

## 参考資料 1 非常用取水設備に要求される貯水機能の要否について

### 1. 概要

本資料は、非常用取水設備の要求機能のうち貯水機能の要否について整理するものである。

### 2. 基準津波による水位下降時の取水性について

#### (1) 評価方法

非常用取水設備の貯水機能は、基準津波による水位下降側の入力津波高さが非常用取水設備通水ルート下面の最高標高及び非常用海水ポンプの取水可能水位のいずれかを下回った場合に要求される機能である。そのため、基準津波による水位下降側の入力津波高さとこれらの標高を比較し、非常用取水設備の要求機能のうち貯水機能の要否を確認する。

#### (2) 評価内容

非常用取水設備の通水ルート下面の最高標高は、取水管下端の EL-7.30m となる。（図 2-1 及び図 2-2 参照）

管路解析により得られた基準津波による取水槽内の水位下降側の入力津波高さは、EL-8.31m（循環水ポンプ運転時）となる。これに対して、原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの取水可能水位は各々 EL-8.32m、EL-8.85m となるため、大津波警報が発令された場合は、気象庁により発表される第一波の到達予想時刻の 5 分前までに運転員による手動操作で循環水ポンプを停止する。以上の結果、取水槽の水位下降側の入力津波高さは EL-6.1m となる。なお、大津波警報が発令された場合に循環水ポンプを停止する手順を整備し、保安規定に定めて管理する。一方、海域活断層から想定される地震による取水槽内の水位下降側の入力津波高さは、敷地までの到達時間が短く循環水ポンプの運転条件を考慮し、EL-6.5m（循環水ポンプ運転時）である。

以上より、基準津波による水位下降側の入力津波高さ（EL-6.5m）が非常用取水設備通水ルート下面の最高標高（EL-7.30m）及び非常用海水ポンプの取水可能水位（EL-8.32m）を上回ることから、基準津波による水位低下に対して非常用海水ポンプは機能保持できる。

(3) 評価結果

以上のことから、基準津波による水位下降時においても海水が連続して供給され、非常用海水ポンプの取水が可能のため、非常用取水設備に貯水機能は要求されない。

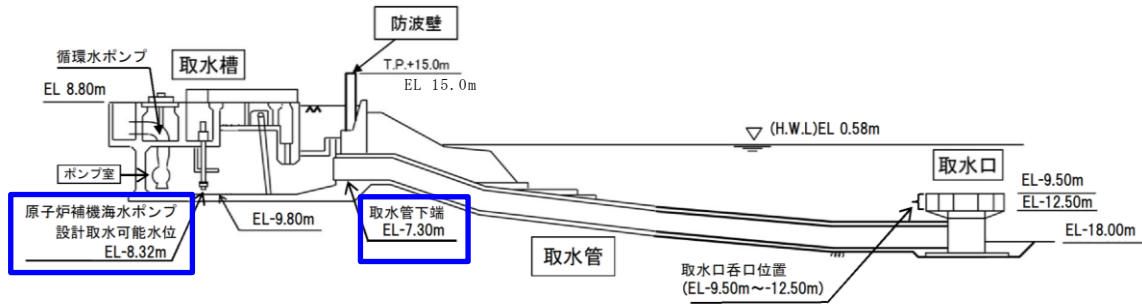


図 2-1 縦断面図 (取水口～取水槽)

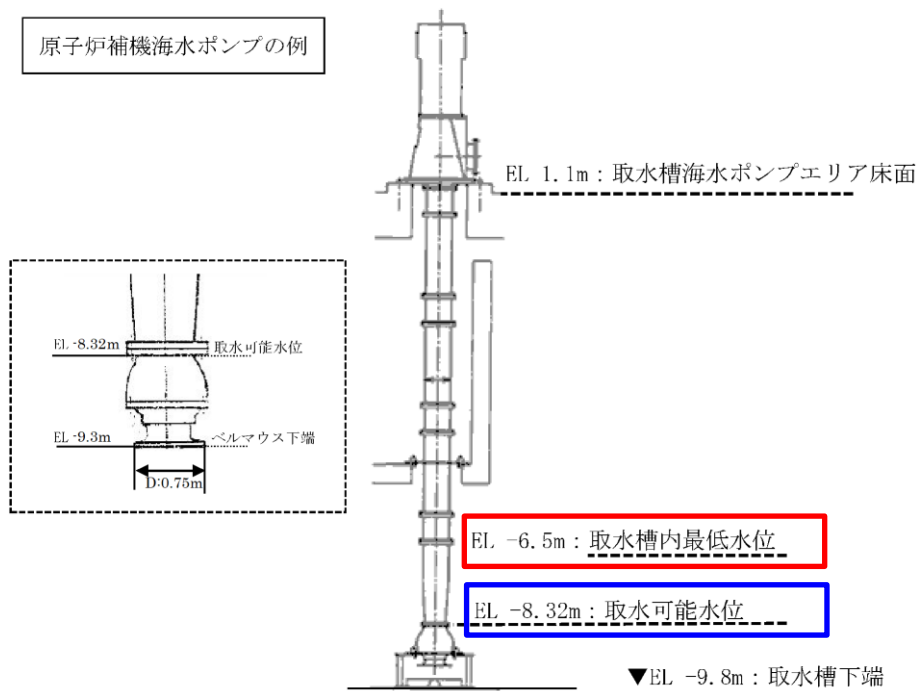


図 2-2 原子炉補機海水ポンプの取水可能水位

## 参考資料2 箱型構造物の評価について

### 1. 概要

箱型構造物の評価において、妻壁の面内せん断の影響を合理的に考慮したい場合等には3次元解析が有効である。一方で、2次元解析はより実務的な手法であり、豊富な適用実績を有する。本資料では、箱型構造物のうち2次元有限要素法解析により耐震評価を実施する構造物の評価手法について記載する。

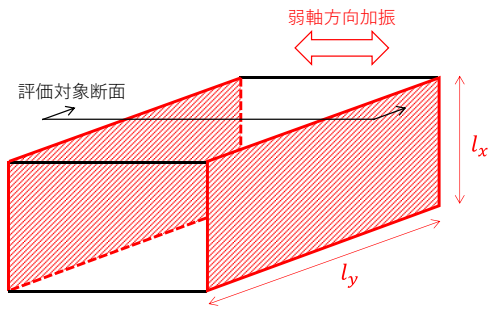
### 2. 弱軸方向断面及び強軸方向断面の評価手法の考え方

箱型構造物については、本文の「4.2(1) 箱型構造物及び線状構造物」に記載のとおり、弱軸方向断面による耐震評価に加え、弱軸方向断面で評価できない部材（強軸方向の側壁等）についても、強軸方向断面を用いて同様の評価を実施することとしている。これらの断面を2次元有限要素法解析により評価するにあたり、保守的に妻壁を耐震要素として見込まない、すなわち妻壁の剛性を平面要素として考慮しないものとする。

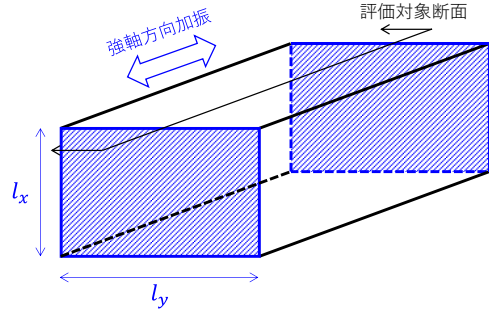
ただし、強軸方向断面は弱軸方向断面と比較して妻壁同士の距離が近く、妻壁が耐震要素として寄与している割合が大きいため、妻壁を見込まないことは過度に保守的な条件となる。上記を踏まえ、強軸方向断面の部材については、「保守的に妻壁を耐震要素として見込まない2次元有限要素法解析」又は「妻壁による拘束効果を固定境界として考慮した4辺固定版」により耐震安全性を確認する。箱形構造物の評価手法の概念図を図2-1に示す。

— : はり  
 斜線 : 荷重を受ける側壁

— : はり  
 斜線 : 荷重を受ける側壁



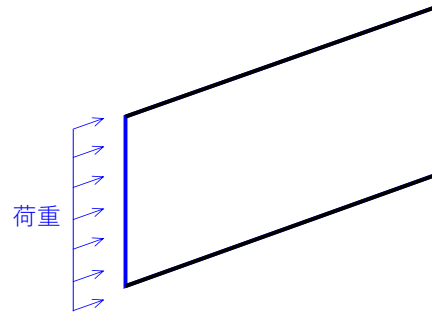
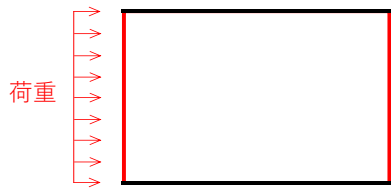
弱軸方向断面



強軸方向断面

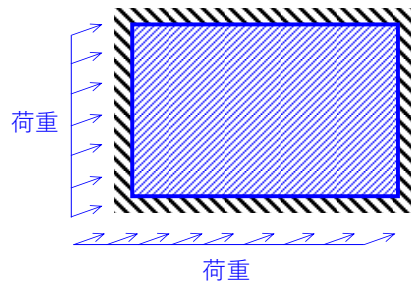
2次元有限要素法解析によるはり要素の評価  
 (保守的に妻壁の剛性を考慮しない)

2次元有限要素法解析によるはり要素の評価  
 (保守的に妻壁の剛性を考慮しない)



又は

2次元有限要素法解析による応答値を用いた4辺固定版による評価



弱軸方向断面の側壁評価手法

強軸方向断面の側壁評価手法

図 2-1 箱型構造物の評価手法の概念図

### 3. 4 辺固定版の評価手法について

「2. 弱軸方向断面及び強軸方向断面の評価手法の考え方」の整理を踏まえ、強軸方向断面で評価する部材を4 辺固定版により評価する際の条件について整理した。

4 辺固定版は、線形シェル要素によりモデル化する。また、4 辺固定版に入力する荷重については、強軸方向断面の2次元有限要素法解析における応答値（土圧及び慣性力）とする。

許容限界は構造物の要求機能に関わらず、解析モデルが線形モデルであることを踏まえて短期許容応力度とし、コンクリート及び鉄筋の曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊について照査を実施する。

上記以外の具体的な条件については、各構造物の計算書又は補足説明資料において記載する。

### 参考資料3 構造物周辺の無筋コンクリートの定義及び評価方針について

#### 1. 概要

本資料は、構造物周辺の無筋コンクリートの定義及び評価方針について整理するものである。

#### 2. 構造物周辺の無筋コンクリートの定義

構造物周辺の無筋コンクリートの設置位置や目的を踏まえ、MMR、置換コンクリート及び埋戻コンクリートとしてそれぞれ定義する。また、それぞれのコンクリートの設置状況の例を図2-1に示す。

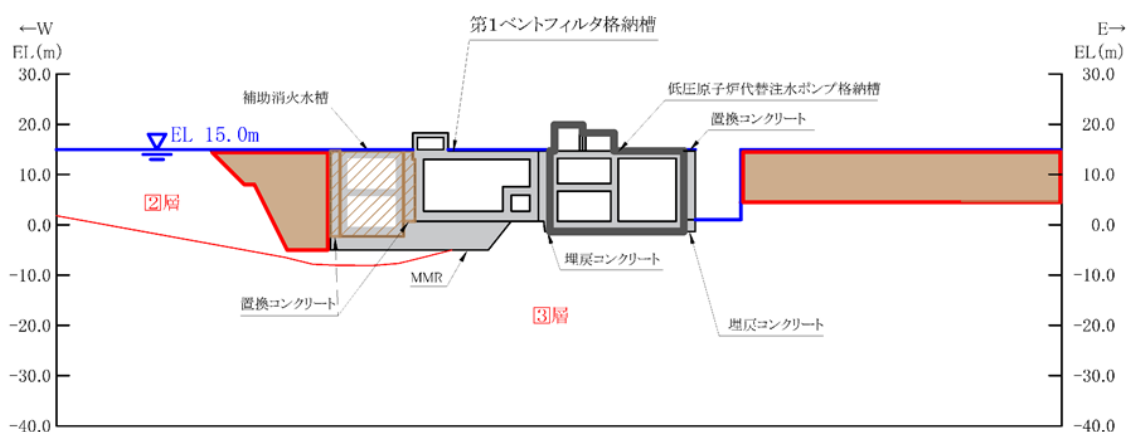


図2-1 MMR、置換コンクリート及び埋戻コンクリートの設置状況の例

#### 2.1 構造物下側

##### (1) MMR

構造物の基礎岩盤の代替として使用する人工岩盤であり、地盤として扱う。

#### 2.2 構造物側方及び上側

##### (1) 置換コンクリート

土圧低減等を目的として構造物周辺に配置する無筋コンクリートであり、健全性を確認する。

##### (2) 埋戻コンクリート

対象構造物と岩盤又は隣接構造物の間を埋め戻す目的として配置する無筋コンクリートであり、地盤として扱う。

### 3. 評価方針

MMR，置換コンクリート及び埋戻コンクリートについて，それぞれの評価方針を示す。

#### (1) MMR

MMRは地震時に評価対象構造物から受ける接地圧を基礎岩盤に伝達する役割が求められるため，MMRに作用する最大接地圧がコンクリートの支圧強度を下回ることを確認する。支圧強度は図3-1に示すとおり「コンクリート標準示方書2002」に基づき，以下の式により算定する。なお，係数 $\eta$ については保守的に1とする。

支圧強度  $f'_{ak} = \eta \cdot f'_{ck}$        $f'_{ck}$  : コンクリートの設計基準強度

ただし，  $\eta = \sqrt{A/A_a} \leq 2$       ( $\eta$  は保守的に1とする)

ここに，  $A$     : コンクリート面の支圧分布面積

$A_a$     : 支圧を受ける面積

図3-1 支圧強度の算定式（「コンクリート標準示方書2002」に加筆）

また，MMRについては上記に加えて健全性評価を実施することとし，せん断強度及び引張強度に対する局所安全係数が1.0以上となることを確認する。

せん断強度及び引張強度の設定方法を表3-1に示す。

表3-1 せん断強度及び引張強度の設定方法

	算定式	準拠図書
せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$1/5f'_{ck}$	コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編] (土木学会, 2013年)
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$0.23f'_{ck}{}^{2/3}$	コンクリート標準示方書2002

#### (2) 置換コンクリート

置換コンクリートは地震時に評価対象構造物が周辺地盤から受ける土圧の低減に寄与していることから，せん断強度及び引張強度に対する局所安全係数が1.0以上となることを確認する。せん断強度及び引張強度の設定方法は，MMRと同様に表3-1に示すとおりとする。なお，解析モデルにおいて保守的にその効果に期待しない場合は，埋戻土としてモデル化する。

(3) 埋戻コンクリート

対象構造物と線形材料である岩盤又は隣接構造物の間を埋め戻しているコンクリートであり、万が一局部的な破壊が生じたとしても構造物の耐震評価に与える影響は軽微と考えられるため、評価は不要と判断した。



## 参考資料4 放水槽を埋戻土としてモデル化することの妥当性について

### 1. 概要

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のA-A及びB-B断面において、北側に隣接する放水槽（ノンクラス）は、基準地震動 $S_s$ に対する耐震性の確保が困難なため、解析モデル上は当該箇所を保守的に埋戻土としてモデル化する方針としている。

本資料では、低耐震性の構造物を保守的に埋戻土としてモデル化することの妥当性について確認する。

### 2. 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）が受ける影響の整理

低耐震性の放水槽が基準地震動 $S_s$ を受けた際に、上位クラスである屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に影響を及ぼす可能性がある。

放水槽は地中構造物ではあるが、本ケースにおいては両構造物が接しているため、VI-2-1-5「波及的影響に係る基本方針」の考え方を参照し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に及ぼす影響を表2-1のとおり整理する。

表2-1 放水槽が屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に及ぼす影響の整理

波及的影響を考慮した施設の設計の観点	波及的影響の可能性の有無	波及的影響の可能性に対する検討
①設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）と放水槽は直接又はMMRを介して岩盤上に設置されていることから、①の観点による影響は無い。	-
②耐震重要施設と下位のクラスの施設との接続部における相互影響*1	-（対象外）	-
③建屋内における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響	-（対象外）	-
④建屋外における下位のクラスの施設の損傷、転倒及び落下等による耐震重要施設への影響	<p><b>【損傷】</b></p> <p>(i)放水槽の部材が損傷することにより、放水槽周囲の埋戻土が屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）側に流入する可能性があるが、放水槽下端（EL-7.5m）に対し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の下端（EL 1.6m）が十分高いため影響は無い。</p> <p>(ii)屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）と接する放水槽の部材（南側壁）が損傷することにより、部材の重量に応じた慣性力が屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に影響を及ぼす可能性がある。</p> <p><b>【転倒】</b></p> <p>放水槽は地中構造物であることから地震時の転倒による影響は無い。また、仮に浮上りが生じた際も、耐震性を有する置換コンクリートやMMRが屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との接触を阻害することから、影響は無い。</p> <p><b>【落下】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>放水槽の南側壁は北側へ落下するため、影響は無い。</li> <li>放水槽の北側壁は南側へ落下する可能性があるが、高さ約14.8mに対して、北側壁と屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の離隔が約18.6mあることから、放水槽の落下による影響は無い。</li> </ul>	<p>左欄の(ii)における放水槽（南側壁）の損傷について、損傷した部材が与える慣性力よりも、放水槽全体を埋戻土とした際の土圧の影響が大きい*2。</p> <p>そのため、保守的に放水槽全体を埋戻土としてモデル化し、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の構成成立性を確認することで、波及的影響は無い。</p>

注記\*1：上位クラス施設と下位クラス施設との接続部における機器・配管系を対象とした観点

\*2：公式等を用いた概略検討により、明らかに土圧のほうが大きいことを確認

### 3. 解析上の放水槽の扱いについて

「2. 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）が受ける影響の整理」を踏まえ、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の解析においては、放水槽を埋戻土としてモデル化することで、放水槽が基準地震動  $S_s$  を受けた際に及ぼす影響を踏まえた保守的な解析条件となることを確認した。なお、当該埋戻土については構造物を保守的に埋戻土としていることから、液状化しないものとする。モデル化の概念図を図 3-1 に示す。

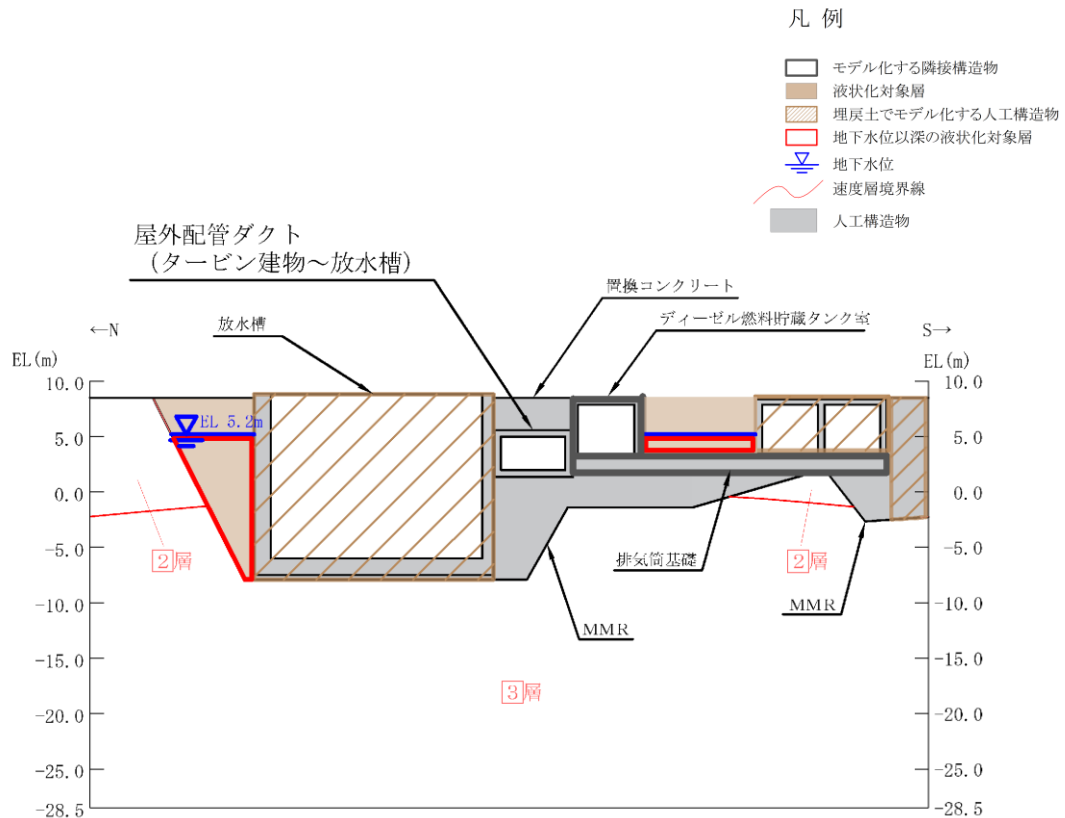


図 3-1 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のモデル化の概念図

## 参考資料5 補助消火水槽の位置付けについて

### 1. 概要

本資料は、補助消火水槽の位置付けについて整理するものである。

### 2. 補助消火水槽の位置付け

補助消火水槽は、その他発電用原子炉の附属施設のうち火災防護設備であり、火災により発電用原子炉施設の安全性が損なわれないよう、火災の影響を限定し、早期の消火を行うため、補助消火ポンプの水源として設置する。

- ・要目表 : 対象（種類：貯蔵槽）
- ・クラス : ノンクラス（クラス外）
- ・耐震要求 : 耐震Cクラス
- ・耐震計算書：作成対象外
- ・強度計算書：作成対象外

### 3. 補助消火水槽の構造の概要

補助消火水槽は、図3-1に示すとおり、常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設である第1ベントフィルタ格納槽と隣接しており、鉄筋コンクリート造の貯蔵槽である。補助消火水槽の平面図を図3-2に、断面図を図3-3に示す。

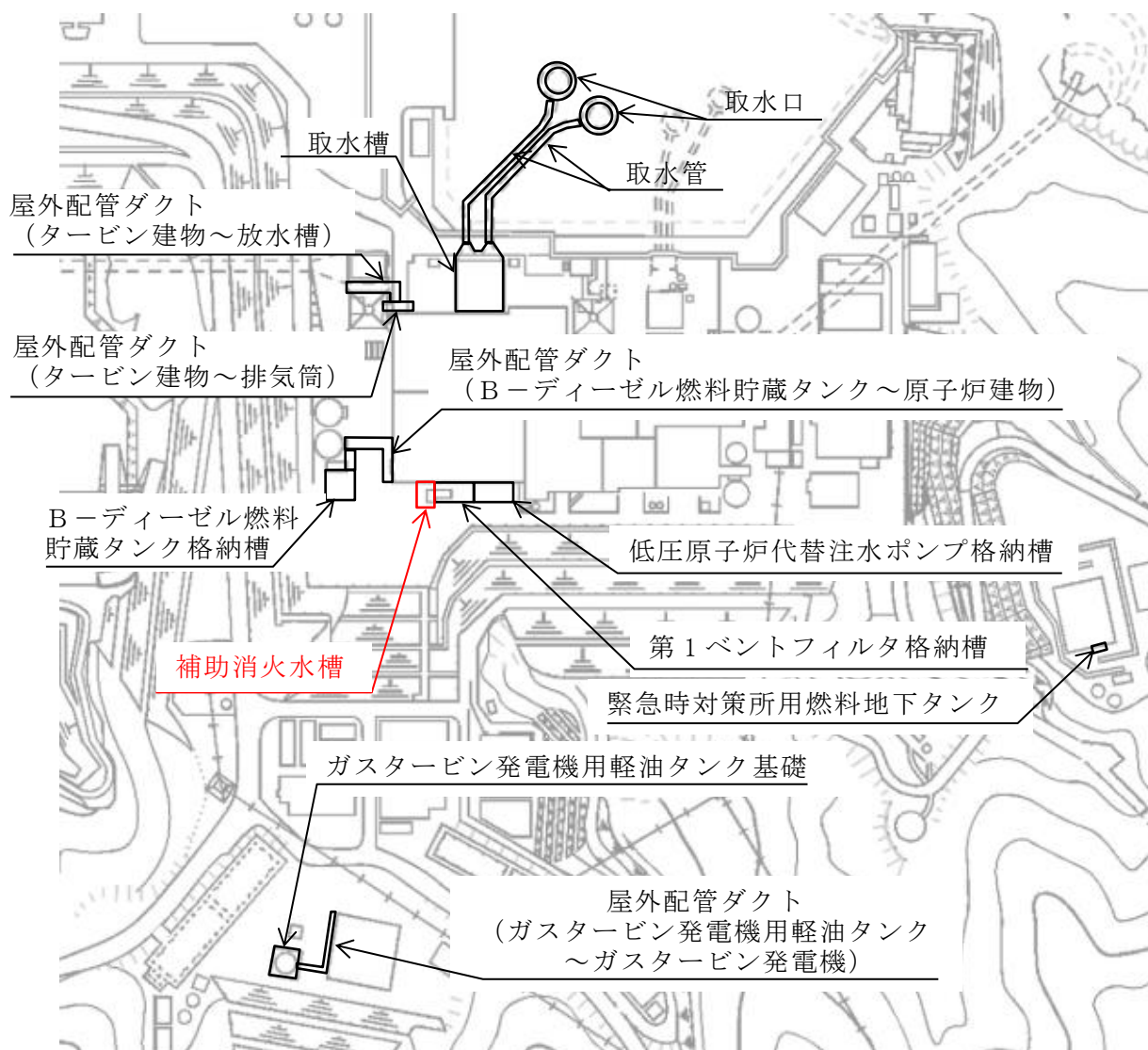


図 3-1(1) 補助消火水槽の周辺状況

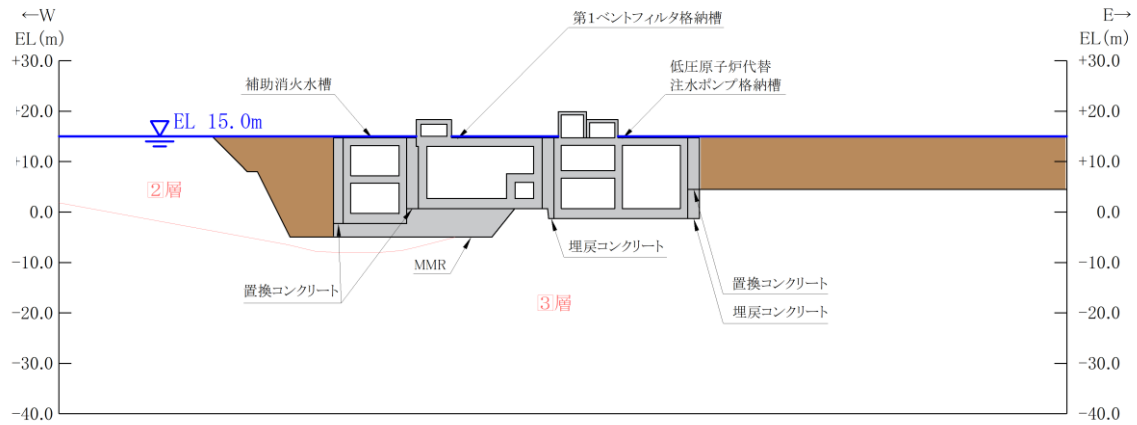


図 3-1(2) 補助消火水槽の周辺状況

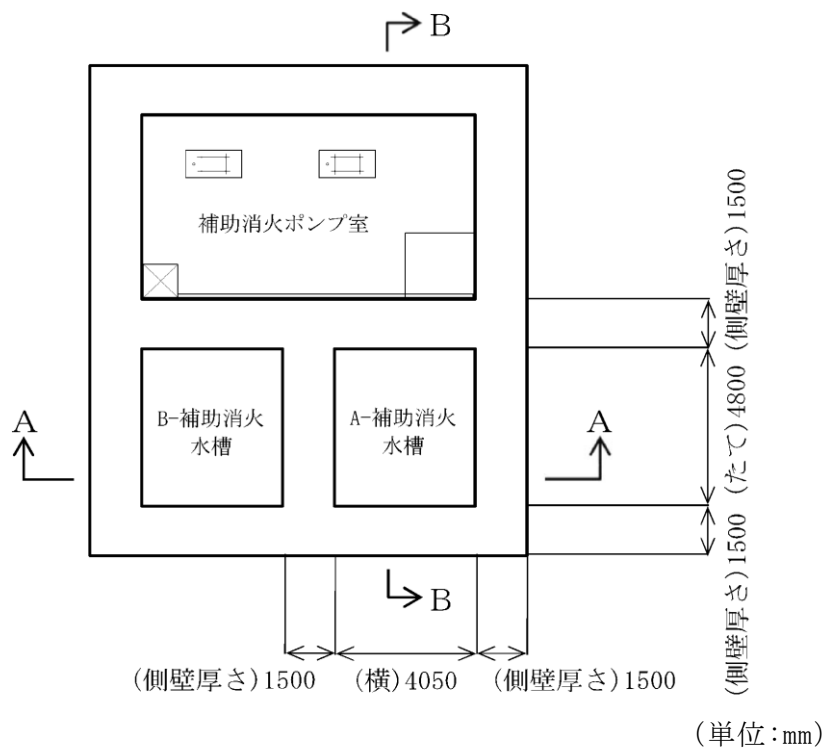


図 3-2 補助消火水槽 平面図

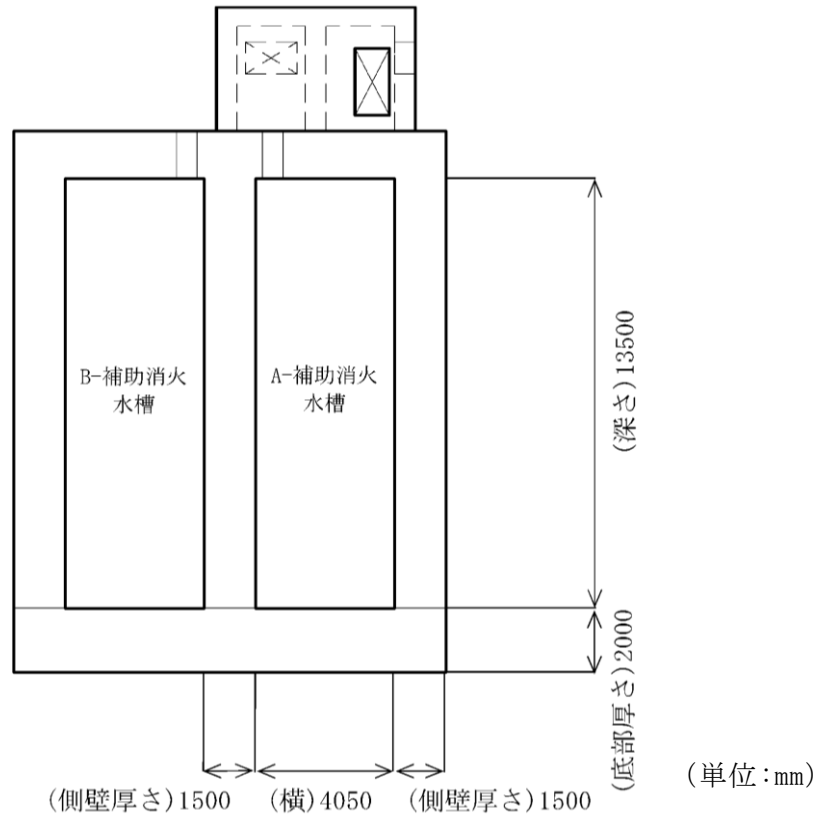


図 3-3(1) 補助消火水槽 断面図 (A-A 断面)

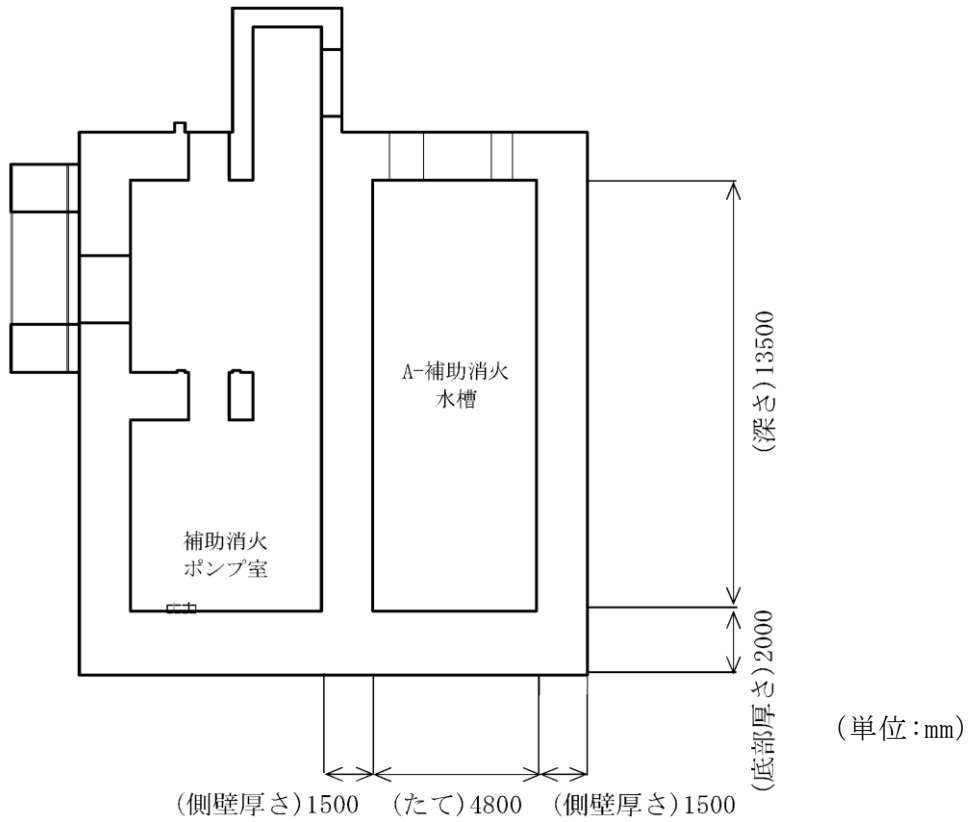


図 3-3(2) 補助消火水槽 断面図 (B-B 断面)

#### 4. 補助消火水槽のモデル化

補助消火水槽は、設工認審査において耐震性を説明しない構造物であるため、保守的に埋戻土としてモデル化する。

## 参考資料 6 安全対策工事着工前の周辺地盤状況を踏まえた断面選定及び解析手法の選定について

### 1. 概要

島根 2 号機周辺では、第 3 系統直流電源設備設置工事等の安全対策工事に伴い掘削を実施しており、第 1 ベントフィルタ格納槽及び低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は掘削箇所に近接している。補足説明資料本文においては、安全対策工事に伴う掘削を考慮した周辺地盤状況に基づき断面選定及び解析手法の選定方針をしているため、本資料では安全対策工事着工前の周辺地盤状況における断面選定及び解析手法の選定方針を示す。



## 2. 第1ベントフィルタ格納槽

断面選定及び解析手法の選定については、補足説明資料本文と同様の考え方で実施する。ただし、C-C断面の部材評価については、安全対策工事着工前後で周辺状況がおおむね同等であることから、安全対策工事に伴う掘削後の評価で代表させる。安全対策工事着工前の周辺地盤状況における断面選定結果を表2-1に示し、安全対策工事に伴う掘削後との相違点を下線部にて識別した。

解析手法については、第1ベントフィルタ格納槽は南側が置換コンクリートを介して埋戻土と接しており、西側においても補助消火水槽の西側に存在する液状化対象層の分布が広範囲であることから、解析手法のフローに基づき、南北方向及び東西方向の断面において「⑤有効応力解析」を選定する。

なお、耐震評価は基準地震動 $S_s$ 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対して実施することとし、基本ケースを対象とする。

第1ベントフィルタ格納槽の平面図を図2-1に、地質断面図を図2-2に示す。

表 2-1 安全対策工事着工前の周辺地盤状況における断面選定結果

位置・エリア	a. 構造的特徴	b. 周辺状況	c. 間接支持する主な設備	d. 要求機能	選定結果	
南北方向	A-A断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄筋コンクリート造の地中（一部地上部を含む）構造物であり、中壁、中床版を有する。</li> <li>・耐震要素として機能する面部材が少なく、弱軸方向となる。</li> <li>・断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MMRを介して、十分な支持性能を有するC<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に支持される。</li> <li>・北側は埋戻コンクリートを介して原子炉建物の接しており、南側は置換コンクリートを介して埋戻土と接している。</li> <li>・設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1ベントフィルタスクラバ容器</li> <li>・圧力解放板</li> <li>・格納容器フィルタベント系配管・弁</li> </ul>	支持機能 遮蔽機能*	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震要素として機能する面部材が少なく、明確な弱軸方向となるため、評価対象断面として選定する。</li> <li>・B-B断面との剛性の違いが地震時荷重及び床応答に影響を及ぼすため、評価対象断面として選定する。</li> </ul>
	E-E断面	同上	同上	同上	同上	・スクラバ容器エリアの平均的な断面であるA-A断面に包括されるため、評価対象断面として選定しない。
	B-B断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、中壁、中床版等を有する。</li> <li>・耐震要素として機能する面部材が少なく、弱軸方向となる。</li> <li>・断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1ベントフィルタスクラバ容器</li> <li>・格納容器フィルタベント系配管・弁</li> </ul>	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震要素として機能する面部材が少なく、明確な弱軸方向となるため、評価対象断面として選定する。</li> <li>・A-A断面との剛性の違いが地震時荷重及び床応答に影響を及ぼすため、評価対象断面として選定する。</li> </ul>
東西方向	C-C断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄筋コンクリート造の地中（一部地上部及び原子炉建物との接続部を含む）構造物であり、中壁、中床版等を有する。</li> <li>・側壁が耐震要素として機能するため、強軸方向となる。</li> <li>・断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MMRを介して、十分な支持性能を有するC<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に支持される。</li> <li>・東側は埋戻コンクリートを介して常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設である低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽と接しており、西側は置換コンクリートを介して補助消火水槽と接している。</li> <li>・設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1ベントフィルタスクラバ容器</li> <li>・圧力解放板</li> <li>・格納容器フィルタベント系配管・弁</li> </ul>	同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機器・配管系への応答加速度の観点より床応答算定断面として選定する。</li> <li>・部材評価については、<u>安全対策工事着工前後で周辺状況がおおむね同等であることから、安全対策工事に伴う掘削後の評価で代表させる。</u></li> </ul>
	F-F断面	同上	同上	同上	同上	・構造上の強軸方向であるが、妻壁間の距離が大きいC-C断面に包括されるため、評価対象として選定しない。
	D-D断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、第1ベントフィルタ格納槽と原子炉建物の接続部である。</li> <li>・他の断面と比較して部材厚に対して内空が小さいが、配筋は同等である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MMRを介して、十分な支持性能を有するC<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に支持される。</li> <li>・周囲全周を埋戻コンクリートで囲まれている。</li> <li>・設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器フィルタベント系配管・弁</li> </ul>	同上	・他の断面と比較して部材厚に対して内空が小さいため、耐震評価上有利と考えられることから、評価対象断面として選定しない。

注記\*：第1ベントフィルタ格納槽の一部は、遮蔽機能を要求される第1ベントフィルタ格納槽遮蔽又は配管遮蔽である。

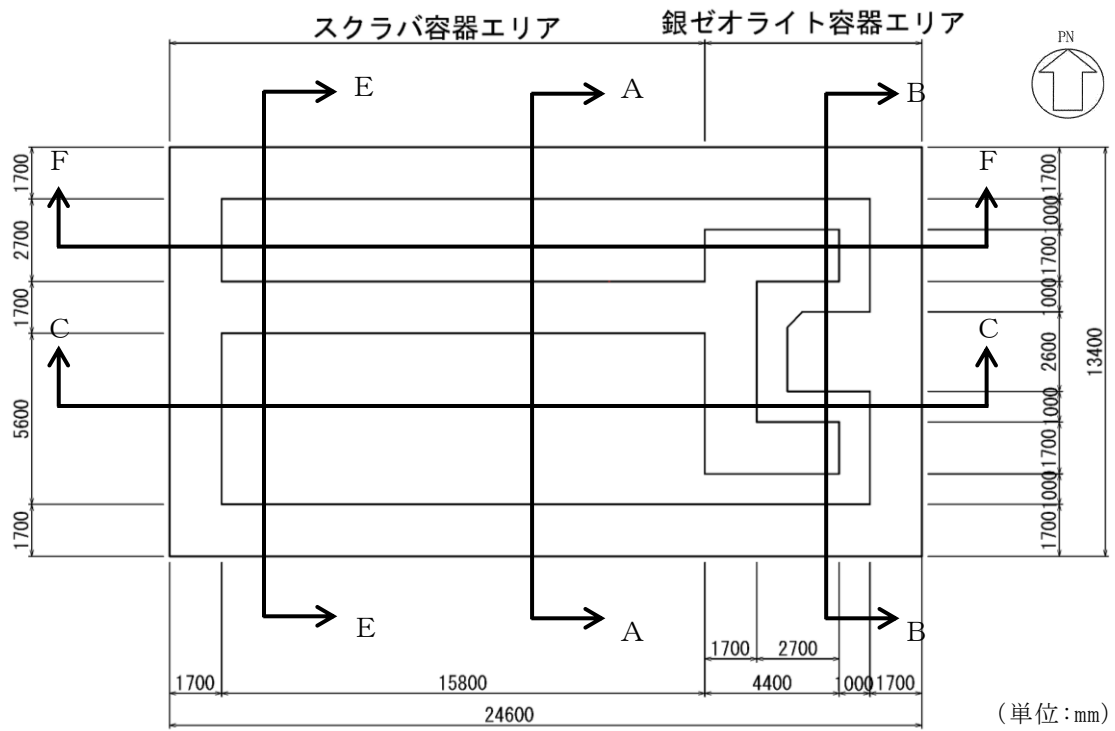


図 2-1(1) 第 1 ベントフィルタ格納槽 平面図 (EL 3.00m)

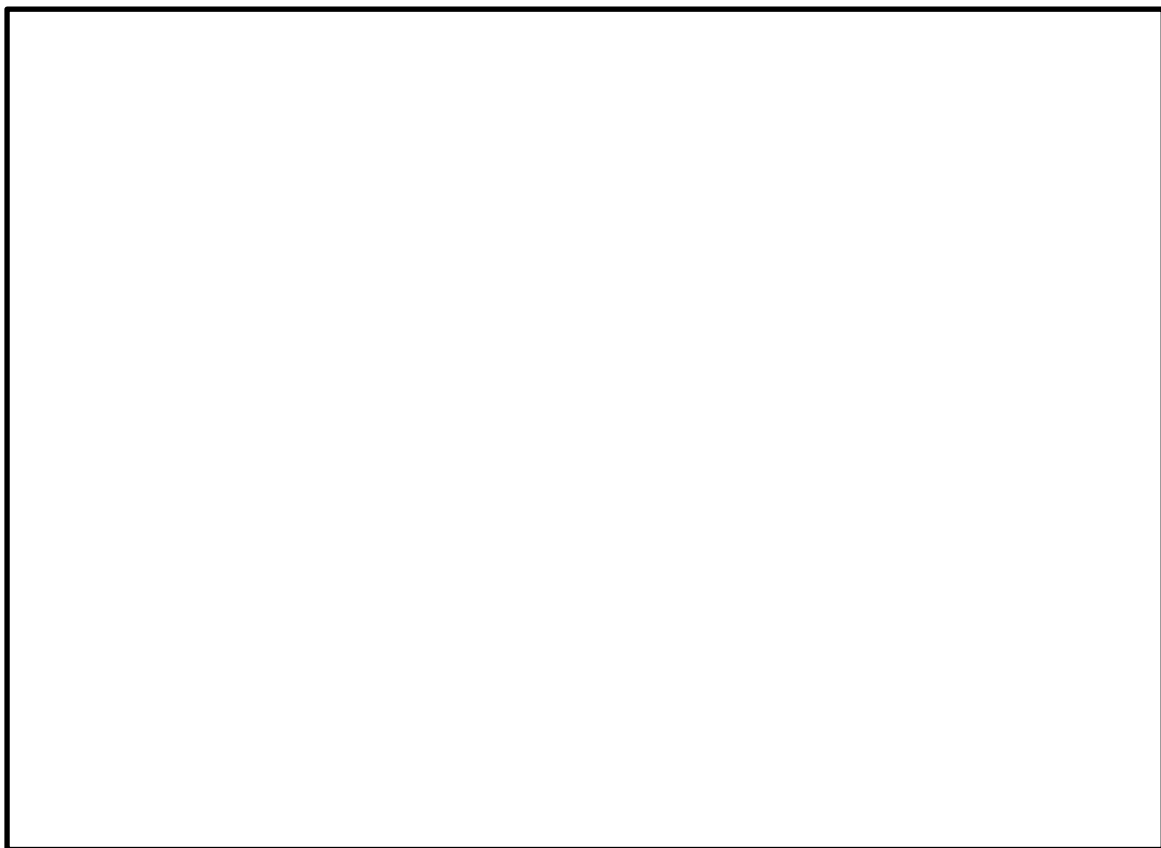


図 2-1(2) 第 1 ベントフィルタ格納槽 平面図 (EL 9.00m)

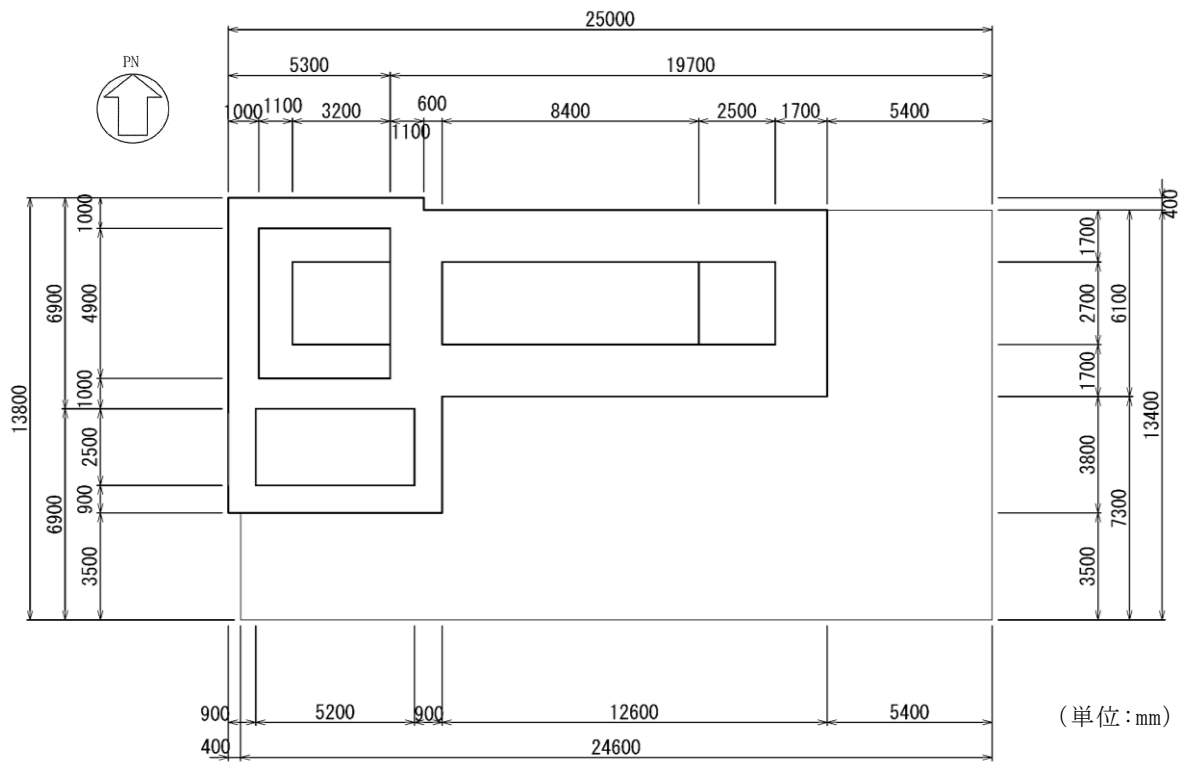
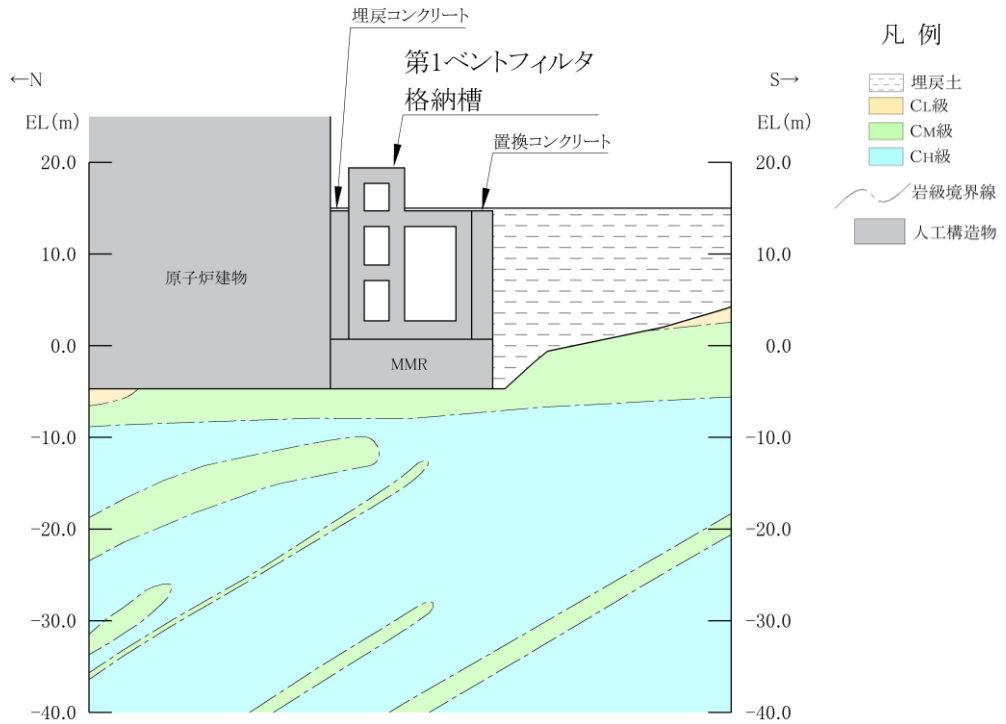
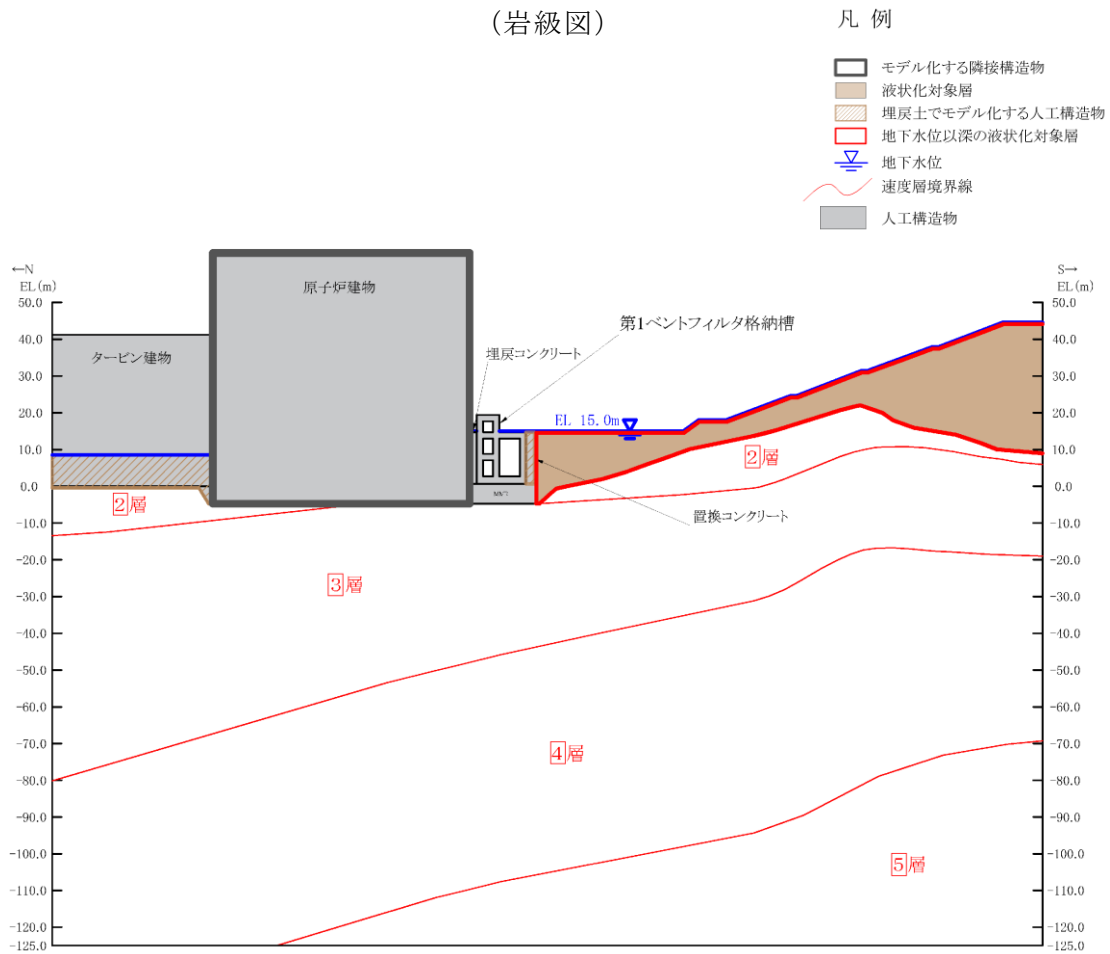


図 2-1(3) 第1 ベントフィルタ格納槽 平面図 (EL 16.00m)

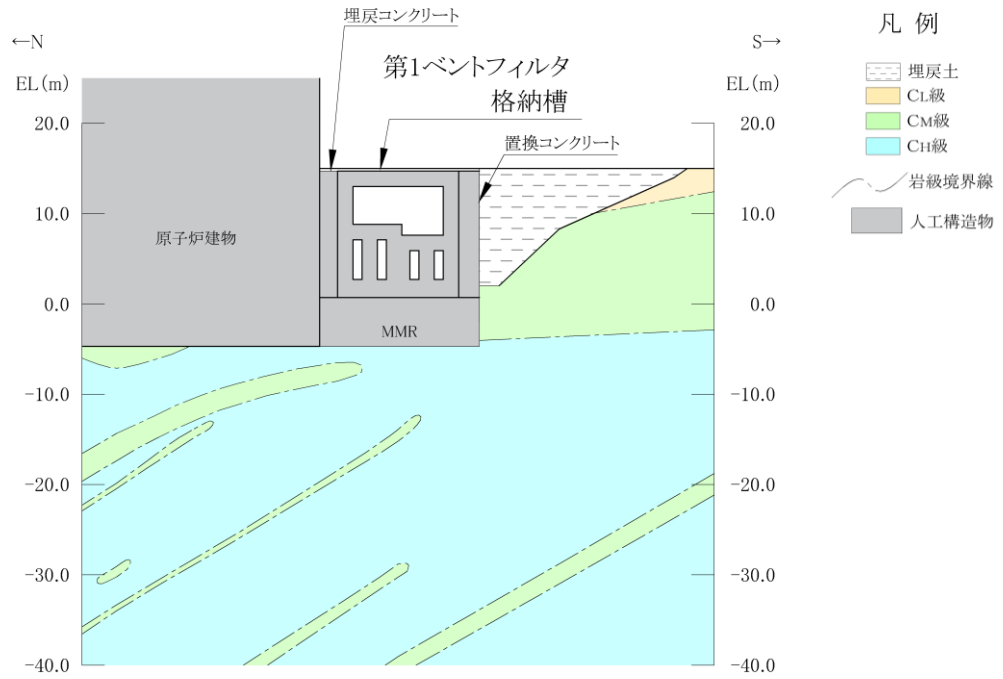


(岩級図)

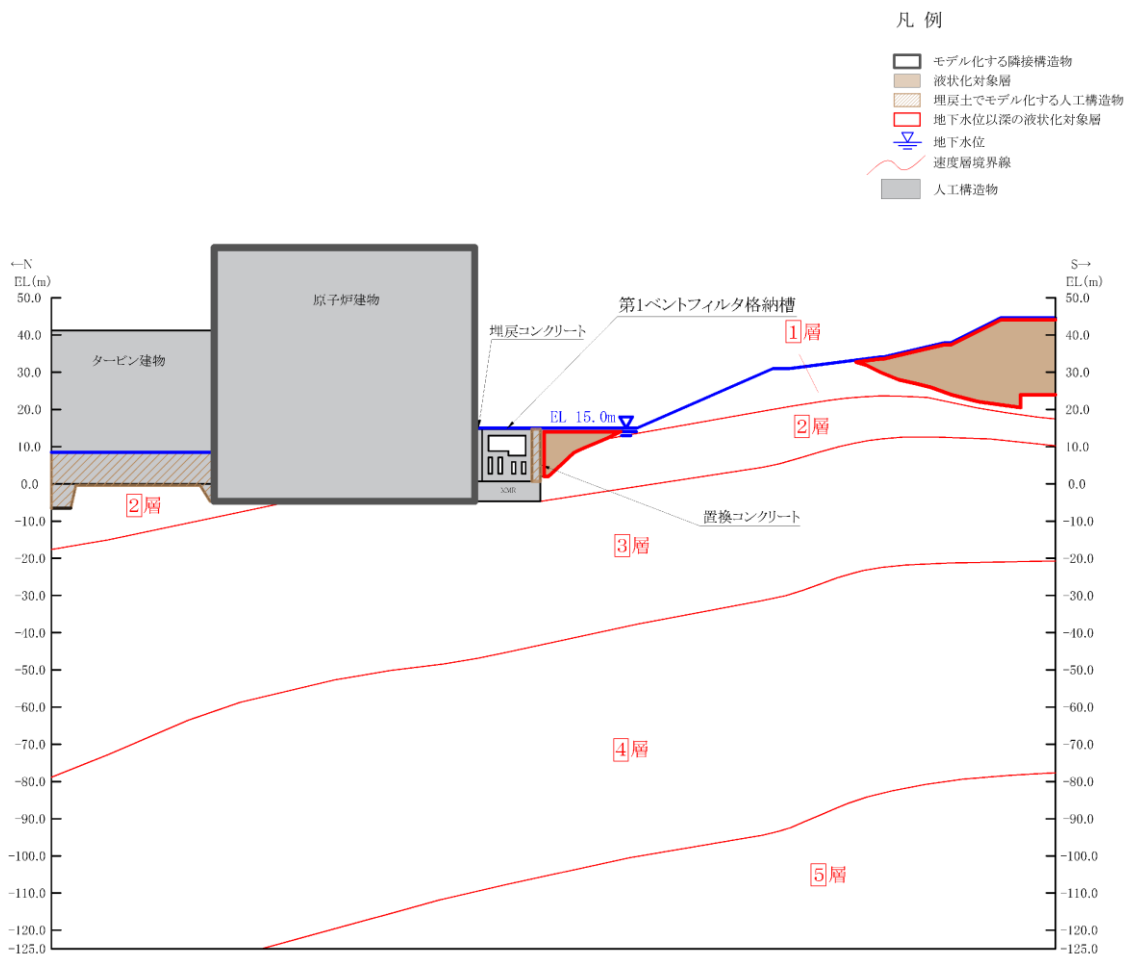


(速度層図)

図 2-2(1) 第1ベントフィルタ格納槽 地質断面図 (A-A断面位置)

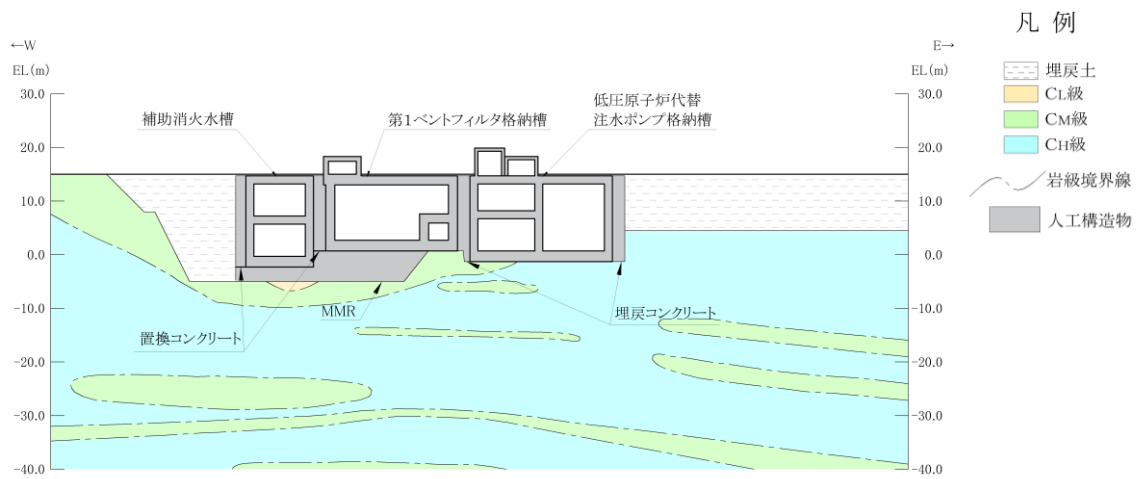


(岩級図)

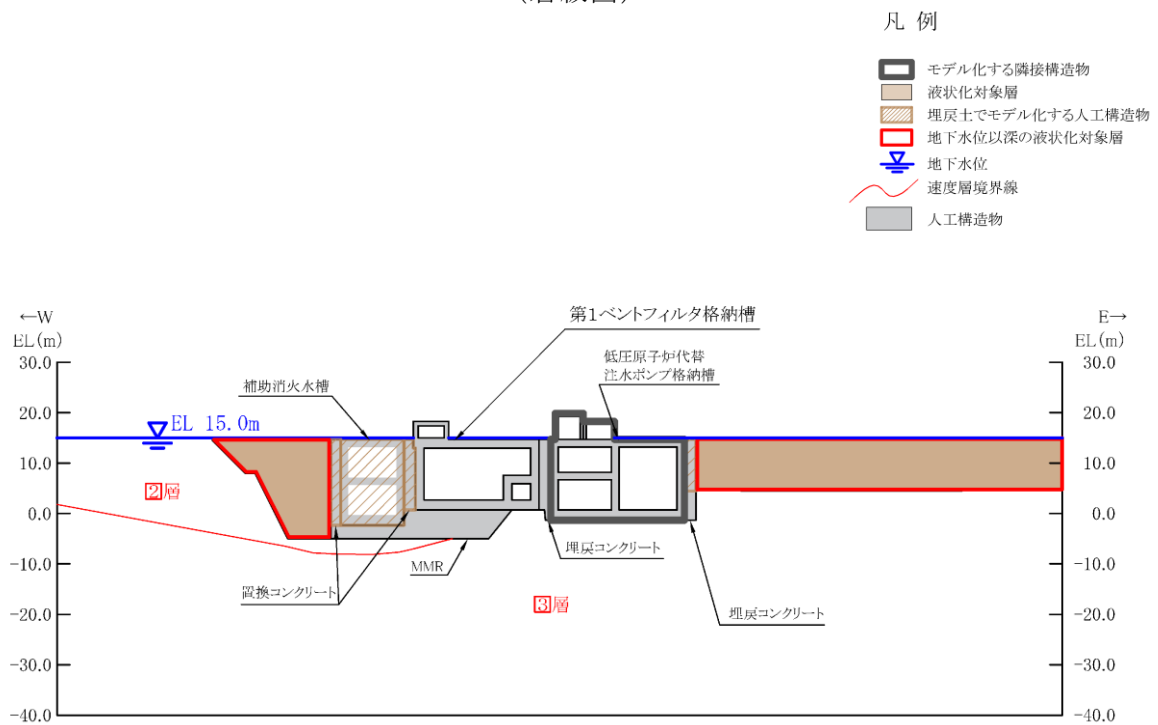


(速度層図)

図 2-2(2) 第 1 ベントフィルタ格納槽 地質断面図 (B-B 断面位置)



(岩級図)



(速度層図)

図 2-2(3) 第1ベントフィルタ格納槽 地質断面図 (C-C断面位置)

### 3. 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽

断面選定及び解析手法の選定については、補足説明資料本文と同様の考え方で実施する。ただし、C-C断面は、機器・配管系に対する強軸方向の床応答算定断面として選定しており、また、耐震評価は安全対策工事に伴う掘削後を評価していることから、本資料においてC-C断面の耐震評価は実施しない。安全対策工事着工前の周辺地盤状況における断面選定結果を表3-1に示し、安全対策工事に伴う掘削後との相違点を下線部にて識別した。解析手法については、南北方向では北側は埋戻コンクリートを介して原子炉建物に接しており、南側は埋戻コンクリートを介して岩盤と接しているため、解析手法の選定フローに基づき「②全応力解析」を選定する。なお、耐震評価は基準地震動 $S_s$ 全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対して実施することとし、基本ケースを対象とする。

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の平面図を図3-1に、地質断面図を図3-2に示す。



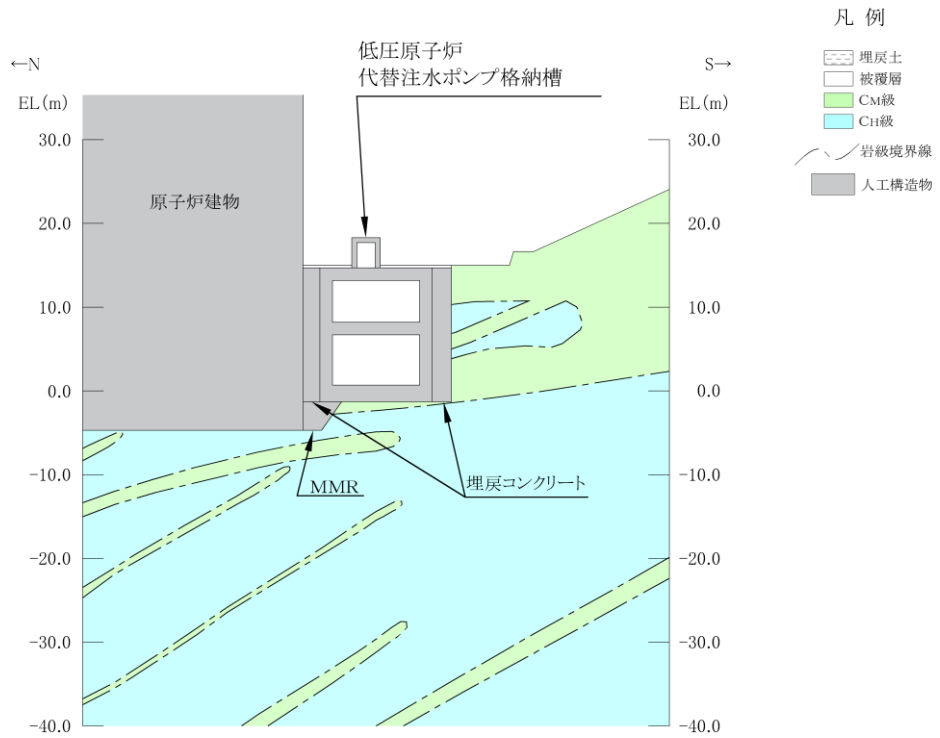
表 3-1 安全対策工事着工前の周辺地盤状況における断面選定結果

位置・エリア		a. 構造的特徴	b. 周辺状況	c. 間接支持する 主な設備	d. 要求 機能	選定結果
南北 方向	A-A断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリート造の地中（一部地上部含む）構造物であり、中床版を有する。</li> <li>耐震要素として機能する面部材が少なく、弱軸方向となる。</li> <li>断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>C<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に直接支持される。</li> <li>埋戻コンクリートを介して北側に周辺構造物（原子炉建物）が、南側は埋戻コンクリートを介して岩盤及び斜面が隣接している。</li> <li>設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低圧原子炉代替注水ポンプ</li> <li>低圧原子炉代替注水系配管・弁他</li> </ul>	支持機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐震要素として機能する面部材が少なく明確な弱軸方向となるため、評価対象断面として選定する。</li> <li>B-B断面との剛性の違いが地震時荷重及び床応答に影響を及ぼすため、評価対象断面として選定する。</li> </ul>
	B-B断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、矩形構造である。</li> <li>耐震要素として機能する面部材が少なく、弱軸方向となる。</li> <li>断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	同上	なし*	貯水機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐震要素として機能する面部材が少なく明確な弱軸方向となるため、評価対象断面として選定する。</li> <li>A-A断面との剛性の違いが地震時荷重及び床応答に影響を及ぼすため、評価対象断面として選定する。</li> </ul>
	E-E断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>A-A断面と同様であるが、地上部の構造のみ異なる。</li> </ul>	A-A断面と同様	A-A断面と同様	支持機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>A-A断面と比較して、地上部で考慮する機器・配管荷重が小さいことから、評価対象断面として選定しない。</li> </ul>
東西 方向	C-C断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリート造の地中（一部地上部を含む）構造物であり、中床版を有する。</li> <li>側壁が耐震要素として機能し、強軸方向となる。</li> <li>断面の奥行き方向において、部材厚や内空断面及び配筋についてはおおむね同一である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>C<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に直接支持される。</li> <li>埋戻コンクリートを介して西側は第1ペントフィルタ格納槽と接しており、東側は置換コンクリートを介して埋戻土と接している。</li> <li>設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低圧原子炉代替注水ポンプ</li> <li>低圧原子炉代替注水系配管・弁他</li> </ul>	支持機能 貯水機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器・配管系への応答加速度の観点より床応答算定断面として選定する。</li> <li>機器・配管系に対する強軸方向の床応答算定断面として選定しており、また、耐震評価は安全対策工事に伴う掘削後を評価していることから、本資料においてC-C断面の耐震評価は実施しない。</li> </ul>
	D-D断面	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽と原子炉建物の接続部である。</li> <li>他の断面と比較して部材厚に対して内空が小さいが、配筋は同等である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MMRを介して、十分な支持性能を有するC<sub>30</sub>級又はC<sub>40</sub>級岩盤に支持される。</li> <li>周囲全周を埋戻コンクリートで囲まれている。</li> <li>設計地下水位は地表面で設定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低圧原子炉代替注水系配管・弁他</li> </ul>	支持機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>他の断面と比較して部材厚に対して内空が小さいため、耐震評価上有利と考えられることから、評価対象断面として選定しない。</li> </ul>

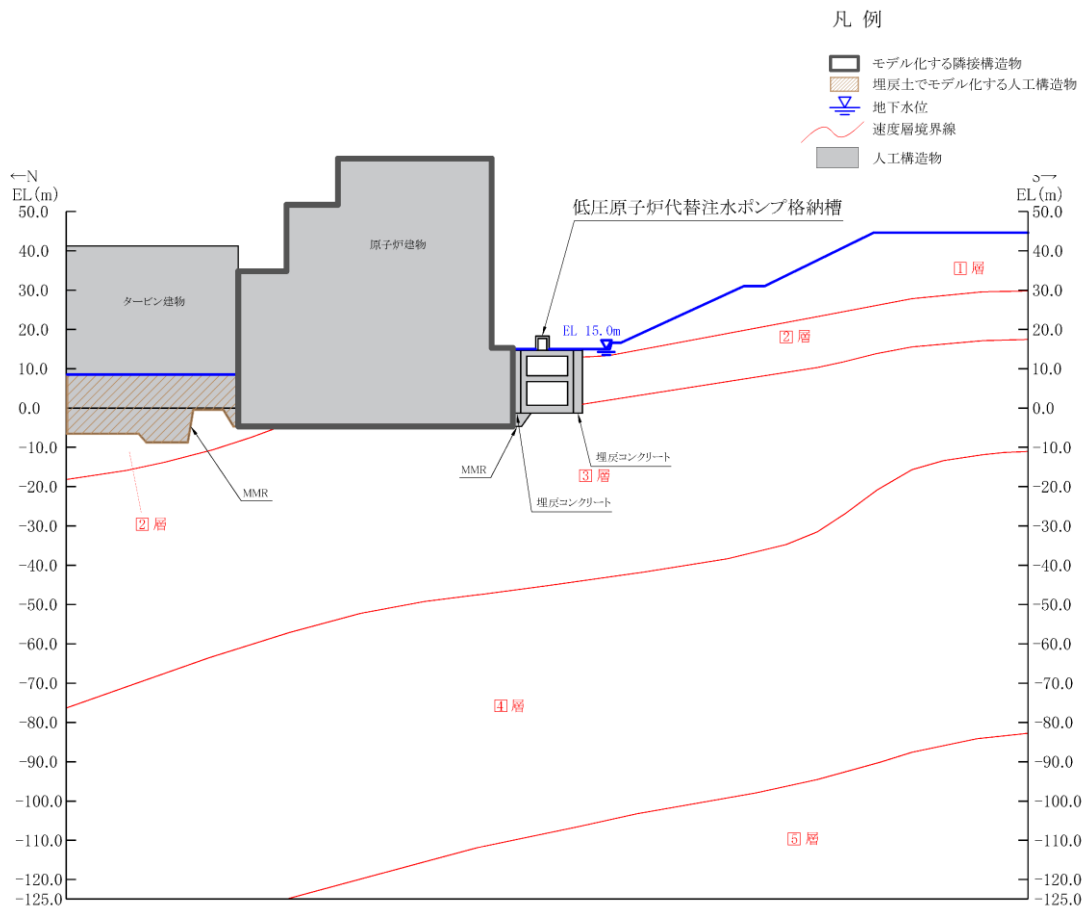
注記＊：B-B断面は鉄筋コンクリート構造物そのものが重大事故等対処設備である低圧原子炉代替注水槽である。



図 3-1 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 平面図

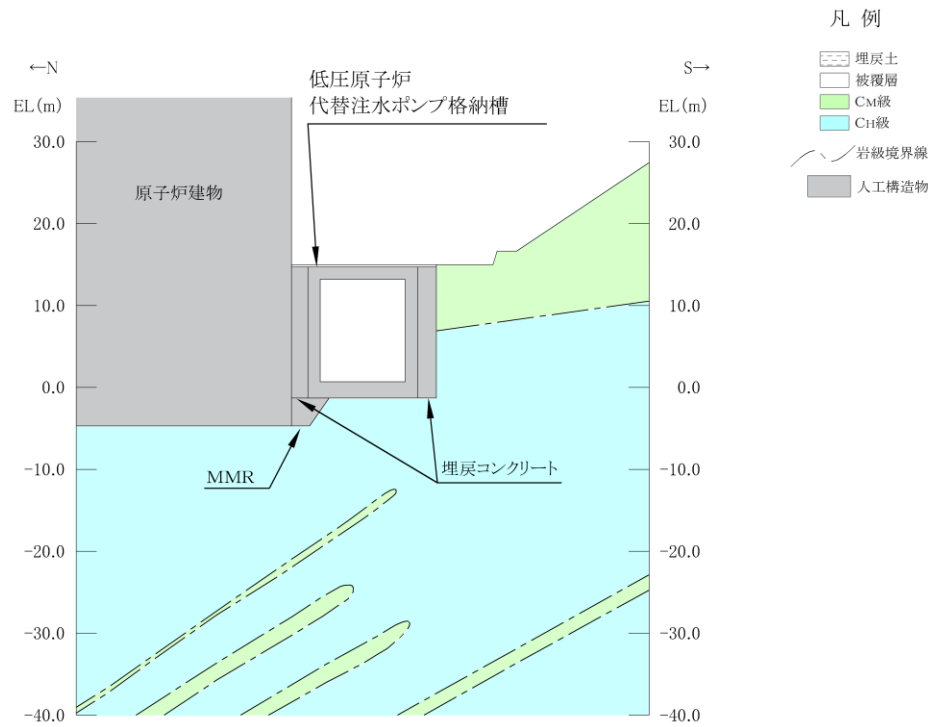


(岩級図)

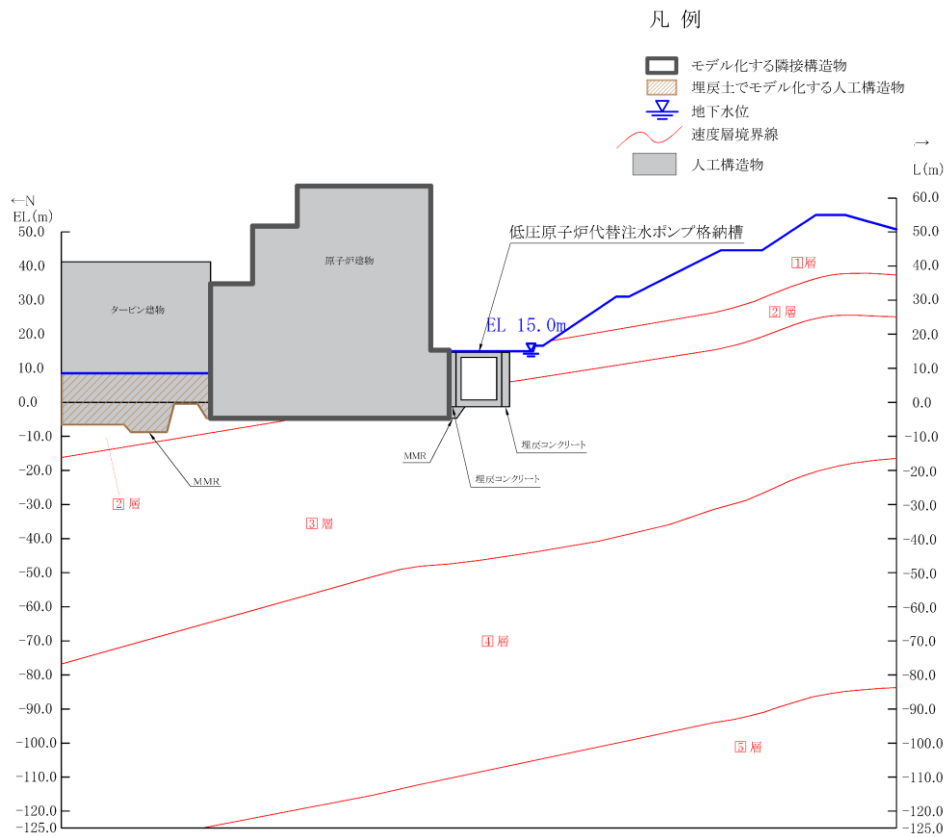


(速度層図)

図 3-2(1) 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 地質断面図 (A-A 断面位置)

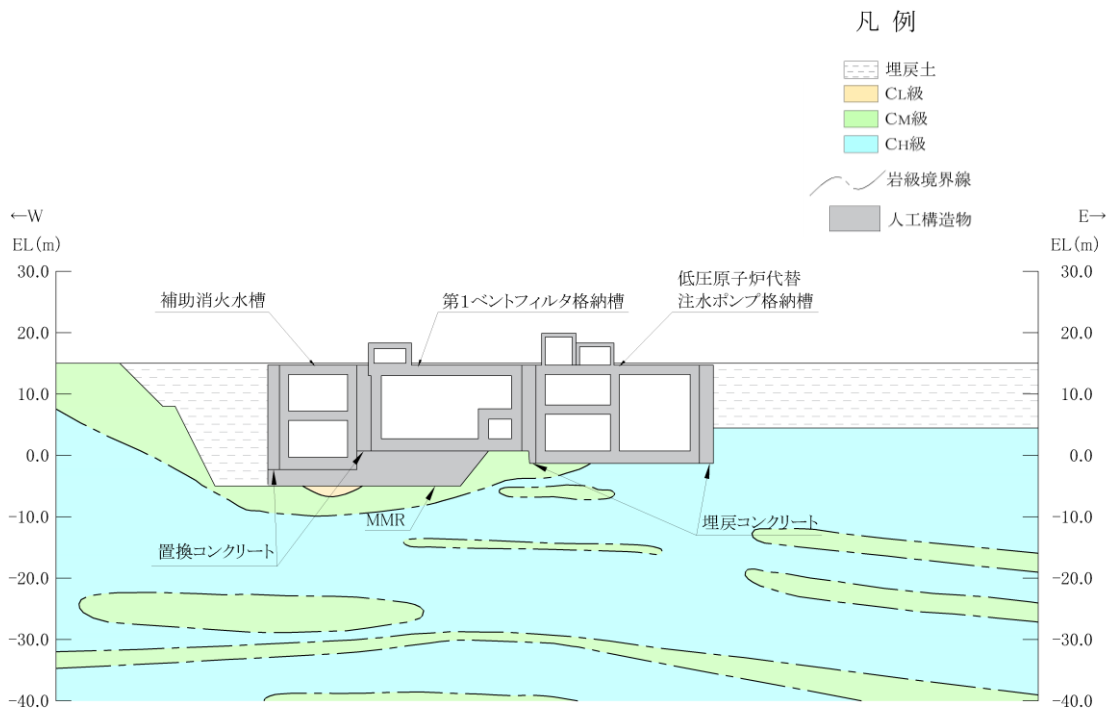


(岩級図)

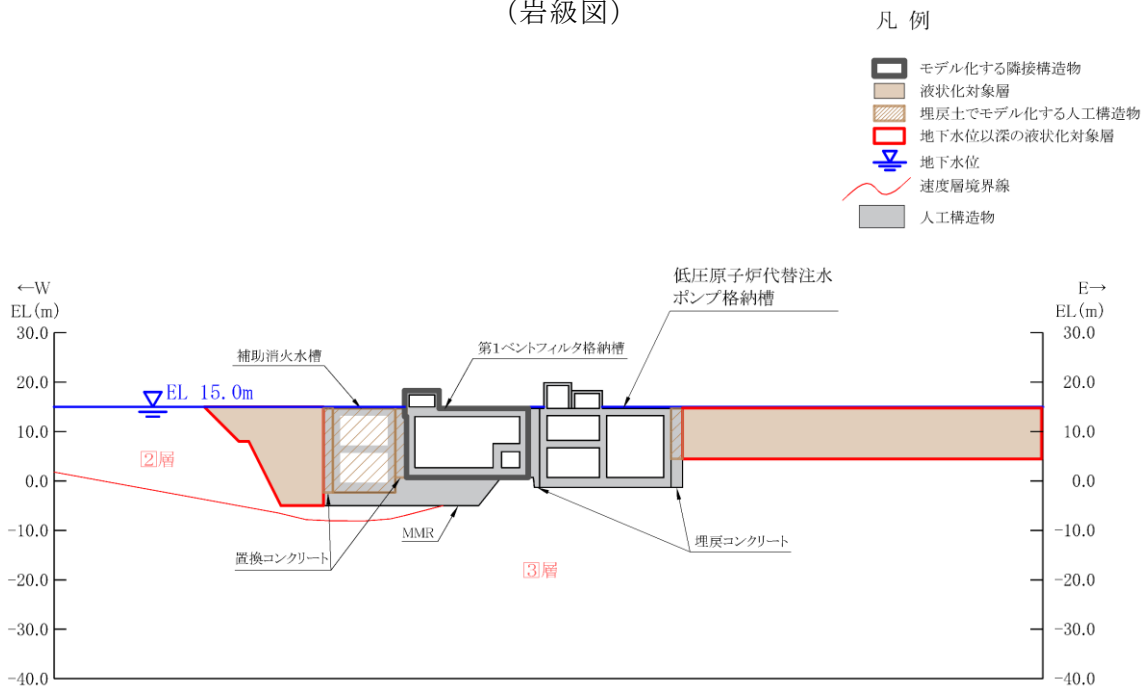


(速度層図)

図 3-2(2) 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 地質断面図 (B-B断面位置)



(岩級図)



(速度層図)

図 3-3(3) 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 地質断面図 (C-C 断面位置)

## 参考資料7 追加解析ケースの選定方法の詳細について

### 1. 概要

本文の「10. 屋外重要土木構造物の耐震評価における追加解析ケースの選定」に示すとおり、曲げ軸力、せん断力及び支持力の照査において、照査値が大きくなる可能性がある場合は、追加解析を実施する。

本資料では、追加解析ケースの選定方法の方針を示す。

### 2. 選定方法

耐震評価においては、すべての基準地震動  $S_s$  に対して実施する基本ケースにおいて、曲げ軸力、せん断力及び支持力の照査において照査値が 0.5 を超えるすべての照査項目に対して、最も厳しい（許容限界に対する余裕が最も小さい）地震動を用い、追加ケースを実施する。

追加解析の結果を踏まえ、照査値に以下の傾向が認められる場合は、更なるケースの追加を検討する。なお、具体的な追加解析ケースについては、個別構造物の耐震評価結果を踏まえて確定する。

- ・基本ケースと追加ケースの照査値の差分が大きい場合
- ・基本ケース又は追加ケースの照査値が厳しい場合

## 参考資料 8 等価剛性モデルにおける鉛直方向床応答への影響について

### 1. 概要

屋外重要土木構造物等のうち、3次元構造解析モデルを用いた耐震評価を実施する取水槽及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）については、2次元地震応答解析における構造物モデルを等価剛性モデルとしている。等価剛性モデルでは、補正係数 $\alpha$ 、 $\beta$ を設定しており、補正係数 $\alpha$ は構造物の奥行長さに対する各部材の奥行長さから比率を算出し、補正係数 $\beta$ は3次元モデルの水平変位と等しくなるように算出し、等価剛性モデルの弾性係数（剛性）を設定している。

補正係数 $\beta$ は2次元等価剛性モデルの平面応力要素及びはり要素に対して設定しており、平面応力要素においては、水平・鉛直方向で等方のため、方向に応じて剛性を変更することはできない。そのため、本書では、水平方向の剛性を等価としない場合の鉛直方向の床応答を算定し、剛性調整による鉛直方向床応答への影響について確認する。

### 2. 検討方法

検討方法として、2次元地震応答解析により、水平方向の剛性を合わせた場合（ $\beta$ 調整）と、合わせない場合（ $\beta = 1$ ）の床応答について加速度応答スペクトル比較を行う。

検討対象構造物は、補正係数 $\beta$ の調整量の差が最大の構造物である取水槽（除じん機エリア）を選定する。取水槽（除じん機エリア）における最小の調整量は $\beta = 0.063$ であり、最大の調整量は $\beta = 2.969$ となる。合わせない場合（ $\beta = 1$ ）と比較して、補正係数 $\beta$ は約1/16倍～約3倍であり、調整量に大きな差があるため、取水槽（除じん機エリア）を用いて影響検討を実施する。

取水槽（除じん機エリア）について、水平方向の剛性を合わせる要素を図2-1に、調整結果を表2-1に示す。

検討では、基準地震動S<sub>s</sub>全12波の基本ケースを包絡した加速度応答スペクトルを用い、加速度応答スペクトルの抽出位置は、床応答算出箇所のうち応答加速度が最大となる節点を抽出する。取水槽における抽出位置を図2-2に示す。

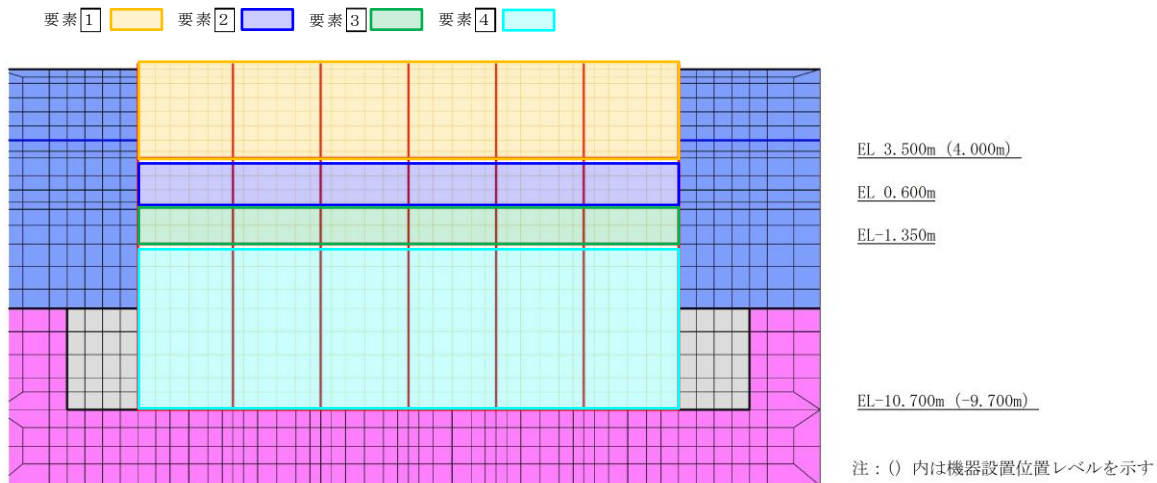


図 2-1 取水槽（除じん機エリア）において水平方向の剛性を合わせる要素

表 2-1 取水槽の調整結果

要素番号	$\alpha$	$\beta$
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</span>	0.229	0.063
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2</span>	0.220	2.969
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</span>	0.145	0.268
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4</span>	0.145	0.134

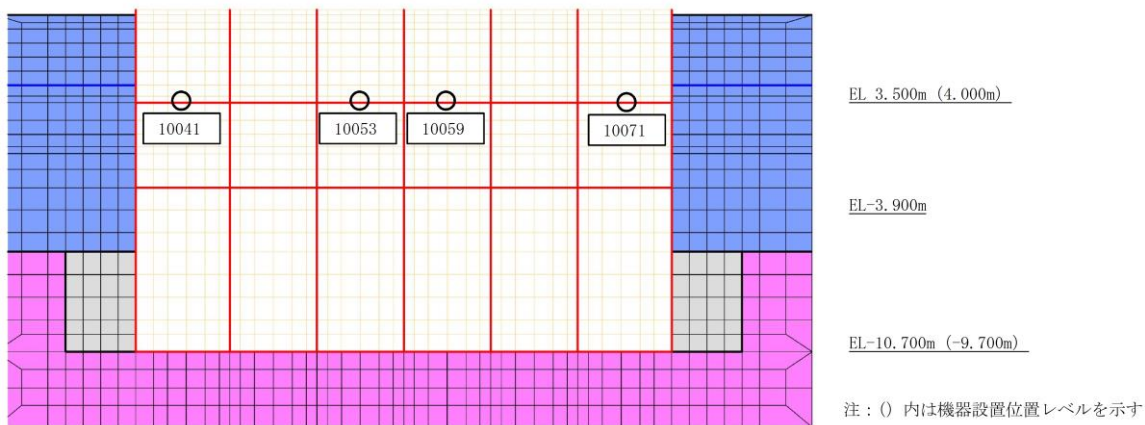


図 2-2 取水槽（除じん機エリア）の抽出位置



### 3. 検討結果

取水槽（除じん機エリア）の加速度応答スペクトルの比較検討結果を図 3-1 に示す。

検討の結果，補正係数  $\beta$  を約 1/16 倍～約 3.0 倍に調整した取水槽は，補正係数  $\beta = 1$ （調整しない）の場合に比べて応答が多少大きくなり，保守的な結果となった。

補正係数  $\beta$  を調整する場合，方向に応じて剛性を変更することはできないことから，鉛直方向の応答の多少影響を及ぼすが，影響は軽微であった。

以上の結果から，補正係数  $\beta$  の調整により，鉛直方向床応答への影響を与える場合があるが，島根原子力発電所 2 号機の屋外重要土木構造物等の設定には問題ないことを確認した。

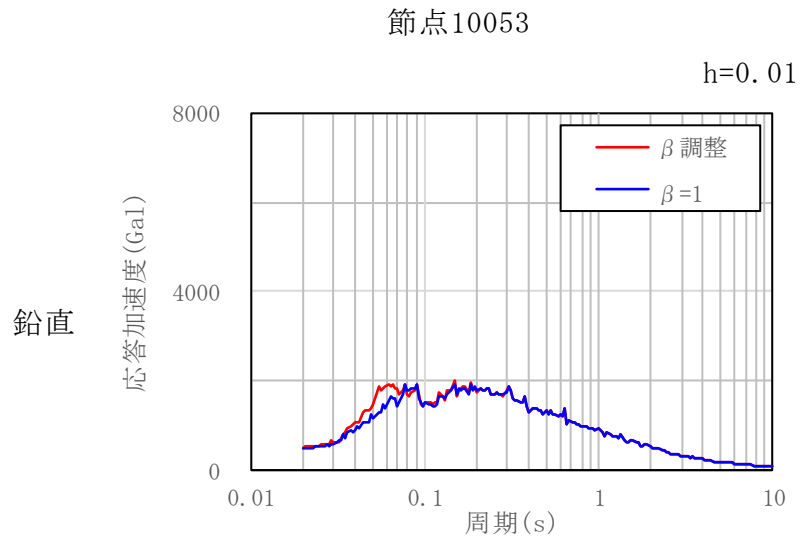
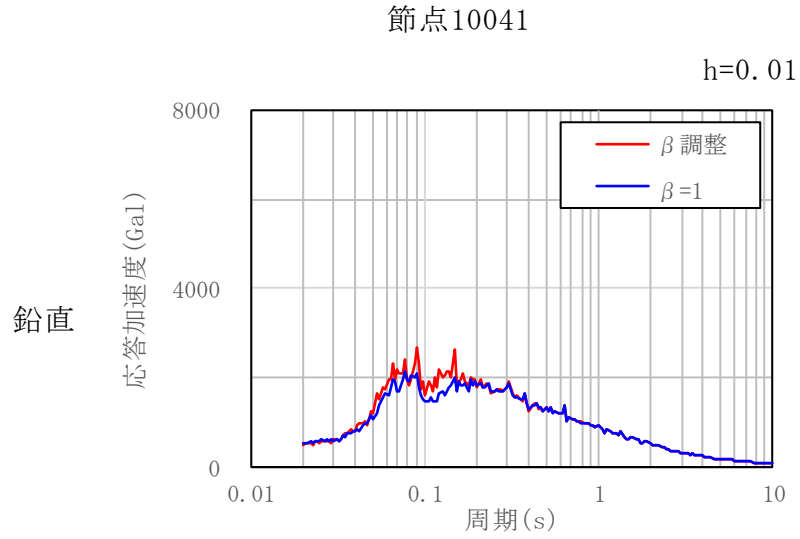


図 3-1(1) 取水槽（除じん機エリア）の加速度応答スペクトル（鉛直方向）

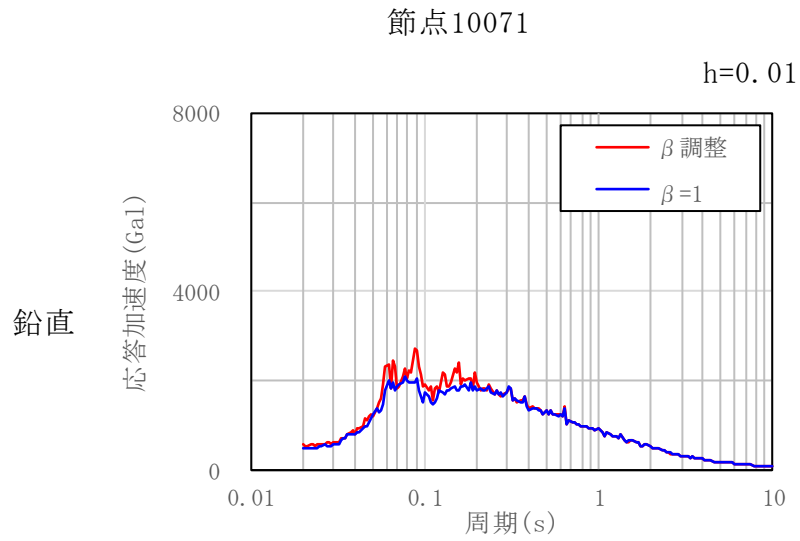
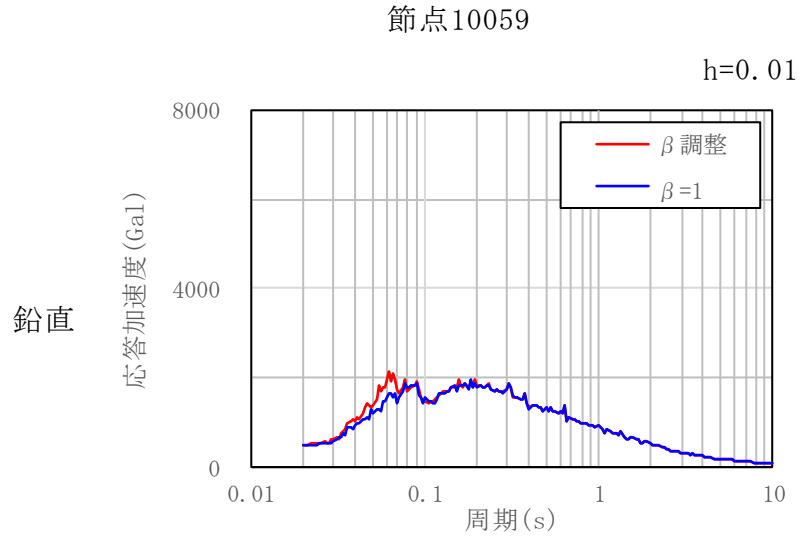


図 3-1(2) 取水槽（除じん機エリア）の加速度応答スペクトル（鉛直方向）

## 参考資料9 解析手法の選定の補足確認結果

### 1. 概要

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価にあたっては、評価対象構造物の設計地下水位を踏まえた液状化対象層の分布や周囲の構造物等の設置状況を踏まえて、表1-1及び図1-1に示す①～⑤の観点で解析手法の選定を行っている。

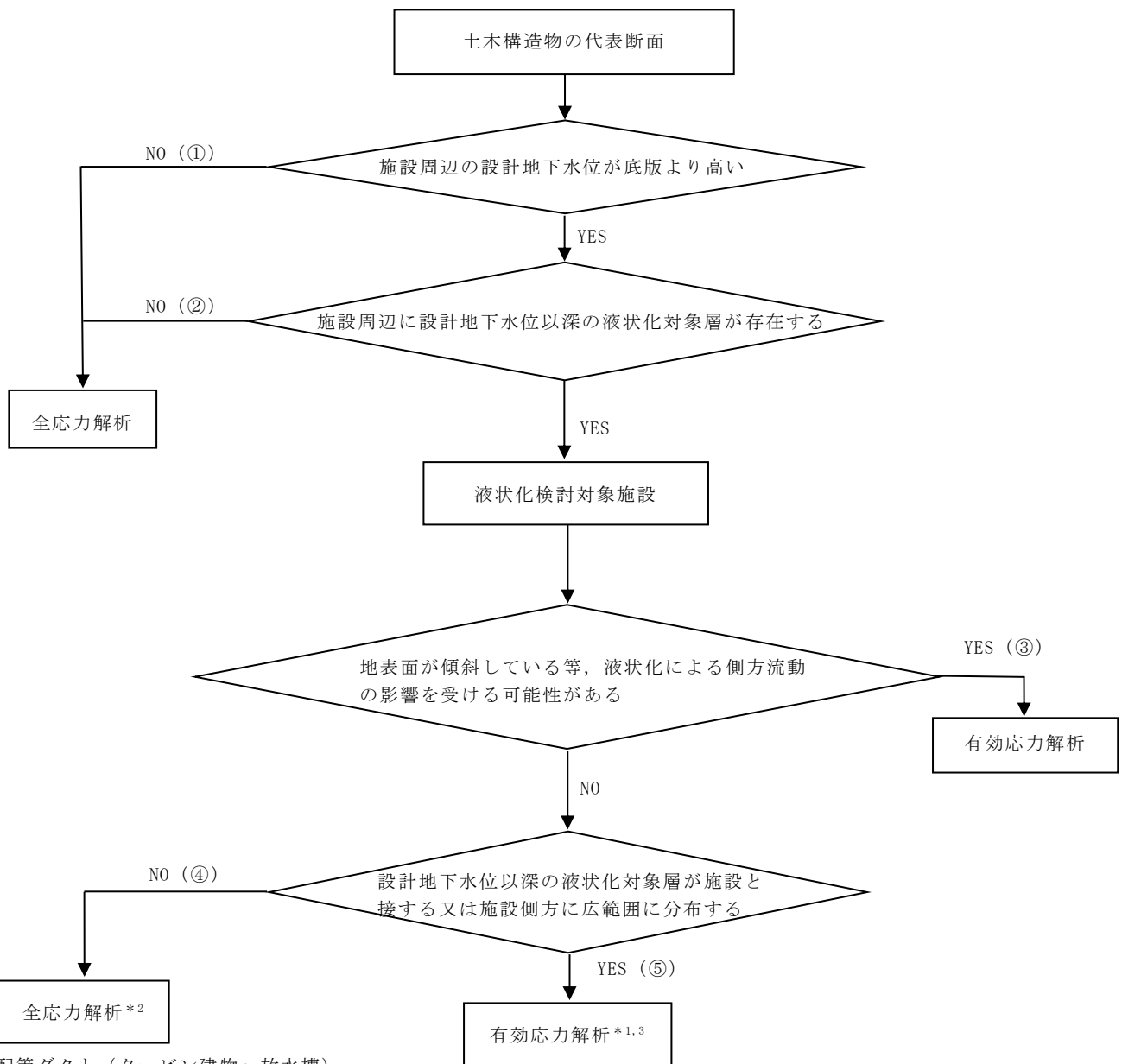
解析手法の選定のうち、④の観点では液状化対象層と施設の間に離隔があり、かつ液状化対象層が局所的に分布している場合、施設に液状化等の影響が及ばないと整理し、全応力解析を実施している。本書では、④の観点に対する補足確認として、全応力解析と有効応力解析のそれぞれで算定した構造物の応答値（加速度応答スペクトル及び断面力）を比較することで、構造物から離隔があり、かつ局所的に分布する液状化対象層が構造物の応答値に及ぼす影響を確認する。

屋外重要土木構造物等の全応力解析においては、地震応答解析コード「T D A P III」を用いているが、本検討においては液状化対象層の影響をより正確に把握するため、地震応答解析コード「F L I P」を用いて液状化パラメータをON/OFFとすることにより、応答値の比較を実施する。

なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

表 1-1 周辺地盤の状況に応じた解析手法の選定と補足検討内容

	周辺地盤の状況	基軸となる解析手法と補足検討内容
①	施設周辺の設計地下水位が底版より低い。	施設周辺で、液状化が発生する可能性が低く、液状化等の影響が及ばないと考えられるため、全応力解析により耐震評価を実施。
②	施設周辺に設計地下水位以深の液状化対象層が存在しない。	施設周辺に、液状化対象層が存在しないため、全応力解析により耐震評価を実施。
③	地表面が傾斜している等、液状化による側方流動の影響を受け可能性がある。	液状化が発生した場合、地表面や岩盤の傾斜により、側方流動が発生し、一方向に変位・荷重が作用することから、有効応力解析により耐震評価を実施。 補足検討として、液状化が発生しない場合の確認を実施。
④	設計地下水位以深の液状化対象層と施設の間に離隔があり、かつ液状化対象層が局所的に分布する。	施設に液状化等の影響が及ばないと考えられるため、全応力解析により耐震評価を実施。 補足検討として、液状化等の影響が及んでいないことの確認を有効応力解析により実施。
⑤	設計地下水位以深の液状化対象層が施設と接する又は施設側方に広範囲に分布する。	施設近傍で液状化が発生する可能性がある。あるいは、施設周辺の地盤で液状化が発生した場合、その影響について判断がつかないことから、有効応力解析により耐震評価を実施。 補足検討として、液状化が発生しない場合の確認を実施。



④ 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）

【A-A断面及びB-B断面】

④ B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽【A-A断面】

注記\*1：非液状化の条件を仮定した全応力解析についても実施する。

\*2：設計地下水位以深の液状化対象層の分布が局所的である断面のため全応力解析を実施するが、液状化の影響が構造物に及んでいないことを有効応力解析により確認する。

\*3：土木構造物の耐震評価の追加解析ケースとして、液状化しない場合の全応力解析を実施する。また、全応力解析について、有効応力解析の解析コードとの差異による影響を代表構造物（例：屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽））で確認する。

図 1-1 解析手法の選定フロー

## 2. 評価対象断面

図 1-1 の解析手法の選定フローで④の観点で整理されたのは、屋外配管ダクト(タービン建物～放水槽)の A-A 断面及び B-B 断面と B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の A-A 断面である。屋外配管ダクト(タービン建物～放水槽)及び B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の位置図を図 2-1 に示す。また、屋外配管ダクト(タービン建物～放水槽)の平面図を図 2-2、断面図を図 2-3 及び図 2-4、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の平面図を図 2-5、A-A 断面の断面図を図 2-6 に示す。

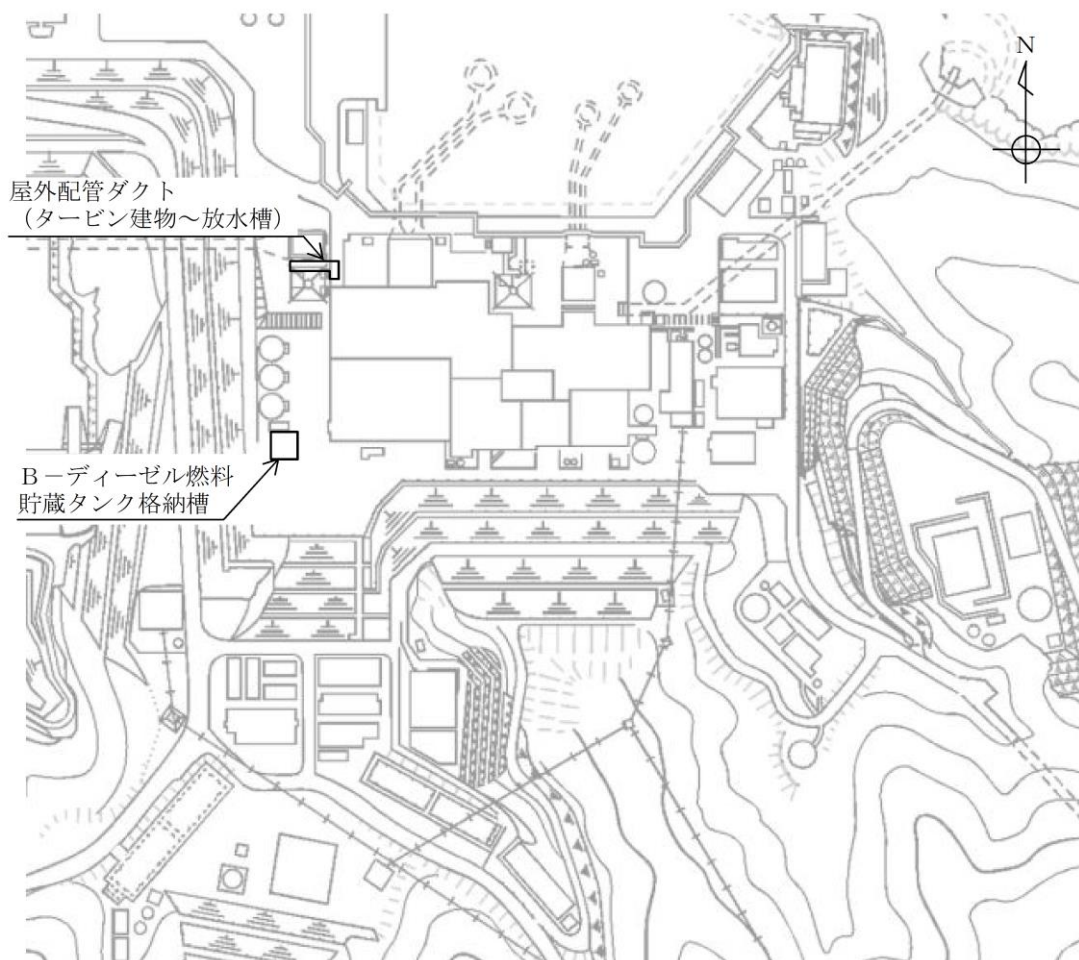


図 2-1 評価対象構造物位置図



図 2-2 平面図（屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽））



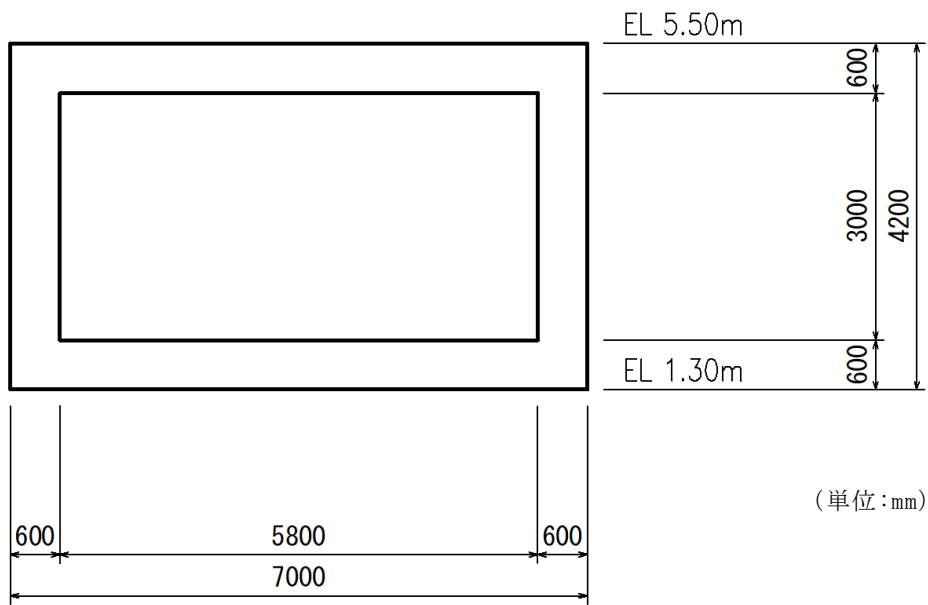


図 2-3 断面図 (屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【A-A断面】)

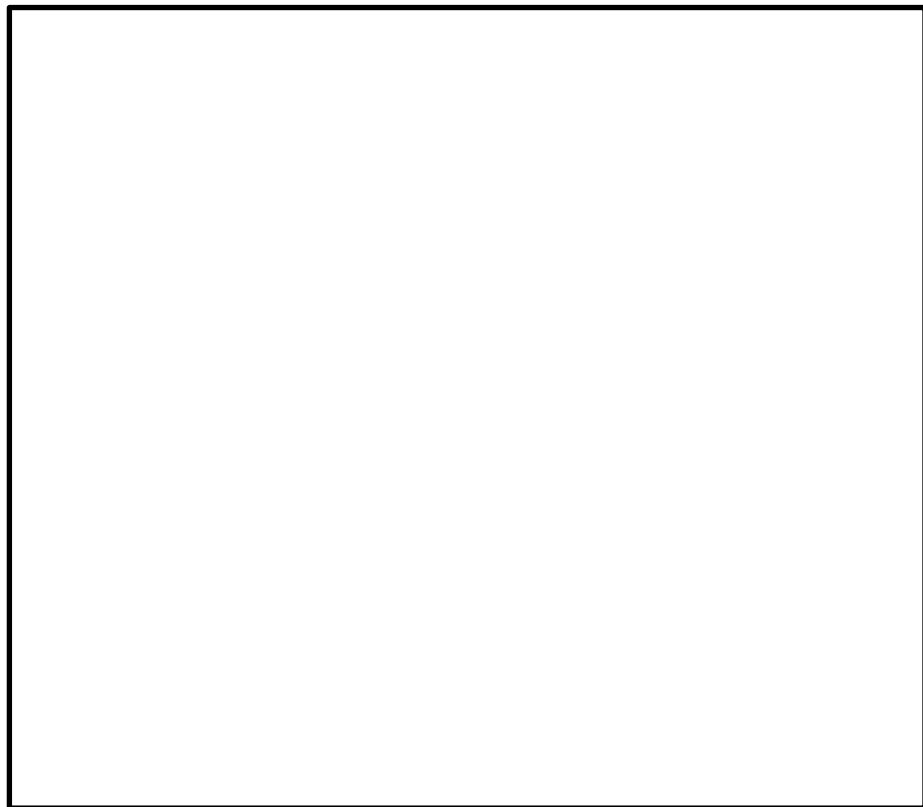


図 2-4 断面図 (屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【B-B断面】)

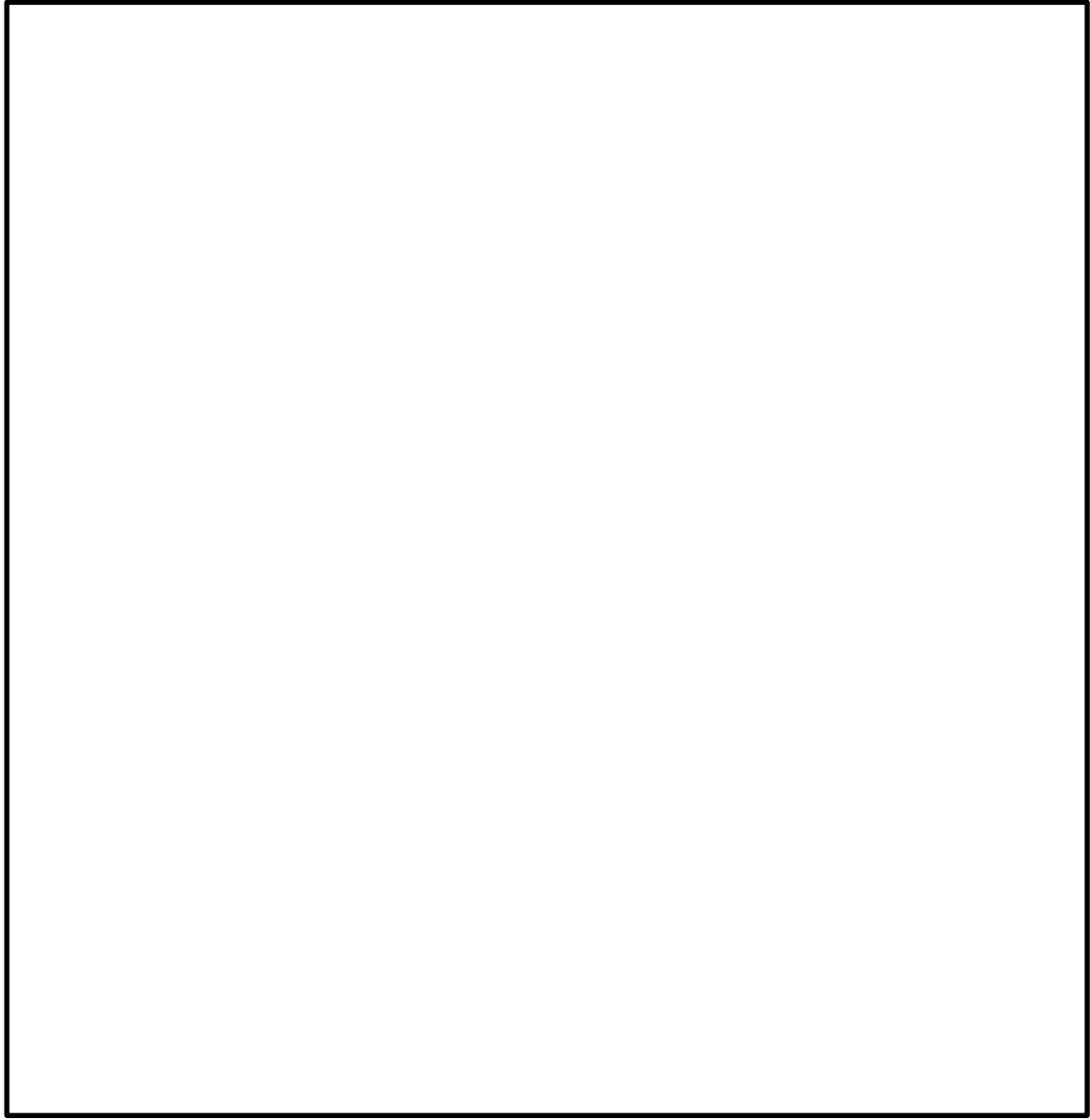


図 2-5 平面図 (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽)

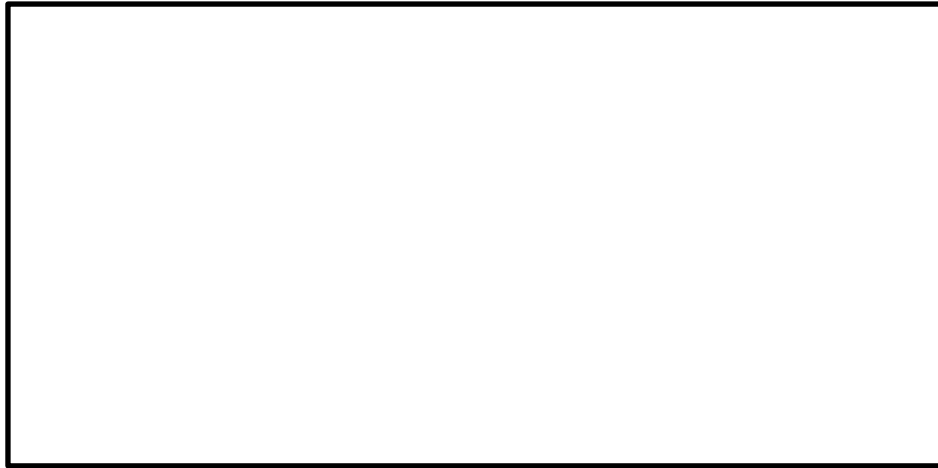


図 2-6 断面図（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽断面図【A-A断面】）

ここで、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のA-A断面位置及びB-B断面位置の地質断面図を図 2-7 及び図 2-8、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽のA-A断面位置の地質断面図を図 2-9 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のA-A断面位置及びB-B断面位置は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に隣接する放水槽を保守的に埋戻土としてモデル化している。一方、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽のA-A断面位置は、構造物周辺を実際の状況に近い形でモデル化している。

本検討では、構造物から離隔がある液状化対象層の影響に着目する観点から、構造物周辺を実際の状況と近い形でモデル化しているB-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽のA-A断面位置を評価対象断面とする。

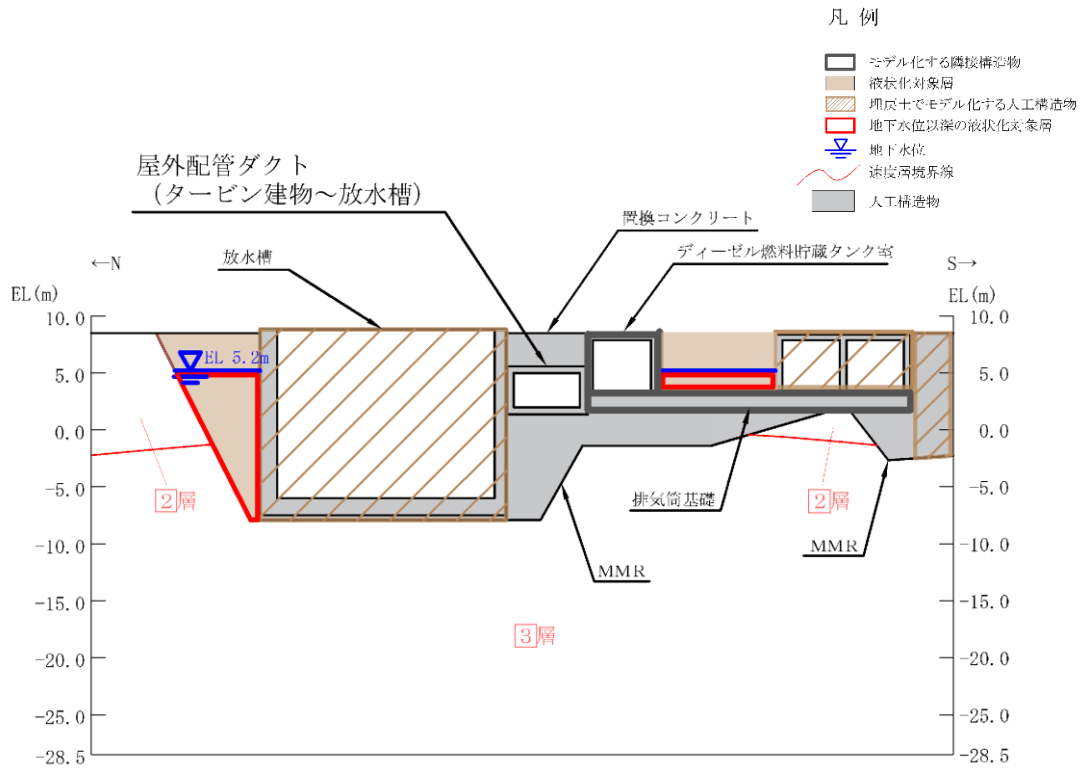


図 2-7 地質断面図 (屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【A-A 断面位置】)

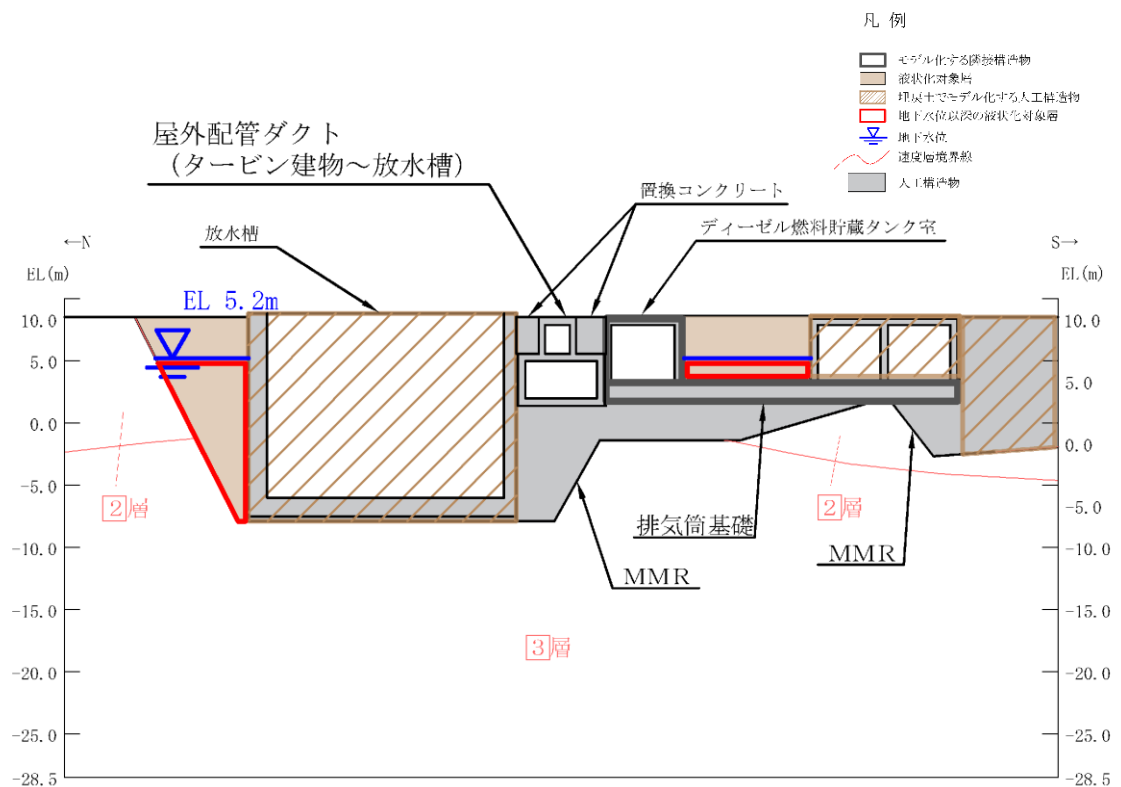


図 2-8 地質断面図 (屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【B-B 断面位置】)

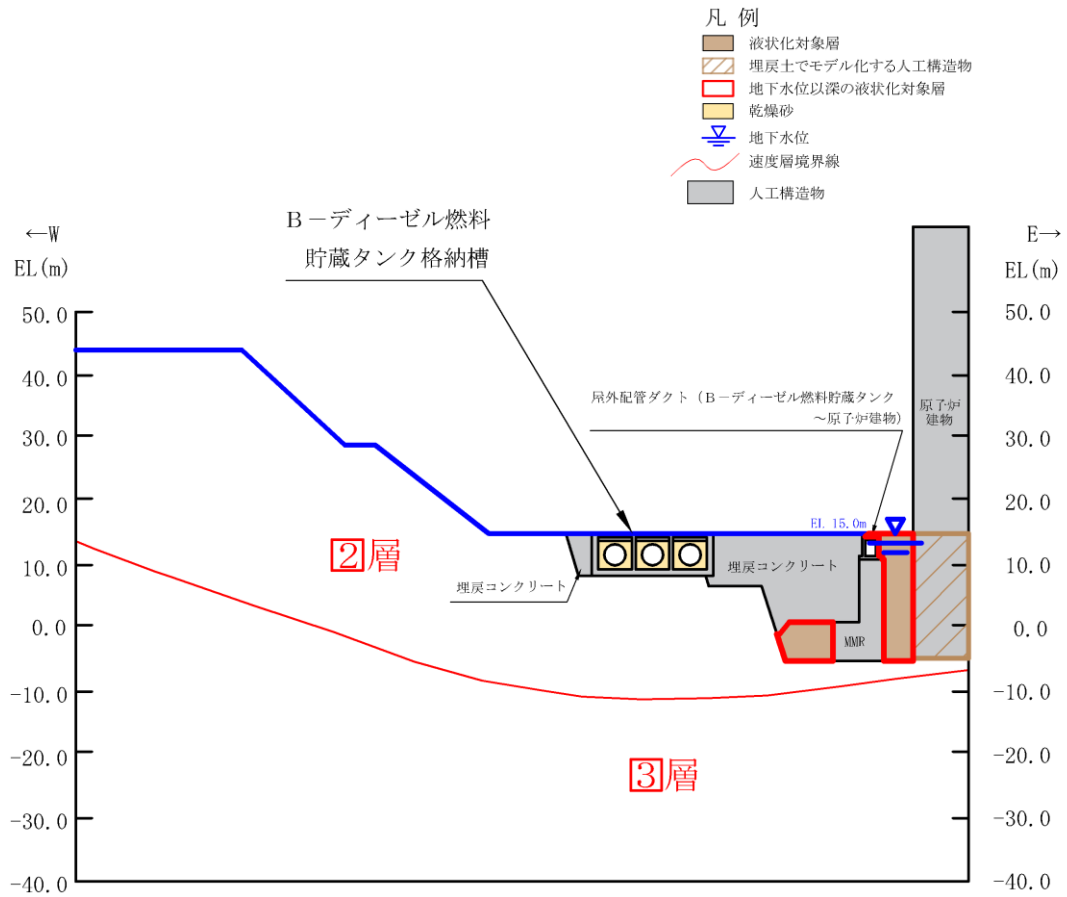


図 2-9 地質断面図 (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽【A-A断面位置】)

### 3. 解析方針

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽のA-A断面について、地震応答解析における液状化パラメータをON/OFFとした場合の構造物の応答値を比較する。

上記断面は、解析手法の選定フローに基づき全応力解析を選定し、地震応答解析コード「TDA P III」を用いている。一方、本資料では液状化対象層の影響をより正確に把握するため、地震応答解析コード「FLIP」を用いることとする。

地震応答解析にあたっては、VI-2-2-22「B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の地震応答計算書」に示す「TDA P III」の解析モデルをベースに、「FLIP」の解析モデルを作成する。

解析コードを「TDA P III」から「FLIP」へ変更するにあたり、入力条件による解析差を小さくするため、以下のとおり解析条件を変更する。

- ・減衰を Rayleigh 減衰から剛性比例型減衰に変更する。
- ・埋戻土の物性値を有効応力解析における解析用物性値に変更する。

その他の解析条件は有効応力解析を実施している他の屋外重要土木構造物と同様とする。なお、本書では構造物の応答値の比較を目的とするため、構造物は簡易的に線形はり要素でモデル化する。

検討に使用する地震動は、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動  $S_s - D(++)$  とし、地盤物性は平均物性とする。

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 A-A 断面の解析モデルを図 3-1 に、加速度応答スペクトルの抽出点を図 3-2 に示す。抽出点は、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の機器・配管系の耐震評価に用いる抽出点のうち、代表的な 4 隅を選定する。

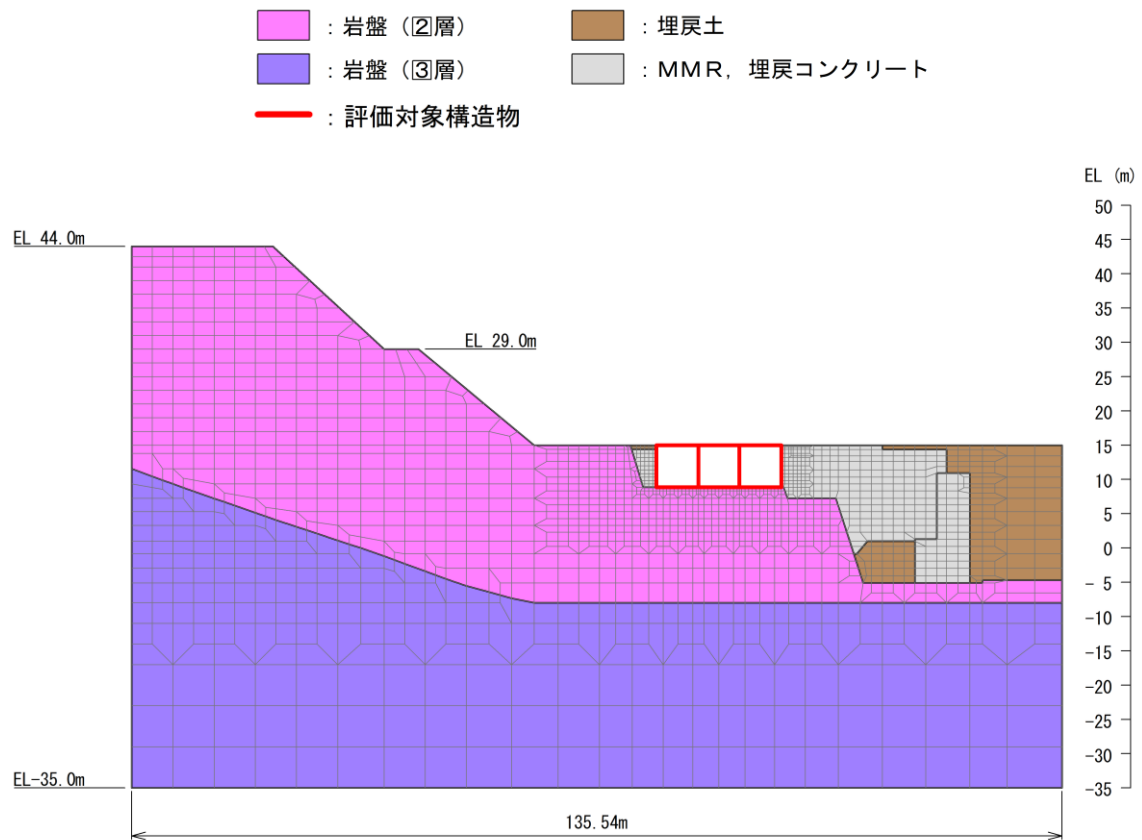


図 3-1 地震応答解析モデル図  
 (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

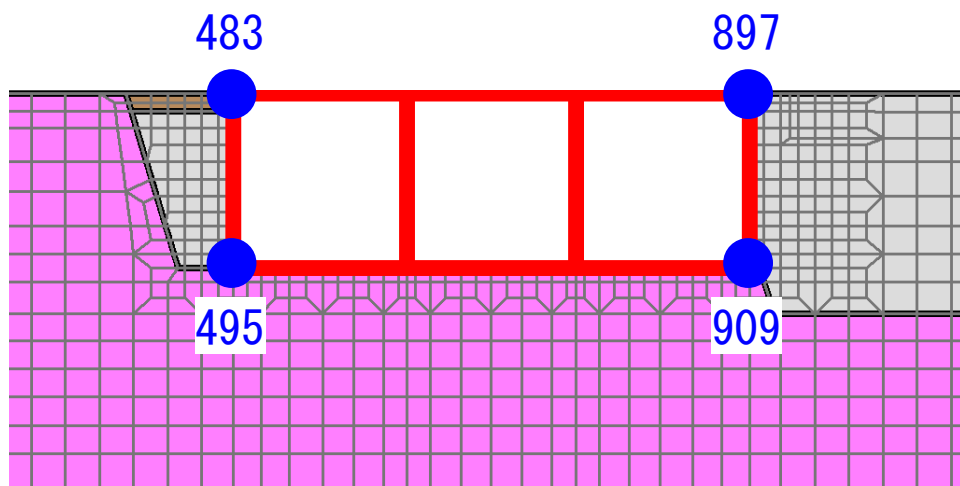


図 3-2 加速度応答スペクトルの抽出点  
 (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

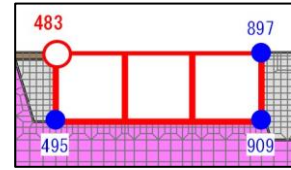
#### 4. 評価結果

##### 4.1 加速度応答スペクトルの比較

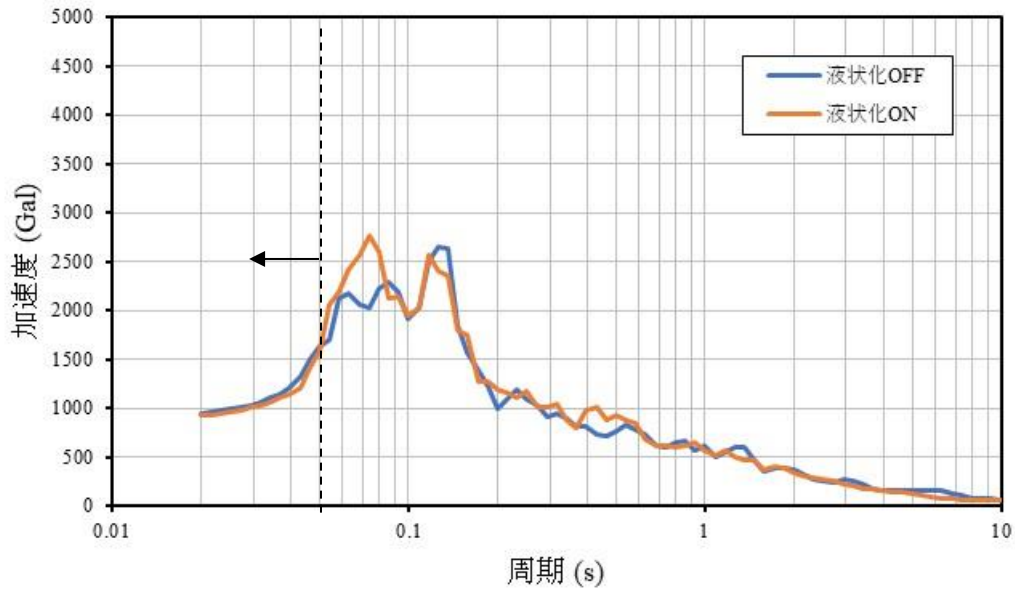
地震応答解析において液状化パラメータをON/OFFとした場合の構造物の加速度応答スペクトルの比較を図4-1に示す。

比較の結果、抽出点483及び897における加速度応答スペクトル（水平方向）について、周期：0.07s辺りで液状化パラメータONが液状化パラメータOFFを上回るが、B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽のA-A断面における主要機器であるB-ディーゼル燃料貯蔵タンクの固有周期：0.05s以下の範囲においては、水平及び鉛直共におおむね同等もしくは液状化パラメータOFFが上回ることを確認した。



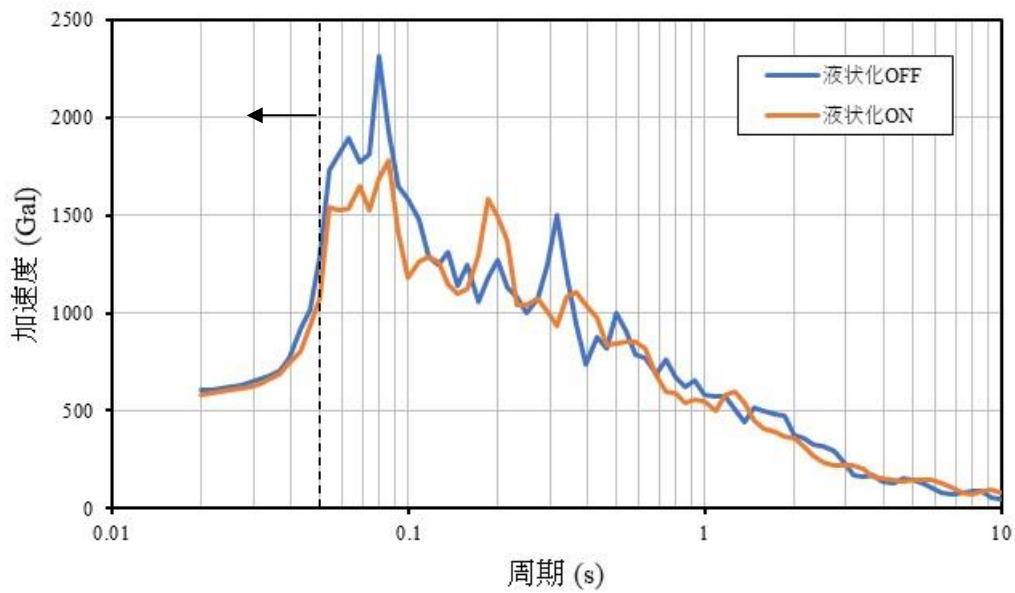


h=0.05



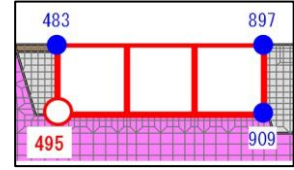
(水平)

h=0.05

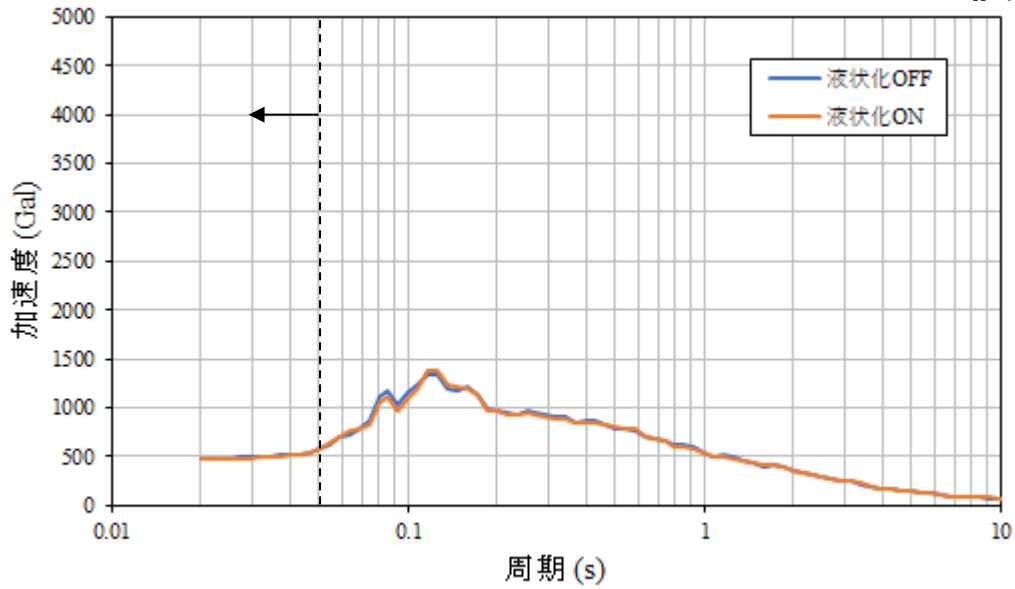


(鉛直) ← Bディーゼル燃料タンクの固有周期

図 4-1(1) 加速度応答スペクトルの比較 (抽出点 483)  
(B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

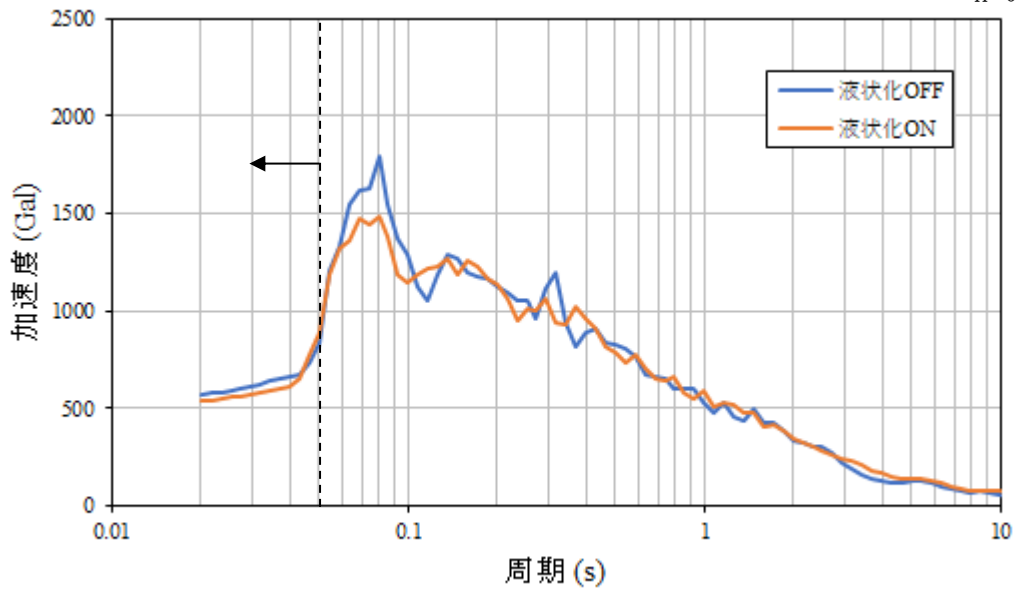


h=0.05



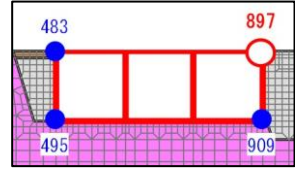
(水平)

h=0.05

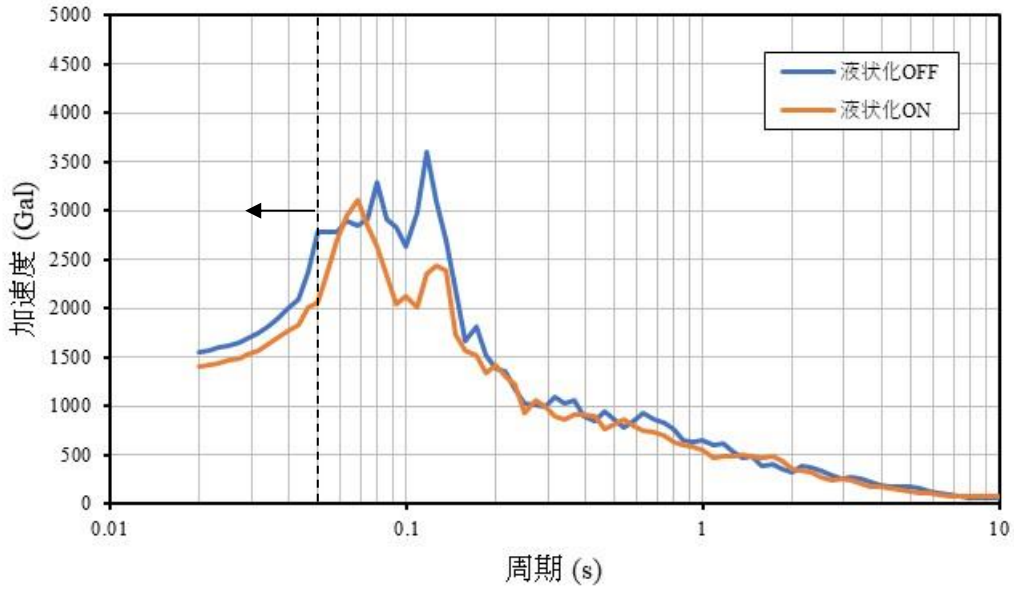


(鉛直) ← Bディーゼル燃料タンクの固有周期

図 4-1(2) 加速度応答スペクトルの比較 (抽出点 495)  
(B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

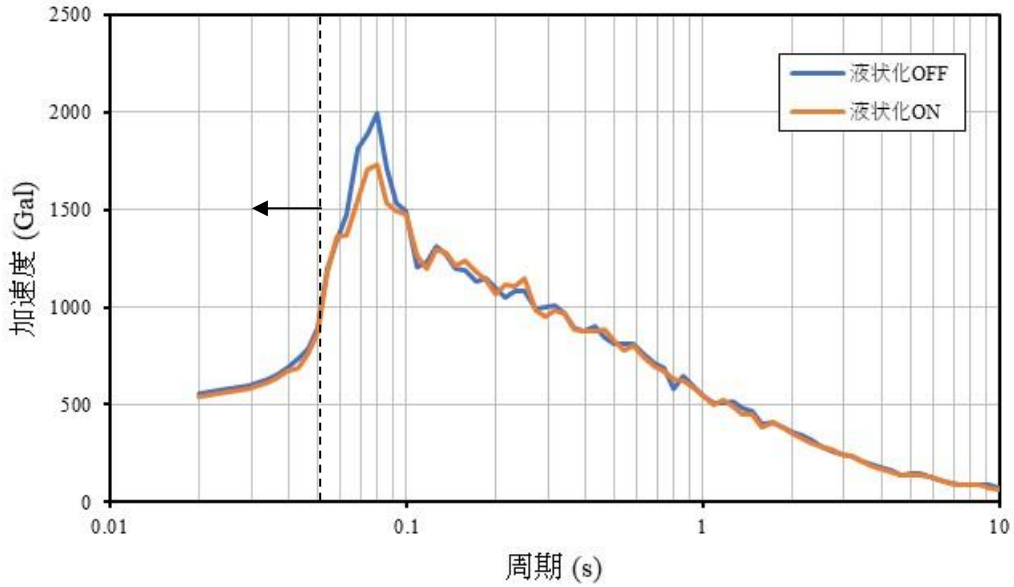


h=0.05



(水平)

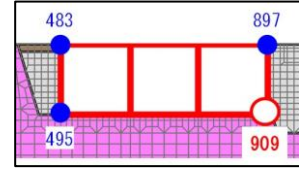
h=0.05



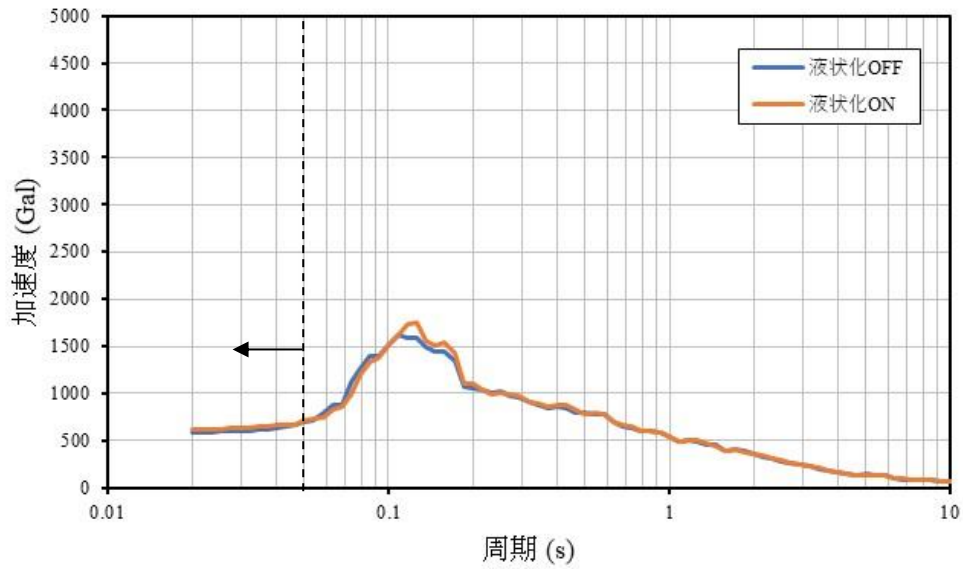
(鉛直)

← Bディーゼル燃料タンクの固有周期

図 4-1(3) 加速度応答スペクトルの比較 (抽出点 897)  
(B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

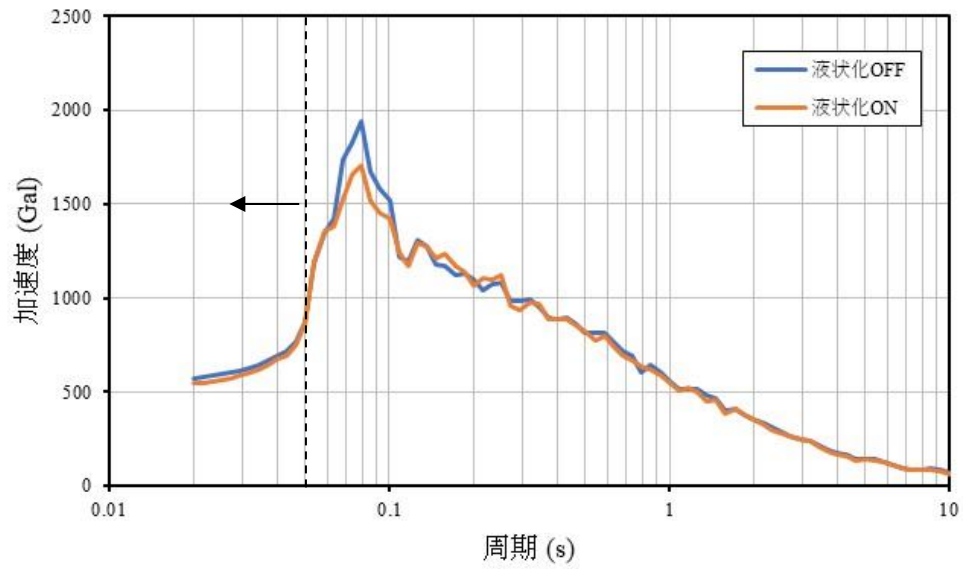


h=0.05



(水平)

h=0.05



(鉛直) ← Bディーゼル燃料タンクの固有周期

図 4-1(4) 加速度応答スペクトルの比較 (抽出点 909)  
(B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

#### 4.2 断面力の比較

地震応答解析において液状化パラメータをON/OFFとした場合の構造物の断面力の比較を表 4-1 に示す。

比較の結果，断面力はおおむね同等であることを確認した。

表 4-1 断面力の比較  
 (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面))

	液状化パラメータOFF	液状化パラメータON
軸力 (kN)		
せん断力 (kN)		
曲げモーメント (kN・m)		

## 5. まとめ

解析手法の選定のうち、④の観点で液状化対象層と施設の間に離隔があり、かつ液状化対象層が局所的に分布している場合、施設に液状化等の影響が及ばないと整理していることに対する補足確認として、地震応答解析において液状化パラメータをON/OFFとした場合の構造物の応答値を比較した。

比較の結果、両者で構造物の応答値はおおむね同等であり、構造物から離隔があり、かつ局所的に分布する液状化対象層が構造物の応答値に及ぼす影響が軽微であることを確認した。

## 参考資料 10 ジョイント要素のばね定数の妥当性確認結果について

### 1. 概要

本文の「7. ジョイント要素のばね設定」に示すとおり，ジョイント要素のばね定数は，数値計算上不安定な挙動を起こさない程度に周囲材料の剛性よりも十分に大きな値を設定する。

表 1-1 にジョイント要素のばね定数を示す。

本項では，表 1-1 のとおり設定しているジョイント要素のばね定数が，数値計算上不安定な挙動を起こさず，かつ，地盤から構造物への圧縮荷重，せん断荷重が確実に伝達され得る適切な設定値であることを確認する。

表 1-1 ジョイント要素のばね定数

圧縮剛性 $k_n$ ( $\text{kN/m}^3$ )	せん断剛性 $k_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )
$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$

### 2. 評価方法

表 1-1 のとおり設定しているジョイント要素のばね定数が数値上不安定な挙動を起こさず，かつ，地盤から構造物への圧縮荷重，せん断荷重が確実に伝達され得る適切な設定値であるかを確認するため，ジョイント要素のばね定数について影響評価を実施する。具体的には，ジョイント要素のばね定数に対して，ばね定数の値を 1/10 倍，1 倍，10 倍とした場合の解析を実施し，構造物の照査値，地盤と構造物の接合面における剥離・すべり量，構造位置での応答加速度及び側壁最大土圧の比較を行う。

評価対象とする構造物は，屋外重要土木構造物において躯体の断面形状が比較的大きく，地盤と構造物の接合面で多数のジョイント要素を設けており，ジョイント要素のばね定数の設定値による影響が生じやすいと考えられる取水槽（A-A 断面）とする。解析ケースは基本ケース①とし，地震動は，全周波数帯で加速度応答スペクトルが大きい  $S_s - D (+ +)$  を用いる。

表 2-1 にジョイント要素のばね定数に係る影響評価の検討ケース，図 2-1 に取水槽の平面図，図 2-2 に取水槽（A-A 断面）の断面図，図 2-3 にジョイント要素の配置図を示す。



表2-1 検討ケース

検討ケース	ばね定数の倍率	ジョイント要素のばね定数 (kN/m <sup>3</sup> )	
		圧縮剛性 $k_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断剛性 $k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	0.1 倍	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$
2	1 倍	$1.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$
3	10 倍	$1.0 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$

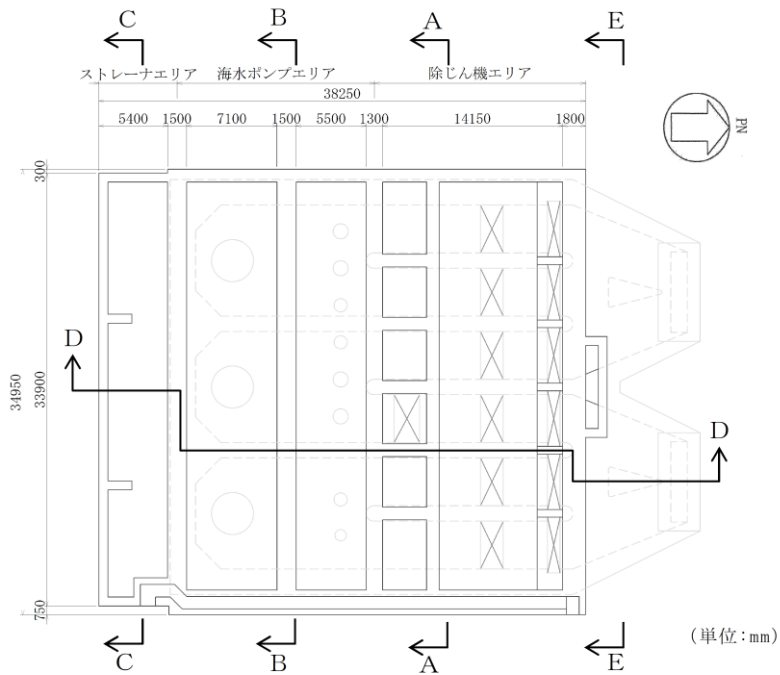


図 2-1 取水槽平面図

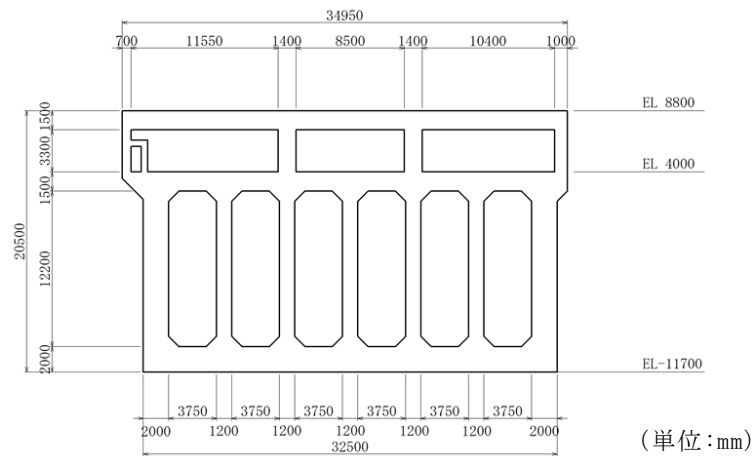
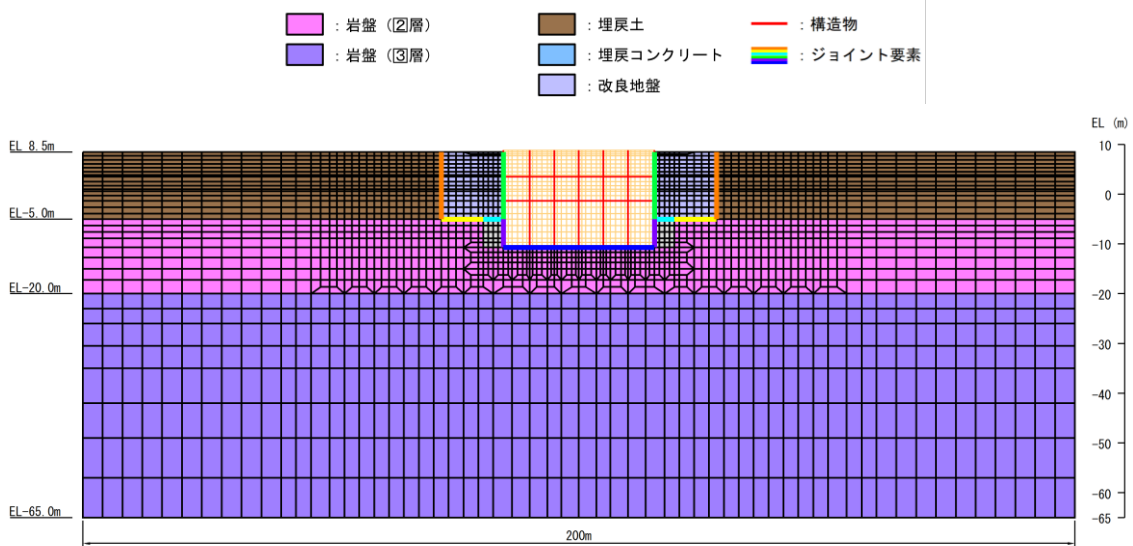
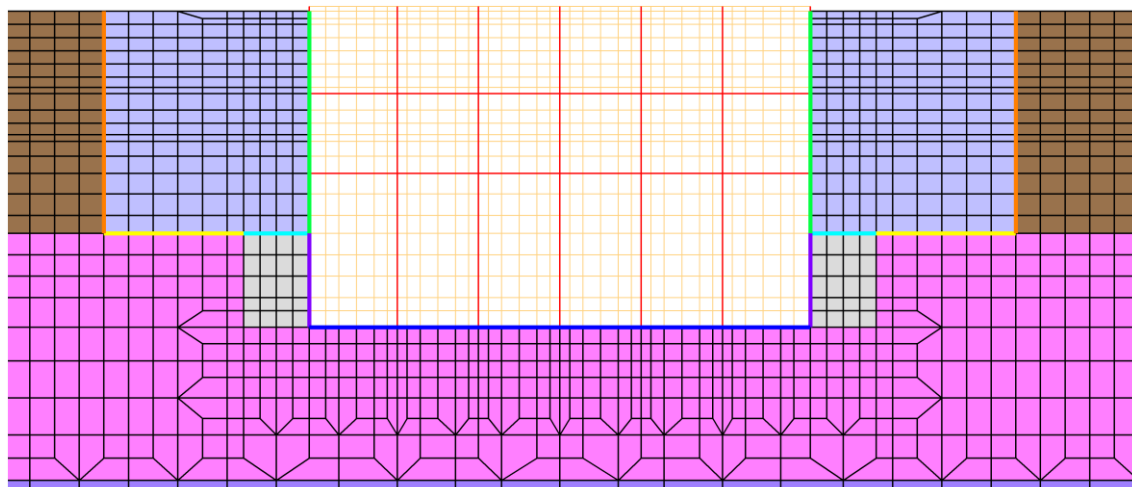


図 2-2 取水槽断面図 (A-A 断面)



(全体図)

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| — : 構造物—改良地盤ジョイント要素     | — : 改良地盤—埋戻土ジョイント要素      |
| — : 構造物—埋戻コンクリートジョイント要素 | — : 改良地盤—埋戻コンクリートジョイント要素 |
| — : 構造物—岩盤ジョイント要素       | — : 改良地盤—岩盤ジョイント要素       |



(ジョイント要素拡大)

図 2-3 ジョイント要素の配置図

### 3. 評価結果

ジョイント要素のばね定数の設定値と、各設定値に対する取水槽（A-A断面）の地盤と構造物の接合面における剥離・すべり量の比較結果を図3-1及び図3-2に、構造物位置における加速度応答スペクトルの比較結果を図3-3及び図3-4に、取水槽（A-A断面）における側壁最大土圧の比較結果を図3-5に示す。

図3-1に示すとおり、ばね定数が1倍、10倍の設定において、剥離・すべり量に大きな差は無い。ばね定数0.1倍においては、底版右端及び右側壁の上端において剥離が大きくなり、右側壁下端においては、剥離・すべり量がともに明確に大きくなっている。また、図3-3及び図3-4に示すとおり、ばね定数1倍以上の設定において、加速度応答スペクトルに大きな差はない。なお、図3-5に示す、側壁最大土圧についても、ばね定数の設定値による大きな差は無い。

以上の結果から、ばね定数1倍では数値計算上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値となっており、地盤から構造物への圧縮荷重、せん断荷重が確実に伝達され得る適切な設定値であることを確認した。

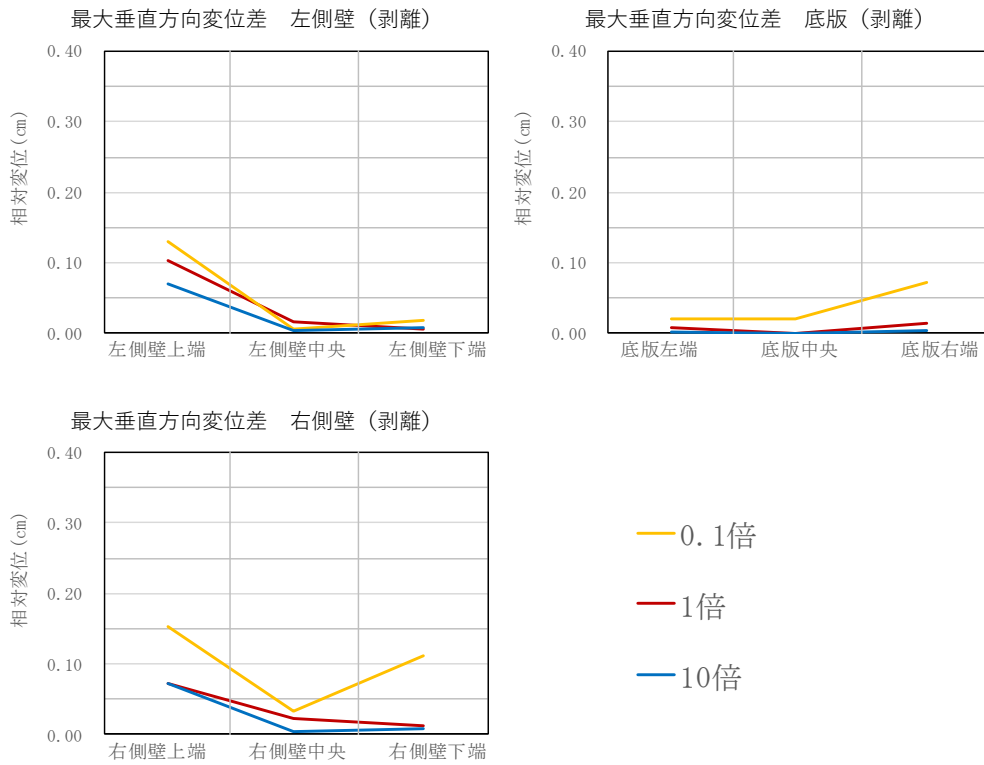


図 3-1 地盤と構造物の接合面接合面における剥離の比較  
 (基本ケース①,  $S_s - D$  (++))

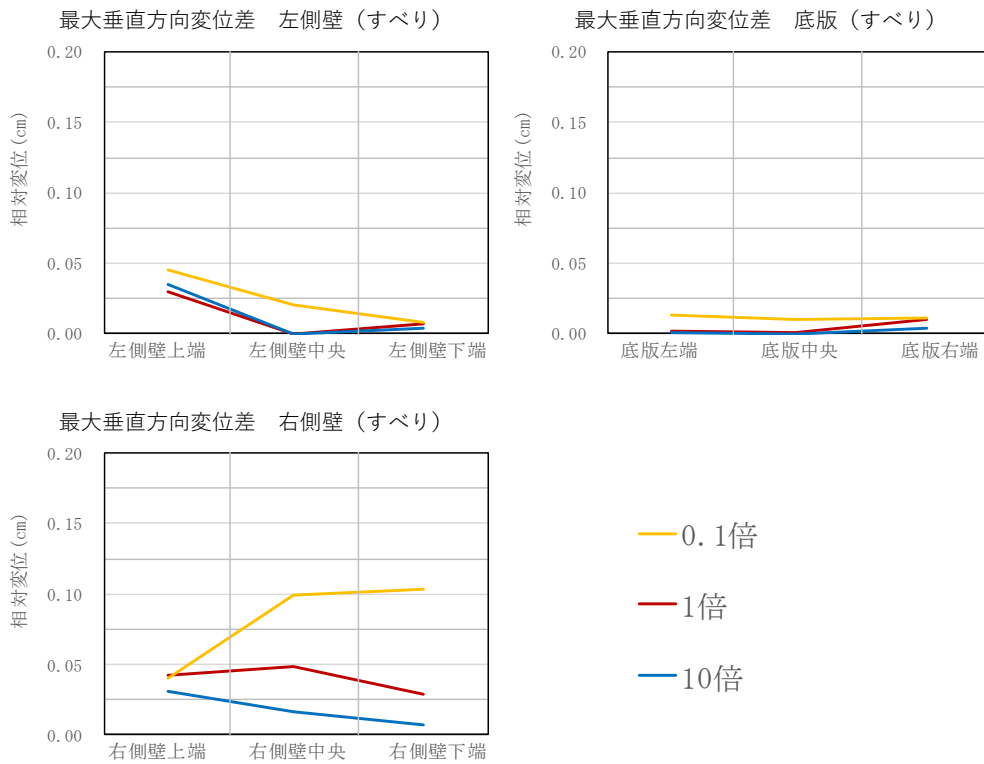


図 3-2 地盤と構造物の接合面接合面におけるすべり量の比較  
 (基本ケース①,  $S_s - D$  (++))

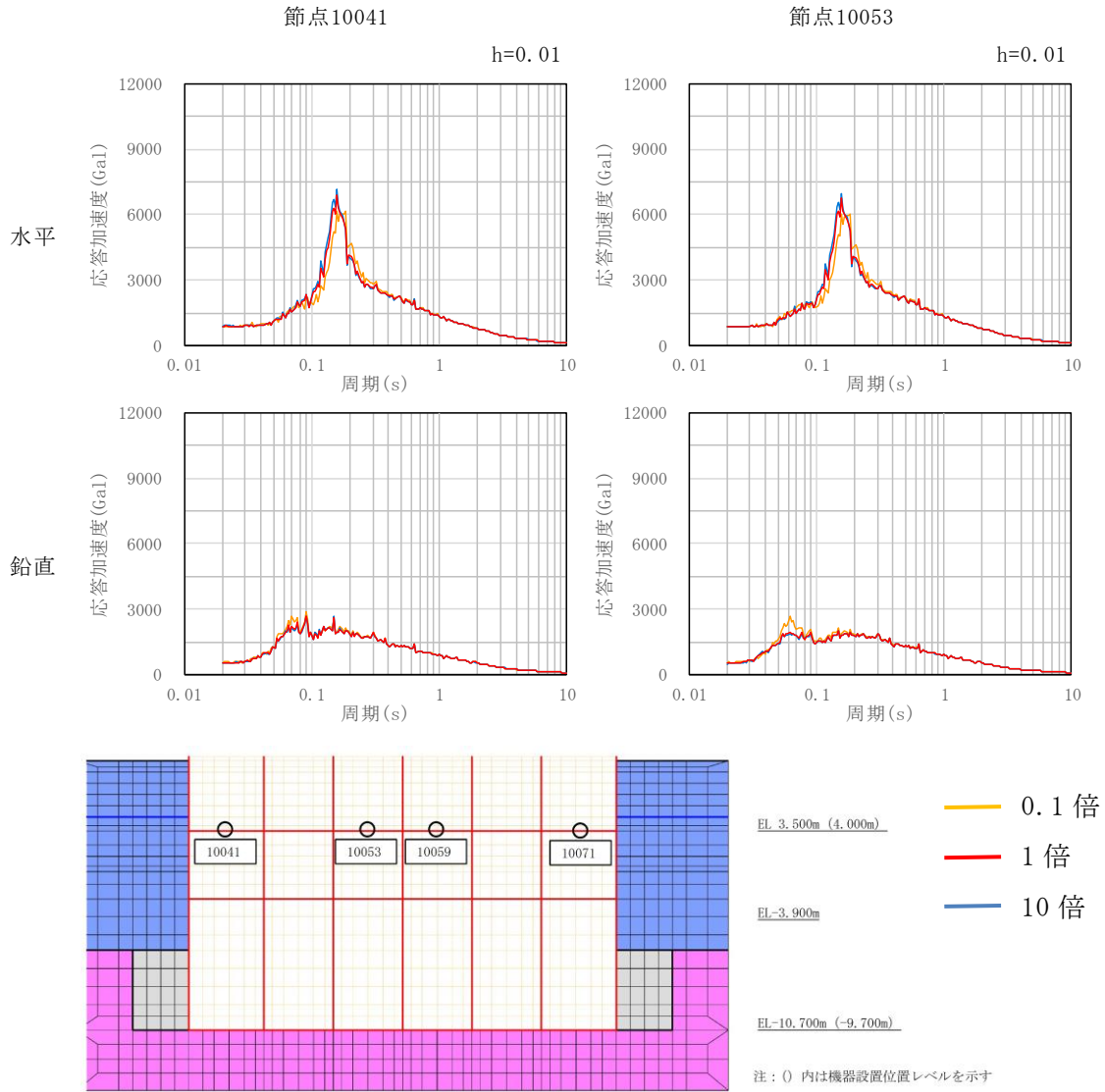


図 3-3 構造物位置における加速度応答スペクトルの比較  
(基本ケース①,  $S_s - D(++)$ )

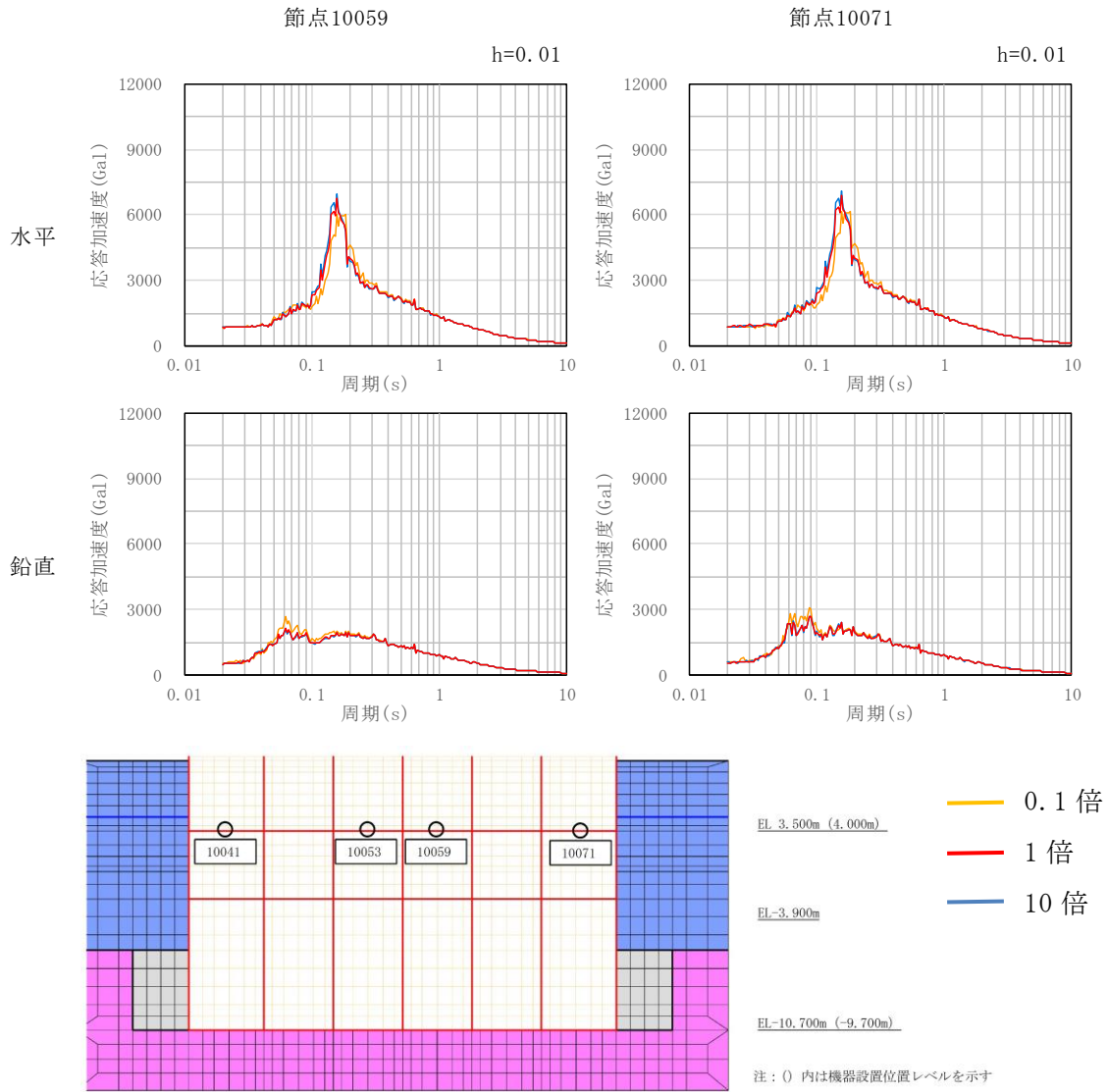


図 3-4 構造物位置における加速度応答スペクトルの比較  
(基本ケース①,  $S_s - D(++)$ )

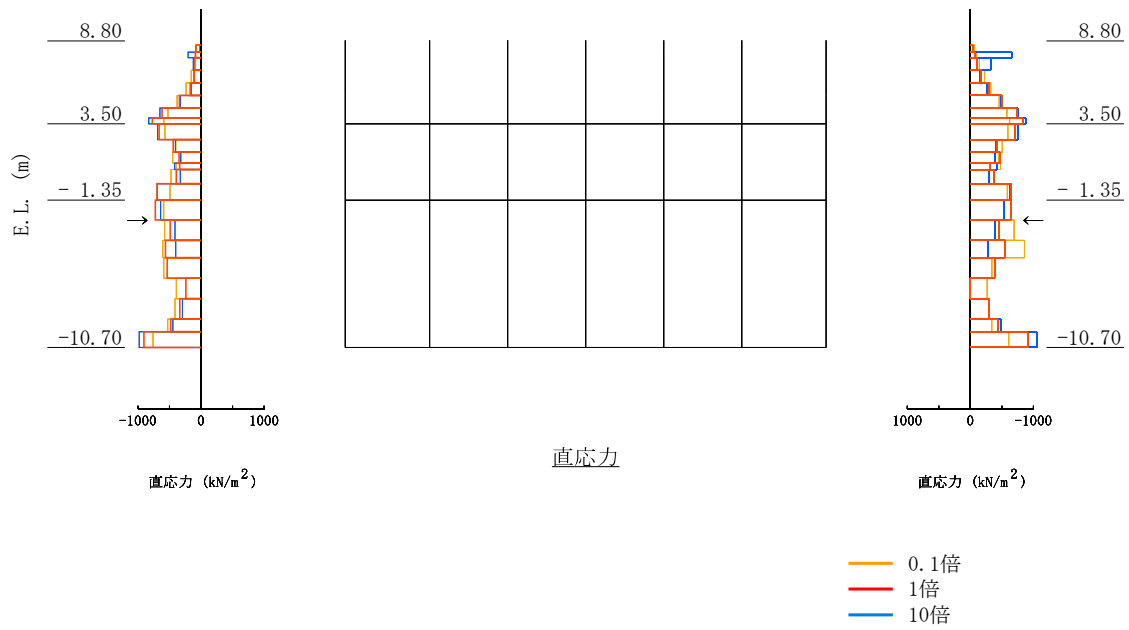


図 3-5 取水槽（除じん機エリア）における側壁最大土圧の比較  
 （基本ケース①， $S_s - D$ （++））

参考資料 11 浮上り評価について

1. 概要

屋外重要土木構造物等のうち，設計地下水位が地表面と同等の高さの構造物に対して，浮上りの影響を受ける可能性があるため，浮上り評価を行うこととしている。

本検討では，常時の浮上りに対する評価結果をとりまとめ，影響がないことを示す。

評価は，トンネル標準示方書（(社)土木学会，2016）（以下「トンネル標準示方書」という。）に基づき実施する。評価対象構造物の上端高さ及び設計地下水位を表 1-1 に示す。

なお，屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の C-C 断面については，有効応力解析を実施する構造物であるため，地震時の過剰間隙水圧分布を踏まえた検討を別途実施する。検討結果については，「補足-026-5 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の地震応答計算書及び耐震性についての計算書に関する補足説明資料」に示す。

表 1-1 評価対象構造物の上端高さ及び設計地下水位

施設名称		構造物上端 (EL m) *	設計地下水位 (EL m)
B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	A-A 断面	15.00	15.00
	B-B 断面		
屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク ～原子炉建物)	A-A 断面	14.65	15.00
	B-B 断面		
	C-C 断面	14.50	
第 1 ベントフィルタ格納槽	A-A 断面	14.70	15.00
	B-B 断面		
	C-C 断面		
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	A-A 断面	14.70	15.00
	B-B 断面		
	C-C 断面		

注記\*：構造物の一部に地上部を有する構造物については，地上部を除く高さを記載している。



## 2. 評価内容

### 2.1 浮上り評価に用いる指針・基準の選定

屋外重要土木構造物等における浮上り評価の対象構造物は、主に矩形のボックスカルバート構造であることから、共同溝設計指針、トンネル標準示方書及び鉄道構造物等設計標準・同解説に示される式(2.1)を用いて評価を実施する。浮上り評価の概念図を図2-1に示す。

$$\gamma_i (U_S + U_D) / (W_S + W_B + 2Q_S + 2Q_B) \leq 1.0 \dots \dots \dots \text{式 (2.1)}$$

ここで、

- $\gamma_i$  : 構造物係数で、 $\gamma_i = 1.0$  とする
- $U_S$  : 構造物底面に作用する静水圧による揚圧力 (kN/m)
- $U_D$  : 構造物底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 (kN/m)
- $W_S$  : 上載土の荷重 (水の重量を含む) (kN/m)
- $W_B$  : 構造物の自重 (kN/m)
- $Q_S$  : 上載土のせん断抵抗 (kN/m)
- $Q_B$  : 構造物側面の摩擦抵抗 (kN/m)

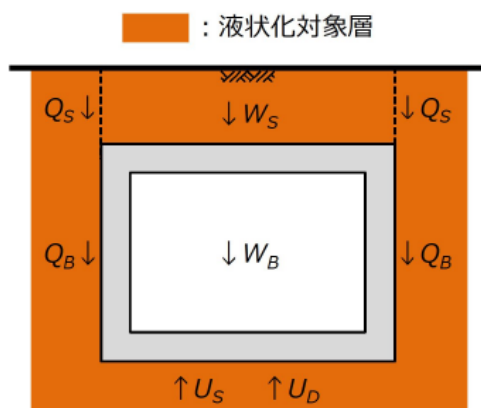


図 2-1 算定方法の概念図

上載土のせん断抵抗  $Q_S$  及び構造物側面の摩擦抵抗  $Q_B$  は、トンネル標準示方書に示される式(2.2)及び式(2.3)に基づき算定する。

$$Q_S = f_{UW} \cdot (c_S + K_0 \cdot \sigma'_{VS} \cdot \tan \phi_S) \cdot H \quad \dots \dots \dots \text{式 (2.2)}$$

$$Q_B = f_{US} \cdot (c_B + K_0 \cdot \sigma'_{VB} \cdot \tan \phi_B) \cdot H \quad \dots \dots \dots \text{式 (2.3)}$$

ここで、

- $c_S$  : 上載土の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
- $c_B$  : 構造物側面の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)
- $\phi_S$  : 上載土のせん断抵抗角 (°)
- $\phi_B$  : 構造物側面の壁面摩擦角で、 $\phi_B = 2\phi / 3$  とする (°)
- $\phi$  : 構造物周辺地盤の内部摩擦角 (°)
- $K_0$  : 静止土圧係数
- $\sigma'_{VS}$  : 上載土中央深さにおける有効上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma'_{VB}$  : 構造物中央深さにおける有効上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)
- $H$  : 上載土の厚さ (m)
- $H$  : 構造物の高さ (m)
- $f_{UW}, f_{US}$  : 液状化時の浮上りに関する安全係数で、  
 $f_{UW} = 1.0, f_{US} = 1.0$  とする

構造物底面に作用する静水圧による揚圧力 $U_S$ は、トンネル標準示方書に示される式 (2.4) に基づき算定する。

$$U_S = A_W \cdot \gamma_w \quad \dots \dots \dots \text{式 (2.4)}$$

ここで、

- $\gamma_w$  : 地下水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $A_W$  : 水位以深面積 (m<sup>2</sup>)

構造物底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 $U_D$ は、トンネル標準示方書に示される式 (2.5) に基づき算定する。

$$U_D = A_W (\gamma_s - \gamma_w) \quad \dots \dots \dots \text{式 (2.5)}$$

ここで、

- $U_D$  : 構造物底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力 (kN/m)
- $\gamma_s$  : 水位以深単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

## 2.2 評価対象断面

### 2.2.1 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽

B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽の平面図を図2-2に、地質断面図を図2-3及び図2-4に、断面図を図2-5及び図2-6示す。



図2-2 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 平面図

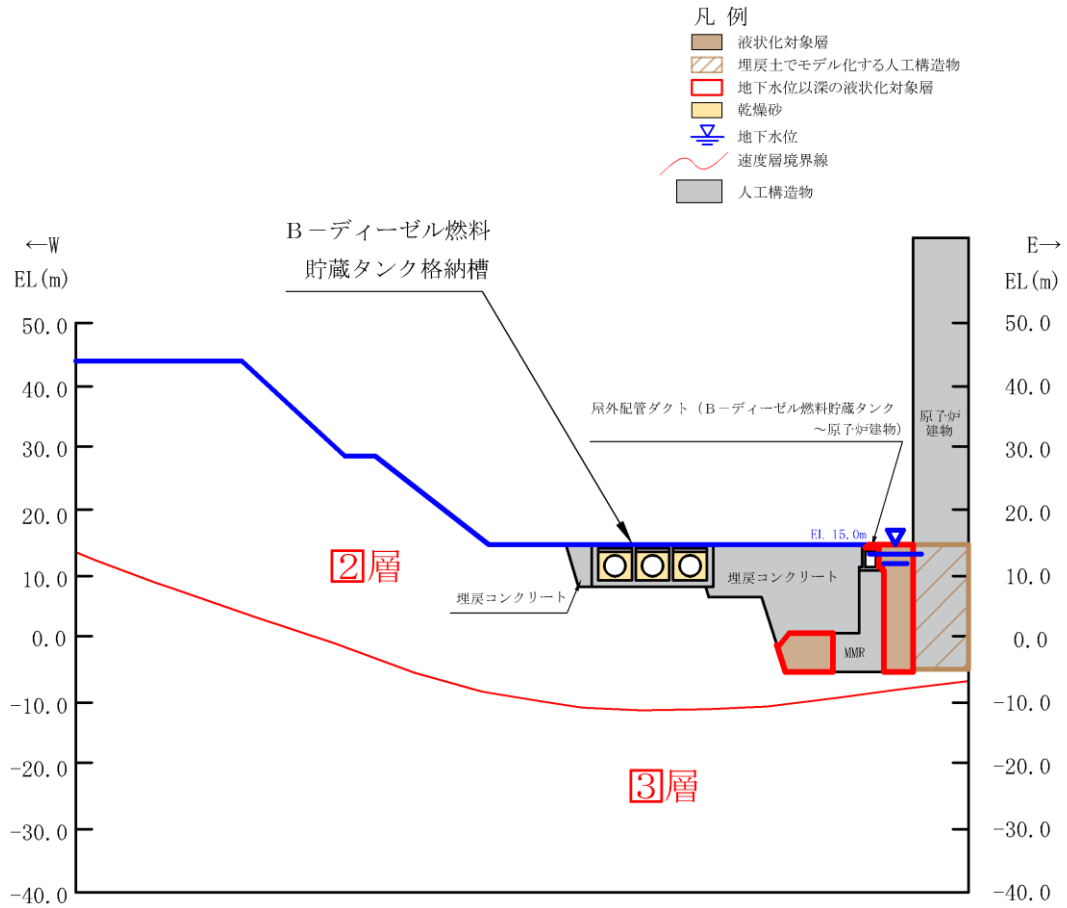


図 2-3 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 地質断面図 (A-A断面位置)

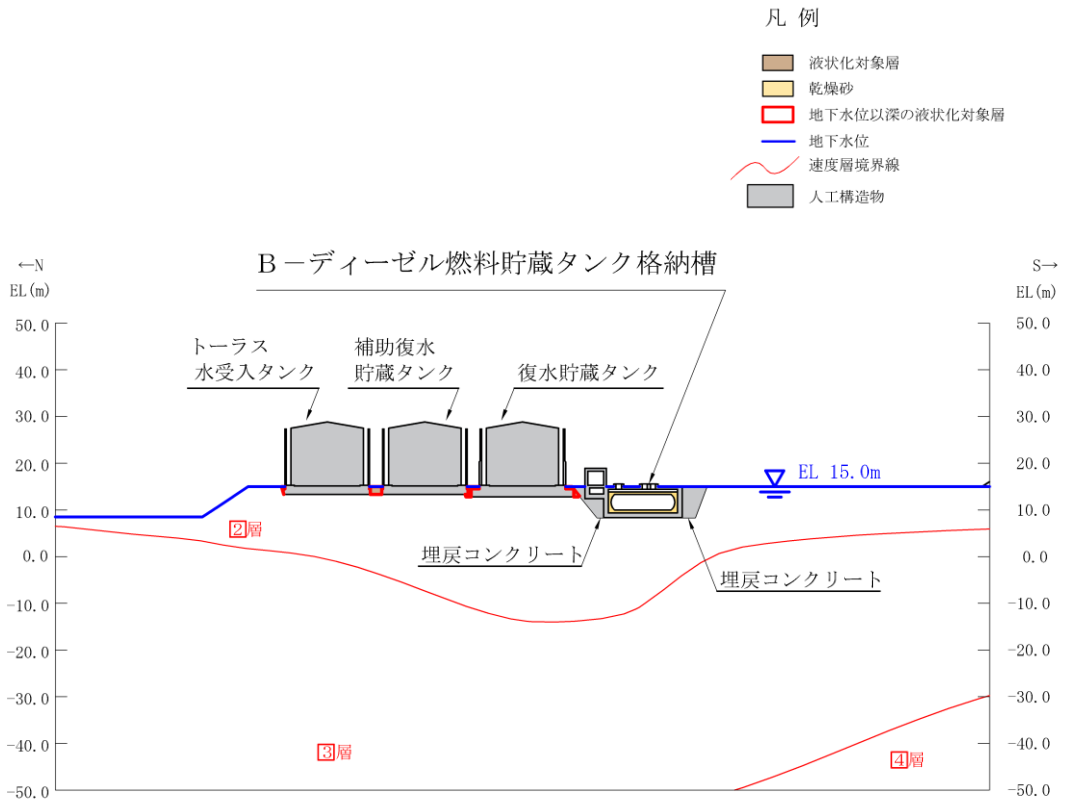


図 2-4 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 地質断面図 (B-B断面位置)



図 2-5 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 断面図 (A-A断面位置)

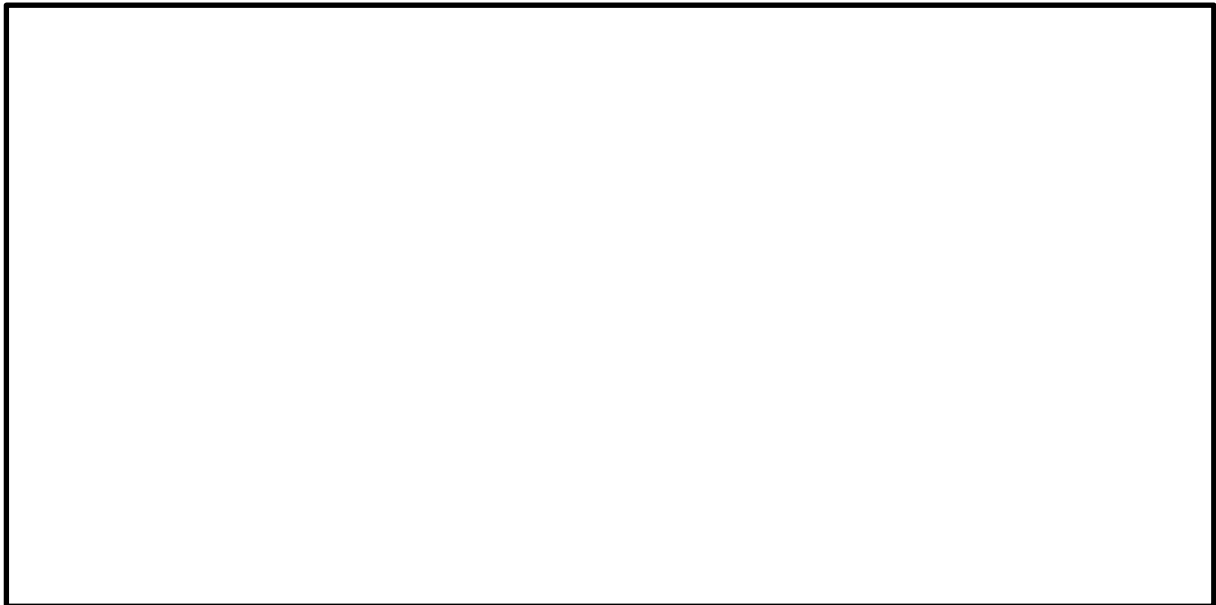


図 2-6 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 断面図 (B-B断面位置)

### 2.2.2 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）

屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の平面図を図2-7に、地質断面図を図2-8～図2-10に、断面図を図2-11～図2-13示す。



図2-7 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物） 平面図

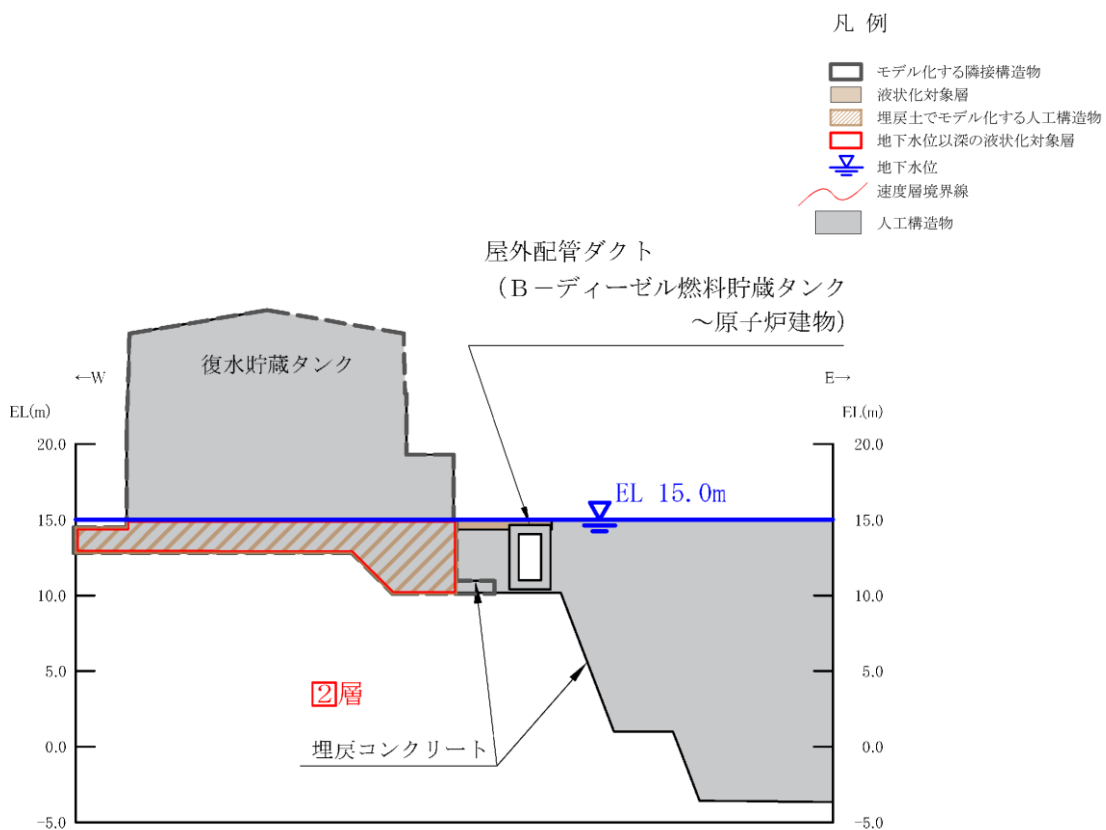


図 2-8 屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (A-A 断面位置)



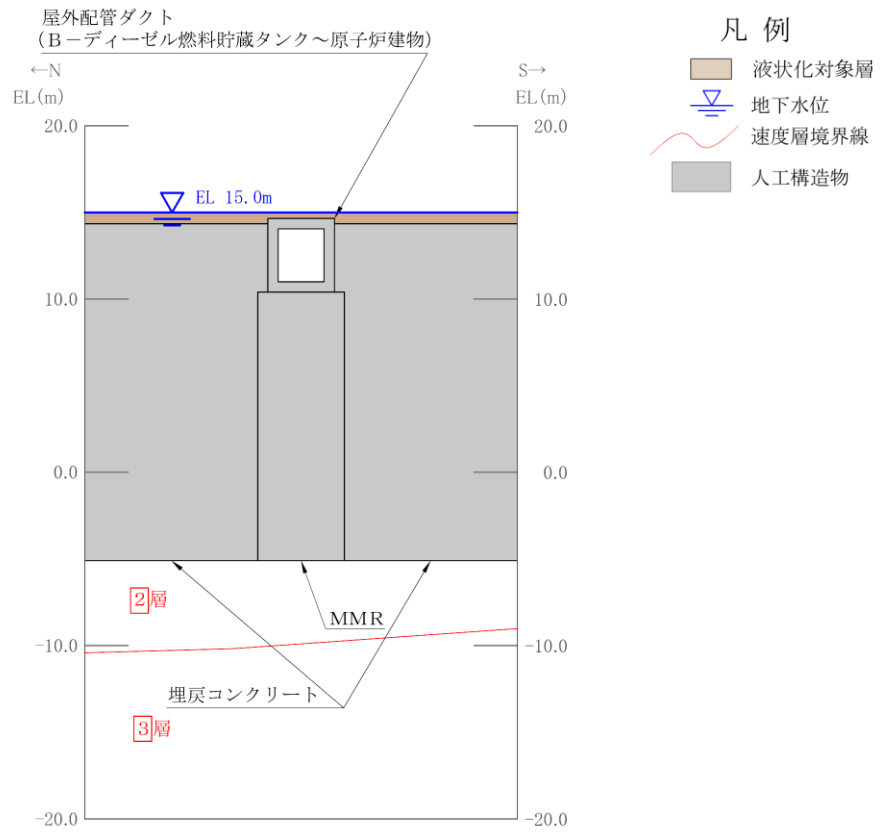
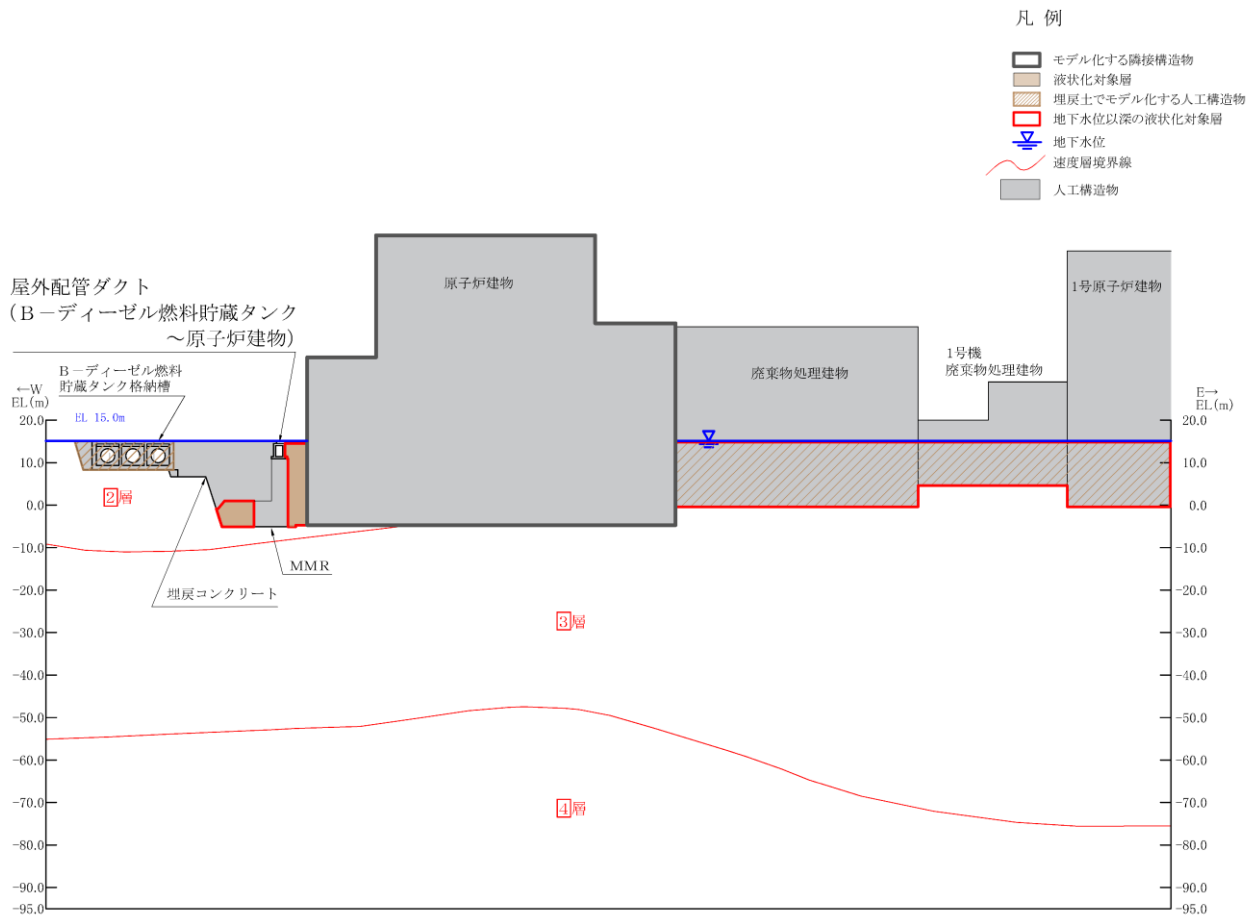
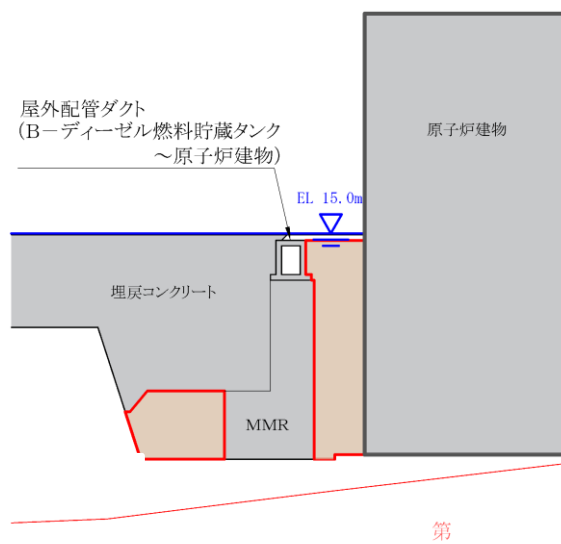


図 2-9 屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (B-B 断面位置)



(全体図)



(拡大図)

図 2-10 屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物)  
地質断面図 (C-C 断面位置)

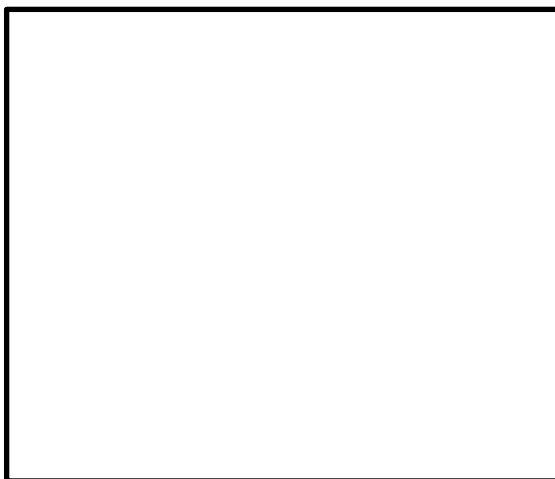


図 2-11 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）  
断面図（A-A 断面位置）

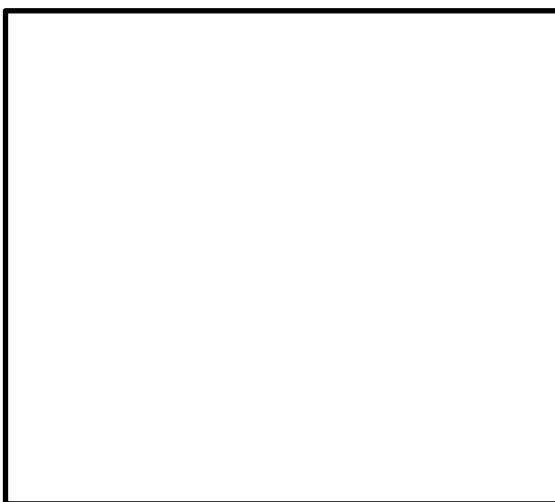


図 2-12 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）  
断面図（B-B 断面位置）



図 2-13 屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）  
断面図（C-C 断面位置）

### 2.2.3 第1ベントフィルタ格納槽

第1ベントフィルタ格納槽の平面図を図2-14に、地質断面図を図2-15～図2-17に、断面図を図2-18～図2-20示す。評価対象断面は、安全対策工事着工前のA-A断面、B-B断面及びC-C断面とする。

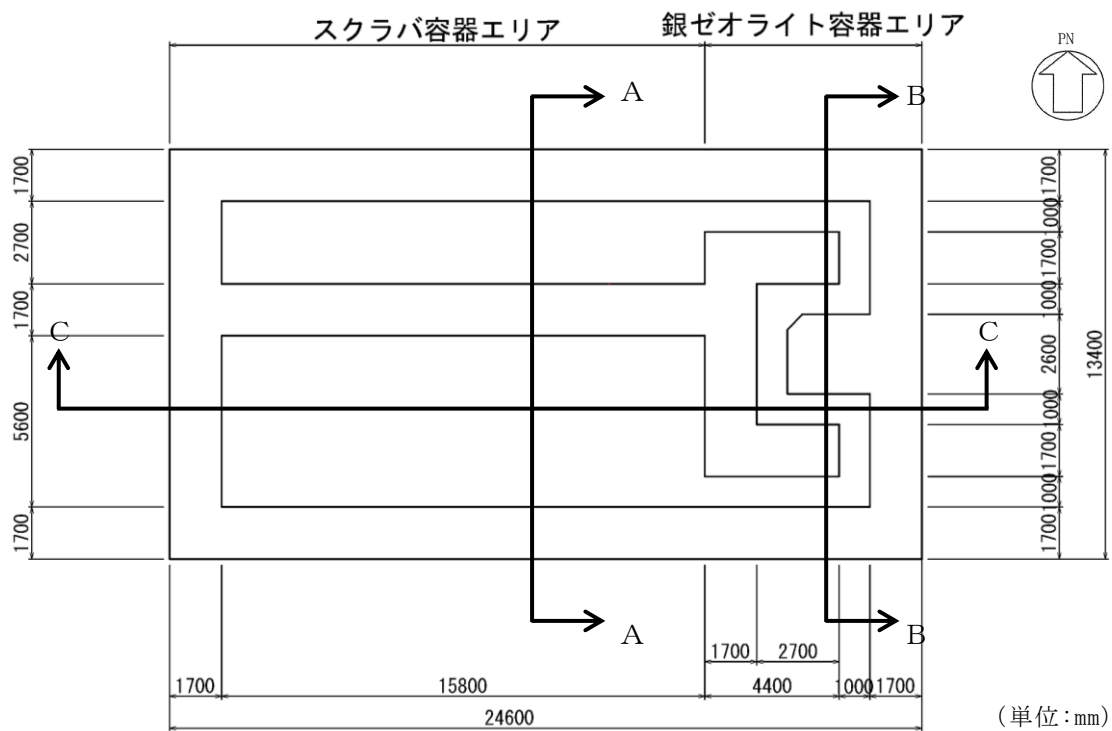


図2-14 第1ベントフィルタ格納槽 平面図

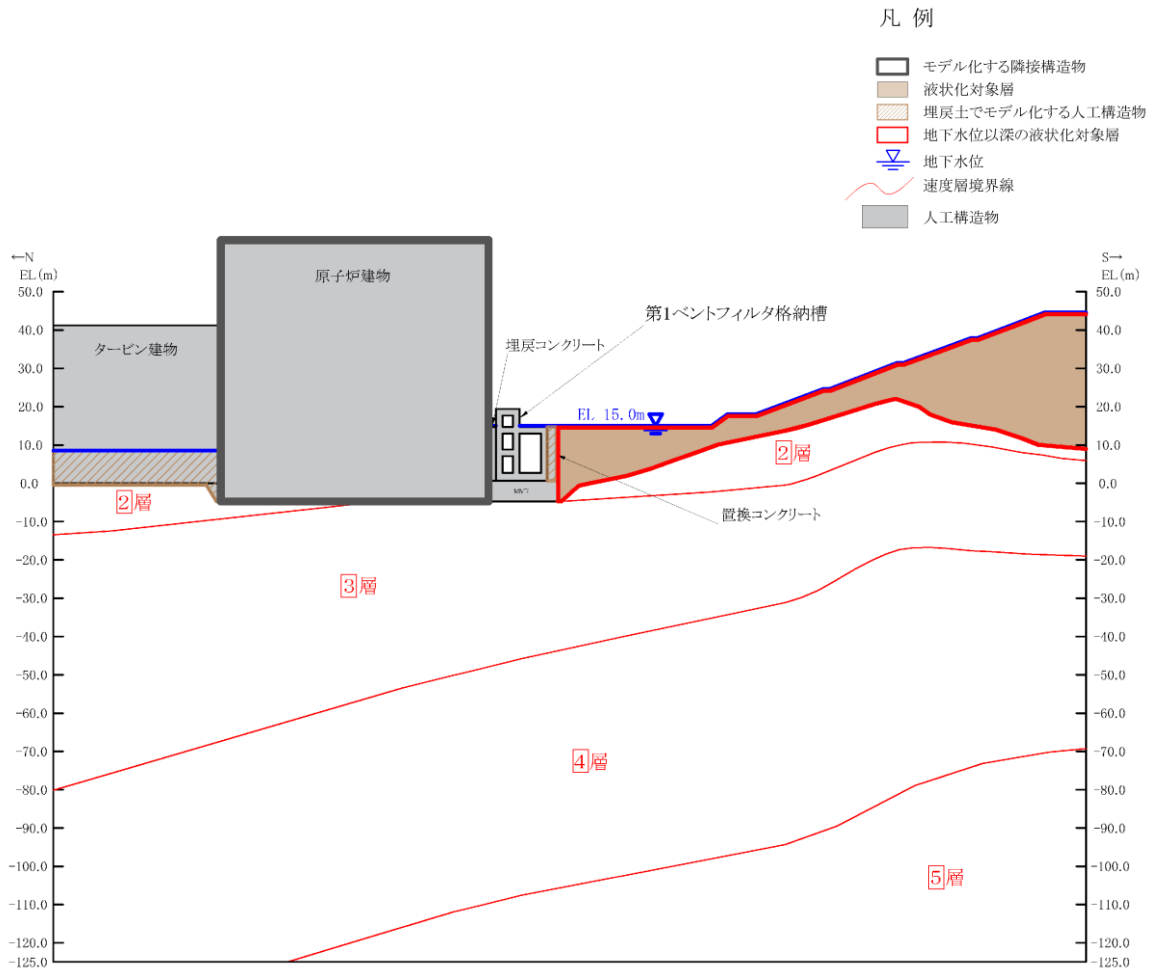
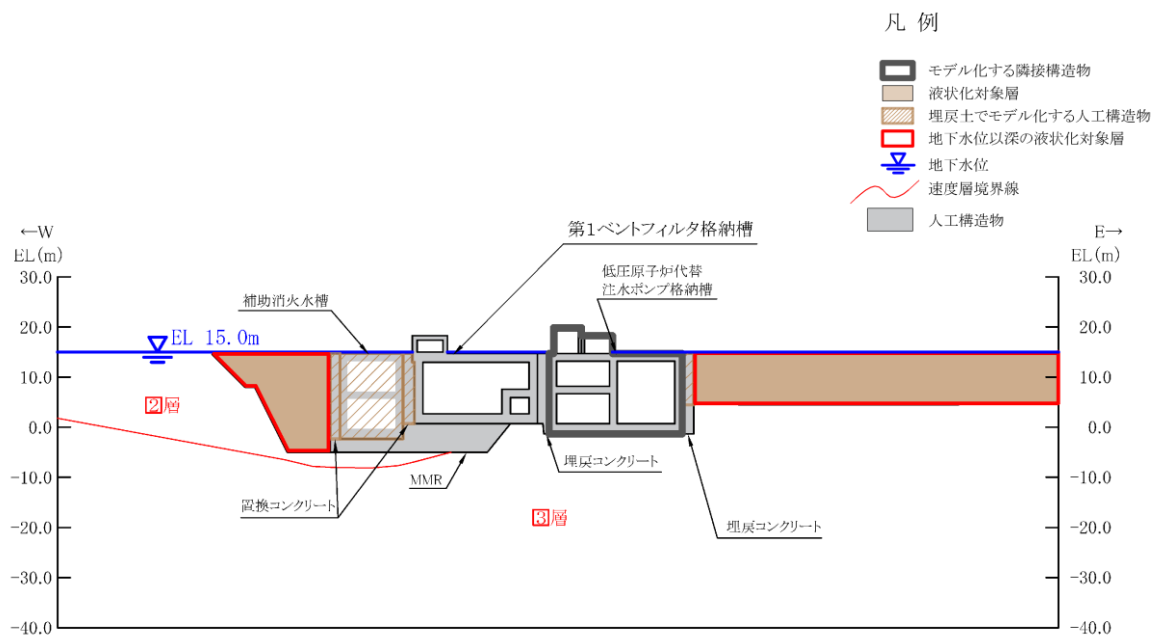
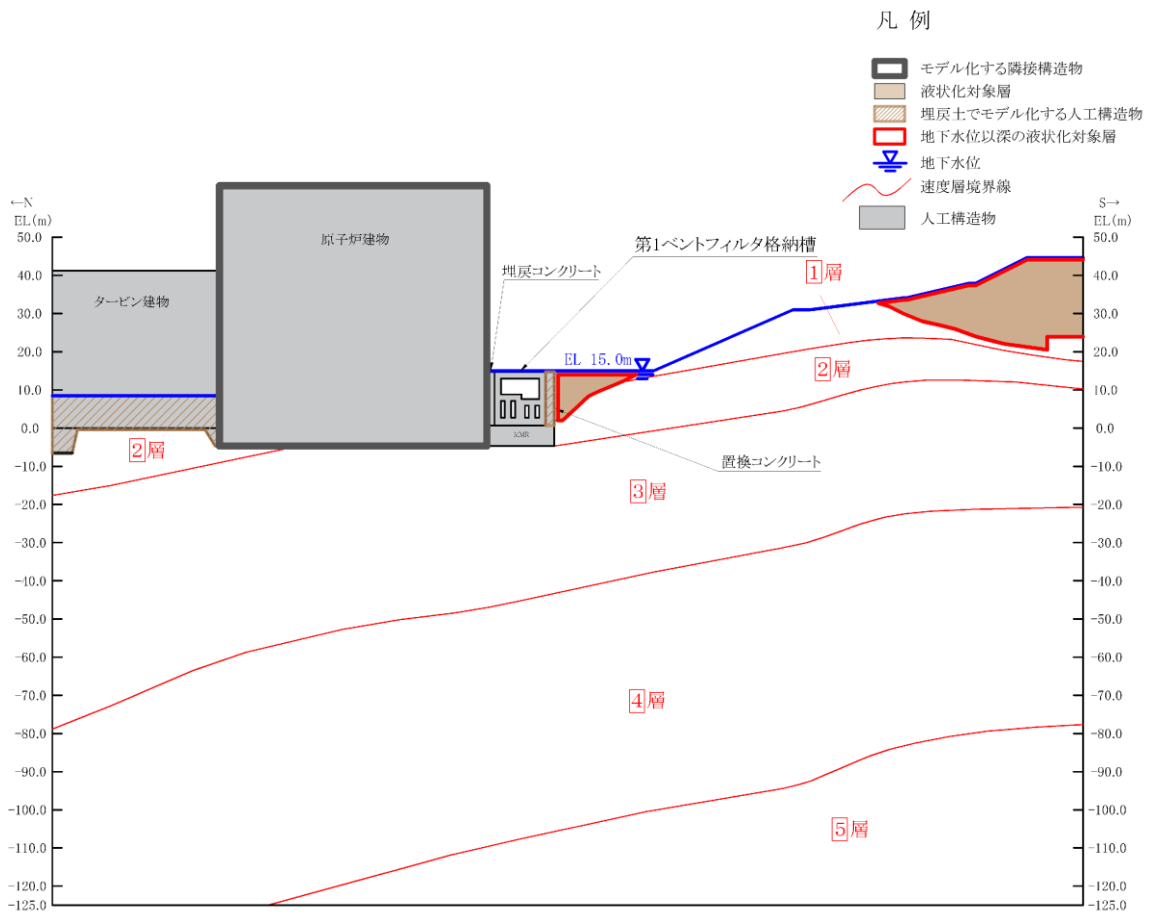
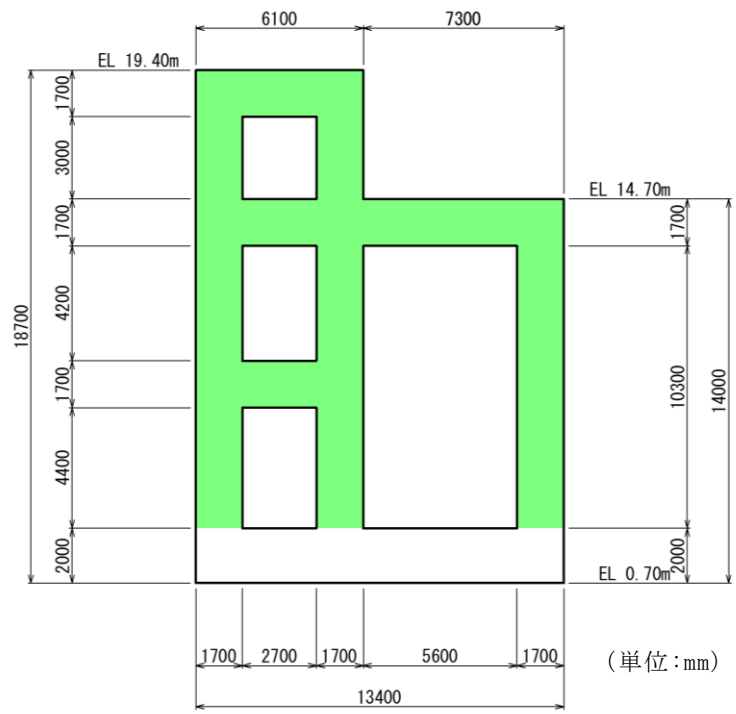


図 2-15 第 1 ベントフィルタ格納槽断面図 (A-A 断面位置)

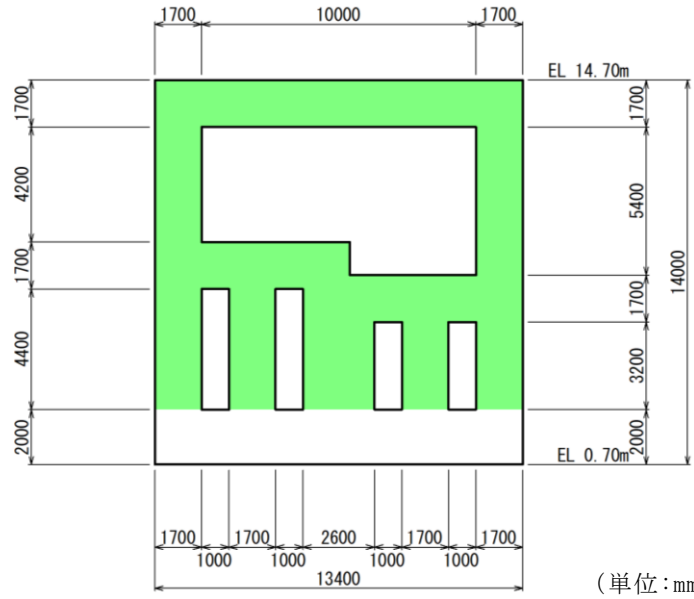




■ : 遮蔽壁又は遮蔽床

(第1 ベントフィルタ格納槽遮蔽)

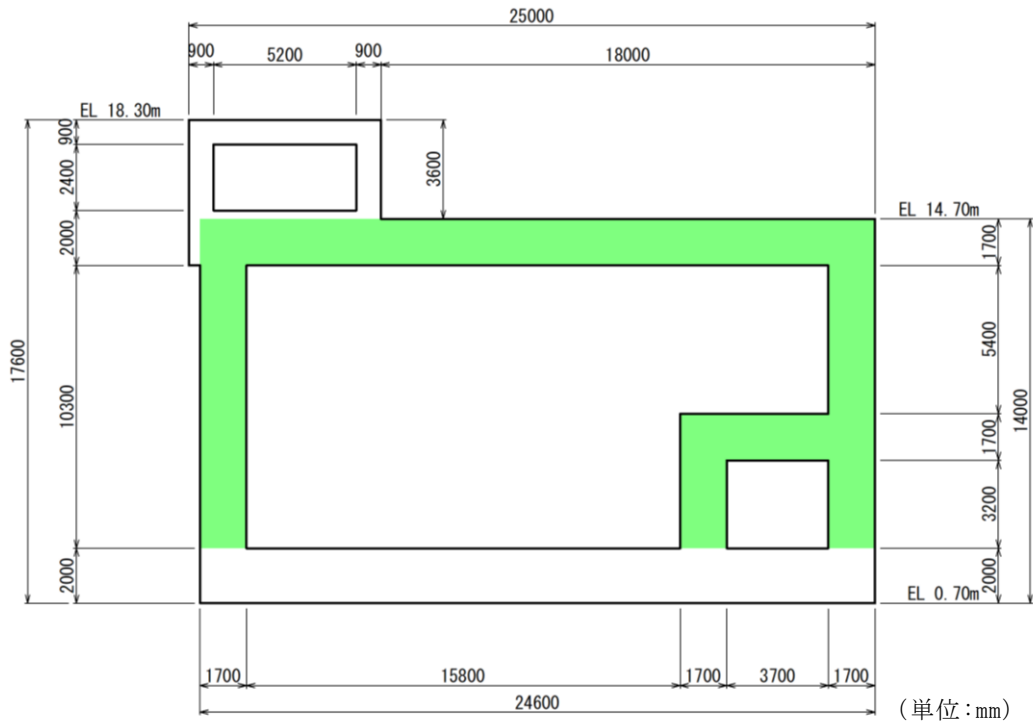
図 2-18 第1 ベントフィルタ格納槽 断面図 (A-A 断面位置)



■ : 遮蔽壁又は遮蔽床

(第1 ベントフィルタ格納槽遮蔽)

図 2-19 第1 ベントフィルタ格納槽 断面図 (B-B 断面位置)



■ : 遮蔽壁又は遮蔽床

(第1 ベントフィルタ格納槽遮蔽)

図 2-20 第1 ベントフィルタ格納槽 断面図 (C-C 断面位置)



#### 2.2.4 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の平面図を図2-21に、地質断面図を図2-22～図2-24に、断面図を図2-25～図2-27に示す。評価対象断面は、安全対策工事着工前のA-A断面、B-B断面及びC-C断面とする。

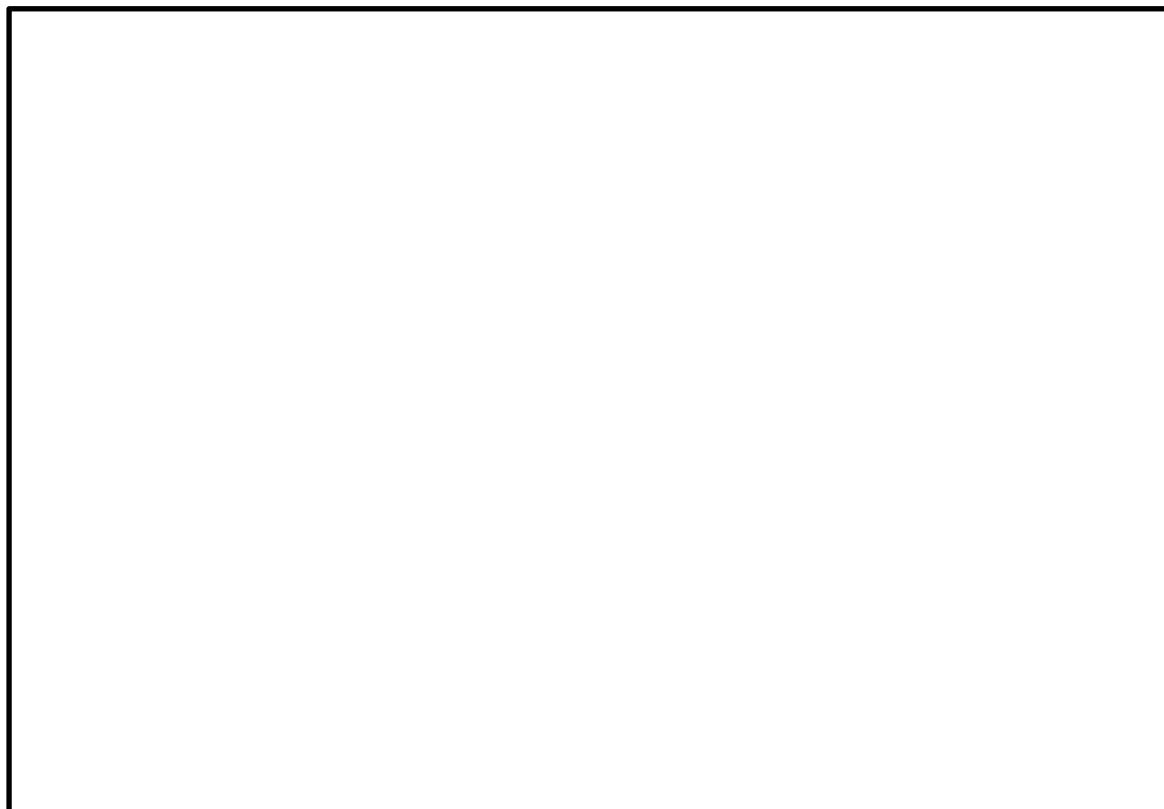


図2-21 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 平面図

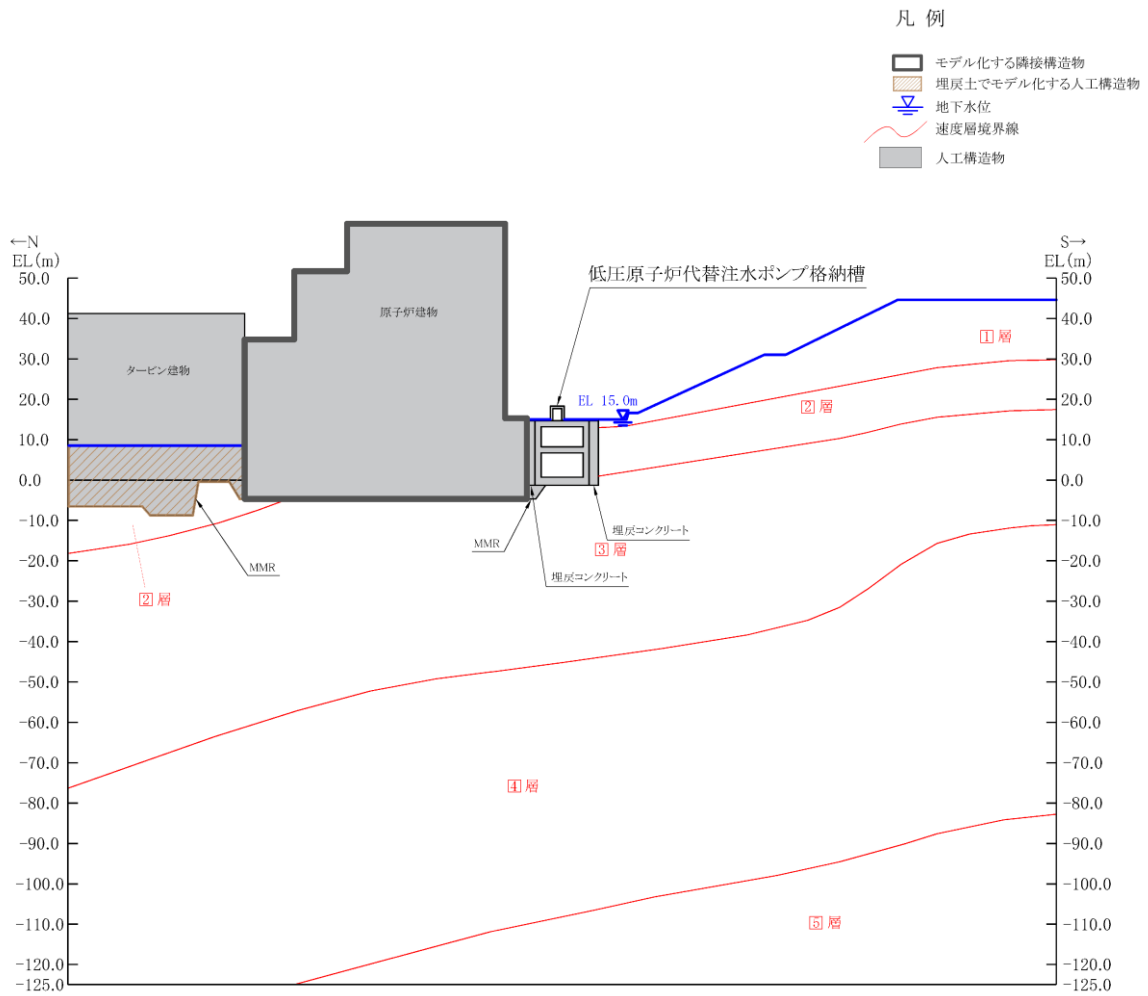


図 2-22 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽断面図 (A-A 断面位置)

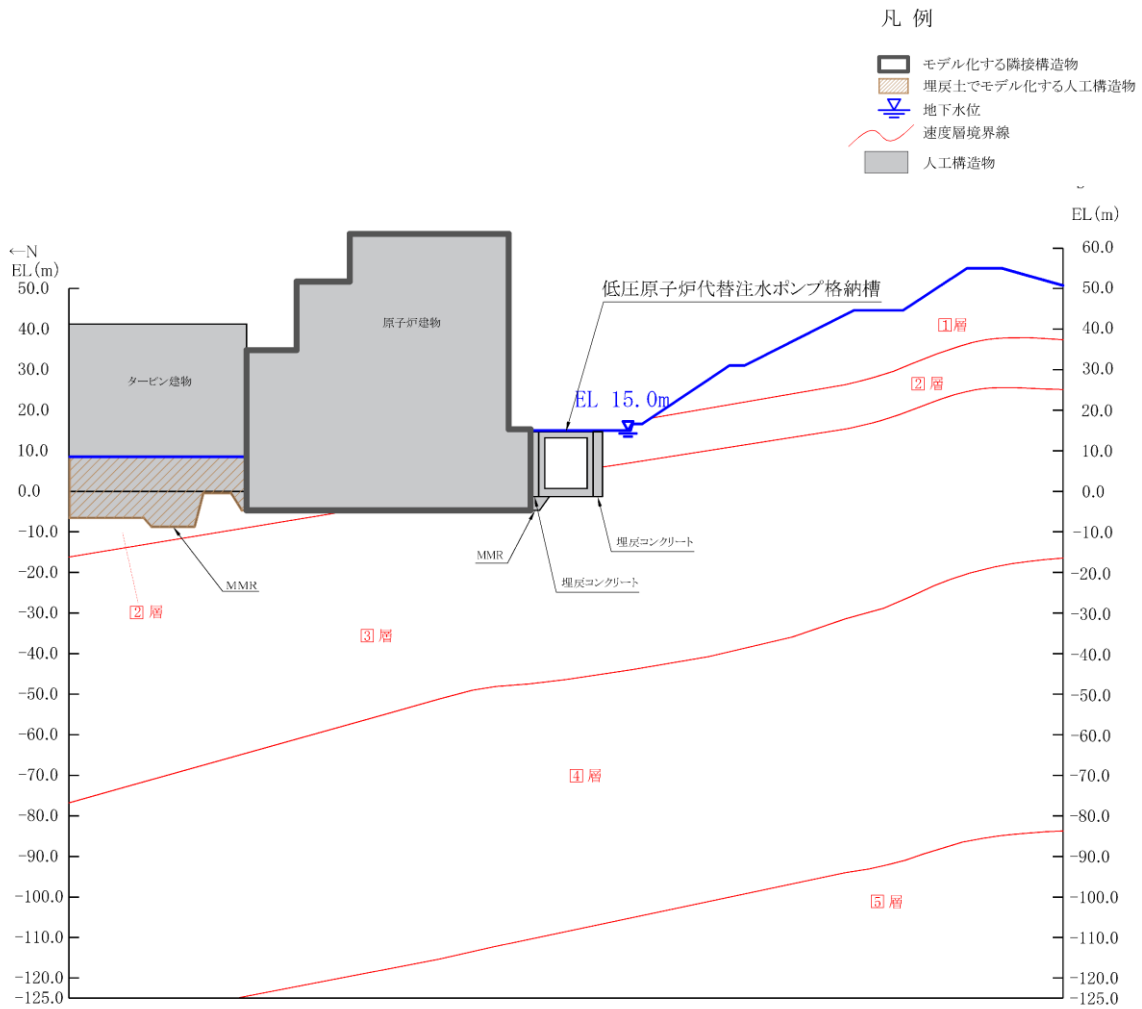


図 2-23 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (B-B 断面位置)

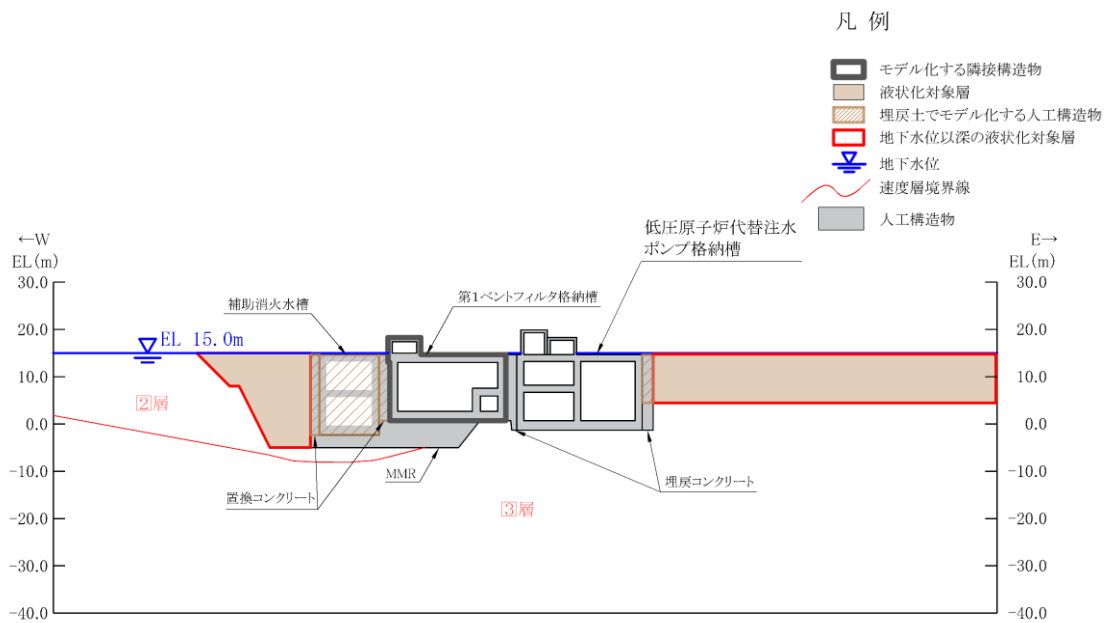


図 2-24 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (C-C 断面位置)

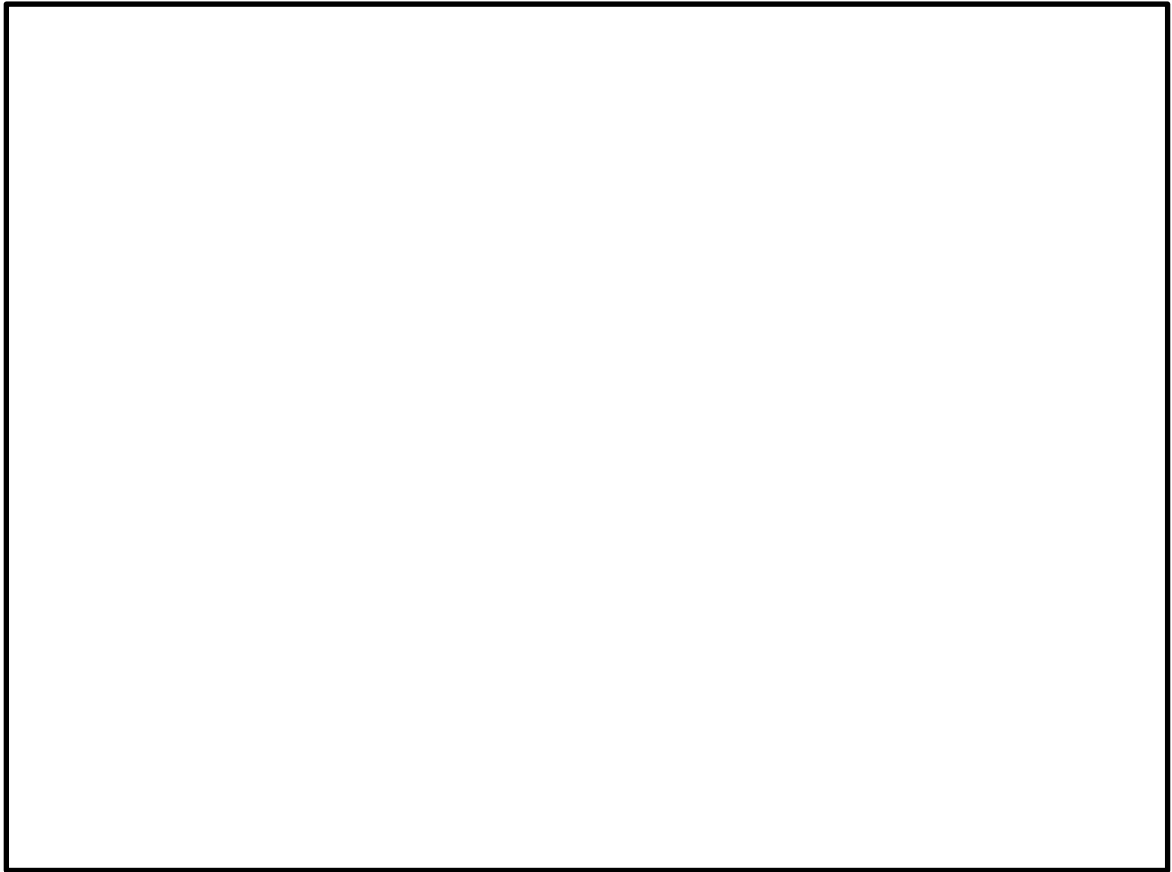
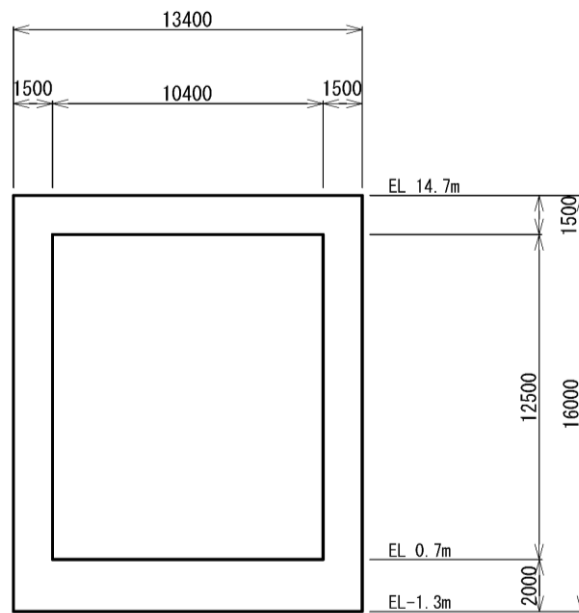


図 2-25 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (A-A 断面)



(単位: mm)

図 2-26 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (B-B 断面)

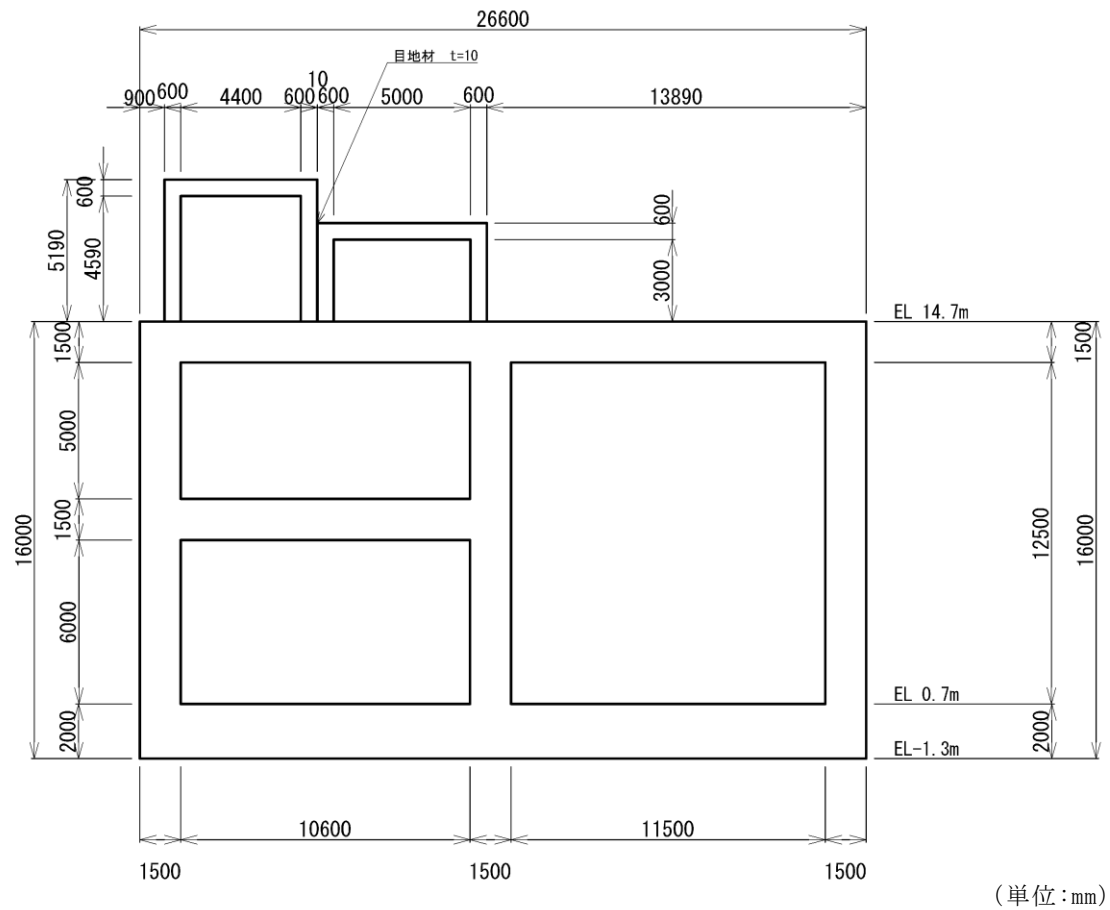


図 2-27 低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽 断面図 (C-C 断面)

## 2.3 評価条件

### 2.3.1 荷重・重量

表 2-1 に、上載土の荷重及び構造物の重量に関する評価条件を示す。

なお、上載土の荷重及び構造物の自重以外の重量（機器・配管荷重等）については、保守的に考慮しないこととする。

表 2-1 荷重・重量に関する評価条件

種別	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
上載土（地下水位以浅）	19.6
上載土（地下水位以深）	20.7
地下水	10.1*
鉄筋コンクリート	24.0

注記\*：保守的に海水の単位体積重量 10.1kN/m<sup>3</sup> を使用する。

### 2.3.2 構造物のせん断抵抗

本評価においては、せん断抵抗  $Q_s$  及び構造物側面の摩擦抵抗  $Q_B$  は保守的に 0 とする。

### 2.3.3 揚圧力

構造物底面に作用する揚圧力のうち、静水圧による揚圧力  $U_s$  は表 1-1 に示す設計地下水位に基づき設定する。なお、本検討は常時の浮上りを対象としているため、過剰間隙水圧による揚圧力  $U_D$  は考慮しない。

### 3. 評価結果

評価結果を表 3-1 に示す。対象構造物は浮上りに対して十分な安全性を有していることを確認した。

表 3-1 浮上り評価結果

施設名称		照査値	判定
B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	A-A断面	1.15 (0.84) *1	○
	B-B断面	0.97	○
屋外配管ダクト (B-ディーゼル燃料貯蔵タンク ～原子炉建物)	A-A断面	0.63	○
	B-B断面	0.73	○
	C-C断面	0.43	○
第1ベントフィルタ格納槽	A-A断面	0.62	○
	B-B断面	0.62	○
	C-C断面	0.93	○
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	A-A断面	0.84	○
	B-B断面	1.03 (0.87) *2	○
	C-C断面	0.98	○

注記\*1：構造物内に充填された乾燥砂を含んだ場合の照査値。乾燥砂の諸元については、図 3-1 参照

\*2：構造物内に内包された淡水を含んだ場合の照査値。内水位は運用上の下限値である EL 4.65m とし、単位体積重量は 9.81 (kN/m<sup>3</sup>) としている。



図 3-1 B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽 (A-A断面) に充填された乾燥砂の諸元

参考資料 1 2 後施工せん断補強工法の適用性について



参考資料 1 2 - 1

後施工せん断補強工法（PHb 工法）の適用性について

## 目 次

1. 概要	1
2. PHb 工法について	14
2.1 PHb 工法を適用した部位	14
2.2 PHb 工法の概要	14
3. 建設技術審査証明報告書の概要	16
3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	16
3.2 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲	17
3.3 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法	18
3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法	18
3.3.2 使用材料・強度	38
3.3.3 構造部材の評価	41
3.3.4 構造細目	43
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認	44
3.4.1 施工の確実性	44
3.4.2 施工の容易性	44
3.4.3 施工手順の設定	44
4. 島根 2 号機における PHb 工法の適用性の確認	47
4.1 適用性確認フロー	47
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定	49
4.3 ①適用性確認項目の抽出	50
4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲及び 先行原子力発電所における審査実績の確認	52
4.5 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認	59
4.5.1 せん断補強効果の確認内容	59
4.5.2 せん断補強効果の確認	59
4.6 ④PHb の施工精度に影響を与える項目の確認	59
4.6.1 削孔方法	59
4.6.2 削孔角度	61
4.6.3 削孔位置	62
4.6.4 グラウトの充てん性	63
4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認	67
4.7.1 施工実績の整理	67
4.7.2 過去の地震の経験事例	70
4.7.3 レベル 2 地震動を対象とした設計事例	73
4.7.4 後施工せん断補強工法の比較	73
4.7.5 後施工せん断補強筋に関する研究事例	76
4.8 島根 2 号機における PHb 工法の保守性と設計上の制限の整理	85

4.8.1	PHb 工法の保守性	85
4.8.2	島根 2 号機において PHb により耐震補強を行うにあたっての保守性	85
4.8.3	島根 2 号機において PHb により耐震補強を行うにあたっての設計上の制限	86
4.8.4	PHb 工法によるせん断補強の設計検討フロー	87
4.9	PHb の適用性確認結果	88

添付資料 1            建設技術審査証明書

添付資料 2            島根 2 号機における部材諸元他の適用性の検討

## 1. 概要

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等には、基準地震動  $S_s$  の大加速度化に伴い、せん断破壊に対して耐震補強工事が必要となる既設鉄筋コンクリート構造物がある。

せん断破壊に対する補強工法としては、部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法の他に、増厚工法や地盤改良工法等があるが、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等については、部材の耐力を直接向上させる合理的な補強工法で、後施工せん断補強工法の一つである、Post-Head-bar（以下「PHb」という。）工法を採用している。（表 1-1 参照）

PHb 工法は、図 1-1 に示すとおり、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、部材を削孔後、その孔内に PHb を挿入し、グラウト充填にて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

PHb による耐震補強の対象となる構造物を表 1-2 に、配置図を図 1-2 に、耐震補強箇所を図 1-3 に示す。図 1-3 に示す PHb による耐震補強箇所は、計算結果を踏まえ、「3.3.4 構造細目」に規定されているとおり、計算上で PHb による補強が必要となる区間の外側の有効高さに等しい区間にも、同量の PHb を配置している。

本資料は、PHb 工法を採用する目的、効果及び島根 2 号機への適用性について説明するものである。

表 1-1 主なせん断補強工法

	従来工法（先施工）	増厚工法	地盤改良工法	後施工せん断補強工法
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋又は配力筋にフックを掛けて定着させる工法。</li> <li>せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物表面にコンクリートを打ち足すことで、断面を増厚する工法。</li> <li>部材厚の増により、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物周辺地盤にセメントミルク等を噴射し、地盤改良体を構築する工法。</li> <li>地盤改良を行うことにより、地震時荷重（主に土圧）が低減され、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にせん断補強筋を差し込み充てん材で固定する工法。</li> <li>せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>
図				
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>島根 2 号機他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>島根 2 号機他、一般土木構造物において施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>島根 2 号機他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>美浜 3 号炉にて、工認実績が有る。（PHb 工法）</li> </ul>

表 1-2 PHb による耐震補強対象の構造物

構造物 名称	部 材	部材厚 (mm)	PHb 径	せん断 スパン比*
取水槽	底版	1,000~2,000	D22, D25, D29	1.99~37.75
	中床版	1,000	D22, D29	1.96~15.32
	側壁	700~2,000	D22, D25, D29	1.38~21.20
	導流壁	1,200	D22	9.11~13.52
	妻壁	700~2,000	D22, D25	3.88~51.59
1号機取水槽	中床版	1,000	D19	4.33~9.99
	妻壁	1,000	D29	5.42~7.26
復水貯蔵タンク遮蔽壁	遮蔽壁	500	D13	19.05~28.57
補助復水貯蔵タンク遮蔽壁	遮蔽壁	300	D13, D19, D22	1.74~52.17
トーラス水受入タンク遮蔽壁	遮蔽壁	300	D13	1.74~52.17

注記\*：せん断スパン比： $a/d$ （ $a$ ：支間長， $d$ ：有効高さ）

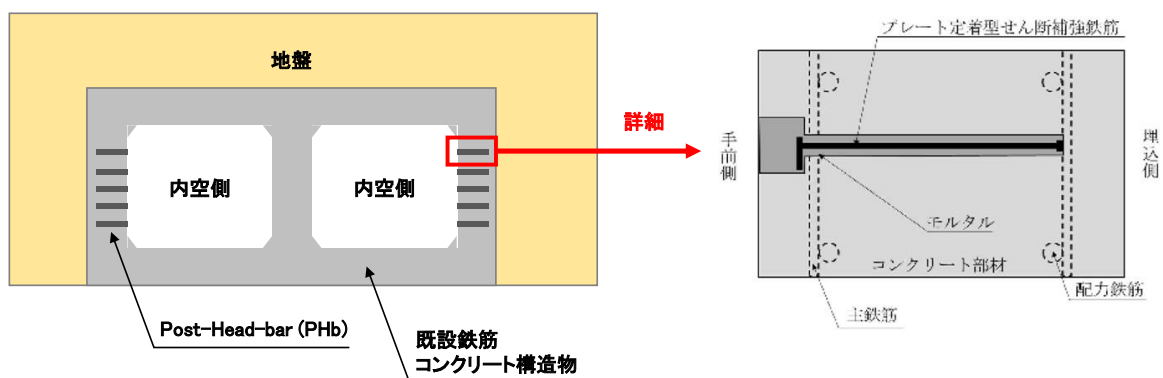


図 1-1 PHb 工法の概要図

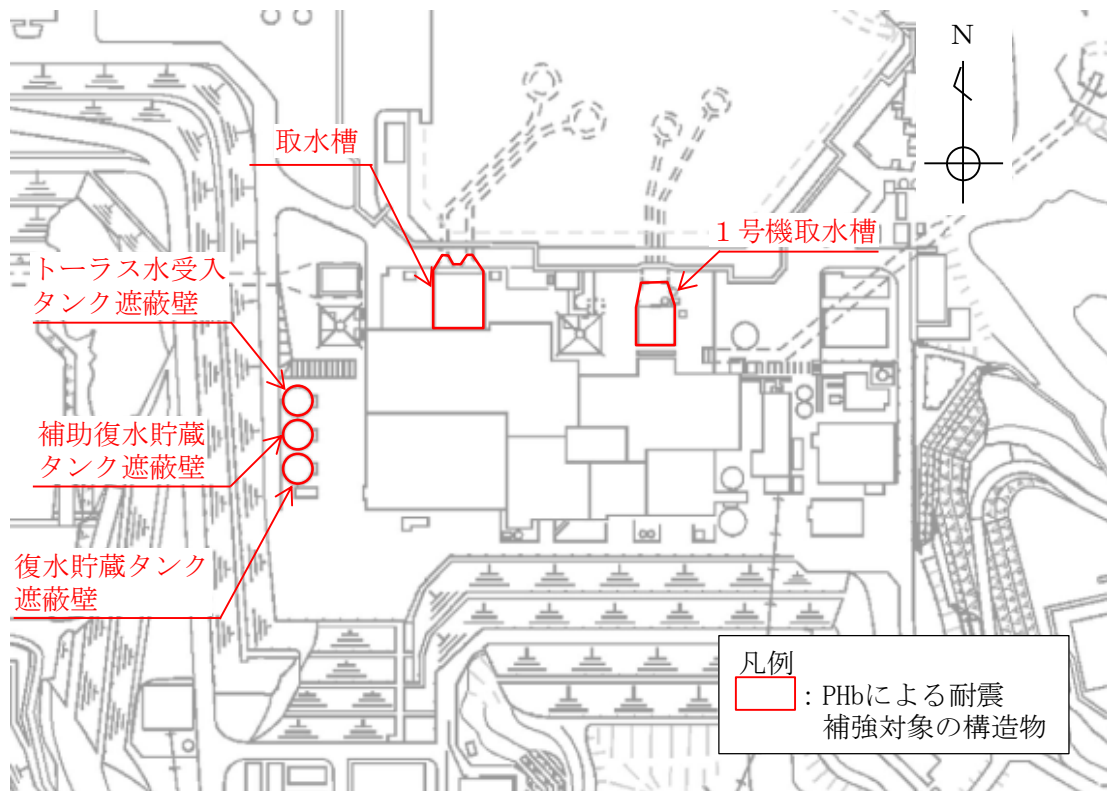


図 1-2 PHb による耐震補強対象の構造物 (配置図)

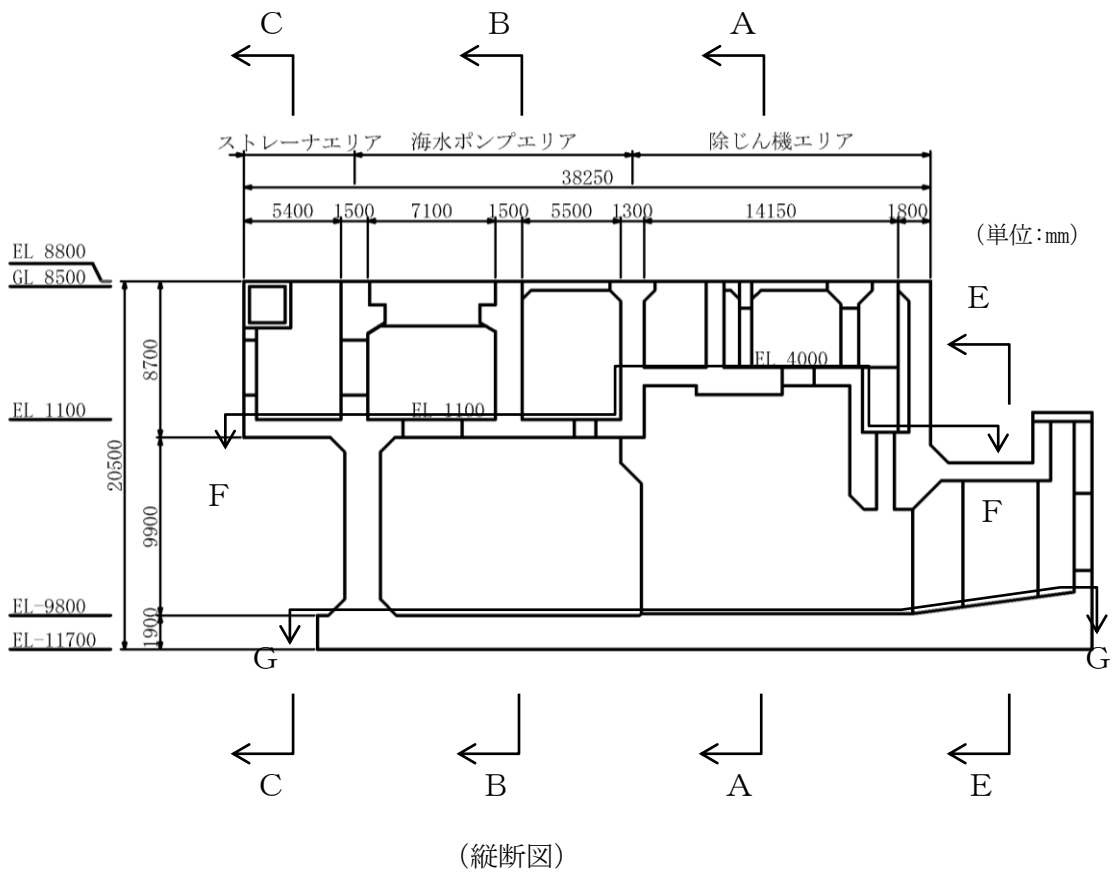
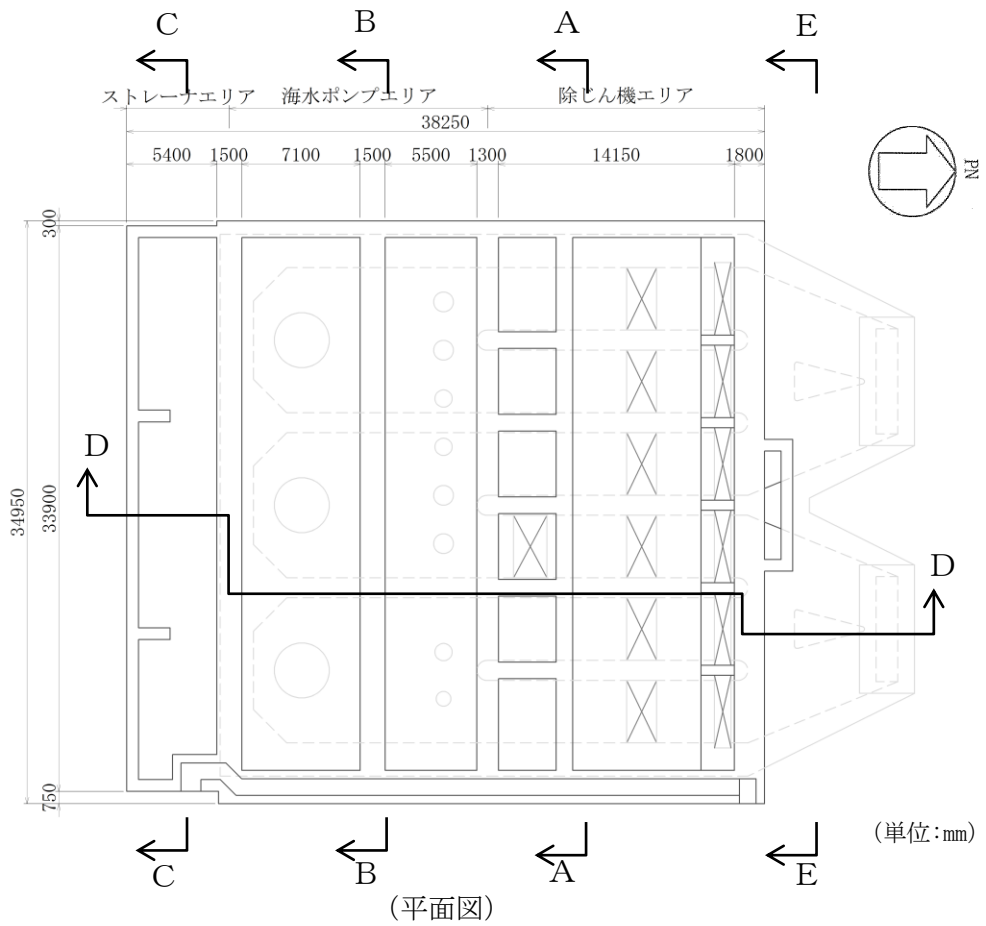
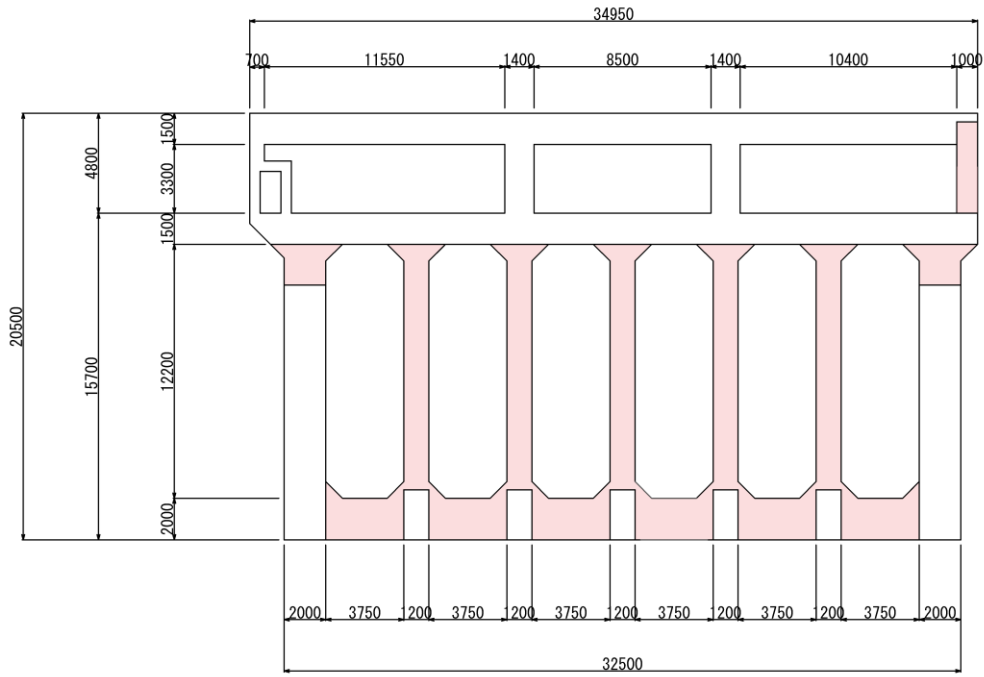


図 1-3(1) PHb による耐震補強対象の構造物 (取水槽)

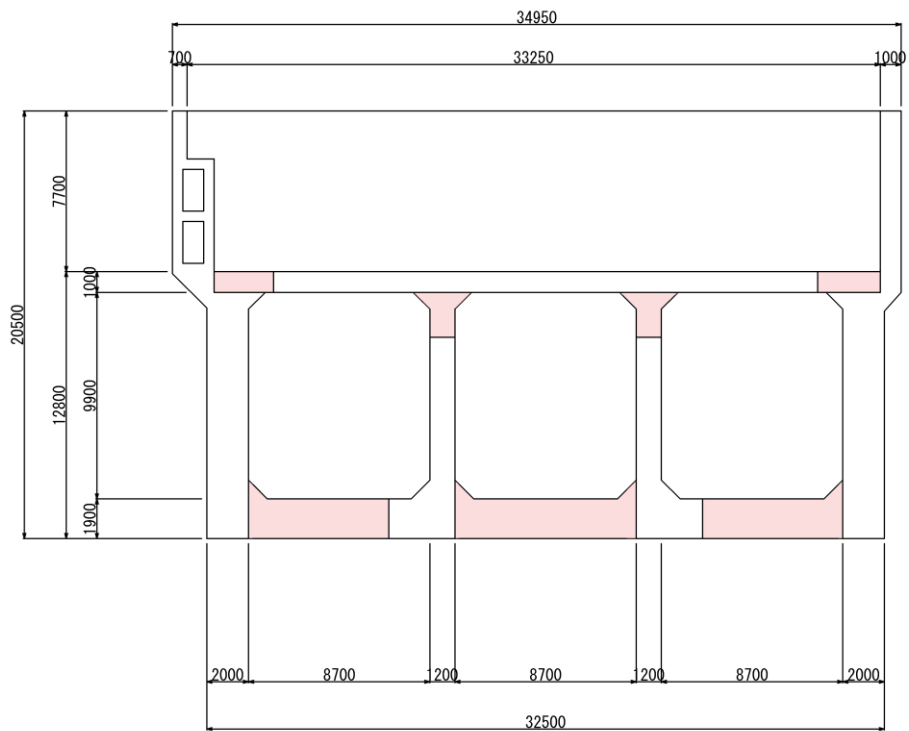
(参考) 12-1-4



(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(A-A断面)



(単位 : mm)

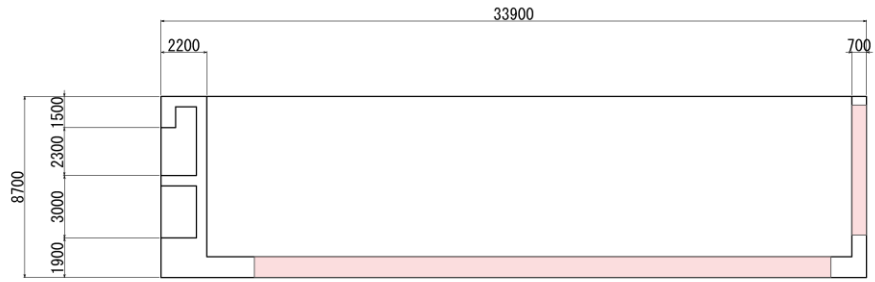
■ : PHb 工法適用箇所

(B-B断面)

図 1-3(2) PHb による耐震補強対象の構造物 (取水槽)

(参考) 12-1-5

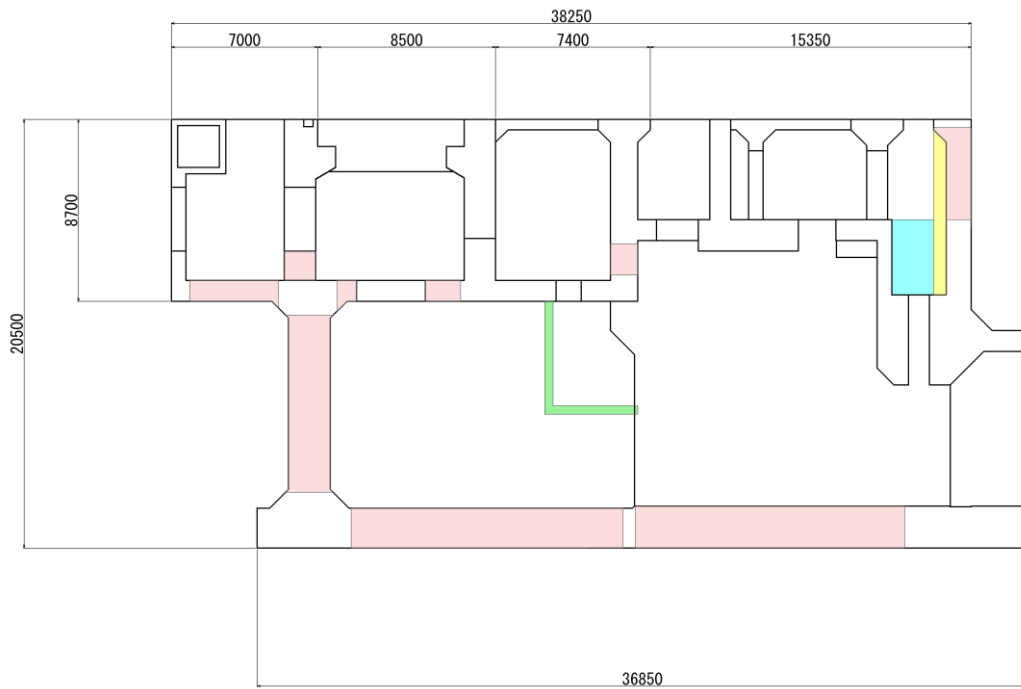




(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(C-C断面)



(単位: mm)

■ : PHb 工法適用箇所

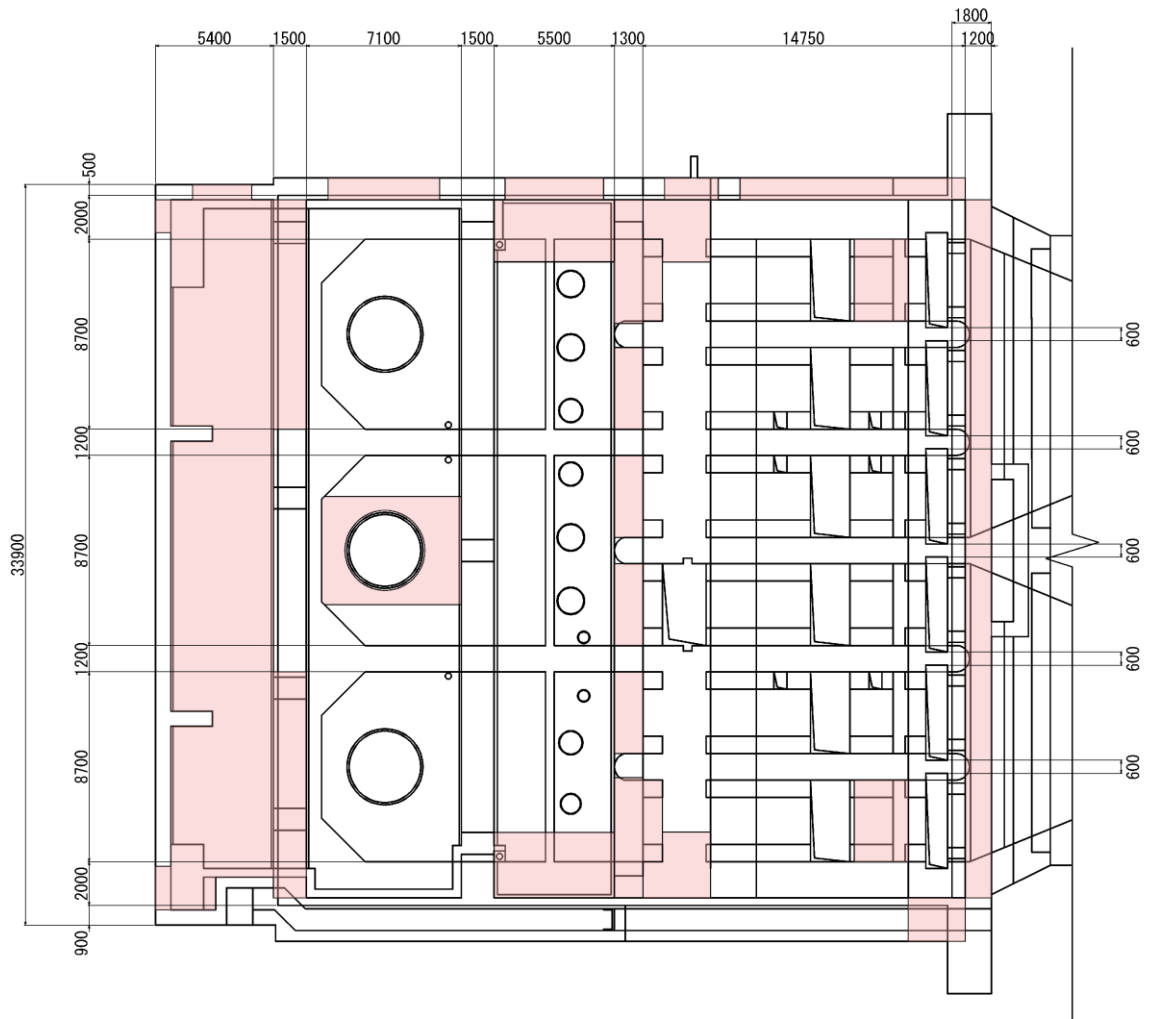
■ : 部材追加箇所 (控壁)

■ : RSW ポンプ棚撤去箇所

■ : 部材追加箇所 (北妻壁)

(D-D断面)

図 1-3(3) PHb による耐震補強対象の構造物 (取水槽)

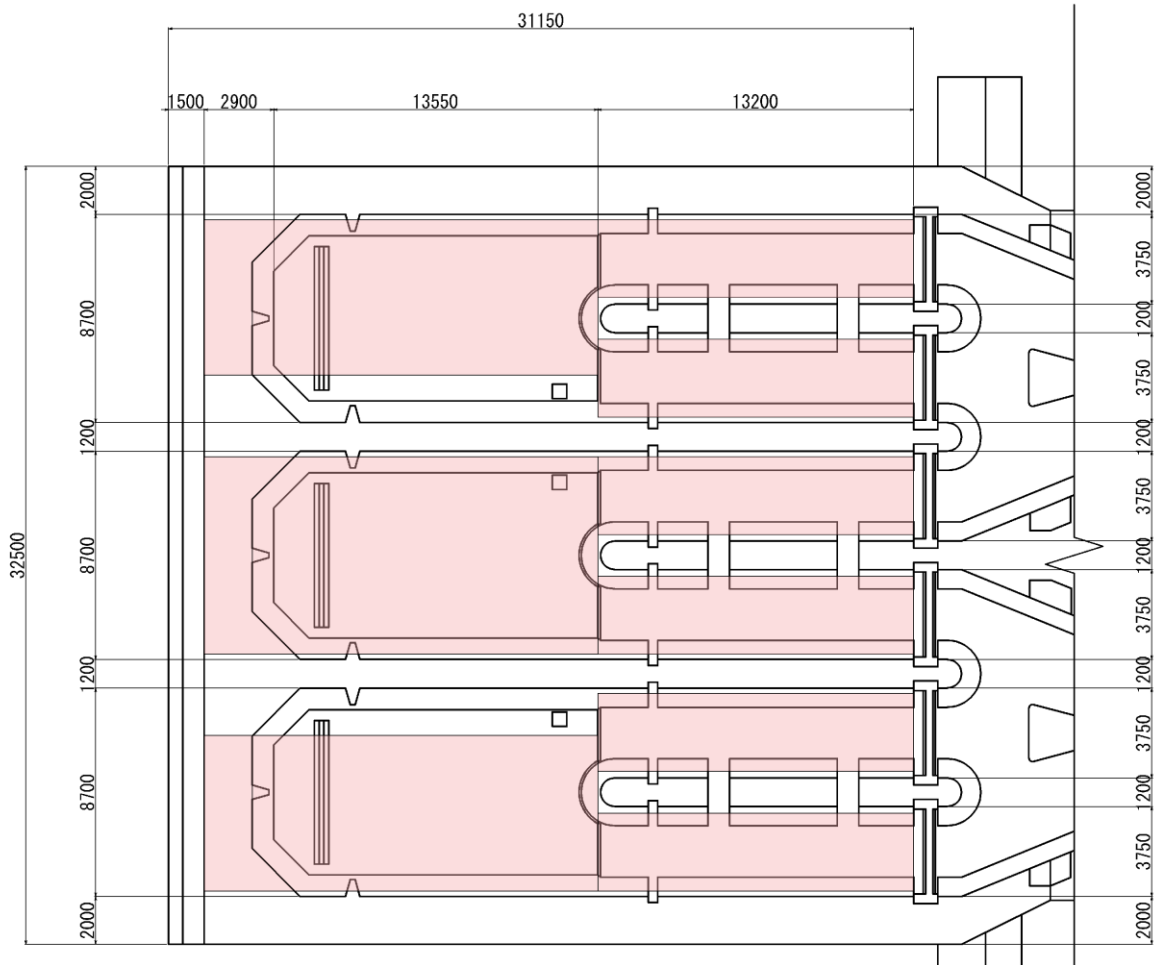


(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(F - F 断面)

図 1-3(4) PHb による耐震補強対象の構造物 (取水槽)

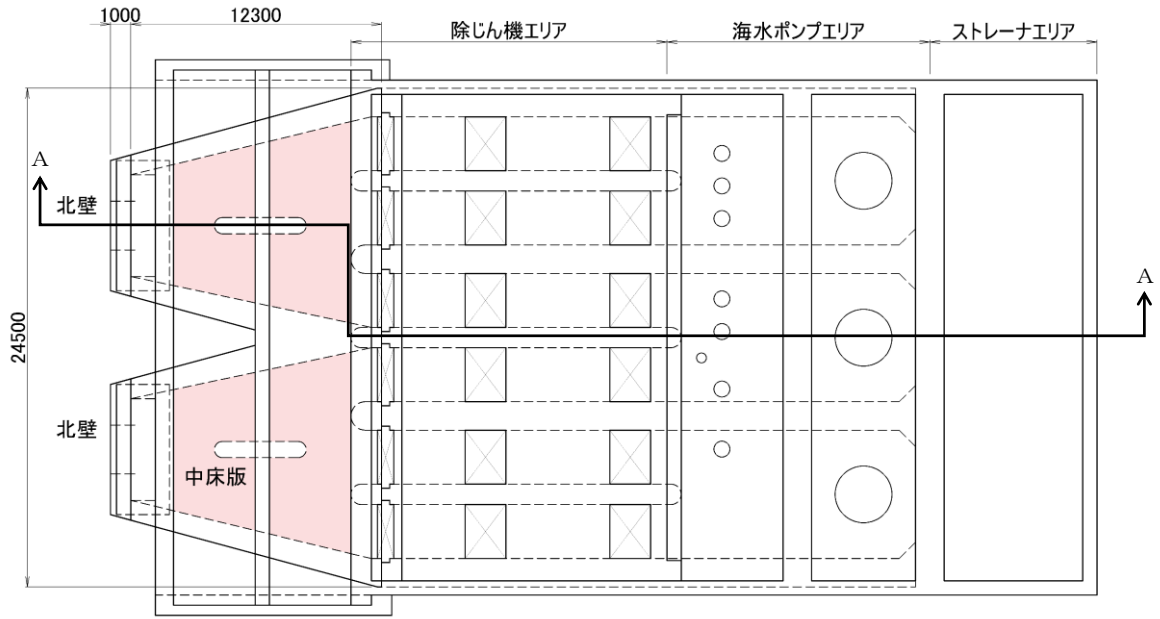


(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(G-G断面)

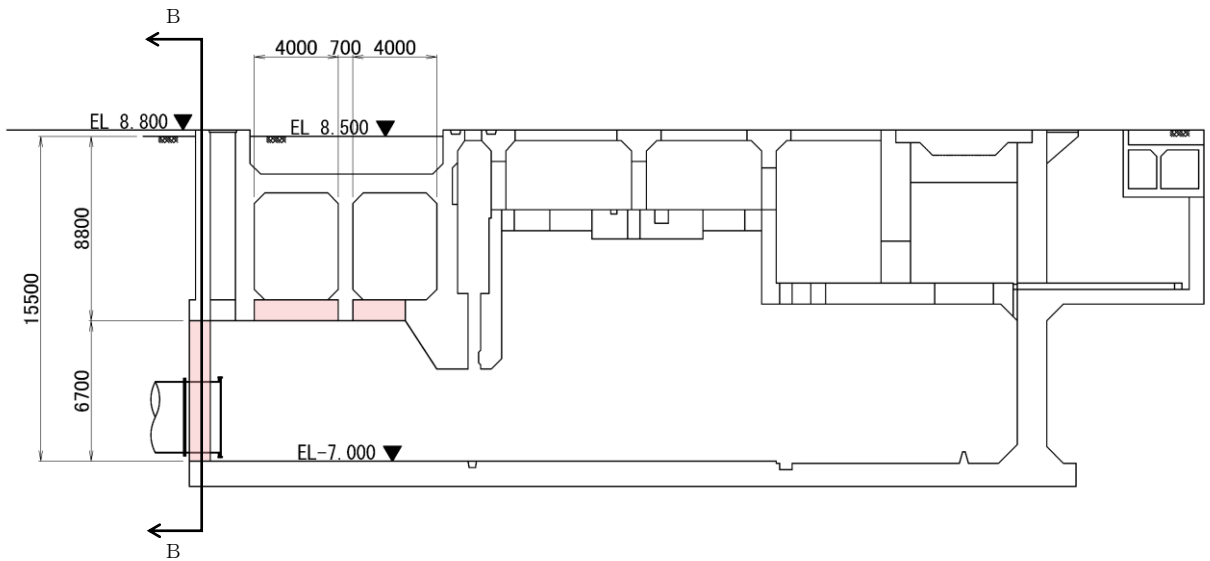
図 1-3(5) PHb による耐震補強対象の構造物 (取水槽)



(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(平面図)

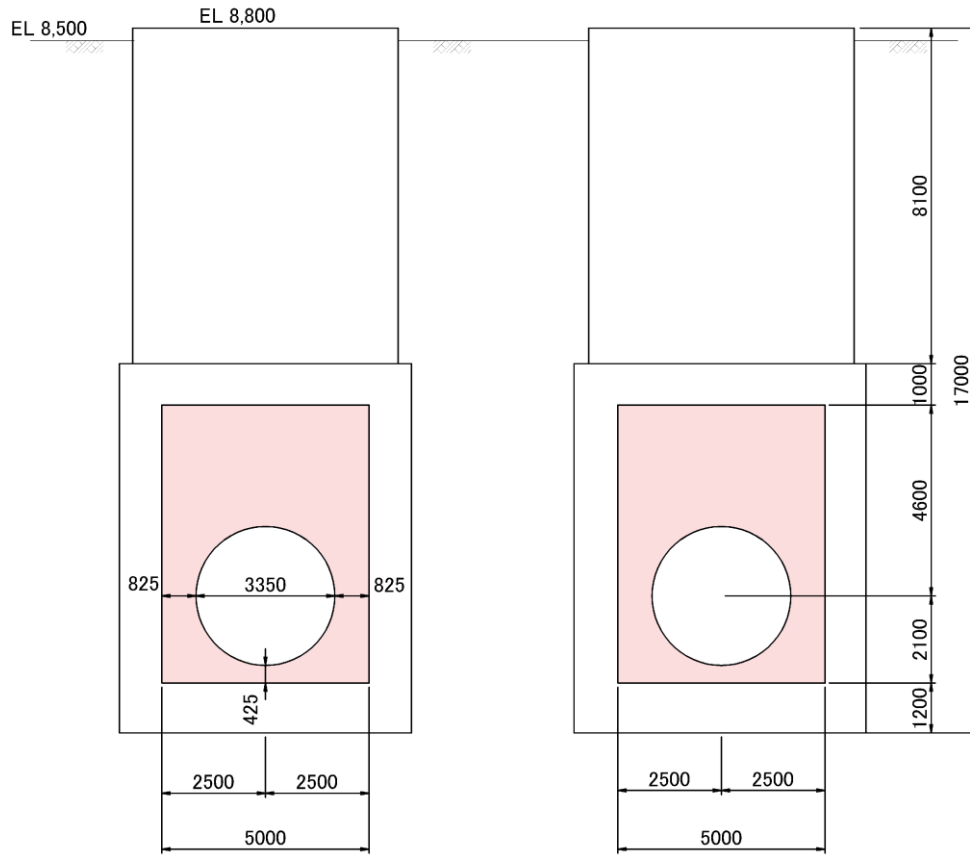


(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

(A-A断面)

図 1-3(6) PHb による耐震補強対象の構造物 (1号機取水槽)

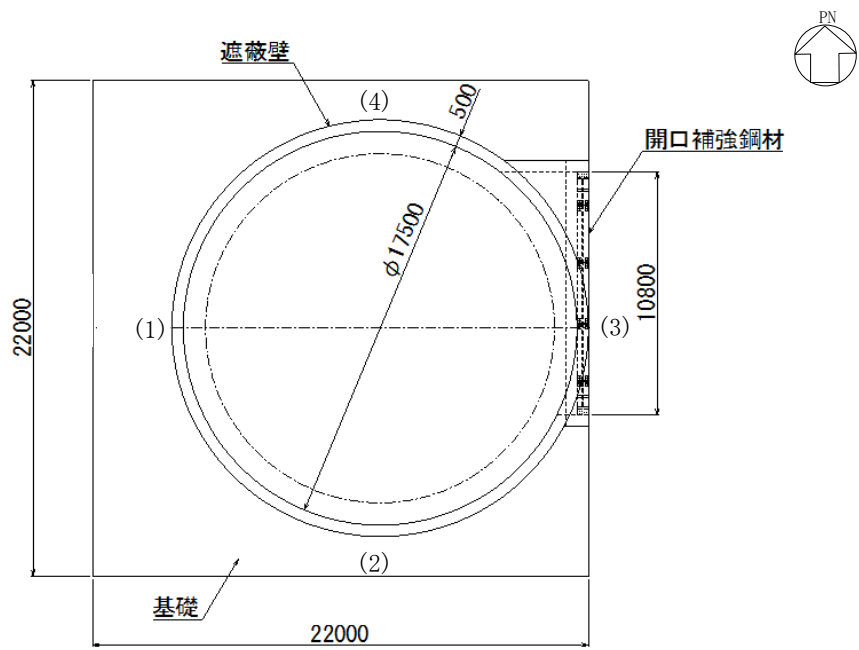


(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

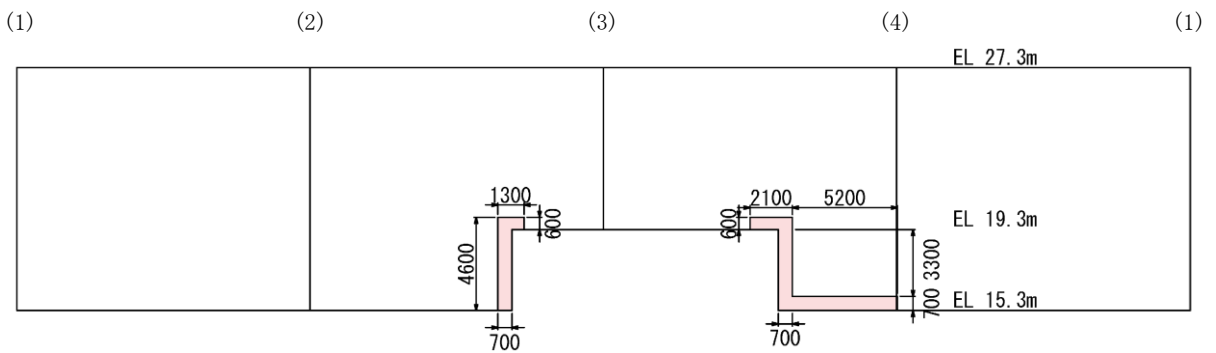
(B - B 断面)

図 1-3(7) PHb による耐震補強対象の構造物 (1号機取水槽)



(単位 : mm)

(平面図)

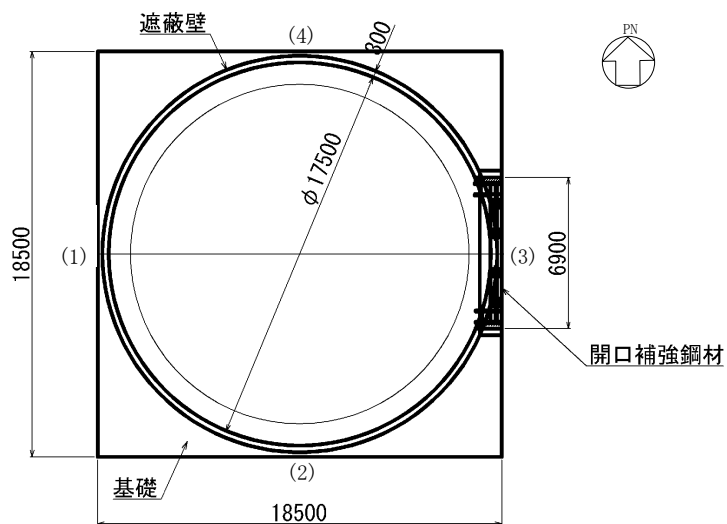


(単位 : mm)

■ : PHb 工法適用箇所

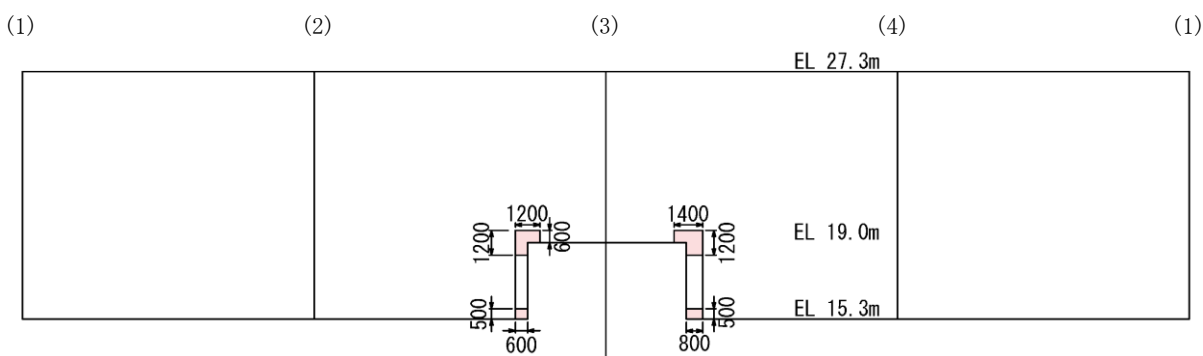
(展開図)

図 1-3(8) PHb による耐震補強対象の構造物 (復水貯蔵タンク遮蔽壁)



(単位：mm)

(平面図)

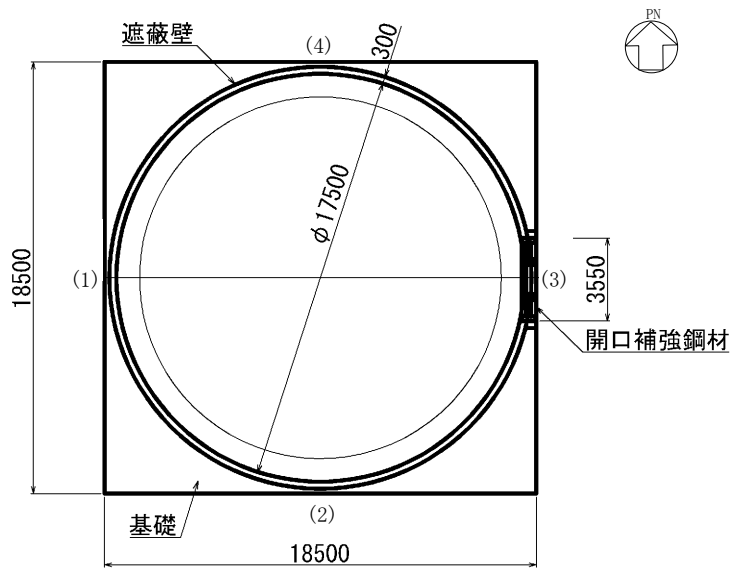


(単位：mm)

■：PHb 工法適用箇所

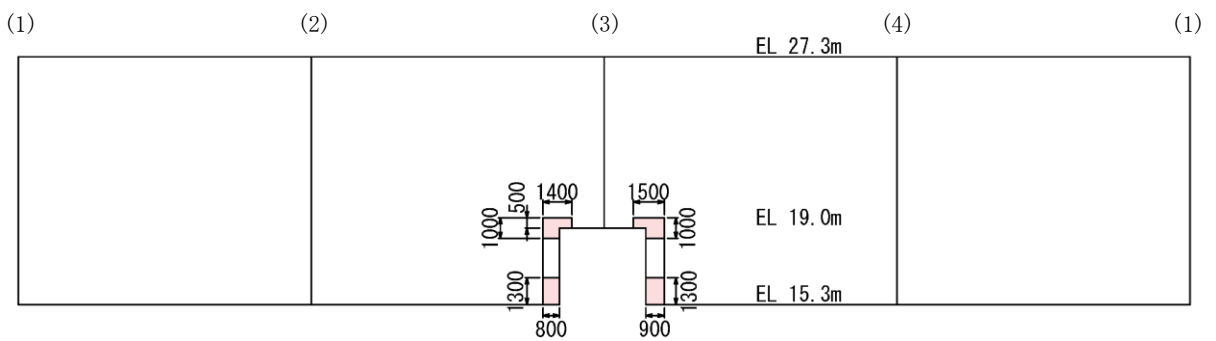
(展開図)

図 1-3 (9) PHb による耐震補強対象の構造物 (補助復水貯蔵タンク遮蔽壁)



(単位：mm)

(平面図)



(単位：mm)

■：PHb 工法適用箇所

(展開図)

図 1-3(10) PHb による耐震補強対象の構造物 (トーラス水受入タンク遮蔽壁)



## 2. PHb 工法について

### 2.1 PHb 工法を適用した部位

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等においては、基準地震動発生時に屋外重要土木構造物等としての機能（設計基準対象施設のうち耐震 S クラス施設の間接支持機能、重大事故等対処施設の間接支持機能、非常時における海水の通水機能、貯水機能及び止水機能）を維持するために、耐震安全性を確保する必要がある。そのため、屋外重要土木構造物等の一部の部材においては、せん断に対する安全性を確保するために、PHb 工法を適用し、せん断耐力の向上を図っている。

PHb 工法を適用した部材は、表 1-2 及び図 1-3 に示すとおりである。

### 2.2 PHb 工法の概要

PHb 工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、PHb を既設の鉄筋コンクリート構造物の部材に挿入・一体化させて、せん断耐力を向上させるものである。PHb は図 2-1 に示すように、手前側に矩形プレートもしくは小型の円形プレートを摩擦接合し、埋込側に小型の円形プレートを摩擦接合した異形鉄筋である。

PHb 工法の具体的な施工方法は、表 2-1 に示すように、既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にせん断補強材である PHb を差し込み、充てん材で固定することにより構造躯体と一体化を図っており、従来工法（先施工）とは施工方法が異なる。

また、PHb 工法は表 2-2 に示すように、「PHb とコンクリート間の付着」により定着しており、フックを掛けて定着する従来工法（先施工）とは定着機構が異なる。そのため、PHb 工法では設計・照査において、通常の従来工法（先施工）であるせん断補強筋によるせん断耐力に有効性を示す係数（ $\beta_{aw}$ ）を乗じることにより、せん断補強効果を評価している。

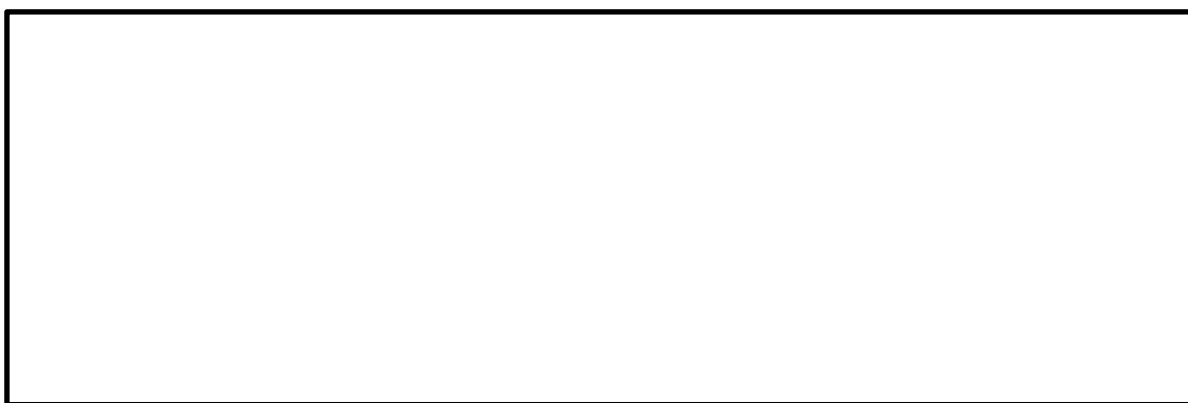


図 2-1 PHb の詳細図

表 2-1 施工方法の違い

--

表 2-2 定着機構の違い

--

### 3. 建設技術審査証明報告書の概要

#### 3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

島根 2 号機のせん断補強が必要な各構造部材に配置した PHb については、一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC\*」という。）の「建設技術審査証明報告書（土木系材料・製品・技術, 道路保全技術） 技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」, 建技審証第 0522 号, 有効期限：2025 年 12 月 20 日」（以下「建設技術審査証明報告書」という。）に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は、添付資料 1「建設技術審査証明書」のとおり、高度な技術を有する第三者機関である PWRC により審査証明を受けており、試験データを用いて、PHb が受け持つせん断耐力の算定方法において、PHb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔及び PHb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。なお、「建設技術審査証明報告書」では、片側からしか補強の施工ができない部材について、PHb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく PHb の配置、PHb 配置位置での削孔方法、削孔内への PHb の固定方法、PHb 設置後の仕上げ等の施工性）を確認しており、それぞれの要素に対して施工上の考慮を示すなど、施工性に関しても審査対象となっている。

また、「建設技術審査証明報告書」では、設計・施工マニュアルが添付され、材料及び施工に関する事項が示されている。

注記\*：PWRC は、国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり、土木に関して、河川、道路、土質・地盤、施工、橋梁等、幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託、さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC では、建設技術審査証明事業を行っており、当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による審査証明委員会を設け、開発の趣旨、開発目標及び技術内容、既存の技術との対比、実績等について審査を行っており、高度な技術を有し、十分な信頼性を有した第三者機関である。

### 3.2 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤等があり部材の片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。PHb が受け持つせん断耐力は鉄筋の材質（SD295, SD345 及び SD390），径（D13～D32）ごとに定め、その値は、先施工のせん断補強鉄筋に PHb のせん断耐力の向上への有効性を示す係数  $\beta_{aw}$  を考慮することにより評価が可能である。

PHb は、主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

また、両側から施工が可能な既設コンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

### 3.3 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法

#### 3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を以下にまとめた。

##### (1) 実験方法

本工法を用いた設計で PHb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の交番載荷試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、PHb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている（図 3-1 参照）。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を表 3-1 に、せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法を図 3-2 に、せん断耐力向上性能試験の加力要領を図 3-3 に示す。



図 3-1 実験方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

表 3-1(1) 各ケースの試験体の諸元（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

--

表 3-1(2) 各ケースの試験体の諸元（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

--

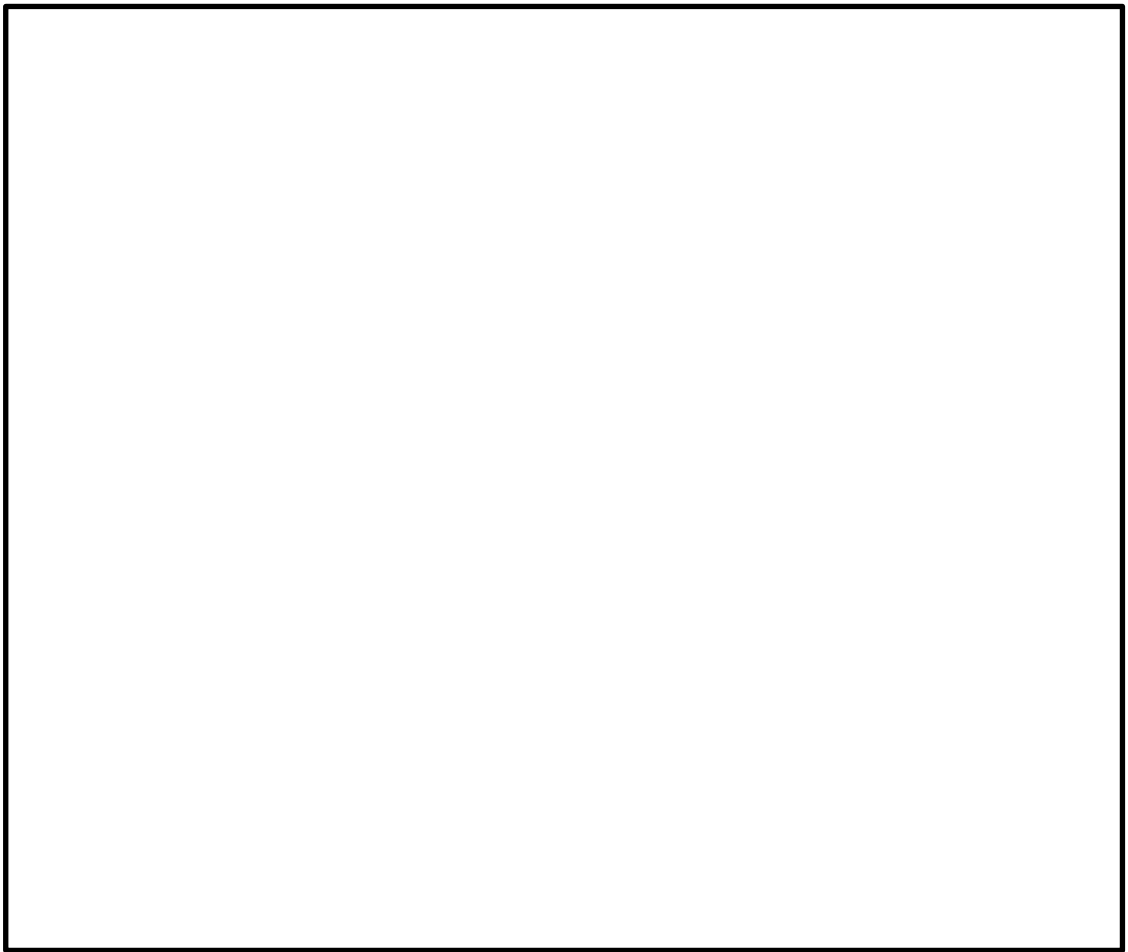


図 3-2(1) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



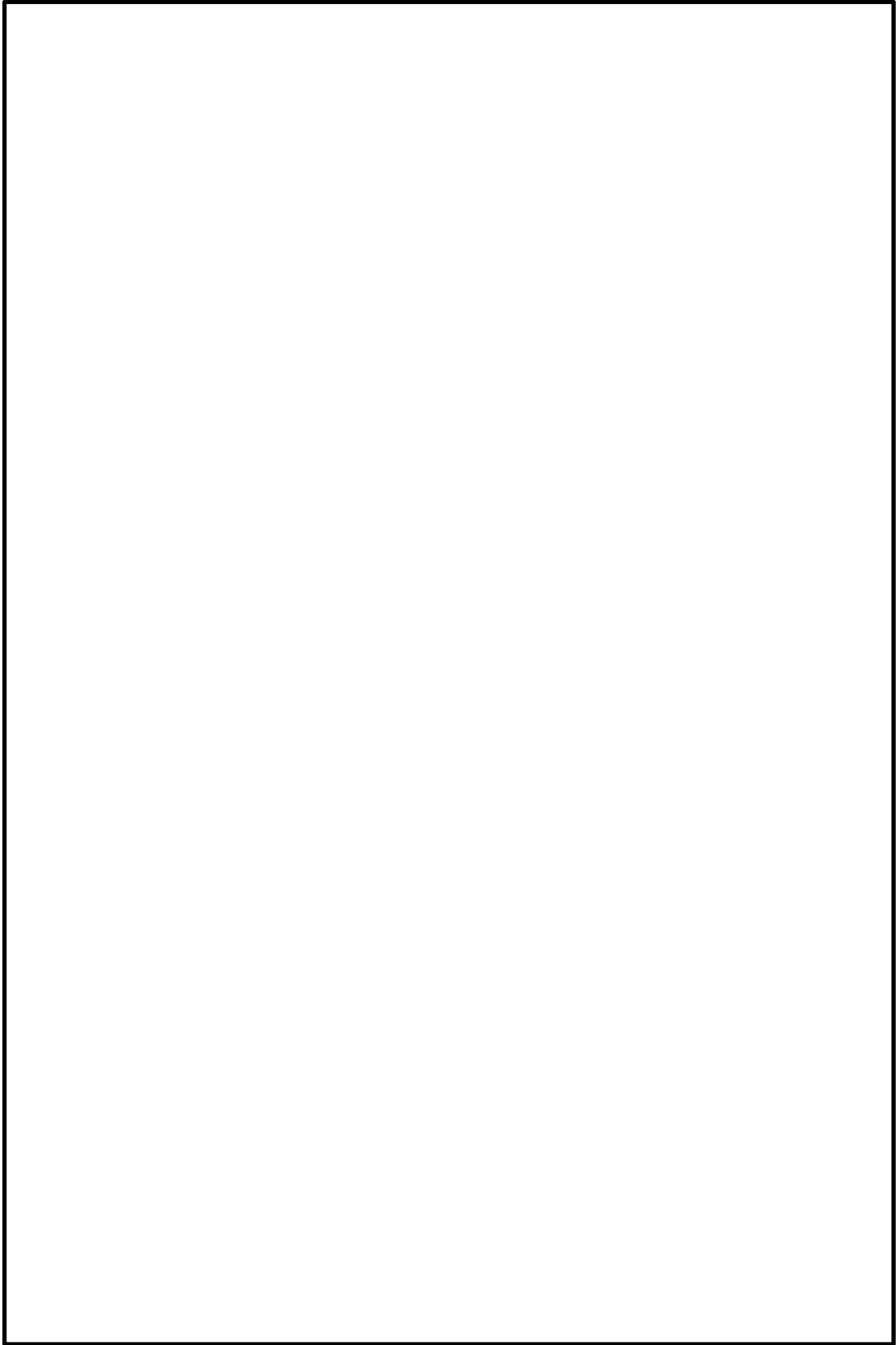


図 3-2(2) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



図 3-2(3) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

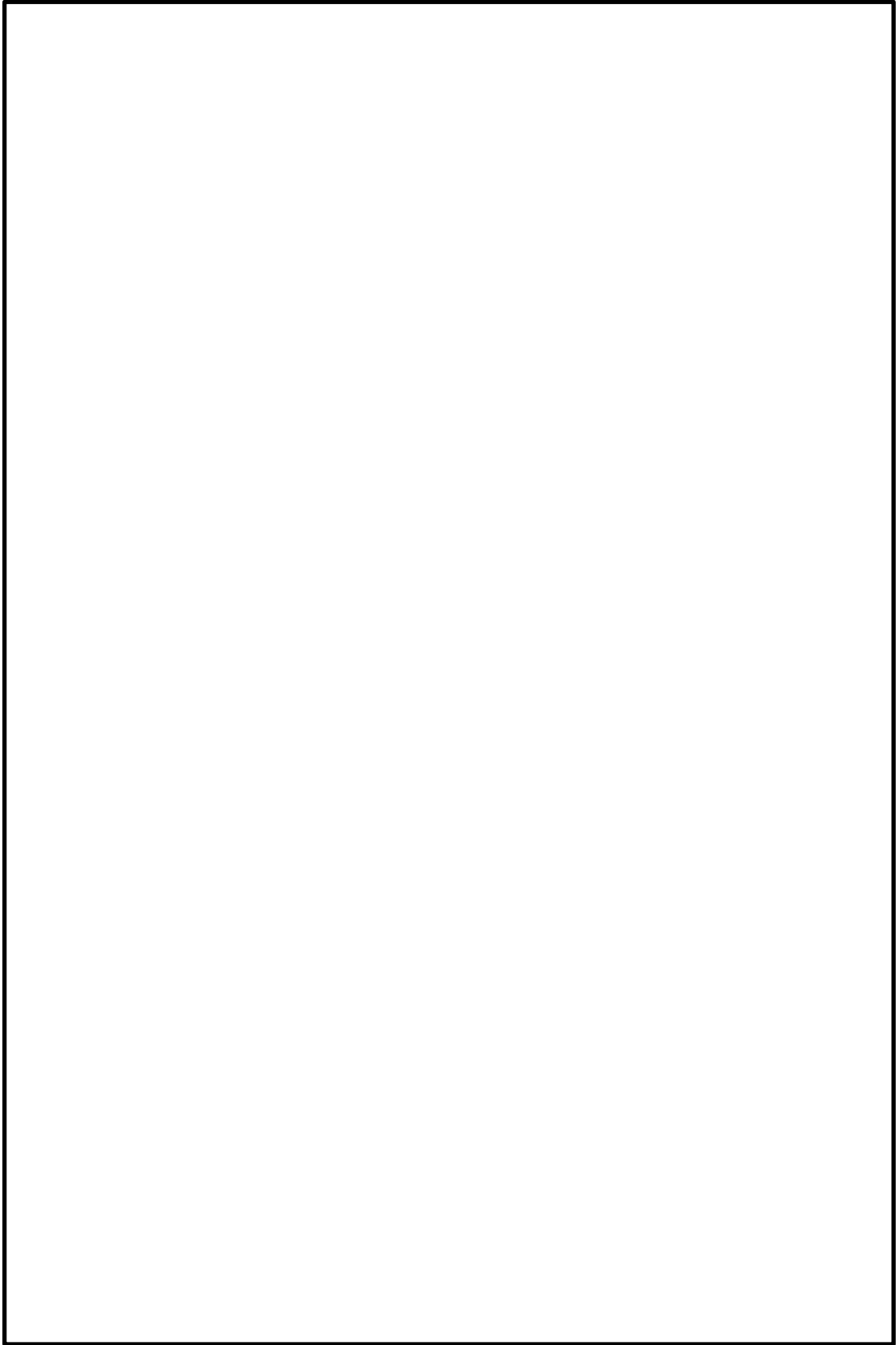


図 3-2(4) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

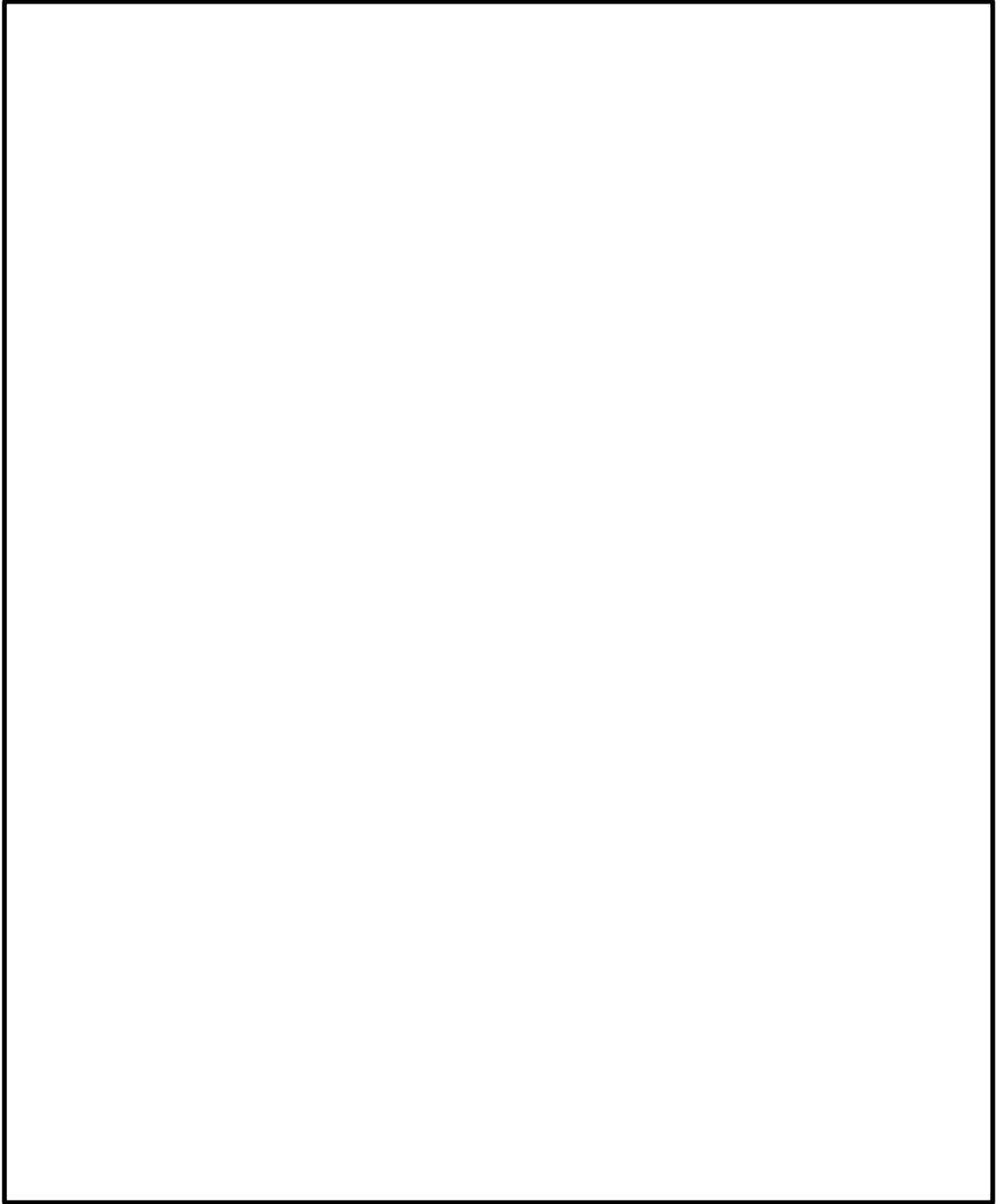


図 3-3(1) せん断耐力向上性能試験の加力要領（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

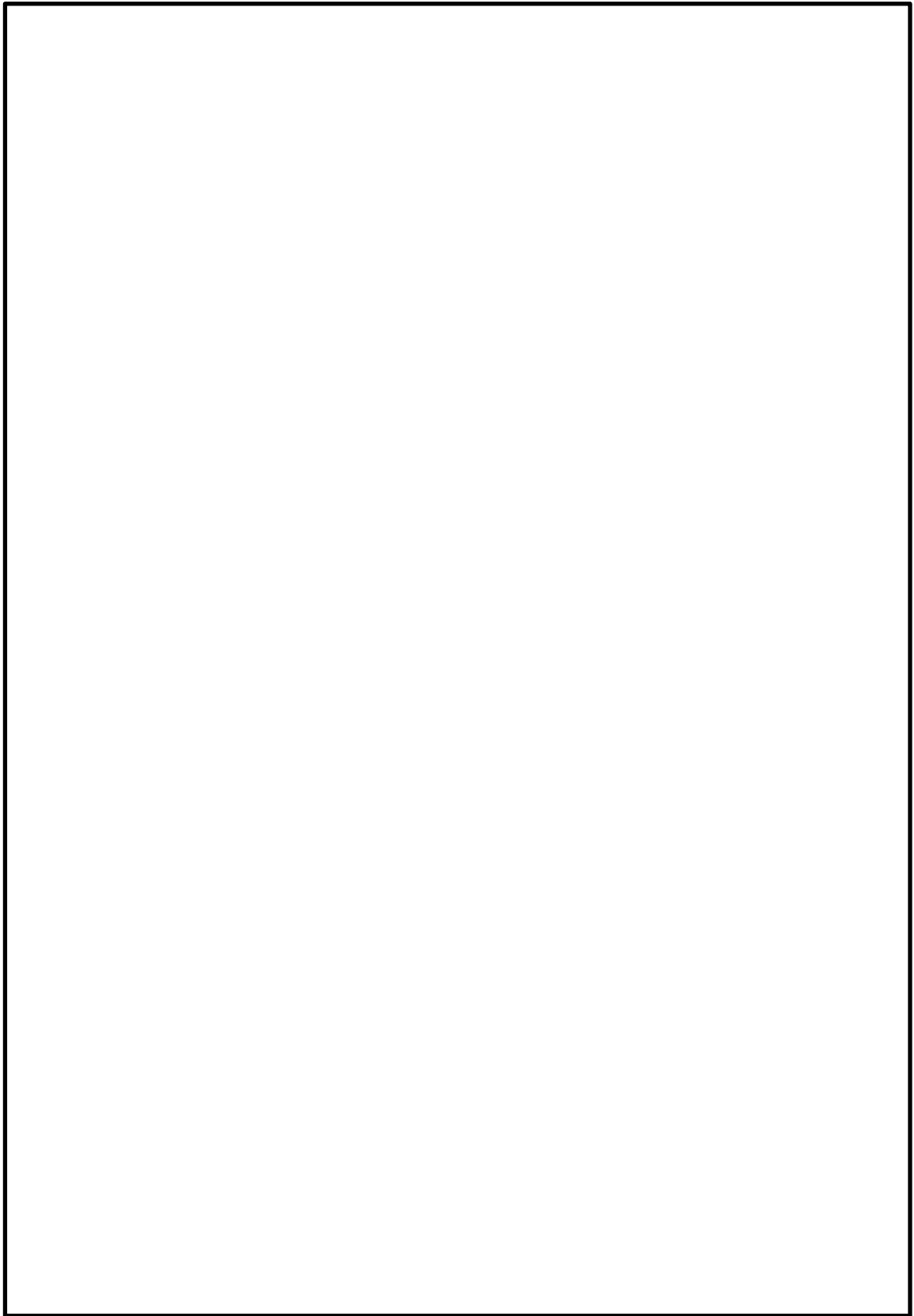


図 3-3(2) せん断耐力向上性能試験の加力要領（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

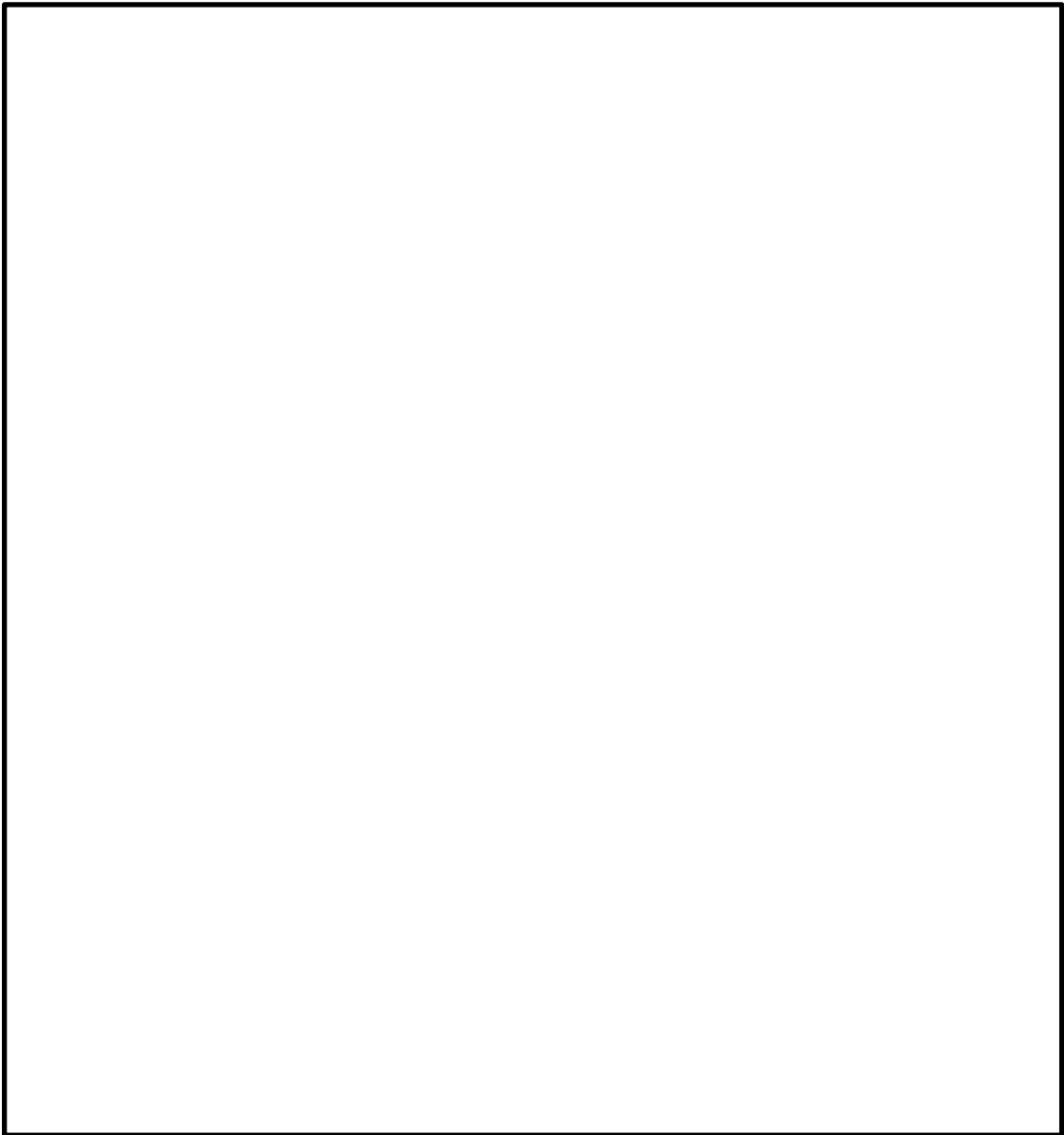
(2) 実験結果

(1)の実験結果を，表 3-2 に示す。

表 3-2(1) 実験結果の一覧（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

--

表 3-2(2) 実験結果の一覧（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

A large empty rectangular box with a black border, intended for a table of experimental results. The box is currently blank.

(3) PHb のせん断補強の考え方

PHb のせん断補強の考え方を図 3-4 に示す。

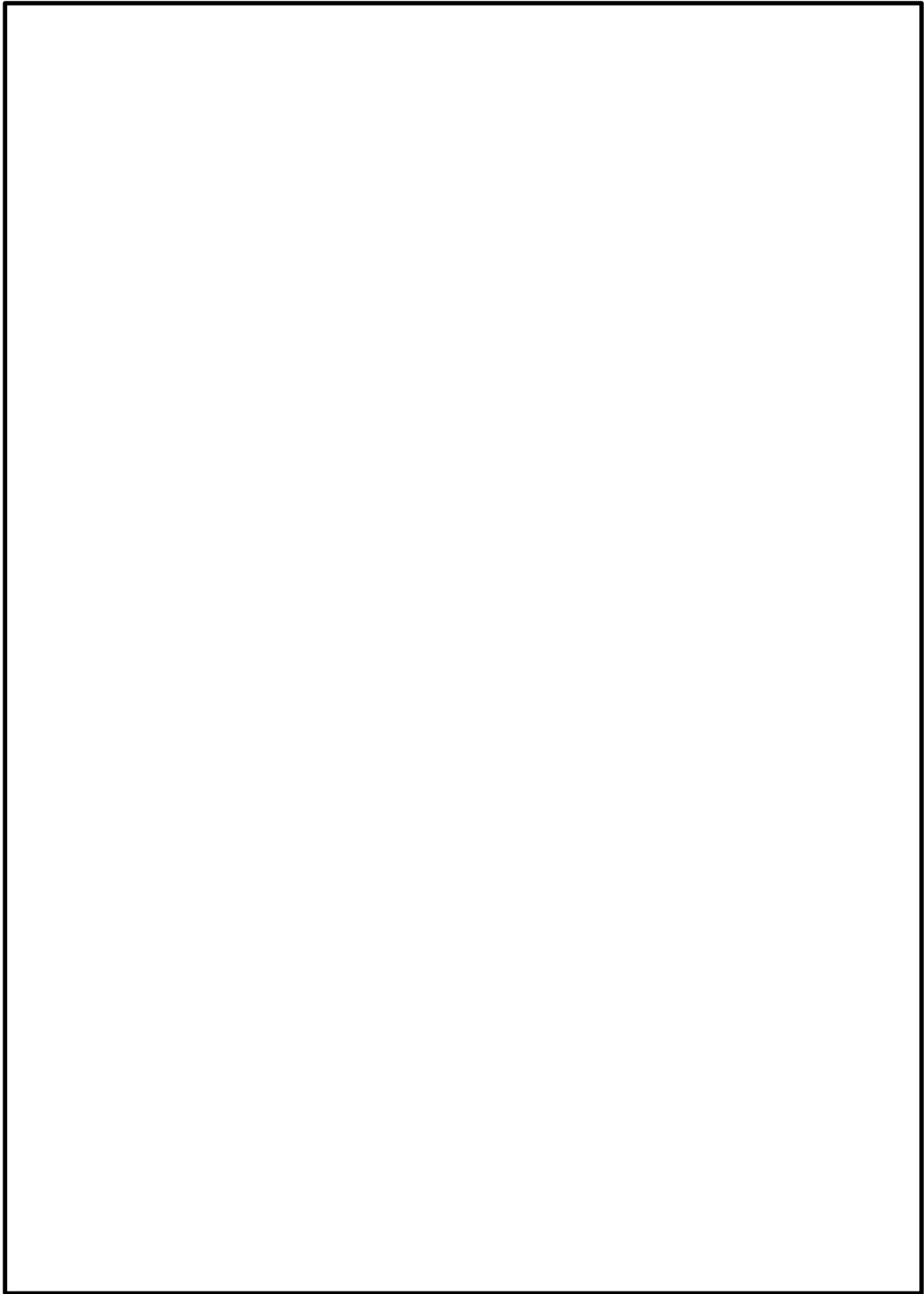


図 3-4(1) PHb のせん断補強の考え方（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



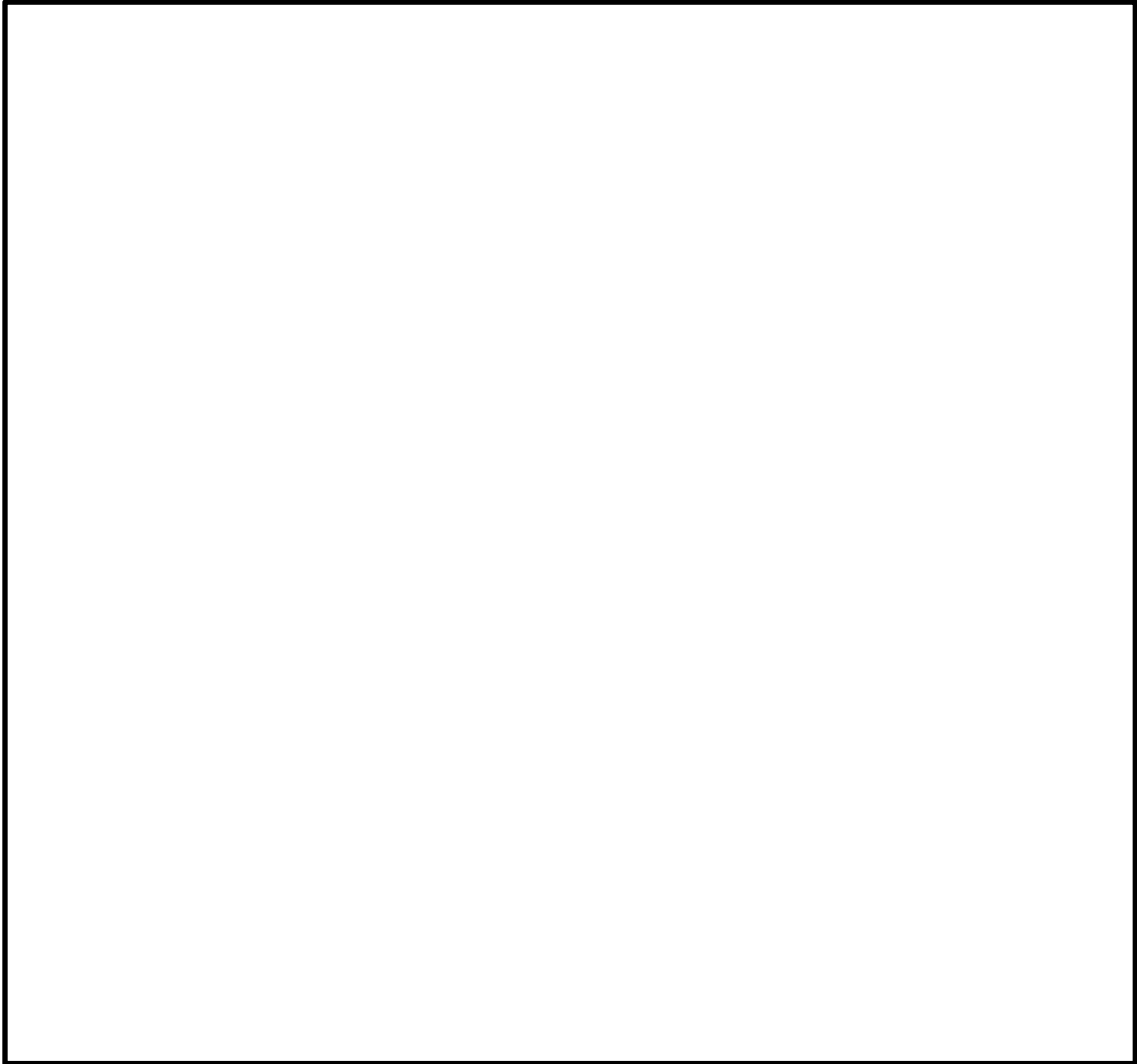


図 3-4(2) PHb のせん断補強の考え方（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

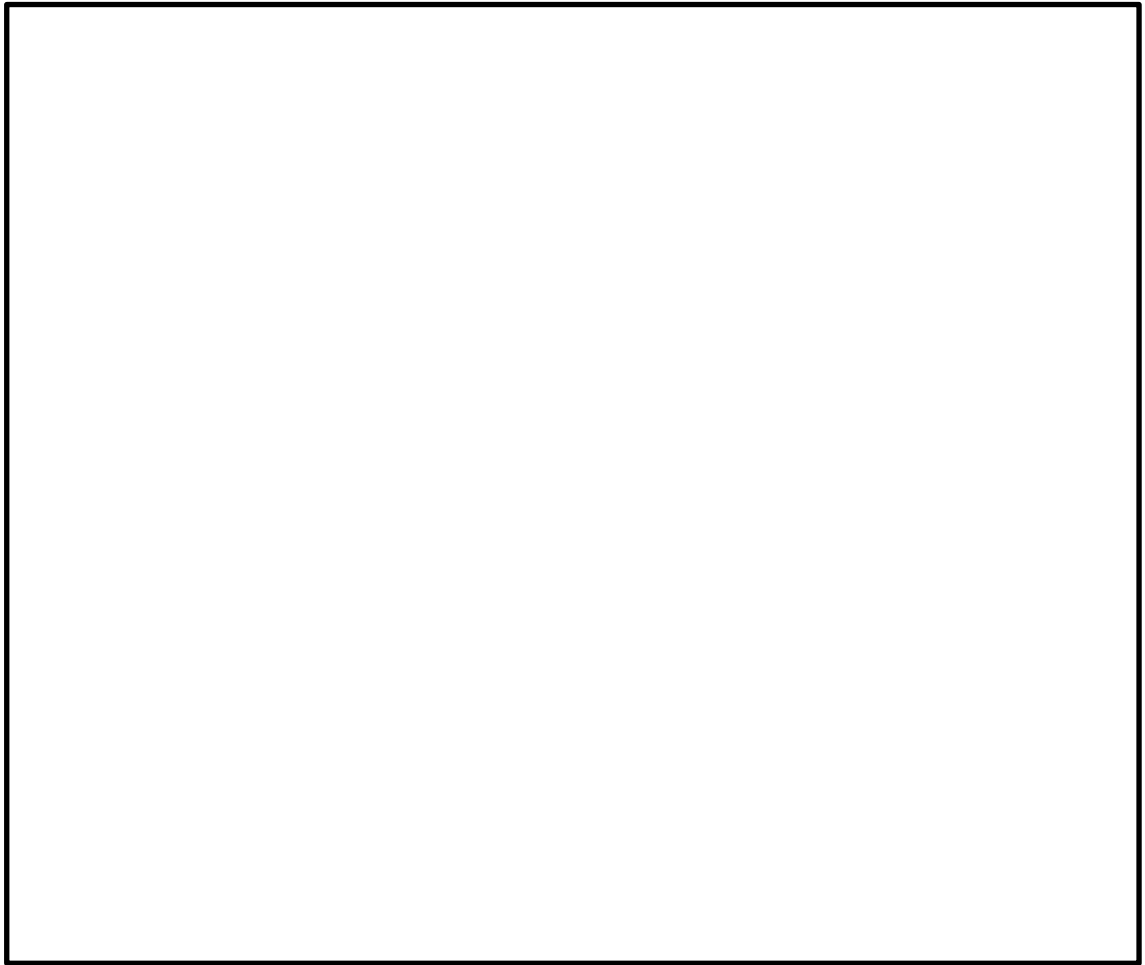


図 3-4(3) PHb のせん断補強の考え方（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

(4) 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価

実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価について、図 3-5 に示す。

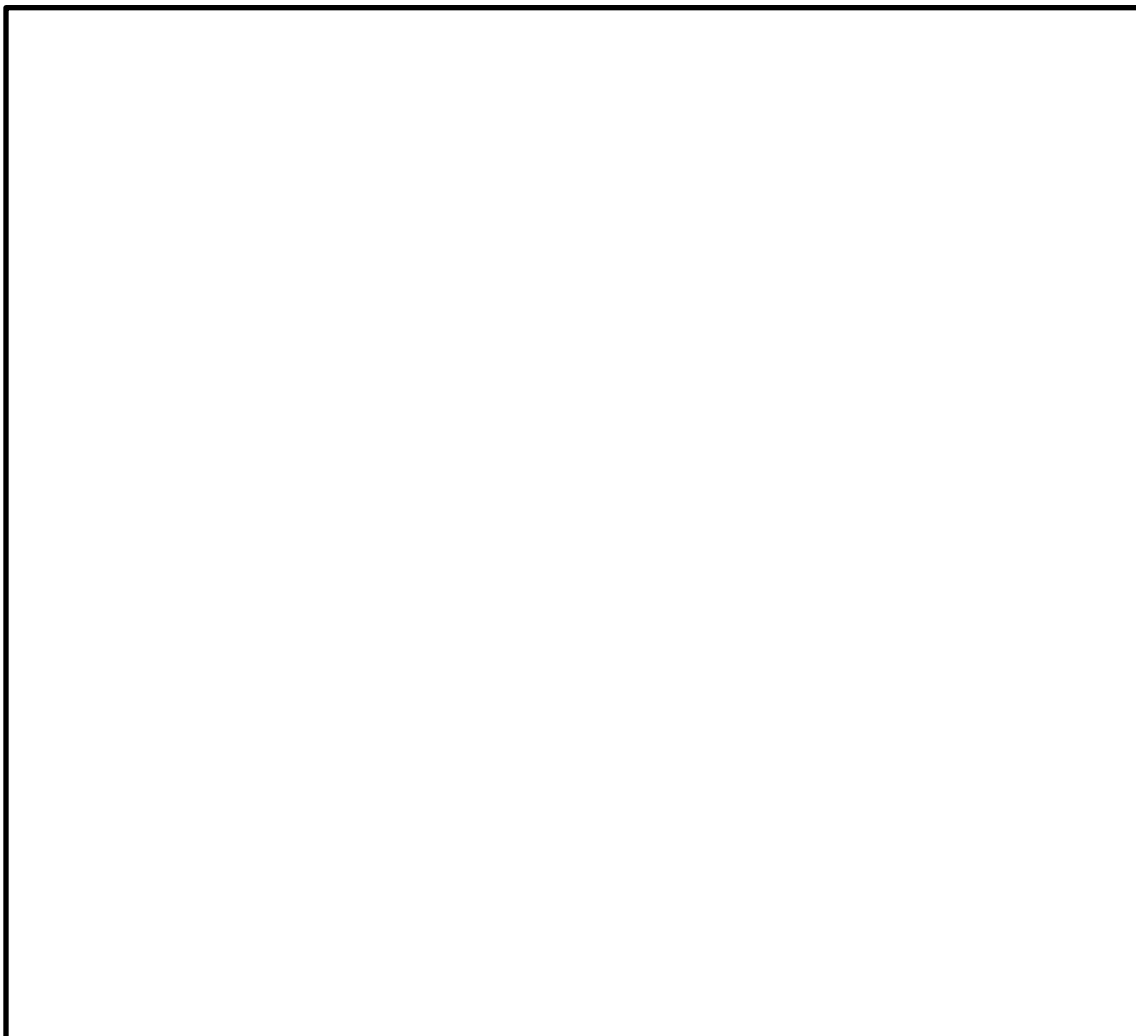


図 3-5(1) 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

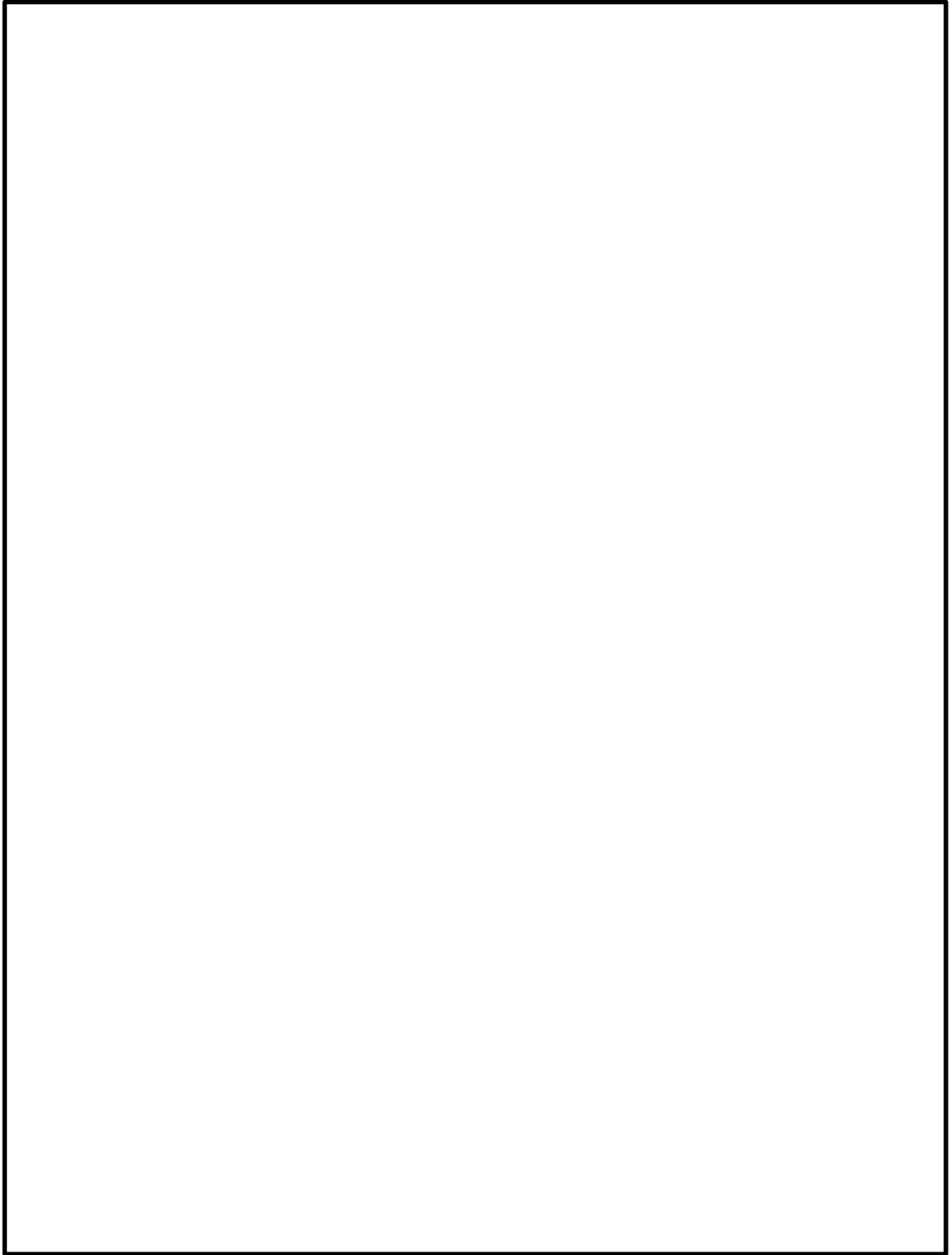


図 3-5(2) 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

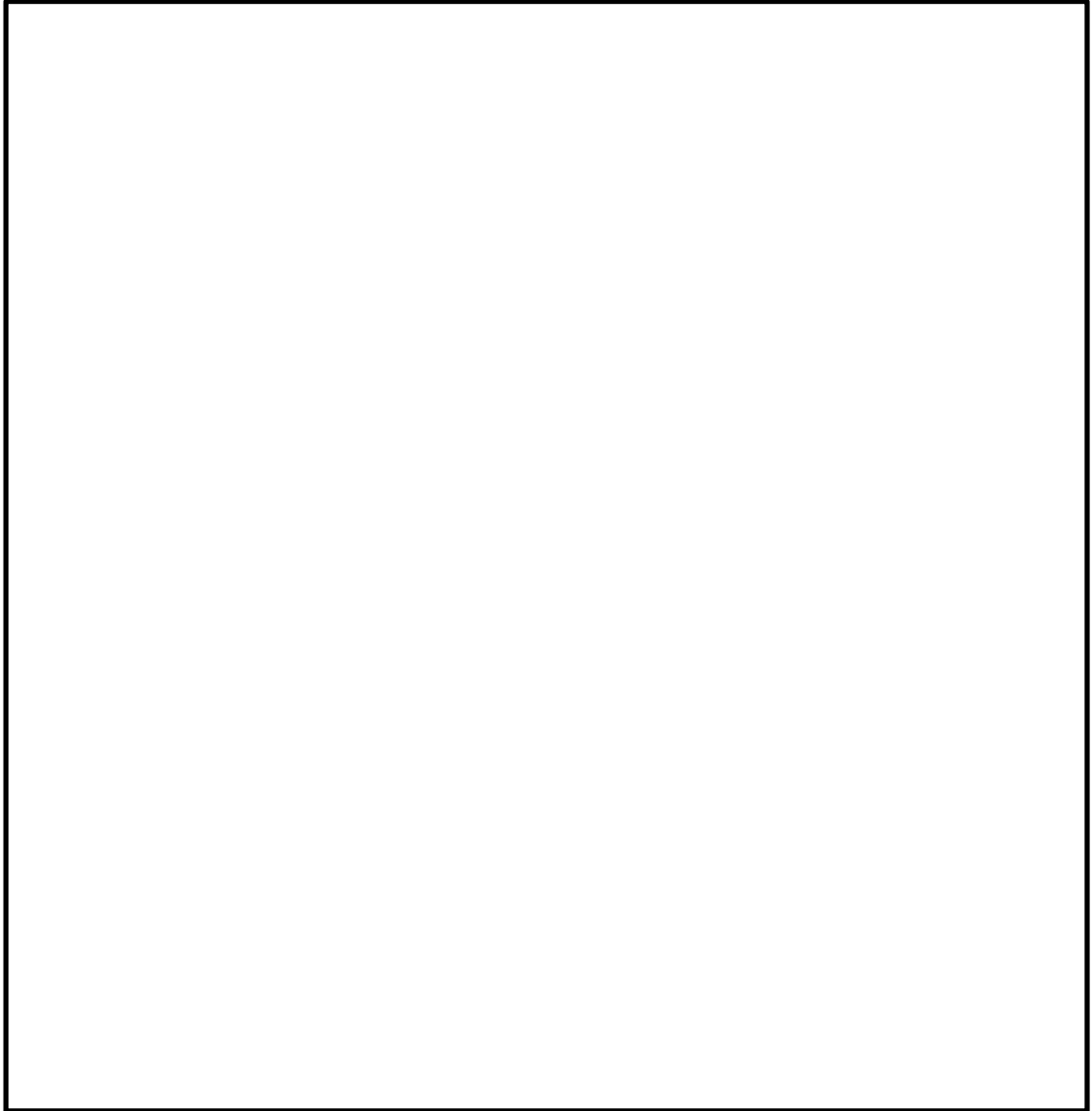


図 3-5(3) 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

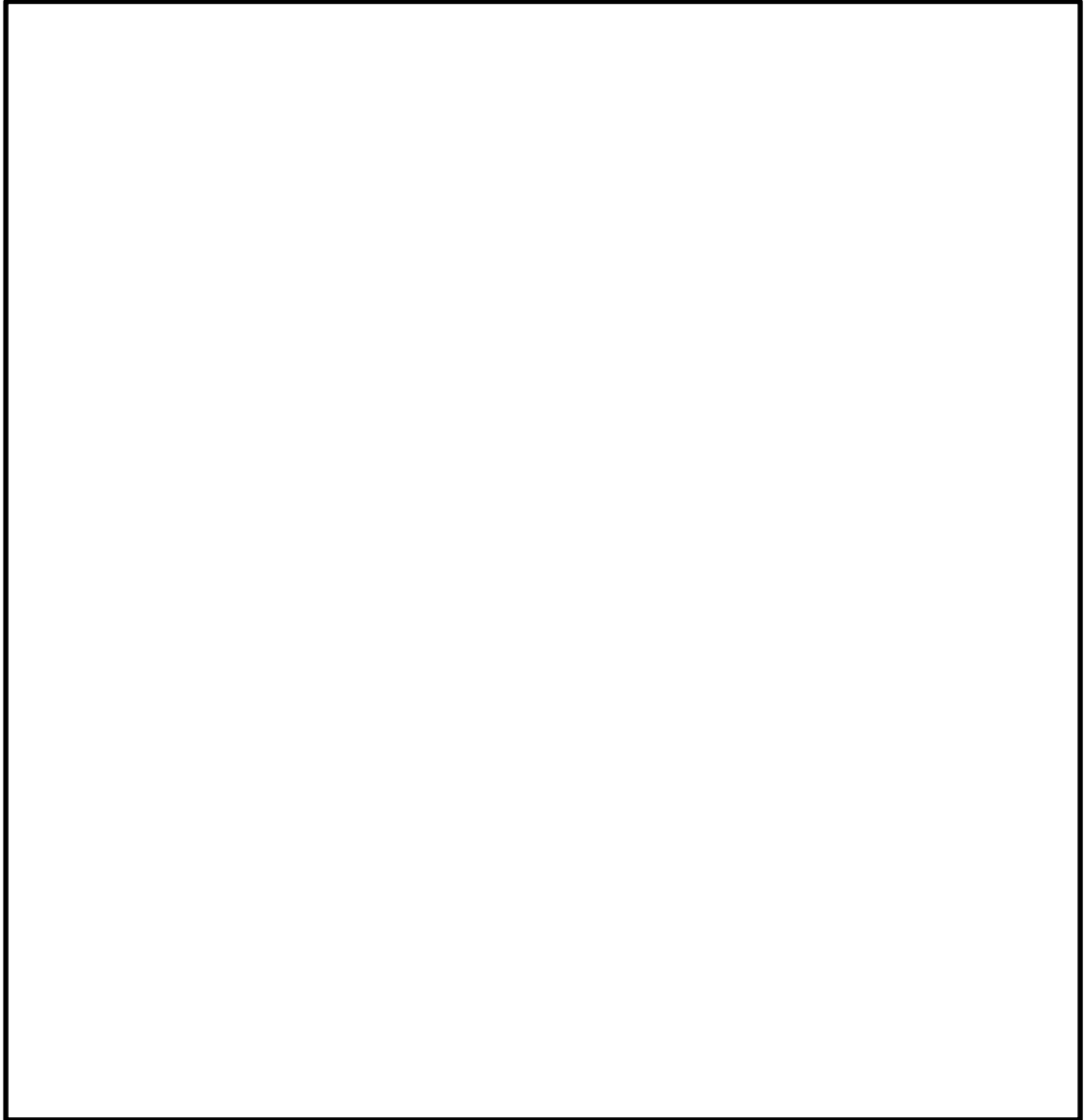


図 3-5(4) 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

(5) PHbによるせん断補強効果のまとめ

PHbによるせん断補強効果のまとめについて、図3-6に示す。

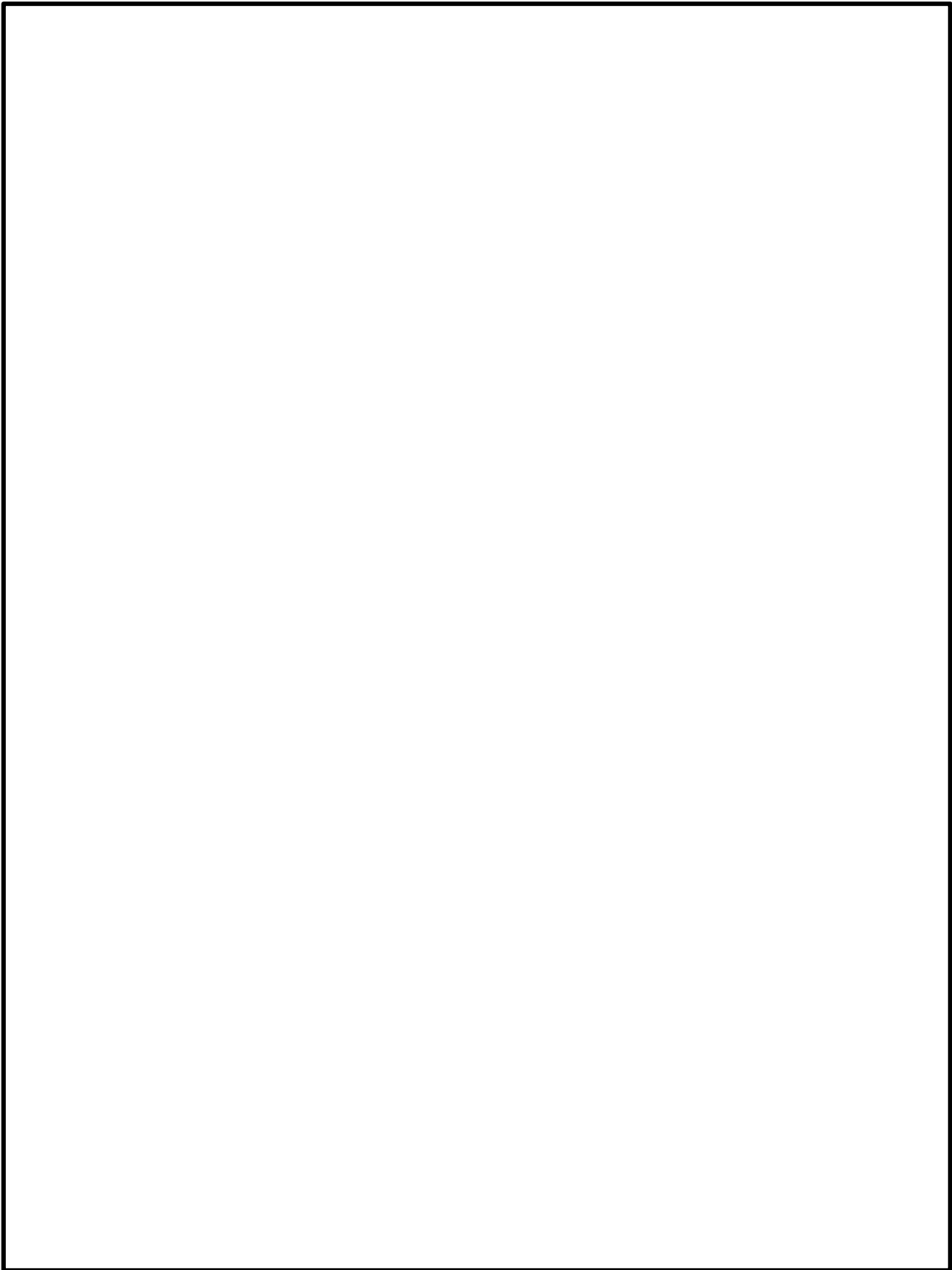


図3-6(1) PHbによるせん断補強効果のまとめ  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

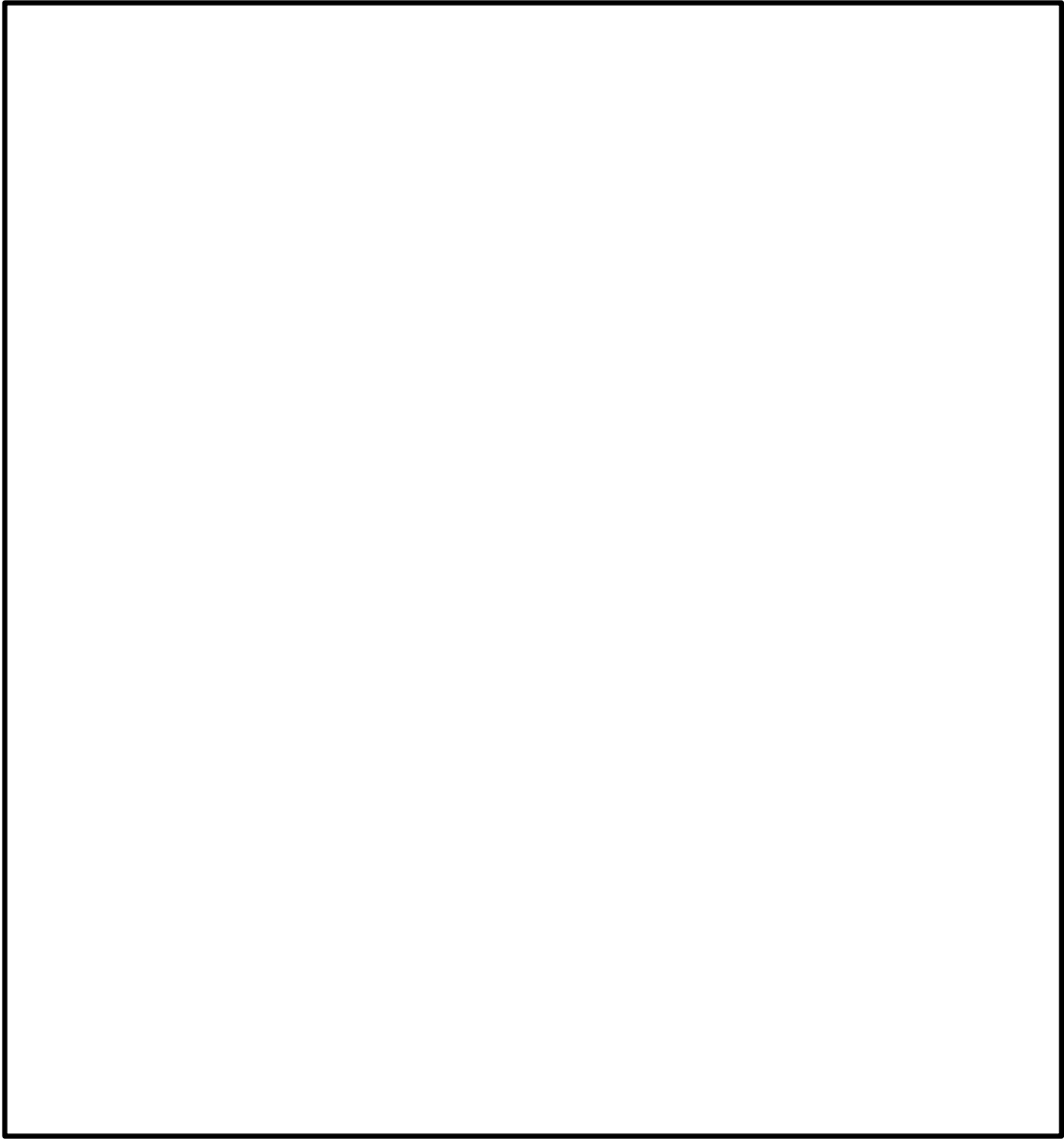


図 3-6(2) PHb によるせん断補強効果のまとめ  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)



### 3.3.2 使用材料・強度

実験を元にした本設計法では、図 3-7 に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも、これらに適合する使用材料・強度を用いる。



図 3-7(1) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

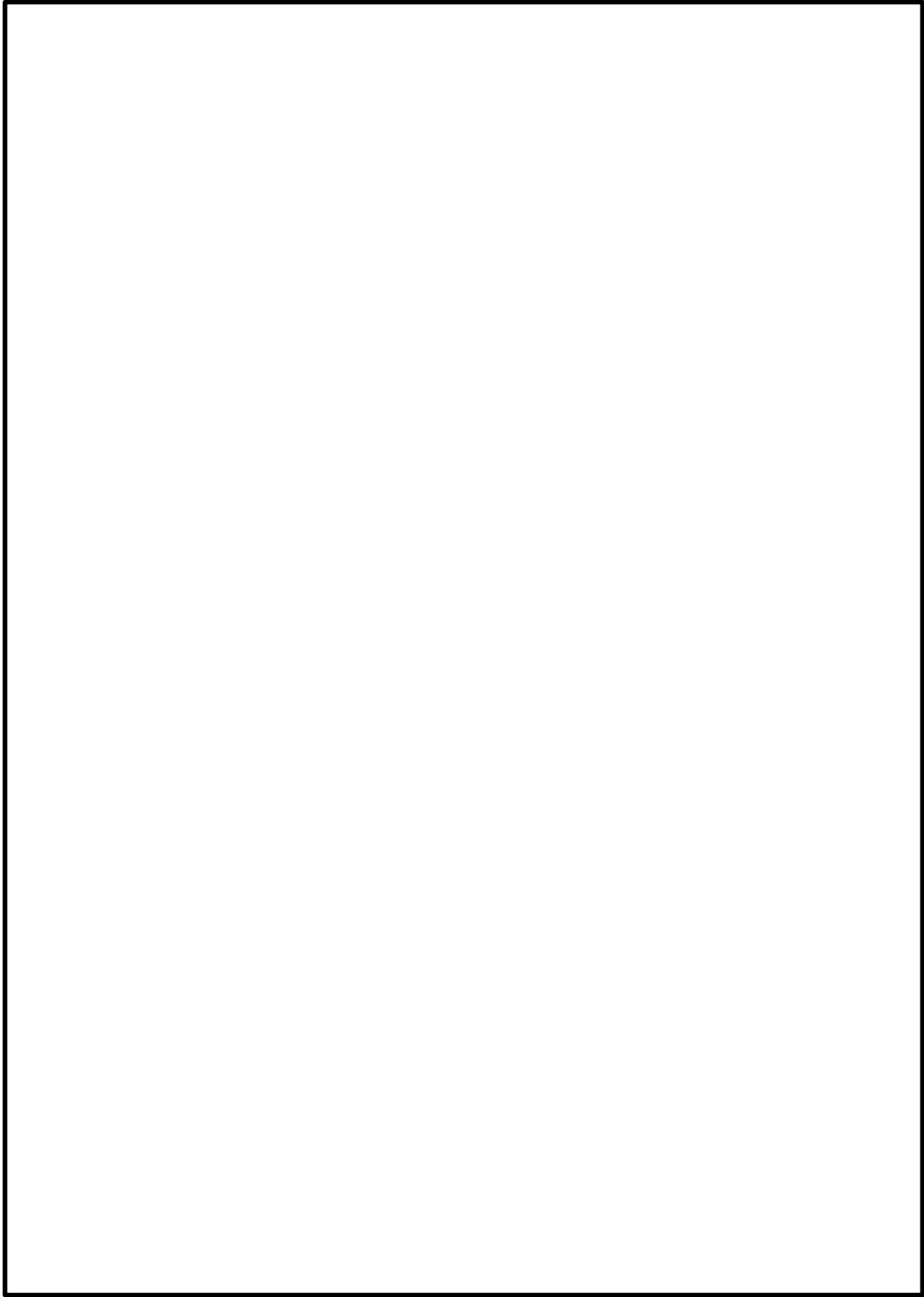


図 3-7(2) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

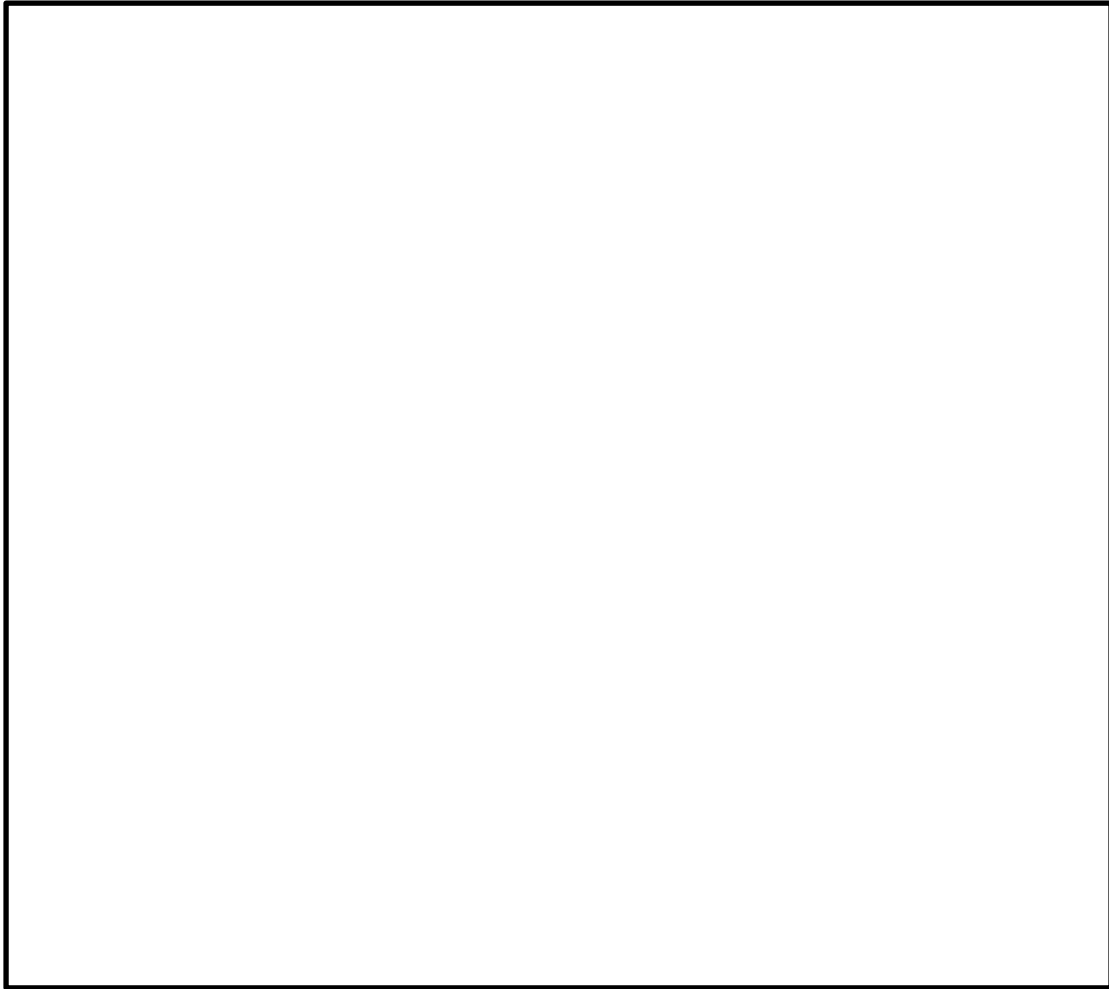


図 3-7(3) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

### 3.3.3 構造部材の評価

3.3.1 で示した基本的考え方に基づき，図 3-8 で示すコンクリート標準示方書[設計編]（(社)土木学会，2017）（以下「コンクリート標準示方書 2017」という。）の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

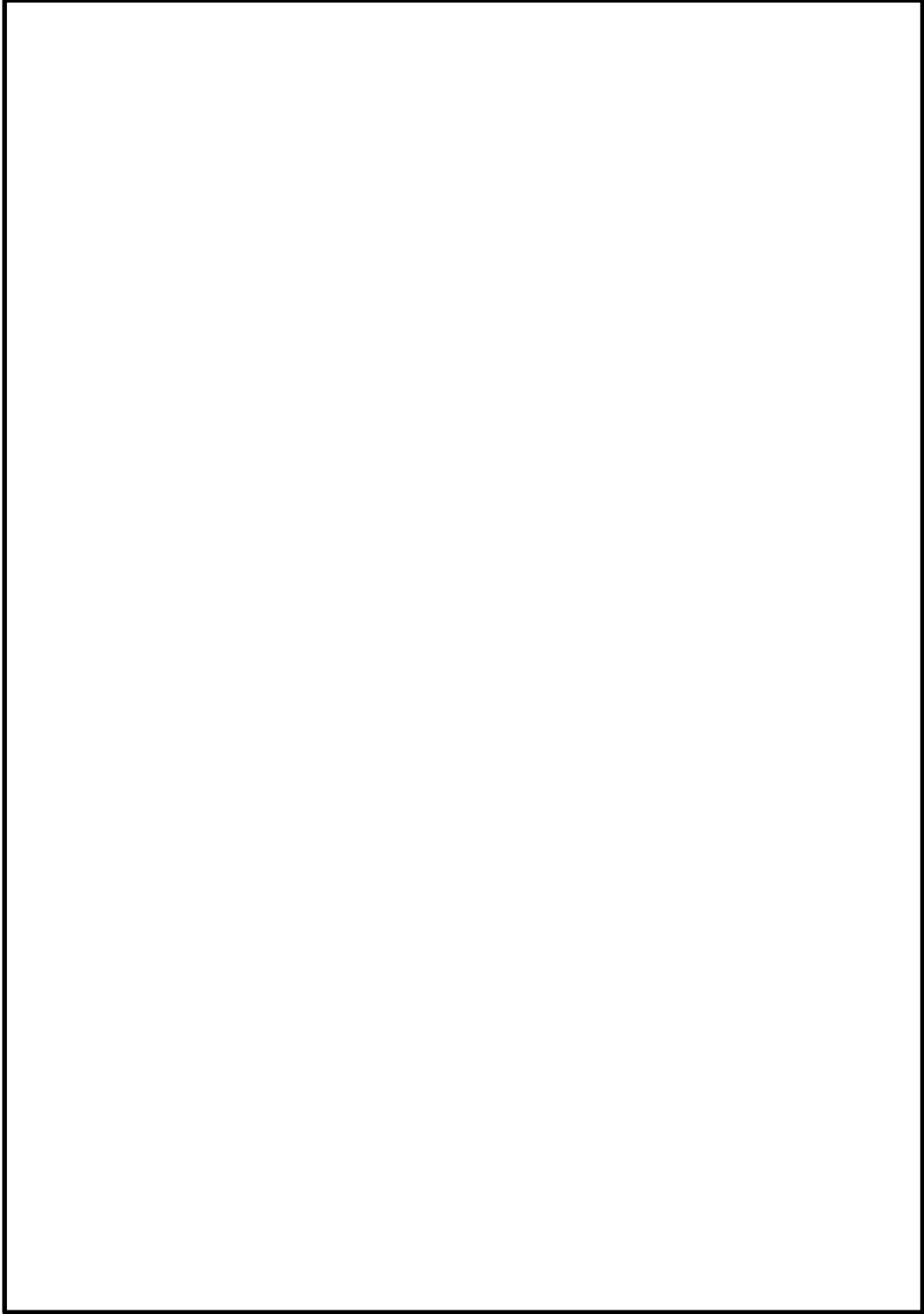


図 3-8(1) せん断に対する安全性照査（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

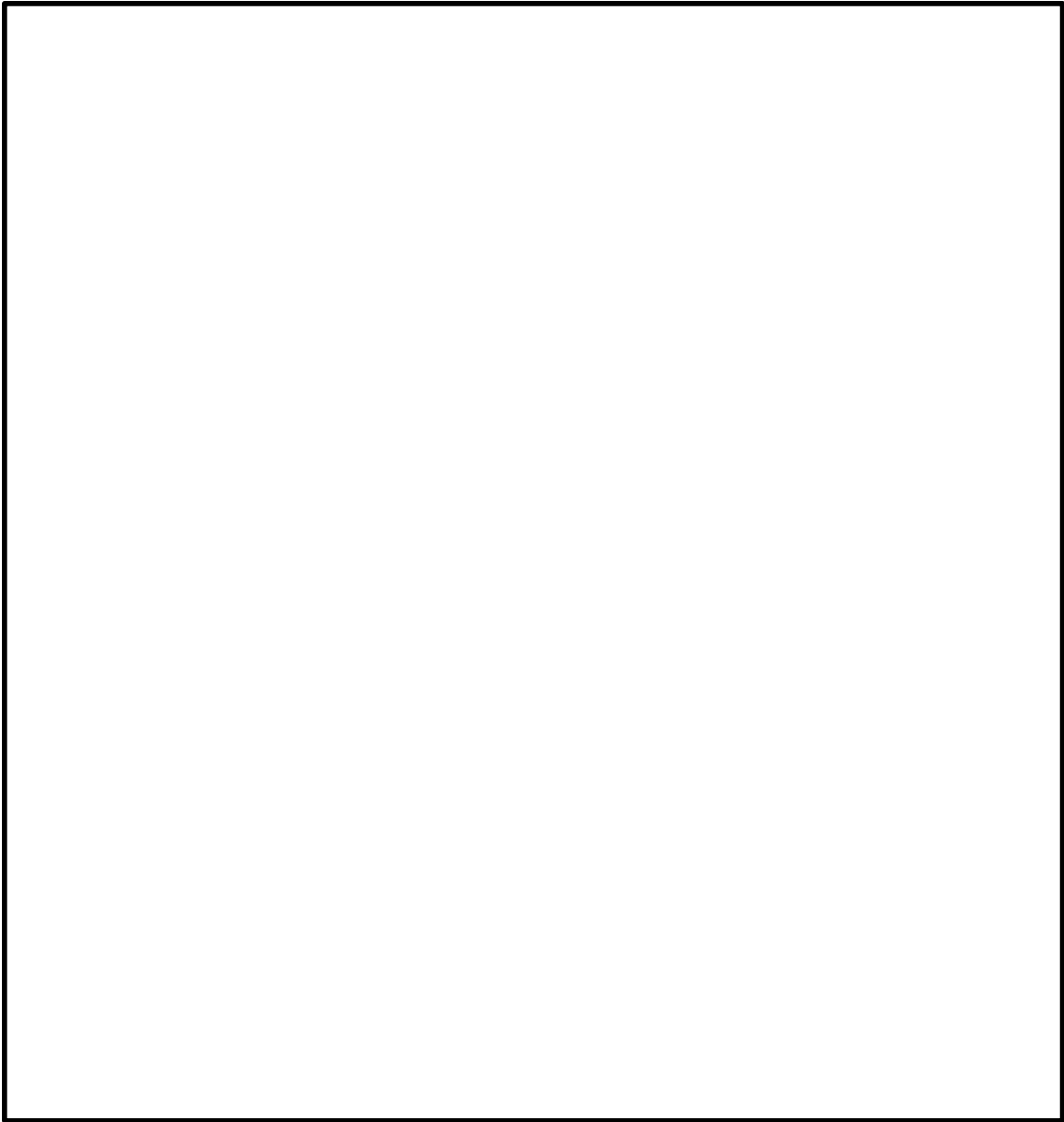


図 3-8(2) せん断に対する安全性照査（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.3.4 構造細目

本設計方法では、想定外の破壊形式をとらないように、図 3-9 で示す構造細目を定めている。

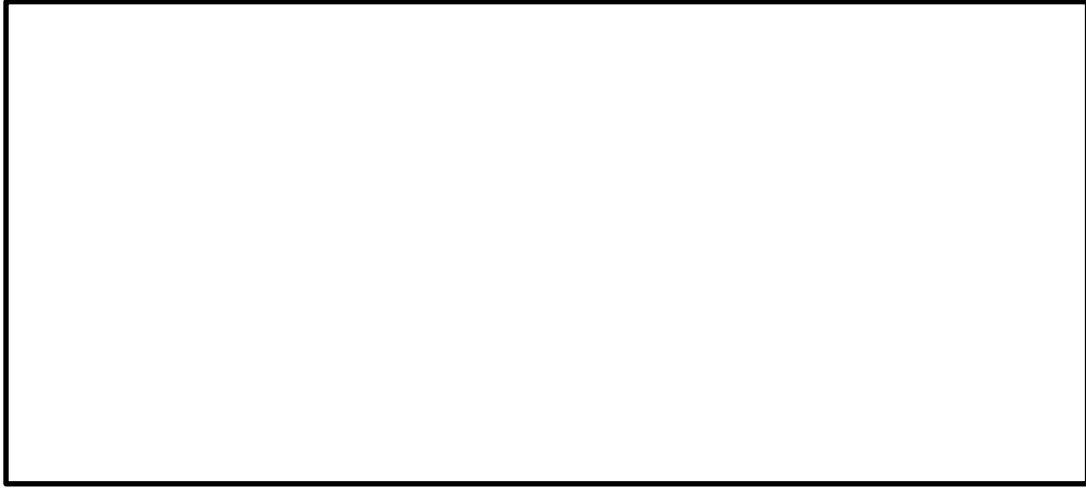


図 3-9 構造細目（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

### 3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

#### 3.4.1 施工の確実性

「建設技術審査証明報告書」において確認されている、PHbの施工の確実性について、図3-10に示す。



図3-10 施工の確実性（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.4.2 施工の容易性

「建設技術審査証明報告書」において確認されている、PHbの施工の容易性について、図3-11に示す。



図3-11 施工の容易性（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.4.3 施工手順の設定

「建設技術審査証明報告書」において設定されている、PHbの施工手順について、図3-12に示す。



図3-12(1) PHbの施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

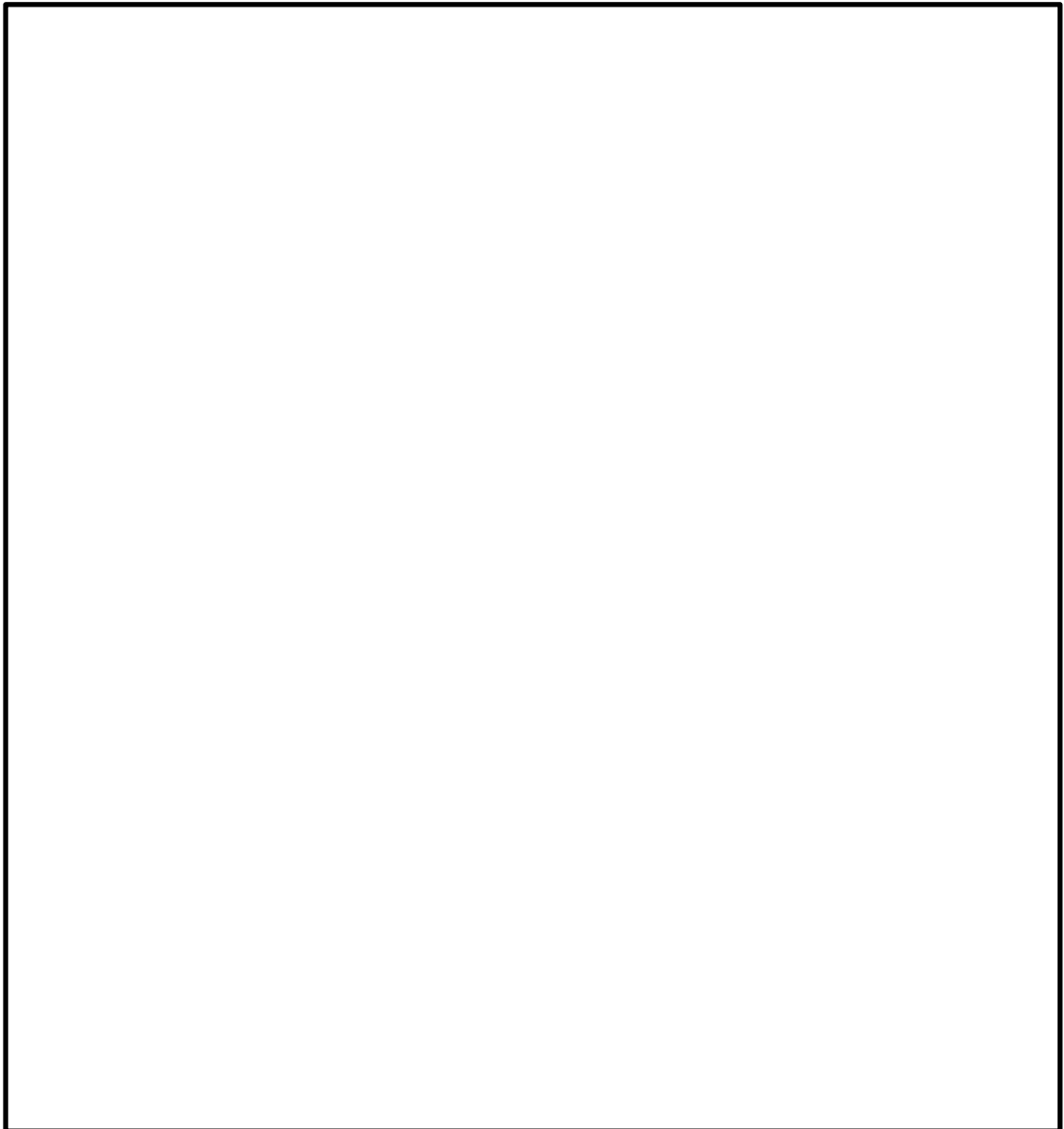


図 3-12(2) PHb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



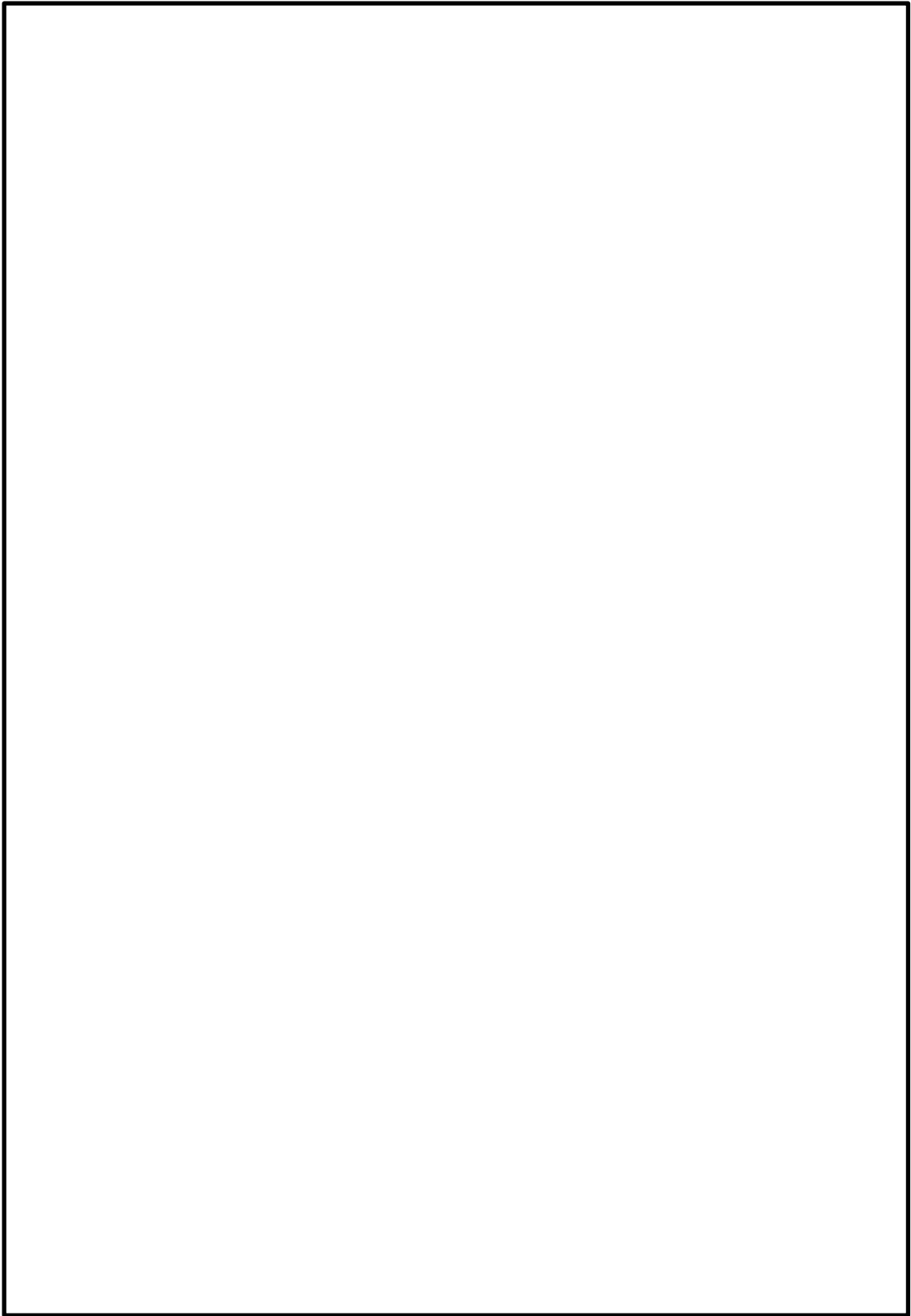


図 3-12(3) PHb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 4. 島根 2 号機における PHb 工法の適用性の確認

##### 4.1 適用性確認フロー

PHb 工法は、「建設技術審査証明報告書」により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、これまでに数多くの施工実績がある。

PHb 工法を島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に適用するにあたり、「建設技術審査証明報告書」、施工実績及び研究事例等から適用範囲を整理し、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等の構造形式・部材諸元、使用環境等が適用範囲に該当することを図 4-1 に示すフローにて確認する。

##### ① 適用性確認項目の抽出

後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えられられる項目を抽出する。

その際、「建設技術審査証明報告書」に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

##### ② 建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用した補強仕様が PHb 工法の「建設技術審査証明報告書」において規定されている適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績内に収まっているか確認する。

##### ③ せん断補強効果の確認

①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討する。

##### ④ PHb の施工精度に影響を与える項目の確認

PHb の施工を行う際に、施工精度に影響を与える項目がないか確認を行う。

施工精度に影響を与える項目（施工上考慮すべき項目）がある場合は、施工上又は設計上どのように考慮するかを決定したうえで、必要により再設計を実施するか適宜判断を行う。

##### ⑤ 施工実績・研究事例等の確認

後施工せん断補強筋に関する施工実績・研究事例について、要旨、着目すべき事項を整理し、PHb 工法への反映事項を確認する。

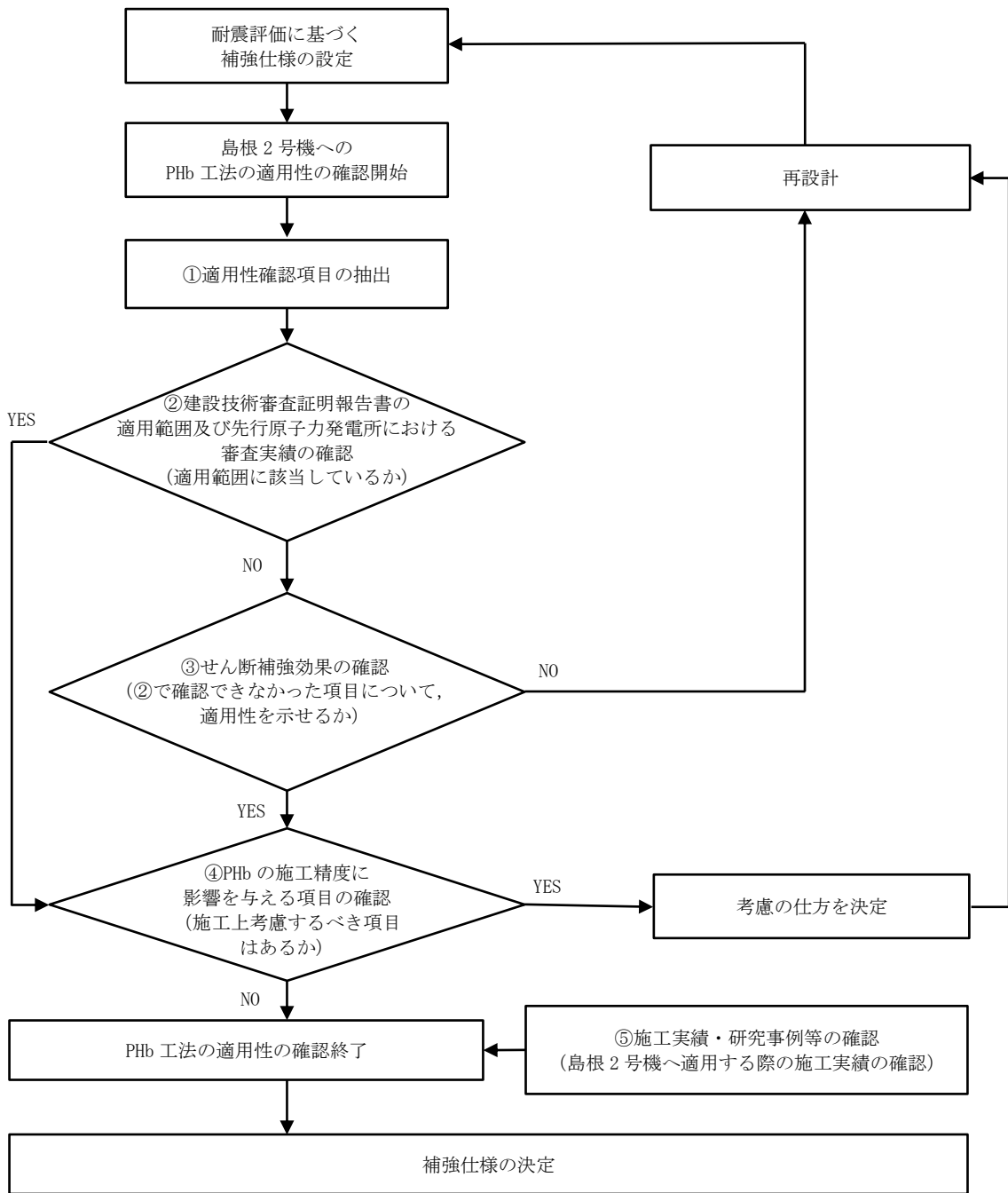
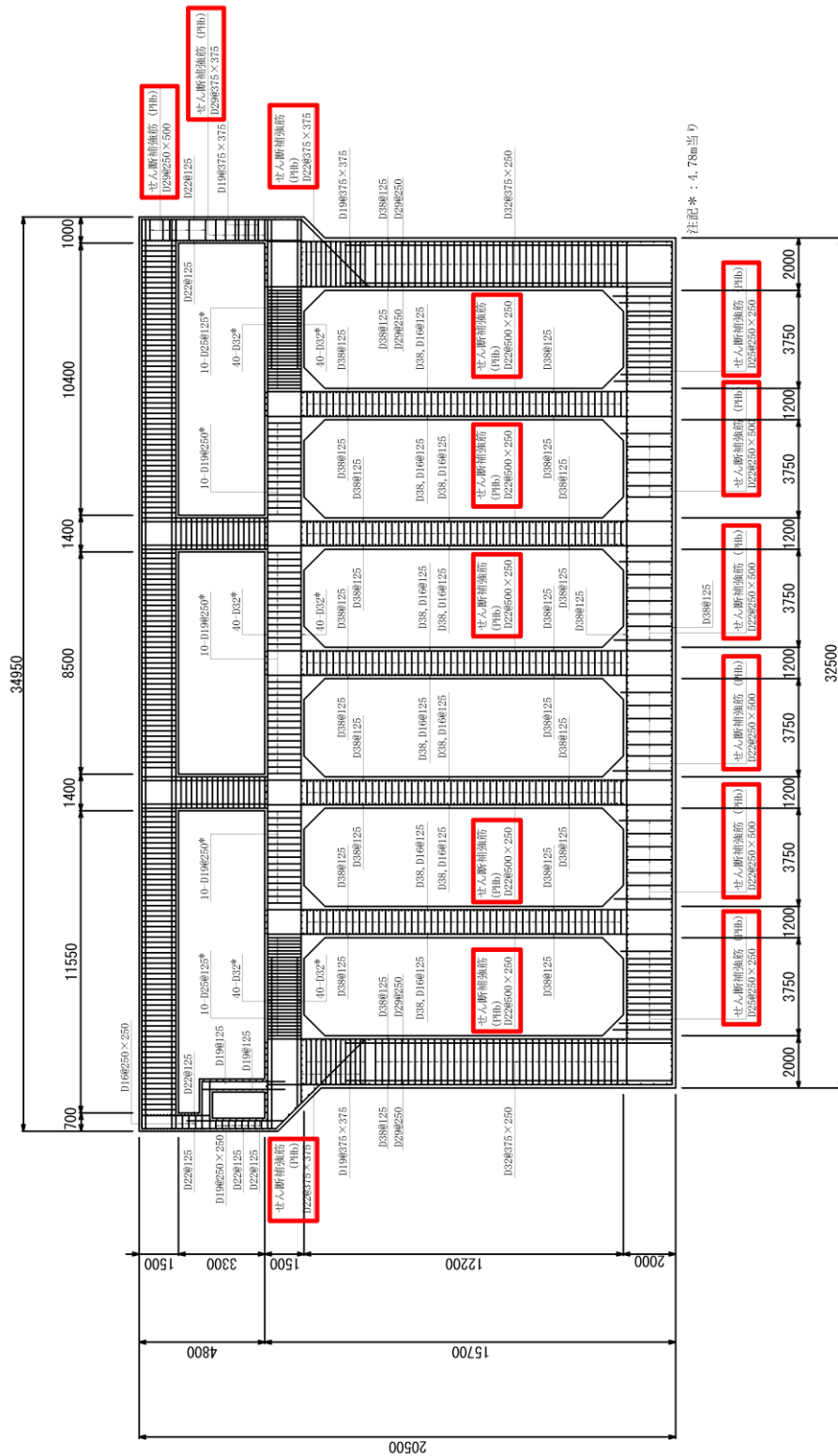


図 4-1 PHb 工法の適用性確認フロー

#### 4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し、せん断に対する安全性を確保するように設定した結果の一例として、取水槽の補強仕様を図4-2に示す。



(単位: mm)

□ : PHb 工法適用箇所

図4-2 取水槽の補強仕様

#### 4.3 ①適用性確認項目の抽出

PHb 工法の特徴及び島根 2 号機固有の条件等の観点から、適用性を確認するために必要な項目を抽出する。以下に項目と確認内容を示す。

##### I. 使用目的

「建設技術審査証明報告書」に明記されている目的に該当しているか。

##### II. 構造形式

建設技術審査証明報告書で想定している構造形式に該当しているか。

##### III. 構造細目

建設技術審査証明報告書で規定している構造細目に該当しているか。

##### IV. 部材諸元

建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚か。

せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度について，建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であるか，又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。

##### V. 載荷方法

建設技術審査証明報告書の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるか。

##### VI. 使用材料（せん断補強筋）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

せん断補強筋は，JIS G 3112 に適合する SD295，SD345 若しくは SD390 とし，呼び名は D13，D16，D19，D22，D25，D29，D32 とする。

##### VII. 使用材料（プレート）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

##### VIII. 使用材料（充てん材）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

##### IX. 使用材料（断面修復材）

建設技術審査証明報告書で規定されている材料か。

- X. せん断補強鉄筋の定着長  
建設技術審査証明報告書で設定している定着長を考慮して設計しているか。
- X I. せん断ひび割れ抑制効果の確認  
建設技術審査証明報告書の実験にて確認していない諸元において、せん断ひび割れ抑制効果を確認できるか。
- X II. ひび割れに対する定着機能の保持  
PHb 工法は、従来工法（先施工）とせん断補強筋の定着機構が異なることから、せん断補強筋としての機能を発揮するために、定着体部にひび割れが生じても、定着機能が保持されているか。
- X III. 変形量  
変形に伴うかぶりコンクリート部の剥落によって、PHb の定着体部の定着機能を阻害するおそれがあることから、建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えていないか。
- X IV. 使用環境  
建設技術審査証明報告書で想定している使用環境において使用しているか。

4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認  
PHb 工法を適用するにあたり，4.3 で抽出した項目について建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績を確認する。確認結果を以下に示す。

(1) I. 使用目的, II. 構造形式

PHb による耐震補強は，既設コンクリート部材に対して後施工によるせん断補強の目的で用いていることから，「建設技術審査証明報告書」に合致している。また，構造形式についても，地中構造物及び地上構造物を想定しており，島根2号機の屋外重要土木構造物等に適用可能である。（表4-1 参照）

表4-1 PHb 工法の適用範囲と使用状況  
（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	<p>地中構造物であり，片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して，後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>
	<p>既設の地上構造物に対して，変形性能の更なる改善を目的としないことを前提として，後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>

(2) Ⅲ. 構造細目

「建設技術審査証明報告書」に、以下のとおり構造細目として記載されており、建設技術審査証明報告書と合致している。

- ① 補強前に配置されていたスターラップと Post-Head-bar を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が 0.15%以上とする。
- ② Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下かつ 300mm 以下とする。
- ③ Post-Head-bar の配置は図 4-3 に示す標準配置によるものとする。
- ④ Post-Head-bar の埋込先端は、軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし、埋込先端のかぶりは、必要なかぶりを確保しかつ 50mm 以上とする。

②の最大配置間隔 300mm は、収縮ひび割れに対する用心鉄筋としての配慮であることから、収縮が収束していると考えられる部材の補強ではこの規定を外すことができる。

島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており、収縮が収束していると考えられることから、この規定(最大配置間隔 300mm 以下)は除外することができる。

なお、PHb により耐震補強を行った構造物に対する、せん断補強鉄筋比及び最大配置間隔の適用範囲及び整理結果を表 4-2 に「(4) Ⅳ. 部材諸元, Ⅴ. 載荷方法」と併せて示す。



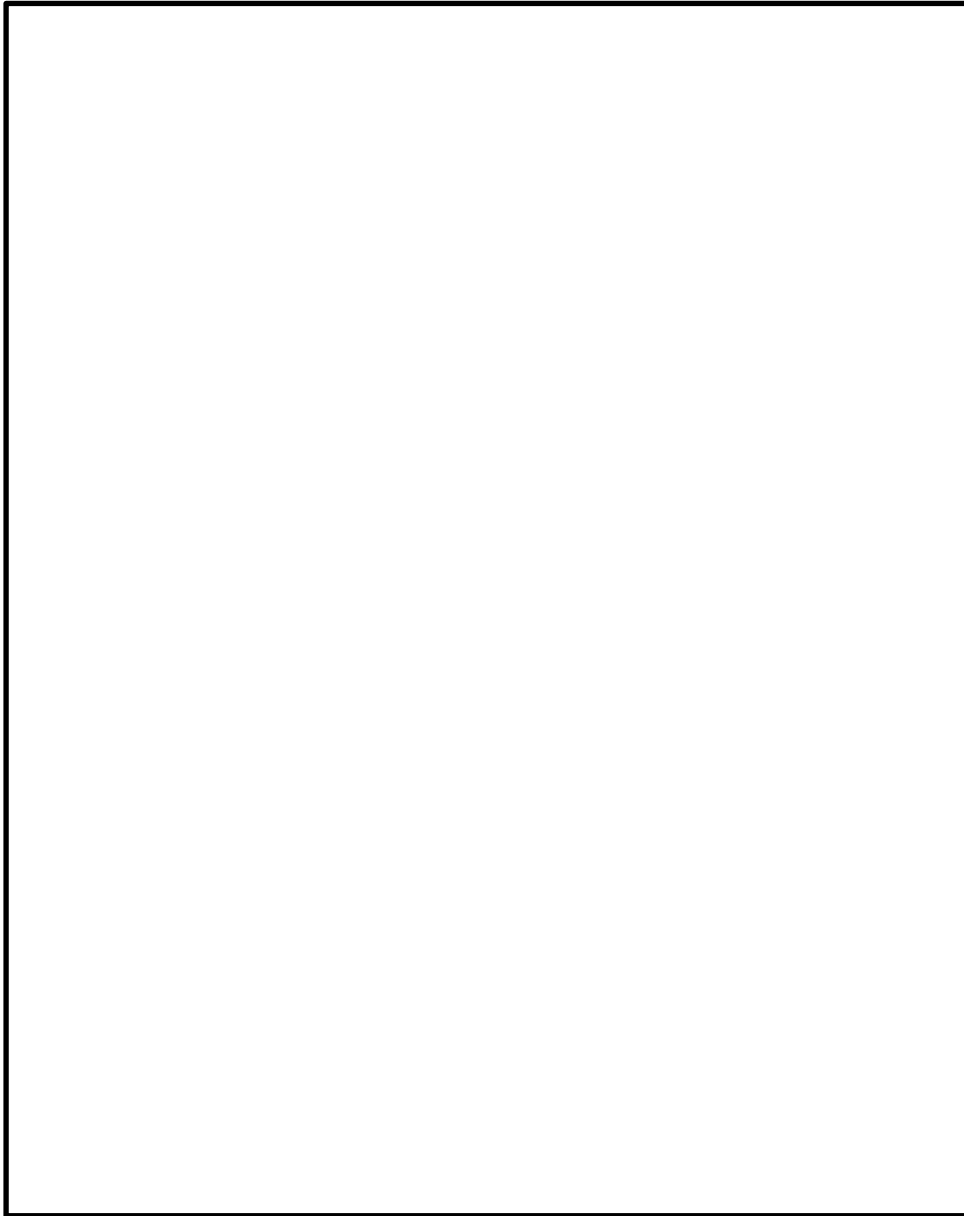


図 4-3 PHb 標準配置（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

(4) IV. 部材諸元, V. 載荷方法

構造細目, 部材諸元及び載荷方法について, PHb により耐震補強を行った構造物への適用範囲及び整理結果を表 4-2 に示す。

せん断スパン比については, 建設技術審査証明報告書及び先行原子力発電所における審査実績の範囲よりも大きい部材があるが, せん断スパン比が大きい部材は建設技術審査証明報告書で想定している棒部材であり, せん断スパン比が大きくなることによる適用性への影響はないと考えられる。

主鉄筋比については, 取水槽において建設技術審査証明報告書及び先行原子力発電所における審査実績の範囲よりも大きい部材があるが, 取水槽には多くの隔壁があり, 隔壁が耐震壁のように地震力の大半を負担するため, 取水槽の構造部材は短期荷重に対して付着割裂破壊を生じるおそれがない曲げ材であると考えられる。このことから, 主鉄筋比が大きくなることによる適用性への影響はないと考えられる。

また, 載荷方法については, 先行の審査実績において, 集中荷重及び分布荷重が作用する部材に対する適用性が実証されていることから, 適用範囲内であると考えられる。

部材厚については, 建設技術審査証明報告書及び先行原子力発電所における審査実績の範囲よりも小さい部材があることから, フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として, 4.5 節にて確認する。

表 4-2 適用範囲の整理結果

III. 構造細目	IV. 部材諸元			V. 載荷方法
	せん断補強鉄筋比 (%)	部材厚 (mm)	せん断スパン比*	
建設技術審査証明書で規定されている適用範囲				荷重形態
建設技術審査証明書の実験から確認した範囲				
先行原子力発電所における審査実績 (美浜3号機)				
先行原子力発電所における審査実績 (東海第二)				

III. 構造細目	IV. 部材諸元		V. 載荷方法			
	せん断補強鉄筋比 (%)	部材厚 (mm)				
2号機 取水槽	底版	最大配置間隔 (mm)	P1bの鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	荷重形態	
		有効高さ (mm)				P1bの鉄筋径
	中床版	250	D22, D25, D29	S10345	1.27~1.82	分布荷重
		861~1,889				
	側壁	250	D22, D29	S10345	0.46~2.85	集中荷重
		865~941				
	導流壁	250	D22, D25, D29	S10345	0.41~1.94	分布荷重
		623~1,889				
	妻壁	250	D22	S10345	1.53	集中荷重
		1,087				
1号機 取水槽	中床版	250	D22, D25	S10345	集中荷重	
		620~1,887				
復水貯蔵タンク遮蔽壁	遮蔽壁	300	D19	S10345	集中荷重	
		923				
補助復水貯蔵タンク遮蔽壁	遮蔽壁	300	D29	S10345	分布荷重	
		923				
トールラス水受入タンク遮蔽壁	遮蔽壁	150	D13	S10345	集中荷重	
		420				
2号機 取水槽	遮蔽壁	115	D13, D19, D22	S10345	集中荷重	
		230				
1号機 取水槽	遮蔽壁	115	D13	S10345	集中荷重	
		230				

注記\*: せん断スパン比  $a/d$  (a: 支間長, d: 有効高さ)

注記\*: せん断補強効果の確認より確認する範囲

注記\*: フロー② (建設技術審査証明書報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認) より確認できた範囲

注記\*: フロー③ (せん断補強効果の確認) より確認する範囲

(5) VI～IX. 使用材料（せん断補強筋，プレート，充てん材，断面修復材）

「建設技術審査証明報告書」に記載されている使用材料と合致している。（表 4-3 参照）

表 4-3 PHb の適用条件と使用状況（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



	建設技術審査証明報告書の材料範囲	使用状況
せん断補強筋 (ねじ節鉄筋)		左記範囲内の材料を使用する。 (D13～D29 SD345)
プレート		SM490 相当の材料を使用する。
充てん材		構造体コンクリート以上の強度とする。
断面修復材		構造体コンクリート以上の強度とする。

(6) X. せん断補強筋の定着長

「建設技術審査証明報告書」で設定されている定着長を考慮していることを確認している。

(7) XI. せん断ひび割れ抑制効果の確認

「建設技術審査証明報告書」及び先行原子力発電所における審査実績と，島根 2 号機にて PHb により耐震補強を行った構造物の部材厚が異なっていることから，フロー③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認として，4.5にて確認する。

(8) X II. ひび割れに対する定着機能の保持

主鉄筋に SD345 を用いている島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物については、応答値として主鉄筋のひずみが降伏ひずみ ( $1725\mu$ ) 未満又は応力が降伏強度 ( $345\text{N/mm}^2$ ) 未満であることを確認している。

(9) X III. 変形量

PHb により耐震補強を行った構造物の変形量が建設技術審査証明報告書の実験の変形量を超えないことを確認している。

「建設技術審査証明報告書」の梁試験体における層間変形角は 0.4% 以上程度であるが、島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物の層間変形角は最大でも 0.06% 程度であり、梁試験体の変形量以下に収まっていることを確認している。

(10) X IV. 使用環境

「建設技術審査証明報告書」に、「橋脚では鋼板巻き立て、RC 巻き立て工法等による耐震補強が一般的であるが、これらの補強工法の適用が困難な周辺環境・立地条件下において、「Post-Head-bar」の特徴を活かしたせん断補強が可能となる場合が考えられる。それ以外でも、背面が地盤である橋台のせん断補強や、上下水処理施設の地下部から連続して立ち上がっている地上部の構造物などが考えられる。」と記載されており、原子力施設などの重要地下構造物及び海水環境下よりも、より使用環境が厳しい下水処理施設を対象としていることから、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等にも適用可能である。

PHb そのものはすべて構造物内に埋設され、かぶり部分によって腐食に対する抵抗性が確保される。また、4.7 に記載のとおり、気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認できている。

#### 4.5 ③建設技術審査証明報告書の適用範囲外の項目に対するせん断補強効果の確認

##### 4.5.1 せん断補強効果の確認内容

「4.3 ①適用性確認項目の抽出」で抽出した適用性確認項目のうち、「4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認」から確認できなかった項目について、4.5.2以降において、数値解析による検証等により、せん断補強効果が期待できることを確認する。確認する項目を以下に示す。

- (1) 部材諸元（部材厚）
- (2) せん断ひび割れ抑制効果の確認

##### 4.5.2 せん断補強効果の確認

- (1) 部材諸元（部材厚）、(2) せん断ひび割れ抑制効果の確認

部材厚が「建設技術審査証明報告書」に記載の実験と異なっても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できるかを数値解析により確認する。

数値解析の詳細については、添付資料2「島根2号機における部材諸元他の適用性の検討」に示す。添付資料2に示すとおり、部材厚が「建設技術審査証明報告書」の実験条件と異なっても、PHb工法が適用可能であること及びせん断ひび割れ抑制効果があることを確認した。

#### 4.6 ④PHbの施工精度に影響を与える項目の確認

PHb工法によるせん断補強においては、施工精度の低下により計画どおり施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、施工精度に影響を与える項目を抽出し、施工精度の低下やせん断補強効果に大きな影響を与えないことを確認する。以下に、抽出した項目を示す。

- ① 削孔方法
- ② 削孔角度
- ③ 削孔位置
- ④ グラウトの充てん性

##### 4.6.1 削孔方法

PHb挿入計画位置をドリルにより削孔するが、その削孔方法としてはレッグハンマードリル又はコンクリートコアドリルの使用が主となっている。コンクリートコアドリルは設置面に強固に固定でき、掘削方向と掘削深さを精度良く確保することが容易であることから、原子力発電所施設では主にコンクリートコアドリルでの削孔を採用している。

なお、削孔においては表4-5のとおり、施工精度を確保するために管理基準を設けている。

表 4-5 削孔に関する品質管理基準

管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
一般部の削孔長 拡幅部の削孔長	メジャーによる計測	0mm ≤ 設計値 ≤ 20mm かつ、削孔先端から 埋込側表面までの厚 さ 50mm 以上	全数
一般部の削孔径 拡幅部の削孔径	ノギスによる計測	設計削孔径以上	

#### 4.6.2 削孔角度

PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、PHb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そのためコンクリートコアドリルを専用架台に設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるよう水平器、金尺等で確認し削孔することにより、削孔角度のばらつきが生じる可能性を低減させる。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」（建技審証第 1203 号）」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している（図 4-6 参照）。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1200mm×高さ 600mm×長さ 1200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を、表 4-6 に示す。削孔角度誤差を換算すると、長さ 1200mm、2400mm は  $0.72^\circ$ 、長さ 3600mm で  $0.66^\circ$  となり、コアドリルによる長尺削孔は十分精度があることが示されている。



図 4-6 試験概要図

表 4-6 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果

削孔長さ (mm)	削孔角度誤差 (°)
1200	0.72
2400	0.72
3600	0.66



#### 4.6.3 削孔位置

PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず PHb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し PHb を挿入することで設計上必要な鉄筋量を確保する。再削孔し PHb を配置する際は、4.4 節に示す記載事項を満足するものとする。なお、図 4-7 に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。再削孔の際、新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性があることから、孔を隣接させて削孔することが可能なコンクリートコアドリルを使用し、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置に変更が生じて必要鉄筋量を確保できるためせん断補強効果に影響を及ぼさない。

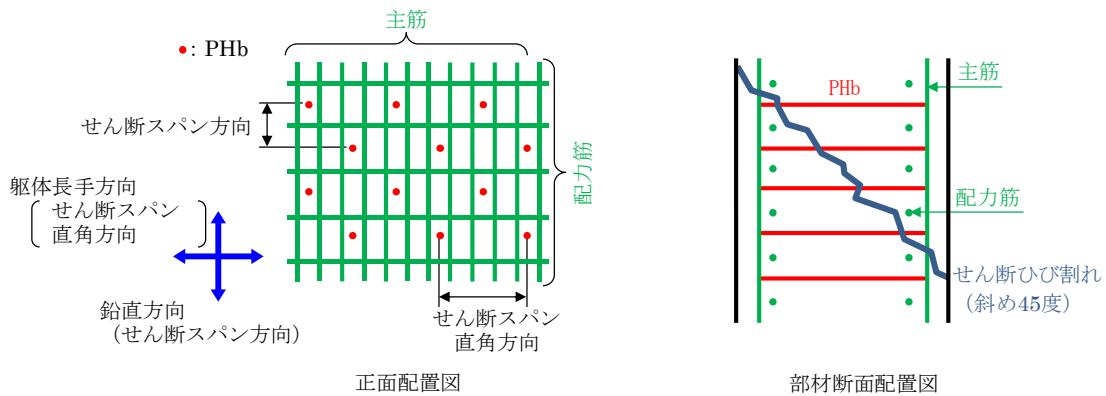


図 4-7 せん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

#### 4.6.4 グラウトの充てん性

グラウトの充てん性については、充てん確認実験により、削孔内に設置した PHb の先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、PHb とコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。以下に、「建設技術審査証明報告書」に記載されている充てん確認実験の内容を示す。

充てん性確認実験は、①横向き施工、②上向き施工にて実施されている（図 4-8 参照）。

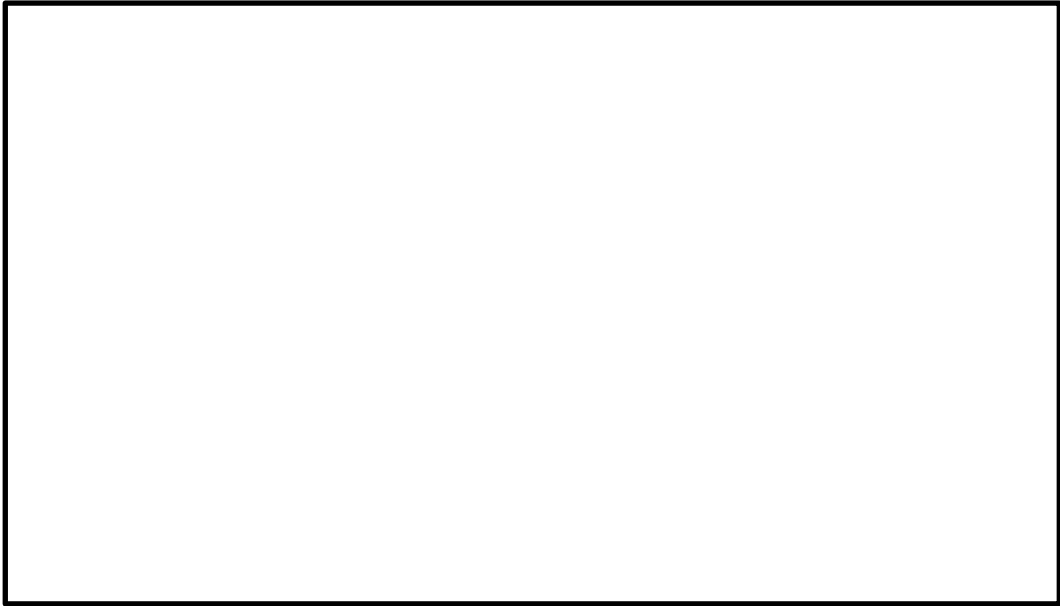


図 4-8(1) グラウトの充てん確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

① 横向き施工

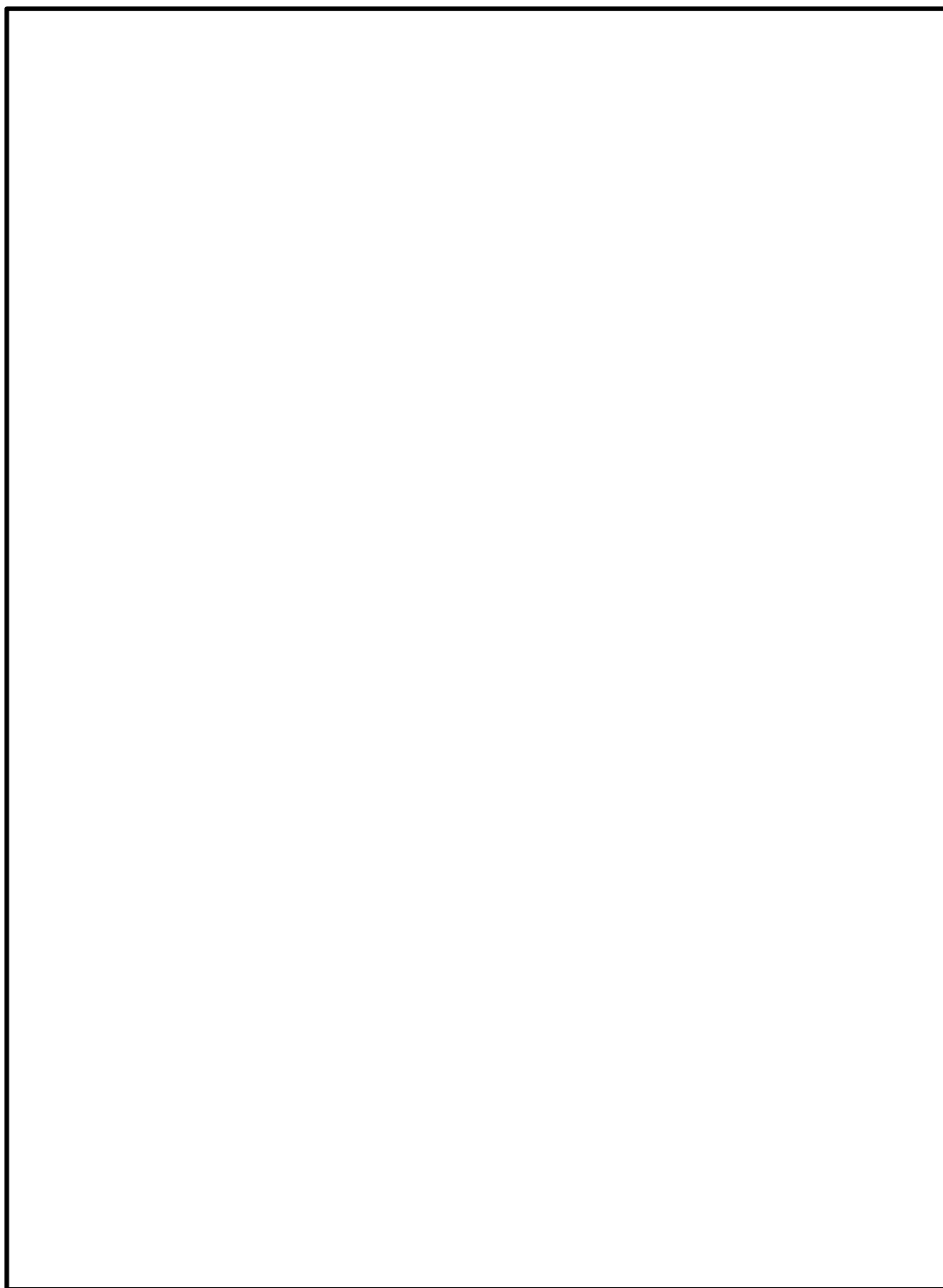


図 4-8(2) グラウトの充てん確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

②上向き施工

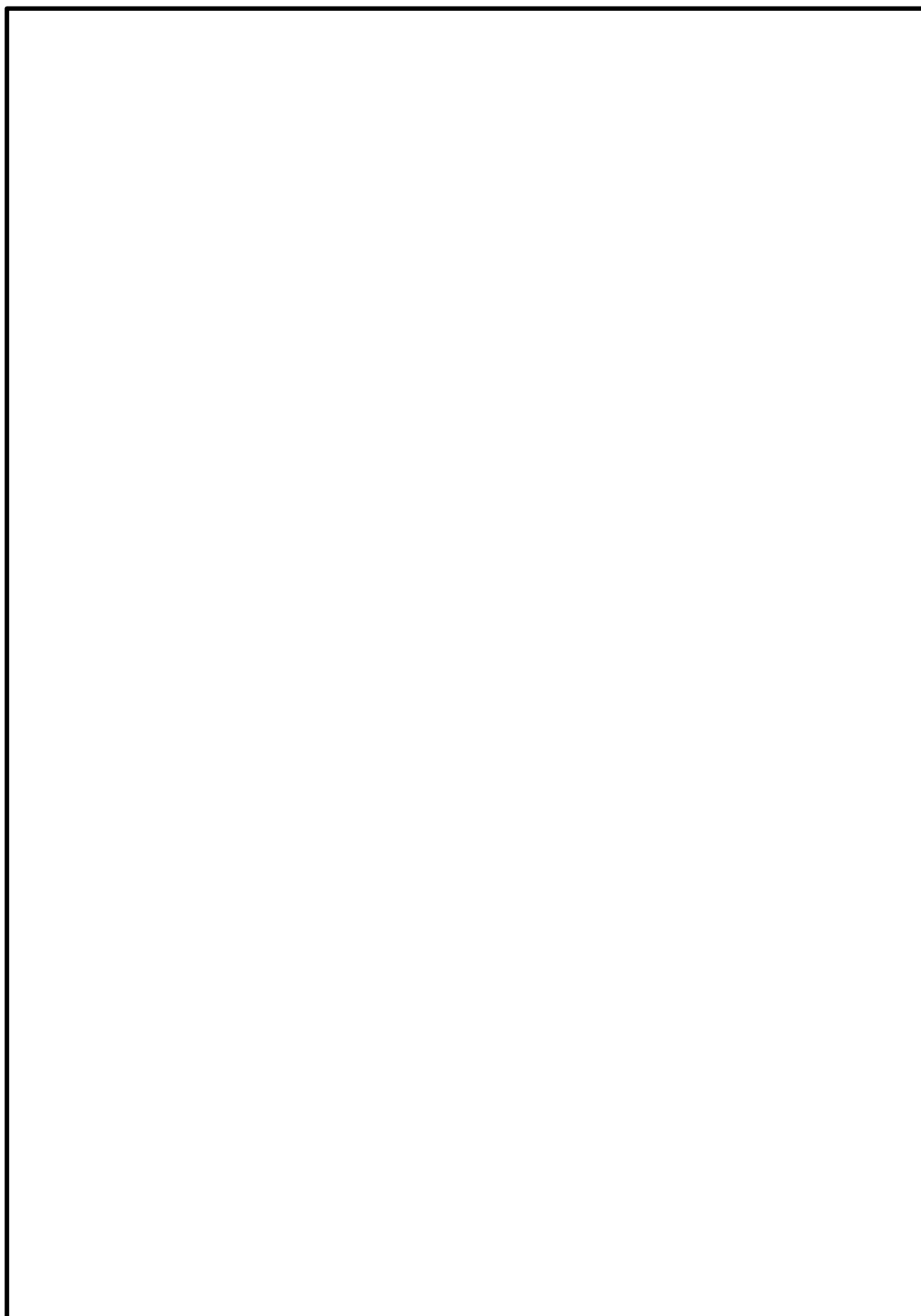


図 4-8(3) グラウトの充てん確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

4.6.1～4.6.4 に示すとおり，施工上の配慮により，せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下が生じる可能性は低いことが確認できる。

しかし，現時点では後施工による施工精度に対して，施工実績に基づく十分な統計がとれていないため，施工精度の低下による影響が生じる可能性を否定することはできない。

以上を踏まえて，適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工精度の低下への設計上の配慮として，耐震評価上の裕度（例えば照査値を8割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

#### 4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認

PHb の施工実績及び後施工せん断補強に関する研究事例を踏まえ、PHb 工法及び施工への反映事項を確認する。

##### 4.7.1 施工実績の整理

PHb の施工実績は、表 4-7 に示すように 2018 年 4 月 1 日までに、道路、浄化センター、ポンプ場、鉄道、浄水場、水門、配水路、発電所・プラントなど施工中案件を含めて 711 件の工事に適用され、119.2 万本以上が施工されている。

表 4-7 PHb の施工実績



PHb の施工実績を部材厚、鉄筋径及び使用環境ごとに整理する。部材厚ごとに整理した結果を表 4-8 に、鉄筋径ごとに整理した結果を表 4-9 に、使用環境（気中又は水中）ごとに整理した結果を表 4-10 に示す。なお、カウントする際は、1 件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている（例：同一工事内で D13、D16、D19 の鉄筋を用いている場合は D13、D16、D19 のすべてにカウント）。

表に示すとおり、十分に実績のある範囲にあることが確認できる。

表 4-8(1) PHb の施工実績 (部材厚) \*

部材厚(mm)	件数
～500	249
501～1000	504
1001～1500	352
1501～2000	212
2001～	170

注記\* : ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-8(2) PHb の施工実績 (部材厚) \*

(上記実績のうち横向き施工)

部材厚(mm)	件数
～500	191
501～1000	335
1001～1500	197
1501～2000	118
2001～	118

注記\* : ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-9 PHb の施工実績 (鉄筋の種類) \*

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	199
	D16	419
	D19	334
	D22	366
	D25	222
	D29	166
	D32	123

注記\* : ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-10 PHb の施工実績（使用環境）\*

施工場所	件数
気中	48
水中	694

注記\*：ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。



#### 4.7.2 過去の地震の経験事例

PHb 施工実績のうち、東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において、震度 5 強以上が観測された地域にある、地震発生前に施工された実績若しくは施工中であった実績を抽出した。

東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において K-NET 又は KIK-NET で観測された加速度及び PHb を施工した箇所の位置関係を図 4-9 及び図 4-10 に示す。東北地方太平洋沖地震においては、最大震度 6 強、熊本地震においては、最大震度 6 弱の地震を受けた事例があることを確認した。PHb 工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では、被害・不具合が発生したという報告はない。

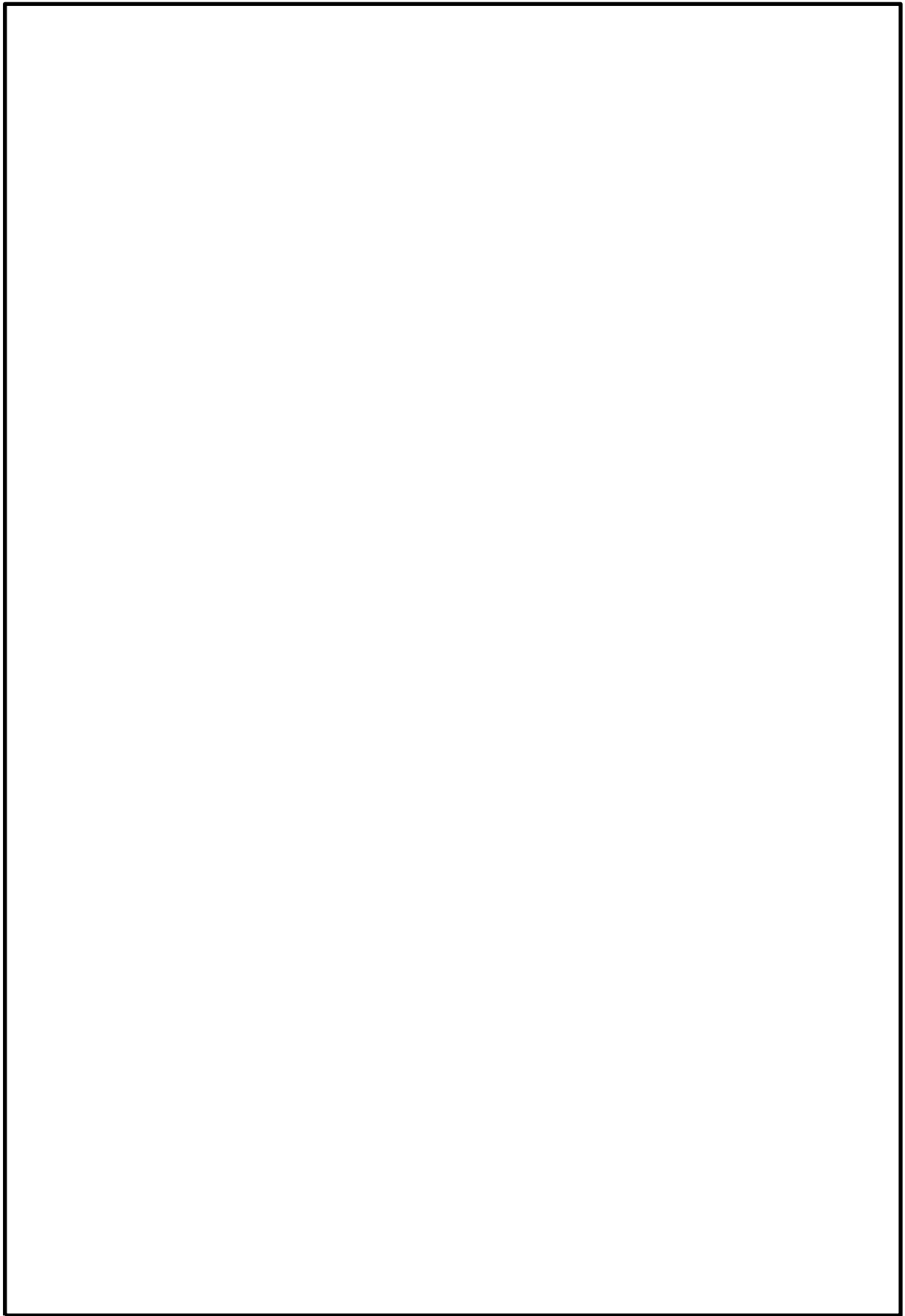


図 4-9 東北地方太平洋沖地震の強震域にある施工実績

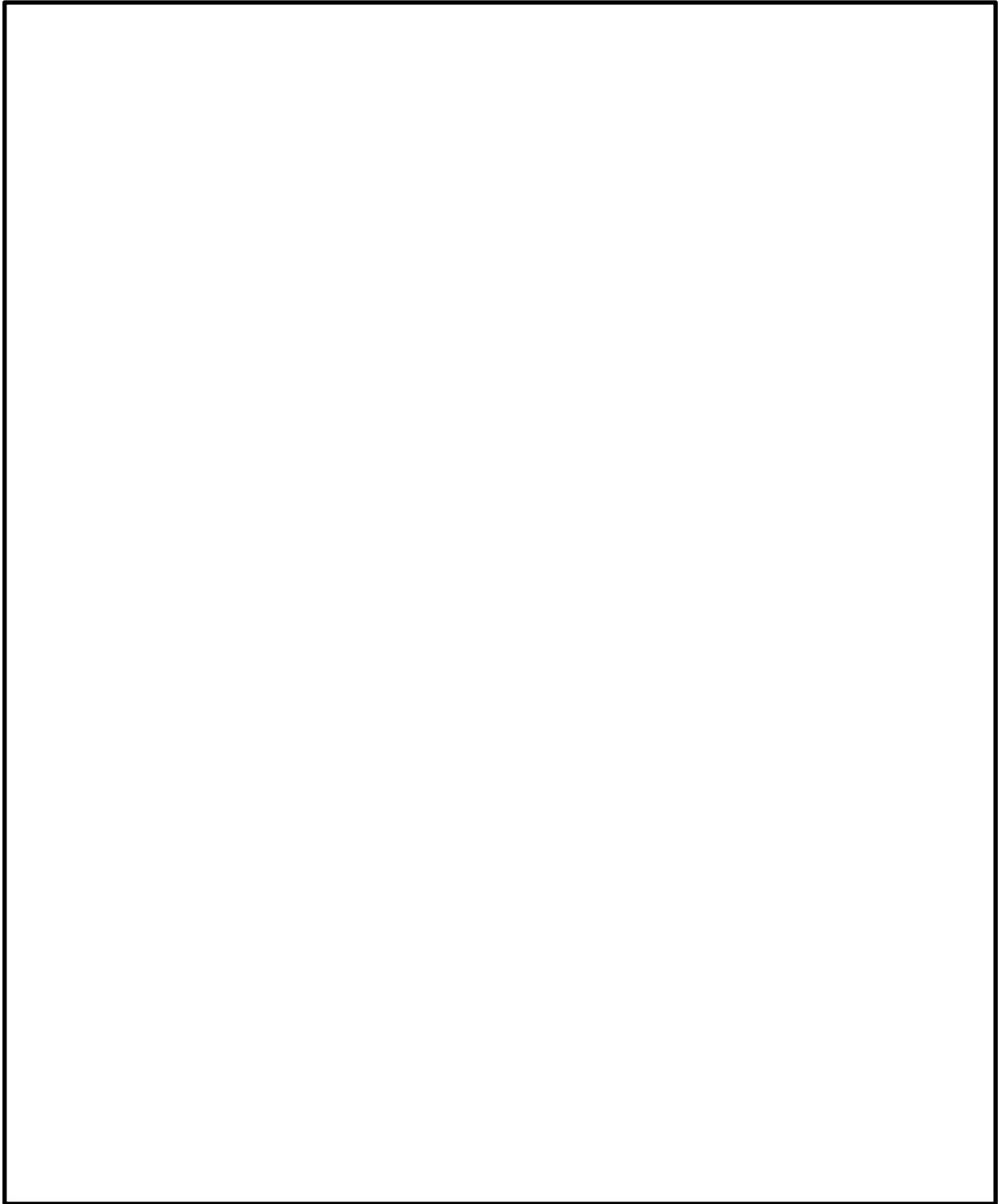


図 4-10 熊本地震の強震域にある施工実績

#### 4.7.3 レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法 RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている\*。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したことによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上で20m弱の盛土をおこなった構造物である。詳細については、4.7.5④に記載する。

注記\*：参考文献

後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について（岡崎大宜）

#### 4.7.4 後施工せん断補強工法の比較

PHb 工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強工法の比較結果を、表 4-11 に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するものの、おおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

表 4-11(1) 後施工せん断補強工法の比較

--

注：土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

表 4-11(2) 後施工せん断補強工法の比較

--

注：土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成

#### 4.7.5 後施工せん断補強筋に関する研究事例

後施工せん断補強工法に関する研究事例や施工実績に関する文献から着目すべき事項を整理し、島根2号機におけるPHb工法への反映事項を確認する。

##### ① コンクリート構造物の後施工せん断補強技術

###### ◆ 文献の要旨

既存のコンクリート構造物の耐震補強技術のうち、カルバートや地下貯水槽の壁（地下壁構造）に用いられるせん断補強（後施工せん断補強）技術について述べられたものである。

###### ◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の定着性能の確認試験として、鉄筋の引抜き試験が例示されている。
- ・ 標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されている。
- ・ 後施工せん断補強効果の確認試験として、梁試験体の正負交番載荷試験が例示されている。
- ・ 「マルチプルナット」、「セラミックキャップバー（CCb）」、「Post-Head-bar（PHb）」の建設技術審査証明報告書を参考文献としている。

###### ◆ 島根2号機におけるPHb工法への反映事項の確認

- ・ 後施工せん断補強技術が地下壁構造に対して効果的であることを確認した。
- ・ PHb工法の「建設技術審査証明報告書」には、本文献と同様の引抜き試験、梁試験体の正負交番載荷試験が実施され、それら試験結果に基づいた有効係数による評価手法が明記されていることを確認した。

## ② 耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

### ◆ 文献の要旨

既設の地中構造物を後施工によりせん断補強する工法として RMA 工法が報告されている。

### ◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、引抜き試験による定着性能の確認、梁試験体の正負交番載荷によるせん断補強効果の確認を実施している。
- ・ 後施工せん断補強において、せん断補強筋の定着長を考慮した有効係数によるせん断補強効果の評価手法が示されている。なお、この評価手法は参考文献として示されている「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」（(社)土木学会、2005）に準じている。
- ・ RMA 工法により補強が実施された構造物は、東日本大地震においても損傷がなかったことが報告されている。

### ◆ 島根 2 号機における PHb 工法への反映事項の確認

- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と同様の性能確認試験を PHb 工法でも実施していることを確認した。
- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と PHb 工法とでは、定着方法の差異により定着長が異なるが、有効係数の算出方法は同様であり、PHb 工法の「建設技術審査証明報告書」に示される有効係数の算出方法が一般的であることを確認した。
- ・ PHb により耐震補強を行った構造物において、現時点で地震による被害・不具合が発生していないことを確認した。



③ 論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

◆ 文献の要旨

既存のボックスカルバート等の連続壁に異形鉄筋を埋込みせん断補強を行う方法に対し、その有効性を確認するために梁供試体を用いたせん断試験が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強した供試体のせん断耐力を実験で確認した結果、先施工として算出したせん断耐力（設計値）とほぼ同等のせん断耐力が得られている（実験値/設計値=0.93～1.12）。
- ・ 後施工によりせん断補強した供試体のせん断耐力は、先施工した供試体のせん断耐力と同等のせん断耐力を有している（後施工/先施工=0.85～1.07）。

◆ 島根2号機におけるPHb工法への反映事項の確認

- ・ 先施工のせん断補強に対するPHb工法の有効係数は、「建設技術証明報告書」に記載されている梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

④ 後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

◆ 文献の要旨

広島空港の滑走路及び誘導路直下の地下構造物（用倉トンネル）が、レベル2地震動に対する耐震性能照査においてせん断耐力が不足していることが確認された。用倉トンネル（アーチカルバート）に対し耐震補強工法の選定・検討を実施し、RMA工法による後施工せん断補強が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 重要施設である空港滑走路及び誘導路直下の地下構造物（アーチカルバート）に対して、後施工型せん断補強工法（RMA工法）による耐震補強が実施されている。
- ・ アーチカルバートの補強には、増厚工法，後施工せん断補強工法（鉄筋差込工法），接着工法，巻立て工法の中から，施工後においても現況の内空断面を確保でき，坑内からの施工も可能である後施工せん断補強工法が選定されている。
- ・ 補強対象のアーチカルバートの部材厚は1600mmである。

◆ 島根2号機におけるPHb工法への反映事項の確認

- ・ 地下構造物の補強工法として，後施工せん断補強工法が効果的であることを確認した。
- ・ 島根2号機においてPHbにより耐震補強を行った部材と同程度又はそれ以上の部材厚に対して後施工せん断補強工法の施工実績があることを確認した。

## ⑤ 地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

### ◆ 文献の要旨

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い、先施工せん断補強と後施工せん断補強との耐力比較及び後施工せん断補強筋の埋込長の違いによる耐力比較が行われている。

### ◆ 着目すべき事項

- ・ せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定については、新設構造物を対象とした乾燥収縮等によるひび割れを防ぐためのものであることから考慮せず、有効高さの 1/2 としている。
- ・ 先端を 45 度にカットした後施工によるせん断補強の場合、先施工の設計耐力に対して最低でも 80% 程度のせん断耐力が実験で得られている。

### ◆ 島根 2 号機における PHb 工法への反映事項の確認

- ・ 島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており乾燥収縮は終了していることから、せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定は除外した。
- ・ 先施工のせん断補強に対する PHb 工法の有効係数は、「建設技術審査証明報告書」に記載される梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

⑥ 論文 セン断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

◆ 文献の要旨

せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を確認することを目的として、せん断補強筋の定着フック及び端部付近の付着を除去したはりを作製し、せん断耐力の低下と破壊モードを実験的に検証している。また、材料非線形解析における定着不良部のモデル化について検討されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ セン断補強筋の定着不良部から鉄筋径の 10 倍程度を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとすれば、二次元ひび割れ解析でせん断耐力を概略評価することが可能であることが示されている。

◆ 島根 2 号機における PHb 工法への反映事項の確認

- ・ 島根 2 号機における解析によるせん断補強効果の確認について（添付資料 2）において、PHb のモデル化に本解析手法を参考とした。

⑦ 地下道における PHb(ポストヘッドバー)工法の採用と積雪寒冷地の施工について

◆ 文献の要旨

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 充てん材の温度と強度の関係を把握するための試験施工が実施されており、充てん材料が 0℃以下の履歴を受けた場合、強度発現が低下することが確認されている。

◆ 島根 2 号機における PHb 工法への反映事項の確認

- ・ PHb 工法においては充てん材料が 0℃以下とならないように、施工上の管理基準 (5℃以上) を設けて適切な施工管理を実施した。

⑧ せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

◆ 文献の要旨

東京都港湾局が後施工せん断補強工法における補強効果確認のために行った室内せん断実験の概要，その実験結果の設計への反映，実施工への適用及びその施工結果についての考察が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じている。

◆ 島根 2 号機における PHb 工法への反映事項の確認

- ・ PHb 工法は第三者機関による審査証明が行われており，その中で施工の確実性についても審査対象となっていることから，本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はない。なお，4.6 にて施工精度の向上に向けた方策を記載している。

後施工せん断補強筋に関する施工実績及び各研究事例を踏まえて、設計及び施工へ反映している事項を以下に示す。

- 硫酸等の影響を受ける腐食環境下である浄化センター（下水道処理施設）での実績もあり、島根2号機で採用する環境よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。
- 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、定着性能の確認、梁試験体の正負交番载荷によるせん断補強効果の確認を実施しており、PHb工法においても同様の確認を行っている。
- 標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する、後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されており、PHb工法においても同様の評価手法であることを確認した。

#### 4.8 島根2号機におけるPHb工法の保守性と設計上の制限の整理

島根2号機において、PHbにより耐震補強を行うにあたっての保守性と設計上の制限について整理する。

##### 4.8.1 PHb工法の保守性

「建設技術審査証明報告書」において、図4-11のとおりせん断耐力の設計計算値と比較して、せん断耐力の実験値が大きかった結果が示されている。このことから、設計においてPHbが負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数 $\beta_{aw}$  (PHbのせん断耐力の補強効果を示す有効係数)を用いることで、せん断耐力を安全側に評価することができる。

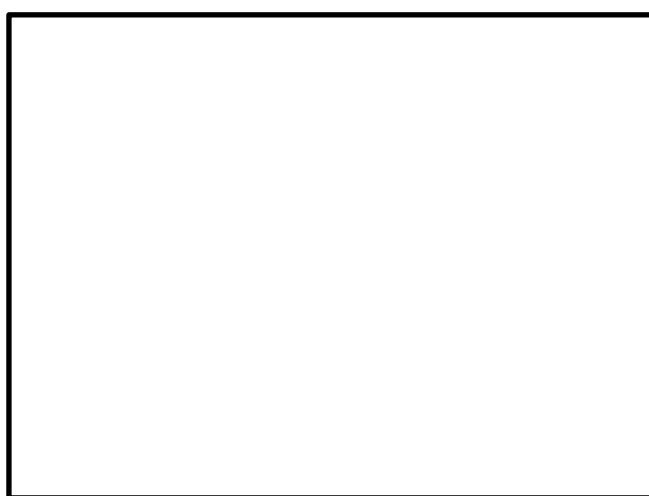


図4-11 有効係数 $\beta_{aw}$ の保守性

##### 4.8.2 島根2号機においてPHbにより耐震補強を行うにあたっての保守性

設計においてPHbが負担するせん断耐力は、棒部材式により算出されるせん断耐力よりもディープビーム式により算出されるせん断耐力の方が大きくなるが、保守的に棒部材式により算出されるせん断耐力により部材の照査を行うことで、本来必要と考えられるせん断補強筋量以上のせん断補強筋を配置している。



#### 4.8.3 島根2号機においてPHbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限

島根2号機ではSD345の鉄筋を使用していることから、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが $1725\mu$ 以下（応力が降伏強度以下）、もしくは面内せん断力に対して、コンクリートのみで抵抗可能な部材を対象におおむね弾性範囲となる状況下でPHb工法を使用する。

また、かぶりコンクリートの剥落によってPHbの定着機能を阻害するおそれがあることから、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ1.0%又は層間変形角1%（1/100）に、十分な余裕をもってPHb工法を使用する。なお、当使用制限は一般に上記に示す鉄筋のひずみに対する制限により満足される。

PHbの施工において、施工精度の低下が生じる可能性は低いが完全に否定できるものではないこと等から、設計上の配慮として耐震評価上の裕度（せん断破壊に対する照査値をおおむね0.8程度に抑える）を持たせた設計を行う。

#### 4.8.4 PHb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

4.8.1～4.8.3 に示す，島根 2 号機において PHb により耐震補強を行うにあたっての保守性及び設計上の制限を考慮した設計検討フローを図 4-12 に示す。

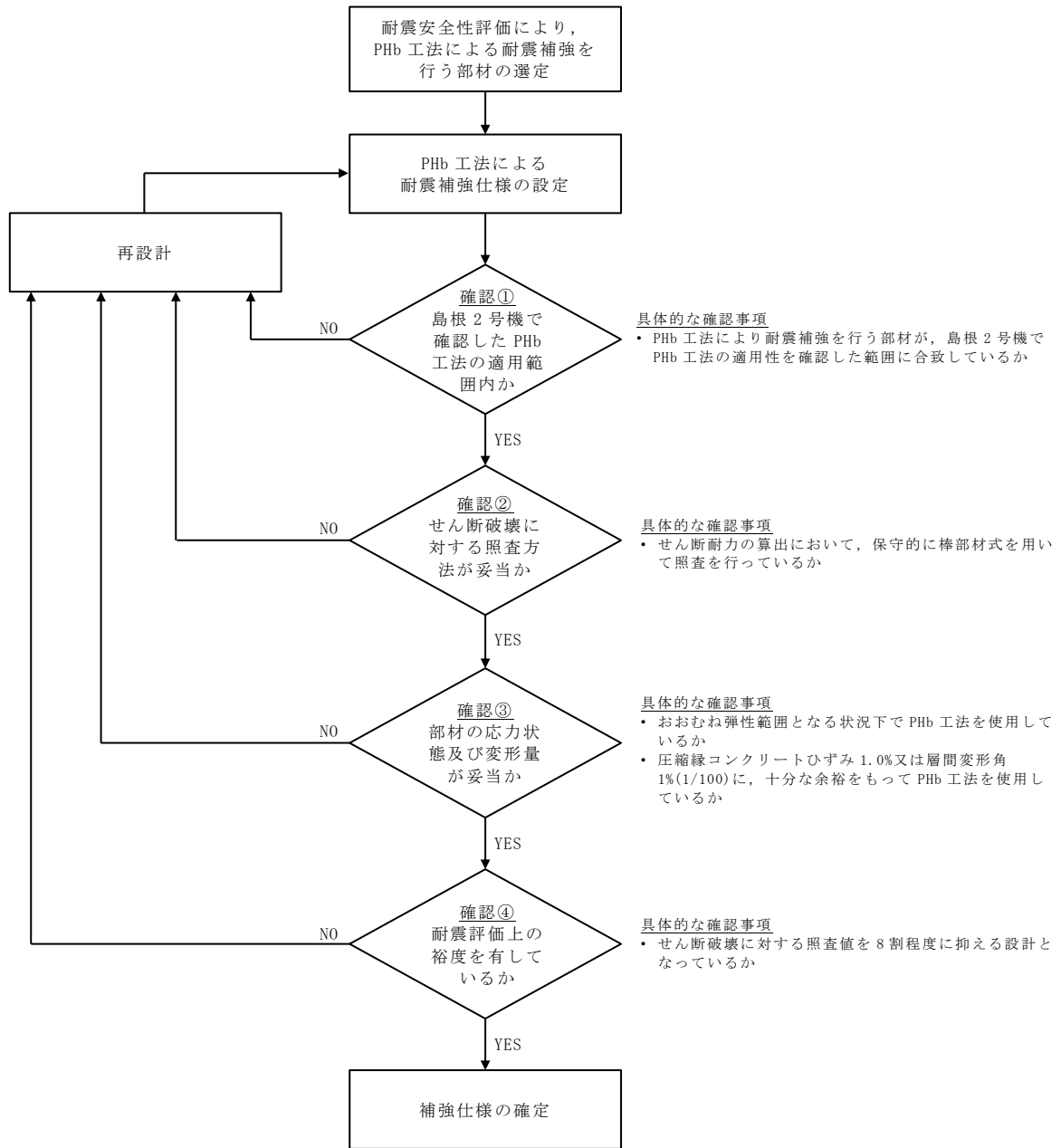


図 4-12 PHb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

#### 4.9 PHb の適用性確認結果

島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物の補強仕様について、4.1 に従い PHb 工法の適用性を検討した結果、「建設技術審査証明報告書」に記載のとおり、せん断補強効果が期待できることを確認した。

建設技術審査証明書



建設技術審査証明書

建設審証第 0522 号

技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋  
「Post-Head-bar」

(開発の趣旨)  
せん断補強を構造物の内側からしか行うことができない使用中の既設構造物に対して、部材の片側からのみの施工が可能で、かつ、せん断耐力のみを向上して、せん断余裕度を向上させ、せん断破壊モードから曲げ破壊モードに移行させることができる後施工せん断補強鉄筋を提供する。  
(開発目標)

- (1) 力学性能
- 1) 後施工せん断補強鉄筋の定着性能  
後施工せん断補強鉄筋の実装伏荷重を發揮するために必要な凹形プレート部の定着長が、鉄筋の種類および呼び名に応じて設定できること。
  - 2) 施工後のせん断耐力  
「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」の凹形プレート部の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できること。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の「Post-Head-bar」により補強した場合に、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に「Post-Head-bar」の有効係数を用いて評価できること。
  - 3) 施工後の変形性能  
新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性能が確保されること。  
補強後の部材の骨格曲線は、補強後の合計せん断補強鉄筋量に上限値を考慮して設定した量のせん断補強鉄筋が配置された部材として算定できること。
- (2) 施工性
- 1) 適用部材  
背面に地盤や水、機器などの障害物などがあるような制約のある施工条件においても、構造物の片側からのみの施工によりせん断補強できること。
  - 2) 施工の容易性と迅速性の評価  
狭い空間や複雑な部位においても、大型機械を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあること。

一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明事業実施要領に基づき、依頼のあった標記の技術について下記のとおり証明する。

2006年 12月 21日		2016年 10月 17日	内容変更
2010年 12月 21日	内容変更・更新	2018年 6月 18日	内容変更
2011年 8月 22日	内容変更	2020年 12月 21日	内容変更・更新
2015年 12月 21日	更新		

建設技術審査証明事業実施機関  
一般財団法人 土木研究センター  
理事長 常田 賢一  
記

1. 審査証明の結果  
「Post-Head-bar」は以下の性能を有することが確認された。
- (1) 力学性能
- 1) 後施工せん断補強鉄筋の定着性能  
後施工せん断補強鉄筋の実装伏荷重を發揮するために必要な凹形プレート部の定着長が、鉄筋の種類および呼び名に応じて審査証明報告書に示す値で設定できることが確認された。
  - 2) 施工後のせん断耐力  
「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」の凹形プレート部の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。ただし、有効係数の上限値は 0.9 とする。せん断スパン比が小さい部材に対しても、SD345 以上の「Post-Head-bar」により補強した場合には、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に「Post-Head-bar」の有効係数を用いて評価できることが確認された。
  - 3) 施工後の変形性能  
新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性能が確保されることが確認された。  
補強後の部材の骨格曲線は、補強後のせん断補強鉄筋と「Post-Head-bar」を合わせた実配置に対し、変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の設定値に上限を設けた部材として算定できることが確認された。
- (2) 施工性
- 1) 適用部材  
背面に地盤や水、機器などの障害物などがあることで片側からしか施工できない RC 部材に対しても、せん断補強できることが確認された。
  - 2) 施工の容易性と迅速性の評価  
狭い空間や複雑な部位においても、大型機械を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあることが確認された。
2. 審査証明の前提
- (1) 本審査証明は、依頼者からの試験データ等の資料を基に審査し、確認したものである。
  - (2) 「Post-Head-bar」は、所定の材料を用いて、適正な品質管理のもとで製造されるものとする。
  - (3) 「Post-Head-bar」は、適正な補強設計によって計画されるものとする。
  - (4) 「Post-Head-bar」は、適正な機械および施工手順によって設置されるものとする。
  - (5) 「Post-Head-bar」は、適正な管理のもとで施工されるものとする。
3. 審査証明の範囲
- (1) 地盤時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤などがあり片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
  - (2) 梁、水門、橋台や橋脚等の既設の平地下および地上構造物に適用する場合には、地中構造物の場合と同様にせん断補強の目的で用いるものとし、現状で曲げ破壊モードにある構造物の変形性能の更なる改善を目的とする補強に用いてはならない。せん断補強により 2 次的に得られる変形性能を考慮する場合には、変形の応答側は変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量に上限値(「Post-Head-bar」の矩形プレート部で 0.30%、凹形プレート部で 0.15%)として求めた部材の骨格曲線の範囲内に限定する。
  - (3) 柱で支持される欄干のアーチングのようなせん断スパン比の小さい部材に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
  - (4) 「Post-Head-bar」を配置するせん断スパン方向の最大間隔は、補強対象部材の有効高きの 1/2 倍以下とする。なお、補強前の構造物内に配置されているスターフラップ等の位置が明確であれば、それらの鉄筋を考慮してもよいものとする。
  - (5) 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔 (d - d') と凹形プレート部の必要定着長 L<sub>1</sub> について、片端矩形プレート型「Post-Head-bar」の場合は (d - d') ≥ L<sub>1</sub>、両端凹形プレート型「Post-Head-bar」の場合は (d - d') ≥ 2L<sub>1</sub> を満たす場合に適用できる。ただし、鉄筋の呼び名が D32 の両端凹形プレート型「Post-Head-bar」については、(d - d') ≥ 710mm も満たす場合に限り適用できる。
  - (6) 適用可能な節孔長の標準値は横向き施工・下向き施工で 9m 以下、上向き施工で 3.5m 以下とし、大型構造物などでこれよりも長くなる部材へ適用する場合には、別途施工試験を行ってモジュール充填率などを確認する。
4. 審査証明の詳細: 建設技術審査証明報告書  
5. 審査証明の有効期限: 2025年 12月 20日  
6. 審査証明の依頼者

大成建設株式会社  
所在地: 東京都新宿区西新宿 1-25-1  
成和リニューアルワークス株式会社  
所在地: 東京都港区六本木 1-6-1

## 島根 2 号機における部材諸元他の適用性の検討

## 1. はじめに

PHb による補強効果については、「建設技術審査証明報告書」の各種実験にて検証している。ここでは、島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁の部材厚が「建設技術審査証明報告書」に記載の実験で用いられた部材厚よりも薄い場合においても、せん断ひび割れを抑制し、せん断補強効果を期待できることを材料非線形解析を用いた数値実験により確認する。

材料非線形解析に用いる鉄筋コンクリートの構成則については種々あるが、ここでは、現在までに実務でも使用され、適用性と信頼性が確認されている「コンクリート標準示方書 2017」において標準とされている以下の手法とする。

- ・ 鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
- ・ 鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては、平均化構成則を用いる。
- ・ 鉄筋との複合作用が及ばない領域では、コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

材料非線形解析に用いる解析コードは、上記の鉄筋コンクリートの構成則を有する解析コードの 1 つである「WCOMD Studio ver.1.3.3」とする。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

## 2. せん断補強効果の確認

## 2.1 検討方針

PHb を考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し、島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った構造物への PHb 工法の適用性をステップ①、②により確認する（図 2-1 参照）。

なお、従来工法である先施工のせん断補強筋を想定した材料非線形解析も比較ケースとして実施する。

## 2.1.1 ステップ①：PHb の解析上のモデル化方法の確認

材料非線形解析を実施するにあたり、PHb の解析上のモデル化方法を確認する。

PHb は従来工法（先施工）のせん断補強筋と異なり、PHb とコンクリート間の付着により定着していることから、PHb 工法は従来工法よりも定着性能が劣るものと仮定し、PHb のモデル化方法の妥当性を確認する。モデル化は、前川らによる「せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響（コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 2, 2004）（以下「前川ら」という。）を参考に、せん断補強筋が機能しない区間（無効区間：要素内鉄筋比をゼロとする区間）を設定することとしている。

モデル化方法の妥当性は、「建設技術審査証明報告書」のせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し、実験結果と解析結果のせん断耐力の比較により確認する。

### 2.1.2 ステップ②:建設技術審査証明報告書の実験よりも小さな部材厚に対する適用性の確認

島根2号機の PHb により耐震補強を行った構造物のうち、最も部材厚の小さい補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁 (t=300mm)を想定して材料非線形解析を行い、実験よりも小さな部材厚に対する適用性を確認する。適用性の確認は、ステップ①とステップ②により行う。

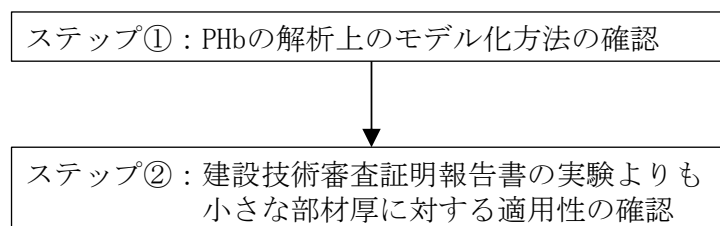


図2-1 島根2号機における部材諸元他の適用性確認フロー

### 3. ステップ①：PHb の解析上のモデル化方法

PHb の定着効果及び付着効果を考慮したモデル化方法の妥当性の確認を目的に、「建設技術審査証明報告書」の実験で用いた試験体をモデル化し、材料非線形解析を行う。

モデル化の対象とする試験体は PHb 先端位置が主鉄筋手前であり、島根2号機の施工実績と合致する CASE 5 を選定する。図3-1に試験体 (CASE 5) の諸元を示す。

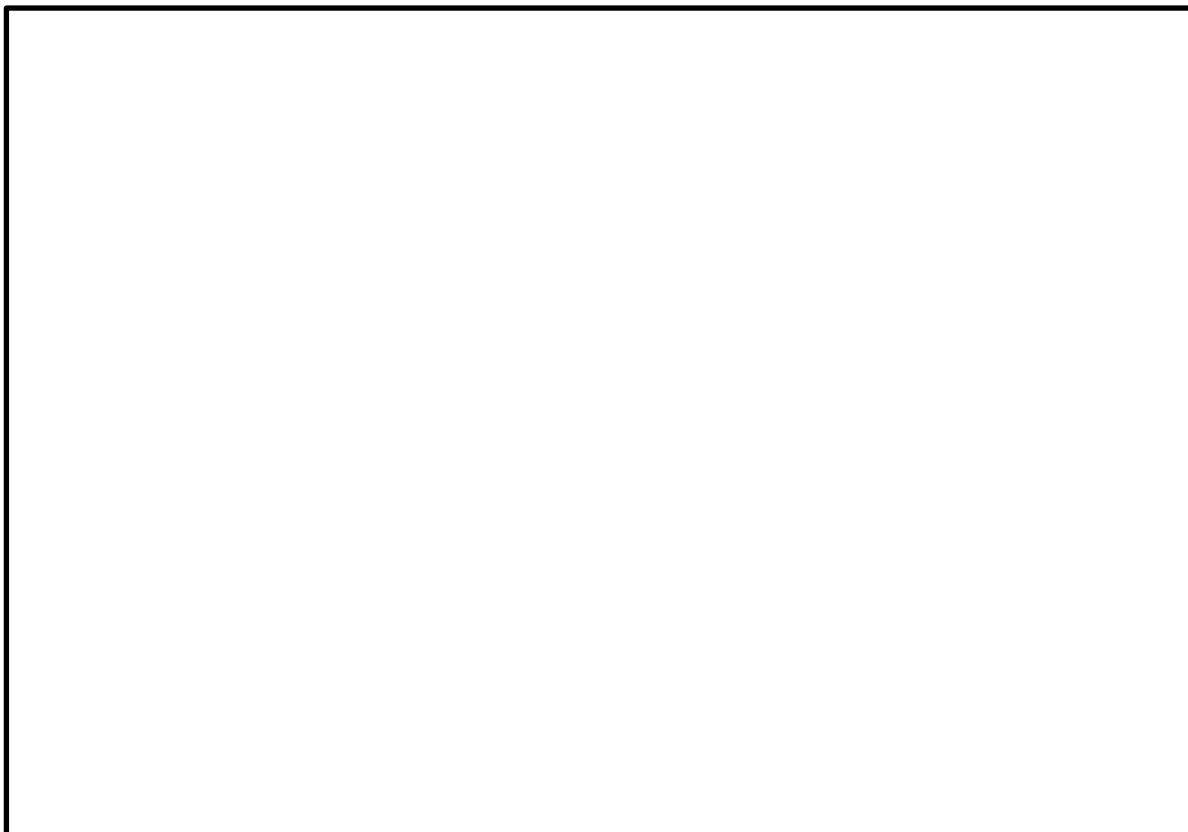


図3-1 試験体 (CASE 5) の諸元 (「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

### 3.1 PHb の定着効果のモデル化

PHb のせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において、PHb 先端の領域では先施工より定着性能が劣る可能性があることから、せん断補強筋が機能しない(無効区間)ものとしてPHbのモデル化を行う。せん断補強筋の無効区間の設定に関する考え方は、前川らの論文を参照しており、せん断補強筋の定着不良を有する部材のせん断耐力評価は、材料非線形解析を用いてせん断補強筋の無効区間を設けることで評価可能であることが示されている。

#### 3.1.1 前川らの検討内容

前川らは、せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響の確認を目的に、実験的検証に加え材料非線形解析による定着不良部のモデル化について検討している。せん断補強筋の定着不良を模擬するため、せん断補強筋端部近傍の定着を効かなくした梁に対する実験を行い、その実験の再現として、せん断補強筋の定着不良部を鉄筋無効区間として要素内鉄筋比をゼロとした材料非線形解析を行うことで、実験のせん断耐力を評価することが可能であることを示している。

#### 3.1.2 モデル化方法

構造部材は、平面応力要素にてモデル化する。モデル化は、「原子力発電所屋外重

要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル」（以下「土木学会マニュアル」という。）を参考に、鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し、付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。

PHb のモデル化は、PHb 先端の領域では定着が十分ではない可能性があるため、せん断補強筋が機能しない（無効区間）ものとして、せん断補強鉄筋比をゼロとしてモデル化する（図 3-2 参照）。

無効区間は、以下のとおり、PHb 先端側の主筋領域（芯かぶりの 2 倍：  $70\text{mm} \times 2 = 140\text{mm}$ ）とした。

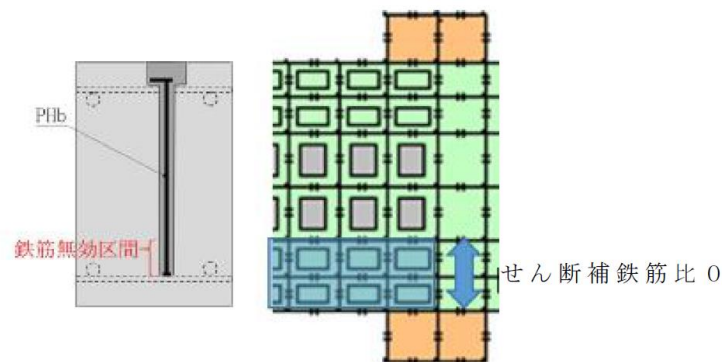


図 3-2 PHb のモデル化概念図

また、解析の入力データとなるコンクリートの材料特性及び鉄筋の材料特性を、表 3-1 及び表 3-2 に示す。これらの条件により設定した解析モデル図を図 3-3 に示す。

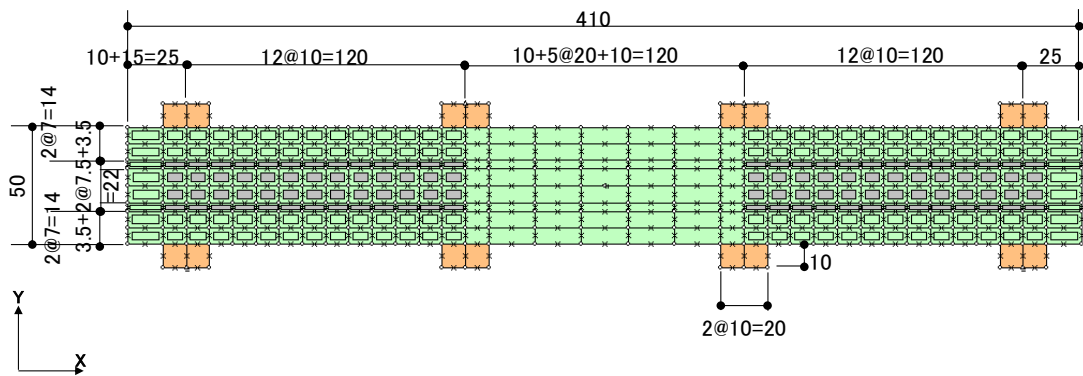
表 3-1 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 $f'c$	$32\text{N/mm}^2$
引張強度 $ft$	$2.32\text{N/mm}^2$ (小数 2 位に四捨五入) ( $=0.23 \times 32.0^{2/3} = 2.3182$ )
ヤング係数 $Ec$	WCOMD で自動計算



表 3-2 鉄筋の材料特性

項目	設定値	設定根拠
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアルに準拠し設定
主鉄筋の降伏強度	999N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアルに準拠し、せん断耐力を得るために主筋の降伏強度を十分大きな値に設定
PHb 鉄筋の降伏強度	384N/mm <sup>2</sup>	建設技術審査証明報告書より設定



(単位 : cm)

図 3-3 解析モデル図

### 3.1.3 荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は、「建設技術審査証明報告書」の実験における載荷条件を模して、変位を作用位置に強制的に与える。また、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、十分小さい値を漸増載荷する。耐力の評価を主目的とするため、単調載荷とするが、実験条件である交番載荷の影響についても参考として確認することとする。

### 3.1.4 破壊判定基準

材料非線形解析における構造部材の破壊判定基準は、既往の研究事例に基づき圧縮ひずみ 1%，せん断ひずみ 2%，引張ひずみ 3%（以下「1, 2, 3%破壊基準」という。）とする。

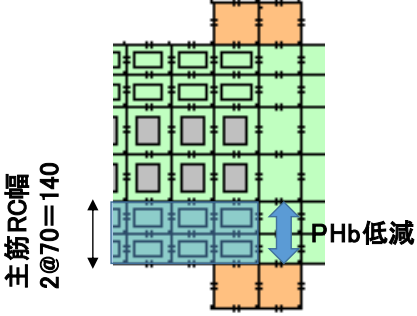
### 3.1.5 妥当性の確認

定着効果のモデル化の妥当性は、「建設技術審査証明報告書」の梁試験の結果から得られるせん断耐力と材料非線形解析より得られるせん断耐力を比較し、試験のせん断耐力を再現できているかにより確認を行う。

表 3-3 に単調載荷を行った解析結果を、試験体 (CASE 5) の実験結果を図 3-4 に示す。表 3-3 に示すとおり、材料非線形解析により PHb をモデル化することで、試験のせん断耐力を良好に再現できることを確認した。また、PHb を材料非線形解析で

モデル化する際、主筋領域（芯かぶりの2倍分）相当を目安として鉄筋無効区間としてモデル化することで、保守的な評価が可能であることを確認した。なお、従来の先施工によるせん断補強鉄筋を考慮した場合の材料非線形解析も併せて実施することにより PHb の有効性を確認することとする。

表 3-3 モデル化の妥当性確認結果

PHb のモデル化	実験のせん断耐力 (kN)	解析によるせん断耐力 (kN)
 <p>主筋RC幅 2@70=140</p> <p>PHb低減</p> <p>無効区間：PHb 先端側の主筋領域 (芯かぶりの2倍：70mm×2=140mm)</p>	486kN	476kN（実験値の 98%）

荷重-変位関係

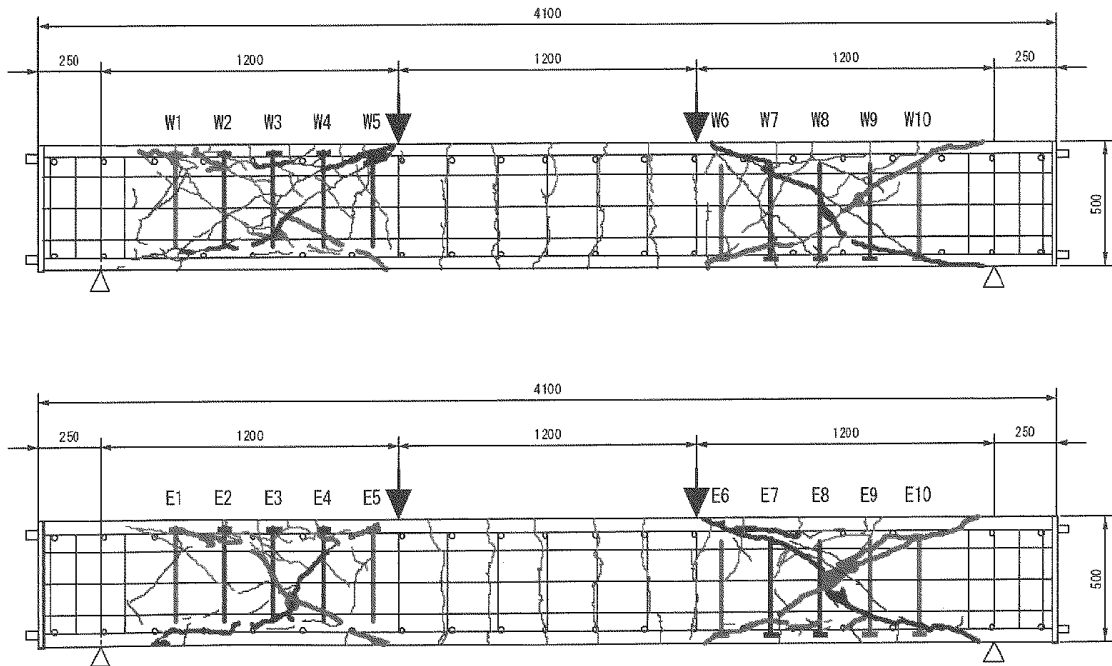
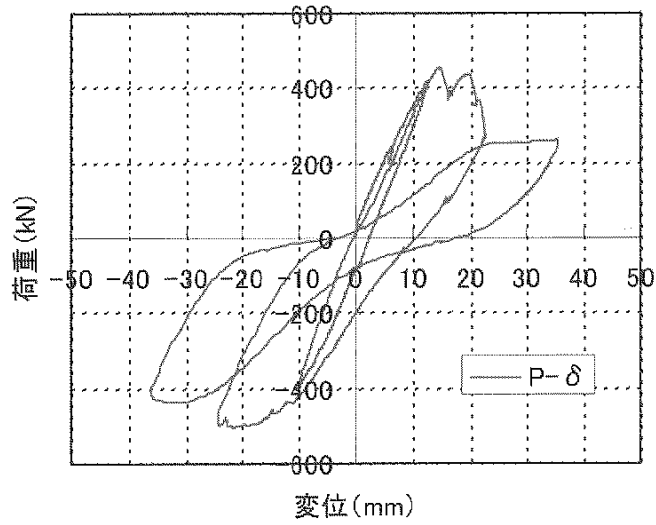
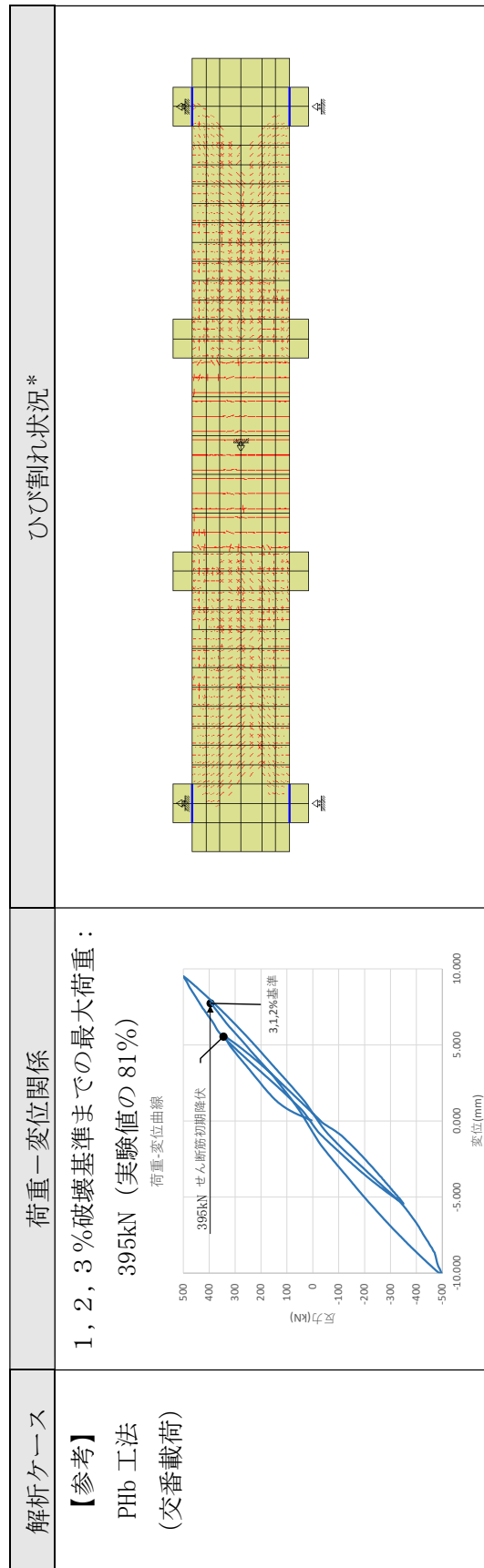


図 3-4 構造実験 (CASE 5) の荷重-変位関係とひび割れ状況  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

また、「建設技術審査証明報告書」の実験では交番载荷が行われていることから、参考として交番载荷を行った解析結果を表 3-4 に示す。表 3-4 に示すように、ひび割れ状況は部材全体にひび割れが分散しており、特異な状況は確認されなかった。なお、荷重の再現性は表 3-3 に示すように単調载荷により確認されており、せん断耐力は良好に再現されている。

表 3-4 試験体 CASE 5 (交番载荷)の荷重-変位関係とひび割れ状況【参考】



注記\*: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

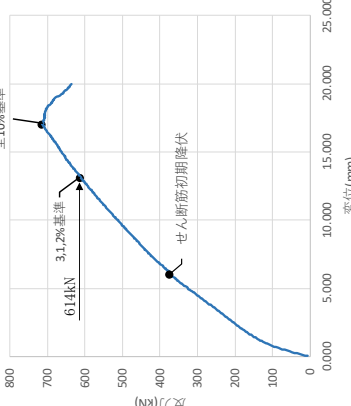
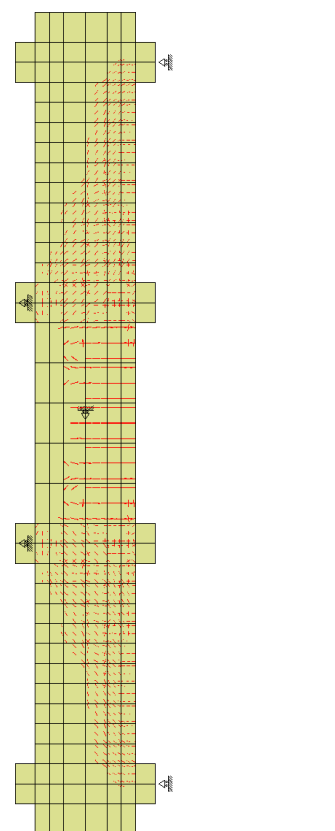
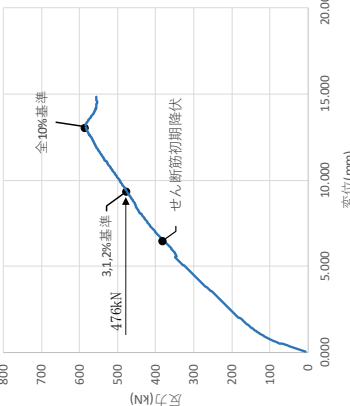
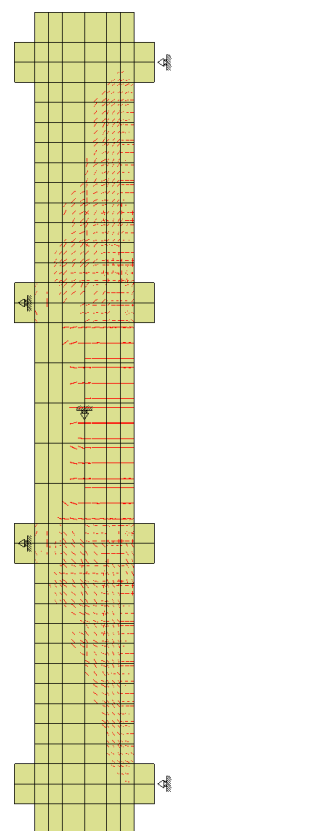
### 3.1.6 従来工法と PHb 工法の材料非線形解析の比較

従来工法（先施工）と PHb 工法の材料非線形解析の比較を行う。解析結果を表 3-5 に示す。

せん断耐力の実験値 (CASE 5 : 486kN) に対して、従来工法を想定した解析結果では、PHb の定着不良領域（無効区間）を設定していないことから、せん断耐力が PHb の実験値を上回っていることが確認できる。また、PHb 工法を想定した解析結果では、せん断耐力は実験をおおむね再現できていることがわかる。

次に、ひび割れ状況を従来工法と PHb 工法で比較すると、PHb 工法はひび割れの分散性が若干低下しているが、これは無効区間の設定方法について参考とした前川らの論文においても同様の傾向が確認できており、PHb の定着不良域（無効区間）を適切にモデル化できている。

表 3-5 従来工法と PHb 工法の材料非線形解析結果

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況*
従来工法	<p>1, 2, 3%破壊基準までの最大荷重：614kN</p> 	
PHb 工法	<p>1, 2, 3%破壊基準までの最大荷重： 476kN (実験値の 98%)</p> 	

注記\*：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れが、ひび割れ発生ひび割れに達したことを示す。

### 3.2 PHb の付着効果のモデル化

3.1 と同様に、PHb とコンクリート間の付着効果の妥当性の確認を行う。付着効果の妥当性は、「建設技術審査証明報告書」の実験結果と実験を模擬した材料非線形解析の結果のひび割れ状況の比較により確認する。

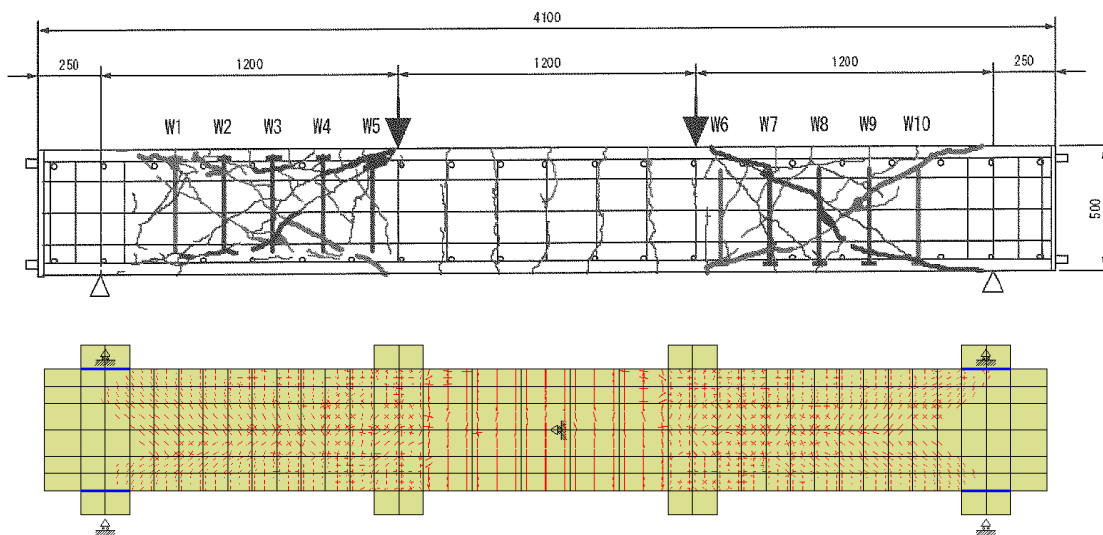
#### 3.2.1 モデル化方法

PHb のせん断補強効果を確認するための材料非線形解析による数値実験において、PHb の付着が有効な領域は鉄筋コンクリート要素にて、PHb とコンクリートが完全付着であるものとしてモデル化しており、付着の影響が及ばない領域は無筋コンクリート領域としてモデル化している。定着部の強度試験より、PHb とコンクリートの定着部で破壊は生じないことから、鉄筋コンクリートの分散ひび割れモデルにおいて、ひび割れの影響は鉄筋コンクリート要素の剛性を低下させることにより考慮している。

#### 3.2.2 妥当性の確認

付着効果のモデル化の妥当性の確認は、「建設技術審査証明報告書」の試験体 CASE 5 を例に交番載荷試験の結果と材料非線形解析による PHb の無効区間を考慮し試験の再現解析結果の比較により行う。交番載荷試験と材料非線形解析のひび割れ状況の比較結果を図 3-5 に示す。

図 3-5 に示すように、PHb とコンクリートが付着していると仮定した解析結果は、ひび割れ状況を良好に再現できていることが確認できる。



注記\* : 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

図 3-5 試験結果と解析結果のひび割れ状況の比較

### 3.2.3 PHbの解析上のモデル化方法のまとめ

PHbの解析上のモデル化方法について、PHbの定着効果及び付着効果を材料非線形解析によるせん断耐力の再現性や実験と解析のひび割れ状況の整合性の観点から確認を行った。

その結果、PHb先端側主筋領域（芯かぶりの2倍）の鉄筋比をゼロとするモデル化を行うことで、実験のせん断耐力やひび割れ発生状況を良好に再現できることを確認した。ここで採用した材料非線形解析では分散ひび割れモデルを用いており、PHbに発生したひび割れによる付着性能の低下を完全に模擬することはできないが、今回採用したモデル化により実験のせん断耐力やひび割れ状況を十分に再現できており、PHbの定着効果及び付着効果を間接的に表現し得ることが確認できた。

## 4. ステップ②：小さな部材厚に対する適用性確認

### 4.1 モデル化について

「建設技術審査証明報告書」の実験よりも小さな部材厚に対する適用性の確認を目的に、島根2号機においてPHb工法を適用した構造物のうち最も部材厚が小さい補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトラス水受入タンク遮蔽壁（ $t=300\text{mm}$ ）を想定し、せん断スパン比（ $a/d$ ）がステップ①と同等となるような部材寸法（ステップ①の躯体の相似形）の解析モデルにより材料非線形解析を行う。配筋は、主鉄筋及びせん断補強筋共に鉄筋比が一定となるように、3.1.2に準じて設定する。PHbのモデル化は、ステップ①と同様の方法とし、材料物性については、構造実験と同一とする。

適用性の確認は、従来工法とPHb工法の材料非線形解析におけるひび割れ状況の比較を行うと共に、解析から得られる有効係数 $\beta_{aw}$ と、「建設技術審査証明報告書」に記載された計算式に基づく設計計算値である $\beta_{aw}$ を比較することにより確認する。解析モデル図を図4-1に示す。

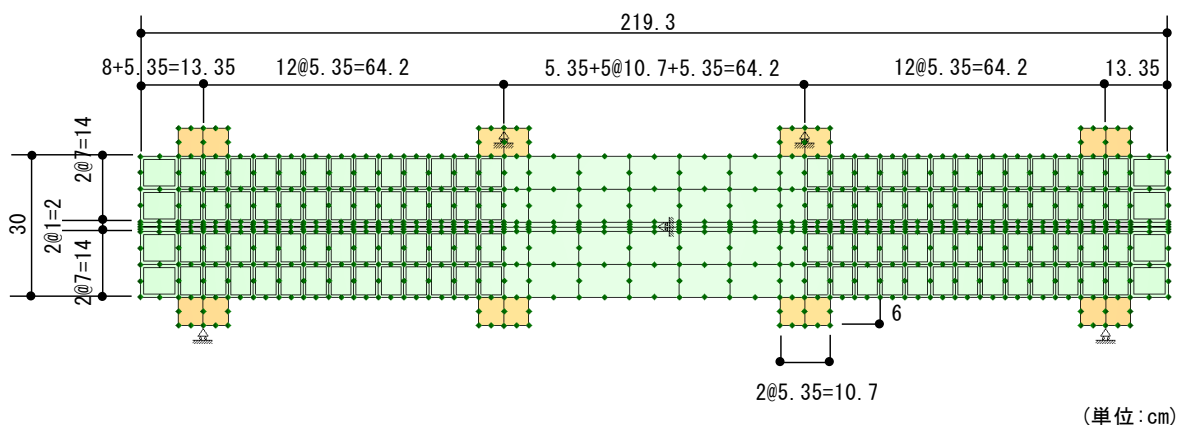


図4-1 解析モデル図



#### 4.2 荷重条件

3.1.3 に準じて設定する。

#### 4.3 破壊判定基準

3.1.4 に準じて設定する。

#### 4.4 検討ケース

検討ケースは、表 4-1 に示すとおり 3 ケースとする。従来工法によるせん断補強を想定したケースをケース②-A, PHb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース②-B とし、参考ケースとして交番載荷としたケースをケース②-C とする。

表4-1 検討ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
②-A 従来工法	単調載荷
②-B PHb 工法	単調載荷
②-C PHb 工法	交番載荷【参考】

#### 4.5 確認結果

各ケースの解析結果を表 4-2 に示す。また、参考として交番載荷を行った解析結果を表 4-3 に示す。表 4-2 及び表 4-3 のひび割れ状況に示すとおり、全体的にひび割れが分散しており、従来工法と顕著な差は見られなかった。

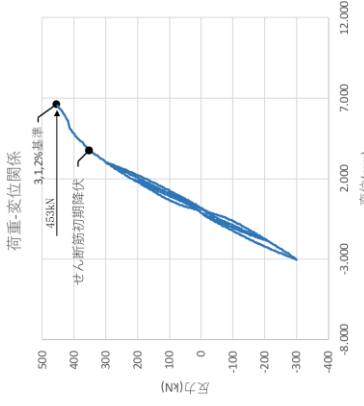
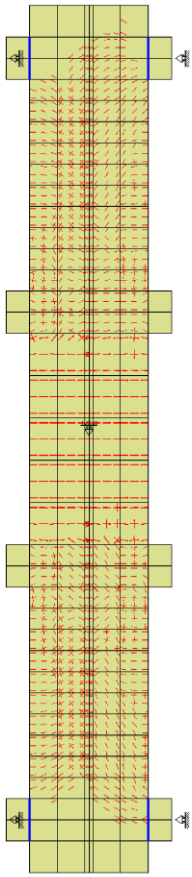
参考に、ケース②-A 及びケース②-B について、各損傷状況における変形状況、ひび割れ状況及び鉄筋降伏状況を表 4-4 及び表 4-5 に示す。表 4-4 及び表 4-5 に示すとおり、各損傷状況において、従来工法と PHb 工法の間で PHb によるせん断補強効果に影響を与えるような顕著な差は確認されなかった。

表4-2 各ケースの荷重-変位関係とひび割れ状況

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況*
従来工法	<p>3, 1, 2%破壊基準までの最大荷重：614kN</p> <p>全10%基準 614kN 3.1,2%基準 せん断筋初期降伏</p>	
PHb 工法	<p>3, 1, 2%破壊基準までの最大荷重： 476kN (実験値の 98%)</p> <p>全10%基準 476kN 3.1,2%基準 せん断筋初期降伏</p>	

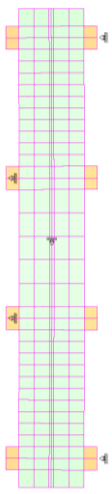
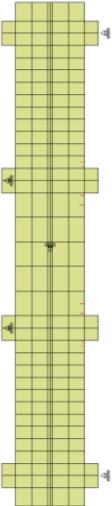
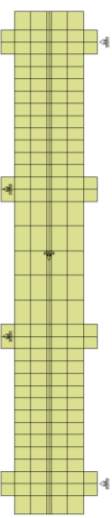
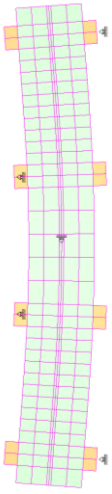
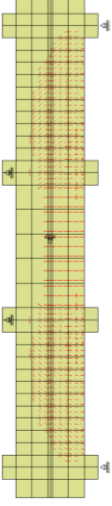
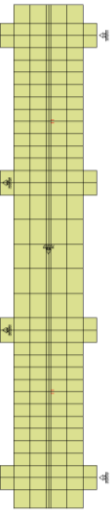
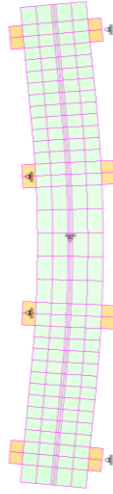
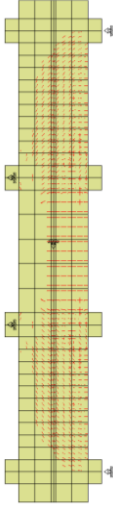
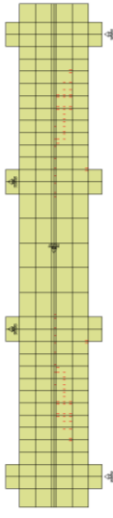
注記\*：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

表4-3 各ケースの荷重-変位関係とひび割れ状況

解析ケース	荷重-変位関係	ひび割れ状況*
<p>【参考】 ②-C PHb 工法 (交番載荷)</p>	<p>3, 1, 2%破壊基準までの 最大荷重：453kN</p> <p>荷重-変位関係</p>  <p>The graph shows the load-displacement relationship for Case ②-C. The vertical axis is Load (kN) ranging from -400 to 500. The horizontal axis is Displacement (mm) ranging from -8,000 to 12,000. The curve shows a linear elastic region up to approximately 300 kN, followed by a peak at 453 kN (labeled 'せん断筋初降伏点'), and then a post-peak region. A point at 31.2% strain is also marked. The loading and unloading paths are shown as a blue line.</p>	 <p>The diagram shows the crack pattern of the specimen. It is a vertical rectangular cross-section with four supports. Red arrows indicate the location and orientation of cracks. The cracks are primarily vertical and diagonal, distributed across the length of the specimen.</p>

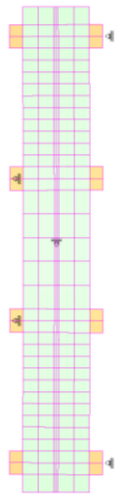
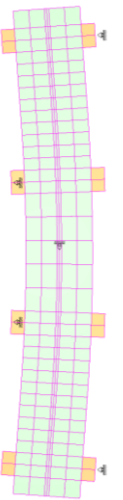
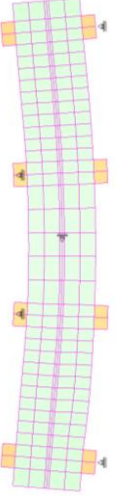
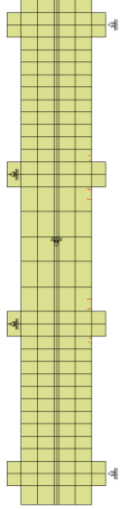

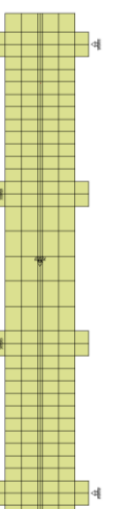
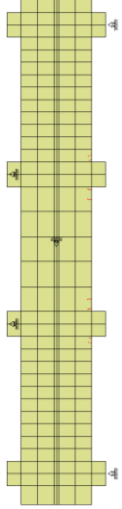

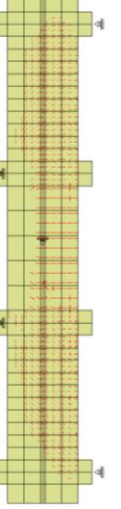
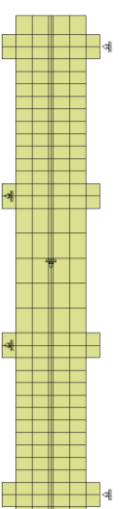
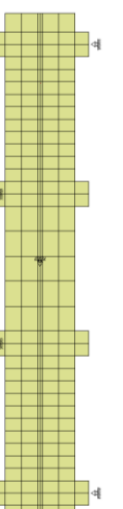
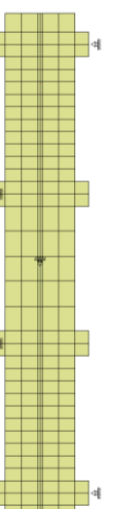
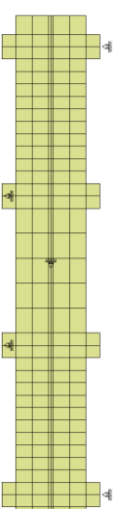
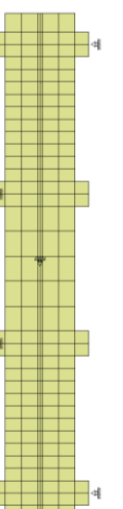
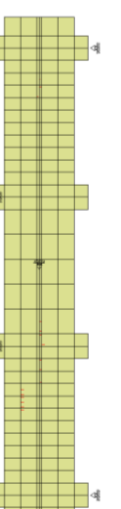
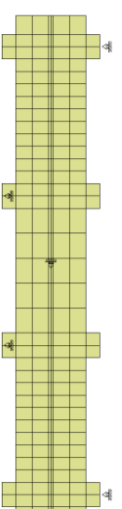
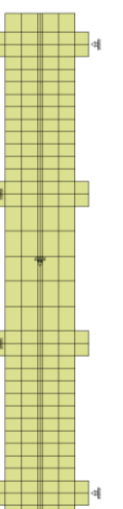
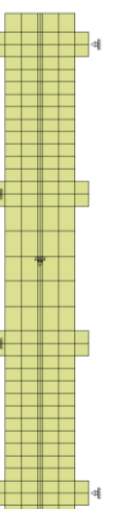
注記\*：図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

表4-4 ケース②-A (従来工法) の解析結果

	変形状況 (変形倍率10倍)	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
初期ひび割れ発生時の状況			
初期降伏時の損傷状況			
終局荷重時の損傷状況			

注記\* : 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

表4-5 ケース②-B (PHb工法) の解析結果

損傷状況 ひび割れ発生時の	初期降伏時の損傷状況	終局荷重時の損傷状況	変形状況 (変形倍率10倍)	ひび割れ状況*	鉄筋降伏状況
					
					
					

注記\*: 図中の赤線は各要素のガウス積分点におけるひずみが、ひび割れ発生ひずみに達したことを示す。

解析結果から算出した有効係数  $\beta_{aw}'$  と「建設技術審査証明報告書」に記載された計算式に基づく設計計算値である有効係数  $\beta_{aw}$  の比較を表 4-6 に示す。なお、 $\beta_{aw}'$  の算出にあたっては、PHb が負担するせん断力を解析結果のせん断耐力  $V_{cd}+V_{phb}$  と、計算値であるコンクリートのせん断耐力  $V_{cd}$  の差で算出しており、この方法は「建設技術審査証明報告書」における算出方法と同様である。

表 4-6 に示すとおり、コンクリートのせん断耐力を棒部材式で算出した場合、解析から得られる  $\beta_{aw}'$  が 1 を超える結果となった。 $\beta_{aw}'$  が大きくなる要因として、棒部材式は土木構造物のように部材厚が比較的厚い構造物を対象とした式であり、部材厚を 300mm とした場合は、棒部材式でコンクリートのせん断耐力を算出すると、過度に保守的なせん断耐力が算出されている可能性が考えられる。

このため、追加検討として、梁や柱といった部材厚が比較的薄いものを対象としていると考えられる「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下「RC規準」という。）からコンクリートのせん断耐力を確認し、その場合の  $\beta_{aw}'$  を算出した。

上記のとおり棒部材式及び「RC規準」より算出した  $\beta_{aw}'$  のうち小さい値を採用しても、解析から得られる  $\beta_{aw}'$  は設計計算値における  $\beta_{aw}$  よりも大きく、構造評価において設計計算値である  $\beta_{aw}$  を使用することで保守的な評価が可能であることを確認した。

表4-6 解析結果から算出した有効係数  $\beta_{aw}'$  と設計計算値における有効係数  $\beta_{aw}$  の比較

ケース			PHb 工法・単調載荷 (ケース②-B)	
			Vcd : 棒部材式	Vcd : RC規準
解析結果	コンクリート+ せん断補強筋の せん断耐力 (kN)	$V_{cd}+V_{phb}$	411	411
計算値	コンクリートの せん断耐力 (kN)	$V_{cd}$	144	297
解析結果	PHbが負担する せん断力 (kN)	$V_{phb}$	267	114
計算値 (棒部材式)	従来工法とした場合に せん断補強筋が負担する せん断耐力 (kN)	$V_{sd}$	137	137
解析結果	有効係数 $\beta_{aw}'$ (解析)	$V_{phb}/V_{sd}$	1.95	0.83
計算値	有効係数 $\beta_{aw}^*$ (計算値)		0.75	0.75

注記\* :  $\beta_{aw} = 1 - I_y / \{2 \cdot (d - d')\}$  ただし、 $\beta_{aw} \leq 0.9$

ここで、 $I_y$  : PHb の埋込側に必要な定着長

$d-d'$  : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔 ( $d-d' \geq I_y$ )

## 5. まとめ

島根 2 号機において PHb により耐震補強を行った補助復水貯蔵タンク遮蔽壁及びトールス水受入タンク遮蔽壁の部材厚が「建設技術審査証明報告書」に記載の実験で用いられた部材厚よりも薄い場合でも、PHb 工法によるせん断ひび割れ抑制効果が期待できることを材料非線形解析を用いた数値実験により確認した。

## 参考資料 1 2 - 2

後施工せん断補強工法（CCb 工法）の適用性について



## 目 次

1. 概要	1
2. CCb 工法について	6
2.1 CCb 工法を適用した部位	6
2.2 CCb 工法の概要	6
3. 建設技術審査証明報告書の概要	8
3.1 CCb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	8
3.2 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の適用範囲	9
3.3 建設技術審査証明報告書における CCb 工法の設計方法	10
3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法	10
3.3.2 使用材料・強度	33
3.3.3 構造部材の評価	39
3.3.4 構造細目	40
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認	41
3.4.1 施工の確実性	41
3.4.2 施工の容易性	41
3.4.3 施工手順の設定	41
4. 島根 2 号機における CCb 工法の適用性の確認	55
4.1 適用性確認フロー	55
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定	57
4.3 ①適用性確認項目の抽出	58
4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認	60
4.5 ③せん断補強効果の確認	67
4.6 ④CCb の施工精度に影響を与える項目の確認	67
4.6.1 削孔方法	67
4.6.2 削孔角度	68
4.6.3 削孔位置	69
4.6.4 グラウトの充てん性	70
4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認	80
4.7.1 施工実績の整理	80
4.7.2 過去の地震の経験事例	83
4.7.3 レベル 2 地震動を対象とした設計事例	84
4.7.4 後施工せん断補強工法の比較	84
4.7.5 後施工せん断補強筋に関する研究事例	87
4.8 島根 2 号機における CCb 工法の保守性と設計上の制限の整理	96
4.8.1 CCb 工法の保守性	96
4.8.2 島根 2 号機において CCb により耐震補強を行うにあたっての保守性	96

4.8.3	島根2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限···	97
4.8.4	CCb工法によるせん断補強の設計検討フロー·····	98
4.9	CCbの適用性確認結果·····	99

添付資料1            建設技術審査証明書

## 1. 概要

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等には、基準地震動  $S_s$  の大加速度化に伴い、せん断破壊に対して耐震補強工事が必要となる既設鉄筋コンクリート構造物がある。

せん断破壊に対する補強工法としては、部材のせん断耐力を向上させる後施工せん断補強工法の他に、増厚工法や地盤改良工法等があるが、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等については、部材の耐力を直接向上させる合理的な補強工法で、後施工せん断補強工法の一つである、セラミックキャップバー（以下「CCb」という。）工法を採用している。（表 1-1 参照）

CCb 工法は、図 1-1 に示すとおり、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、部材を削孔後、その孔内に CCb を挿入し、グラウト充てんにて固定し、せん断耐力を向上させるものである。

CCb による耐震補強の対象となる構造物を表 1-2 に、配置図を図 1-2 に、耐震補強箇所を図 1-3 に示す。図 1-3 に示す CCb による耐震補強箇所は、計算結果を踏まえ、「3.3.4 構造細目」に規定されているとおり、計算上で CCb による補強が必要となる区間の外側の有効高さに等しい区間にも、同量の CCb を配置している。

本資料は、CCb 工法を採用する目的、効果及び島根 2 号機への適用性について説明するものである。

表 1-1 主なせん断補強工法

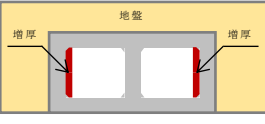
	従来工法（先施工）	増厚工法	地盤改良工法	後施工せん断補強工法
概 要	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート打設前の鉄筋組立時に、せん断補強筋を主筋又は配力筋にフックを掛けて定着させる工法。</li> <li>せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物表面にコンクリートを打ち足すことで、断面を増厚する工法。</li> <li>部材厚の増により、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物周辺地盤にセメントミルク等を噴射し、地盤改良体を構築する工法。</li> <li>地盤改良を行うことにより、地震時荷重（主に土圧）が低減され、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既設コンクリート構造物を削孔し、その孔内にせん断補強筋を差し込み充てん材で固定する工法。</li> <li>せん断補強筋を配置することで、せん断破壊に対する安全性向上に寄与する。</li> </ul>
図				
備 考	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川 2 号機他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川 2 号機にて、工事実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川 2 号機他、多数の施工実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>女川 2 号機にて、工事実績がある。（CCb 工法）</li> </ul>

表 1-2 Ccb による耐震補強対象の構造物

構造物 名称	部 材	部材厚 (mm)	CCb 径	せん断 スパン比*
屋外配管ダクト (タービン建物～放水 槽)	側壁	600	D25	5.83
	頂版	800	D19	8.11

注記\*：せん断スパン比： $a / d$ （ $a$ ：支間長， $d$ ：有効高さ）



図 1-1 Ccb 工法の概要図\*

注記\*：セラミックキャップバー（CCb）工法研究会 HP より引用。一部修正・加筆。

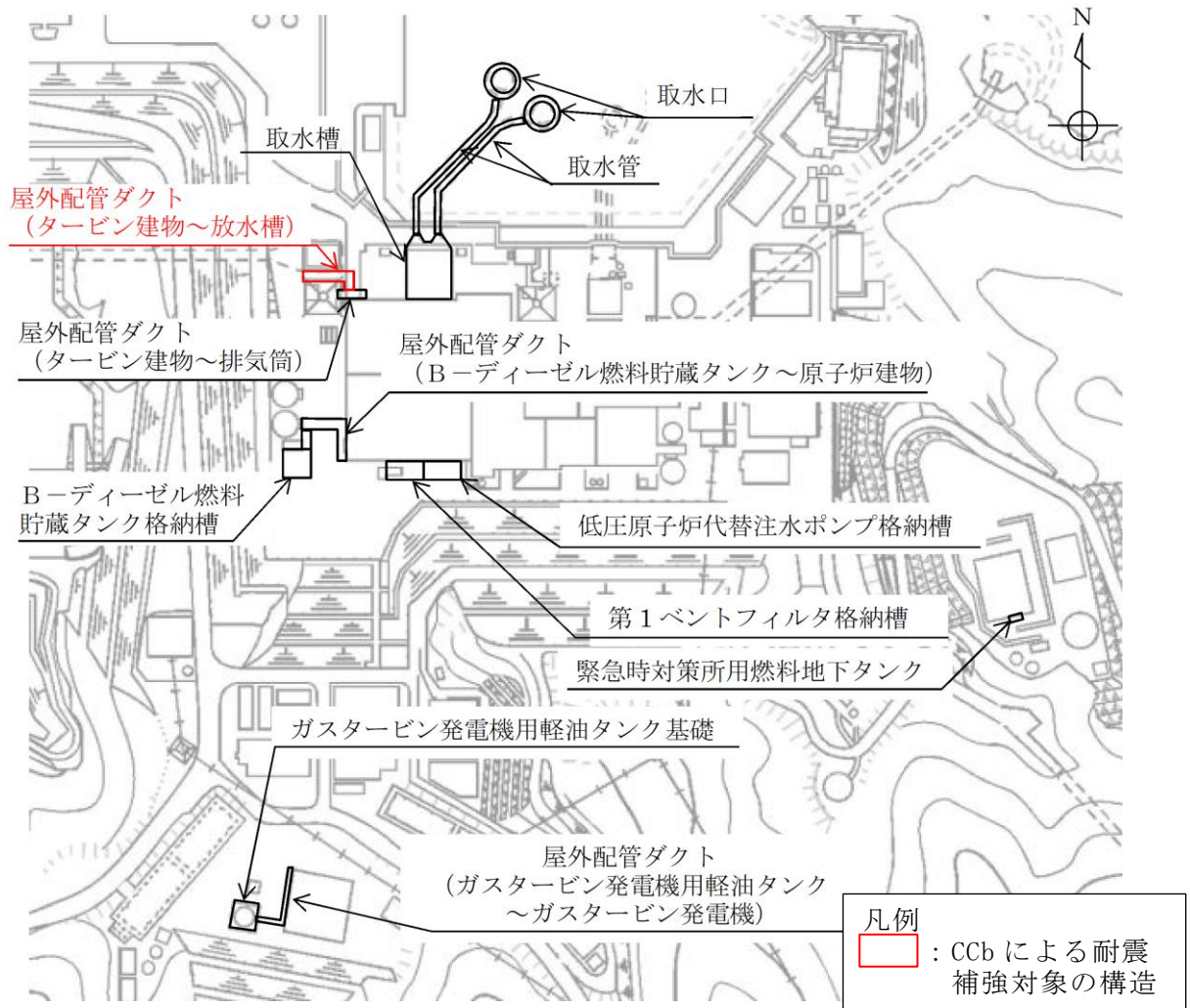
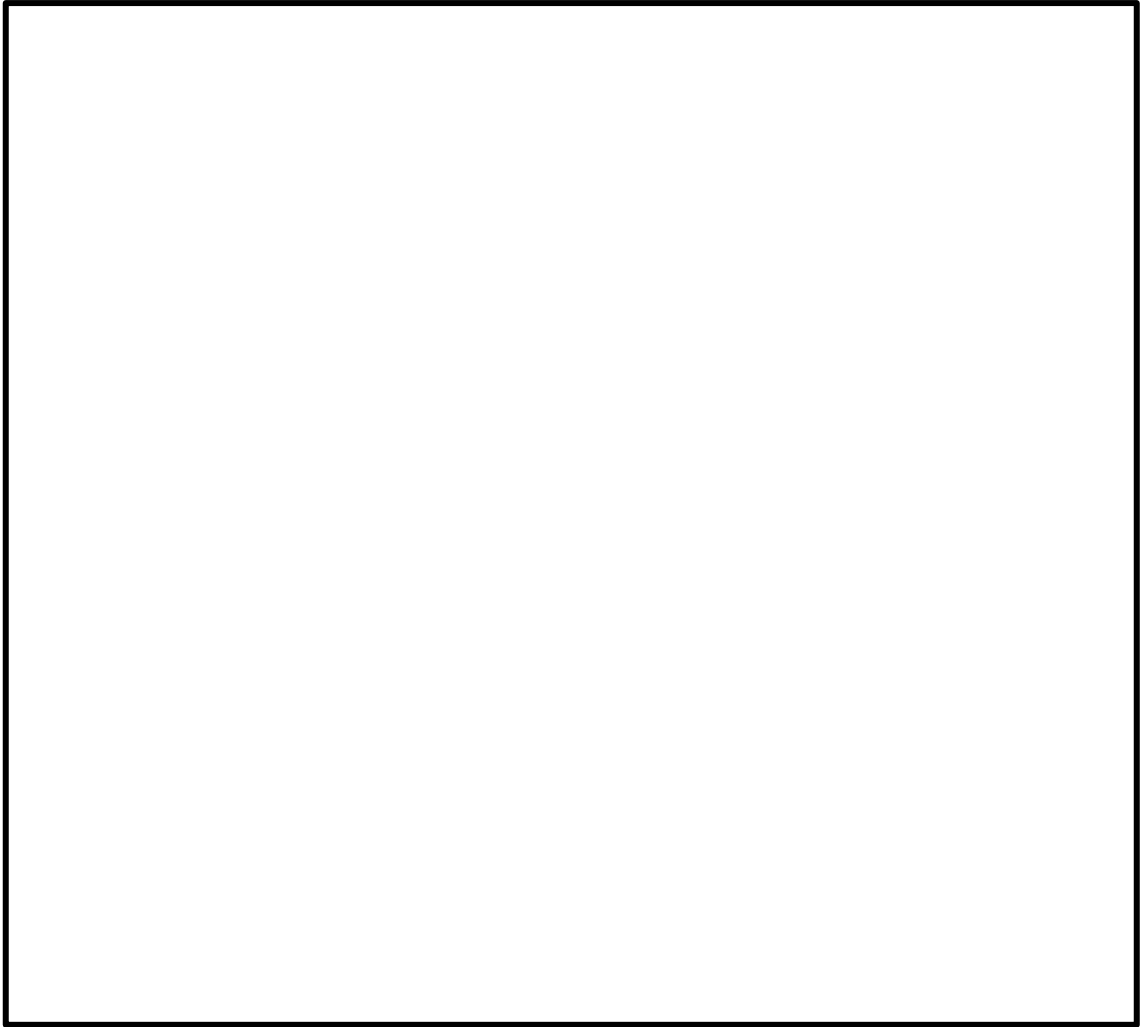
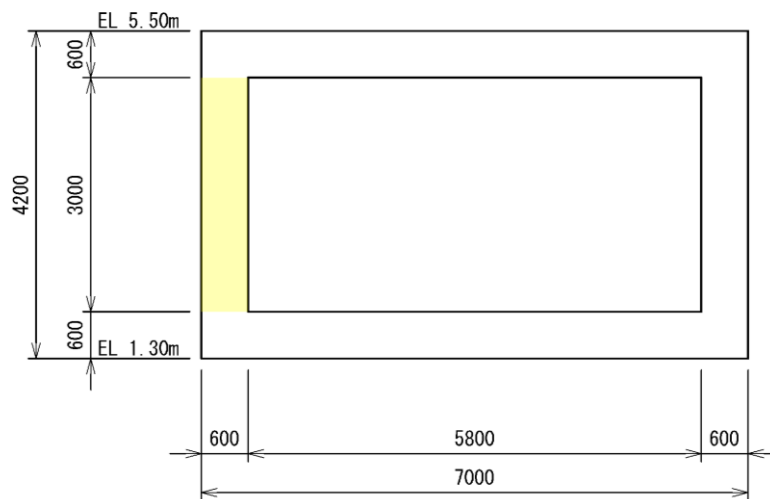


図 1-2 CCbによる耐震補強対象の構造物 (配置図)



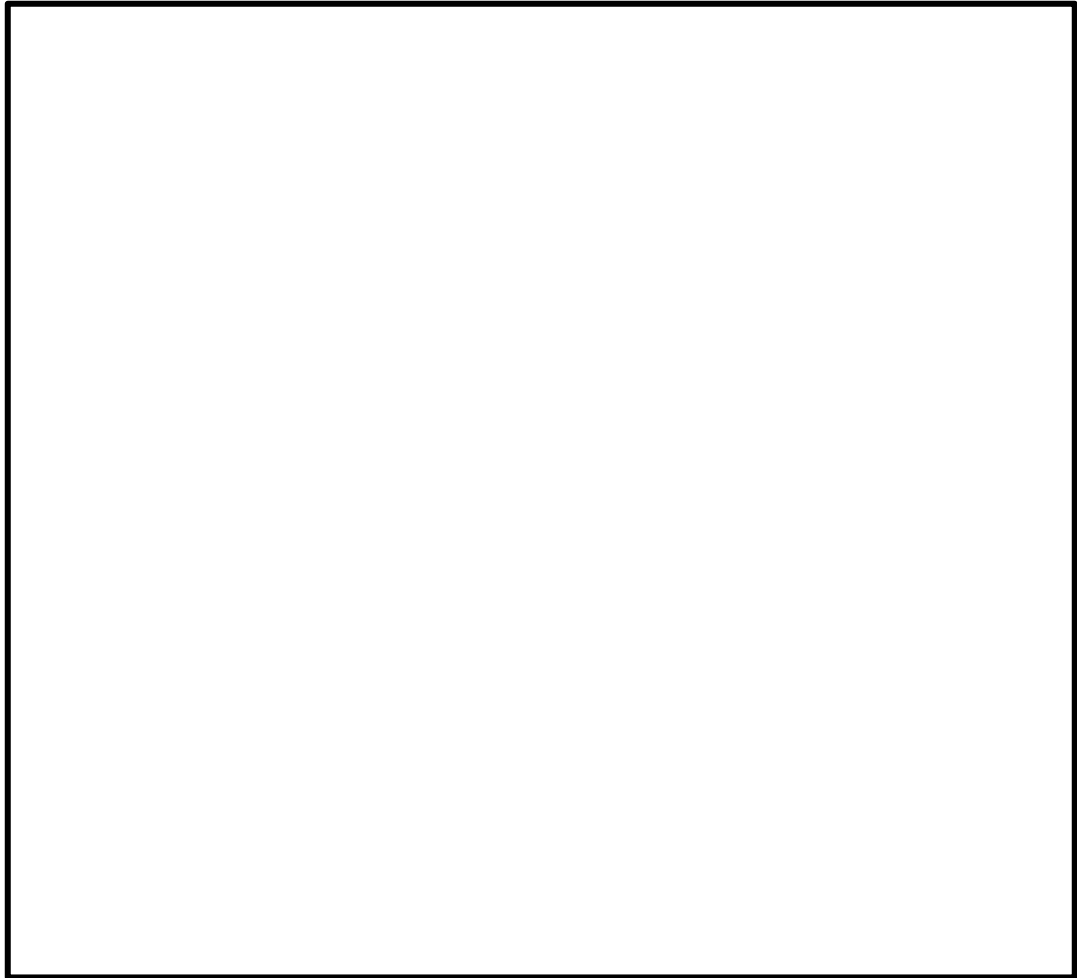
平面図



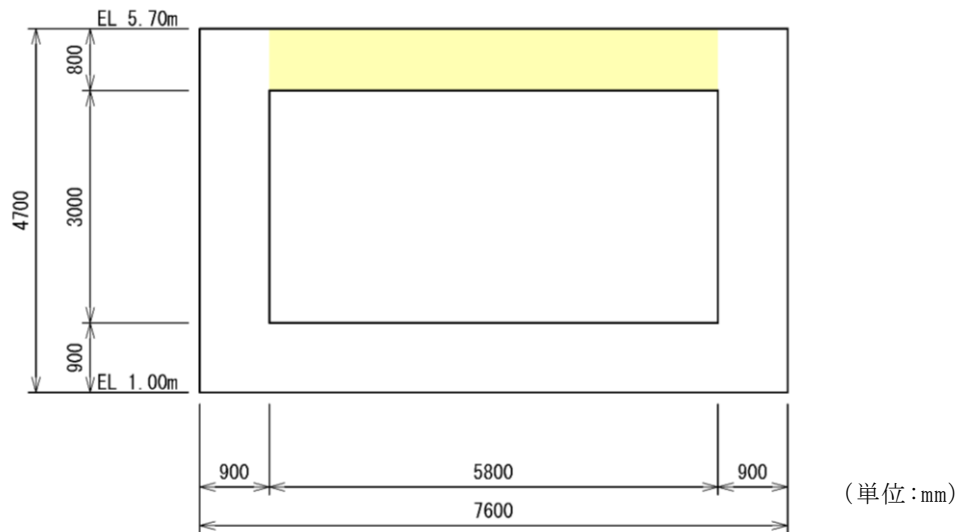
：CCbによる耐震補強箇所

A-A断面

図1-3(1) CCbによる耐震補強対象の構造物  
(屋外配管ダクト(タービン建物~放水槽))



B - B 断面



■ : CCb による耐震補強箇所

C - C 断面

図 1-3(2) CCb による耐震補強対象の構造物  
(屋外配管ダクト (タービン建物~放水槽))

(参考) 12-2-5

## 2. Ccb 工法について

### 2.1 Ccb 工法を適用した部位

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等においては、基準地震動発生時に屋外重要土木構造物等としての機能（設計基準対象施設のうち耐震 S クラス施設の間接支持機能、重大事故等対処施設の間接支持機能、非常時における海水の通水機能、貯水機能及び止水機能）を維持するために、耐震安全性を確保する必要がある。そのため、屋外重要土木構造物等の一部の部材においては、せん断に対する安全性を確保するために、Ccb 工法を適用し、せん断耐力の向上を図っている。

Ccb 工法を適用した部材は、表 1-2 及び図 1-3 に示すとおりである。

### 2.2 Ccb 工法の概要

Ccb 工法は、既設の鉄筋コンクリート構造物に後施工によりせん断補強を行う工法の一つであり、Ccb を既設の鉄筋コンクリート構造物の部材に挿入・一体化させて、せん断耐力を向上させるものである。Ccb は図 2-1 に示すように、せん断補強筋の両端に耐腐食性に優れたセラミック製の定着体を取り付けた構造となっており、海水環境下にある構造物にも適した材料である。

Ccb 工法の具体的な施工方法は、表 2-1 に示すように、既設の鉄筋コンクリート構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にせん断補強材である Ccb を差し込み、充てん材で固定することにより構造躯体と一体化を図っており、従来工法（先施工）とは施工方法が異なる。

また、Ccb 工法は表 2-2 に示すように、「セラミック定着体とコンクリート間の支圧（後端側）」と「セラミック定着体及び Ccb とコンクリート間の付着（先端側）」により定着しており、フックを掛けて定着する従来工法（先施工）とは定着機構が異なる。そのため、Ccb 工法では設計・照査において、通常の従来工法（先施工）であるせん断補強筋によるせん断耐力に有効性を示す係数（ $\beta_{aw}$ ）を乗じることにより、せん断補強効果を評価している。





図 2-1 Ccb の詳細図\*

注記\*：セラミックキャップバー（CCb）（工法研究会及び鹿島建設 HP より引用。一部修正・加筆。）

表 2-1 施工方法の違い

表 2-2 定着機構の違い

### 3. 建設技術審査証明報告書の概要

#### 3.1 CCb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

島根 2 号機のせん断補強が必要な各構造部材に配置した CCb については、一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC\*」という。）の『建設技術審査証明報告書（土木系材料・製品・技術，道路保全技術） 技術名称 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー(CCb)」，建技審証第 0811 号，有効期限：2024 年 2 月 2 日』（以下「建設技術審査証明報告書」という。）に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は，添付資料 1「建設技術審査証明書」のとおり，高度な技術を有する第三者機関である PWRC により審査証明を受けており，試験データを用いて，CCb が受け持つせん断耐力の算定方法において，CCb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し，適用部材の軸方向鉄筋間隔及び CCb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。なお，「建設技術審査証明報告書」では，片側からしか補強の施工ができない部材について，CCb を設置する手順を設定し，この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく CCb の配置，CCb 配置位置での削孔方法，削孔内への CCb の固定方法，CCb 設置後の仕上げ等の施工性）を確認しており，それぞれの要素に対して施工上の考慮を示すなど，施工性に関しても審査対象となっている。

また，「建設技術審査証明報告書」では，設計・施工マニュアルが添付され，材料及び施工に関する事項が示されている。

注記\*：PWRC は，国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり，土木に関して，河川，道路，土質・地盤，施工，橋梁等，幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託，さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC では，建設技術審査証明事業を行っており，当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による審査証明委員会を設け，開発の趣旨，開発目標及び技術内容，既存の技術との対比，実績等について審査を行っており，高度な技術を有し，十分な信頼性を有した第三者機関である。

### 3.2 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の適用範囲

本工法では、地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤等があり部材の片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても、後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。Ccb が受け持つせん断耐力は鉄筋の材質（SD295A, SD295B, SD345）、径（D13～D32）ごとに定め、その値は、先施工のせん断補強鉄筋に Ccb のせん断耐力の向上への有効性を示す係数  $\beta_{aw}$  を考慮することにより評価が可能である。

Ccb は、主に地震時の応答変位量が限定される地中構造物であって、片側から施工する既設コンクリート構造物に対し、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

また、両側から施工が可能な既設コンクリート構造物であり、じん性確保を目的としない場合、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

### 3.3 建設技術審査証明報告書における Ccb 工法の設計方法

#### 3.3.1 後施工によるせん断耐力の評価方法

本工法では実験により性能を確かめることで、設計方法等を設定しており、その概要を以下にまとめた。

##### (1) 実験方法

本工法を用いた設計で Ccb のせん断耐力への寄与分を確認するために、梁試験体の交番載荷試験（せん断破壊モード試験体）を実施することにより、Ccb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている（図 3-1 参照）。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を表 3-1 に、せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法を図 3-2 に、せん断耐力向上性能試験の加力要領を図 3-3 に示す。

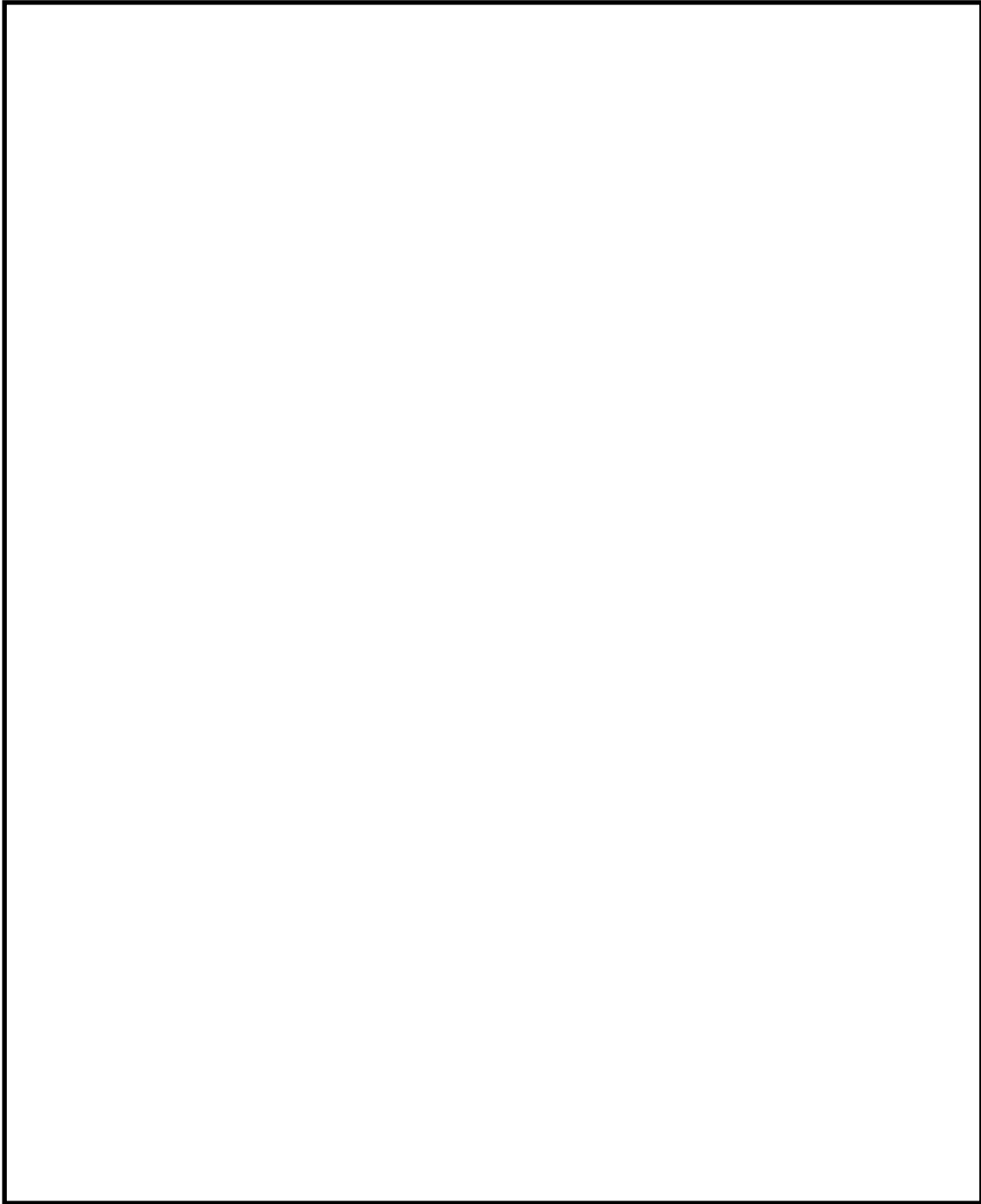


図 3-1 実験方法（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

表 3-1(1) 各ケースの試験体の諸元（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

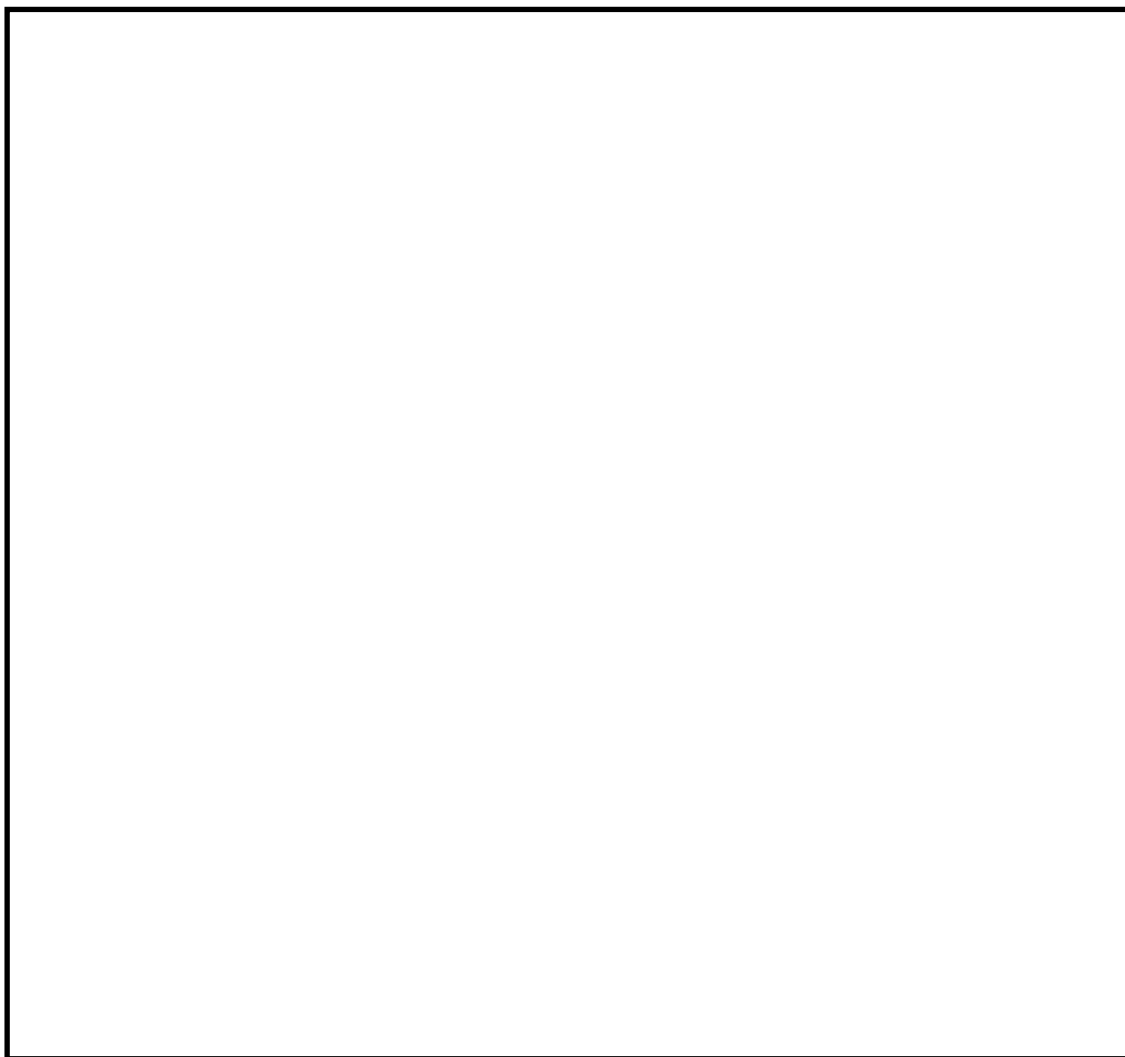


表 3-1(2) 各ケースの試験体の諸元（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

--

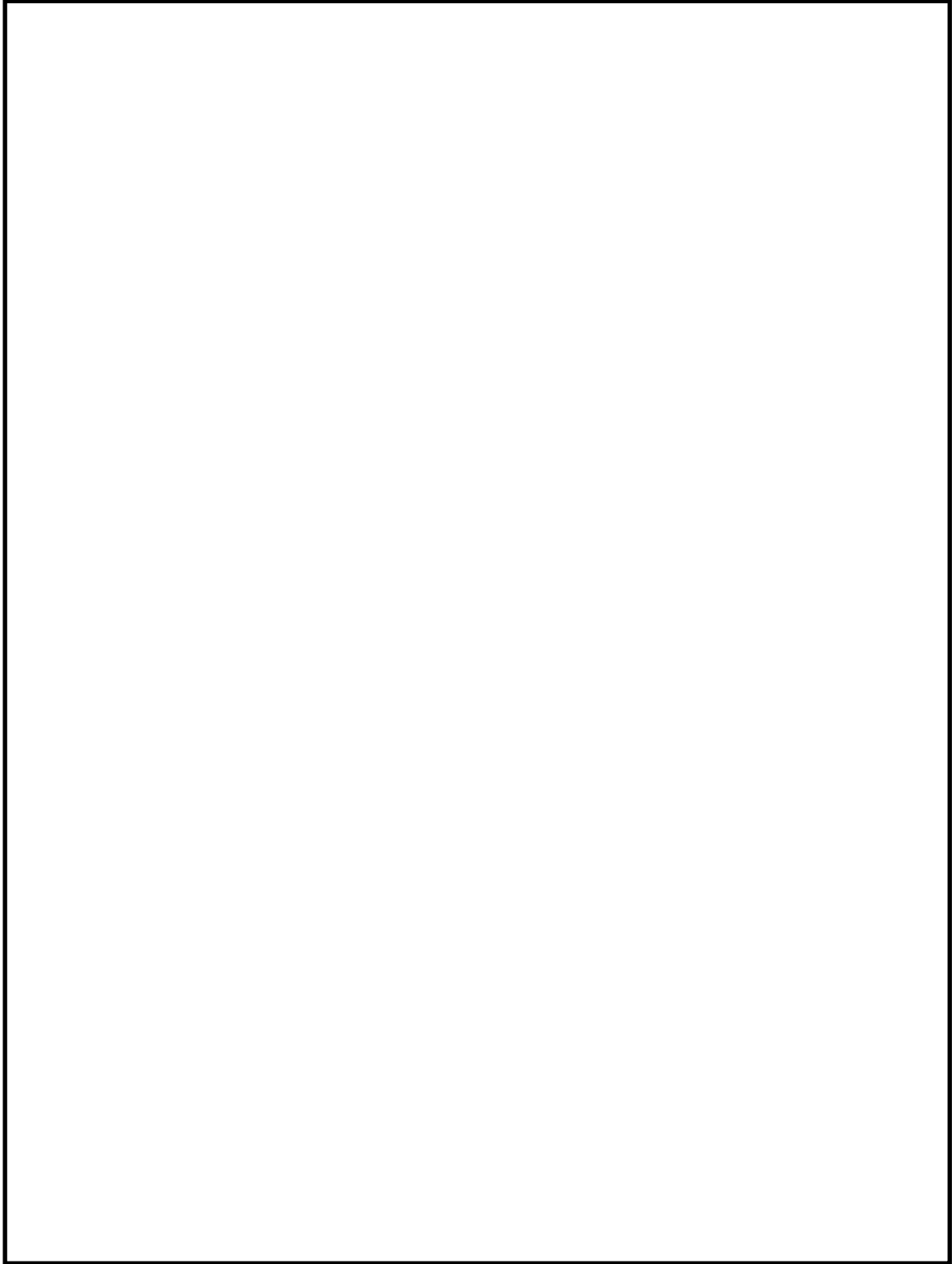


図 3-2(1) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)





図 3-2(2) せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

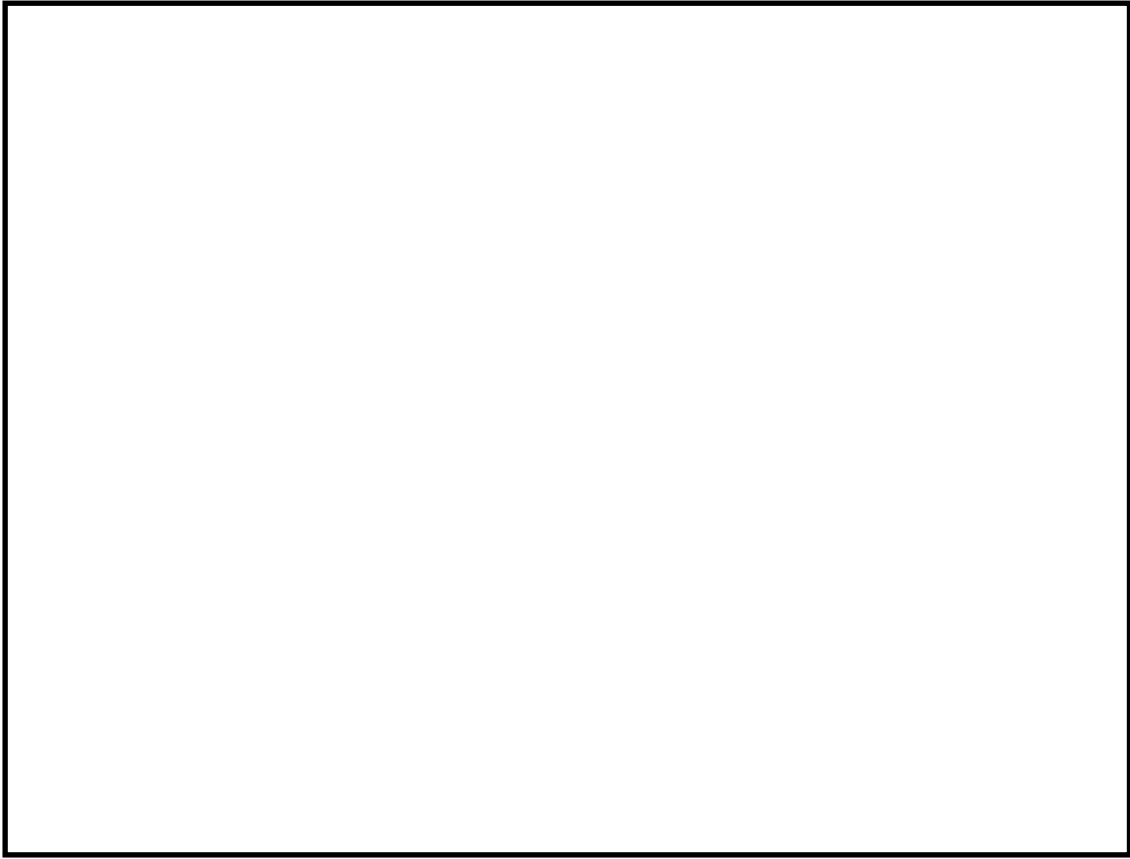


図 3-3(1) せん断耐力向上性能試験の加力要領  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

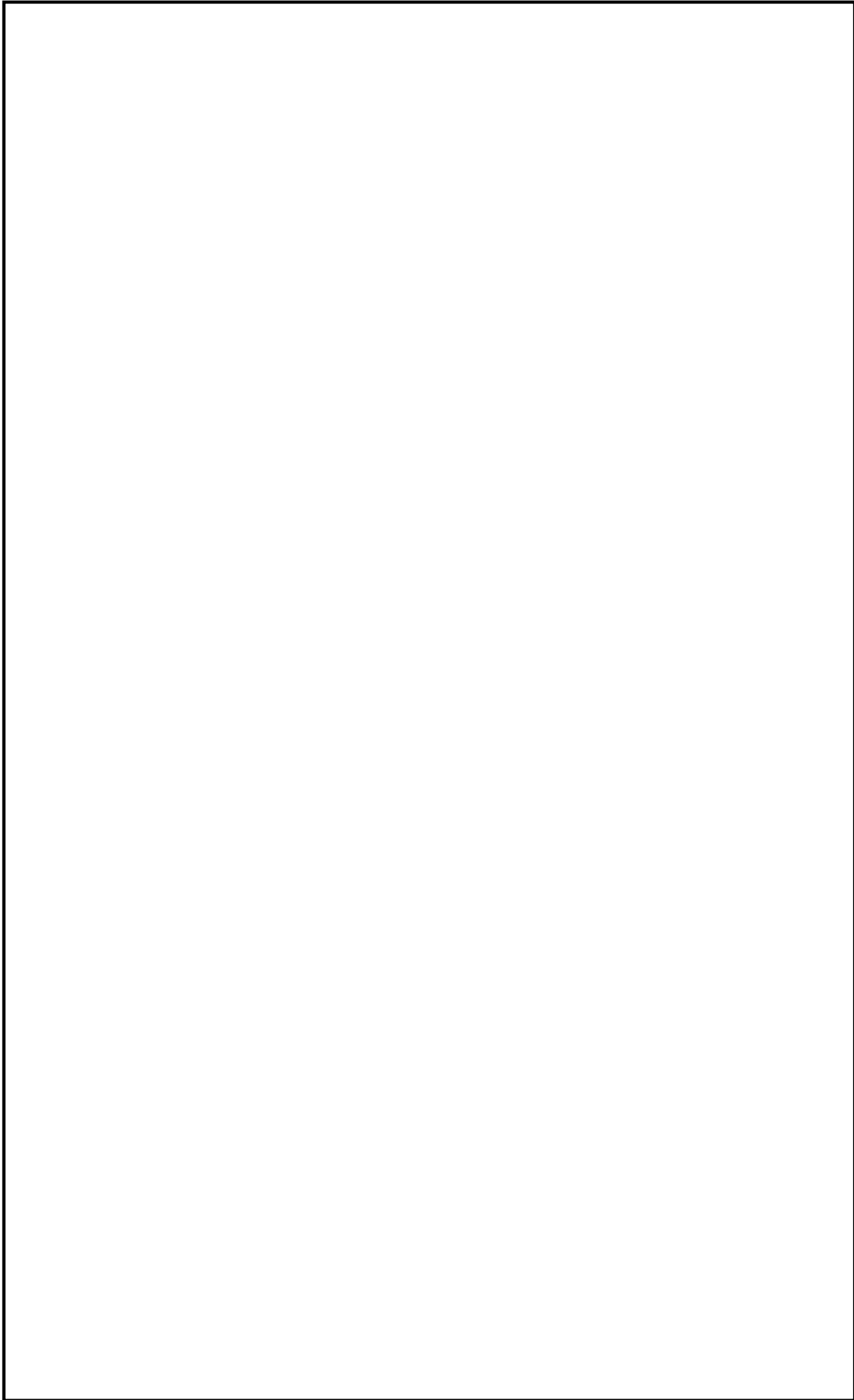


図 3-3(2) せん断耐力向上性能試験の加力要領  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

(参考) 12-2-17

(2) 実験結果

(1)の実験結果を、図 3-4 及び表 3-2 に示す。

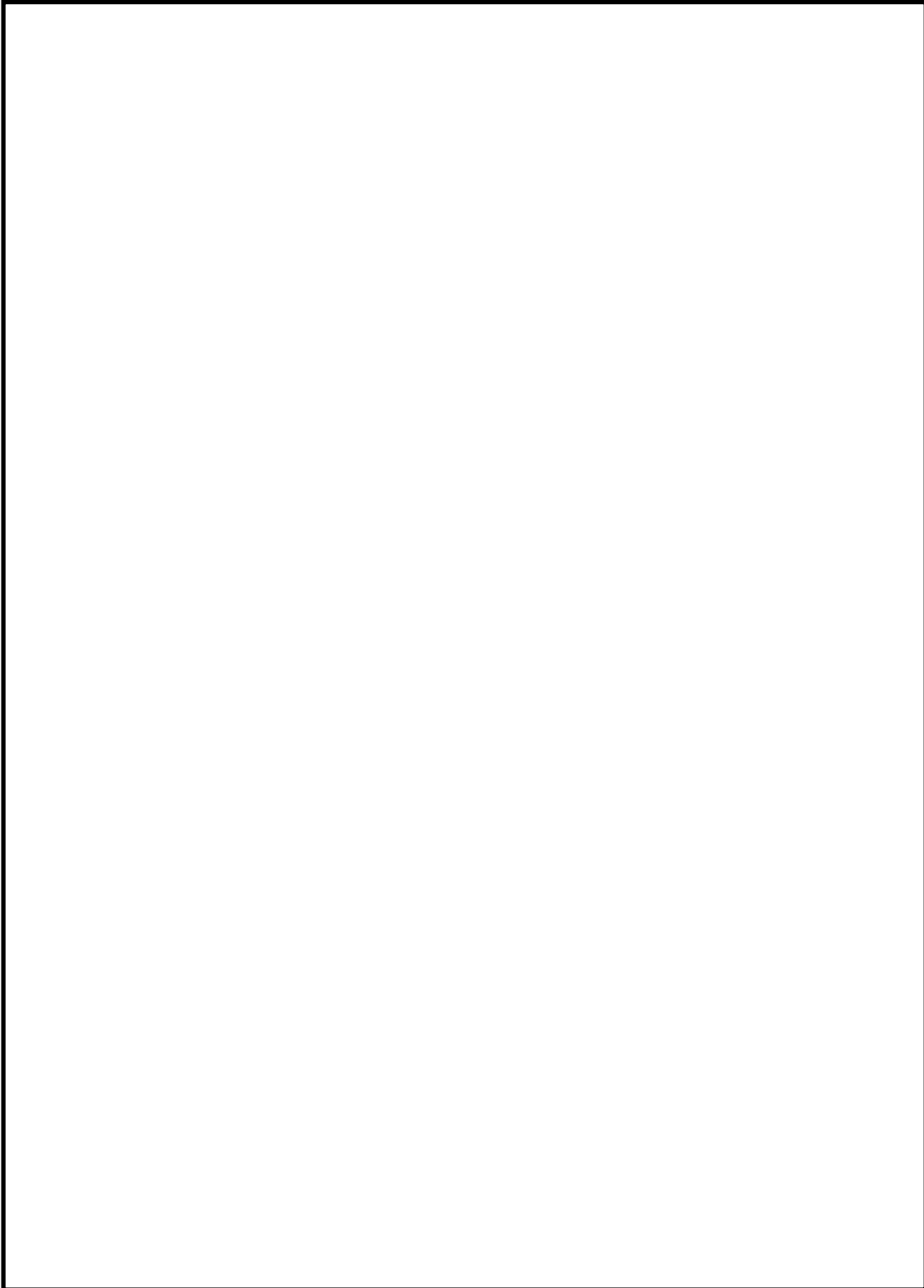


図 3-4(1) 実験結果（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

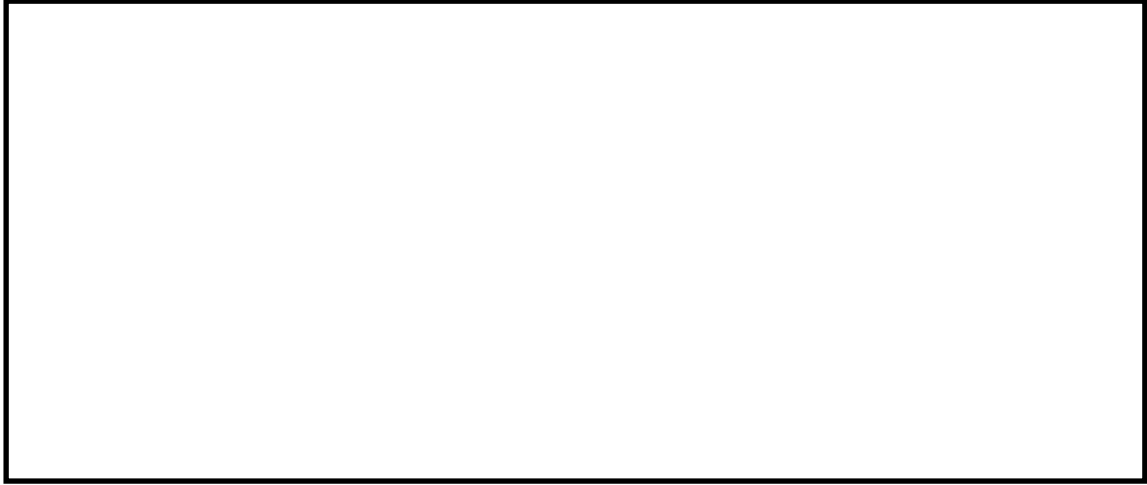


図 3-4(2) 実験結果（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

注記\*：図 3-4 に示す式(5) は 3.3.1(3)に，式(9)～(12)は 3.3.1(4)に詳細を示す。

表 3-2(1) 実験結果の一覧（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

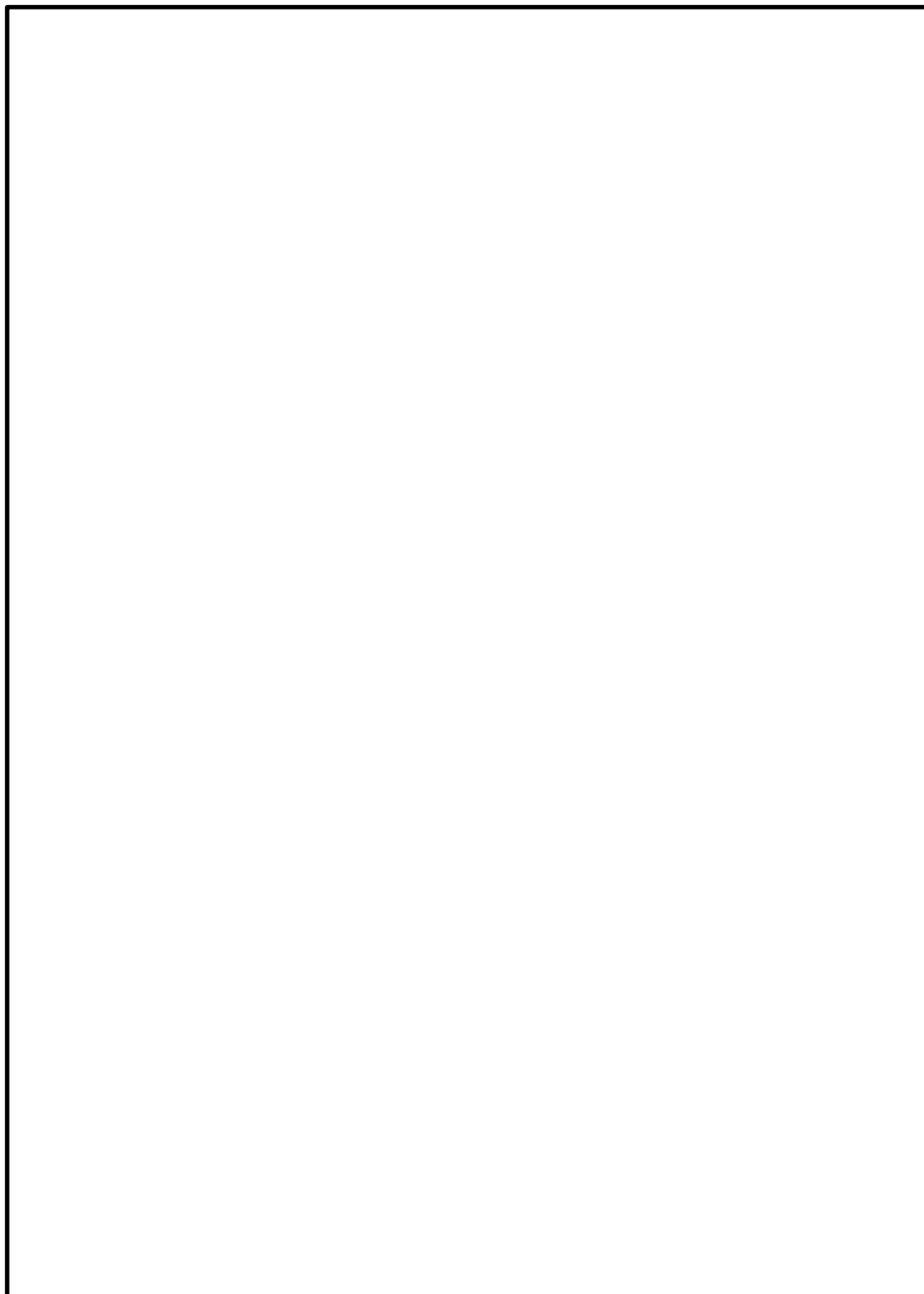
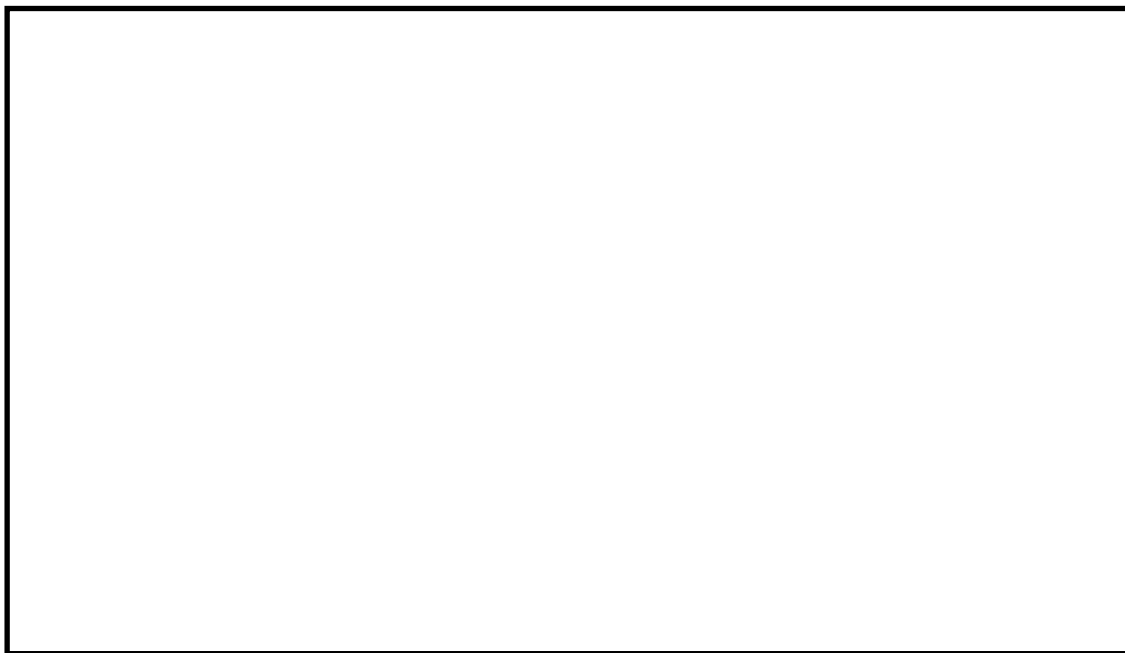
A large empty rectangular box with a black border, intended for the table of experimental results. The box is currently blank.

表 3-2(2) 実験結果の一覧（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

A large empty rectangular box with a black border, intended for the table of experimental results. The box is currently blank.

(3) Ccb のせん断補強の考え方

Ccb のせん断補強の考え方を図 3-5 に示す。

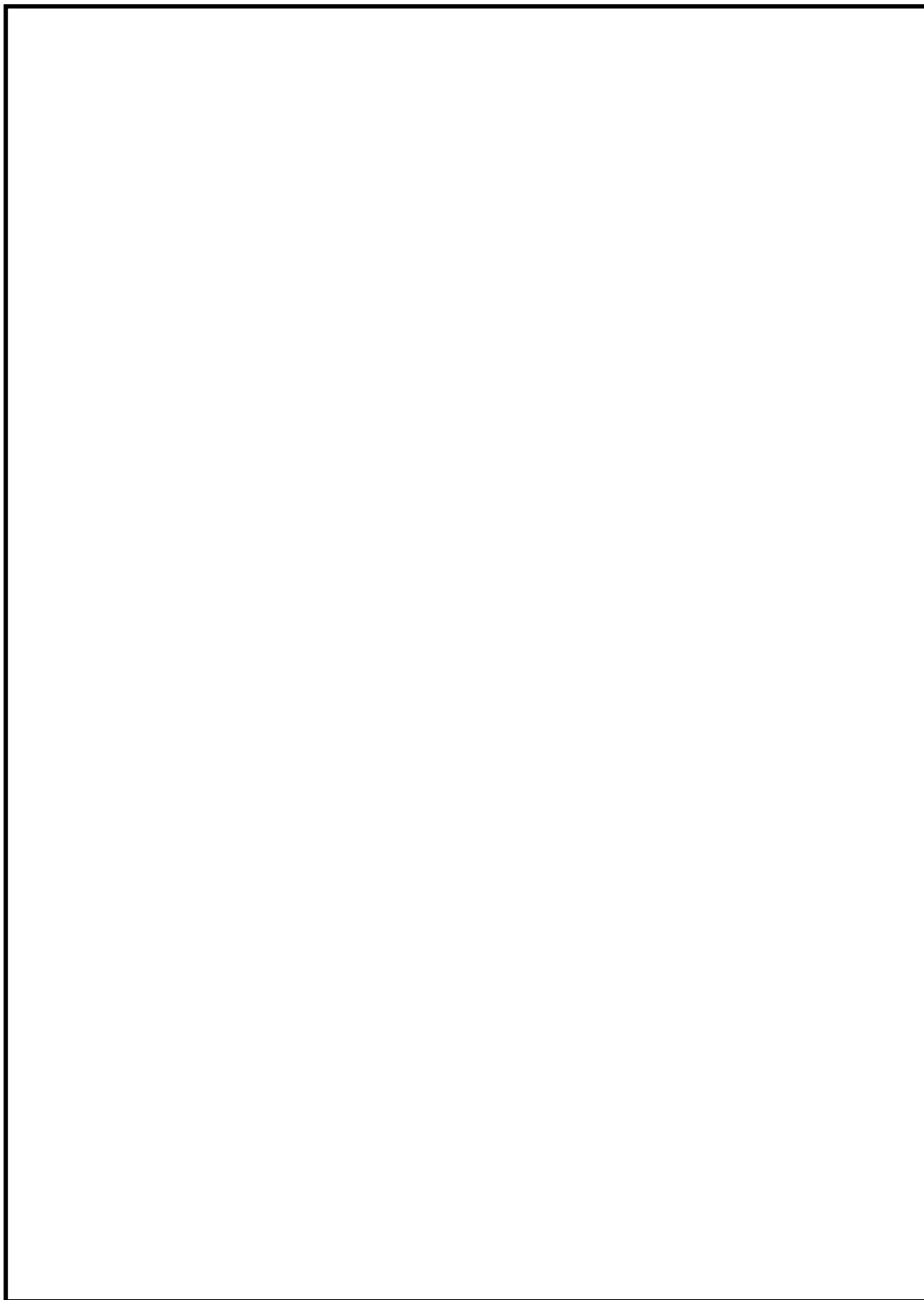


図 3-5(1) Ccb のせん断補強の考え方（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



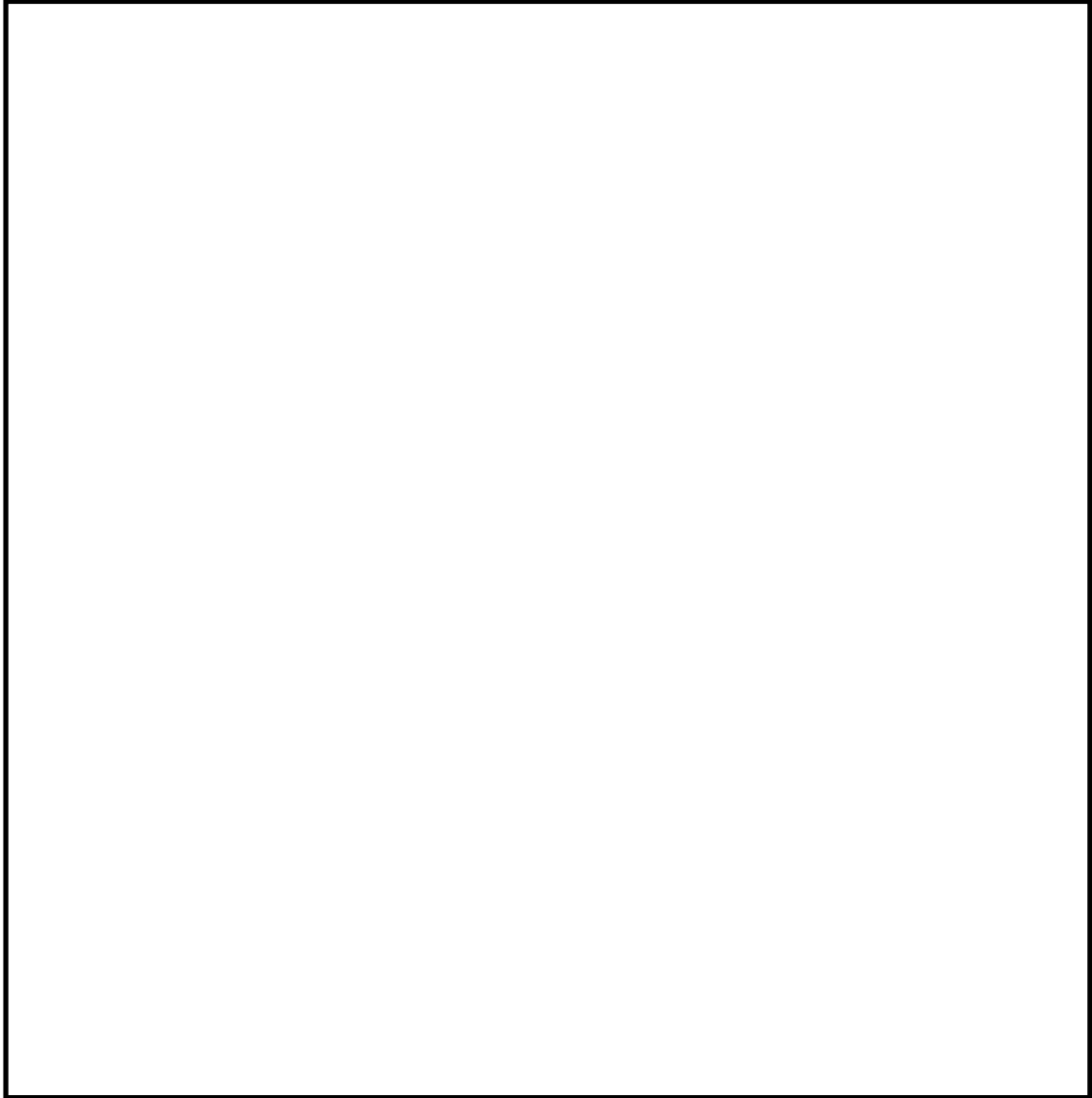


図 3-5(2) Ccb のせん断補強の考え方（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

(4) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価

実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価について、図 3-6 に示す。

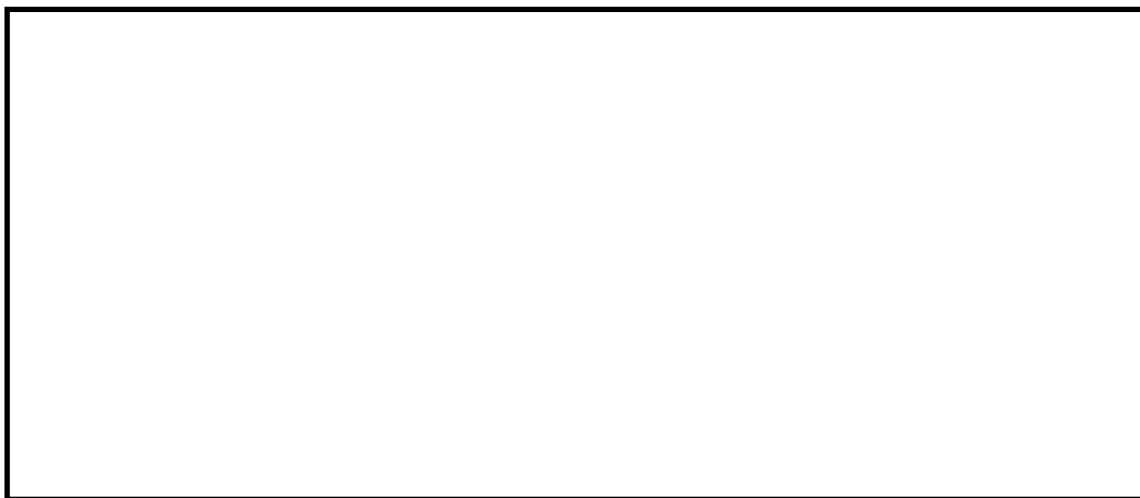


図 3-6(1) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

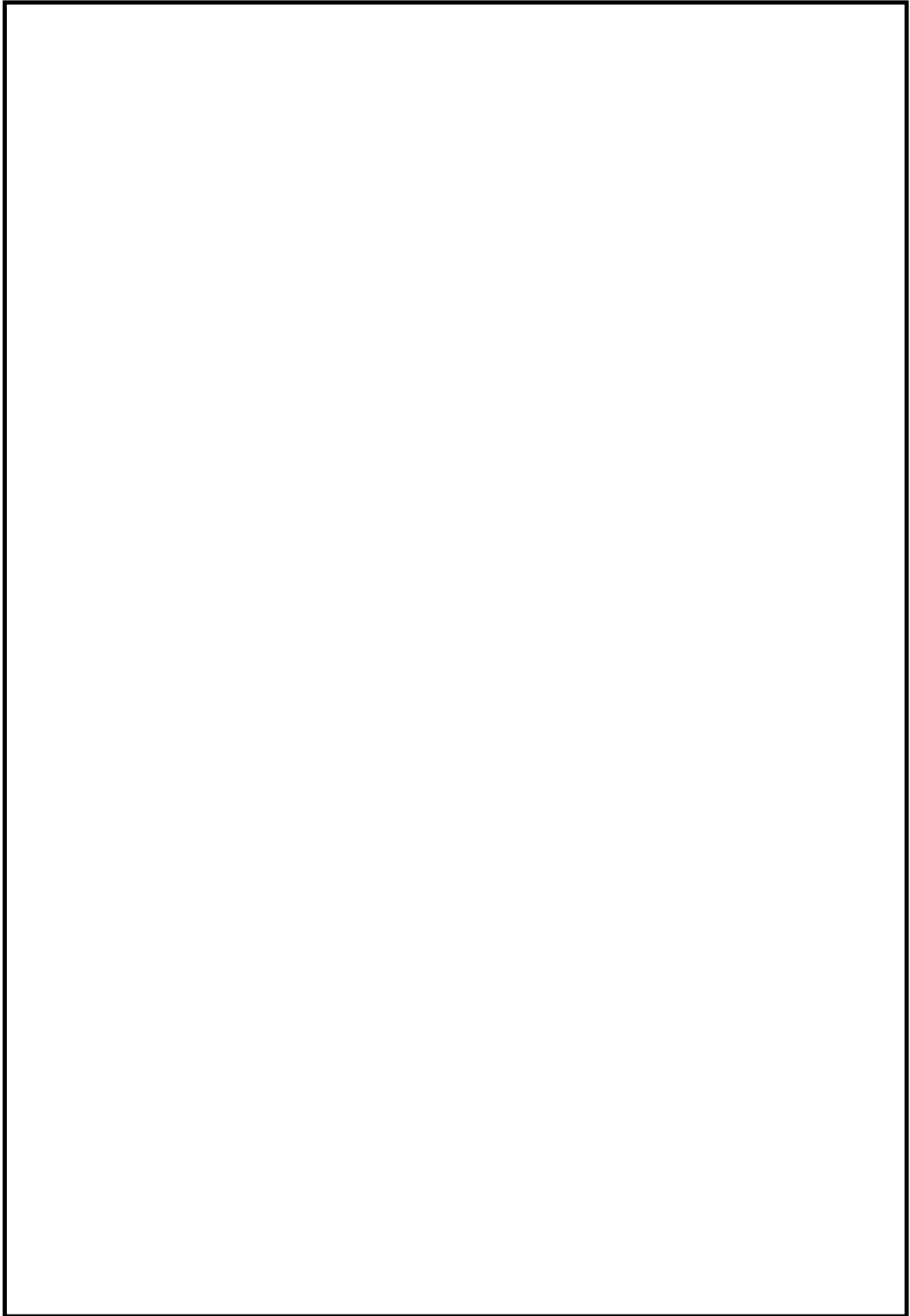


図 3-6(2) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

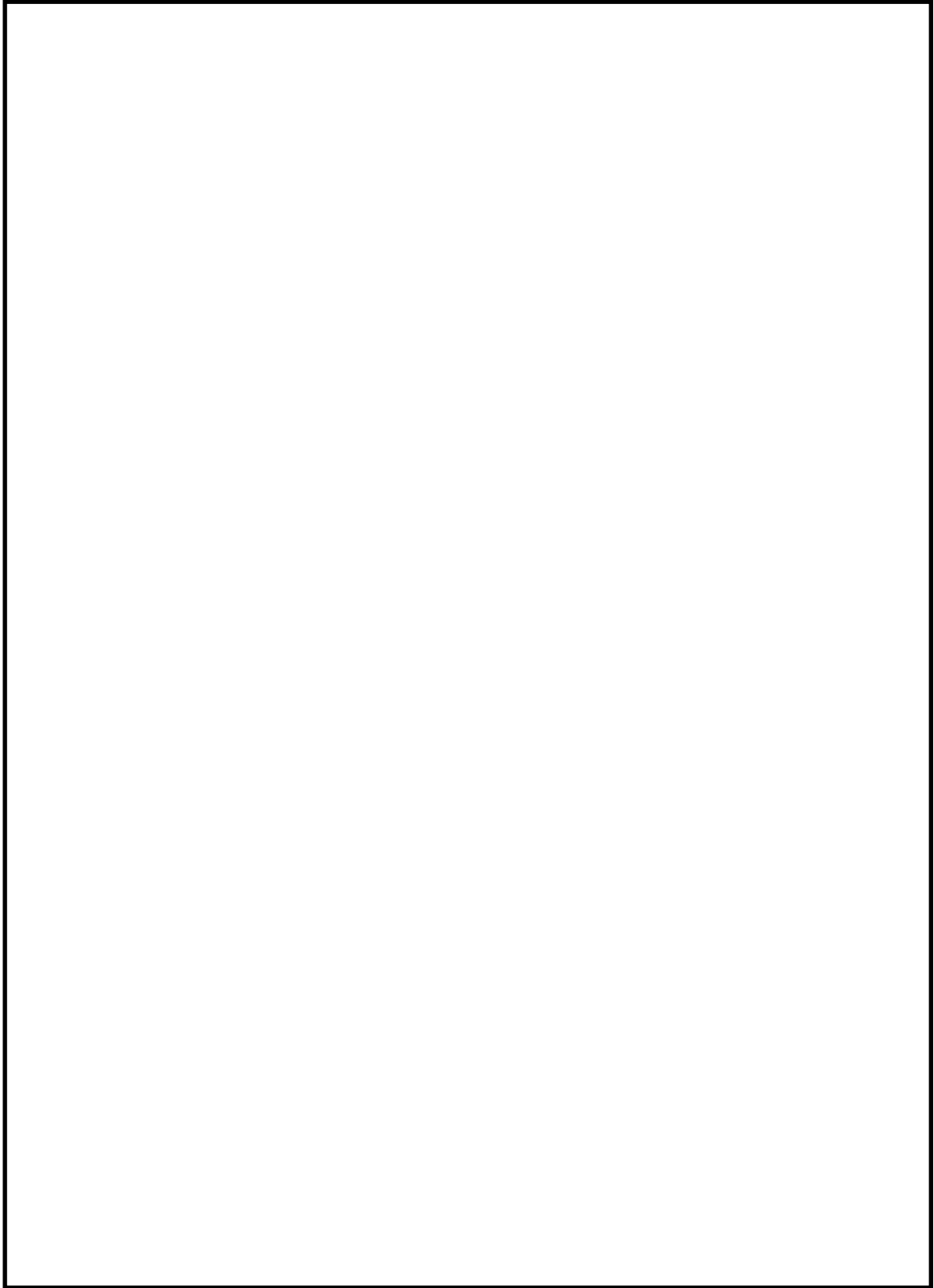


図 3-6(3) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
 (「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

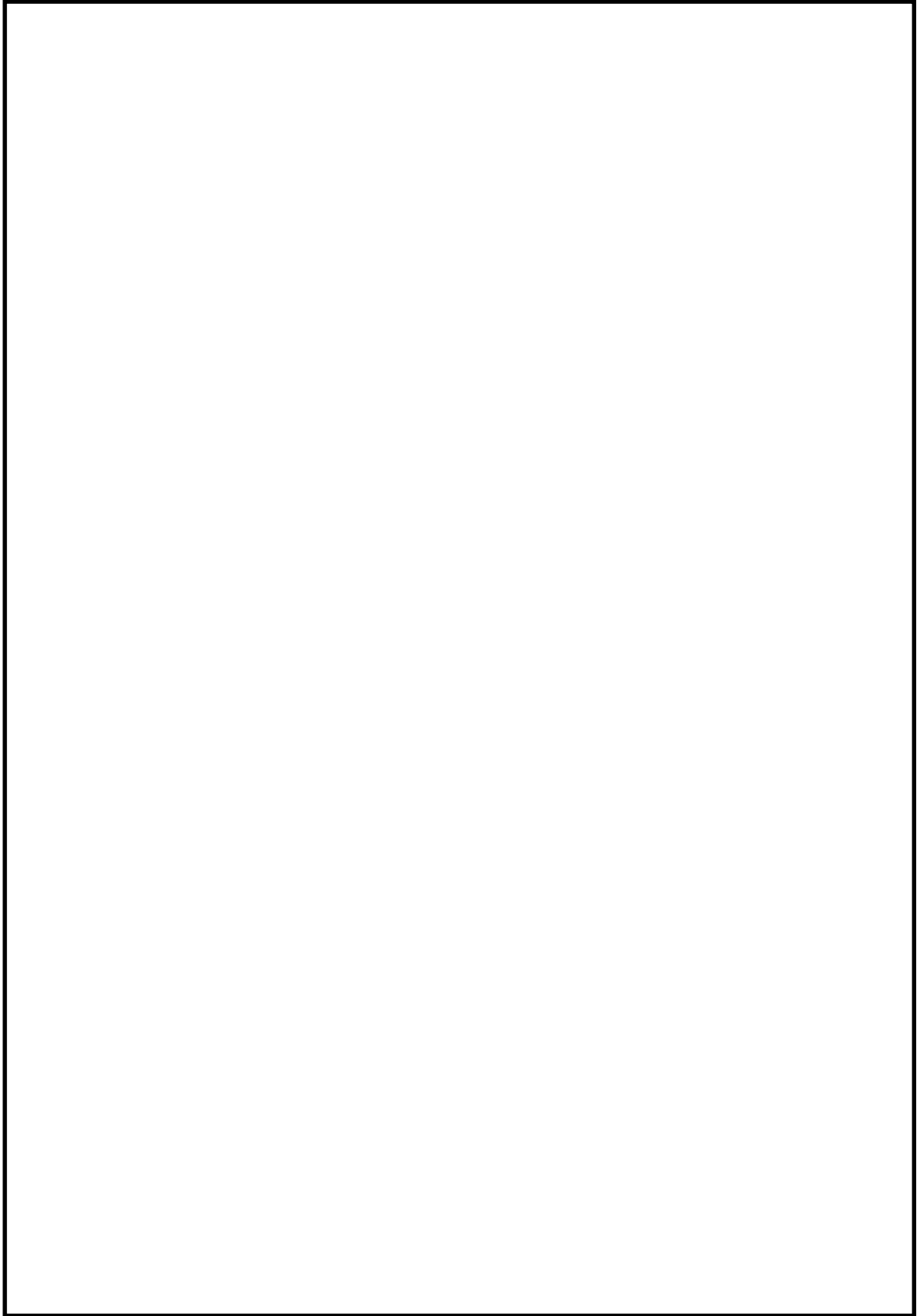


図 3-6(4) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

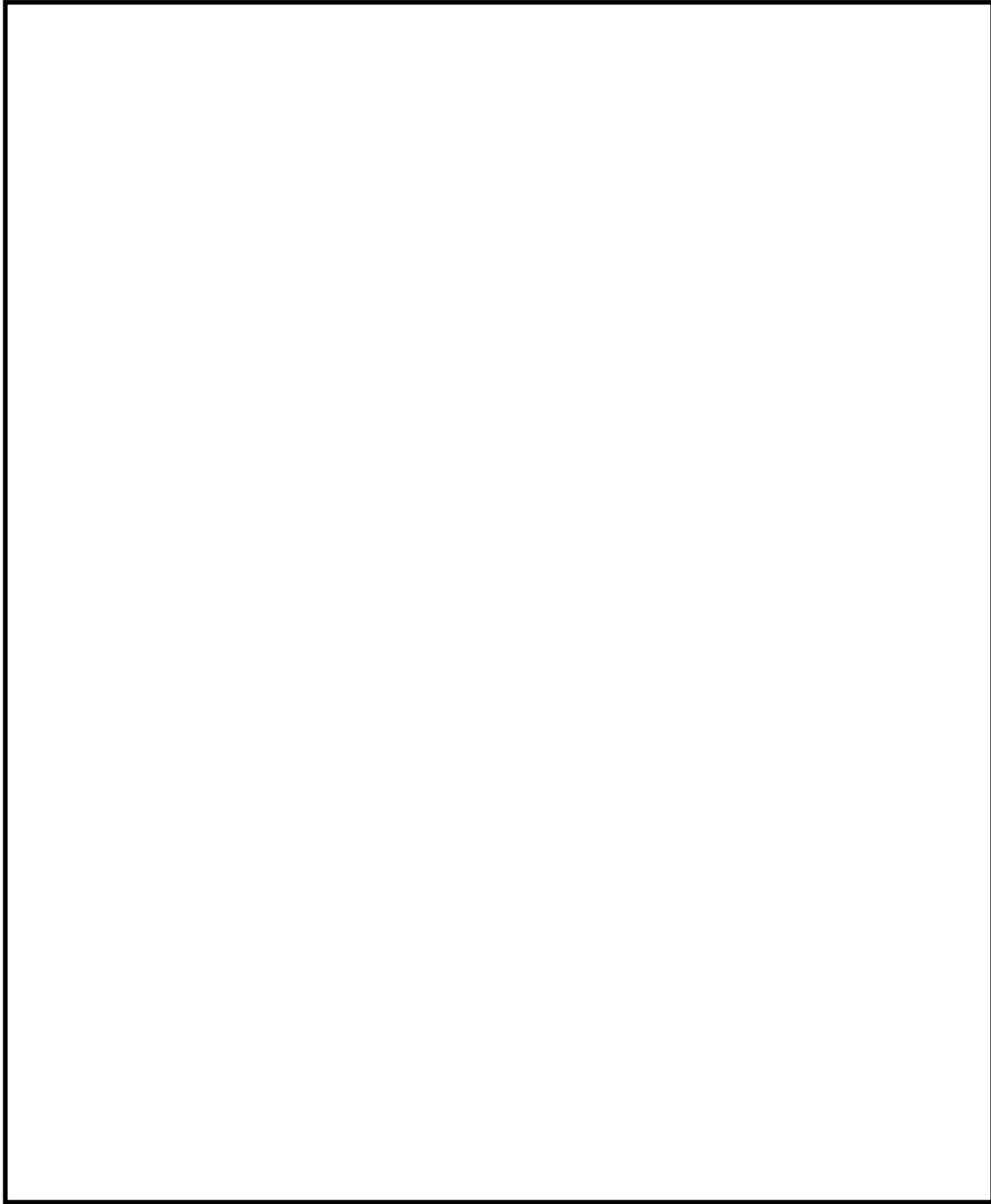


図 3-6(5) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

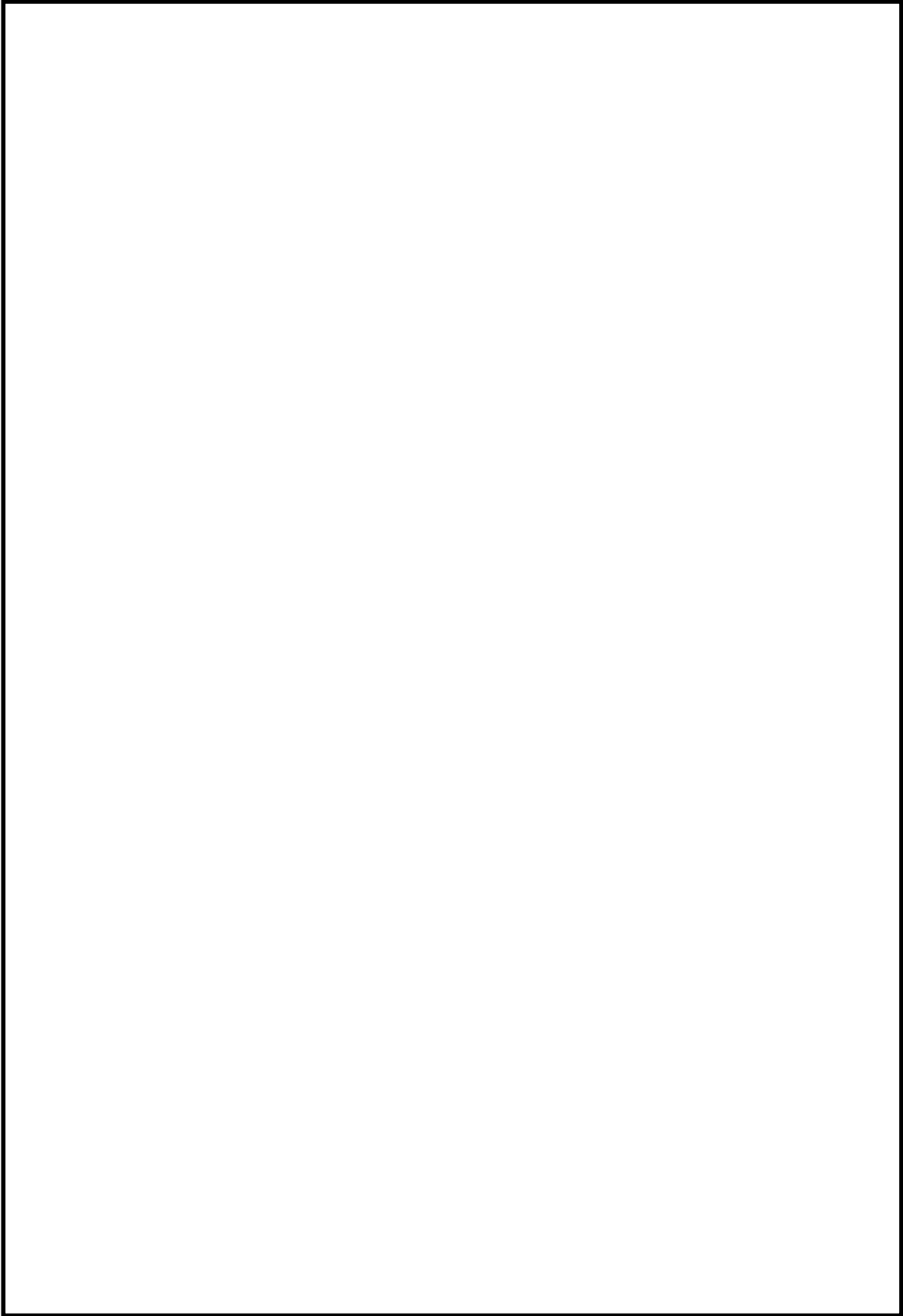


図 3-6(6) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

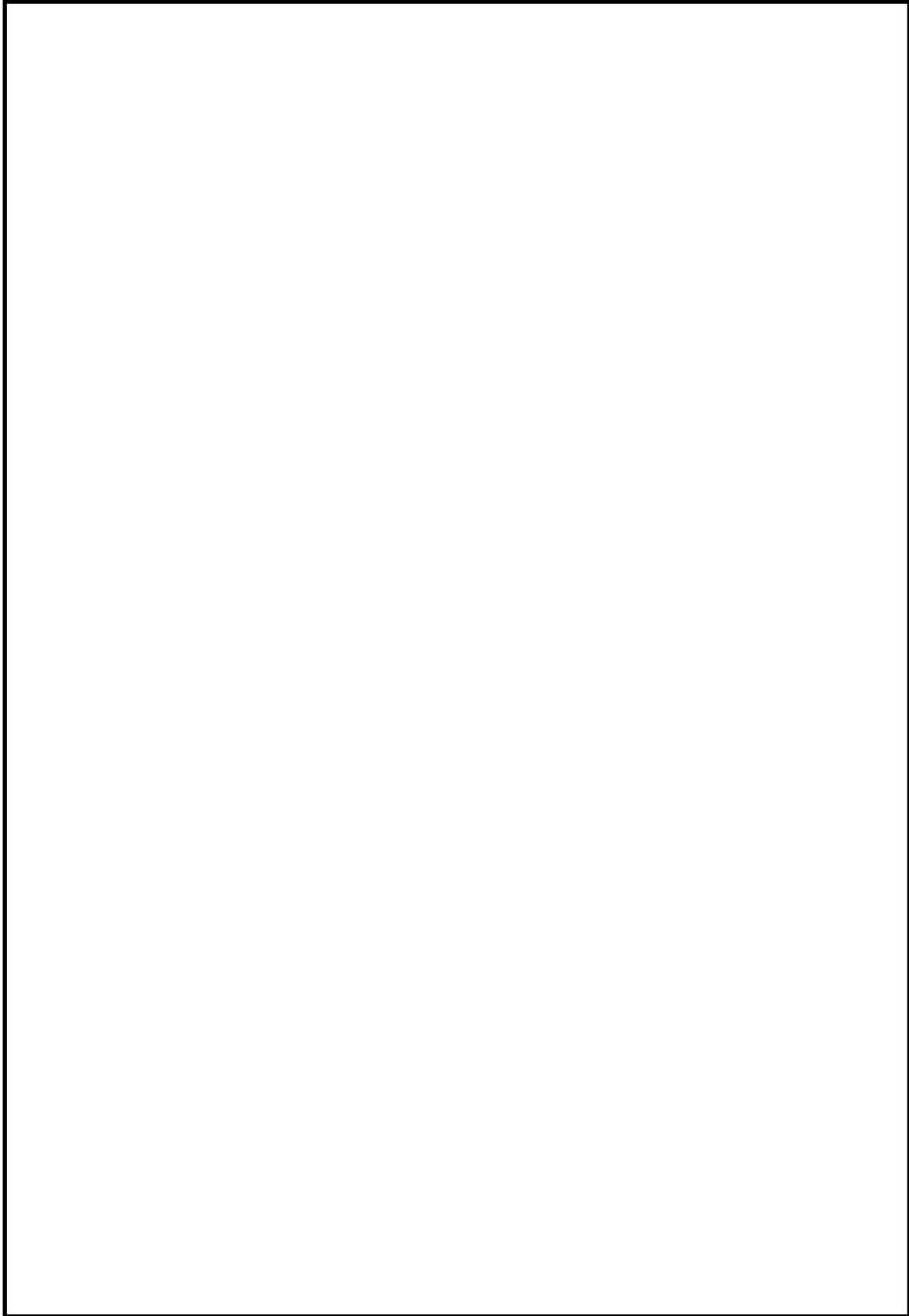


図 3-6(7) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)



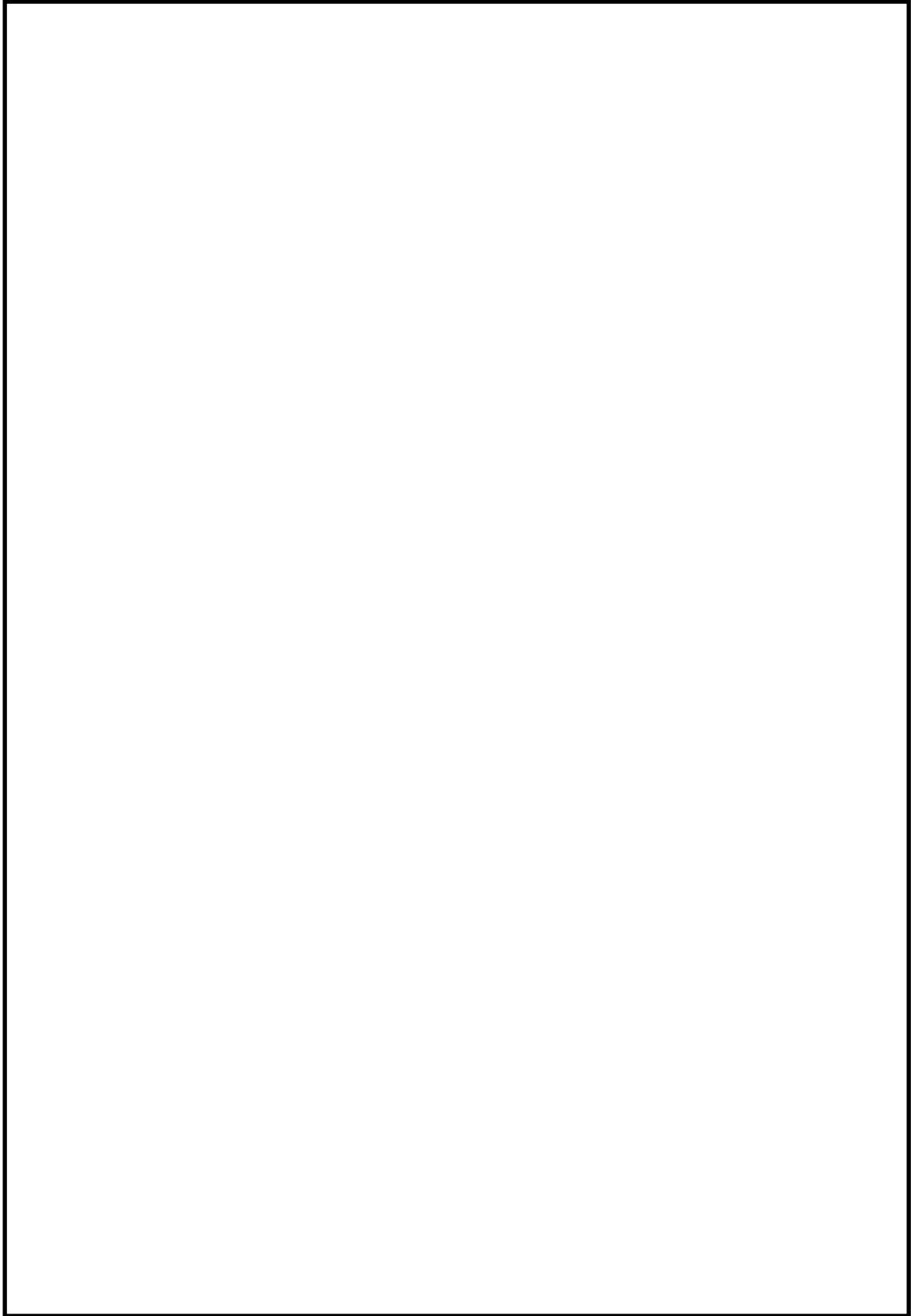


図 3-6(8) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

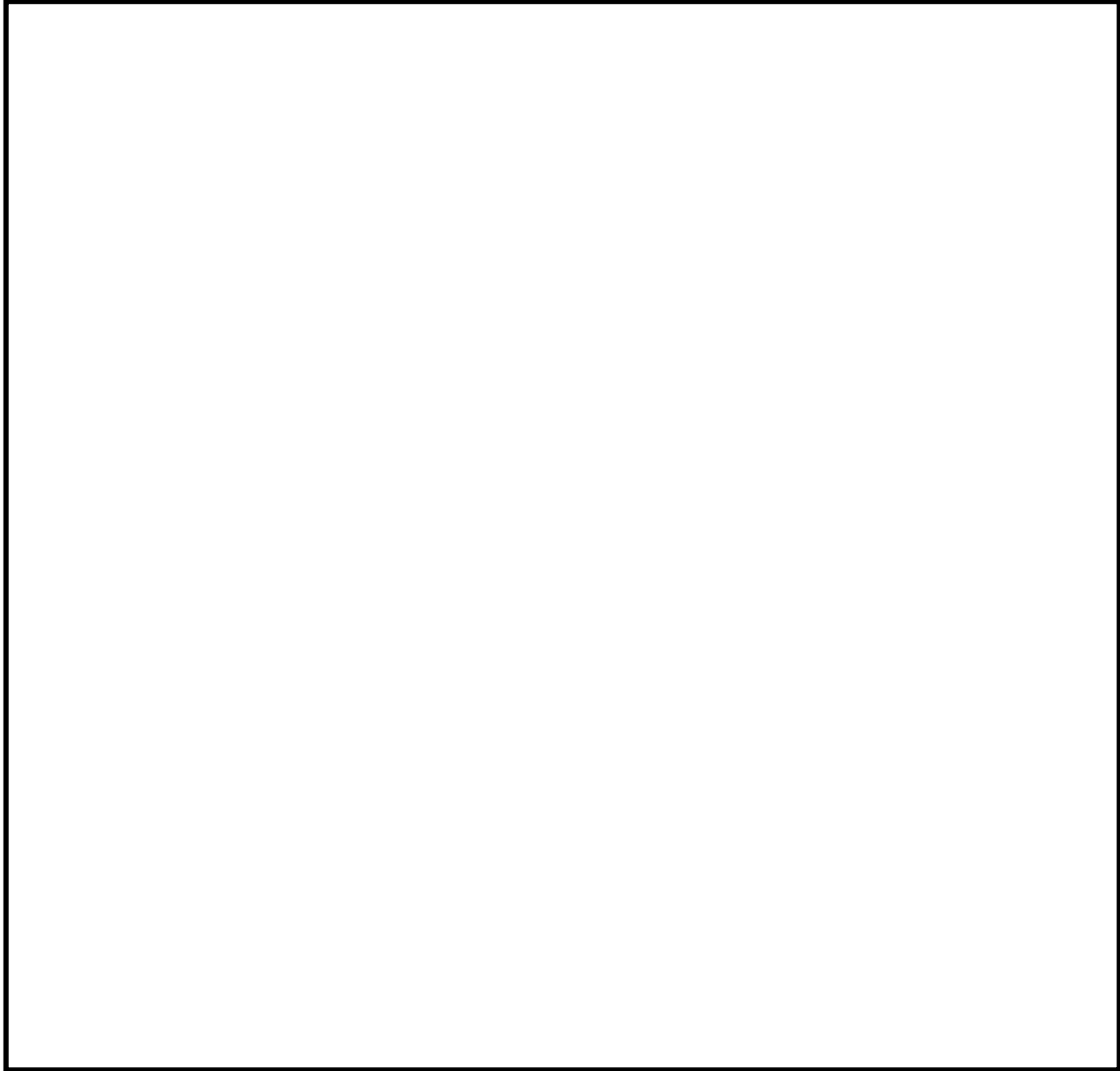


図 3-6(9) 実験結果に基づく Ccb によるせん断補強効果の評価  
(「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

### 3.3.2 使用材料・強度

実験を元にした本設計法では, 図 3-7 に示すとおり使用材料を定めている。  
今回の設計でも, これらに適合する使用材料・強度を用いる。

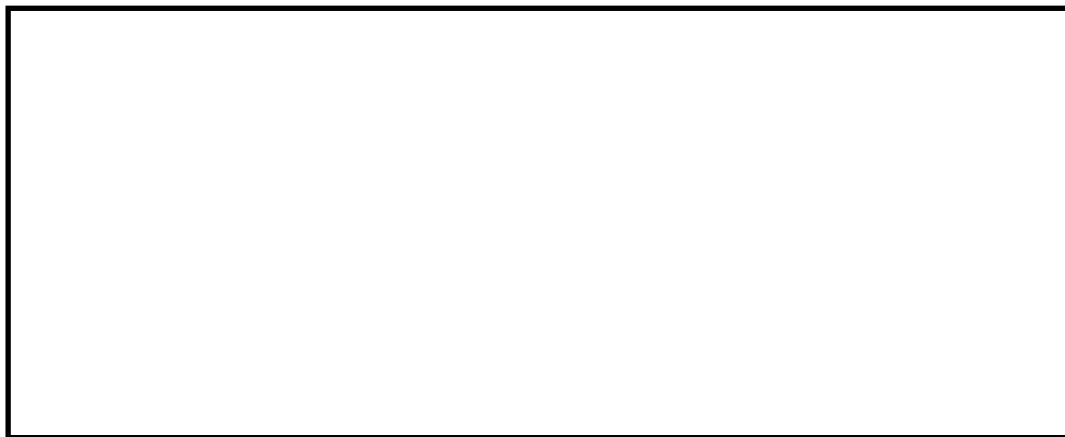


図 3-7(1) 使用材料・強度 (「建設技術審査証明報告書」より抜粋)

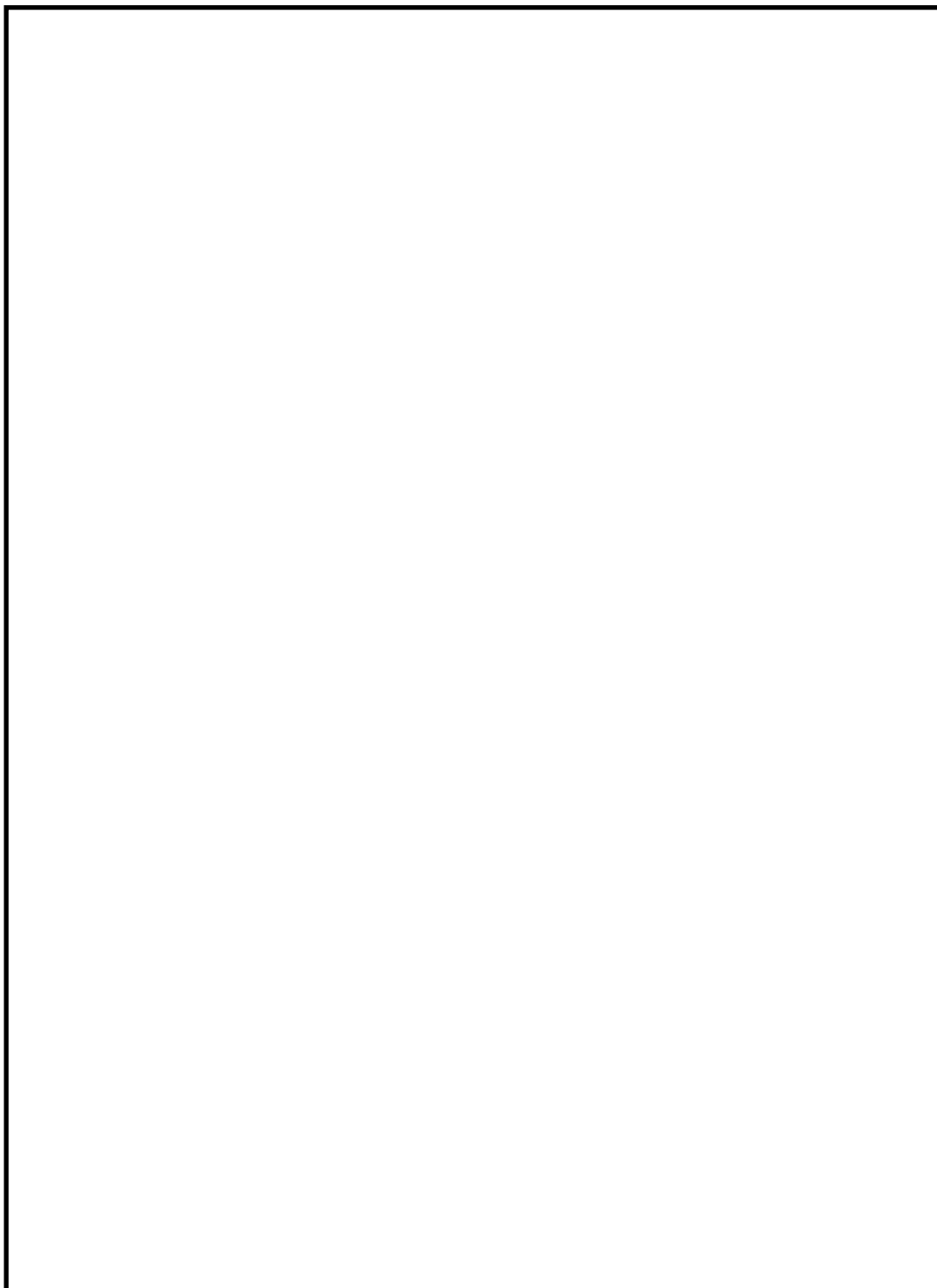


図 3-7(2) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

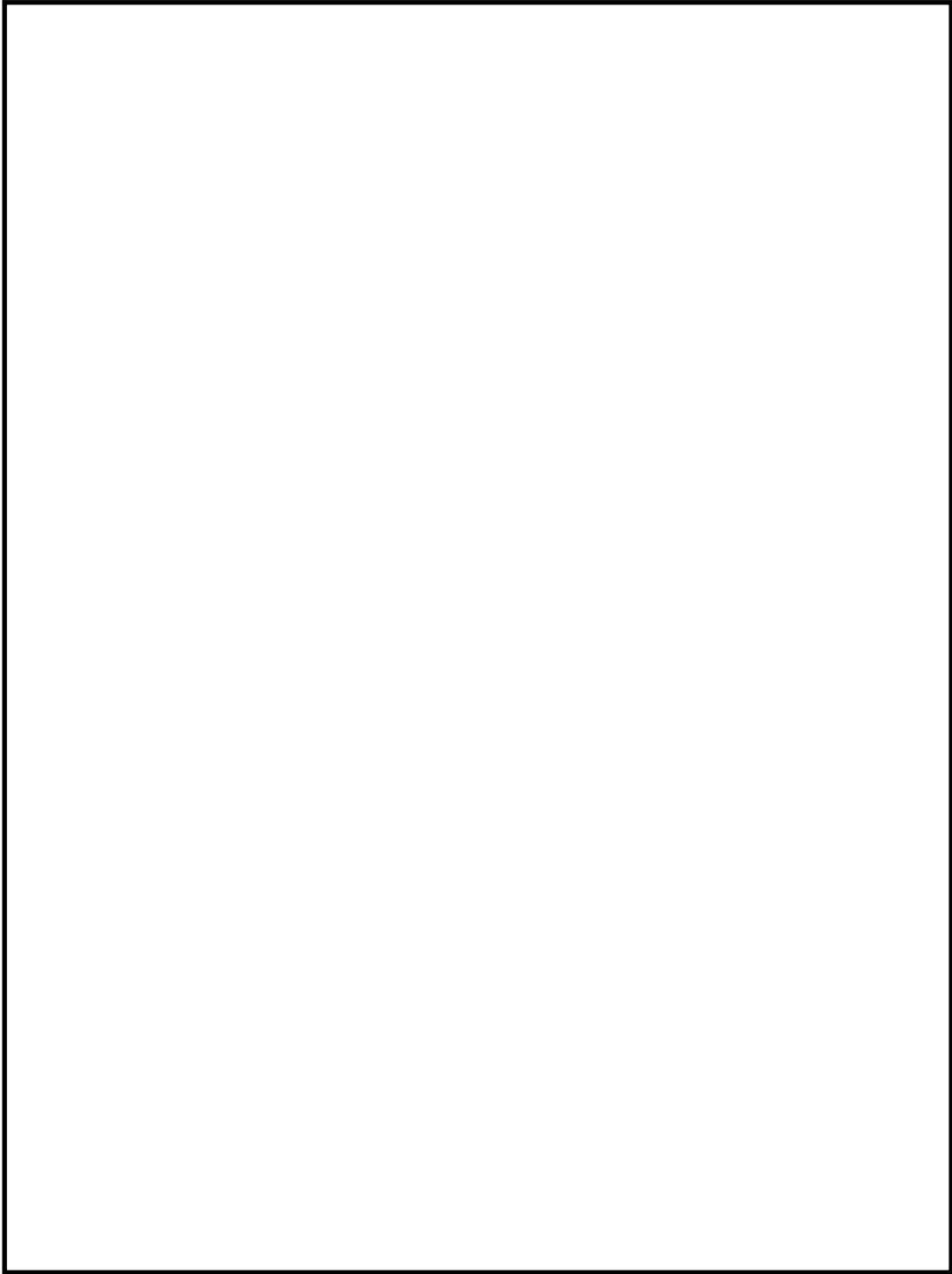


図 3-7(3) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

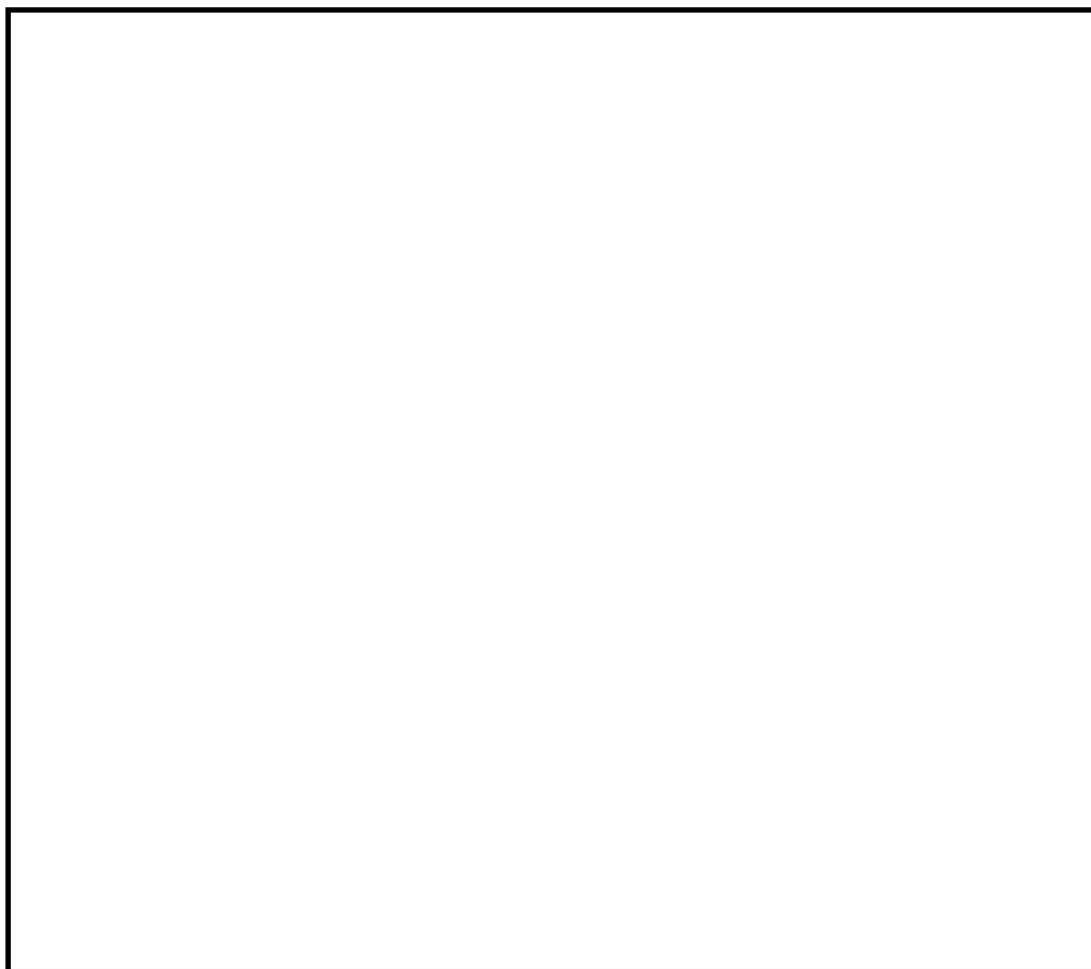


図 3-7(4) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

セラミック定着体は、JIS R 1600 に示すファインセラミックスに分類されるセラミックにて製作されており、顆粒物性においてアルミナ純度 96%以上のアルミナ材で、焼成体物性において 300N/mm<sup>2</sup>以上の曲げ強度(JIS R 1601)を製造会社が保証するものを用いることを原則としている。

セラミック定着体の寸法、ねじ節強度及び密度については、以下のとおり品質管理基準を定めている。

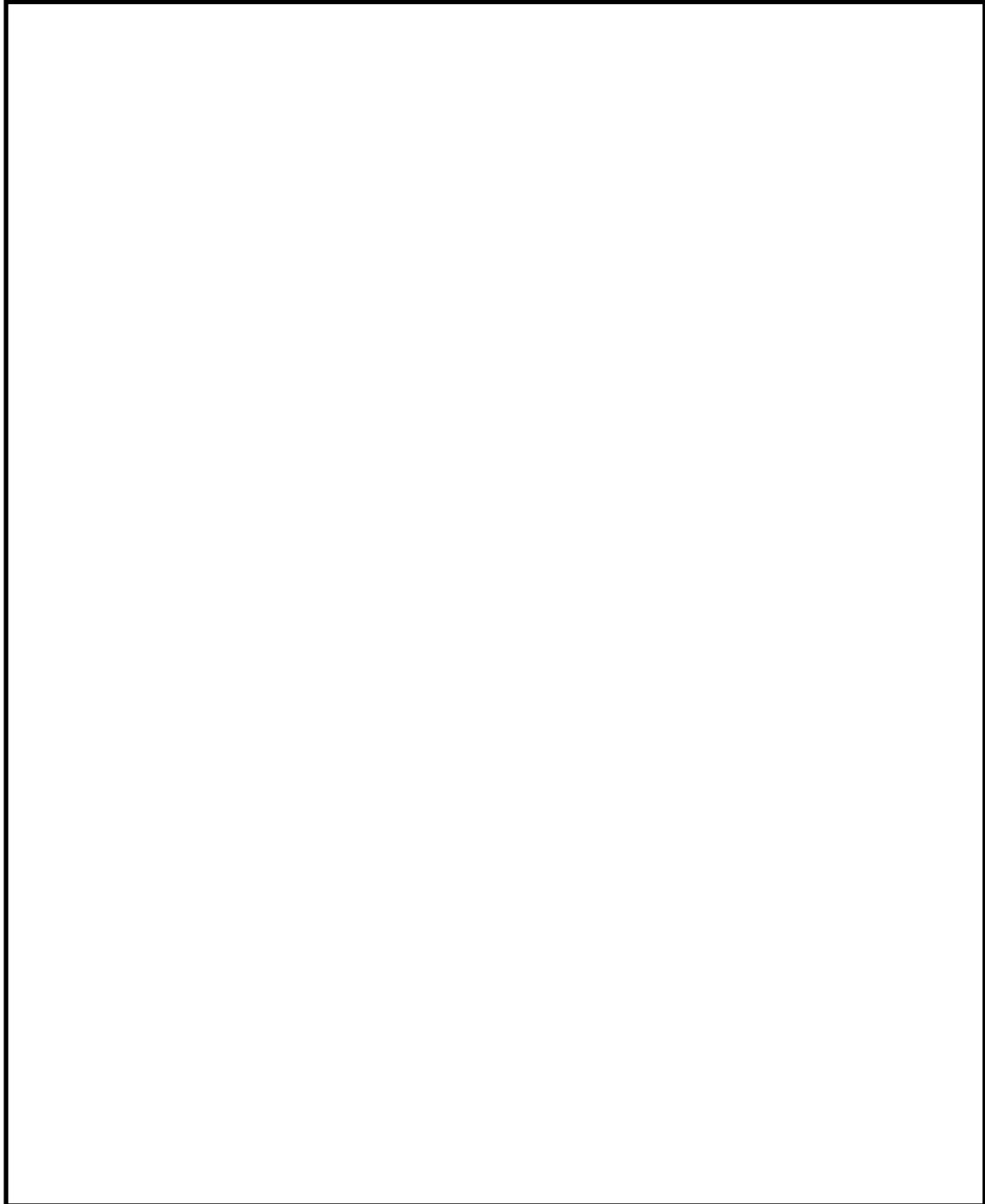


図 3-7(5) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



図 3-7(6) 使用材料・強度（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



### 3.3.3 構造部材の評価

3.3.1 で示した基本的考え方に基づき，図 3-8 で示すコンクリート標準示方書[設計編]（(社)土木学会，2012）（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

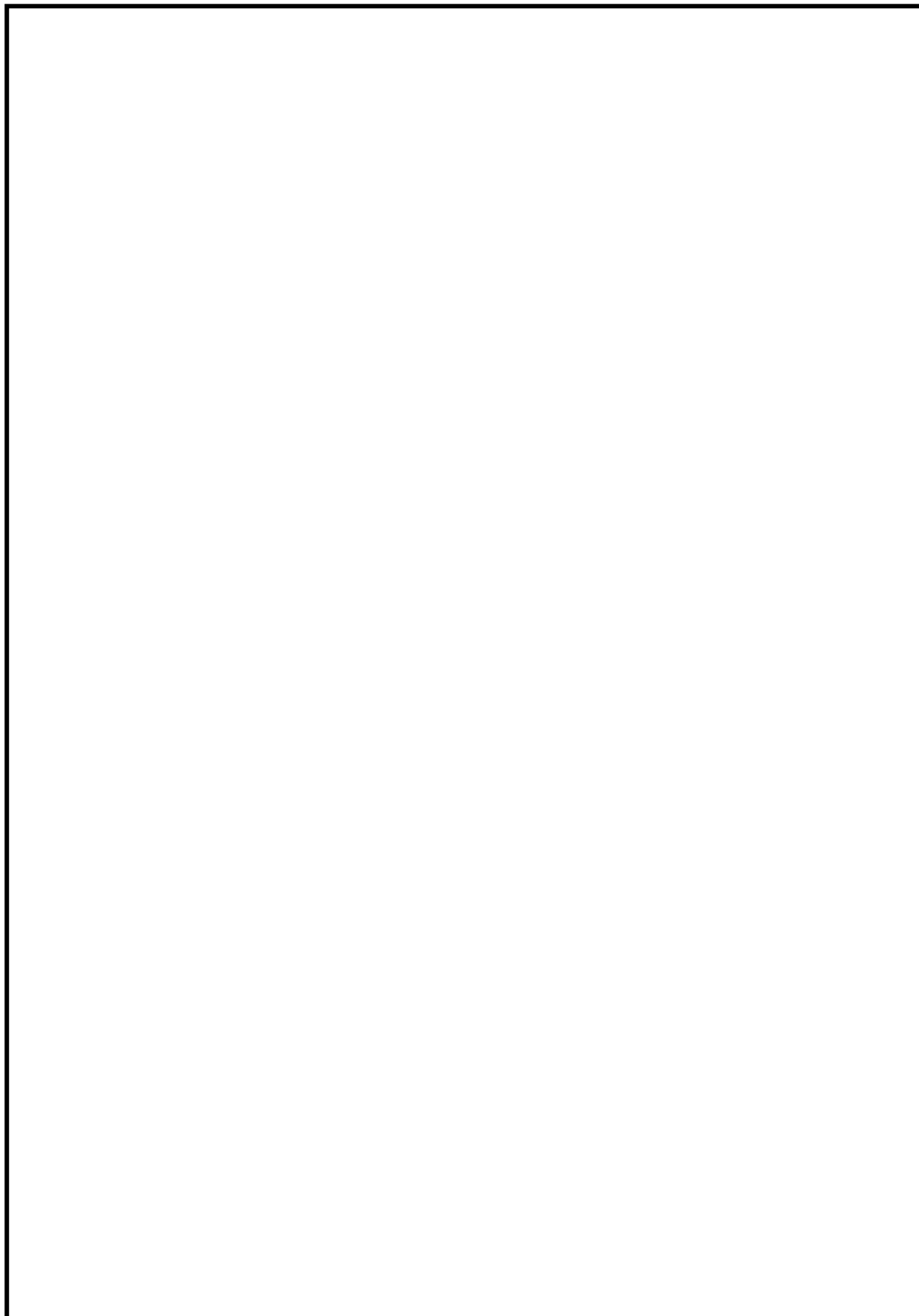


図 3-8(1) せん断に対する安全性照査（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

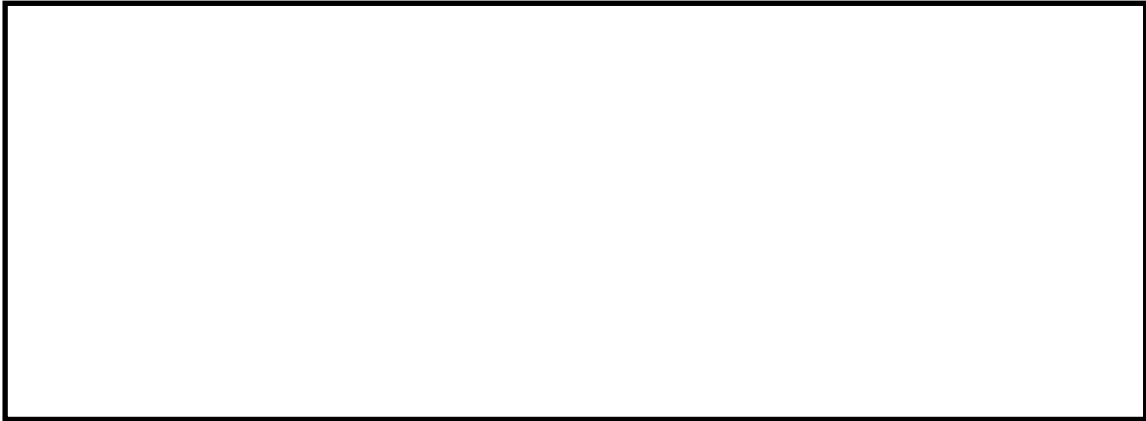


図 3-8(2) せん断に対する安全性照査（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.3.4 構造細目

本設計方法では，想定外の破壊形式をとらないように，図 3-9 で示す構造細目を定めている。

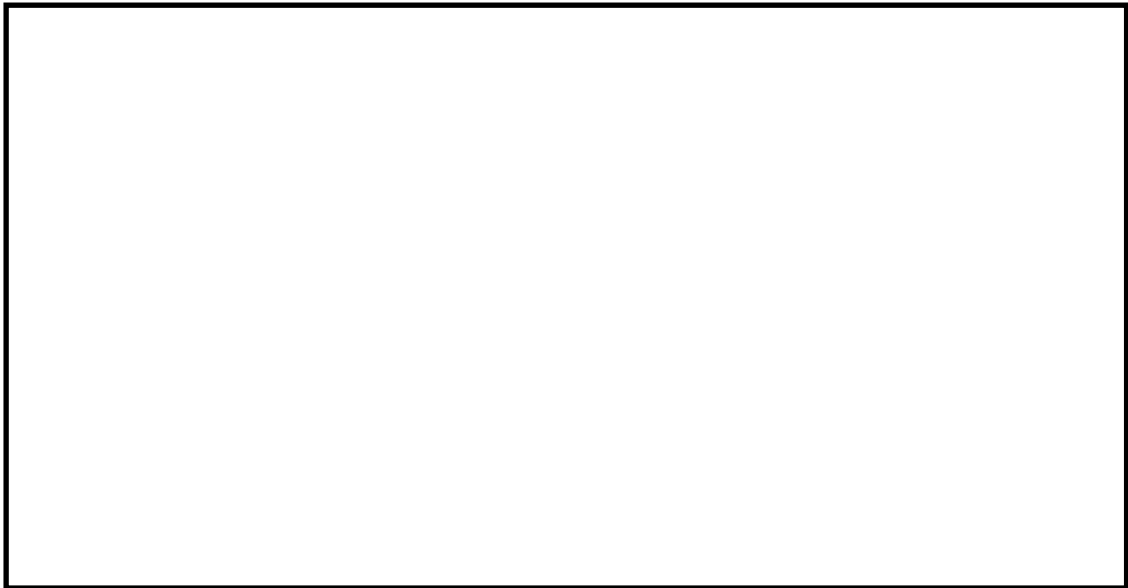


図 3-9 構造細目（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

### 3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

#### 3.4.1 施工の確実性

「建設技術審査証明報告書」において確認されている，CCbの施工の確実性について，図3-10に示す。



図3-10 施工の確実性（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.4.2 施工の容易性

「建設技術審査証明報告書」において確認されている，CCbの施工の容易性について，図3-11に示す。

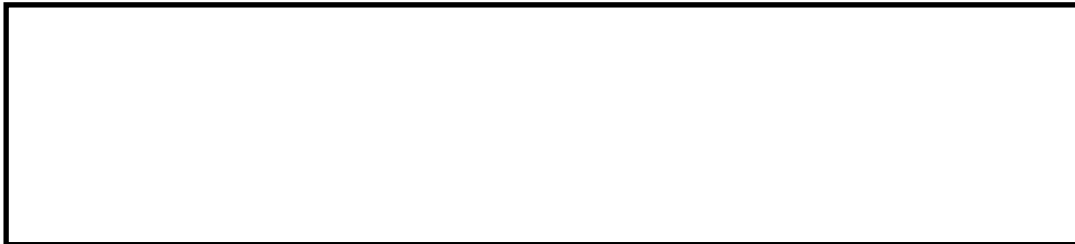


図3-11 施工の容易性（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 3.4.3 施工手順の設定

「建設技術審査証明報告書」において設定されている，CCbの施工手順について，図3-12に示す。



図3-12(1) CCbの施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

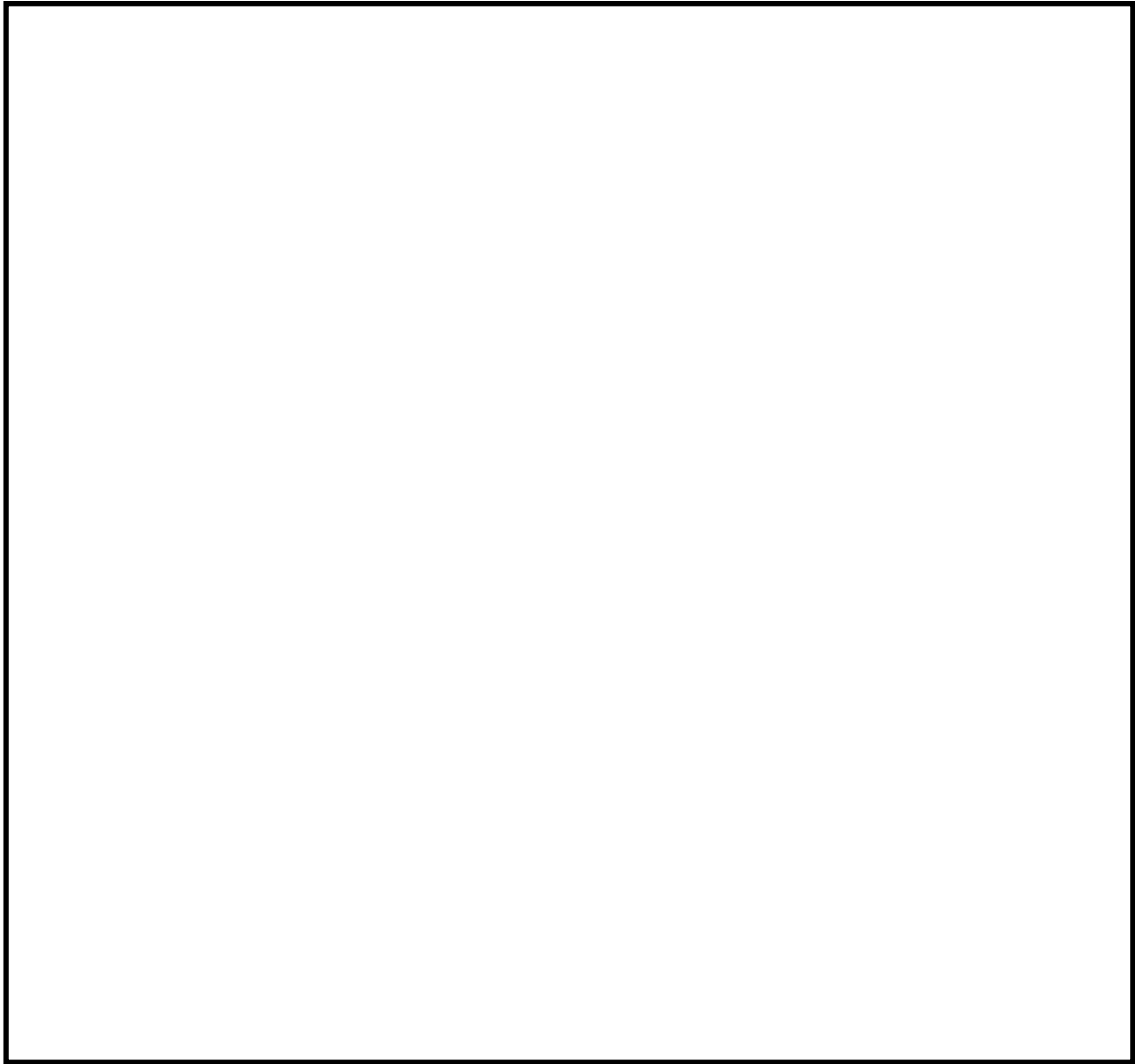


図 3-12(2) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

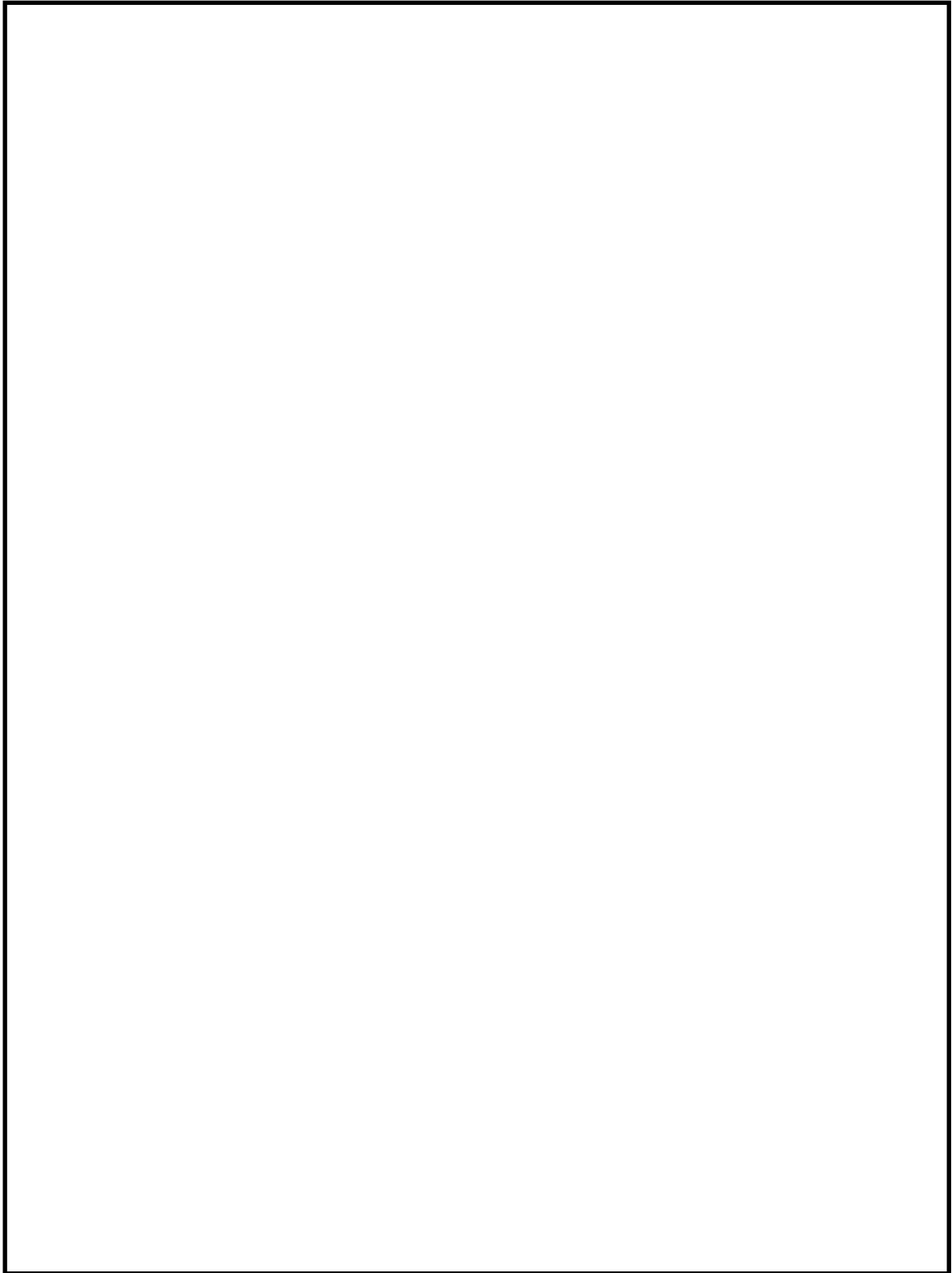


図 3-12(3) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

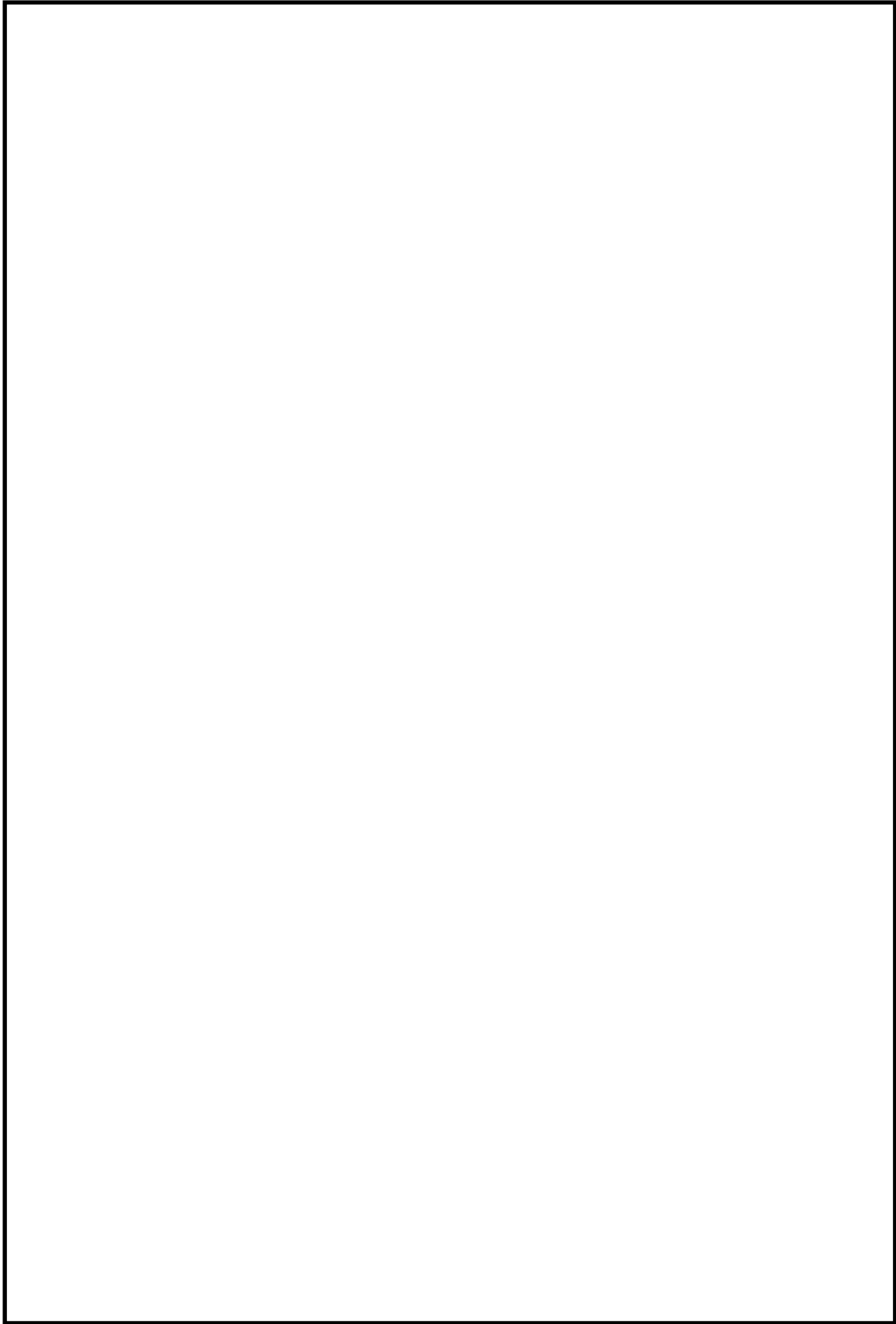


図 3-12(4) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

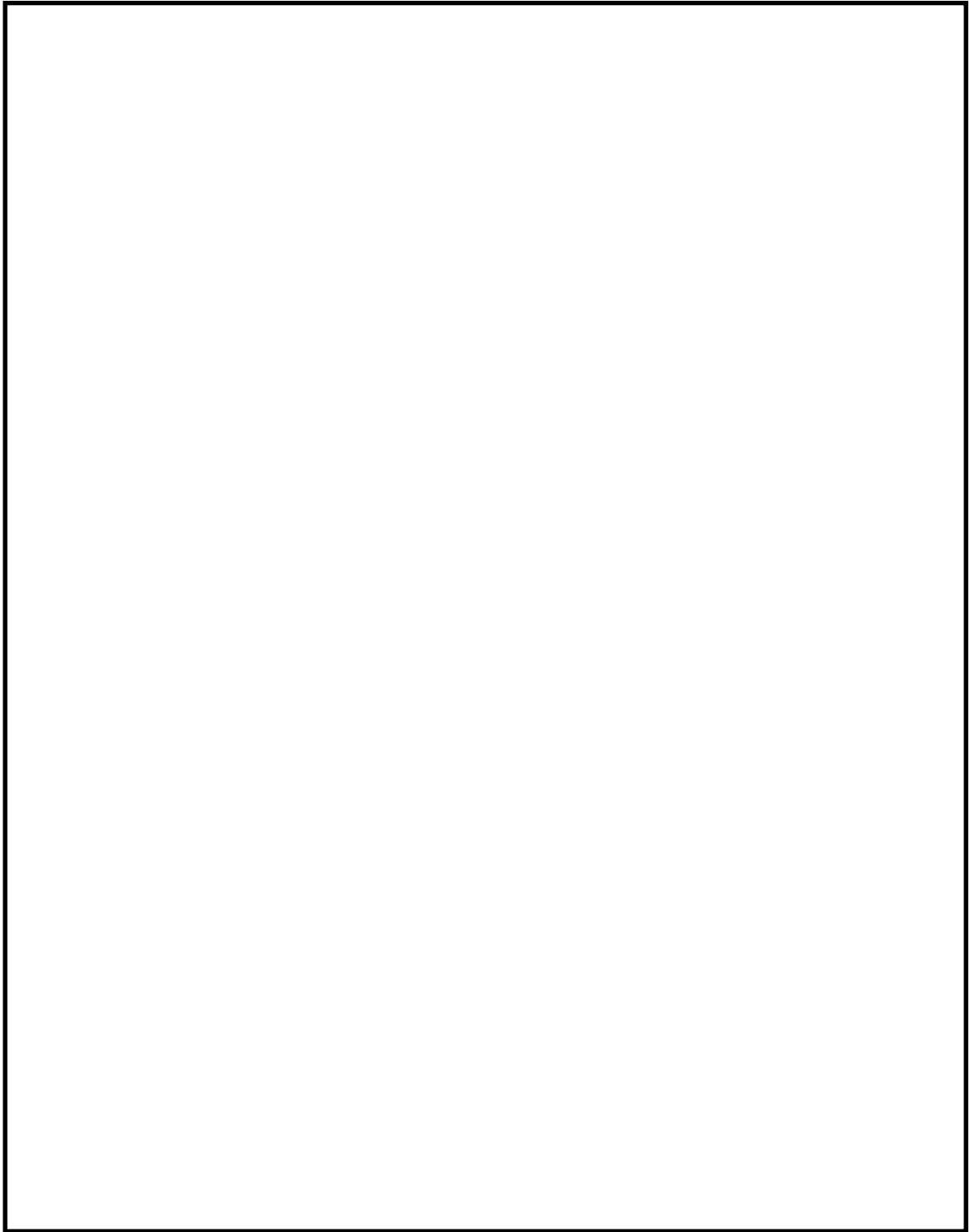


図 3-12(5) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

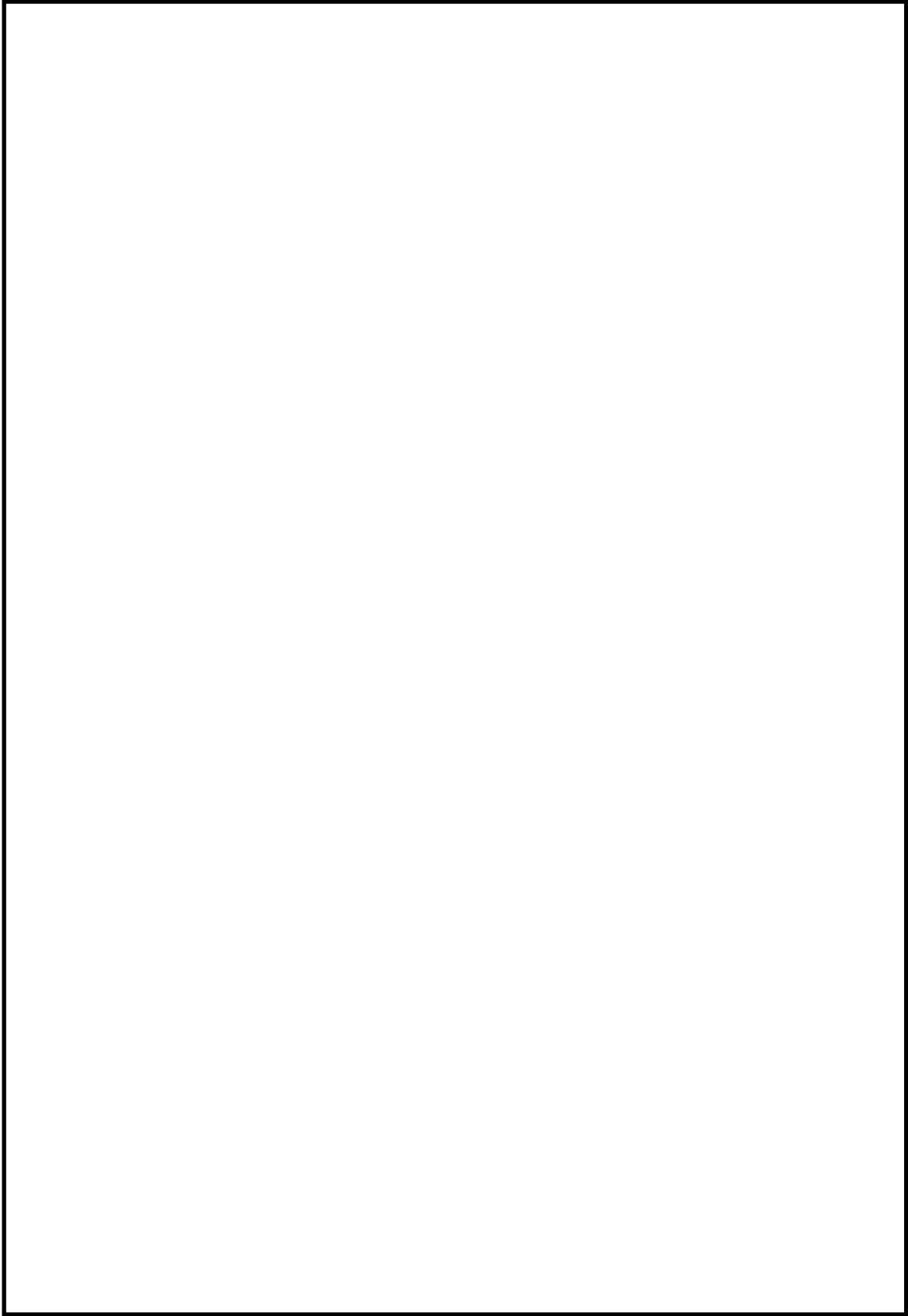


図 3-12(6) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



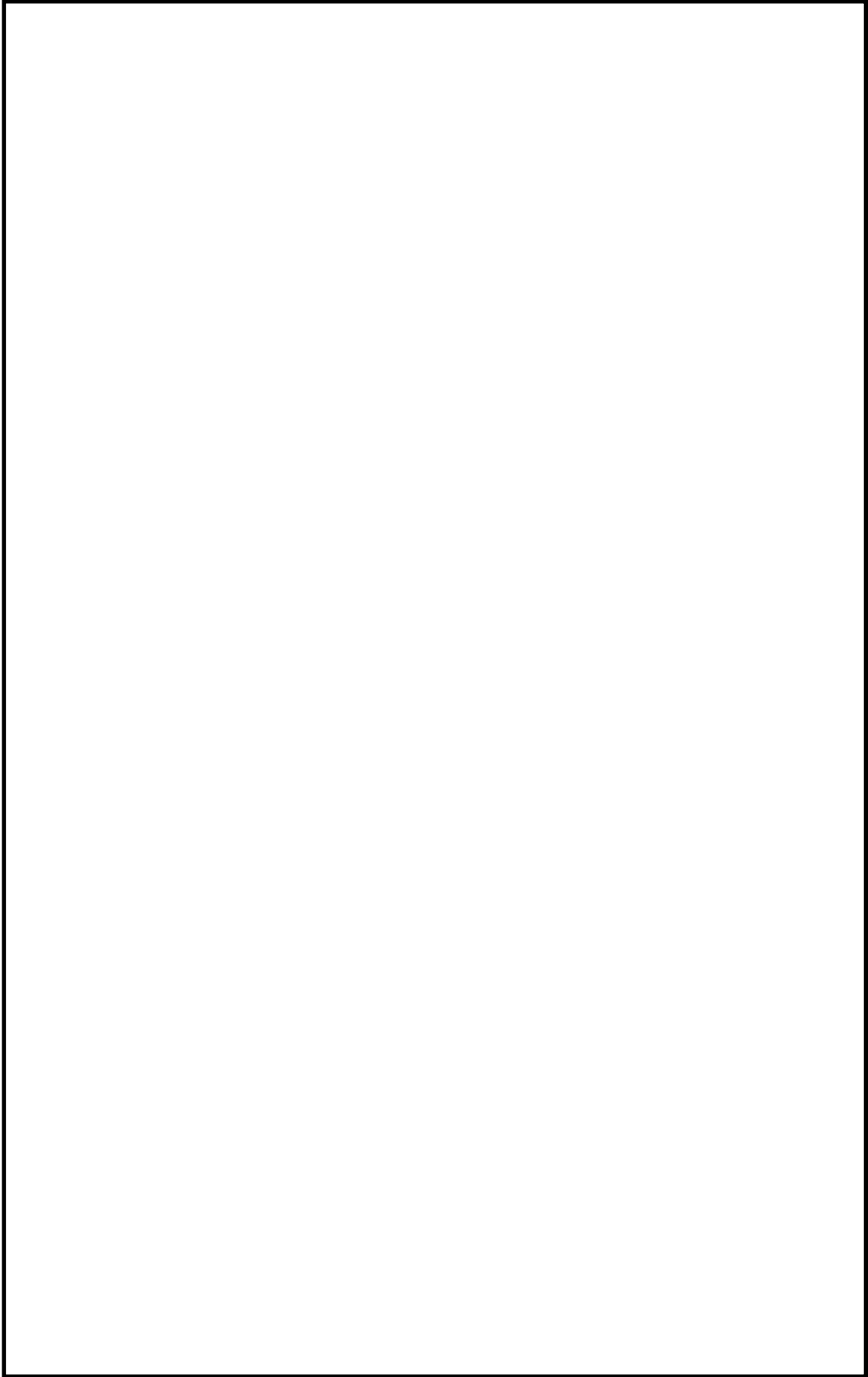


図 3-12(7) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

（参考） 12-2-47

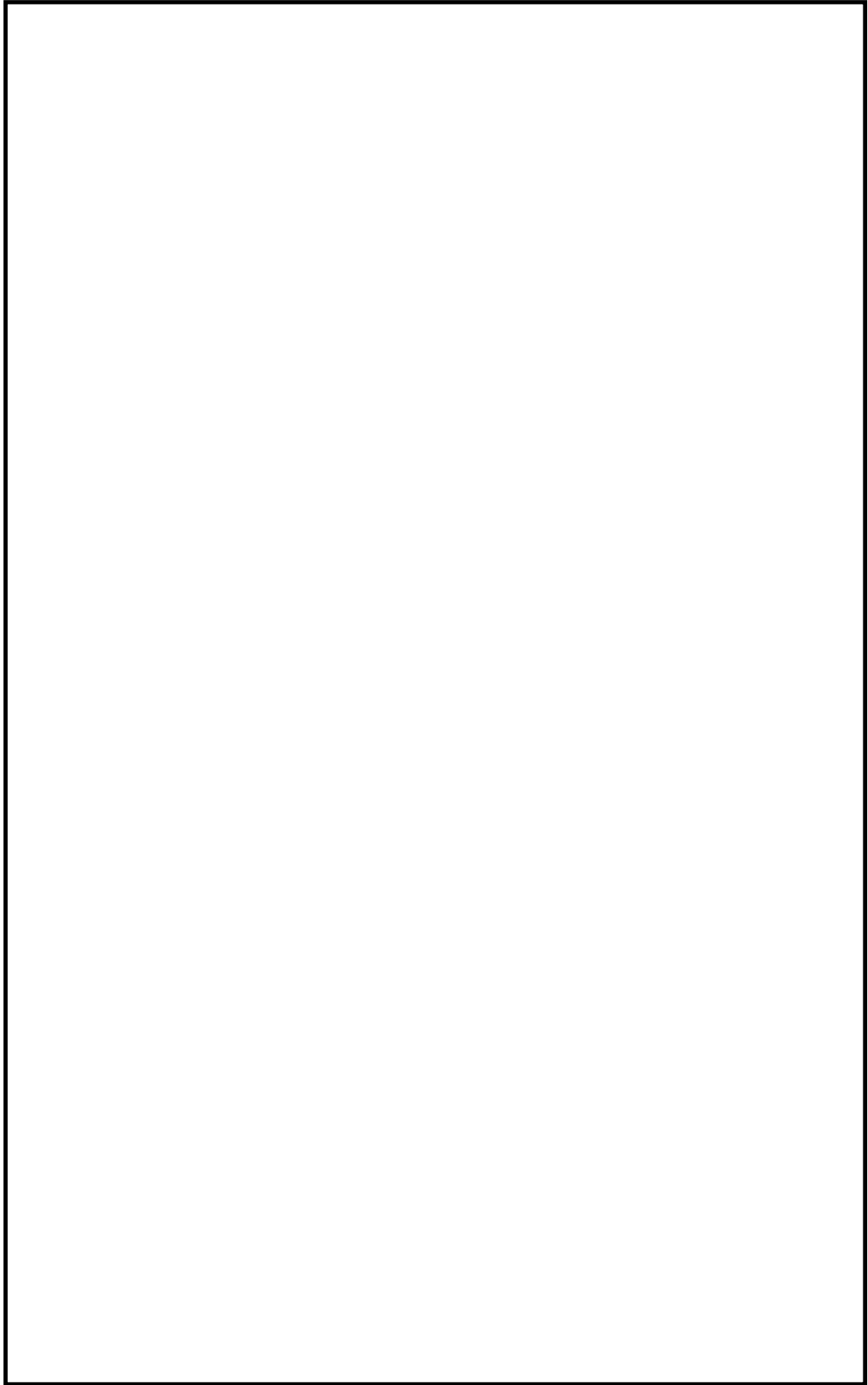


図 3-12(8) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

（参考） 12-2-48

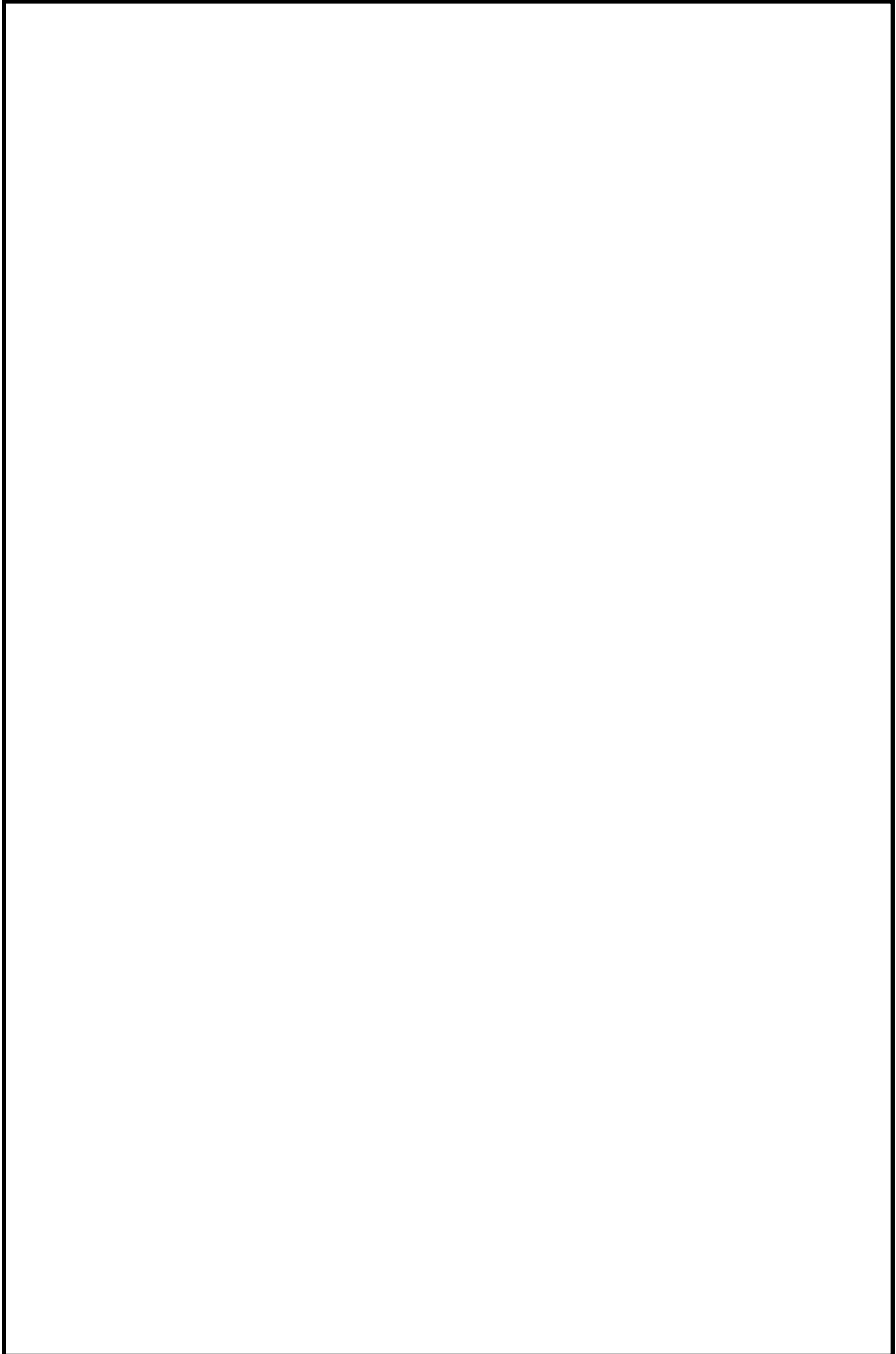


図 3-12(9) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

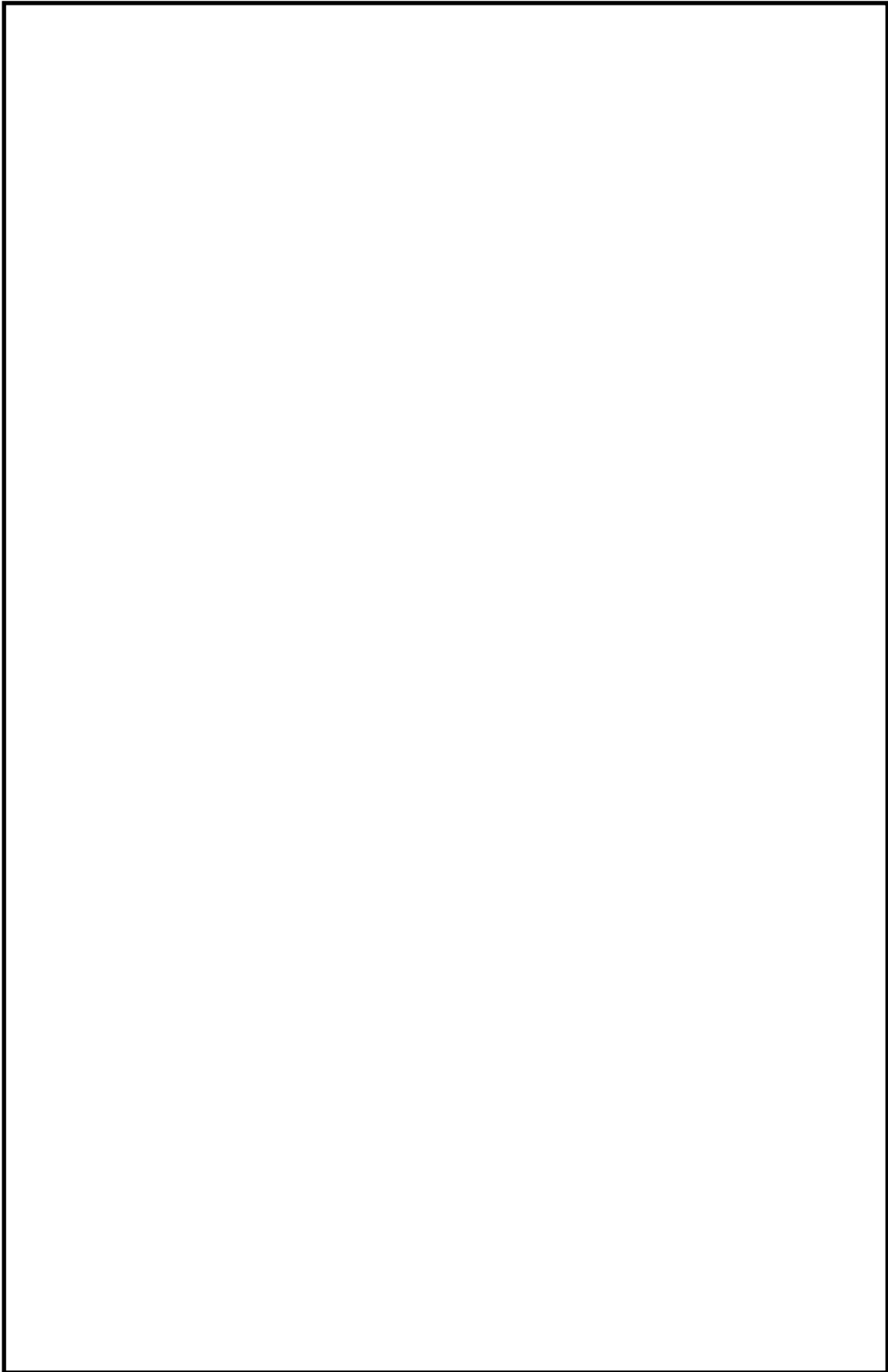


図 3-12(10) Ccb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

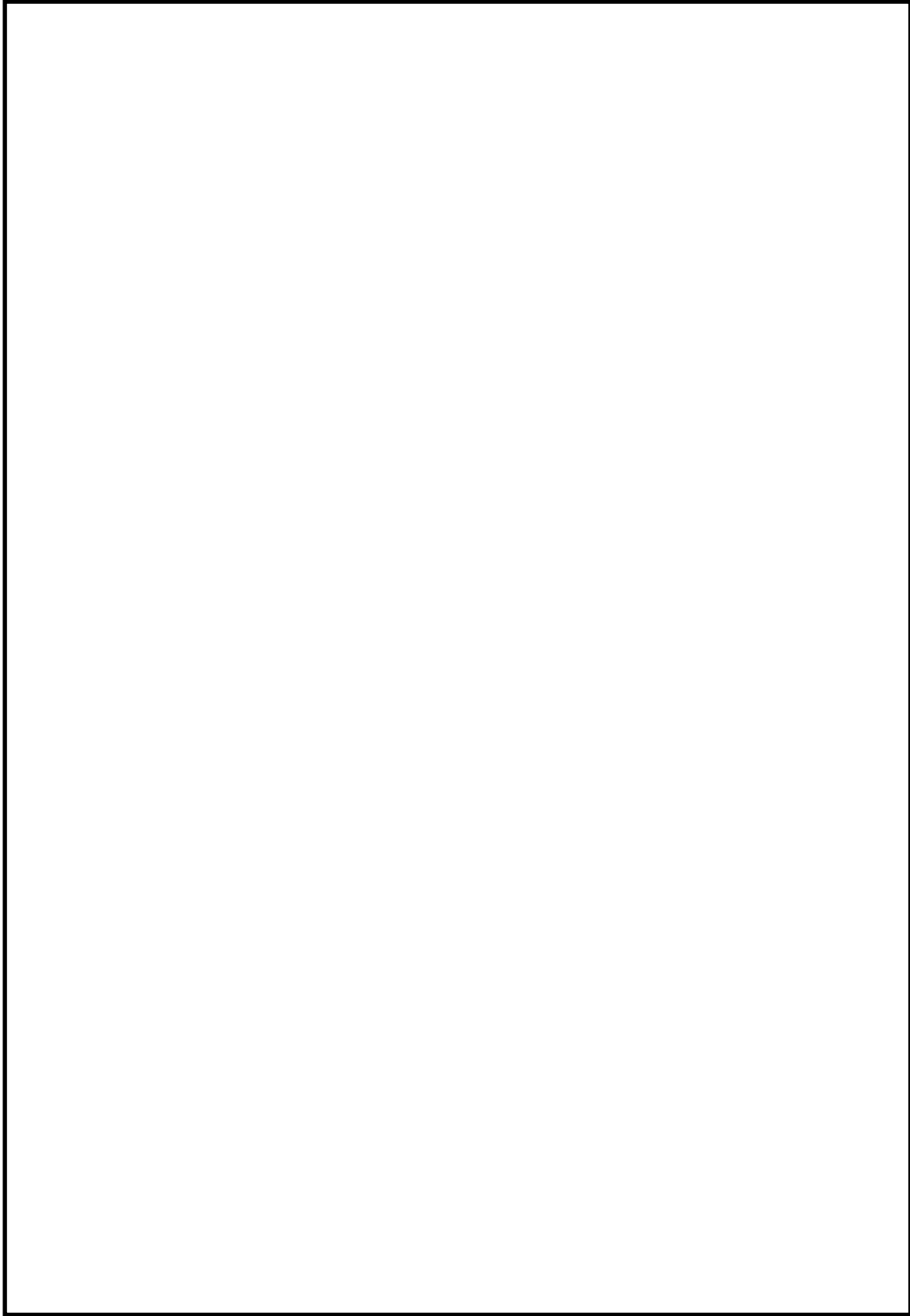


図 3-12(11) CCb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

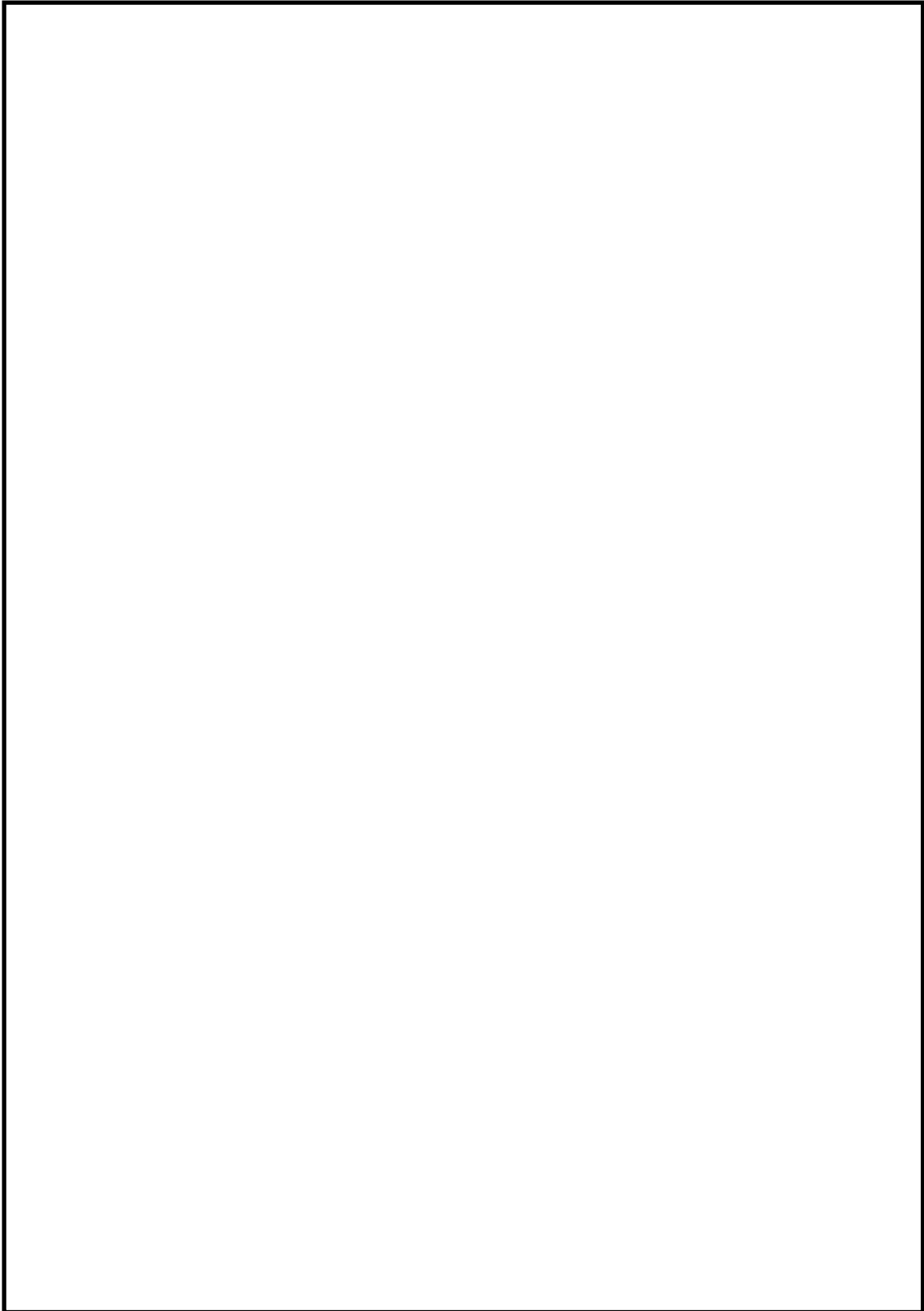


図 3-12(12) CCb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

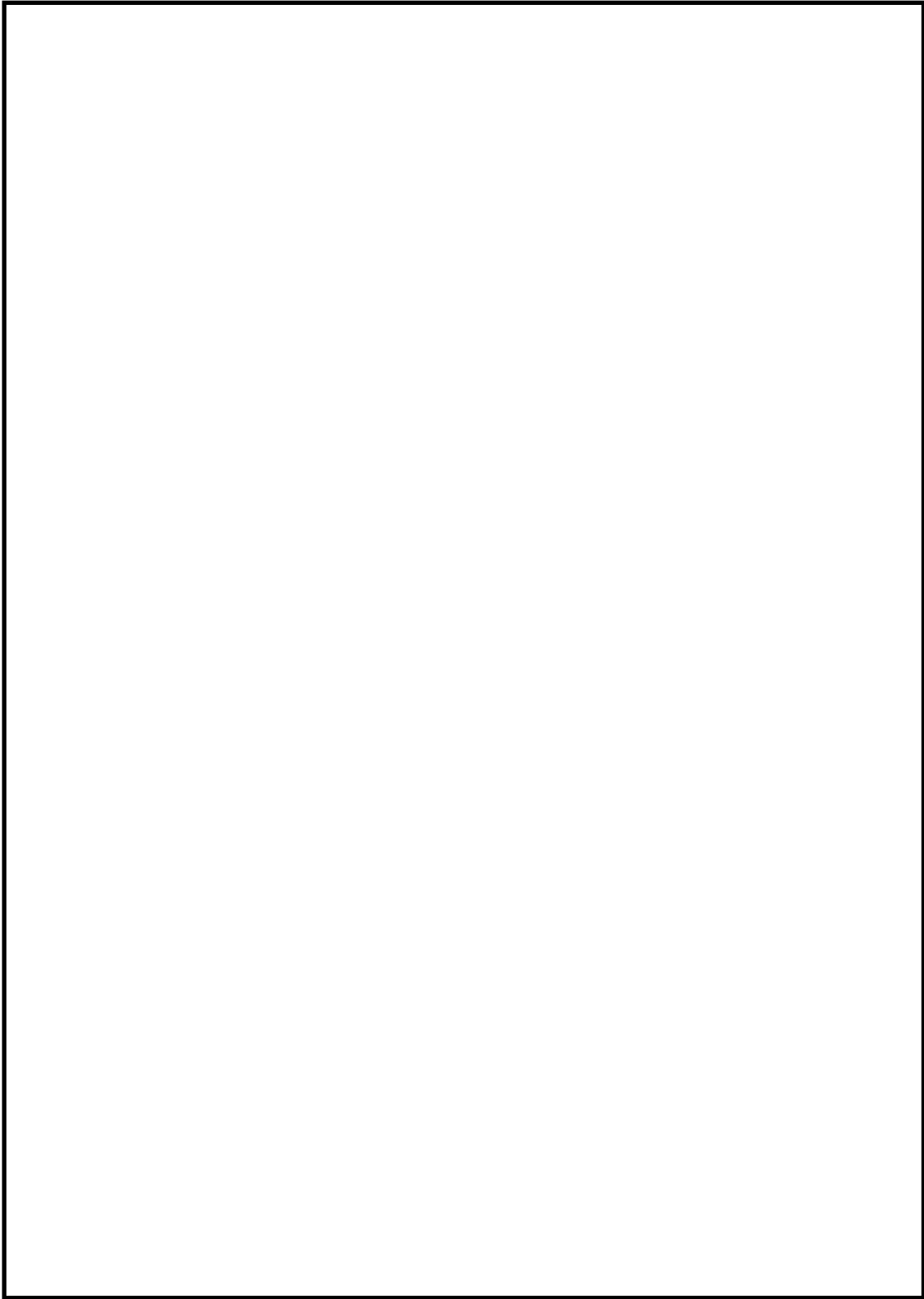


図 3-12(13) CCb の施工手順の設定（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



図 3-12(14) CCb の施工手順の設定 (「建設技術審査証明報告書」より抜粋)



#### 4. 島根 2 号機における CCb 工法の適用性の確認

##### 4.1 適用性確認フロー

CCb 工法は、「建設技術審査証明報告書」により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており、これまでに数多くの施工実績がある。

CCb 工法を島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に適用するにあたり、「建設技術審査証明報告書」、施工実績及び研究事例等から適用範囲を整理し、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等の構造形式・部材諸元、使用環境等が適用範囲に該当することを図 4-1 に示すフローにて確認する。

##### ① 適用性確認項目の抽出

後施工によるせん断補強において、せん断補強効果に影響を与えると考えられる項目を抽出する。

その際、「建設技術審査証明報告書」に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

##### ② 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用した補強仕様が CCb 工法の「建設技術審査証明報告書」において規定されている適用範囲内に収まっているか確認する。

##### ③ せん断補強効果の確認

①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について、適用性の確認を実施する。適用性確認の際は、せん断補強効果が期待できるかという点について検討する。

##### ④ CCb の施工精度に影響を与える項目の確認

CCb の施工を行う際に、施工精度に影響を与える項目がないか確認を行う。施工精度に影響を与える項目（施工上考慮すべき項目）がある場合は、施工上又は設計上どのように考慮するかを決定したうえで、必要により再設計を実施するか適宜判断を行う。

##### ⑤ 施工実績・研究事例等の確認

後施工せん断補強筋に関する施工実績・研究事例について、要旨、着目すべき事項を整理し、CCb 工法への反映事項を確認する。

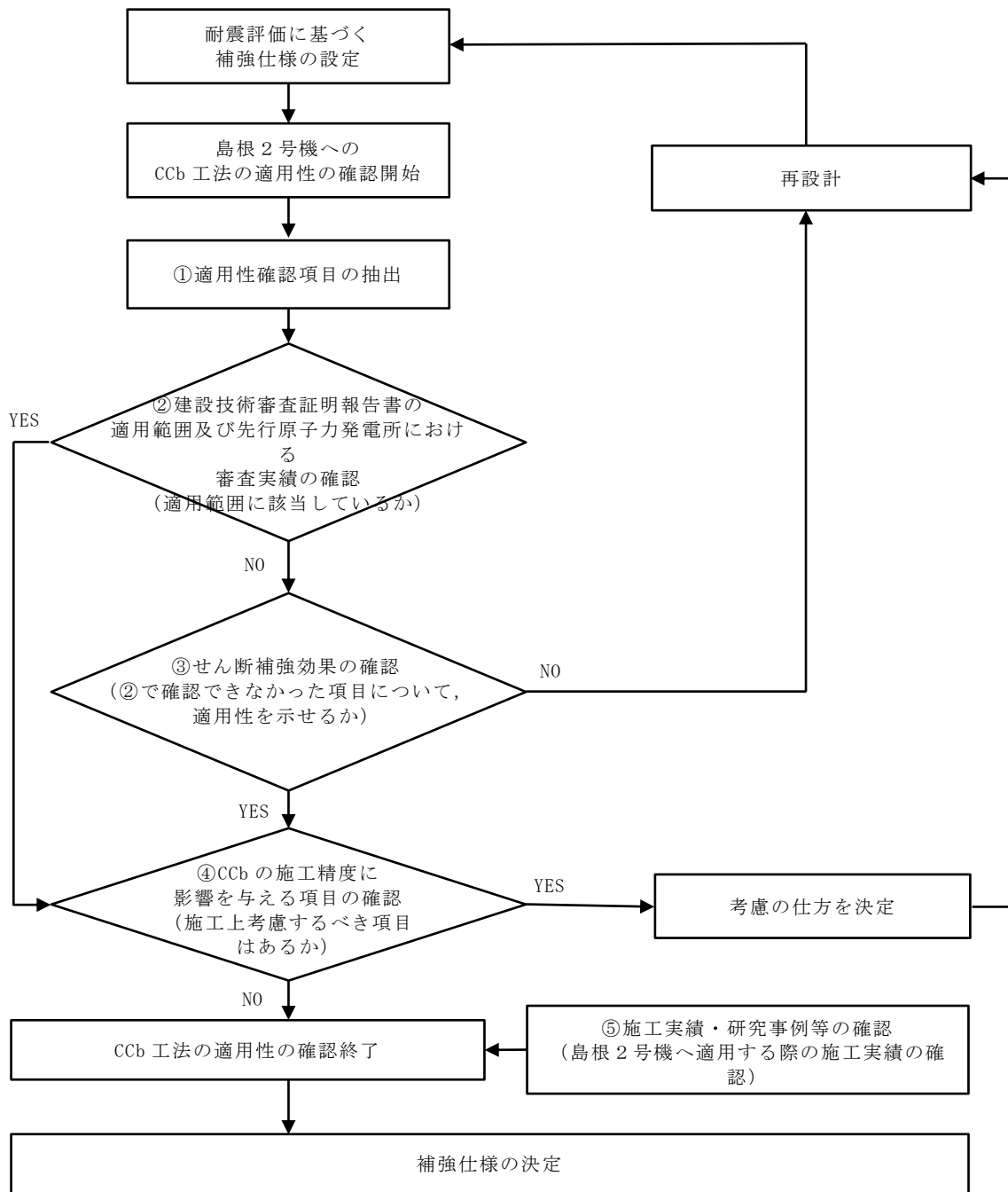


図 4-1 Ccb 工法の適用性確認フロー

#### 4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し，せん断に対する安全性を確保するように設定した結果として，屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の補強仕様を図 4-2 に示す。

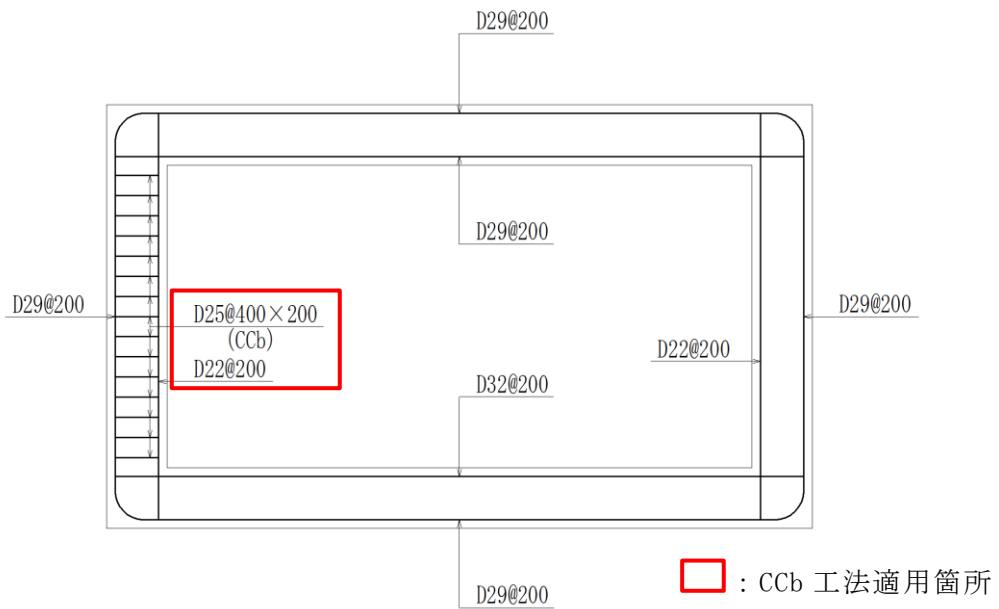


図 4-2 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の補強仕様

#### 4.3 ①適用性確認項目の抽出

CCb 工法の特徴及び島根 2 号機固有の条件等の観点から、適用性を確認するために必要な項目を抽出する。以下に項目と確認内容を示す。

##### I. 使用目的

「建設技術審査証明報告書」に明記されている目的に該当しているか。

##### II. 構造形式

「建設技術審査証明報告書」で想定している構造形式に該当しているか。

##### III. 構造細目

「建設技術審査証明報告書」で規定している構造細目に該当しているか。

##### IV. 部材諸元

「建設技術審査証明報告書」の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚か。

せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度について，「建設技術審査証明報告書」の実験で適用性が確認された範囲内であるか，又は範囲内でもせん断補強効果が期待できるか。

##### V. 載荷方法

「建設技術審査証明報告書」の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は範囲内でもせん断補強効果が期待できるか。

##### VI. 使用材料（せん断補強筋）

「建設技術審査証明報告書」で規定されている材料か。

せん断補強筋は，JIS G 3112 に準拠した熱間圧延異形棒鋼ネジテツコン（東京鐵鋼株式会社製）で，鉄筋の種類は SD295A，SD295B，SD345 とし，呼び名は D32，D29，D25，D22，D19，D16，D13 とする。

##### VII. 使用材料（セラミック製定着体）

「建設技術審査証明報告書」で規定されている材料か。

##### VIII. 使用材料（充てん材）

「建設技術審査証明報告書」で規定されている材料か。

IX. せん断補強鉄筋の定着長

「建設技術審査証明報告書」で設定している定着長を考慮して設計しているか。

X. せん断ひび割れ抑制効果の確認

「建設技術審査証明報告書」の実験にて確認していない諸元において、せん断ひび割れ抑制効果を確認できるか。

X I. ひび割れに対する定着機能の保持

CCb 工法は、従来工法（先施工）とせん断補強筋の定着機構が異なることから、せん断補強筋としての機能を発揮するために、定着体部にひび割れが生じてても、定着機能が保持されているか。

X II. 変形量

変形に伴うかぶりコンクリート部の剥落によって、CCb の定着体部の定着機能を阻害するおそれがあることから、「建設技術審査証明報告書」の実験の変形量を超えていないか。

X III. 使用環境

「建設技術審査証明報告書」で想定している使用環境において使用しているか。

#### 4.4 ②建設技術審査証明報告書の適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績の確認

CCb 工法を適用するにあたり、4.3 で抽出した項目について「建設技術審査証明報告書」から適用範囲及び先行原子力発電所における審査実績を確認する。確認結果を以下に示す。

##### 4.4.1 I. 使用目的

CCb により耐震補強を行った構造物は地中構造物であり、既設コンクリート部材に対して後施工によるせん断補強の目的で用いていることから、「建設技術審査証明報告書」に合致している。（表 4-1 参照）

表 4-1 Ccb 工法の適用範囲と使用状況  
 (「建設技術審査証明報告書」より抜粋)



建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	<p>地中構造物であり、片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>
	<p>両側からの施工が可能な既設の構造物に対して、変形性能の向上を目的としないことを前提として、後施工によるせん断補強の目的で用いる。</p>

#### 4.4.2 II. 構造形式

「建設技術審査証明報告書」に、「CCb 補強工法によれば、相次ぐ地震によりその耐震補強の必要性が高まっている原子力施設などの重要地下構造物、高速道路、鉄道及び上下水処理施設などの地下構造物、また、水門あるいは堰の門柱・堰柱など、構造上、巻立て補強が適用できない構造物の耐震性能を改善することができる」と記載されていることから、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等にも適用可能である。

#### 4.4.3 III. 構造細目

「建設技術審査証明報告書」に、以下のとおり構造細目として記載されており、「建設技術審査証明報告書」と合致している。

- ① せん断補強筋の断面積比 $\geq 0.15\%$ とする。
- ② 補強前に配置されていたせん断補強筋を含めた CCb との最大配置間隔 $\leq$  補強対象部材の有効高さの  $1/2$  かつ  $300\text{mm}$  とする。
- ③ CCb の配置は図 4-3 に示す標準配置によるものとする。
- ④ CCb の埋込側の先端は、主鉄筋の中心まで配置することを原則とする。  
ただし、孔の先端から埋込側の表面までの厚さは  $50\text{mm}$  以上とする。

②の最大配置間隔  $300\text{mm}$  は、収縮等によるひび割れの発生を防ぐための用心鉄筋としての配慮であることから、収縮が収束していると考えられる部材の補強ではこの規定を外すことができる。

島根 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており、収縮が収束していると考えられることから、この規定（最大配置間隔  $300\text{mm}$  以下）は除外することができる。

なお、CCb により耐震補強を行った構造物に対する、せん断補強鉄筋比及び最大配置間隔の適用範囲及び整理結果を表 4-2 に「(4) IV. 部材諸元, V. 載荷方法」と併せて示す。



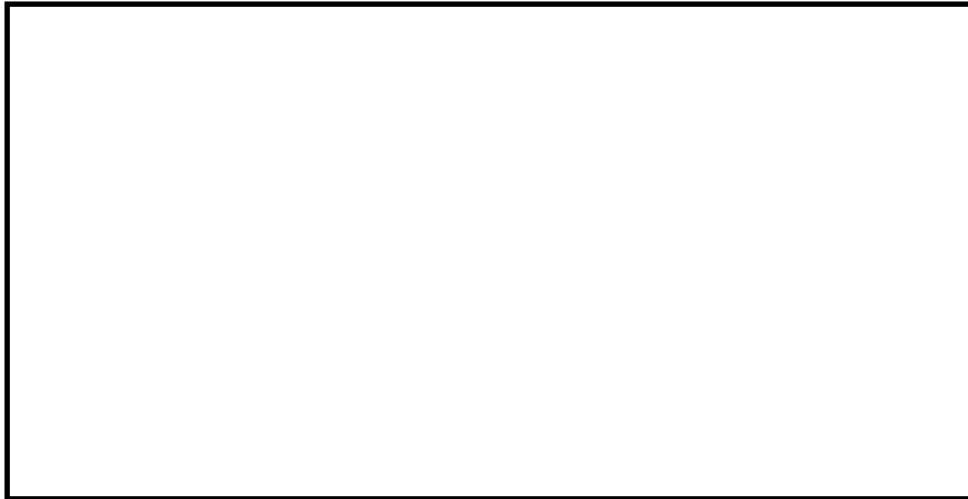


図 4-3 Ccb 標準配置（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

#### 4.4.4 IV. 部材諸元， V. 載荷方法

構造細目，部材諸元及び載荷方法について，Ccbにより耐震補強を行った構造物への適用範囲及び整理結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 に示すとおり，部材諸元については，部材厚，せん断スパン比及び主鉄筋比が，「建設技術審査証明報告書」又は「建設技術審査証明報告書」の実験から確認した範囲に合致している。せん断スパン比及び主鉄筋比は先行の審査実績において，Ccb 適用部材と同程度の部材に対する適用性が実証されている。以上より，部材諸元については適用範囲内であると考えられる。

載荷方法についても，先行の審査実績において，集中荷重及び分布荷重が作用する部材に対する適用性が実証されていること，適用部材のせん断スパン比も先行の審査実績において確認された範囲内であることから，適用範囲内であると考えられる。

表 4-2 適用範囲の整理結果

	III. 構造細目		IV. 部材諸元					V. 載荷方法
	せん断補強鉄筋比 (%)	最大配置間隔 (mm)		せん断スパン比*1	CCbの鉄筋径	CCbの鉄筋種別	主鉄筋比 (%)	
		有効高さ (mm)	有効高さ (mm)					荷重形態
建設技術審査証明書で規定されている適用範囲								
建設技術審査証明書の実験から確認した範囲								
先行原子力発電所*2における審査実績								
CCb適用部材 (屋外配管ダクト (タービン建物 ～放水槽))	0.63	200	600	5.83	D25	SD345	0.64	分布荷重
		515	800					
側壁	0.36	200	800	8.11	D19	SD345	0.79	分布荷重
頂版		715						

注記\*1: せん断スパン比 a/d (a: 支間長, d: 有効高さ)

- 4.4.5 VI～VIII. 使用材料（せん断補強筋，セラミック製定着体，充てん材）  
「建設技術審査証明報告書」に記載されている使用材料と合致している。  
（表 4-3 参照）

表 4-3 Ccb の適用条件と使用状況（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

	建設技術審査証明報告書の材料範	使用状況
せん断補強筋 （ねじ節鉄筋）		左記範囲内の材料を使用する。（D25 SD345）
セラミック定着体		左記検査を受けた材料を使用する。
充てん材		躯体コンクリート以上の強度とする。

- 4.4.6 IX. せん断補強筋の定着長  
「建設技術審査証明報告書」で設定されている定着長を考慮していることを確認している。

- 4.4.7 X. せん断ひび割れ抑制効果の確認  
島根 2 号機にて Ccb により耐震補強を行った構造物の各種諸元（部材厚，せん断スパン比，主鉄筋比，載荷方法）が「建設技術審査証明報告書」の実験又は先行の審査実績において確認された範囲内であり，せん断ひび割れ抑制効果が確認されている。

#### 4.4.8 X I. ひび割れに対する定着機能の保持

主鉄筋に SD345 を用いている島根 2 号機において Ccb により耐震補強を行った構造物については、応答値として主鉄筋のひずみが降伏ひずみ ( $1725\mu$ ) 未満又は応力が降伏強度 ( $345\text{N/mm}^2$ ) 未満であることを確認している。

#### 4.4.9 X II. 変形量

Ccb により耐震補強を行った構造物の変形量が「建設技術審査証明報告書」の実験の変形量を超えないことを確認している。

「建設技術審査証明報告書」の梁試験体における層間変形角は 1% を超える範囲まで確認されている。これを踏まえ、島根 2 号機において Ccb により耐震補強を行った構造物については、圧縮縁コンクリートひずみ 1.0% 又は層間変形角 1.0% (1/100) に、十分な余裕をもって Ccb 工法を使用している。

屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) の圧縮縁コンクリートひずみは最大でも 0.06% 程度であり、梁試験体の変形量 (1% を超える範囲まで確認) 以下に収まっていることを確認している。

#### 4.4.10 X III. 使用環境

「建設技術審査証明報告書」に、「Ccb 補強工法によれば、相次ぐ地震によりその耐震補強の必要性が高まっている原子力施設などの重要地下構造物、高速道路、鉄道及び上下水処理施設などの地下構造物、また、水門あるいは堰の門柱・堰柱など、構造上、巻立て補強が適用できない構造物の耐震性能を改善することができる」と記載されており、原子力施設などの重要地下構造物及び海水環境下よりも、より使用環境が厳しい下水処理施設を対象としていることから、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等にも適用可能である。

また、4.7 に記載のとおり、Ccb 工法については気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認されており、硫酸等の影響を受ける腐食環境下にある下水道施設での施工実績もある。

よって、海水中よりも厳しい環境下での施工実績が確認できているため、使用環境として問題がないことを確認している。

#### 4.5 ③せん断補強効果の確認

「4.3 ①適用性確認項目の抽出」で抽出した適用性確認項目に対し、「4.4 ②「建設技術審査証明報告書」の適用範囲の確認」で、島根2号機においてCCb工法を適用した部材は全項目において、適用範囲内であることを確認した。よって、「建設技術審査証明報告書」に記載のとおり、せん断補強効果が期待できると判断する。

#### 4.6 ④CCbの施工精度に影響を与える項目の確認

CCb工法によるせん断補強においては、施工精度の低下により計画どおり施工できなかった場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、施工精度に影響を与える項目を抽出し、施工精度の低下やせん断補強効果に大きな影響を与えないことを確認する。以下に、抽出した項目を示す。

- ① 削孔方法
- ② 削孔角度
- ③ 削孔位置
- ④ グラウトの充てん性

##### 4.6.1 削孔方法

CCb挿入計画位置をドリルにより削孔するが、その削孔方法としてはレッグハンマードリル又はコンクリートコアドリルの使用が主となっている。コンクリートコアドリルは設置面に強固に固定でき、掘削方向と掘削深さを精度良く確保することが容易であることから、原子力発電所施設では主にコンクリートコアドリルでの削孔を採用している。

なお、削孔においては表4-5のとおり、施工精度を確保するために管理基準を設けている。

表4-5 削孔に関する品質管理基準

管理項目	管理内容	規格値	管理頻度
一般部の削孔長 拡幅部の削孔長	メジャーによる計測	0mm ≤ 設計値 ≤ 20mm かつ、削孔先端から埋込側表面までの厚さ 50mm 以上	全数
一般部の削孔径 拡幅部の削孔径	ノギスによる計測	設計削孔径以上	

#### 4.6.2 削孔角度

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、CCb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そのためコンクリートコアドリルを専用架台に設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるよう水平器、金尺等で確認し削孔することにより、削孔角度のばらつきが生じる可能性を低減させる。

また、「建設技術審査証明報告書 技術名称 あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」（建技審証第 1203 号）」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している(図 4-5 参照)。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では、幅 1200mm×高さ 600mm×長さ 1200mm のコンクリートブロック 4 体を削孔し、削孔位置のずれを確認している。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を、表 4-6 に示す。削孔角度誤差を換算すると、長さ 1200mm, 2400mm は  $0.72^\circ$  , 長さ 3600mm で  $0.66^\circ$  となり、コアドリルによる長尺削孔は十分精度があることが示されている。



図 4-5 試験概要図

表 4-6 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果

--

### 4.6.3 削孔位置

CCb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず CCb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は、付近を再削孔し CCb を挿入することで設計上必要な鉄筋量を確保する。再削孔し CCb を配置する際は、4.4 に示す記載事項を満足するものとする。なお、図 4-6 に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり、再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし、せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。再削孔の際、新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性があることから、孔を隣接させて削孔することが可能なコンクリートコアドリルを使用し、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置に変更が生じても必要鉄筋量を確保できるためせん断補強効果に影響を及ぼさない。

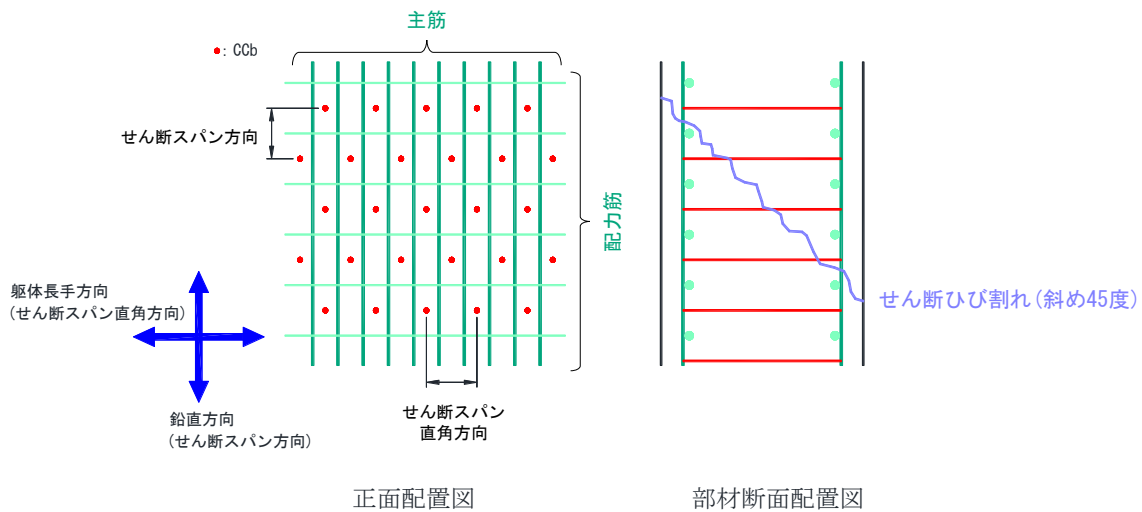


図 4-6 せん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

#### 4.6.4 グラウトの充てん性

グラウトの充てん性については、グラウト充てん性確認実験により、削孔内に設置したCCbの先端定着部までグラウトが密実に充てんされ、CCbとコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。以下に、「建設技術審査証明報告書」に記載されているグラウト充てん性確認実験の内容を示す。

グラウト充てん性確認実験は、①先充てん工法（横向き）、②先充てん工法（下向き）、③先充てん工法（上向き）、④後充てん工法（上向き）にて実施されている（図4-7参照）。

なお、グラウト充てんでは残留エアが施工品質に影響を与えることから、高流動グラウトを使用する横向き施工においては、残留エアの有無をかき出しにより確認しており、残留エアが無いことを全数確認している。

##### ① 先充てん工法（横向き）



図4-7(1) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



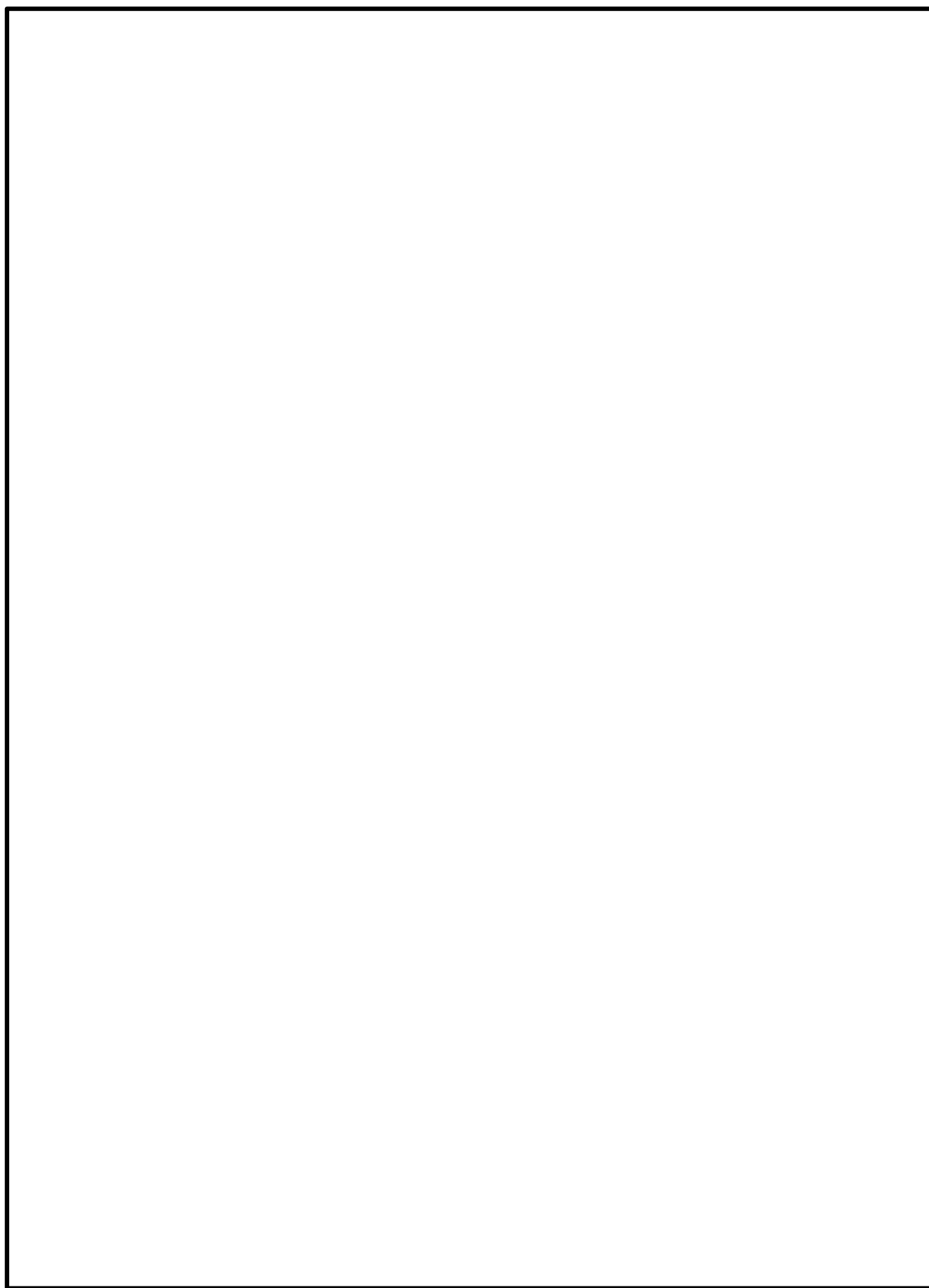


図 4-7(2) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

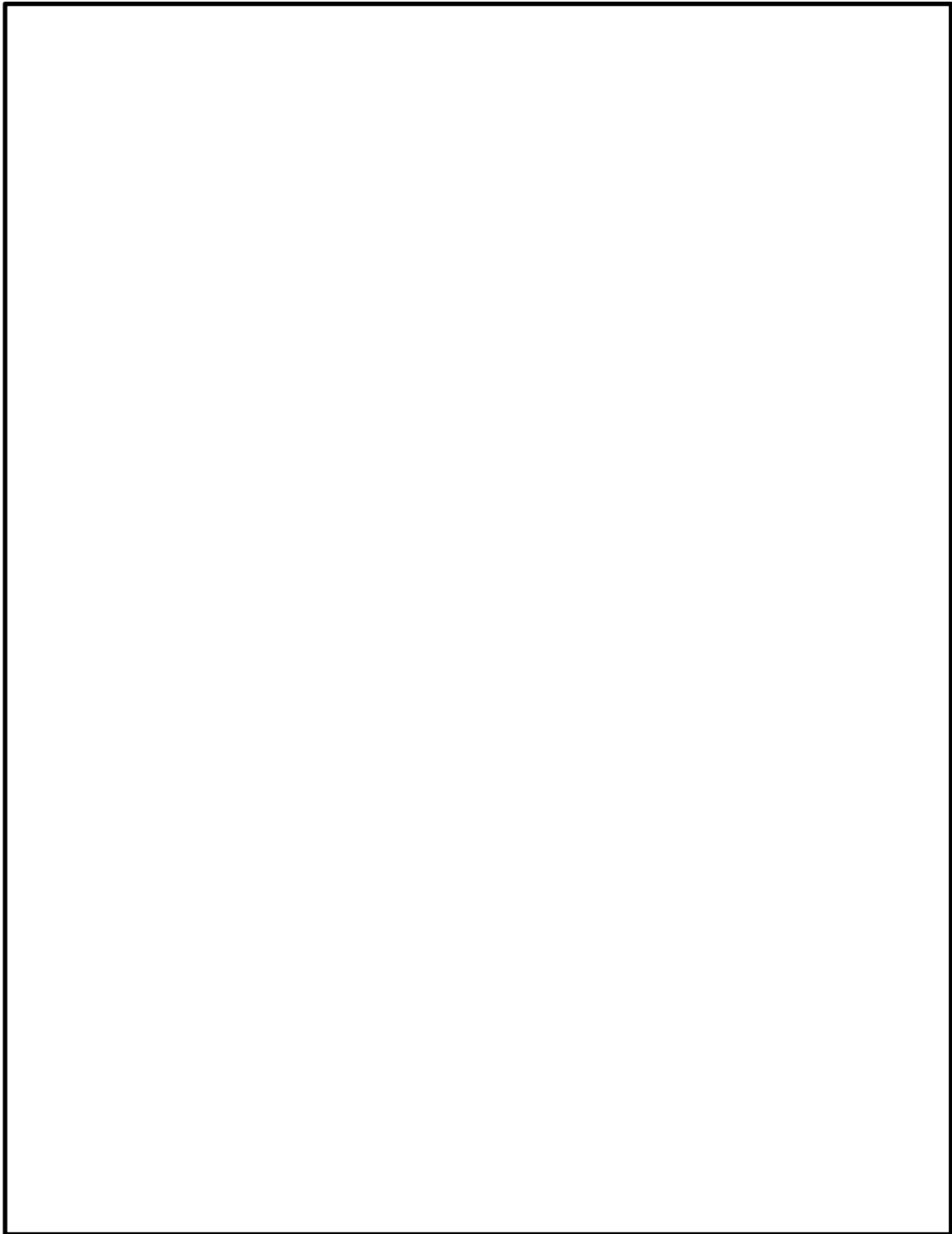


図 4-7(3) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

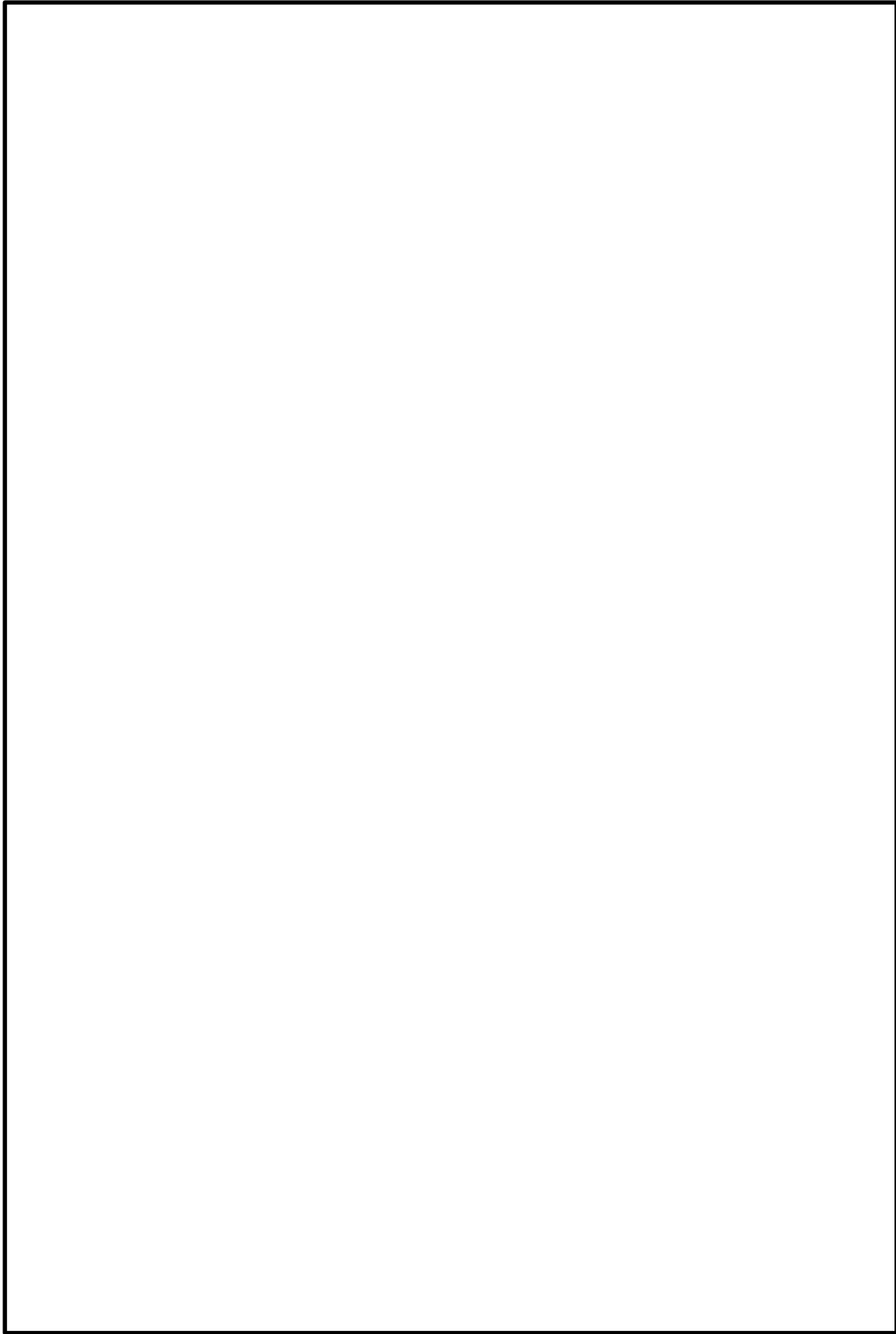


図 4-7(4) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

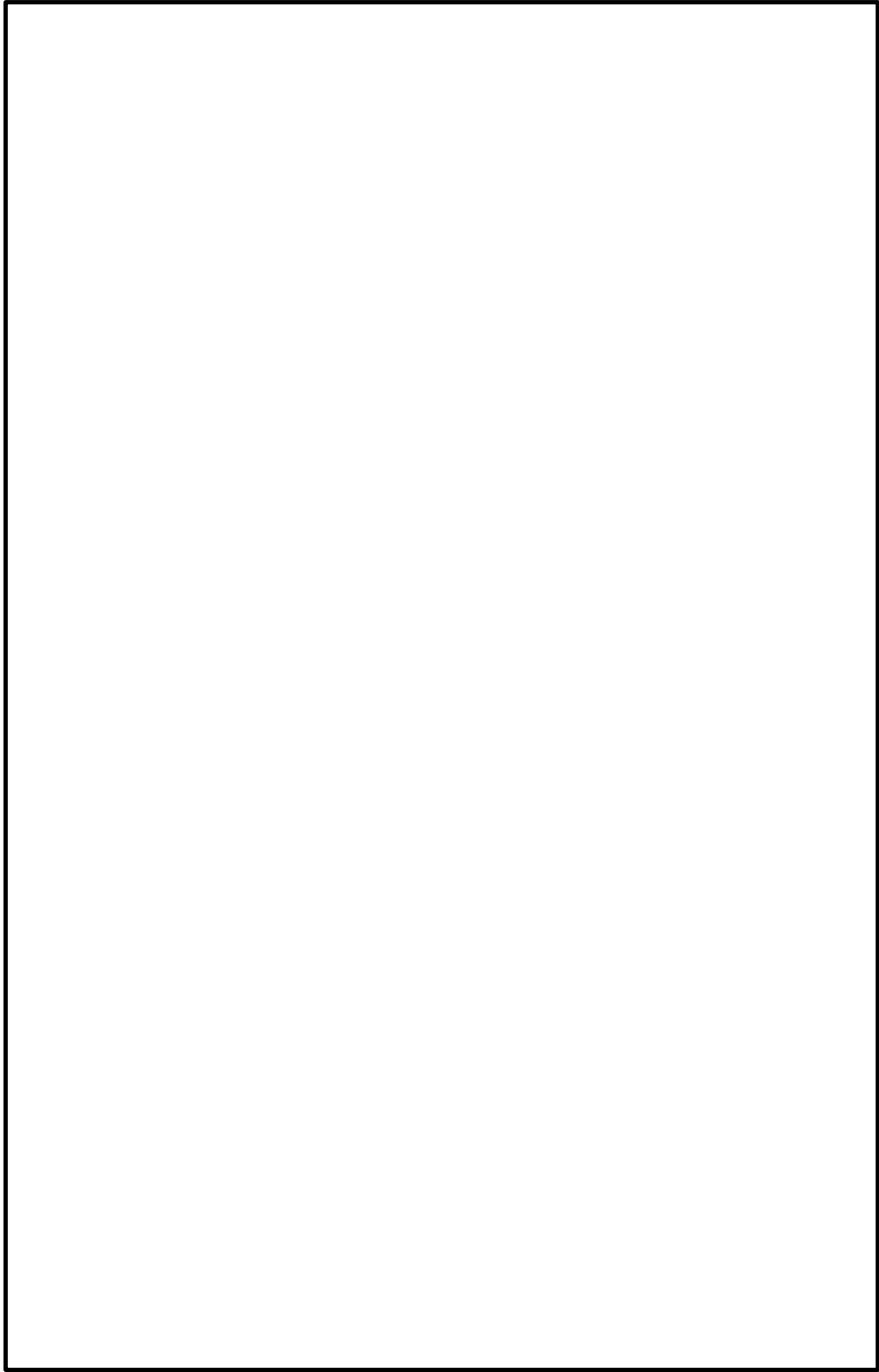


図 4-7(5) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

② 先充てん工法（下向き）

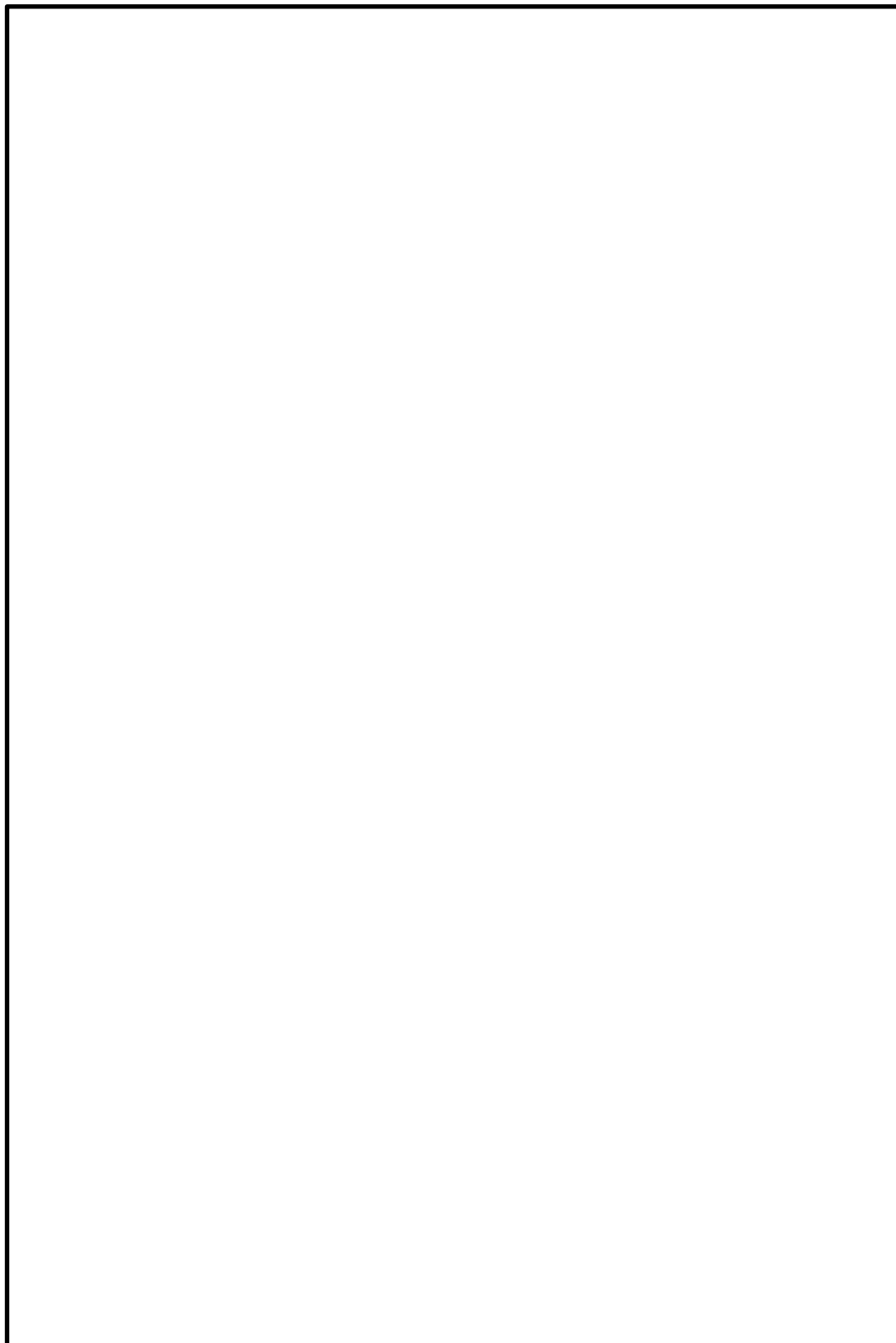


図 4-7(6) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

③ 先充てん工法（上向き）

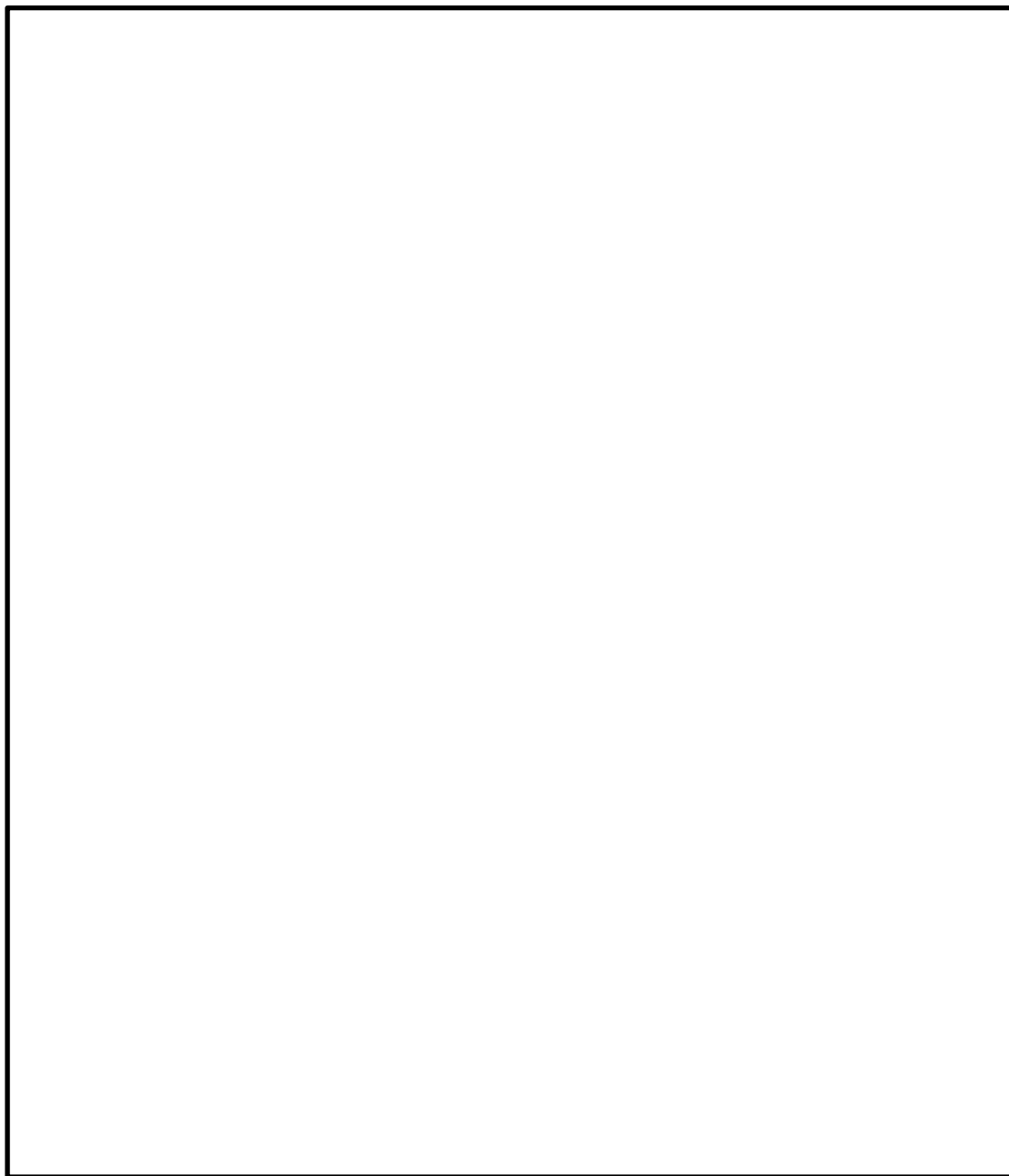


図 4-7(7) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

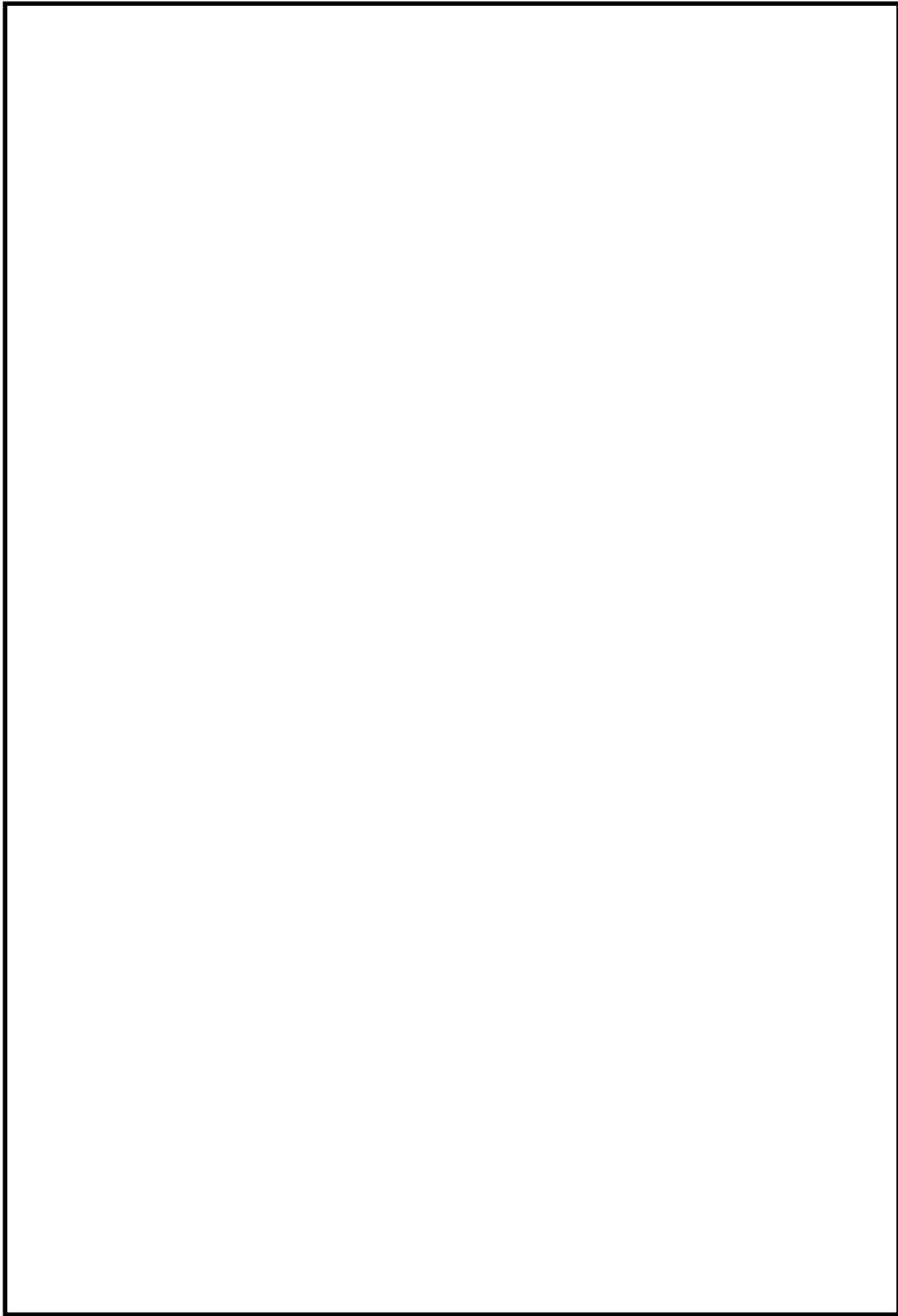


図 4-7(8) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

④ 後充てん工法（上向き）



図 4-7(9) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）



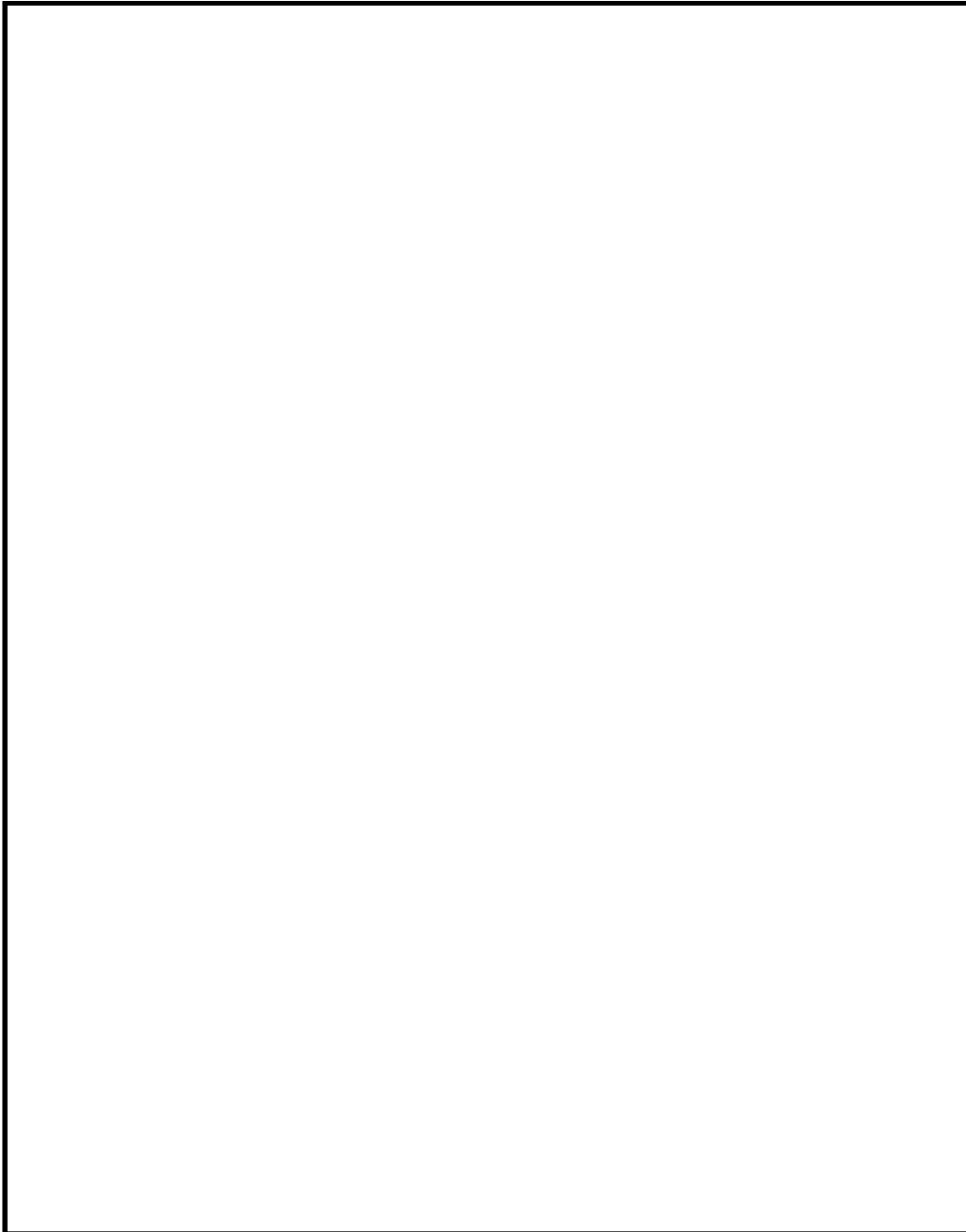


図 4-7(10) グラウトの充てん性確認実験（「建設技術審査証明報告書」より抜粋）

4.6.1～4.6.4 に示すとおり，施工上の配慮により，せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工精度の低下が生じる可能性は低いことが確認できる。

しかし，現時点では後施工による施工精度に対して，施工実績に基づく十分な統計がとれていないため，施工精度の低下による影響が生じる可能性を否定することはできない。

以上を踏まえて，適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工精度の低下への設計上の配慮として，耐震評価上の裕度（例えば照査値を 8 割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

#### 4.7 ⑤施工実績・研究事例等の確認

CCbの施工実績及び後施工せん断補強に関する研究事例を踏まえ、CCb工法及び施工への反映事項を確認する。

##### 4.7.1 施工実績の整理

CCbの施工実績は、表4-7に示すように2017年9月30日までに、道路・地下街、浄化センター、浄水場、水門、排水機場、排水路、発電所・プラントなど、施工中案件を含め174件の工事に適用され、37.6万本以上が施工されている。

表4-7 CCbの施工実績（2017年9月30日現在）

対象施設		施工件数
道路・地下街	道路橋他	
浄化センター	最終沈澱池，ポンプ室他	
浄水場	配水池他	
水門	防潮水門他	
排水機場	排水機場他	
排水路	地下排水路	
発電所・プラント	貯水池・水路他	
ダム	ダム	
空港	空港	
護岸	防潮堤他	
栈橋	栈橋	

施工中案件を含む 合計：174件 376,000本以上

CCbの施工実績を部材厚、鉄筋径及び使用環境ごとに整理する。部材厚ごとに整理した結果を表4-8に、鉄筋径ごとに整理した結果を表4-9に、使用環境（気中又は水中）ごとに整理した結果を表4-10に示す。なお、カウントする際は、1件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には、各項目でそれぞれカウントしている（例：同一工事内でD13、D16、D19の鉄筋を用いている場合はD13、D16、D19のすべてにカウント）。

表 4-8(1) Ccb の施工実績 (部材厚) \*

部材厚 (mm)	件数
～500	78
501～1000	126
1001～1500	77
1501～2000	39
2001～3000	10
3001～	7

注記\* : ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-8(2) Ccb の施工実績 (部材厚) \*

(上記実績のうち横向き施工)

部材厚 (mm)	件数
～500	53
501～1000	87
1001～1500	47
1501～2000	17
2001～3000	5
3001～	2

注記\* : ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-8(3) Ccb の施工実績 (部材厚) \*

(上記実績のうち下向き施工)

部材厚 (mm)	件数
～500	35
501～1000	61
1001～1500	48
1501～2000	29
2001～3000	6
3001～	5

表 4-8(4) Ccb の施工実績（部材厚）\*

（上記実績のうち上向き施工）

部材厚 (mm)	件数
～500	6
501～1000	22
1001～1500	14
1501～2000	0
2001～3000	0
3001～	0

表 4-9 Ccb の施工実績（鉄筋の種類）\*

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	42
	D16	71
	D19	82
	D22	80
	D25	61
	D29	30
	D32	33

注記\*：ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

表 4-10 Ccb の施工実績（使用環境）\*

施工場所	件数
気中	12
水中	162

注記\*：ハッチング箇所は、島根 2 号機の屋外重要土木構造物等に採用している項目を示す。

#### 4.7.2 過去の地震の経験事例

CCbにより耐震補強を行った構造物は、過去に多くの地震を受けている（表4-11）。その中には、震度5強の地震を受けた事例もあり、CCb工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では被害・不具合が発生したという報告はない。

表4-11 震度4以上の地震を受けた構造物

--

#### 4.7.3 レベル2地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて、レベル2地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法 RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている\*。本事例においては、広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため、耐震性能照査を行った結果、せん断耐力が不足していることが判明したことによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に 20m 弱の盛土をおこなった構造物である。詳細については、4.7.5④に記載する。

注記\*：参考文献

後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について（岡崎大宜）

#### 4.7.4 後施工せん断補強工法の比較

CCb 工法以外にも土木研究センターにおいては、類似する後施工せん断補強工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強工法の比較結果を、表 4-12 に示す。工法に差異はあるものの、コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また、せん断耐力の算出方法については、工法により多少の差異は存在するものの、おおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

表 4-12(1) 後施工せん断補強工法の比較

--

表 4-12(2) 後施工せん断補強工法の比較

--

注：土木研究センター建設技術審査証明関係資料に基づき作成



#### 4.7.5 後施工せん断補強筋に関する研究事例

後施工せん断補強工法に関する研究事例や施工実績に関する文献から着目すべき事項を整理し、島根2号機におけるCCb工法への反映事項を確認する。

##### ① コンクリート構造物の後施工せん断補強技術

###### ◆ 文献の要旨

既存のコンクリート構造物の耐震補強技術のうち、カルバートや地下貯水槽の壁（地下壁構造）に用いられるせん断補強（後施工せん断補強）技術について述べられたものである。

###### ◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の定着性能の確認試験として、鉄筋の引抜き試験が例示されている。
- ・ 標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されている。
- ・ 後施工せん断補強効果の確認試験として、梁試験体の正負交番載荷試験が例示されている。
- ・ 「マルチプルナット」、「セラミックキャップバー（CCb）」、「Post-Head-bar（PHb）」の「建設技術審査証明報告書」を参考文献としている。

###### ◆ 島根2号機におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 後施工せん断補強技術が地下壁構造に対して効果的であることを確認した。
- ・ CCb工法の「建設技術審査証明報告書」には、本文献と同様の引抜き試験、梁試験体の正負交番載荷試験が実施され、それら試験結果に基づいた有効係数による評価手法が明記されていることを確認した。

## ② 耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

### ◆ 文献の要旨

既設の地中構造物を後施工によりせん断補強する工法として RMA 工法が報告されている。

### ◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、引抜き試験による定着性能の確認、梁試験体の正負交番載荷によるせん断補強効果の確認を実施している。
- ・ 後施工せん断補強において、せん断補強筋の定着長を考慮した有効係数によるせん断補強効果の評価手法が示されている。なお、この評価手法は参考文献として示されている「アルカリ骨材反応対策小委員会報告書」（土木学会，2005）に準じている。
- ・ RMA 工法により補強が実施された構造物は、東日本大地震においても損傷がなかったことが報告されている。

### ◆ 島根 2 号機における Ccb 工法への反映事項の確認

- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と同様の性能確認試験を Ccb 工法でも実施していることを確認した。
- ・ 本文献の工法（RMA 工法）と Ccb 工法とでは、定着方法の差異により定着長が異なるが、有効係数の算出方法は同様であり、Ccb 工法の「建設技術審査証明報告書」に示される有効係数の算出方法が一般的であることを確認した。
- ・ Ccb により耐震補強を行った構造物において、現時点で地震による被害不具合が発生していないことを確認した。

③ 論文 異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

◆ 文献の要旨

既存のボックスカルバート等の連続壁に異形鉄筋を埋込みせん断補強を行う方法に対し、その有効性を確認するために梁供試体を用いたせん断試験が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 後施工せん断補強した供試体のせん断耐力を実験で確認した結果、先施工として算出したせん断耐力（設計値）とほぼ同等のせん断耐力が得られている（実験値/設計値=0.93～1.12）。
  - ・ 後施工によりせん断補強した供試体のせん断耐力は、先施工した供試体のせん断耐力と同等のせん断耐力を有している（後施工/先施工=0.85～1.07）。
- ◆ 島根2号機におけるCCb工法への反映事項の確認
- ・ 先施工のせん断補強に対するCCb工法の有効係数は、建設技術証明報告書に記載されている梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

④ 後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

◆ 文献の要旨

広島空港の滑走路及び誘導路直下の地下構造物（用倉トンネル）が、レベル2地震動に対する耐震性能照査においてせん断耐力が不足していることが確認された。用倉トンネル（アーチカルバート）に対し耐震補強工法の選定・検討を実施し、RMA工法による後施工せん断補強が行われている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 重要施設である空港滑走路及び誘導路直下の地下構造物（アーチカルバート）に対して、後施工型せん断補強工法（RMA工法）による耐震補強が実施されている。
- ・ アーチカルバートの補強には、増厚工法，後施工せん断補強工法（鉄筋差込工法），接着工法，巻立て工法の中から，施工後においても現況の内空断面を確保でき，坑内からの施工も可能である後施工せん断補強工法が選定されている。
- ・ 補強対象のアーチカルバートの部材厚は1600mmである。

◆ 島根2号機におけるCCb工法への反映事項の確認

- ・ 地下構造物の補強工法として，後施工せん断補強工法が効果的であることを確認した。
- ・ 島根2号機においてCCbにより耐震補強を行った部材と同程度又はそれ以上の部材厚に対して後施工せん断補強工法の施工実績があることを確認した。

## ⑤ 地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

### ◆ 文献の要旨

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い、先施工せん断補強と後施工せん断補強との耐力比較及び後施工せん断補強筋の埋込長の違いによる耐力比較が行われている。

### ◆ 着目すべき事項

- ・ せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定については、新設構造物を対象とした乾燥収縮等によるひび割れを防ぐためのものであることから考慮せず、有効高さの 1/2 としている。
- ・ 先端を 45 度にカットした後施工によるせん断補強の場合、先施工の設計耐力に対して最低でも 80% 程度のせん断耐力が実験で得られている。

### ◆ 島根 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ 島根 2 号機において CCb により耐震補強を行った構造物は建設後 20 年以上経過しており乾燥収縮は終了していることから、せん断補強筋のピッチ 300mm 以下の規定は除外した。
- ・ 先施工のせん断補強に対する CCb 工法の有効係数は、「建設技術審査証明報告書」に記載される梁の交番載荷試験により妥当性が確認された有効係数としていることを確認した。

⑥ 地下道における PHb(ポストヘッドバー)工法の採用と積雪寒冷地の施工について

◆ 文献の要旨

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 充てん材の温度と強度の関係を把握するための試験施工が実施されており、充てん材料が 0℃以下の履歴を受けた場合、強度発現が低下することが確認されている。

◆ 島根 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法においては充てん材料が 0℃以下とならないように、施工上の管理基準（5℃以上）を設けて適切な施工管理を実施した。

⑦ せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

◆ 文献の要旨

東京都港湾局が後施工せん断補強工法における補強効果確認のために行った室内せん断実験の概要，その実験結果の設計への反映，実施工への適用及びその施工結果についての考察が報告されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ 施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じている。

◆ 島根 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法は第三者機関による審査証明が行われており，その中で施工の確実性についても審査対象となっていることから，本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はない。なお，4.6 にて施工精度の向上に向けた方策を記載している。

⑧ セラミック定着型せん断補強鉄筋（CCb 工法）による既設地下コンクリート構造物の耐震補強

第 57 回 電力土木講習会テキスト 平成 27 年 2 月

一般社団法人 電力土木技術協会

◆ 文献の要旨

CCb 工法の設計法および施工法の概要と、電力分野での実績を含む施行実績が紹介されている。

◆ 着目すべき事項

- ・ CCb 工法の施工実績は、下水道処理場のポンプ棟、分水槽、重力濃縮槽、汚泥処理槽、ポンプ室及び放流渠等が多い。
- ・ CCb 工法の定着体は、アンカーやインサートにも広く用いられている高い耐食性を有する高純度アルミナ系セラミックス製であるため、塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境（海水に接する発電所の取・放水路や腐食環境にある下水道施設）においても、耐久性を確保できる。

◆ 島根 2 号機における CCb 工法への反映事項の確認

- ・ CCb 工法が様々な施設で施工実績があることを確認した。
- ・ 塩害や硫酸などの影響を受ける厳しい環境下においても CCb 工法が使用されていることを確認した。



後施工せん断補強筋に関する施工実績及び各研究事例を踏まえて、設計及び施工へ反映している事項を以下に示す。

- ・ 硫酸等の影響を受ける腐食環境下である浄化センター（下水道処理施設）での実績もあり、島根2号機で採用する環境よりも厳しい環境下での施工実績を確認した。
- ・ 後施工せん断補強筋の性能確認実験として、定着性能の確認、梁試験体の正負交番载荷によるせん断補強効果の確認を実施しており、CCb工法においても同様の確認を行っている。
- ・ 標準フックのせん断補強筋（先施工）が負担できるせん断力に対する、後施工せん断補強筋が負担できるせん断力の割合である有効係数を用いて評価する手法が例示されており、CCb工法においても同様の評価手法であることを確認した。

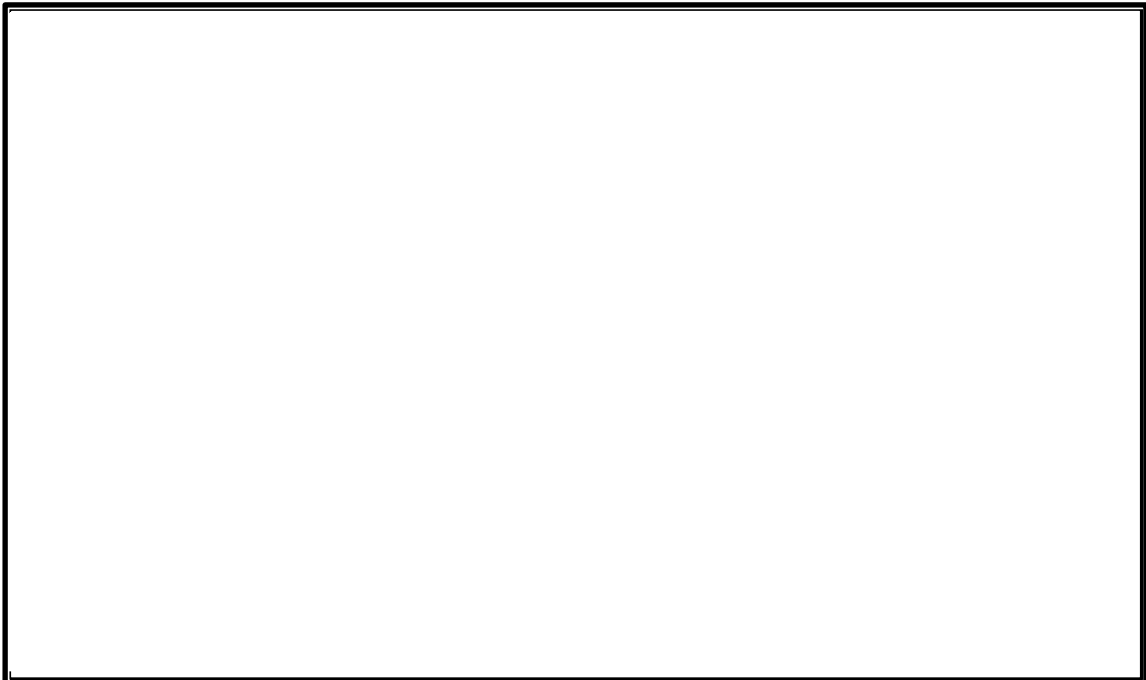
#### 4.8 島根 2 号機における Ccb 工法の保守性と設計上の制限の整理

島根 2 号機において、Ccb により耐震補強を行うにあたっての保守性と設計上の制限について整理する。

##### 4.8.1 Ccb 工法の保守性

設計において Ccb が負担するせん断耐力を算出する際に乗じる有効係数  $\beta_{aw}$  (Ccb のせん断耐力の補強効果を示す有効係数) は、「建設技術審査証明報告書」において、表 4-13 のとおり試験結果に対して保守的に小さい値を設定しており、せん断耐力を安全側に評価している。

表 4-13 有効係数  $\beta_{aw}$  の保守性



##### 4.8.2 島根 2 号機において Ccb により耐震補強を行うにあたっての保守性

設計において Ccb が負担するせん断耐力は、棒部材式により算出されるせん断耐力よりもディープビーム式により算出されるせん断耐力の方が大きくなるが、保守的に棒部材式により算出されるせん断耐力により部材の照査を行うことで、本来必要と考えられるせん断補強筋量以上のせん断補強筋を配置している。

#### 4.8.3 島根2号機においてCCbにより耐震補強を行うにあたっての設計上の制限

島根2号機ではSD345の鉄筋を使用していることから、面内せん断力と面外力の合力による鉄筋のひずみが $1725\mu$ 以下（応力が降伏強度以下）、もしくは面内せん断力に対して、コンクリートのみで抵抗可能な部材を対象におおむね弾性範囲となる状況下でCCb工法を使用する。

また、かぶりコンクリートの剥落によってCCbの定着機能を阻害するおそれがあることから、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態である圧縮縁コンクリートひずみ1.0%又は層間変形角1%（1/100）に、十分な余裕をもってCCb工法を使用する。なお、当使用制限は一般に上記に示す鉄筋のひずみに対する制限により満足される。

CCbの施工において、施工精度の低下が生じる可能性は低いが完全に否定できるものではないこと等から、設計上の配慮として耐震評価上の裕度（せん断破壊に対する照査値をおおむね0.8程度に抑える）を持たせた設計を行う。

#### 4.8.4 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

4.8.1～4.8.3 に示す，島根 2 号機において Ccb により耐震補強を行うにあたっての保守性及び設計上の制限を考慮した設計検討フローを図 4-8 に示す。

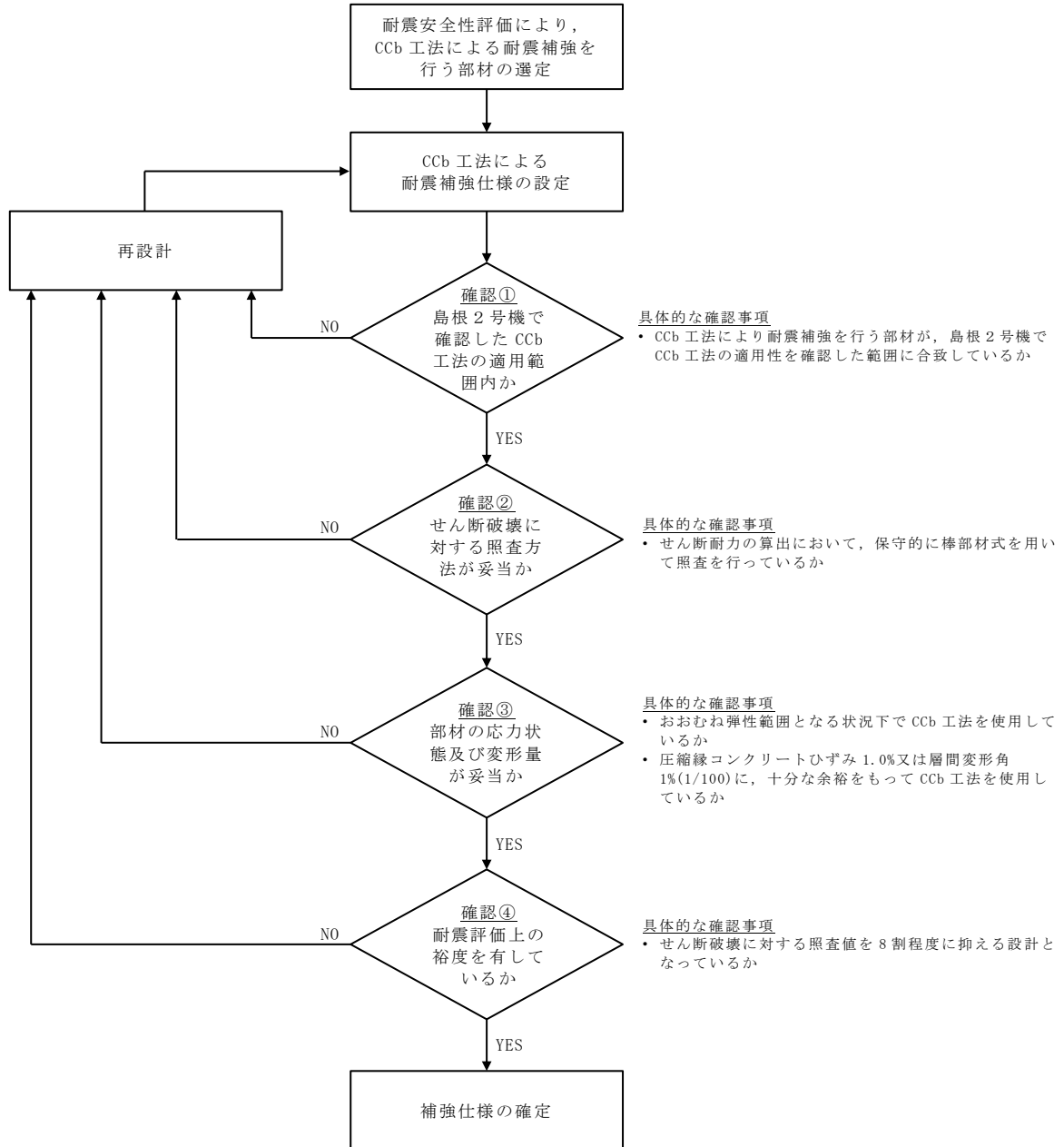


図 4-8 Ccb 工法によるせん断補強の設計検討フロー

#### 4.9 Ccb の適用性確認結果

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の補強仕様について、4.1 に従い Ccb 工法の適用性を検討した結果、「建設技術審査証明報告書」に記載のとおり、せん断補強効果が期待できることを確認した。

建設技術審査証明書



## 建設技術審査証明書

建設審証第 0811 号

**技術名称** 後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋  
「セラミックキャップバー (CCb)」

(開発の趣旨)  
両端に耐久性が高いセラミック定着体を設置したねじ筋鉄筋を用いることにより、補強材もコンクリート表面に近くなる定着体の耐久性を確保しつつ、高い効率でせん断耐力、じん性の向上を図ることができる後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー (CCb)」を提供する。

(開発の目標)  
後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー (CCb)」の開発目標を以下に示す。

- (1) 定着性能  
規格降伏強度相当の定着力を確保するために必要な「セラミックキャップバー (CCb)」の先端型定着体の定着長が5D (D: 鉄筋の直径) であること。後端型定着体については、定着体単体で規格降伏強度相当以上の定着力を確保できること。
- (2) 配置後のせん断耐力  
「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の負担分を、通常の方法でせん断補強した部材のせん断補強鉄筋によるせん断耐力寄与分に、適用部材の主鉄筋の間隔および「セラミックキャップバー (CCb)」の各定着体を用いた場合の定着長から評価される有効率を乗じたものとして評価できること。
- (3) 配置後のじん性  
「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した RC 部材において、先端型定着体が圧縮となる場合は、拘束効果を無視した終局変位の計算値より大きな変形性能が確保されること。また、後端型定着体が圧縮となる場合は、通常の方法でせん断補強した RC 壁と同等以上の変形性能が確保されること。
- (4) 施工の確実性  
背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない RC 部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できること。両側からの施工が可能な RC 部材に対し、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、両端に後端型定着体を設置する施工が確実に行えること。
- (5) 施工の容易性  
狭い空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できること。  
挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭い空間での施工においても、カブラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できること。

一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明事業実施要領に基づき、依頼のあった標記の技術について下記のとおり証明する。

2009年2月3日		2010年5月17日	内容変更	2019年2月3日	更新
2012年2月6日	内容変更	2013年3月18日	内容変更		
2013年9月30日	内容変更	2014年2月3日	更新		
2014年8月25日	内容変更	2018年1月16日	内容変更		

建設技術審査証明事業実施機関

一般財団法人  土木研究センター

理事長  常田 賢一

記

1. 審査証明の結果  
上記の開発の趣旨、開発の目標に照らして審査した結果、「セラミックキャップバー (CCb)」は以下の性能を有することが確認された。  
(1) 定着性能  
引抜き試験によれば、規格降伏強度相当の定着力を確保するために必要な「セラミックキャップバー (CCb)」の先端型定着体の定着長が5D (D: 鉄筋の直径) であること、並びに、後端型定着体については、定着体単体で規格降伏強度相当以上の定着力を確保できることが確認された。  
(2) 配置後のせん断耐力  
せん断破壊モードの梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験によれば、「セラミックキャップバー (CCb)」によるせん断耐力の負担分は、通常の方法でせん断補強した部材のせん断補強鉄筋によるせん断耐力寄与分に、適用部材の主鉄筋の間隔、および「セラミックキャップバー (CCb)」の各定着体を用いた場合の定着長から評価される有効率を乗じたものとして評価できることが確認された。  
(3) 配置後のじん性  
曲げ破壊モードの RC 壁柱試験体の正負交番繰返し静的加力試験によれば、「セラミックキャップバー (CCb)」で後施工補強した RC 部材において、先端型定着体が圧縮となる場合は、拘束効果を無視した終局変位の計算値より大きな変形性能が確保されること、また、後端型定着体が圧縮となる場合は、通常の方法でせん断補強した RC 壁と同等以上の変形性能が確保されることが確認された。  
(4) 施工の確実性  
施工試験等によれば、背面に地盤などがあり、片側からしか施工できない RC 部材に対して、補強後の掘削孔内にエア抜き用ホースを残置せずにせん断補強できることが確認された。  
両側からの施工が可能な RC 部材に対し、片方のセラミック定着体をグラウト中で接合することで、両端に後端型定着体を設置する施工が確実に行えることが確認された。  
(5) 施工の容易性  
典型的な補強工事のケーススタディの照査によれば、狭い空間や複雑な部位において、大型機材を用いずに容易に施工でき、安定した品質を確保できることが確認された。  
挿入する「セラミックキャップバー (CCb)」の長さを確保できないような狭い空間での施工においても、カブラーによる機械式継手を用いて、安定した品質の作業を容易に施工できることが確認された。
2. 審査証明の前提  
(1) 本審査証明は、依頼者からの試験データ等の資料を基に審査し、確認したものである。  
(2) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、所定の材料を用いて、適正な品質管理のもとで製造されるものとする。  
(3) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な補強設計によって計画されるものとする。  
(4) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な機材および施工手順によって設置されるものとする。  
(5) 「セラミックキャップバー (CCb)」は、適正な管理のもとで施工されるものとする。
3. 審査証明の範囲  
(1) 本審査証明は、主に地盤時の応答変位量が限定される地中構造物であって、施工が片側からしか実施できない現状の既設鉄筋コンクリート構造物に対し、鉄筋の両端部に先端型定着体を、芯径個に後端型定着体を設置した標準型、または、鉄筋の両端部に先端型定着体を設置した両端先端型の「セラミックキャップバー (CCb)」により、後施工によるせん断補強の目的で用いる。ただし、両側からの施工が可能な既設の構造物に対しては、変形性能の向上を目的とし、両端からの施工を前提として、鉄筋の両端に後端型定着体を設置した両端後端型の「セラミックキャップバー (CCb)」を後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。  
(2) 使用するグラウトは、高流動グラウトまたは可塑性グラウト (後添加タイプまたはプレミックスタイプ) とする。  
(3) 使用する鉄筋は、JIS G 3112 に適合するネジテッコン (東京鉄鋼製ねじ筋鉄筋) とし、鉄筋の種類は SD295A、SD295B、SD345、呼び名は D13 ~ D32 とする。  
(4) 適用可能な構造物の部材厚は、横向き施工で 7m 以下、下向き施工で 5m 以下、上向き施工で 4m 以下とする。
4. 審査証明の詳細 建設技術審査証明報告書
5. 審査証明の有効期限 2024年2月2日
6. 審査証明の依頼者 鹿島建設株式会社 カジマ・リノベイト株式会社  
所在地: 東京都港区元赤坂 1-3-1 所在地: 東京都新宿区住吉町 1-20

参考資料 13 屋外重要土木構造物設置位置における地盤の振動特性

1. 概要

本資料は、図 1-1 に示す屋外重要土木構造物が設置される地盤の振動特性について、取水槽の海水ポンプエリアを代表断面として、地盤の最大加速度分布図、最大変位分布図及び最大せん断ひずみ分布図を示すものである。

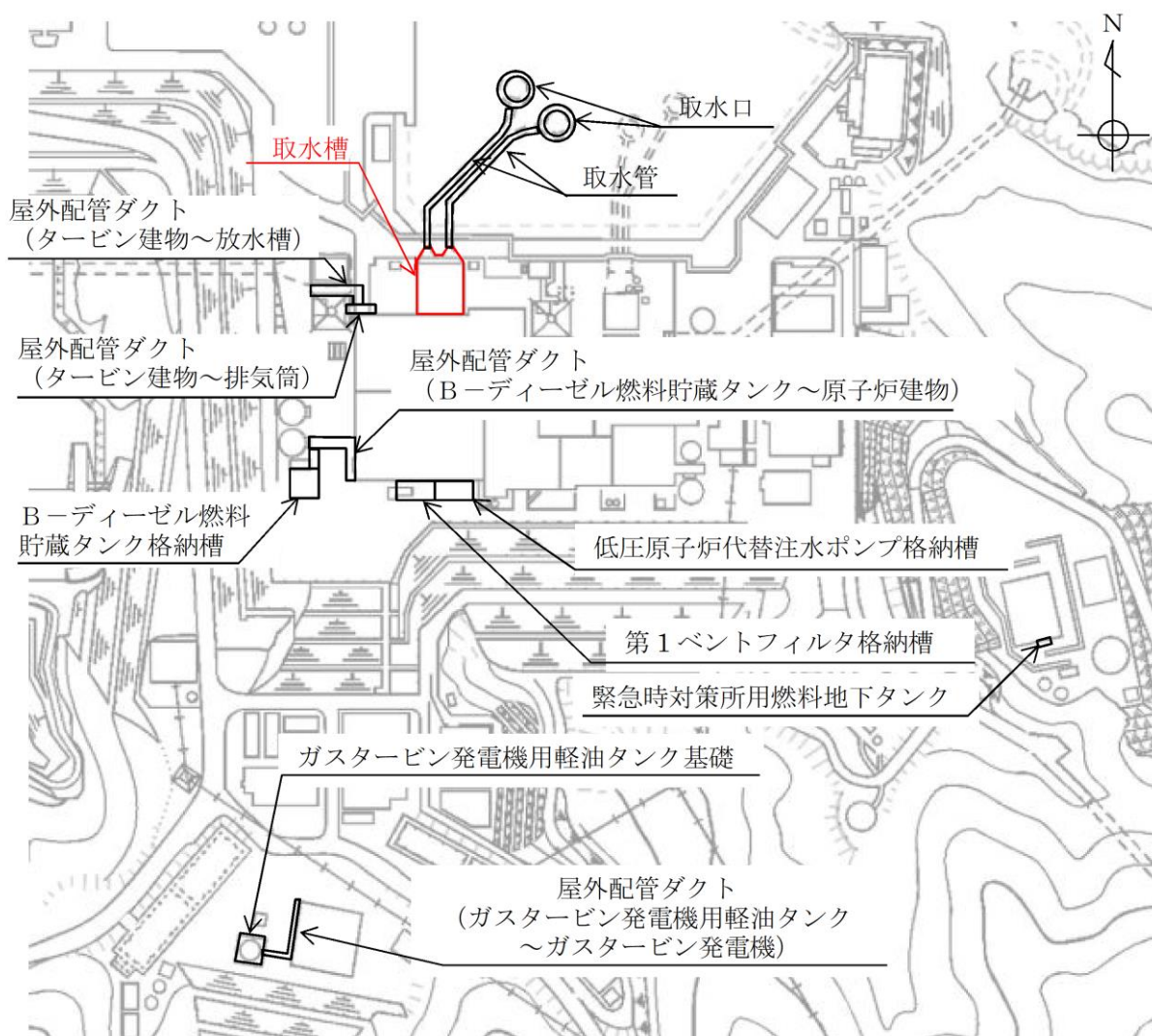


図 1-1 屋外重要土木構造物等の配置平面図

## 2. 対象断面の選定

対象断面は、代表的な屋外重要土木構造物として、周囲に埋戻土が分布する取水槽の海水ポンプエリア（B-B断面）を選定する。取水槽の平面図を図2-1、対象断面における地質断面図を図2-2、解析モデル図を図2-3に示す。

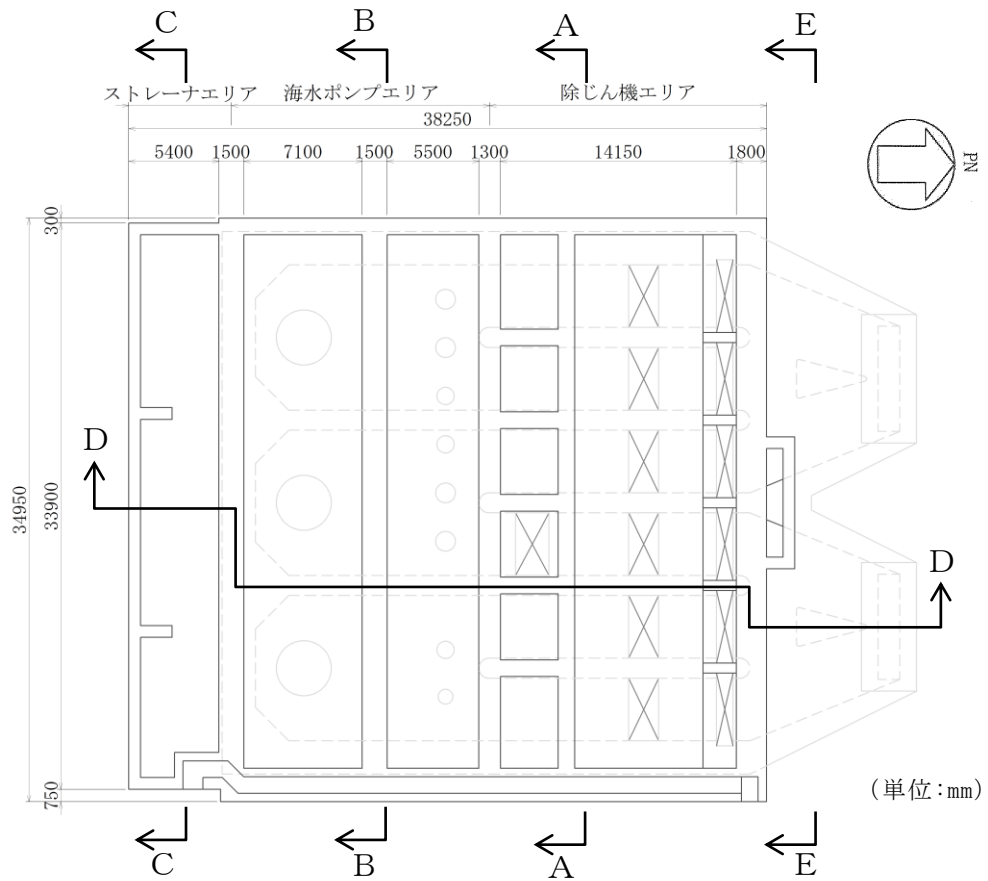
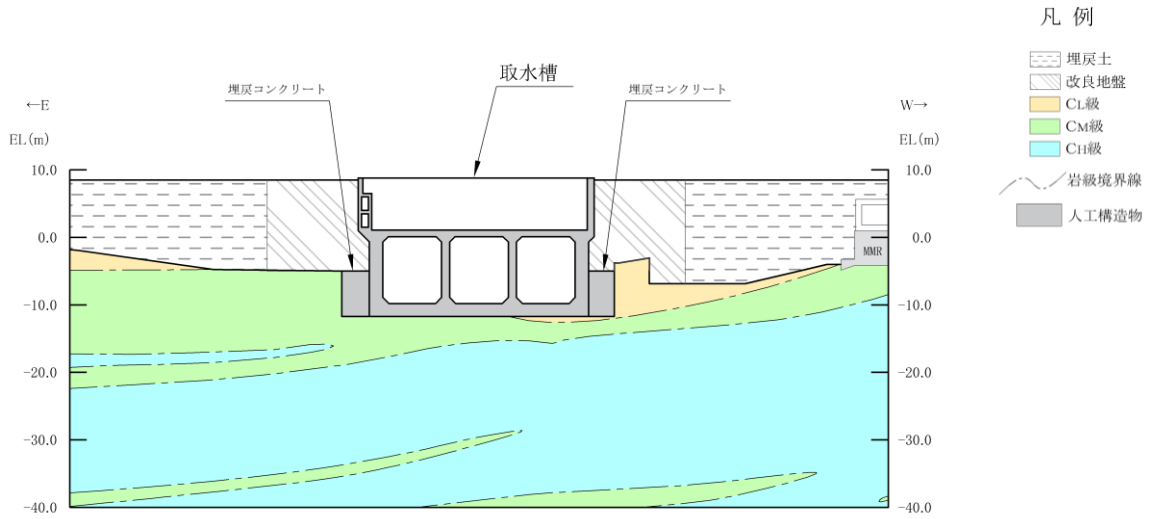
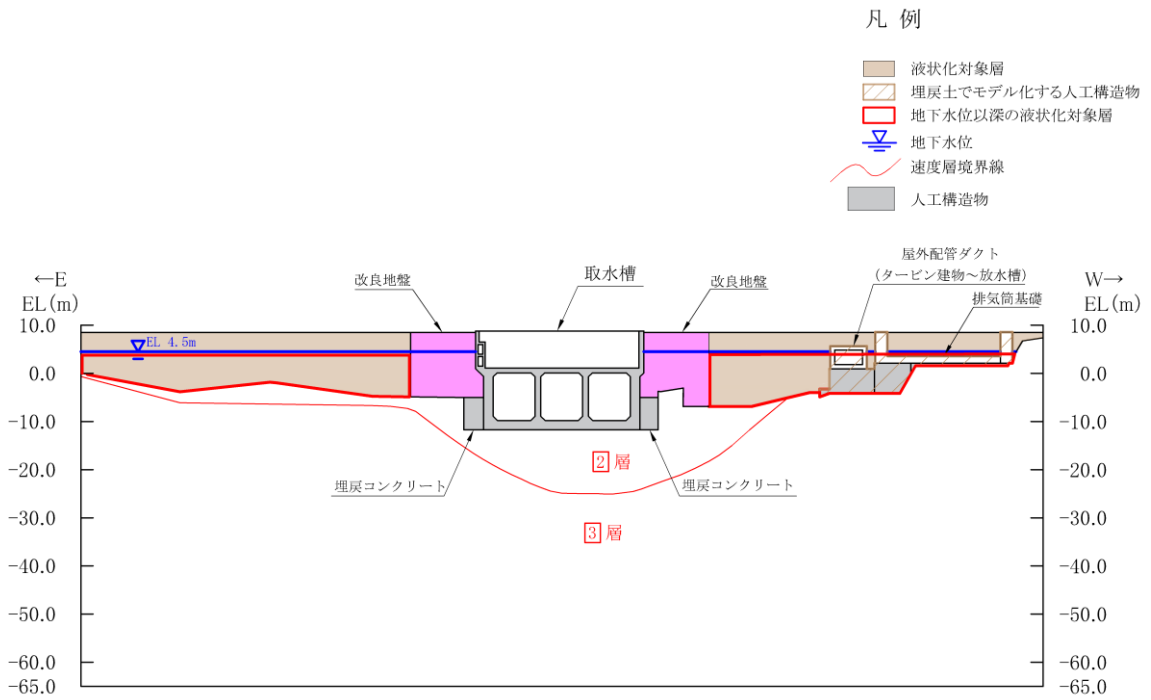


図2-1 取水槽平面図





(岩級図)



(速度層図)

図 2-2 地質断面図 (取水槽海水ポンプエリア (B-B 断面位置))

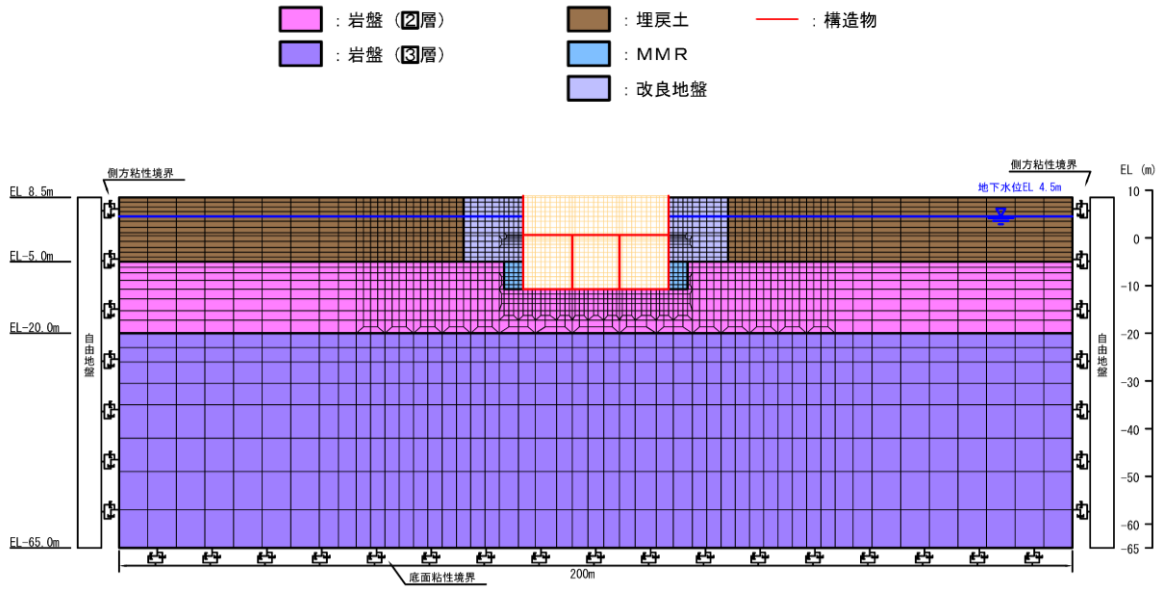


図 2-3 解析モデル図 (取水槽海水ポンプエリア (B-B断面位置))

### 3. 解析方針

地盤の最大加速度分布図，最大変位分布図及び最大せん断ひずみ分布図は，「VI-2-2-18 取水槽の地震応答計算書」に基づき地震応答解析を実施し，作成する。検討に用いる地震動は，代表的な基準地震動としてS s - D (++)とし，地盤物性はケース①（有効応力解析，平均物性）とする。対象断面の解析ケース及び地震動を表3-1に示す。

表 3-1 対象断面の解析ケース及び地震動

対象断面	解析ケース	地震動	分布図の記載箇所		
			最大 加速度	最大 変位	最大せん断 ひずみ
取水槽 海水ポンプ エリア (B - B 断面)	ケース① (有効応力解析 平均物性)	S s - D (++)	図 4-1	図 4-2	図 4-3

#### 4. 解析結果

地震応答解析により算出された対象断面における最大加速度分布図，最大変位分布図及び最大せん断ひずみ分布図を図 4-1～図 4-3 に示す。

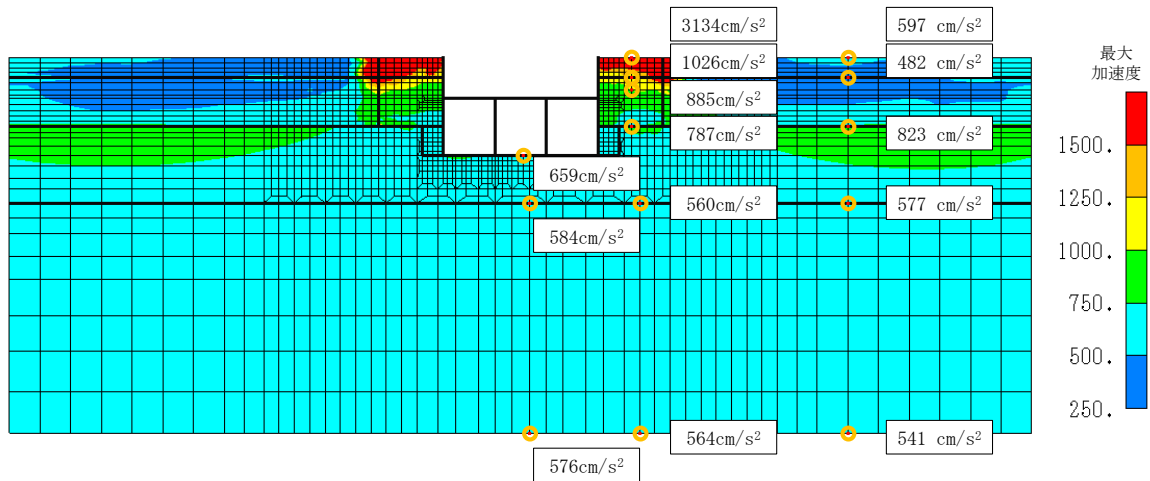


図 4-1 取水槽海水ポンプエリア（B-B 断面位置）における最大加速度分布図

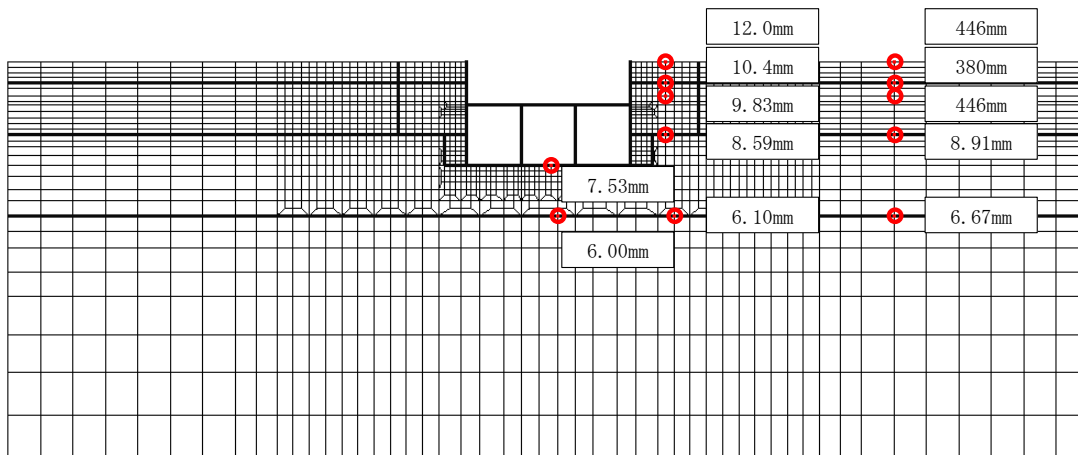


図 4-2 取水槽海水ポンプエリア（B-B断面位置）における最大変位分布図

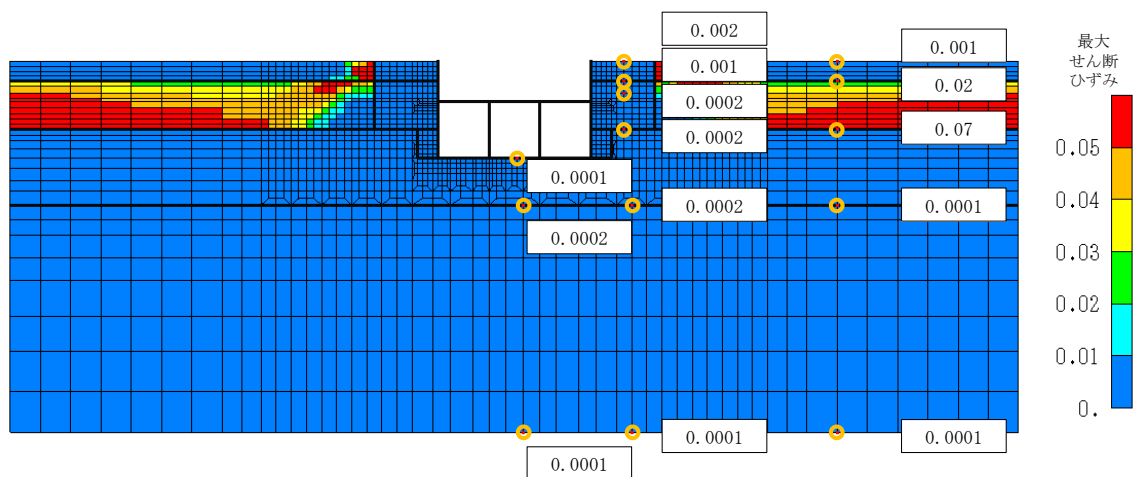


図 4-3 取水槽海水ポンプエリア（B-B断面位置）における最大せん断ひずみ分布図

## 参考資料 14 材料非線形解析の部材係数 $\gamma_{b1}$ の設定について

### 1. 概要

材料非線形解析では、各種構成則の差異、要素の種類、要素分割、材料特性の設定、入増分等、多岐の項目に関して解析者間で差異が生じることを考慮し、実験等によるせん断耐力及び材料非線形解析によるせん断耐力の比をもって部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定を行う。

本資料では、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル2005」という。）に示されている部材係数設定用モデルを対象に材料非線形解析を実施し、せん断破壊に対する照査で使用する部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定について示す。

### 2. 計算機コード

材料非線形解析に用いる解析コードは、「WCOMD-STUDIO」とする。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

### 3. 部材係数設定用モデルの概要

「土木学会マニュアル2005」に示されている部材係数設定用モデルは、集中荷重部材9体（Case No.1～9）及び分布荷重部材8体（Case No.10～17）の計17体である。各モデルの概要を以下に示す。

#### 3.1 集中荷重部材

集中荷重部材 Case No.1～9 の構造諸元、材料諸元及びせん断耐力を表 3-1 に示す。また、Case No.1～9 の構造形状を図 3-1 に示す。

Case No.1～9 は、集中荷重を受ける単純梁である。この形式に関して、「土木学会マニュアル2005」では、せん断耐力評価式を用いて十分な精度の評価が可能と判断されている。

このことから、Case No.1～9 のせん断耐力は、せん断耐力評価式（棒部材式、ディープビーム式）により算定する。

表 3-1 材料諸元及びせん断耐力（集中荷重部材 Case No. 1~9）

Case No.	スパン [m]	部材幅 [m]	部材厚 [m]	有効部材厚 [m]	コンクリート圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	主筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張鉄筋比	軸力比	せん断補強筋比	せん断補強筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	せん断耐力 [kN]	着目点
1	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	475	No.1~9の基本モデル
2	0.25	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	1187	a/dの効果
3	1.00	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	324	
4	1.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0	0	294	
5	0.50	1.00	0.30	0.25	36.0	350	0.030	0	0	0	581	
6	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.010	0	0	0	329	引張鉄筋比の効果
7	2.50	1.00	1.50	1.25	24.0	350	0.030	0	0	0	1587	寸法効果
8	1.00	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0.1	0	0	350	軸力の効果
9	0.50	1.00	0.30	0.25	24.0	350	0.030	0	0.005	350	855	せん断補強の効果

集中荷重部材

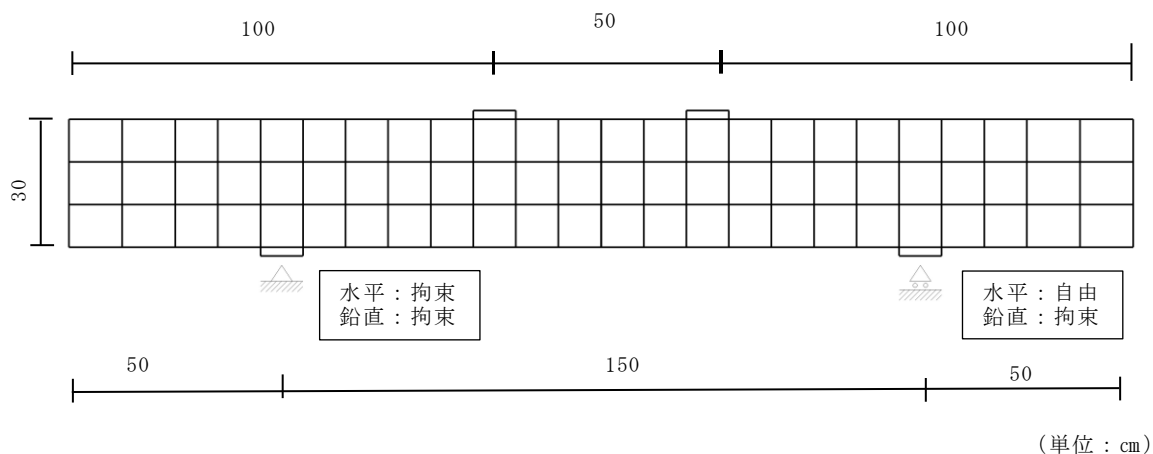


図 3-1 集中荷重を受ける単純梁モデル  
 (集中荷重部材 Case No. 1~9 の基本モデルとなる Case No. 1)

### 3.2 分布荷重部材

分布荷重部材 Case No. 10~17 の構造諸元, 材料諸元及びせん断耐力を表 3-2 に示す。また, Case No. 10~17 の構造形式, 配筋状況を図 3-2 及び図 3-3 に示し, 実験終了時のひび割れ状況を図 3-4 に示す。



表 3-2 材料諸元及びせん断耐力 (分布荷重部材 Case No. 10~17)

Case No.	スパン [m]	部材幅 [m]	部材厚 [m]	有効部材厚 [m]	コンクリート圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	主筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張鉄筋比	軸力比	せん断補強筋補強筋比	せん断補強筋降伏強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	P' / P (各立面図参照)	せん断耐力 (支点位置) [kN]	着目点
10	1.00	0.15	0.30	0.25	32.3	363	0.041	0	0	0	0	165	No.10~14 の基本モデル
11	0.50	0.15	0.30	0.25	41.4	363	0.041	0	0	0	0	333	分布荷重を受けるスパンの効果
12	1.50	0.15	0.30	0.25	41.7	363	0.041	0	0	0	0	127	
13	1.00	0.15	0.30	0.25	33.6	363	0.041	0	0	0	1.5	188	モーメント分布の効果
14	1.00	0.15	0.30	0.25	36.2	363	0.041	0	0	0	2	163	
15	1.00	0.16	0.30	0.26	33.7	511	0.035	0.1	0	0	1.5	273	No.15~17 の基本モデル
16	1.00	0.16	0.30	0.26	35.0	511	0.035	0.1	0.038	332	1.5	356	せん断補強の効果
17	1.00	0.16	0.30	0.26	34.4	511	0.035	0.1	0	0	1.5	432	ハンチの効果

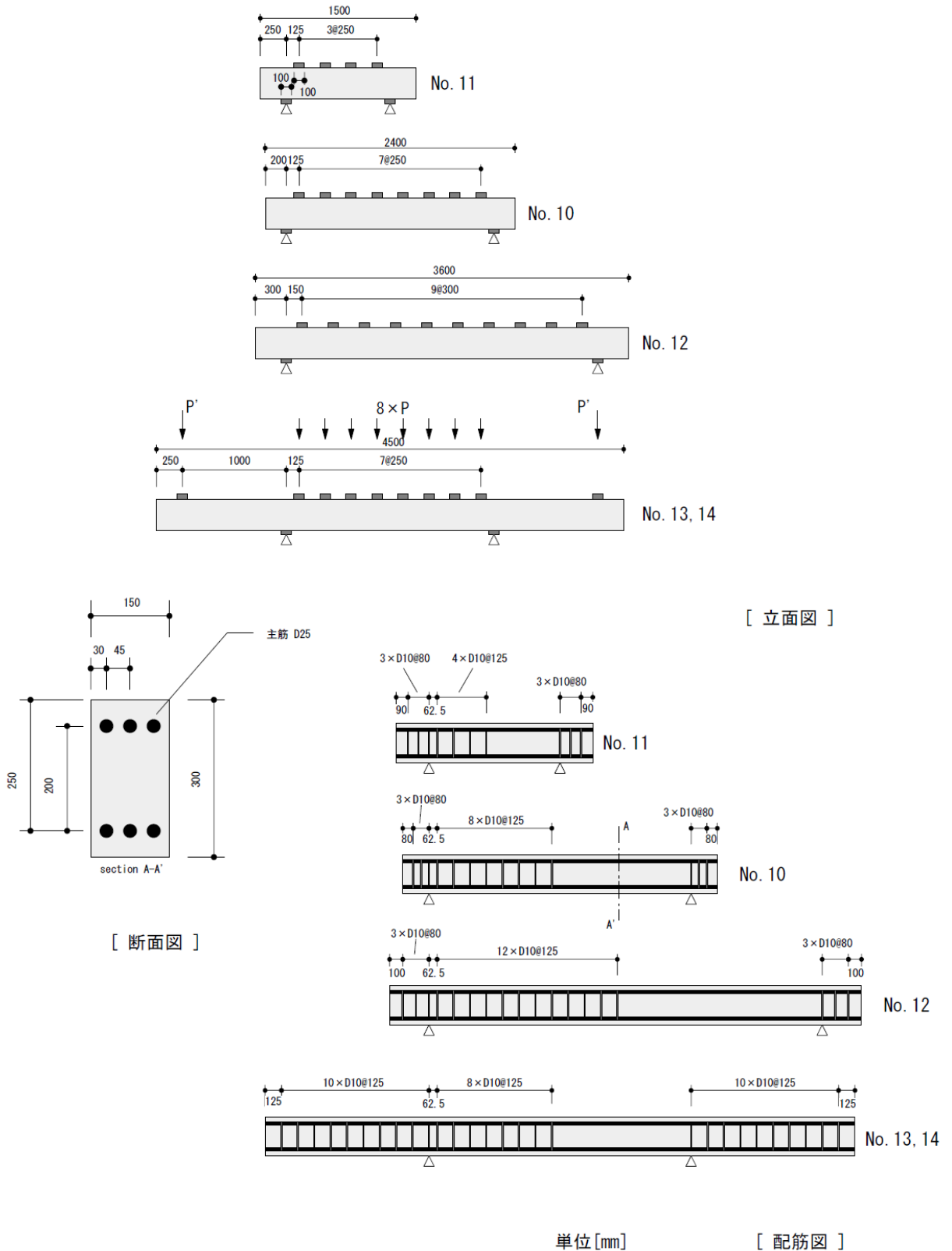


図 3-2 構造形式，配筋状況 (Case No. 10~14) (「土木学会マニュアル 2005」)

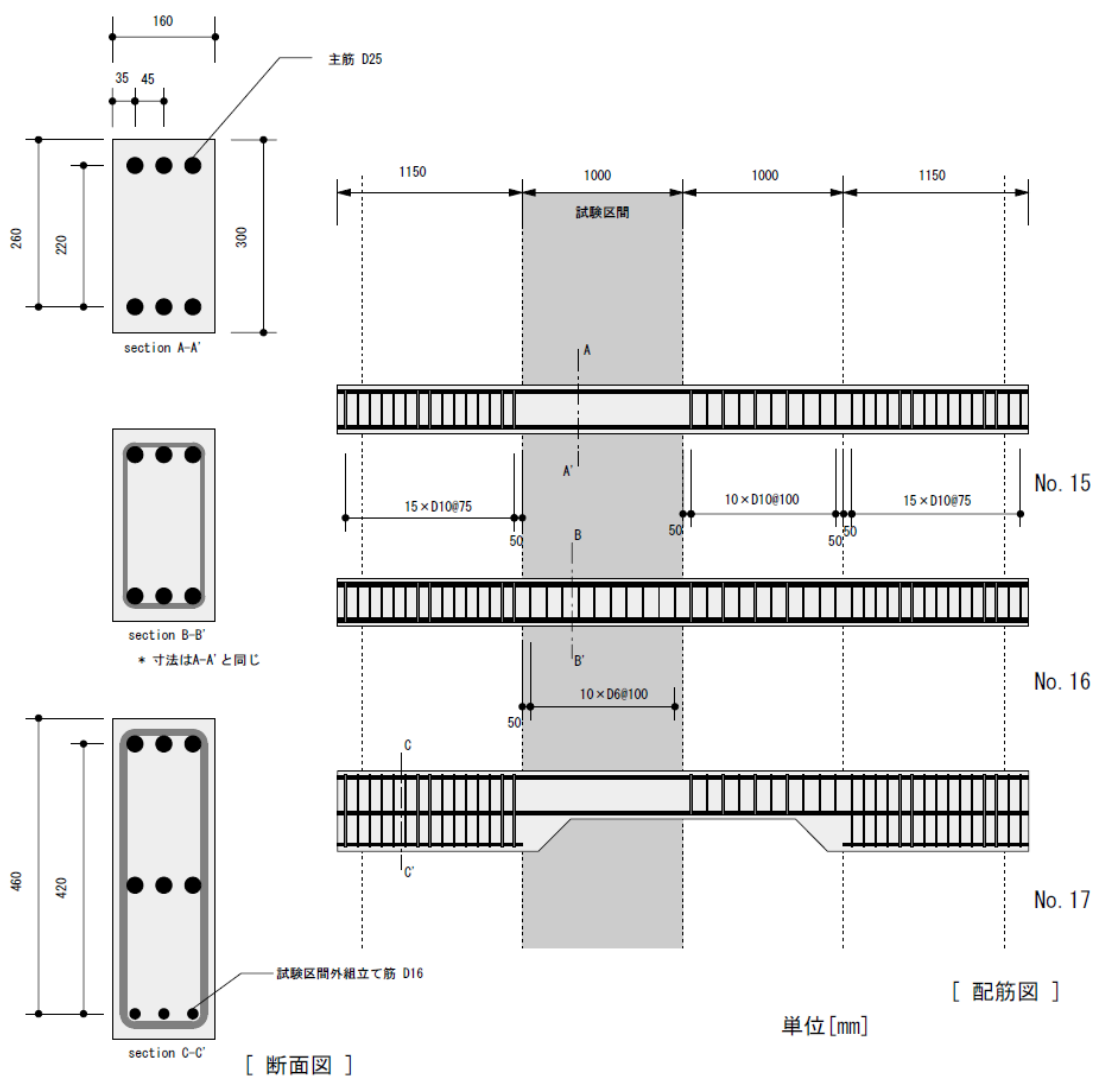
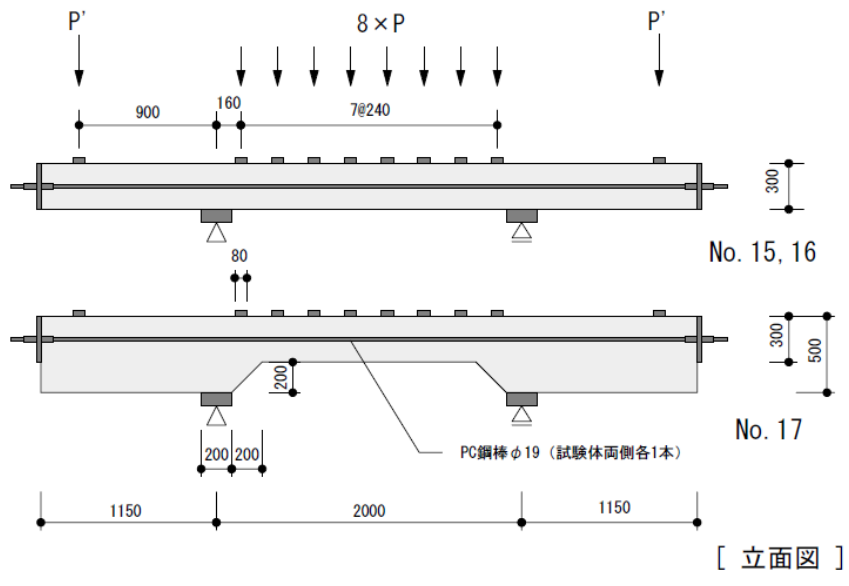
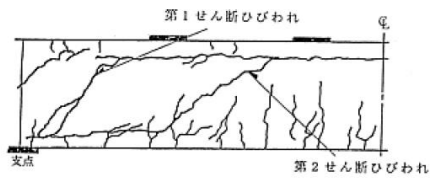
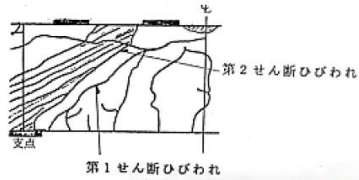


図6.3-9 No.15-17の詳細

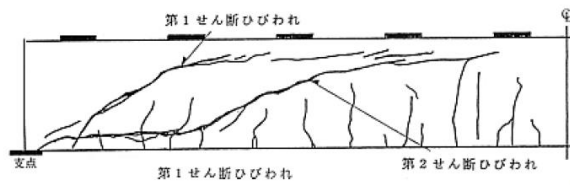
図 3-3 構造形式, 配筋状況 (Case No.15~17) (「土木学会マニュアル 2005」)



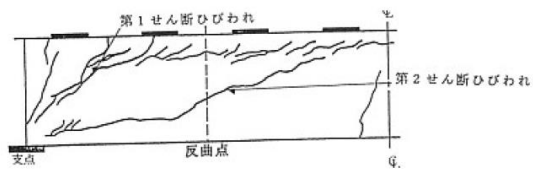
No. 10



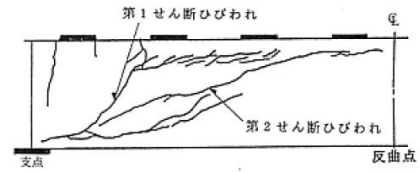
No. 11



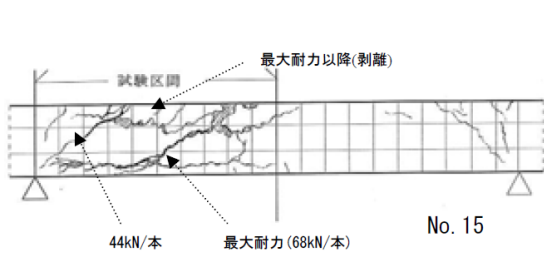
No. 12



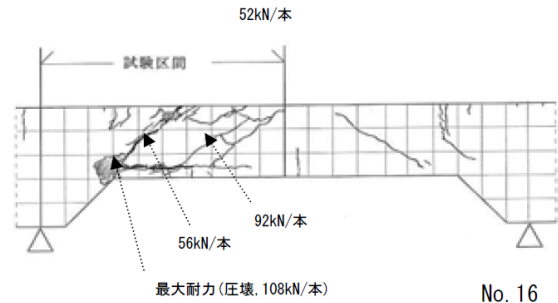
No. 13



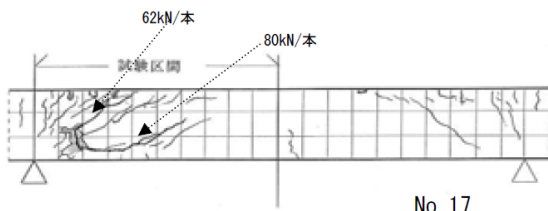
No. 14



No. 15



No. 16



No. 17

図 3-4 ひび割れ状況 (Case No. 10~17) (「土木学会マニュアル 2005」)

#### 4. 解析条件

##### 4.1 解析要素分割

「WCOMD-Studio」における構造部材のモデル化については、「土木学会マニュアル 2005」に従って、図 4-1 に示すとおり、鉄筋コンクリート要素でモデル化する領域と無筋コンクリートでモデル化する領域に分けてモデル化する。鉄筋コンクリート要素の厚さは、鉄筋を中心としてかぶり厚さの 2 倍とする。

また、「土木学会マニュアル 2005」では、部材厚方向の要素分割数については、「鉄筋を含む要素と含まない要素あわせて 3 分割以上の要素分割とすることが望ましい」こと及び「3 層以上の分割数を取る場合、解析結果に大きな差異が生じない」ことが記載されており、分割数は 3 層以上を基本とする。

解析モデルの概要を図 4-2 に示す。解析モデルは、試験体全体をモデル化し、左側支点の水平・鉛直方向変位及び右側支点の鉛直方向変位を拘束する。

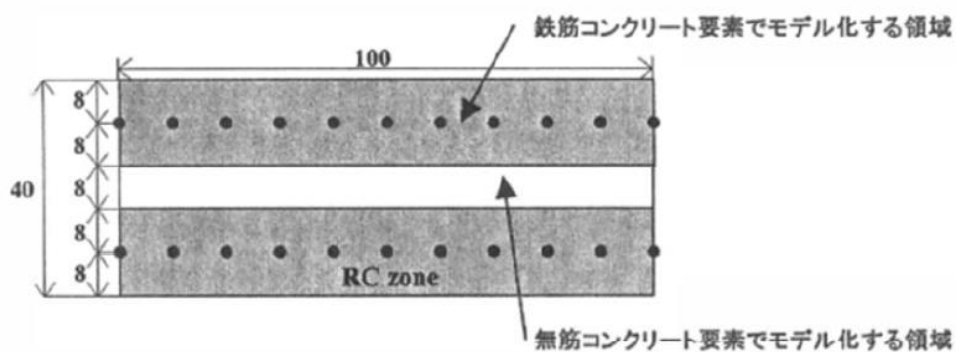
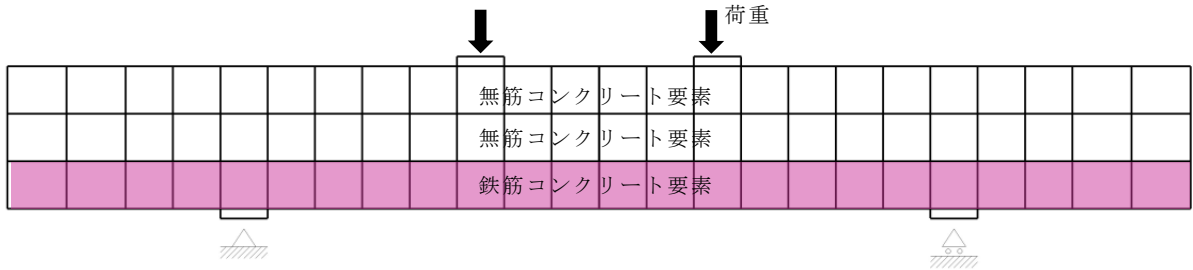
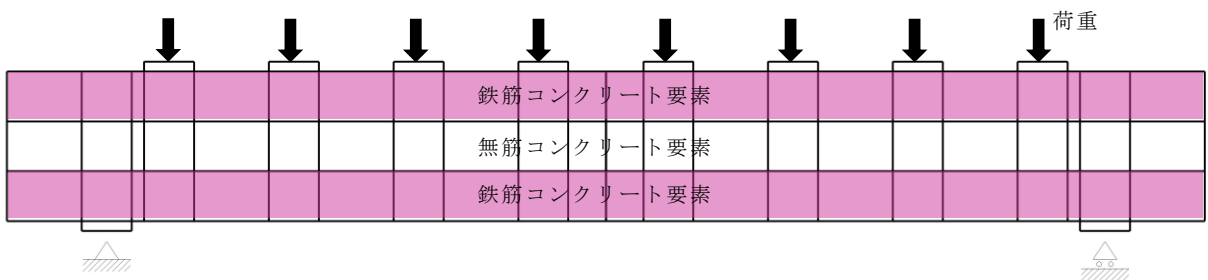


図 4-1 鉄筋コンクリート部材の要素分割の例（「土木学会マニュアル 2005」）



(a) 集中荷重部材 (Case No. 1～9) の解析モデル



(b) 分布荷重部材 (Case No. 10～17) の解析モデル

図 4-2 鉄筋コンクリート部材の要素分割の例

#### 4.2 材料特性

材料強度及びせん断耐力は、表 3-1 及び表 3-2 のとおり「土木学会マニュアル 2005」で示されている値を用いる。

なお、「土木学会マニュアル 2005」で示されている材料特性以外は、「コンクリート標準示方書[設計編]（（社）土木学会，2012 年）」（以下「コンクリート標準示方書 2012」という。）に基づいて設定した。

#### 4.3 荷重載荷方法

材料非線形解析を用いる方法にてせん断照査を行う際には、荷重制御でせん断耐力を評価するため、部材係数を設定するための材料非線形解析も荷重制御による載荷を行う。

また、解析結果から得られた荷重と変位の関係において、変位増加が急増する状態を当該部材の破壊点（終局状態）と考え、この時の荷重値をせん断耐力とする。

## 5. 解析モデル及び解析用物性値

「土木学会マニュアル 2005」に示されている部材係数設定用モデル 17 体について、材料非線形解析の解析モデル及び解析用物性値を以下に示す。

### 5.1 Case No. 1 (Case No. 1～9 の基本モデル)

Case No. 1 は Case No. 1～9 の基本モデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-1 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-1 に、材料諸元を表 5-2 に示す。要素鉄筋比を図 5-2 及び図 5-3 に、引張に対する軟化係数を図 5-4 及び図 5-5 に示す。

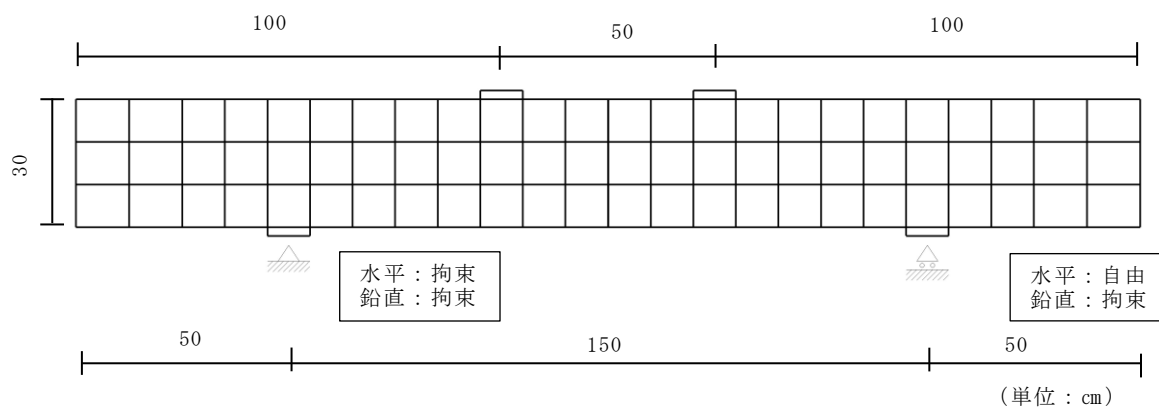


図 5-1 メッシュ図及び境界条件

表 5-1 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-2 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012



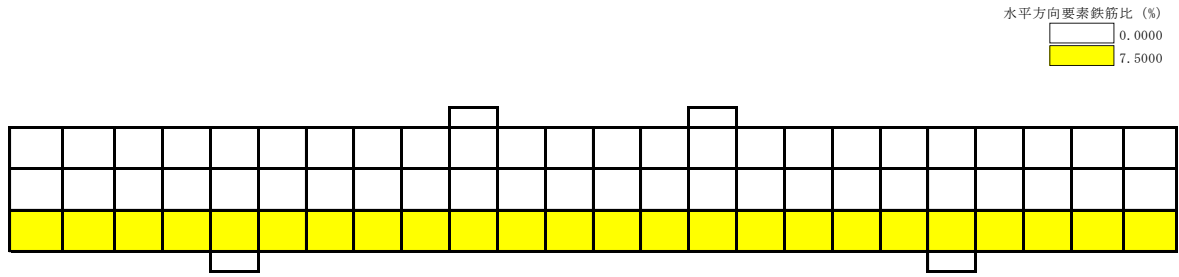


図 5-2 要素鉄筋比 (水平方向)

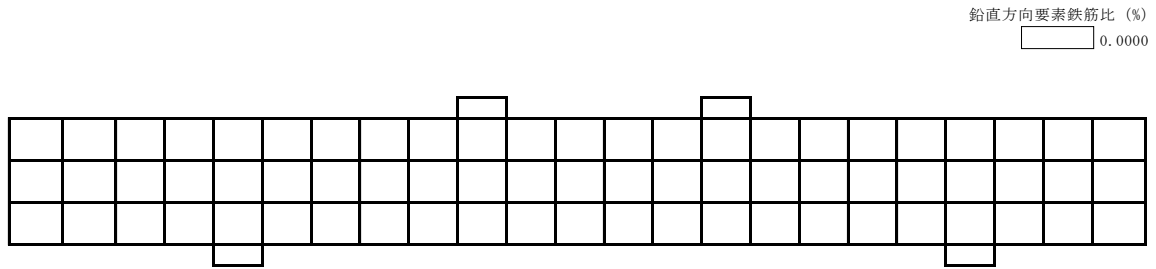


図 5-3 要素鉄筋比 (鉛直方向)

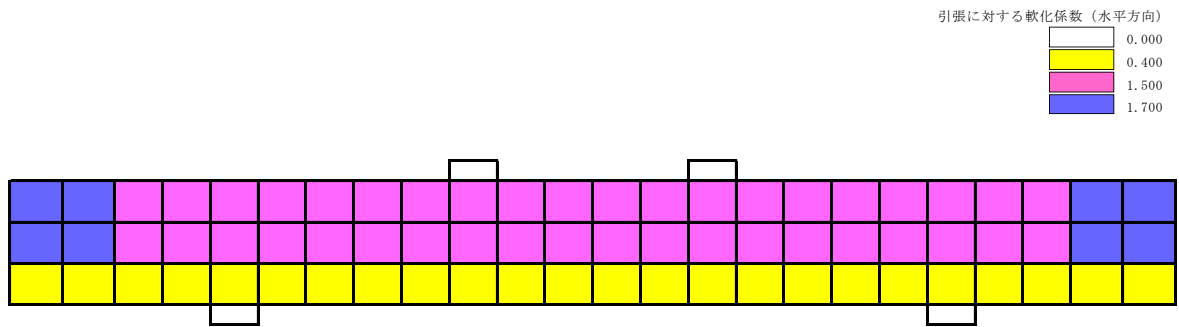


図 5-4 引張に対する軟化係数 (水平方向)

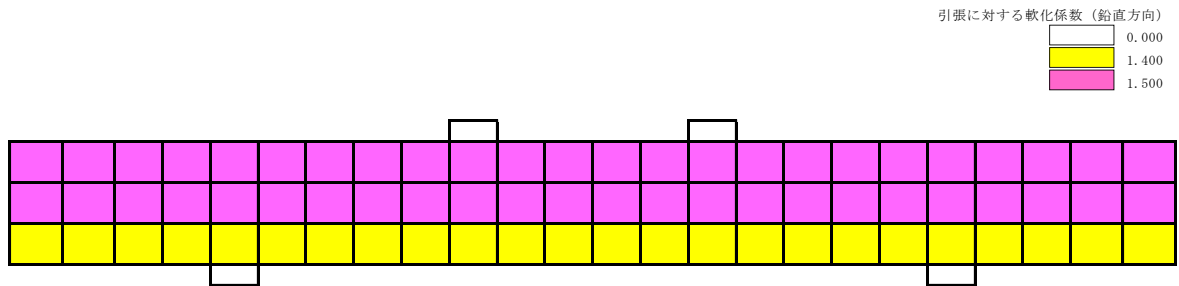


図 5-5 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

## 5.2 Case No.2 (着目点 : a/d の効果)

Case No.2 は基本モデル Case No.1 のスパンの長さ (0.50m→0.25m) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-6 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-3 に、材料諸元を表 5-4 に示す。要素鉄筋比を図 5-7 及び図 5-8 に、引張に対する軟化係数を図 5-9 及び図 5-10 に示す。

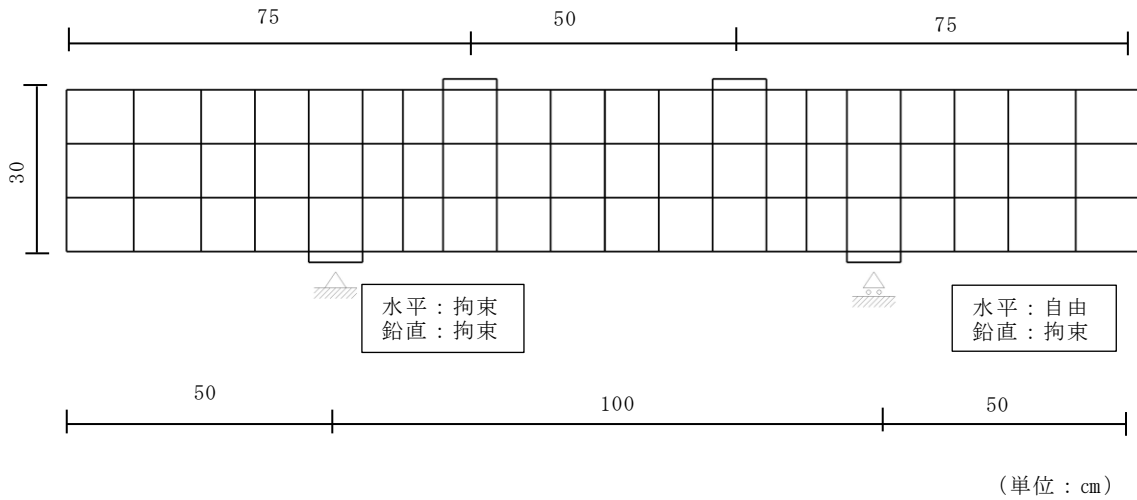


図 5-6 メッシュ図及び境界条件

表 5-3 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-4 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん 断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

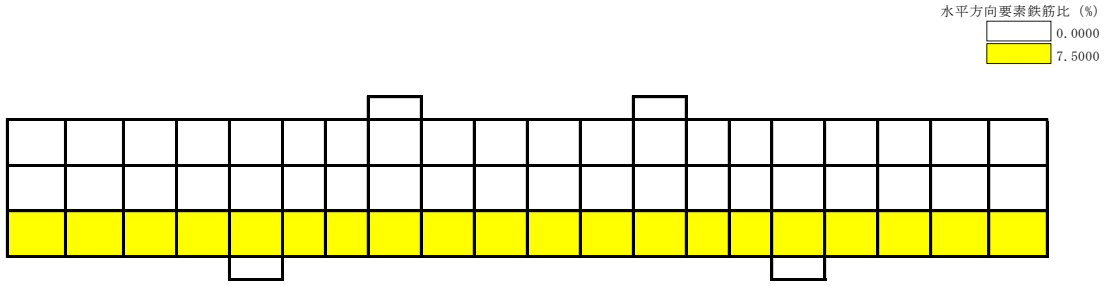


図 5-7 要素鉄筋比 (水平方向)

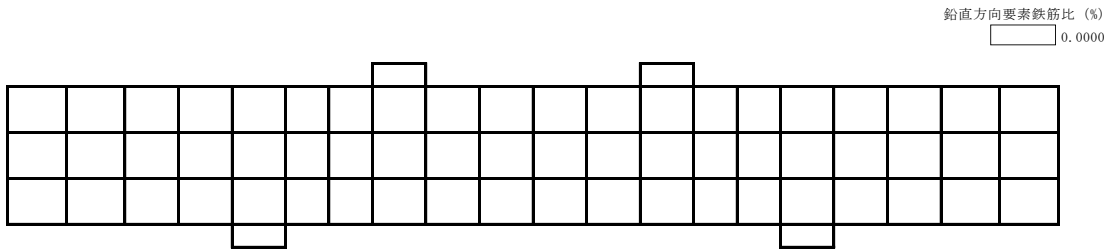


図 5-8 要素鉄筋比 (鉛直方向)

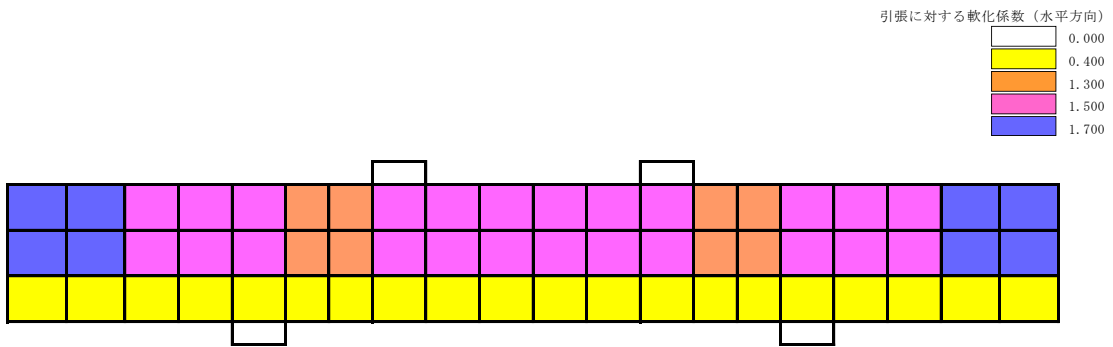


図 5-9 引張に対する軟化係数 (水平方向)

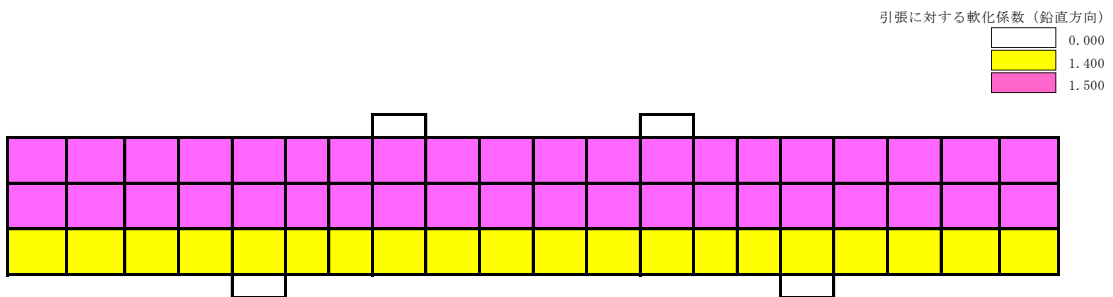


図 5-10 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

### 5.3 Case No. 3 (着目点：a/d の効果)

Case No. 3 は基本モデル Case No. 1 のスパンの長さ (0.50m→1.00m) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-11 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-5 に、材料諸元を表 5-6 に示す。要素鉄筋比を図 5-12 及び図 5-13 に、引張に対する軟化係数を図 5-14 及び図 5-15 に示す。

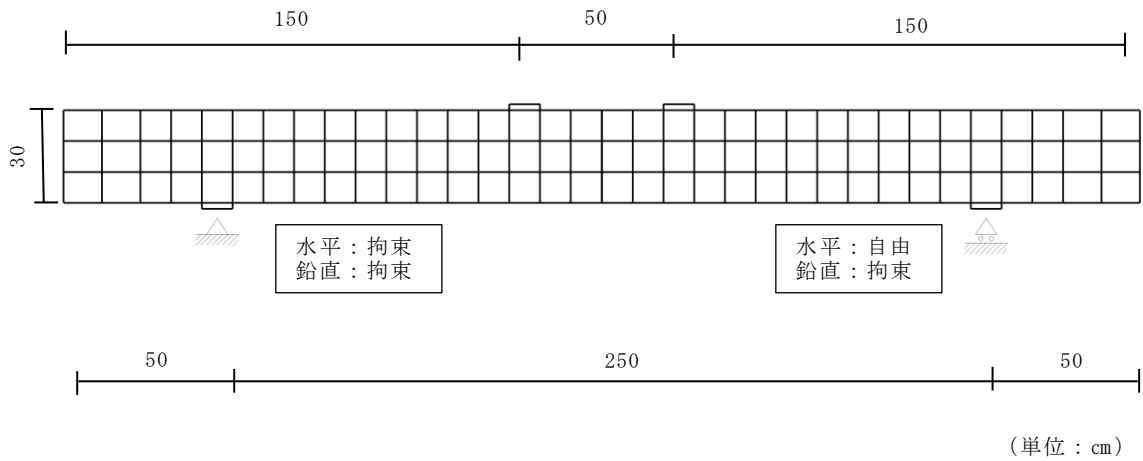


図 5-11 メッシュ図及び境界条件

表 5-5 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-6 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

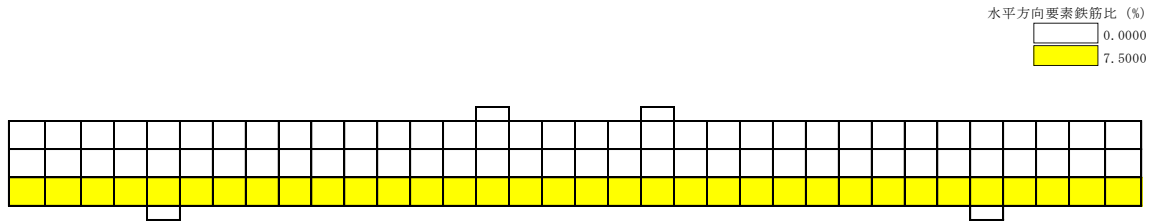


図 5-12 要素鉄筋比 (水平方向)

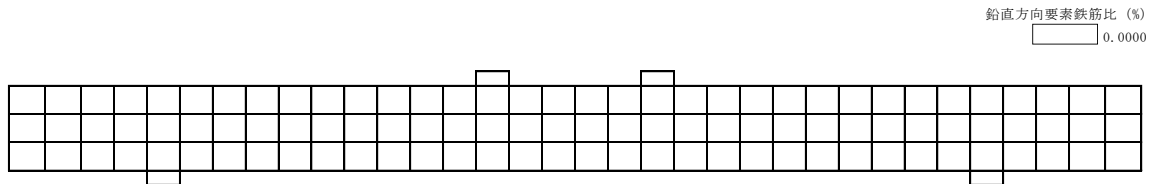


図 5-13 要素鉄筋比 (鉛直方向)

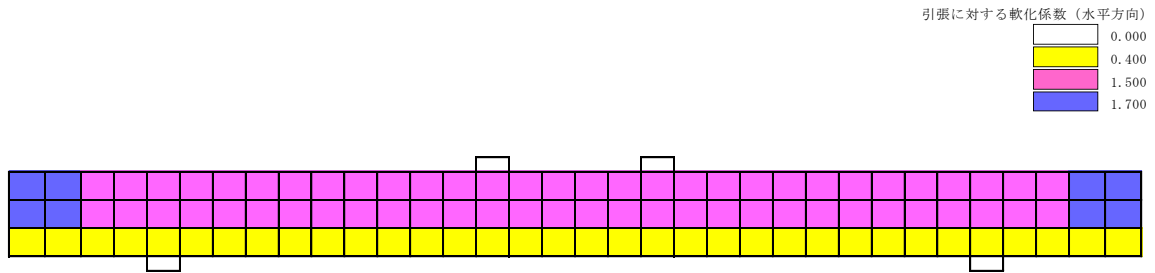


図 5-14 引張に対する軟化係数 (水平方向)

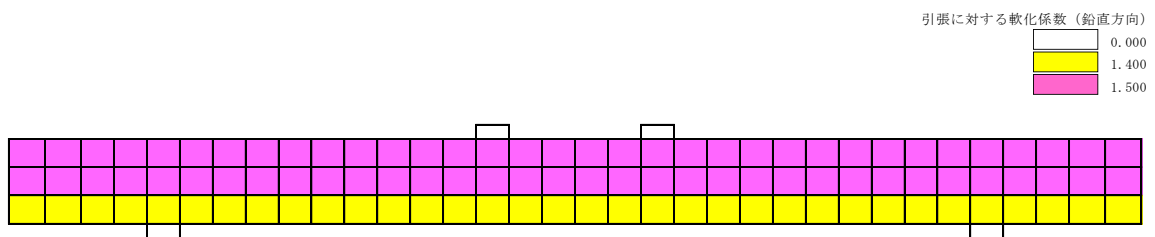


図 5-15 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

#### 5.4 Case No. 4 (着目点：a/d の効果)

Case No. 4 は基本モデル Case No. 1 のスパンの長さ (0.50m→1.50m) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-16 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-7 に、材料諸元を表 5-8 に示す。要素鉄筋比を図 5-17 及び図 5-18 に、引張に対する軟化係数を図 5-19 及び図 5-20 に示す。

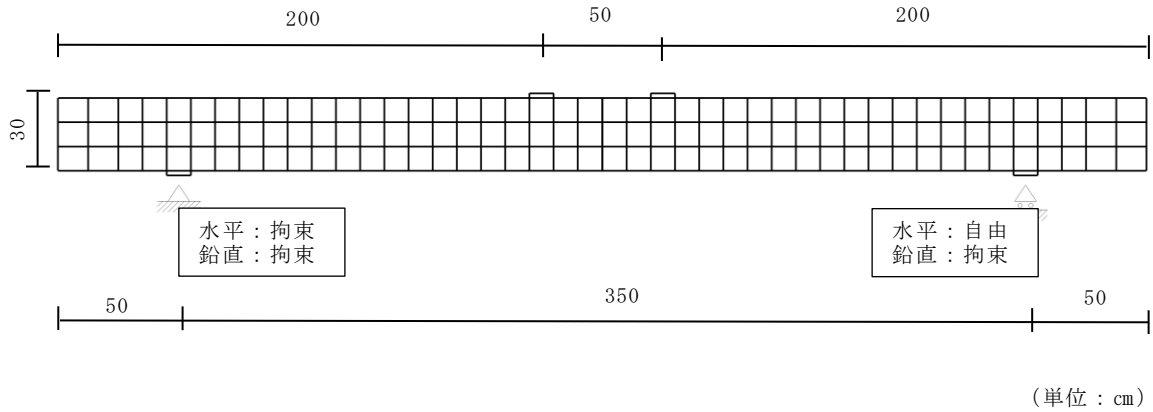


図 5-16 メッシュ図及び境界条件



表 5-7 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-8 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

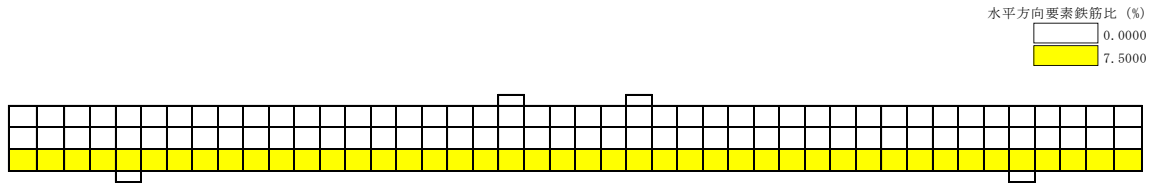


図 5-17 要素鉄筋比 (水平方向)

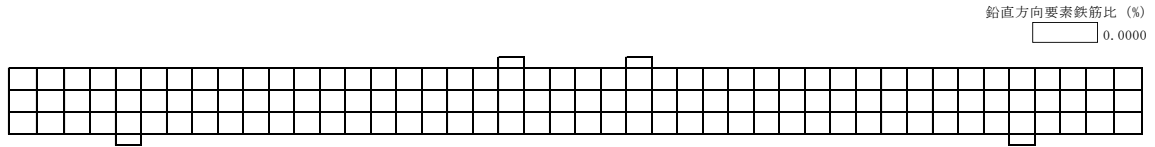


図 5-18 要素鉄筋比 (鉛直方向)

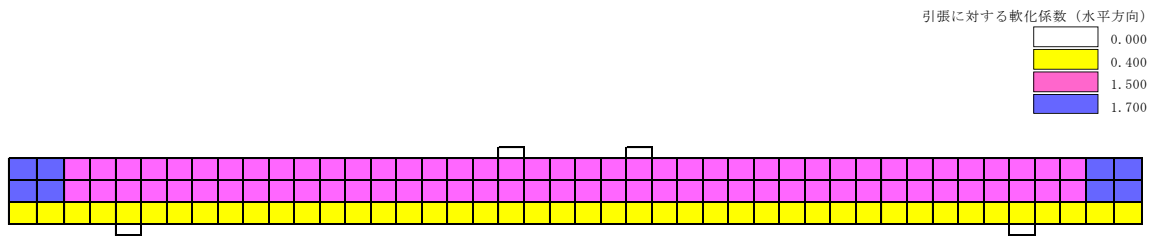


図 5-19 引張に対する軟化係数 (水平方向)

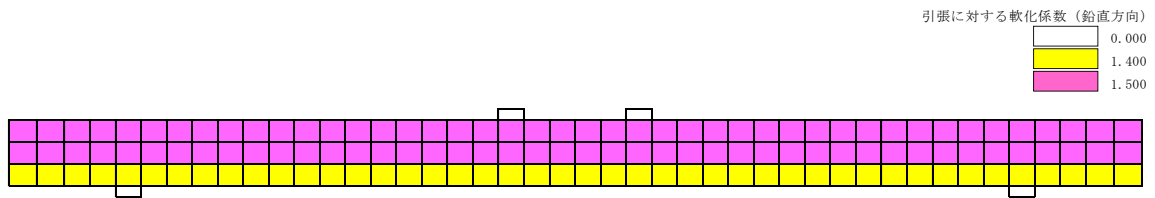


図 5-20 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.5 Case No.5 (着目点：コンクリートの圧縮強度の効果)

Case No.5 は基本モデル Case No.1 のコンクリートの圧縮強度 ( $24.0 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 36.0 \text{ N/mm}^2$ ) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-21 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-9 に、材料諸元を表 5-10 に示す。要素鉄筋比を図 5-22 及び図 5-23 に、引張に対する軟化係数を図 5-24 及び図 5-25 に示す。

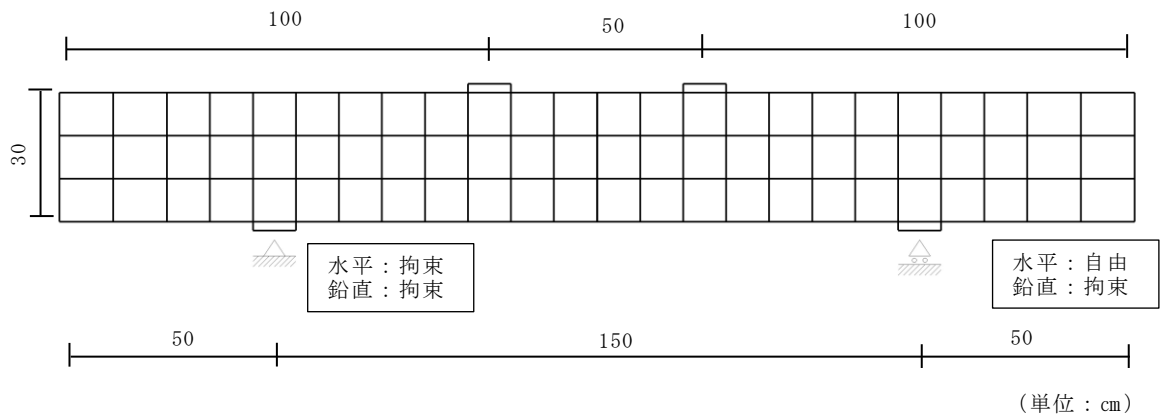


図 5-21 メッシュ図及び境界条件

表 5-9 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-10 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	36	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.51	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 36^{2/3}$ = 2.507 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

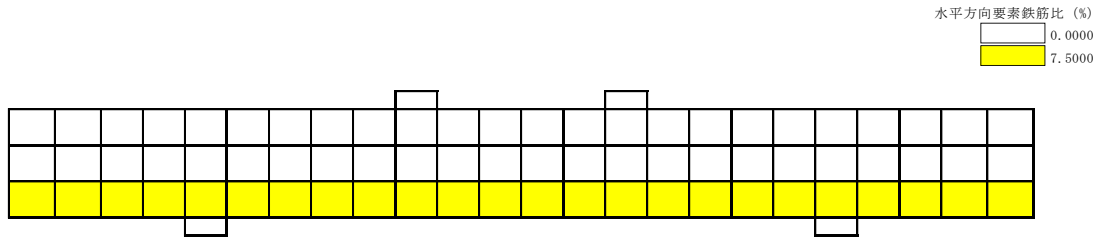


図 5-22 要素鉄筋比 (水平方向)

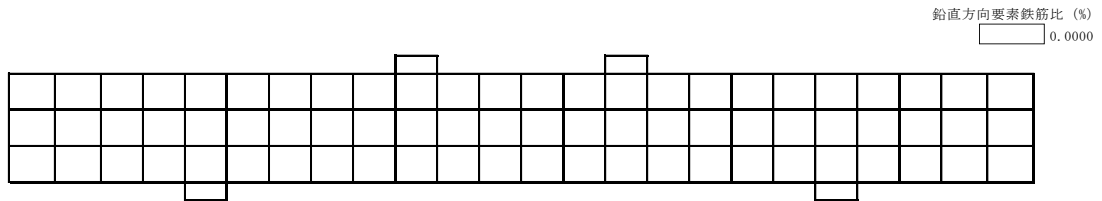


図 5-23 要素鉄筋比 (鉛直方向)

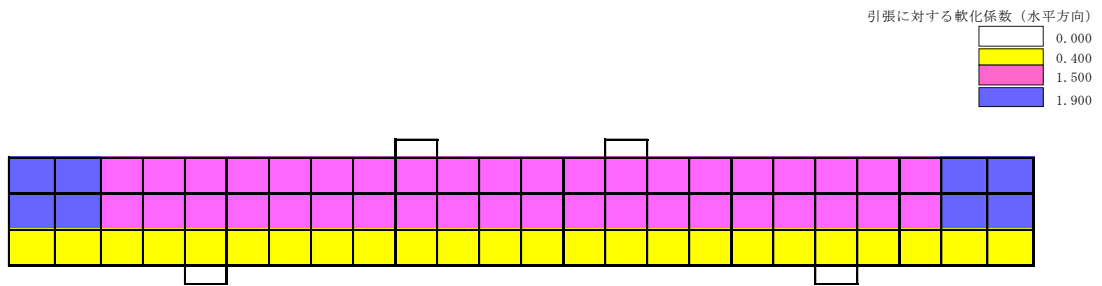


図 5-24 引張に対する軟化係数 (水平方向)

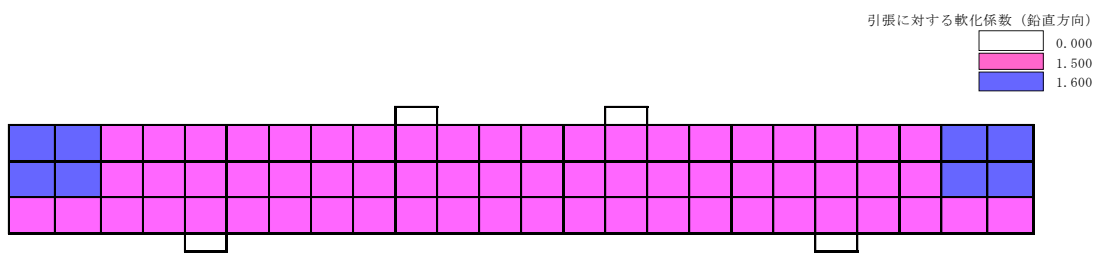


図 5-25 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

### 5.6 Case No. 6 (着目点：引張鉄筋比の効果)

Case No. 6 は基本モデル Case No. 1 の引張鉄筋比 (0.03→0.01) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-26 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-11 に、材料諸元を表 5-12 に示す。要素鉄筋比を図 5-27 及び図 5-28 に、引張に対する軟化係数を図 5-29 及び図 5-30 に示す。

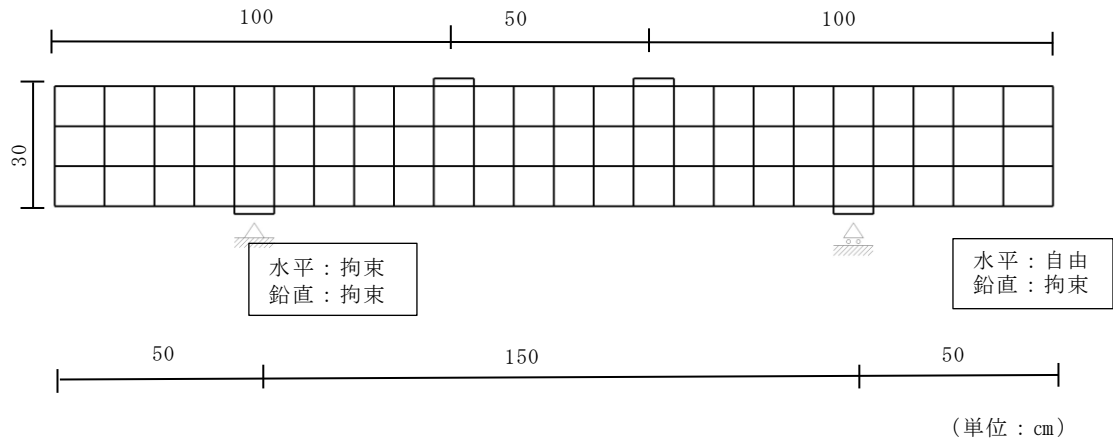


図 5-26 メッシュ図及び境界条件

表 5-11 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.01	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-12 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

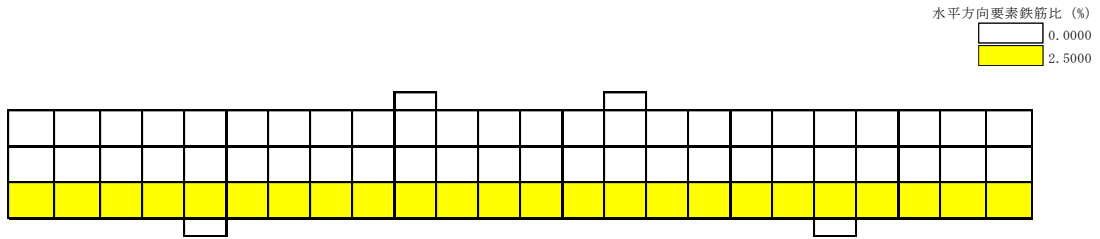


図 5-27 要素鉄筋比 (水平方向)

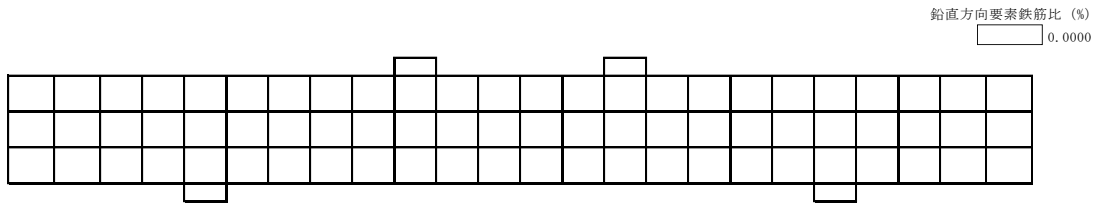


図 5-28 要素鉄筋比 (鉛直方向)

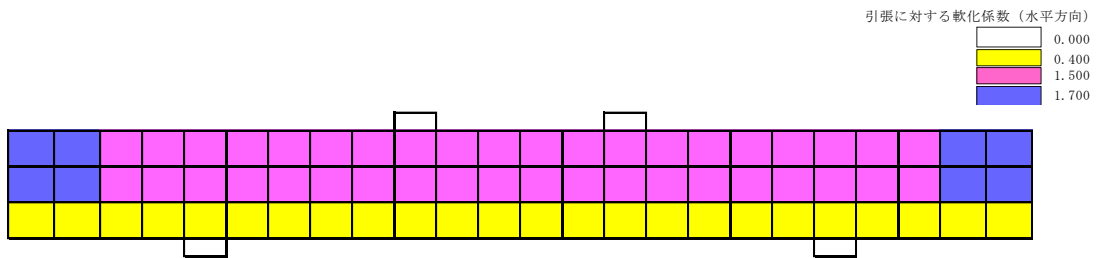


図 5-29 引張に対する軟化係数 (水平方向)

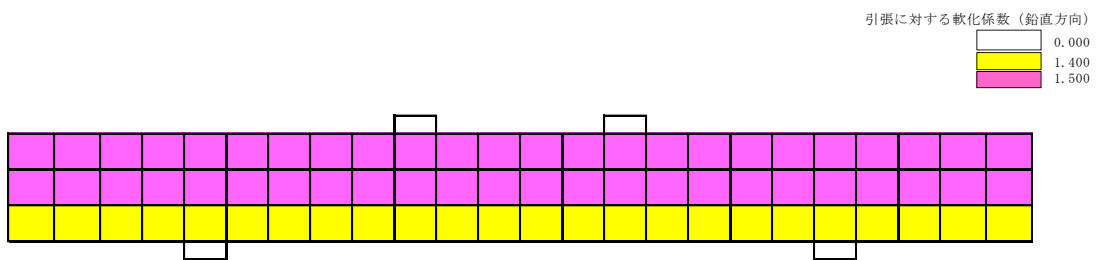
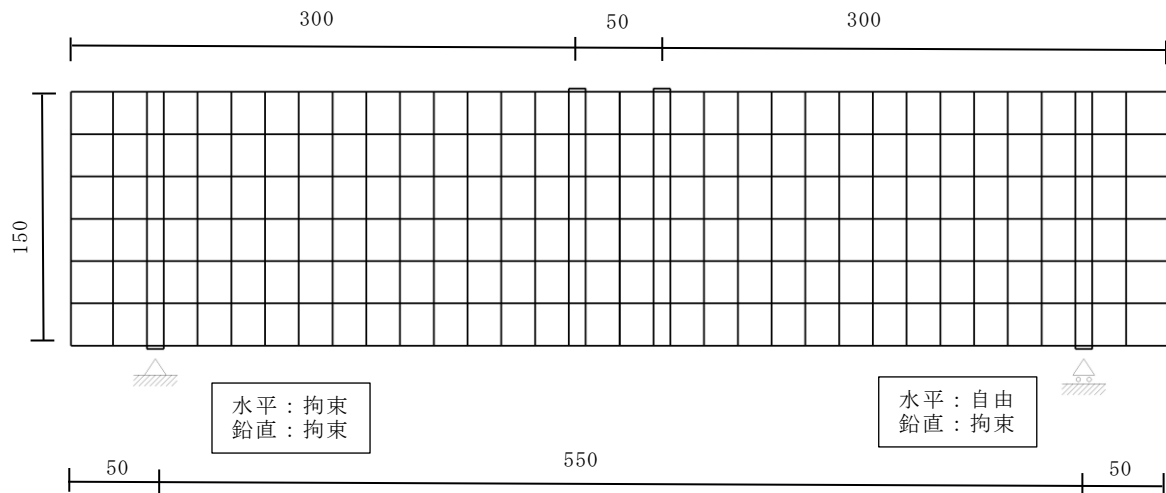


図 5-30 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)



### 5.7 Case No.7 (着目点：寸法効果)

Case No.7 は基本モデル Case No.1 のスパンの長さ (0.50m→2.50m) , 部材厚 (0.30m→1.50m) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-31 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-13 に, 材料諸元を表 5-14 に示す。要素鉄筋比を図 5-32 及び図 5-33 に, 引張に対する軟化係数を図 5-34 及び図 5-35 に示す。



(単位：cm)

図 5-31 メッシュ図及び境界条件

表 5-13 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	150	同上
有効部材厚 (cm)	125	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-14 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん 断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

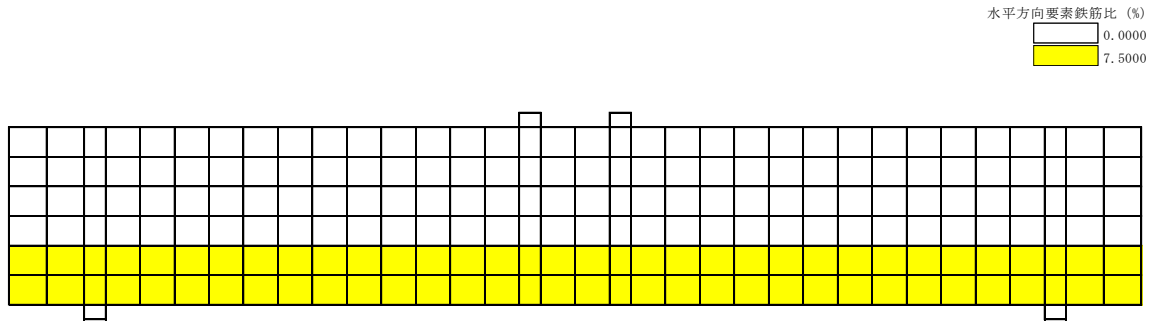


図 5-32 要素鉄筋比 (水平方向)

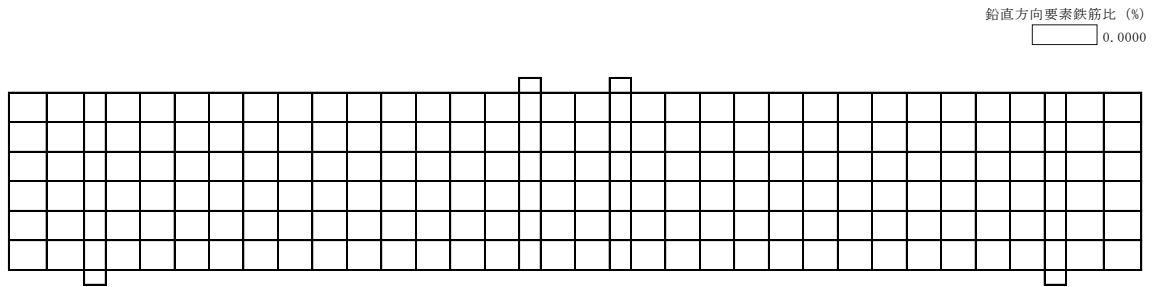


図 5-33 要素鉄筋比 (鉛直方向)

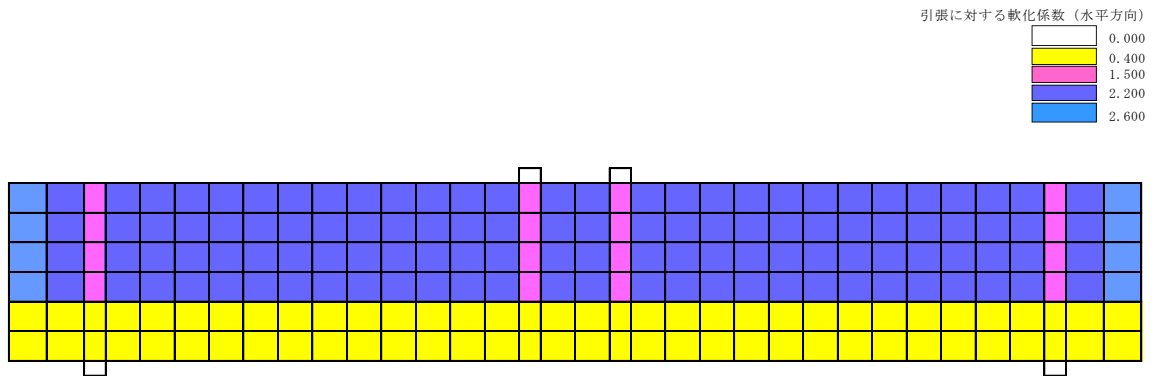


図 5-34 引張に対する軟化係数 (水平方向)

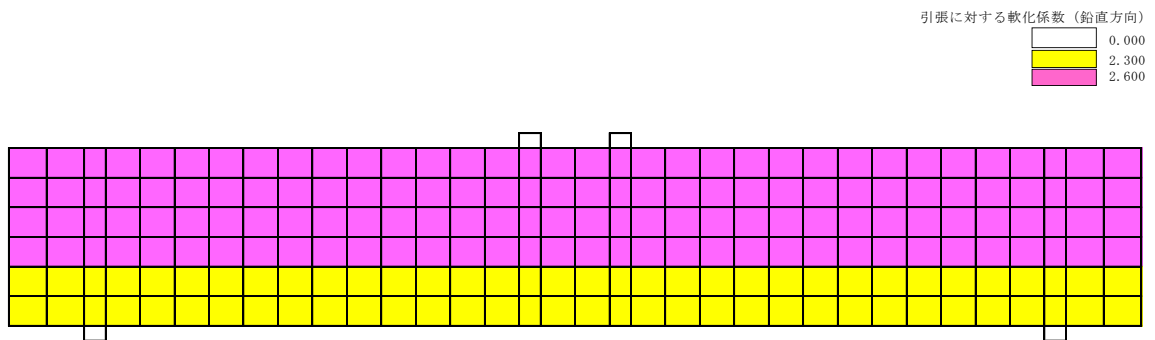


図 5-35 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

### 5.8 Case No.8 (着目点：軸力の効果)

Case No.8は基本モデルCase No.1のスパンの長さ(0.50m→1.00m)を変更し、軸力比を追加したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図5-36に示す。断面性状及び鉄筋比を表5-15に、材料諸元を表5-16に示す。要素鉄筋比を図5-37及び図5-38に、引張に対する軟化係数を図5-39及び図5-40に示す。

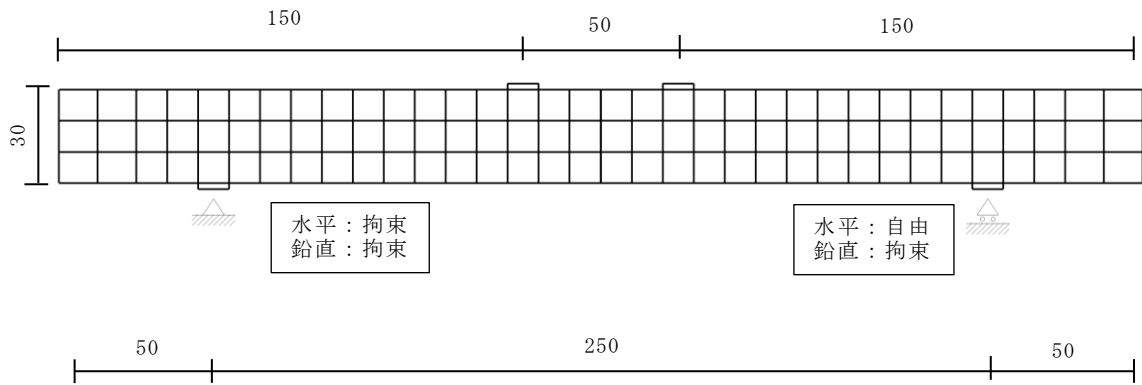


図5-36 メッシュ図及び境界条件

(単位：cm)

表 5-15 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.00	同上

表 5-16 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

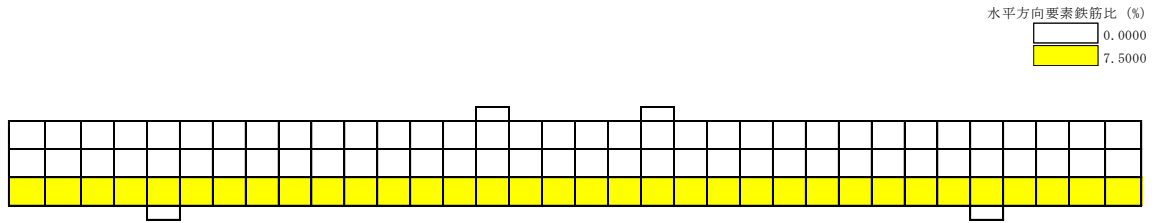


図 5-37 要素鉄筋比 (水平方向)

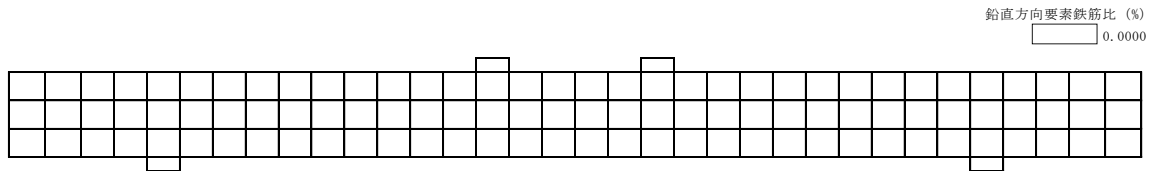


図 5-38 要素鉄筋比 (鉛直方向)

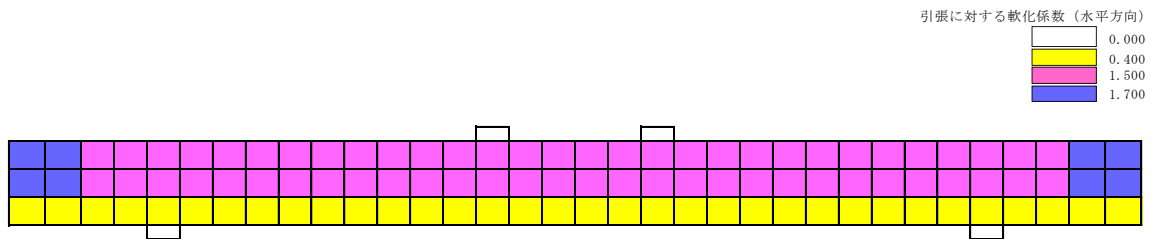


図 5-39 引張に対する軟化係数 (水平方向)

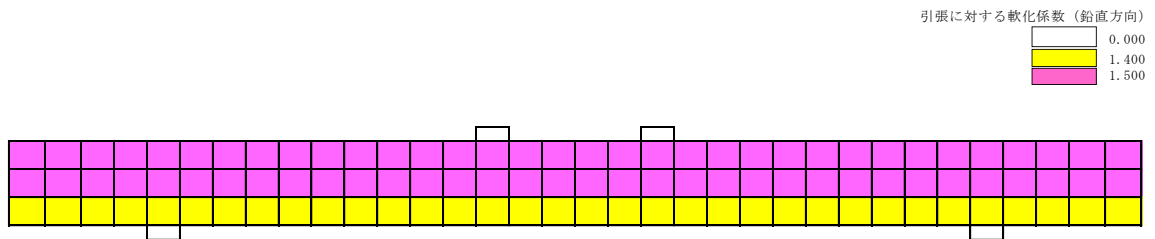


図 5-40 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.9 Case No.9 (着目点：せん断補強筋の効果)

Case No.9 は基本モデル Case No.1 にせん断補強筋を追加したモデルである解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-41 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-17 に、材料諸元を表 5-18 に示す。要素鉄筋比を図 5-42 及び図 5-43 に、引張に対する軟化係数を図 5-44 及び図 5-45 に示す。

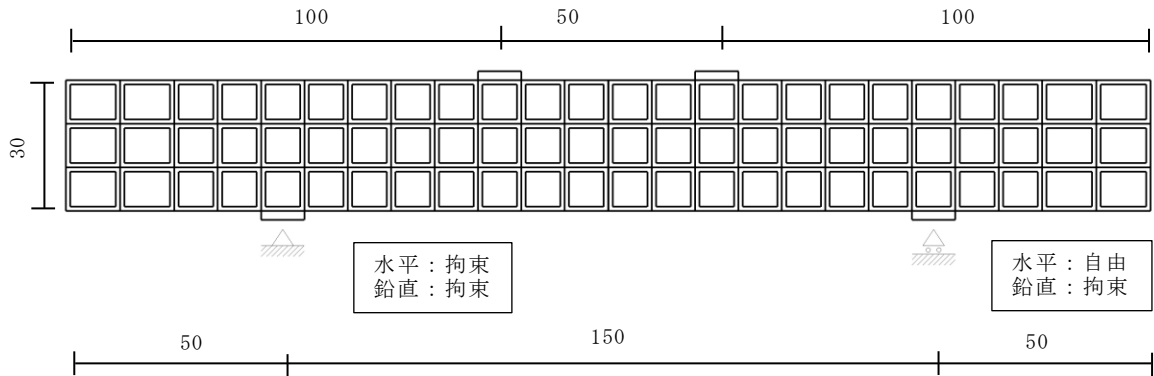


図 5-41 メッシュ図及び境界条件

(単位：cm)

表 5-17 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	100	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.03	同上
せん断補強筋比	0.005	同上

表 5-18 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	24	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	1.91	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 24^{2/3}$ = 1.913 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	350	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012



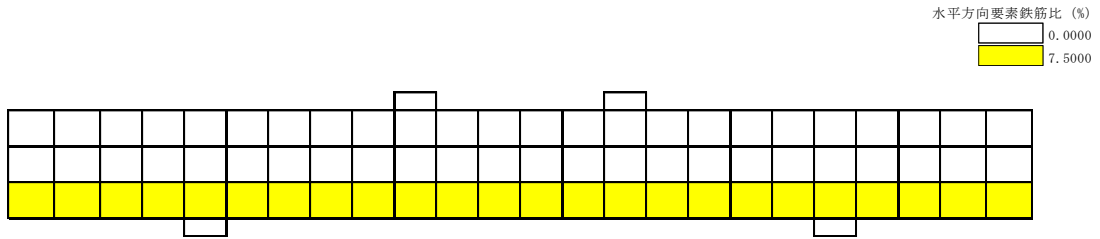


図 5-42 要素鉄筋比 (水平方向)

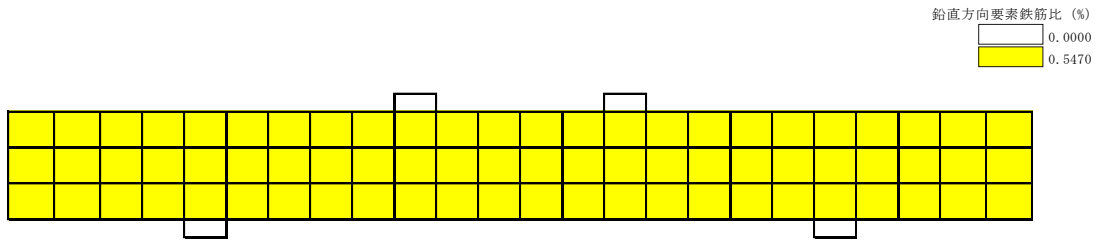


図 5-43 要素鉄筋比 (鉛直方向)

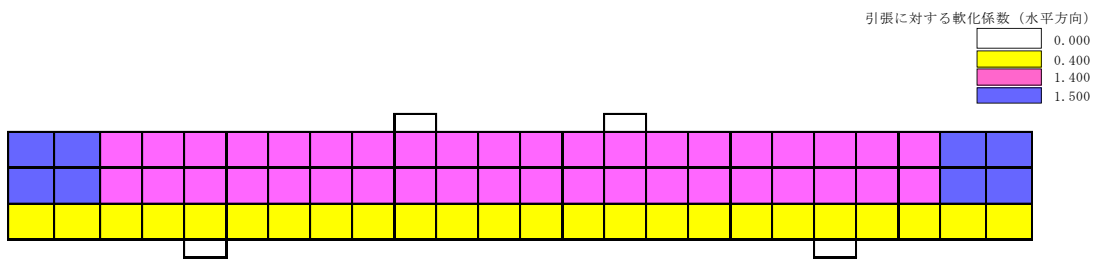


図 5-44 引張に対する軟化係数 (水平方向)

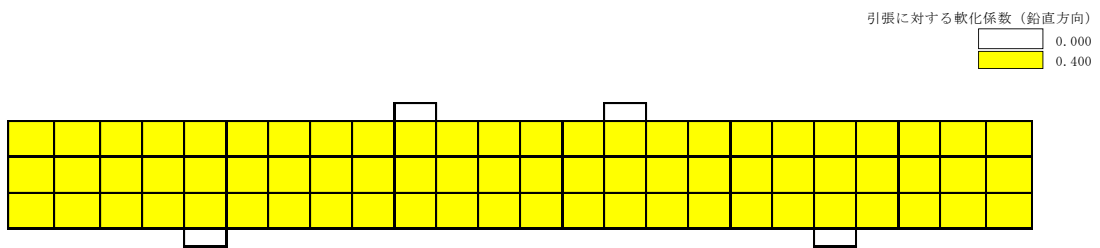


図 5-45 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

### 5.10 Case No. 10 (Case No. 10~14 の基本モデル)

Case No. 10 は Case No. 10~14 の基本モデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-46 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-19 に、材料諸元を表 5-20 に示す。要素鉄筋比を図 5-47 及び図 5-48 に、引張に対する軟化係数を図 5-49 及び図 5-50 に示す。

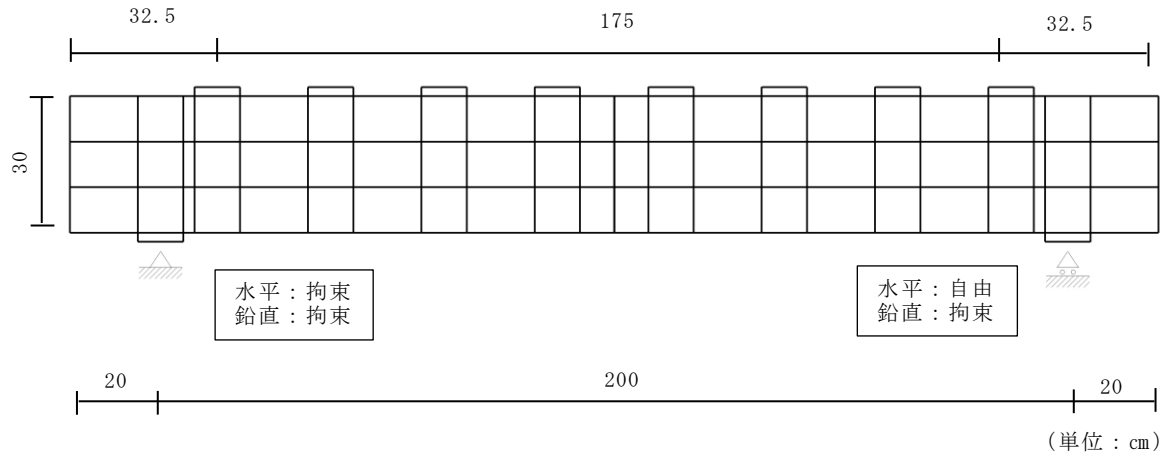


図 5-46 メッシュ図及び境界条件

表 5-19 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	15	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.041	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり，他の区間より先行して破壊に至るように，鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-20 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	32.3	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.33	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 32.3^{2/3} = 2.333$ コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	363	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

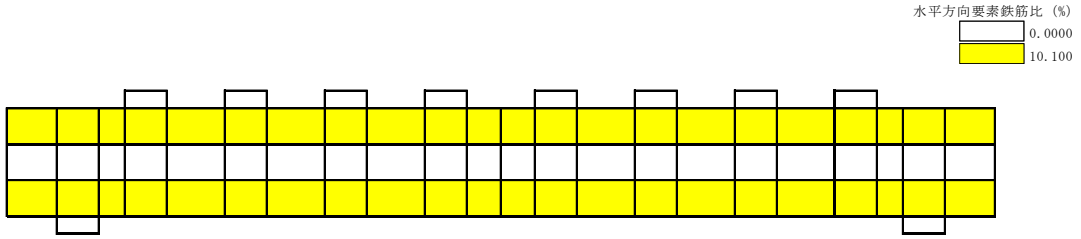


図 5-47 要素鉄筋比 (水平方向)

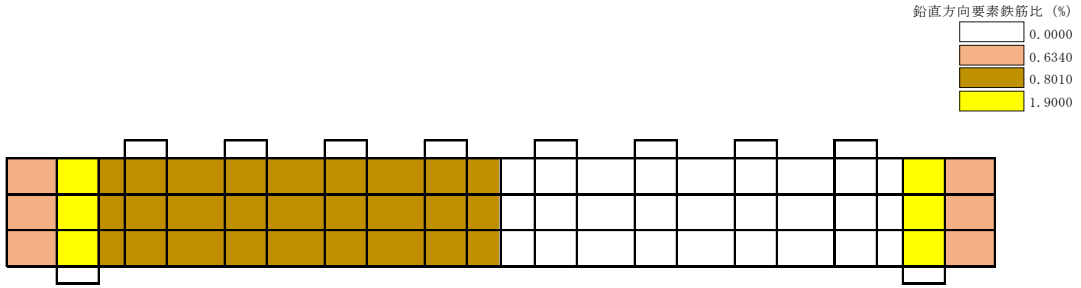


図 5-48 要素鉄筋比 (鉛直方向)

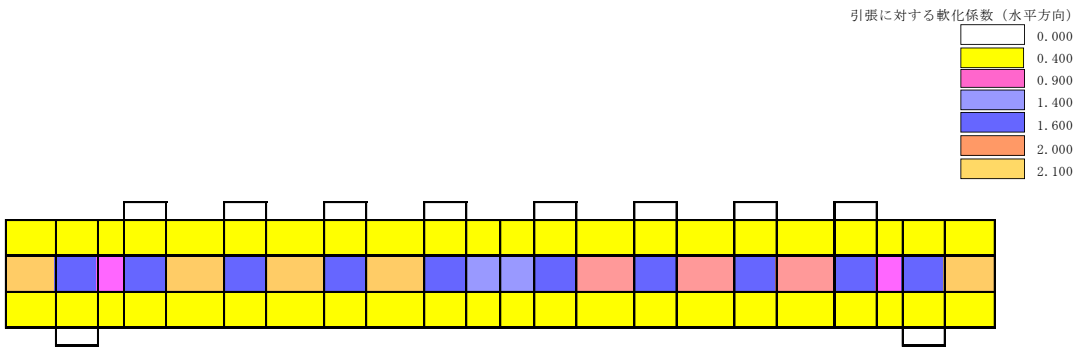


図 5-49 引張に対する軟化係数 (水平方向)

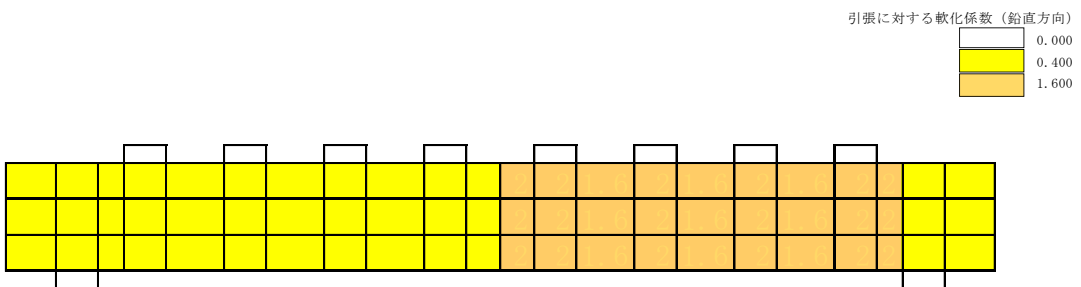
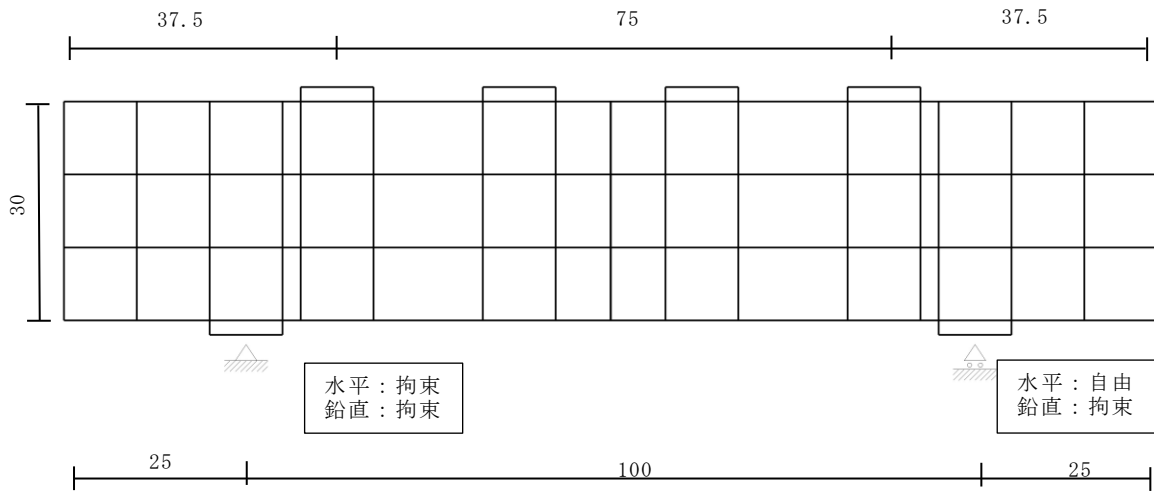


図 5-50 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.11 Case No. 11（着目点：分布荷重を受けるスパンの効果）

Case No. 11 は基本モデル Case No. 10 のスパンの長さ（1.00m→0.50m）及びコンクリートの圧縮強度（32.3N/mm<sup>2</sup>→41.4N/mm<sup>2</sup>）を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-51 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-21 に、材料諸元を表 5-22 に示す。要素鉄筋比を図 5-52 及び図 5-53 に、引張に対する軟化係数を図 5-54 及び図 5-55 に示す。



(単位：cm)

図 5-51 メッシュ図及び境界条件

表 5-21 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	15	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.041	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり，他の区間より先行して破壊に至るように，鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-22 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	41.4	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.75	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 41.4^{2/3}$ = 2.753 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	363	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

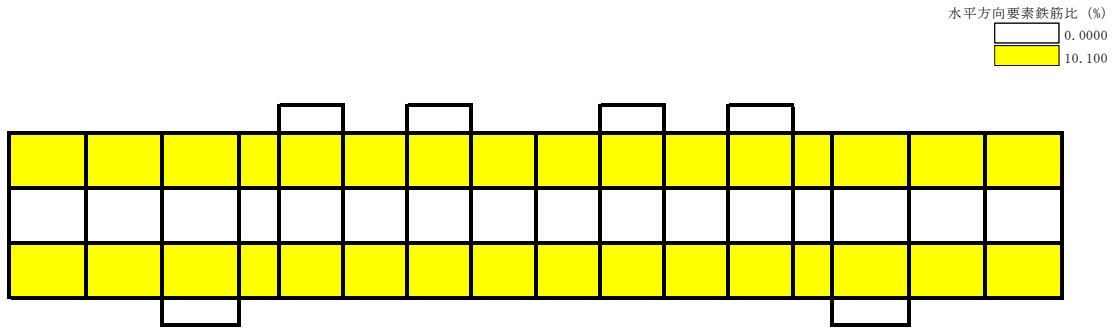


図 5-52 要素鉄筋比 (水平方向)

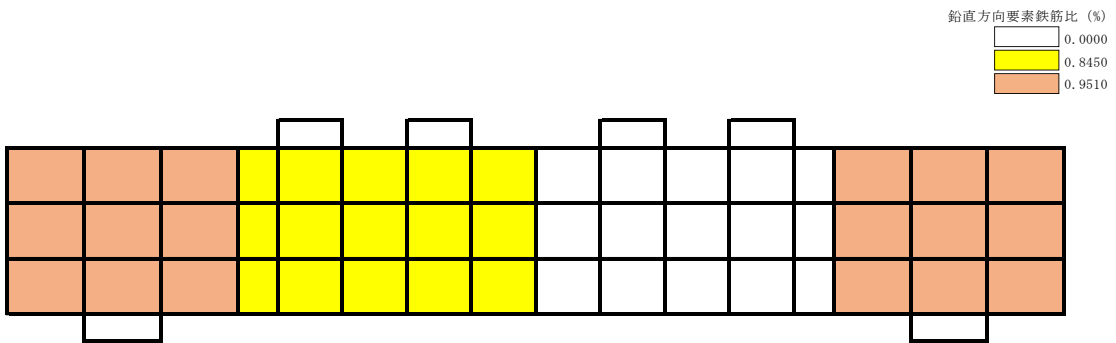


図 5-53 要素鉄筋比 (鉛直方向)

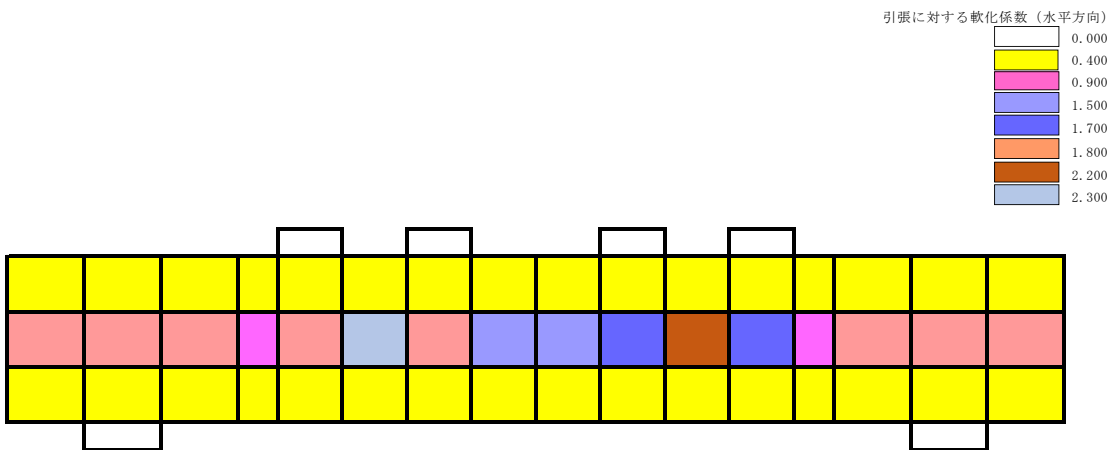


図 5-54 引張に対する軟化係数 (水平方向)

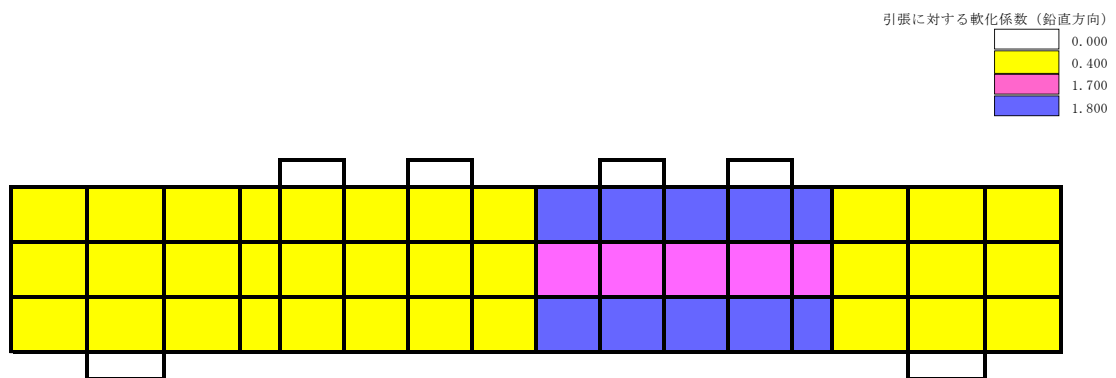
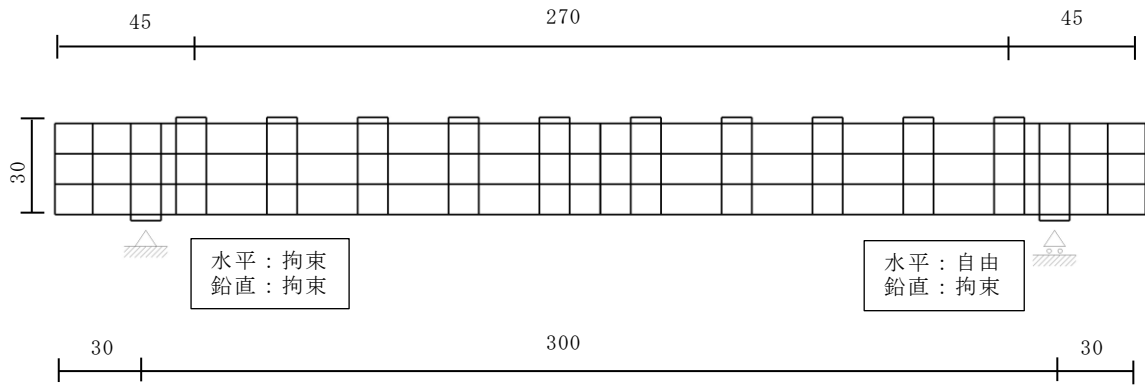


図 5-55 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.12 Case No. 12 (着目点：分布荷重を受けるスパンの効果)

Case No. 12 は基本モデル Case No. 10 のスパンの長さ (1.00m→1.50m) 及びコンクリートの圧縮強度 (32.3N/mm<sup>2</sup>→41.7N/mm<sup>2</sup>) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-56 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-23 に、材料諸元を表 5-24 に示す。要素鉄筋比を図 5-57 及び図 5-58 に、引張に対する軟化係数を図 5-59 及び図 5-60 に示す。



(単位：cm)

図 5-56 メッシュ図及び境界条件



表 5-23 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	15	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.041	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり，他の区間より先行して破壊に至るように，鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-24 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	41.7	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.77	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 41.7^{2/3} = 2.765$ コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	363	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

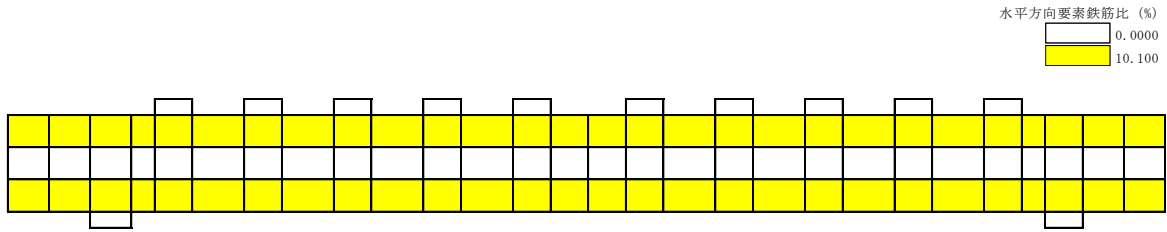


図 5-57 要素鉄筋比 (水平方向)

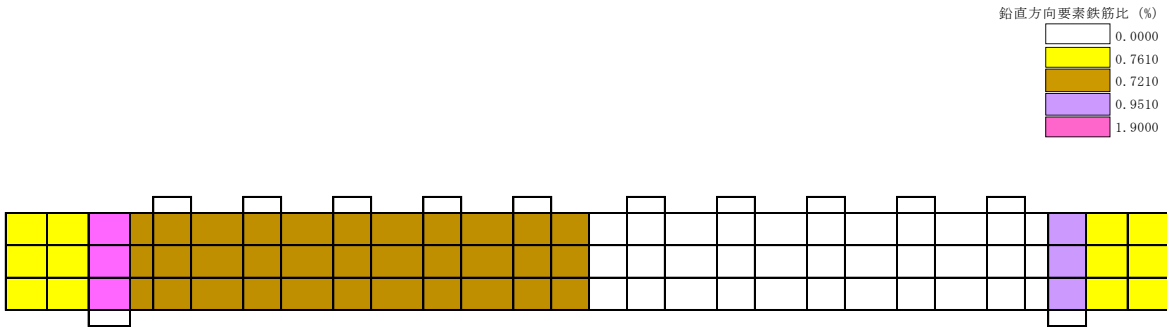


図 5-58 要素鉄筋比 (鉛直方向)

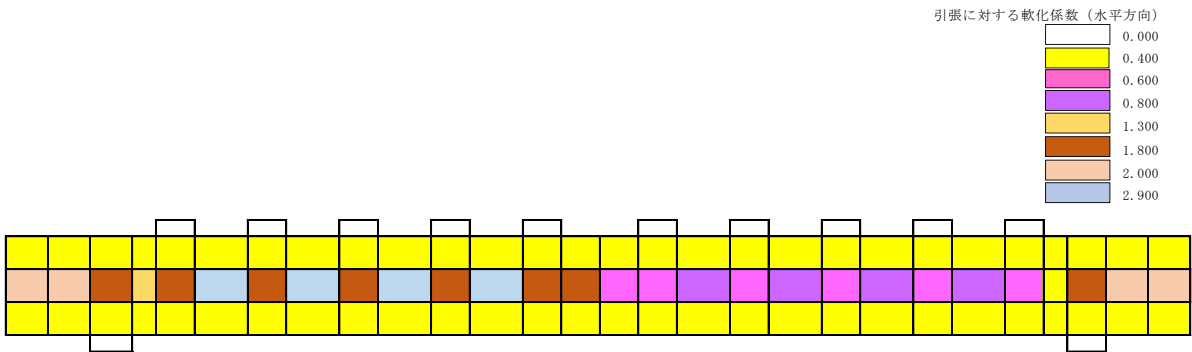


図 5-59 引張に対する軟化係数 (水平方向)

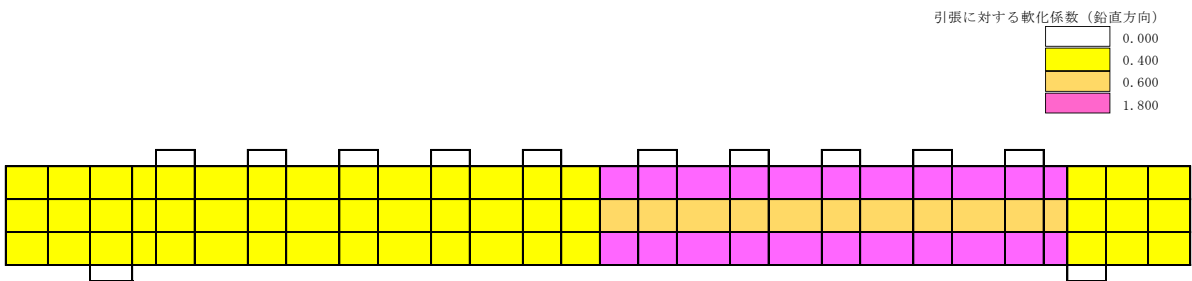


図 5-60 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.13 Case No. 13 (着目点：モーメント分布の効果)

Case No. 13 は基本モデル Case No. 10 の作用荷重倍率 ( $P' / P = 0 \rightarrow 1.50$ ) 及びコンクリートの圧縮強度 ( $32.3\text{N/mm}^2 \rightarrow 33.6\text{N/mm}^2$ ) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-61 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-25 に、材料諸元を表 5-26 に示す。要素鉄筋比を図 5-62 及び図 5-63 に、引張に対する軟化係数を図 5-64 及び図 5-65 に示す。

表 5-25 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	15	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.041	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり，他の区間より先行して破壊に至るように，鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-26 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	33.6	$\text{N/mm}^2$	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.39	$\text{N/mm}^2$	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 33.6^{2/3}$ = 2.3949 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	$\text{kN/m}^3$	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	$\text{kN/mm}^2$	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	363	$\text{N/mm}^2$	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	$\text{kN/m}^3$	コンクリート標準示方書 2012

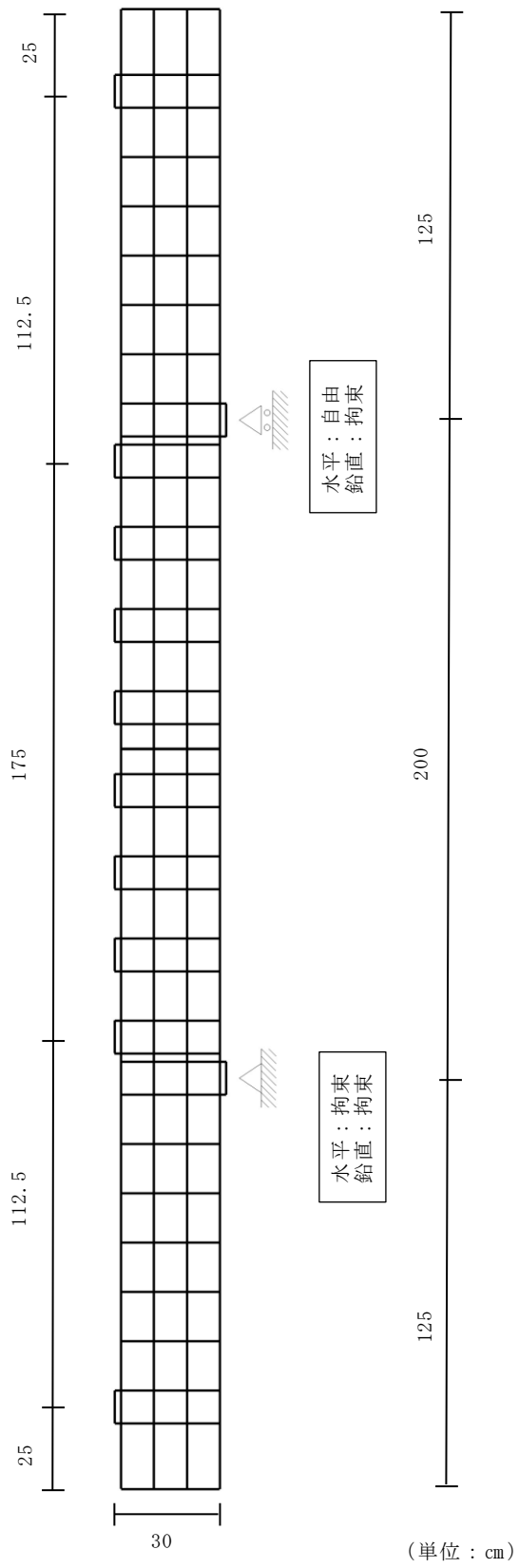


図 5-61 メッシュ図及び境界条件

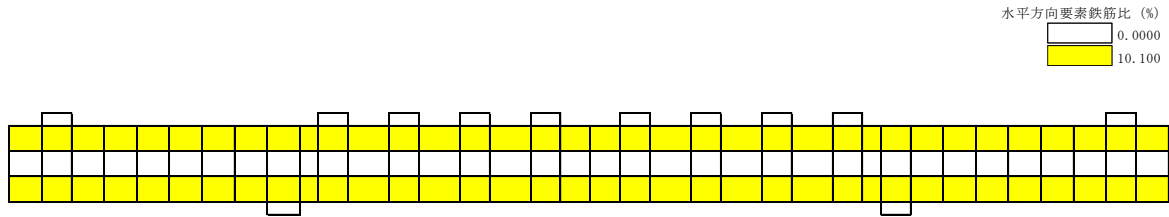


図 5-62 要素鉄筋比 (水平方向)

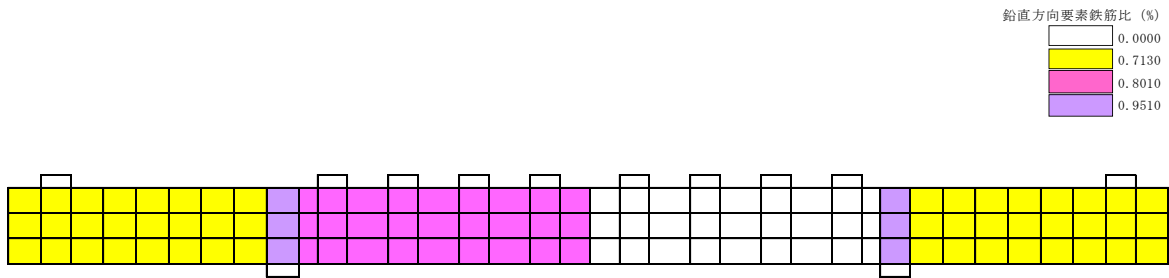


図 5-63 要素鉄筋比 (鉛直方向)

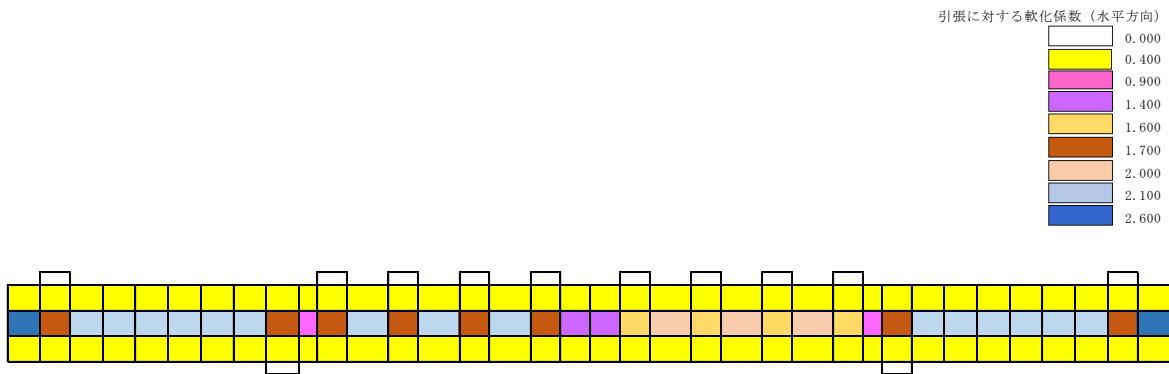


図 5-64 引張に対する軟化係数 (水平方向)

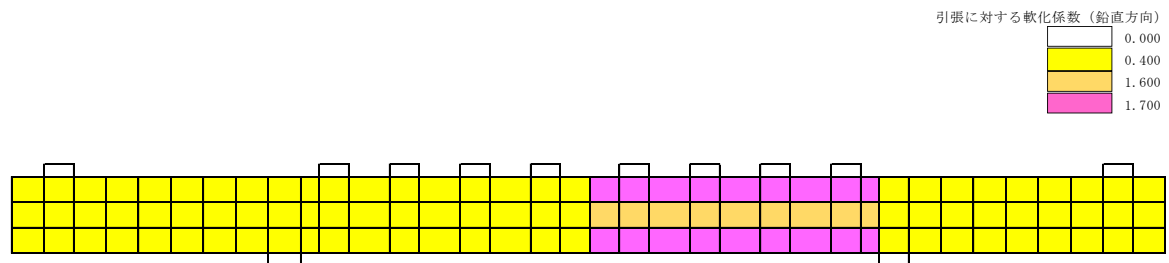


図 5-65 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.14 Case No. 14 (着目点：モーメント分布の効果)

Case No. 14 は基本モデル Case No. 10 の作用荷重倍率 ( $P' / P = 0 \rightarrow 2.00$ ) 及びコンクリートの圧縮強度 ( $32.3\text{N/mm}^2 \rightarrow 36.2\text{N/mm}^2$ ) を変更したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-66 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-27 に、材料諸元を表 5-28 に示す。要素鉄筋比を図 5-67 及び図 5-68 に、引張に対する軟化係数を図 5-69 及び図 5-70 に示す。

表 5-27 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	15	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	25	同上
引張鉄筋比	0.041	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり，他の区間より先行して破壊に至るように，鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-28 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	36.2	$\text{N/mm}^2$	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.52	$\text{N/mm}^2$	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 36.2^{2/3} = 2.516$ コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	$\text{kN/m}^3$	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	$\text{kN/mm}^2$	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	363	$\text{N/mm}^2$	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	$\text{kN/m}^3$	コンクリート標準示方書 2012

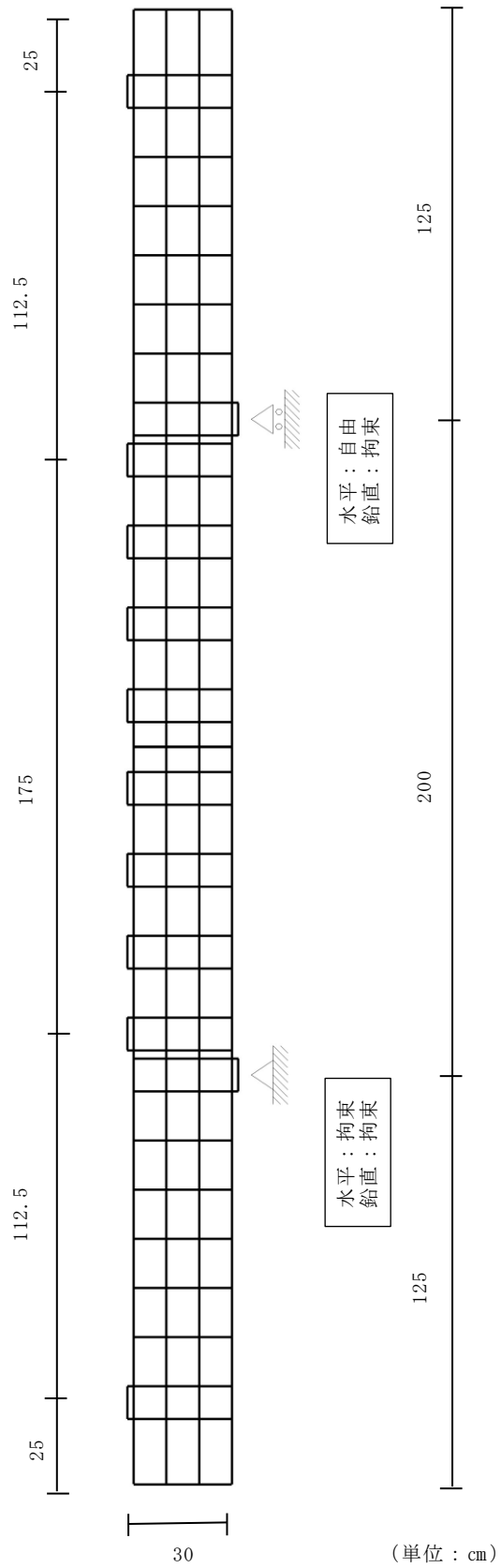


図 5-66 メッシュ図及び境界条件

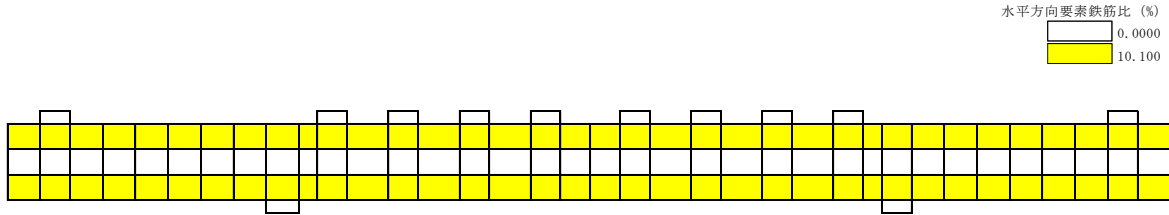


図 5-67 要素鉄筋比 (水平方向)

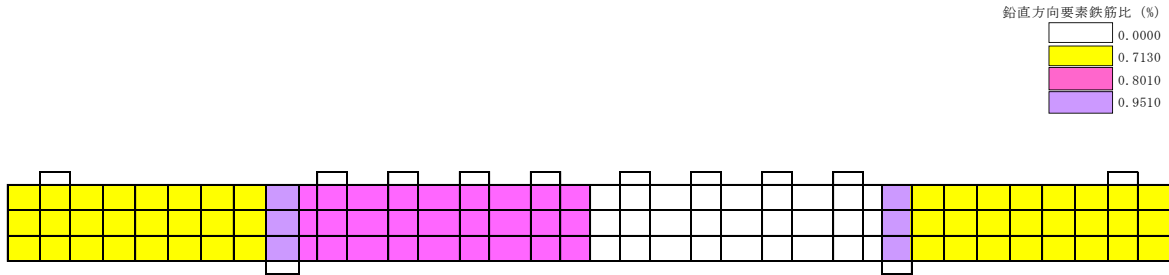


図 5-68 要素鉄筋比 (鉛直方向)

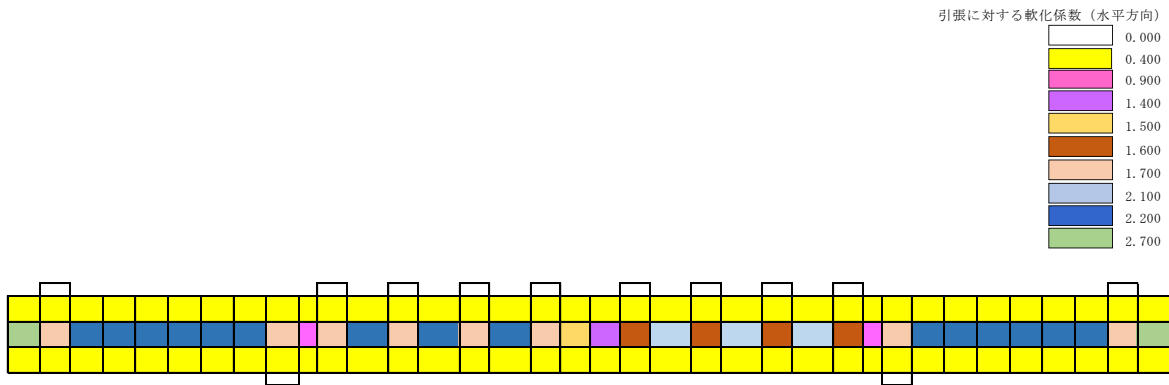


図 5-69 引張に対する軟化係数 (水平方向)

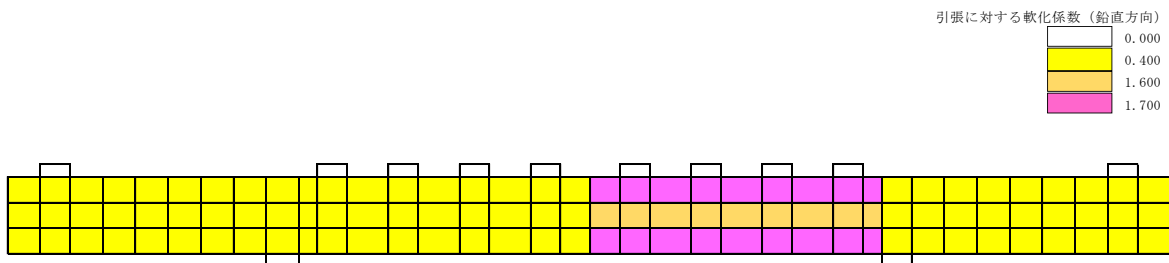


図 5-70 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)



5.15 Case No.15 (Case No.15～17 の基本モデル)

Case No.15 は Case No.15～17 の基本モデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-71 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-29 に、材料諸元を表 5-30 に示す。要素鉄筋比を図 5-72 及び図 5-73 に、引張に対する軟化係数を図 5-74 及び図 5-75 に示す。

表 5-29 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	16	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	26	同上
引張鉄筋比	0.035	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり、他の区間より先行して破壊に至るように、鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-30 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	33.7	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.40	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 33.7^{2/3}$ = 2.399 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	511	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

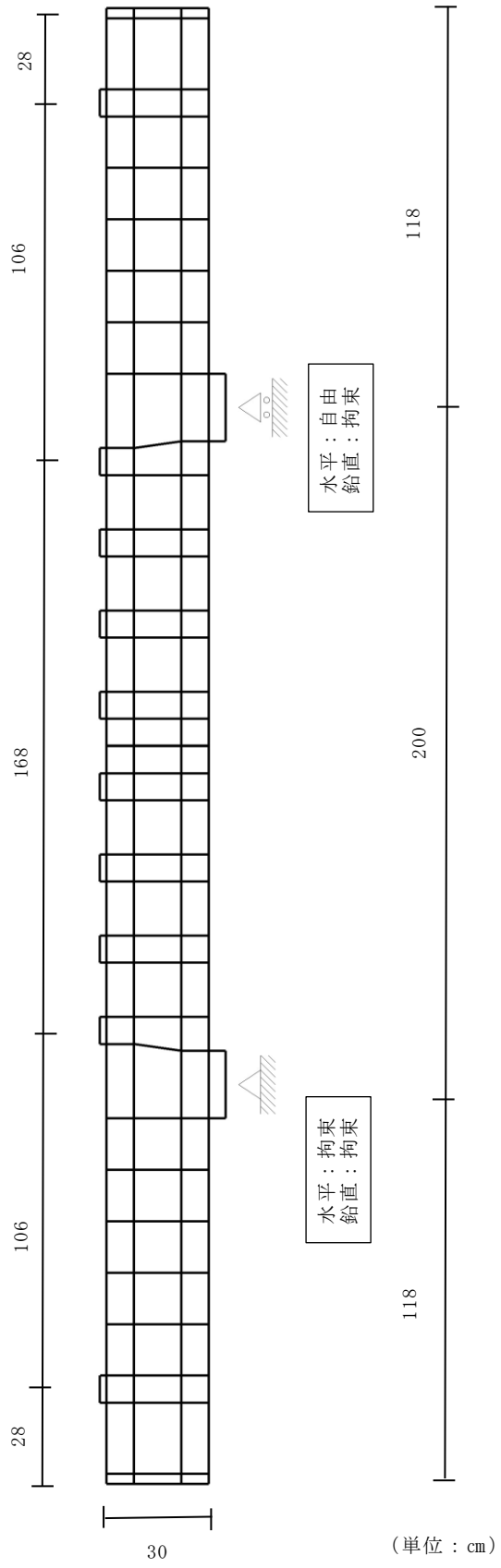


図 5-71 メッシュ図及び境界条件

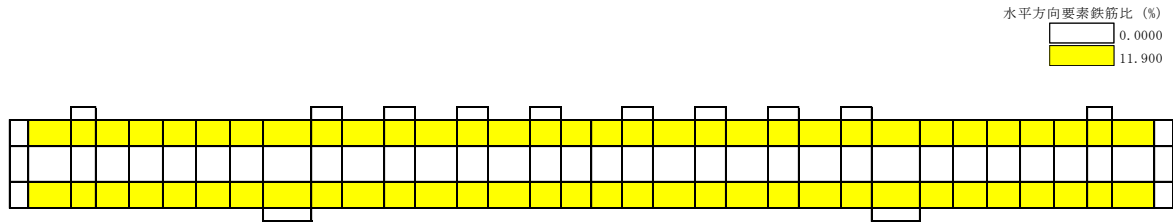


図 5-72 要素鉄筋比 (水平方向)

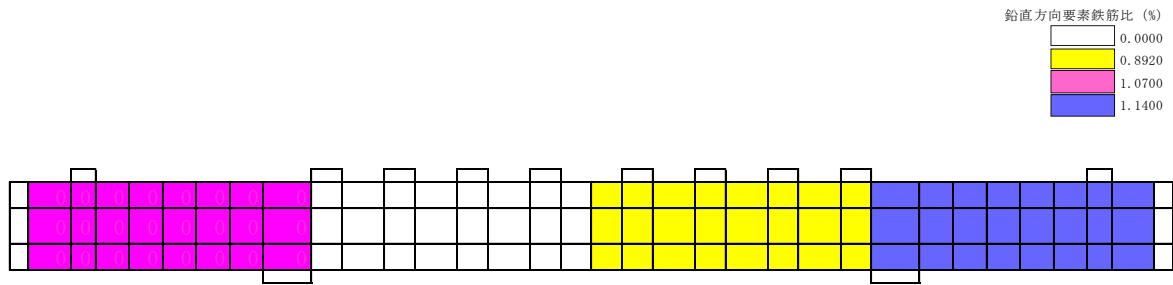


図 5-73 要素鉄筋比 (鉛直方向)

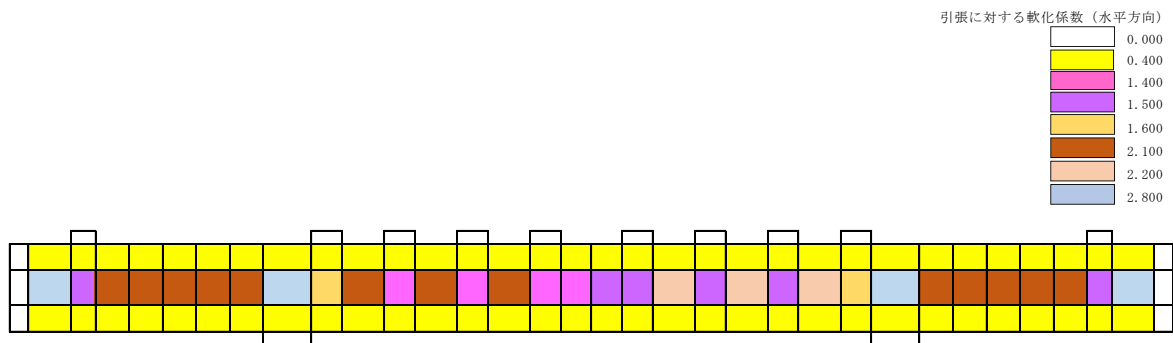


図 5-74 引張に対する軟化係数 (水平方向)

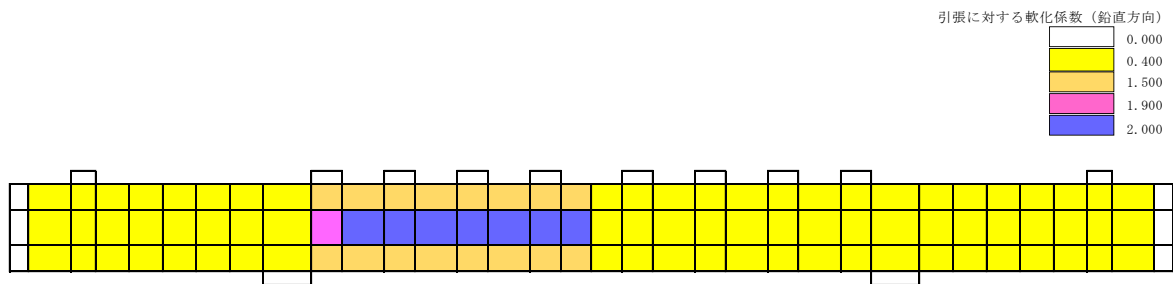


図 5-75 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.16 Case No.16（着目点：せん断補強筋の効果）

Case No.16 は基本モデル Case No.15 にせん断補強筋を追加したモデルである。解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-76 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-31 に、材料諸元を表 5-32 に示す。要素鉄筋比を図 5-77 及び図 5-78 に、引張に対する軟化係数を図 5-79 及び図 5-80 に示す。

表 5-31 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	16	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	26	同上
引張鉄筋比	0.035	同上
せん断補強筋比*	0.038	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり、他の区間より先行して破壊に至るように、鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-32 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	35.0	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.46	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 35.0^{2/3}$ = 2.4609 コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	511	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

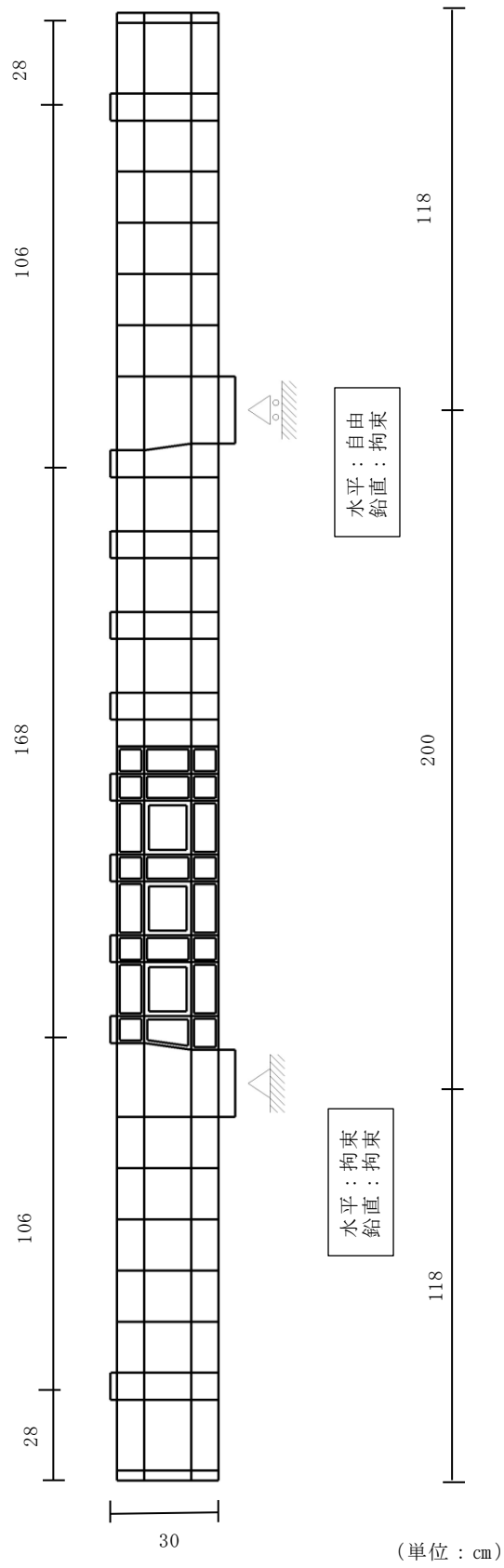


図 5-76 メッシュ図及び境界条件

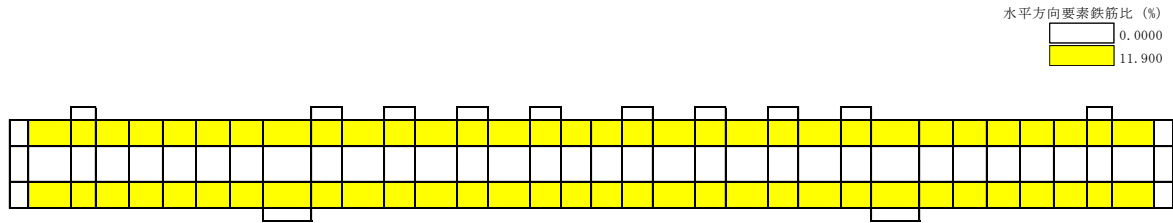


図 5-77 要素鉄筋比 (水平方向)

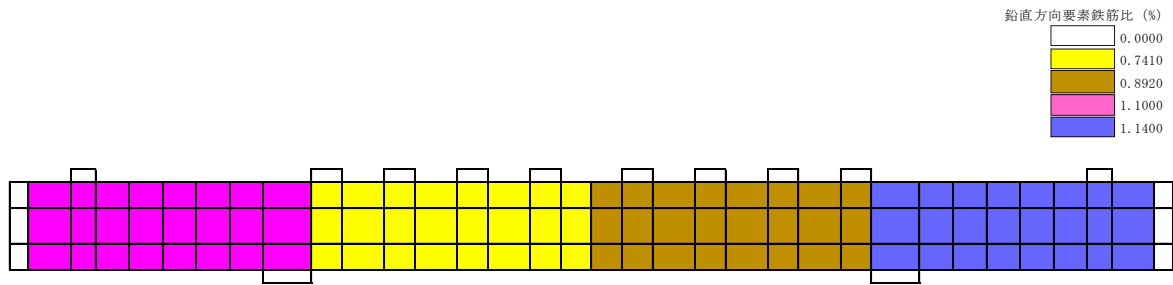


図 5-78 要素鉄筋比 (鉛直方向)

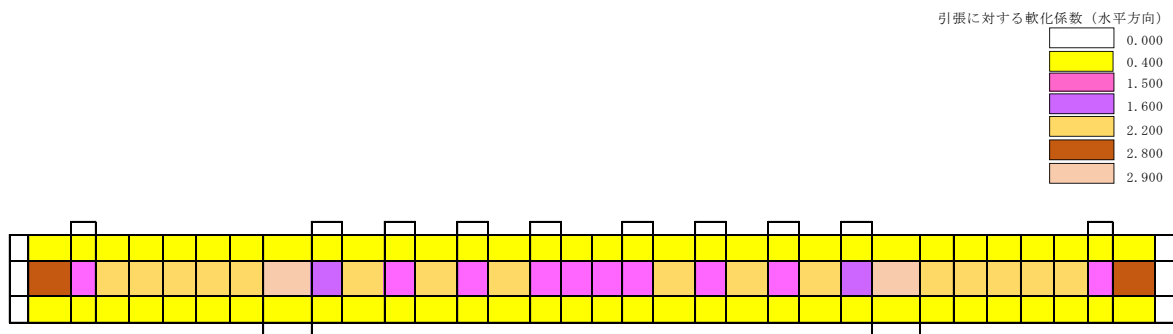


図 5-79 引張に対する軟化係数 (水平方向)

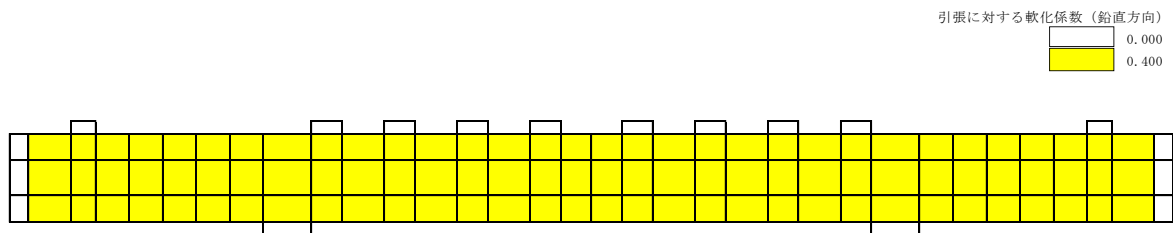


図 5-80 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

5.17 Case No.17（着目点：ハンチの効果）

Case No.17 は基本モデル Case No.15 にハンチを追加したモデルである解析モデルのメッシュ図及び境界条件を図 5-81 に示す。断面性状及び鉄筋比を表 5-33 に、材料諸元を表 5-34 に示す。要素鉄筋比を図 5-82 及び図 5-83 に、引張に対する軟化係数を図 5-84 及び図 5-85 に示す。

表 5-33 断面性状及び鉄筋比

諸元	設定値	設定根拠
部材幅 (cm)	16	土木学会マニュアル 2005
部材厚 (cm)	30	同上
有効部材厚 (cm)	26	同上
引張鉄筋比	0.035	同上
せん断補強筋比*	0.000	同上

注記\*：当該部材の破壊について着目する区間であり、他の区間より先行して破壊に至るように、鉛直方向のせん断補強鉄筋を配置しない区間のこと。

表 5-34 材料諸元

材料	諸元	設定値	単位	設定根拠
コンクリート	圧縮強度 $f'_c$	34.4	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	引張強度 $f_t$	2.43	N/mm <sup>2</sup>	$0.23f'_c{}^{2/3} = 0.23 \times 34.4^{2/3} = 2.433$ コンクリート標準示方書 2012
	単位重量 $\gamma$	23	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012
鉄筋 (主鉄筋, せん断補強鉄筋)	ヤング係数 E	200	kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書 2012
	降伏強度 $f_y$	511	N/mm <sup>2</sup>	土木学会マニュアル 2005
	単位重量 $\gamma$	77	kN/m <sup>3</sup>	コンクリート標準示方書 2012

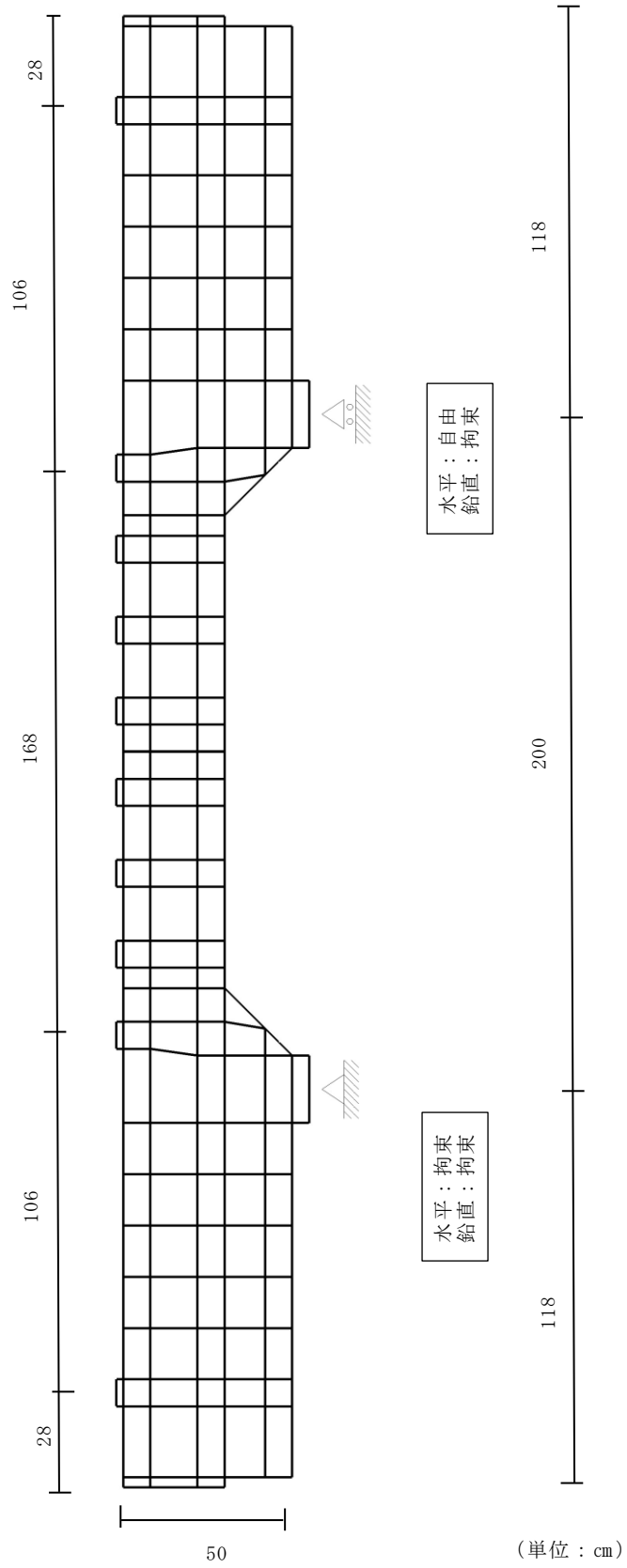


図 5-81 メッシュ図及び境界条件



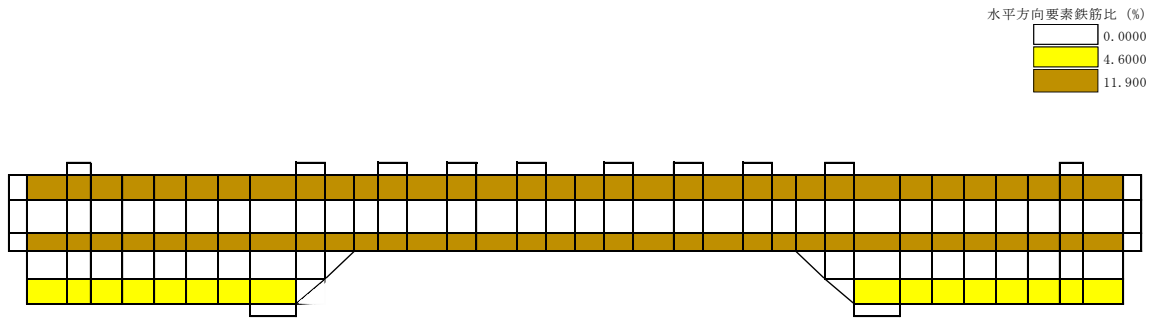


図 5-82 要素鉄筋比 (水平方向)

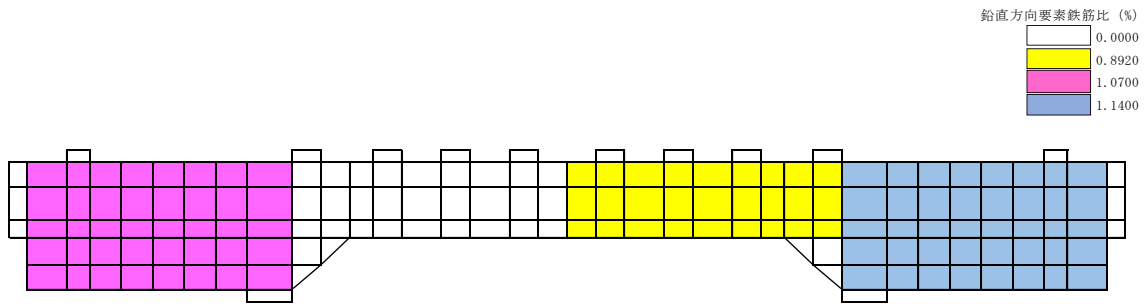


図 5-83 要素鉄筋比 (鉛直方向)

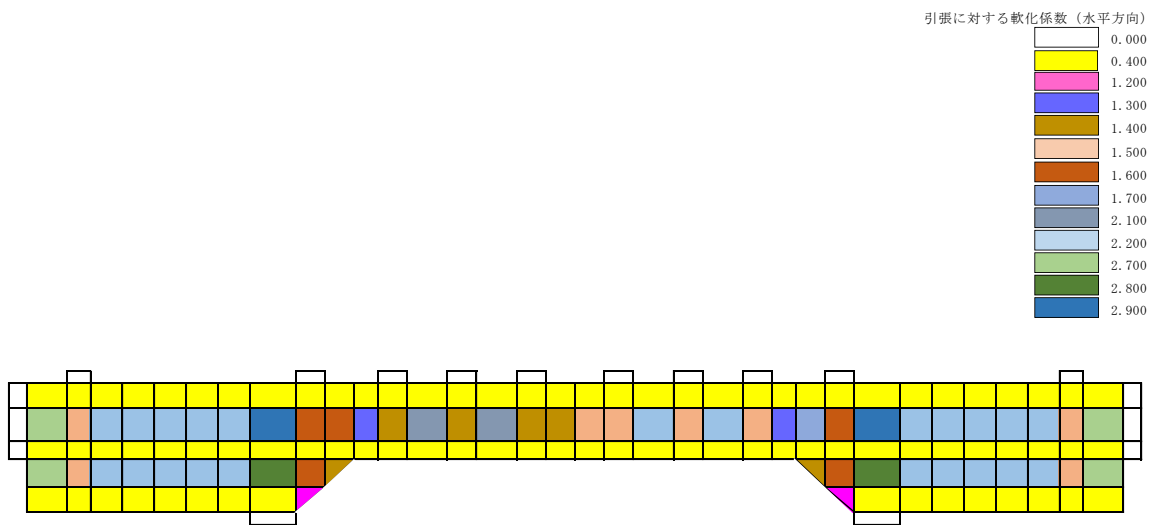


図 5-84 引張に対する軟化係数 (水平方向)

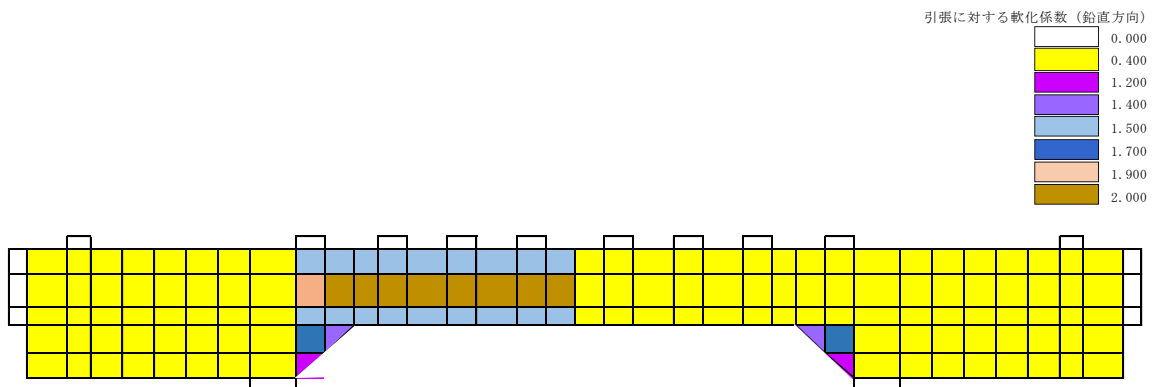


図 5-85 引張に対する軟化係数 (鉛直方向)

## 6. 解析結果と部材係数の設定

「土木学会マニュアル 2005」に示されている部材係数設定用モデル 17 体について、材料非線形解析を実施した。また、その解析結果に基づいて、材料非線形解析を用いたせん断照査で使用する部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定を行った。

### 6.1 解析結果

材料非線形解析結果から得られた支点反力と載荷点変位の関係及び破壊時（変位増分が急増するステップあるいは最大荷重時）の変形図及びひび割れ状態を図 6-1～図 6-34 に示す。

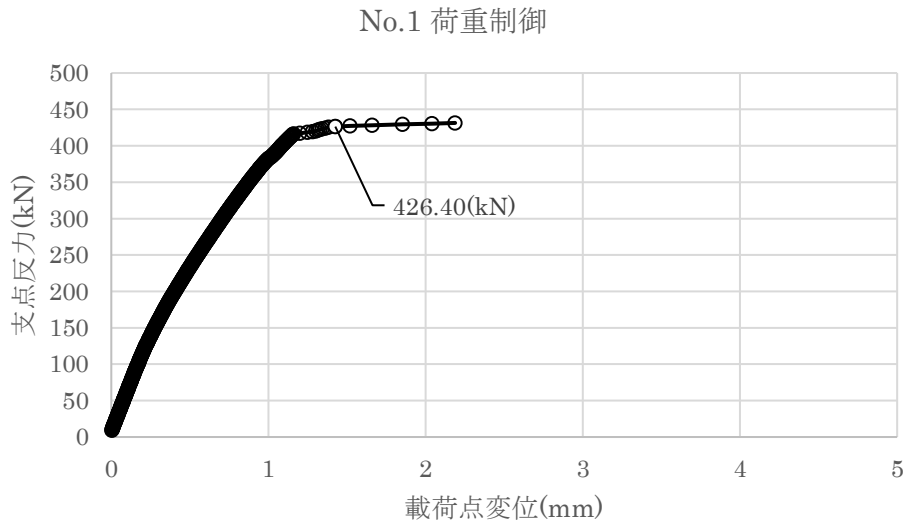
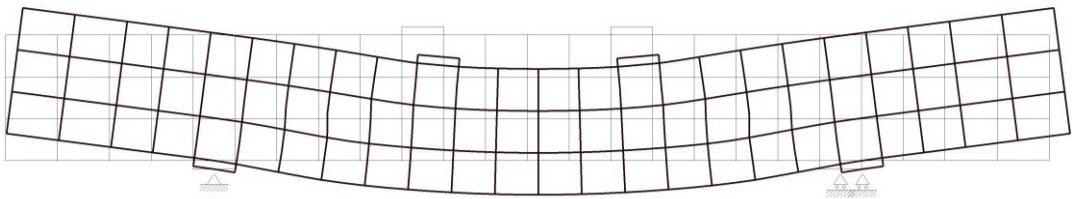


図 6-1 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 1)

<変形>

ステップ 418



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 418

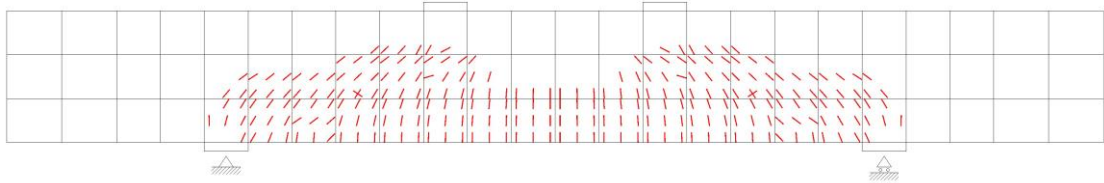


図 6-2 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 1)

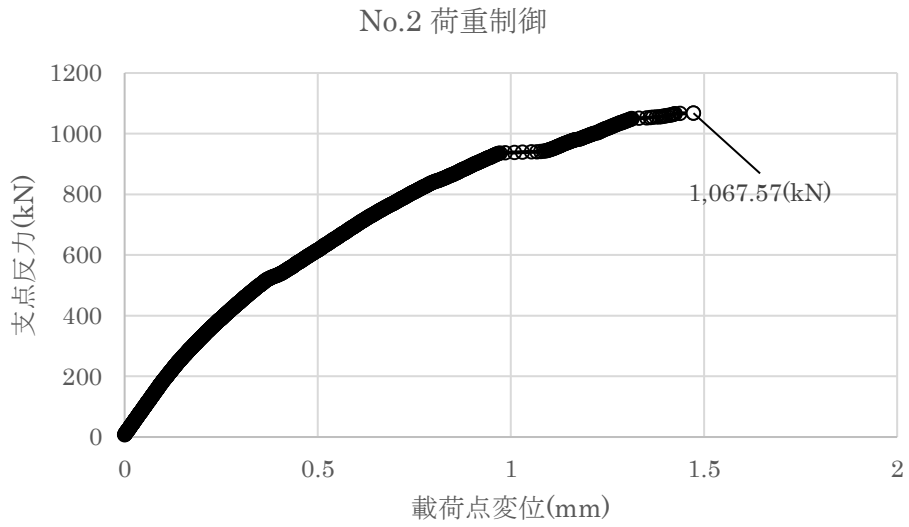
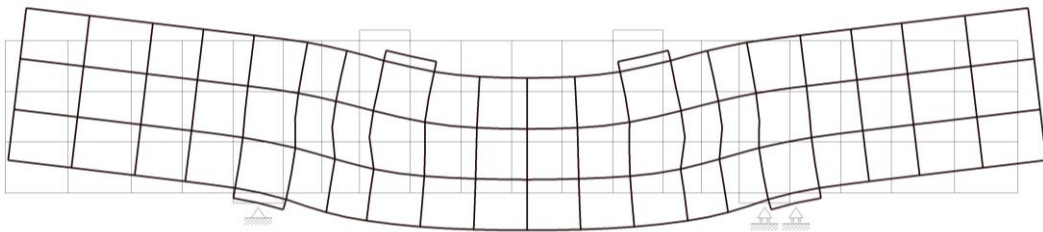


図 6-3 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 2)

<変形>

ステップ 1061



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 1061

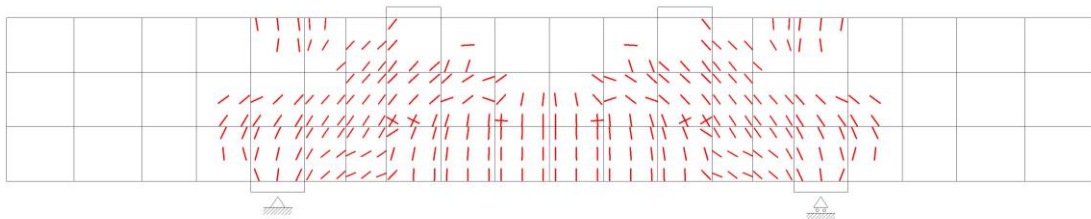


図 6-4 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 2)

No.3 荷重制御

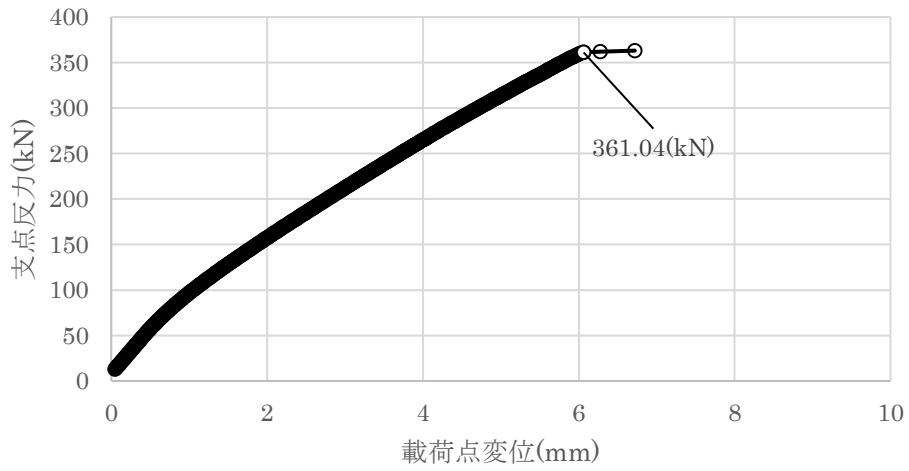
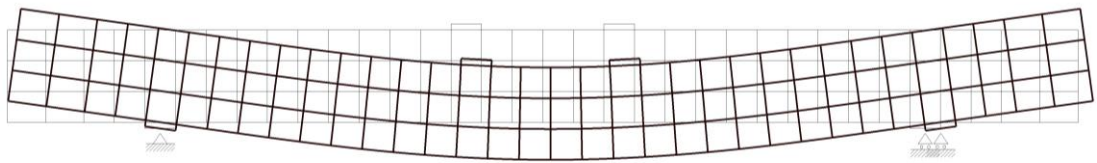


図 6-5 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 3)

<変形>

ステップ 349



×20.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 349

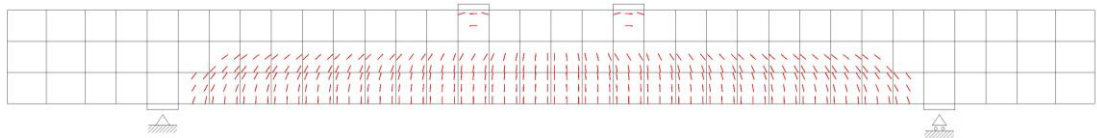


図 6-6 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 3)

No.4 荷重制御

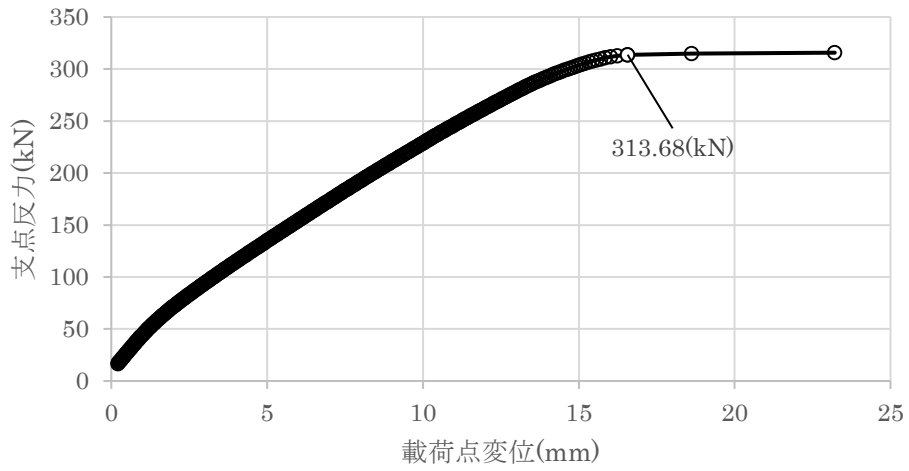


図 6-7 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 4)

<変形>

ステップ 298



×10.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 298

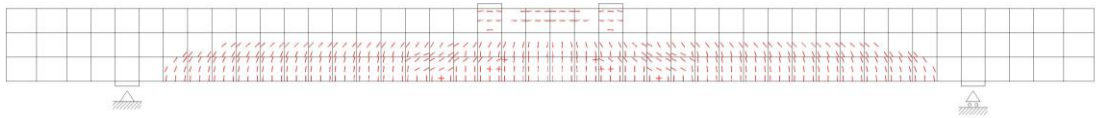


図 6-8 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 4)

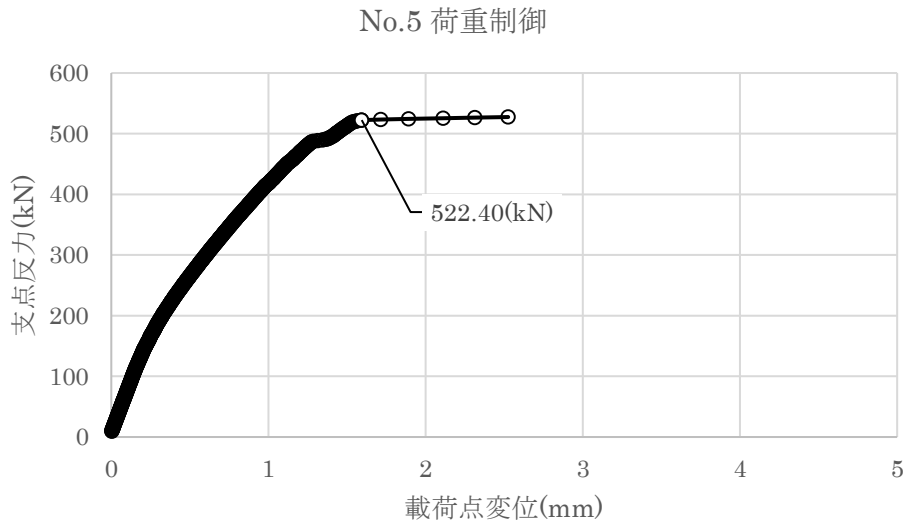
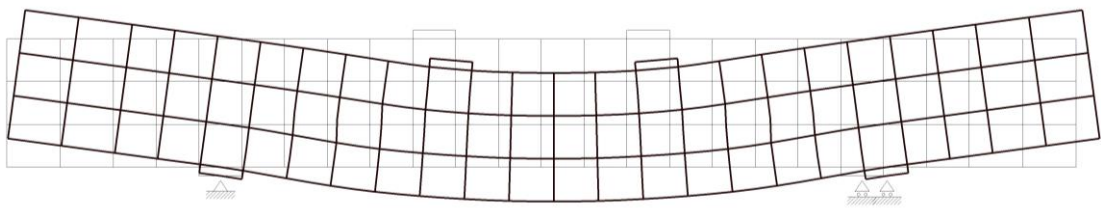


図 6-9 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 5)

<変形>

ステップ 514



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 514

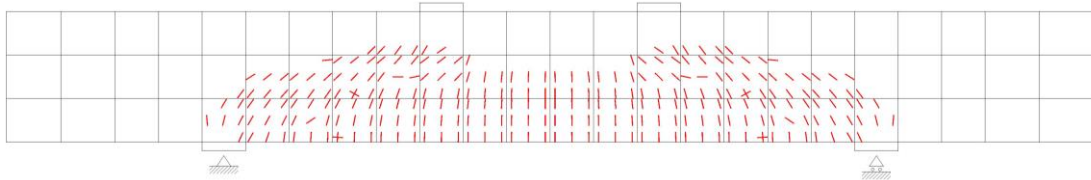


図 6-10 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 5)

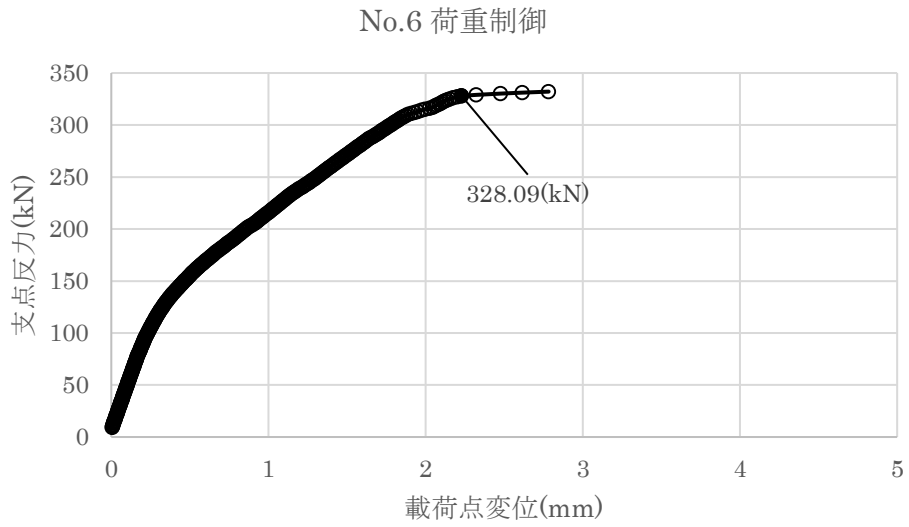
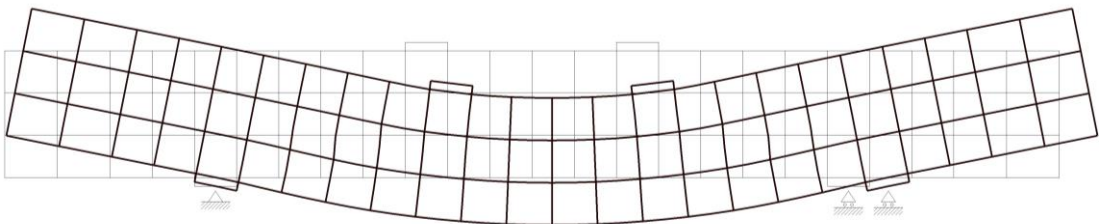


図 6-11 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 6)

<変形>

ステップ 320



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 320

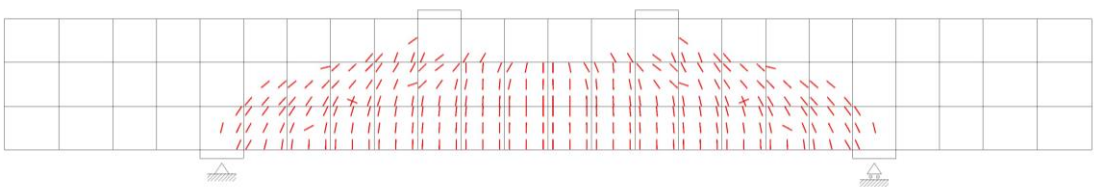


図 6-12 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 6)



No.7 荷重制御

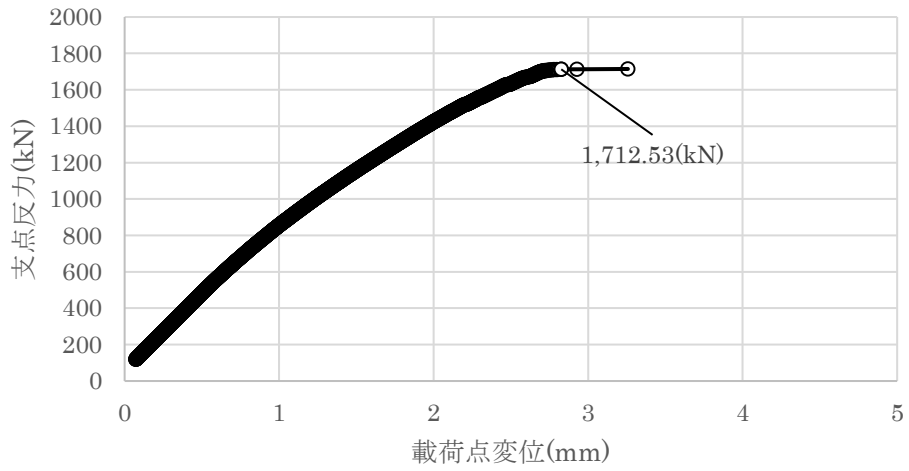
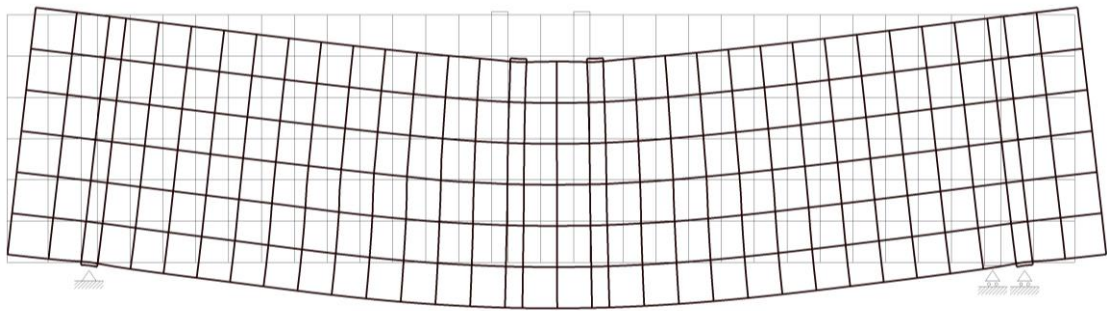


図 6-13 支点反力と荷重点変位の関係 (Case No. 7)

<変形>

ステップ 1595



×100.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 1595

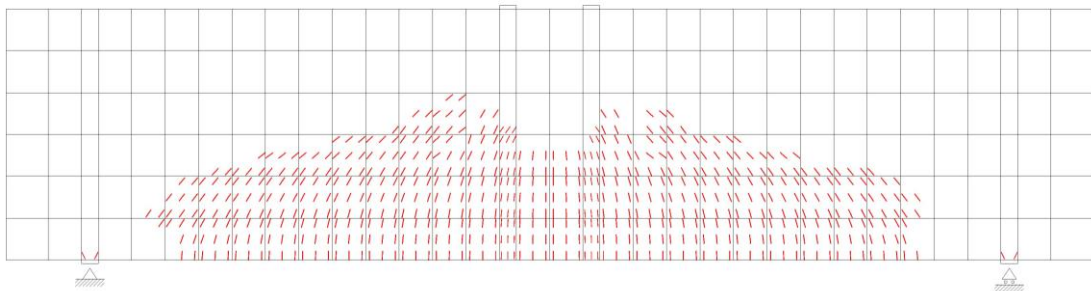


図 6-14 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 7)

No.8 荷重制御

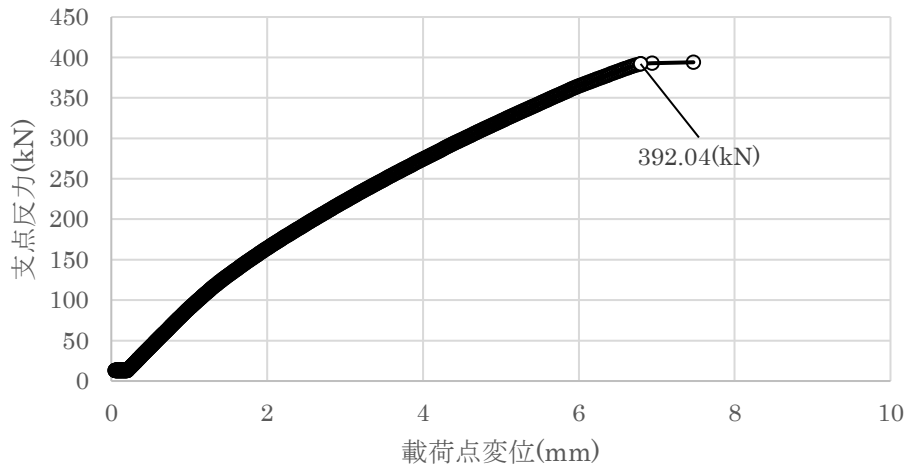
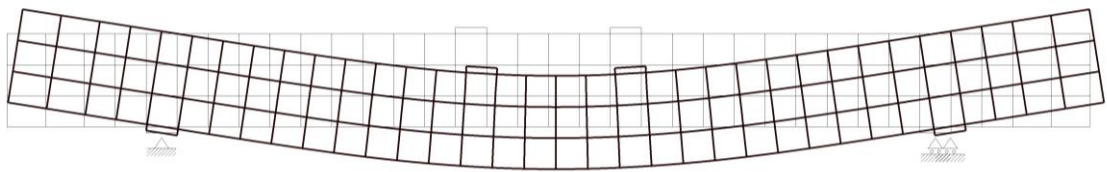


図 6-15 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 8)

<変形>

ステップ 480



×20.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 480

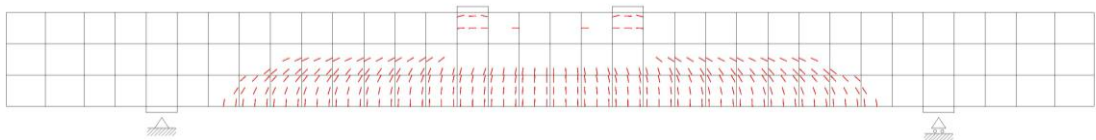


図 6-16 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 8)

No.9 荷重制御

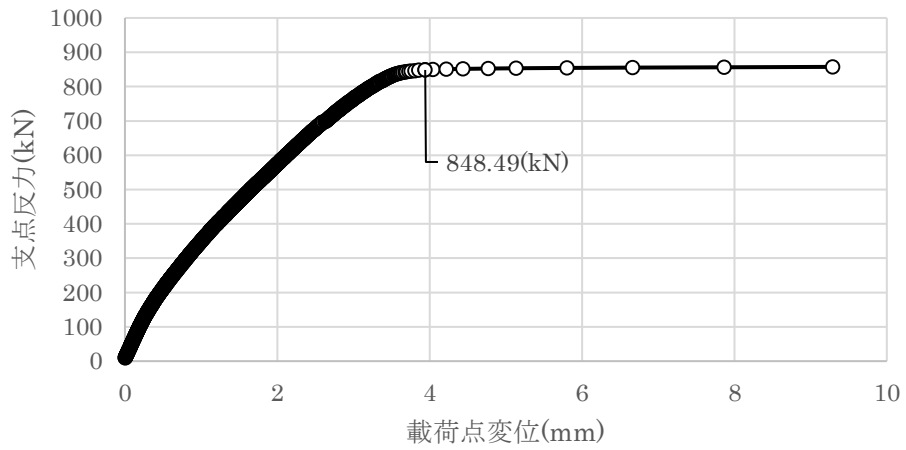
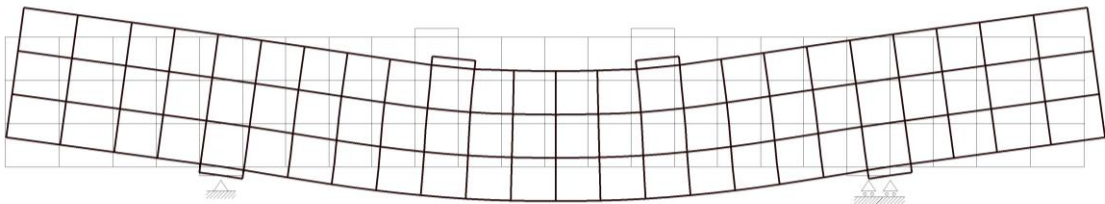


図 6-17 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 9)

<変形>

ステップ 840



×20.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 840

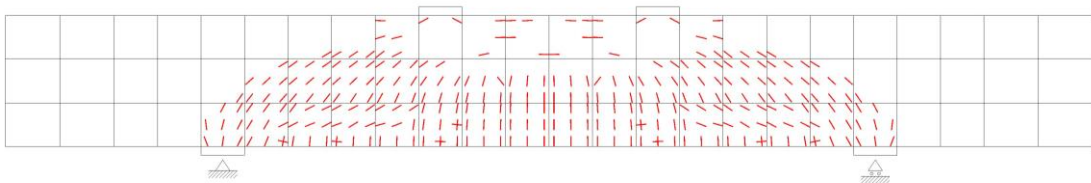


図 6-18 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 9)

No.10 荷重制御

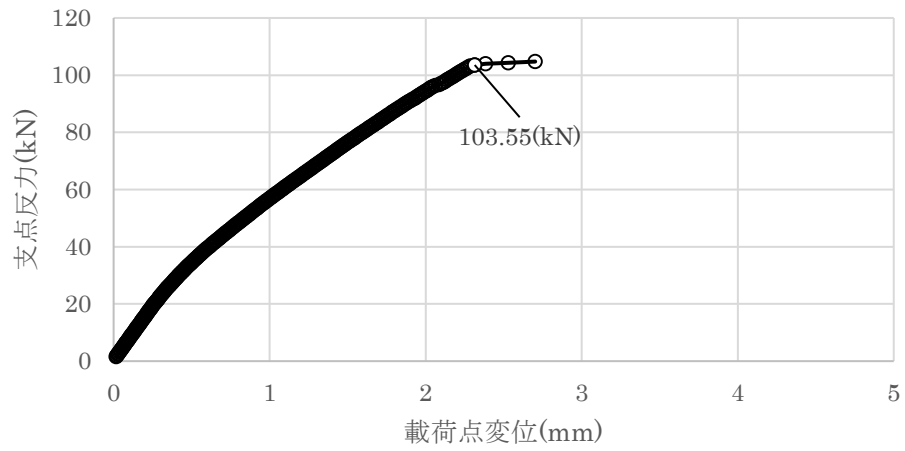
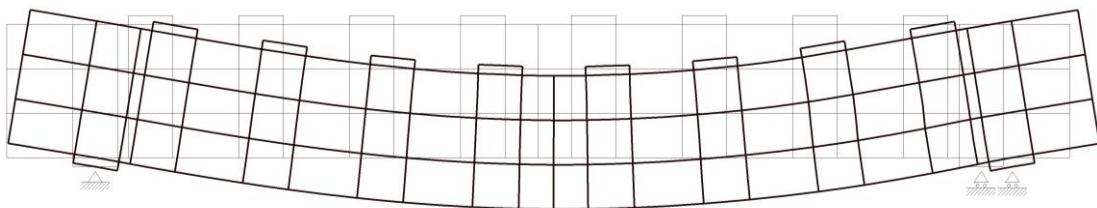


図 6-19 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 10)

<変形>

ステップ 256



× 50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 256

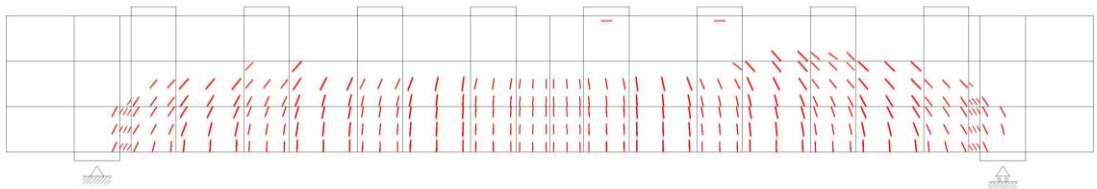


図 6-20 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 10)

No.11 荷重制御

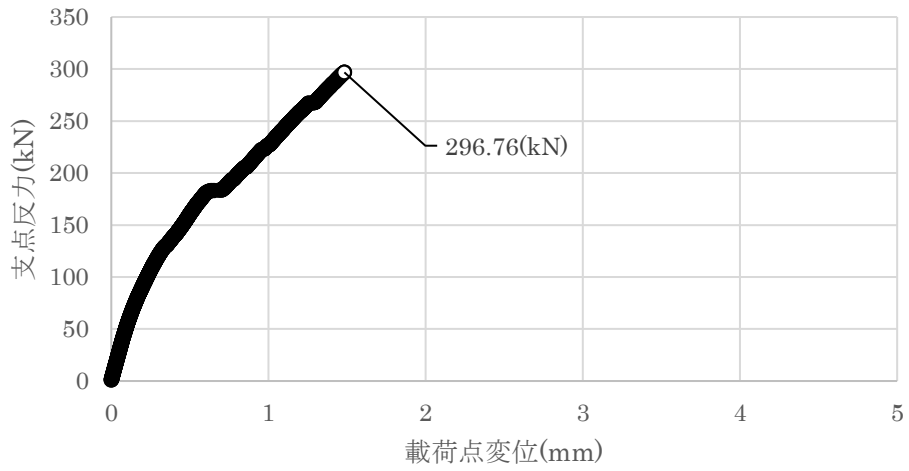
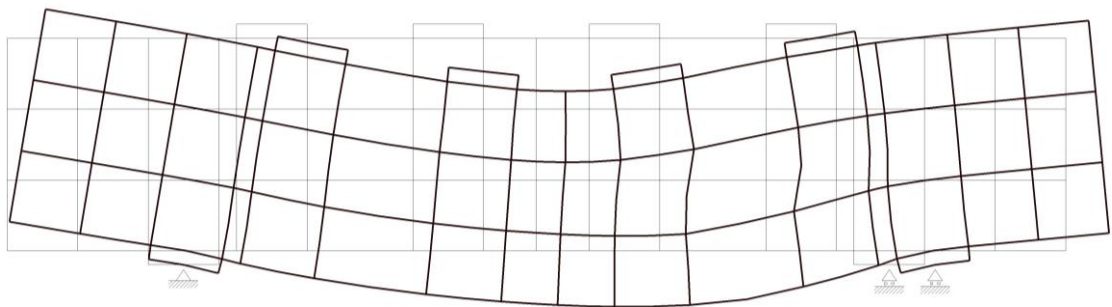


図 6-21 支点反力と載荷点変位の関係 (Case No. 11)

<変形>

ステップ 1480



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 1480

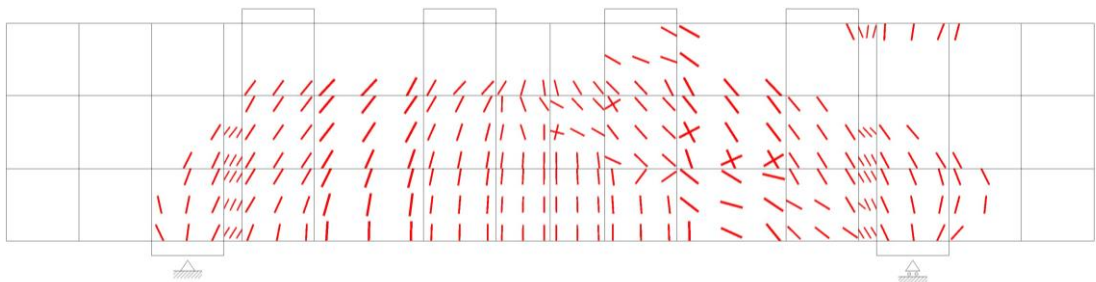


図 6-22 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 11)

No.12 荷重制御

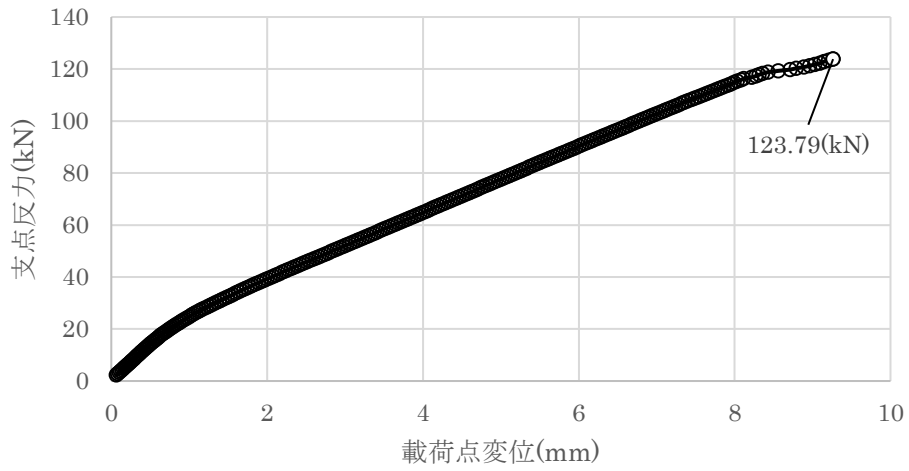
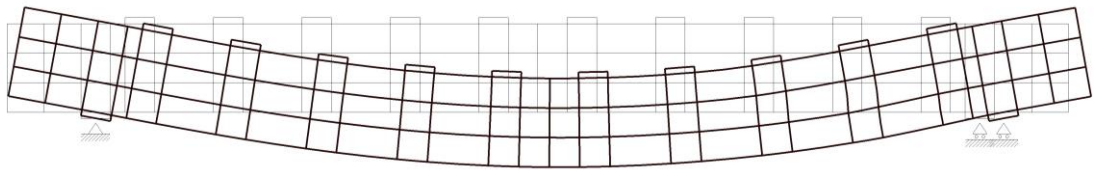


図 6-23 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 12)

<変形>

ステップ 244



×20.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 244

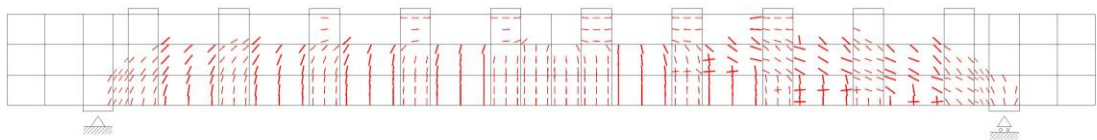


図 6-24 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 12)

No.13 荷重制御

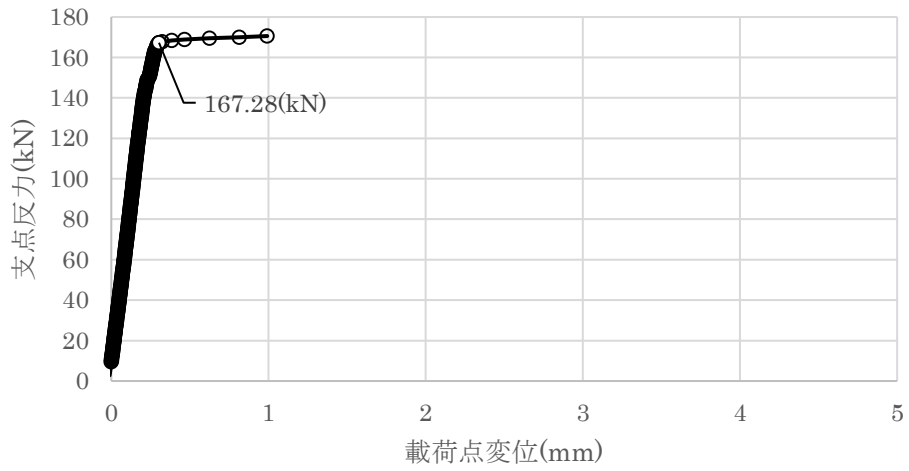
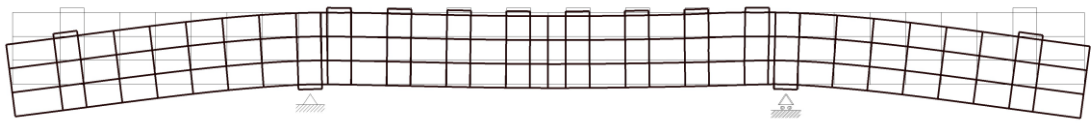


図 6-25 支反力と荷重点変位の関係 (Case No. 13)

<変形>

ステップ 300



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 300

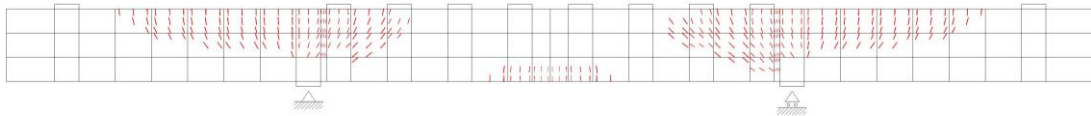


図 6-26 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 13)

No.14荷重制御

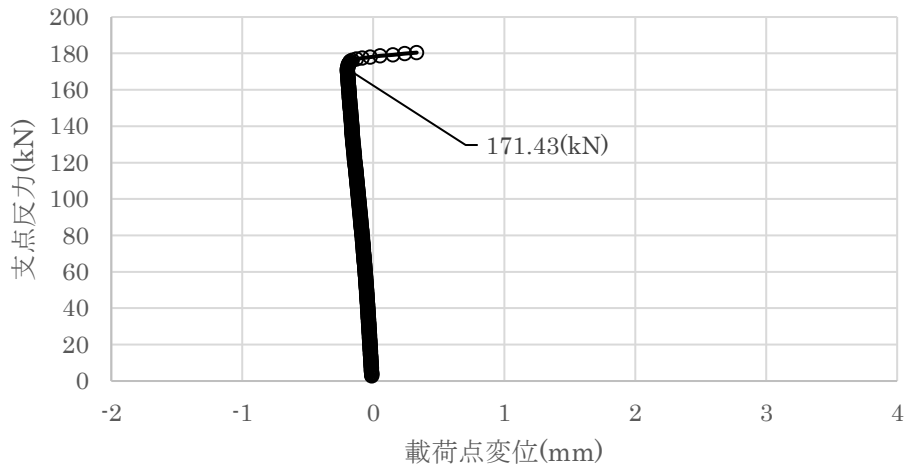
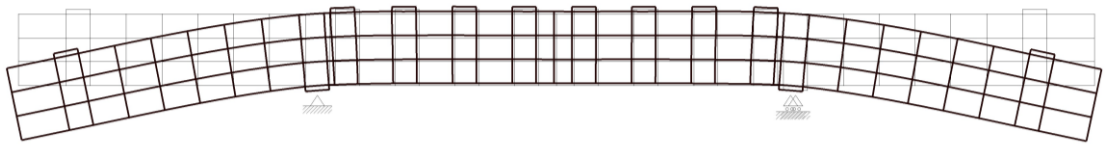


図 6-27 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 14)

<変形>

ステップ 282



×50.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 282

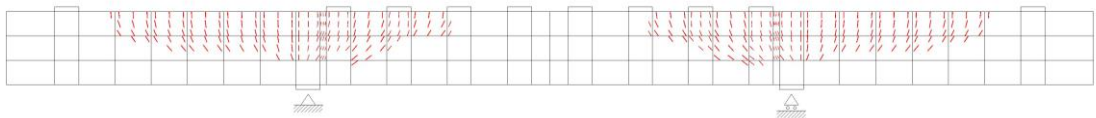


図 6-28 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 14)



No.15 荷重制御

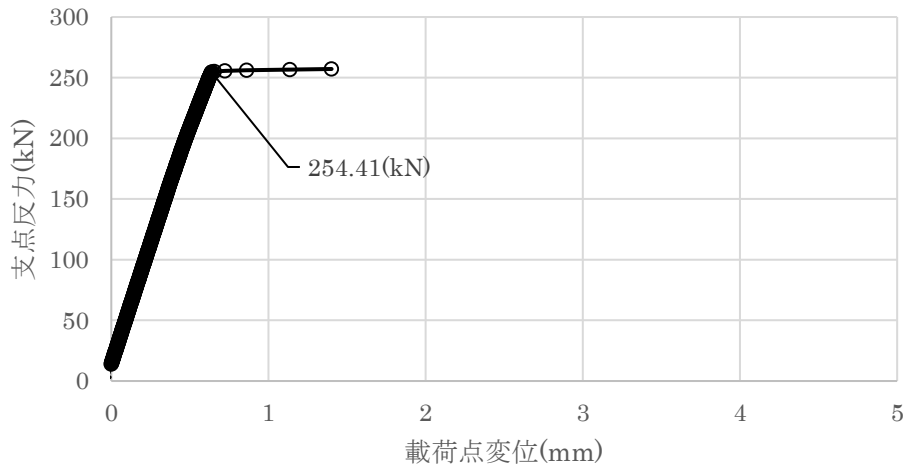
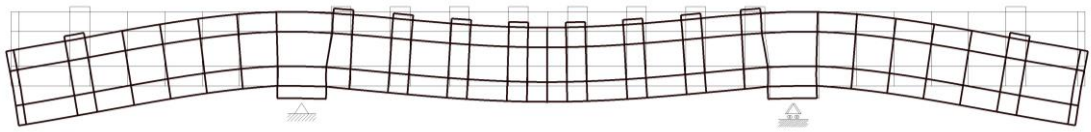


図 6-29 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 15)

<変形>

ステップ 558



×100.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 558

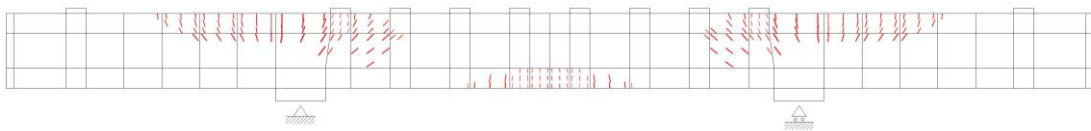


図 6-30 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 15)

No.16 荷重制御

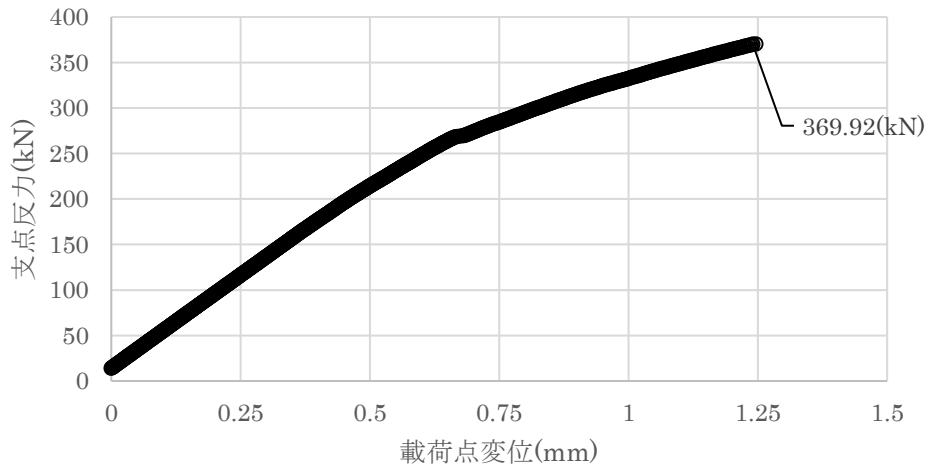
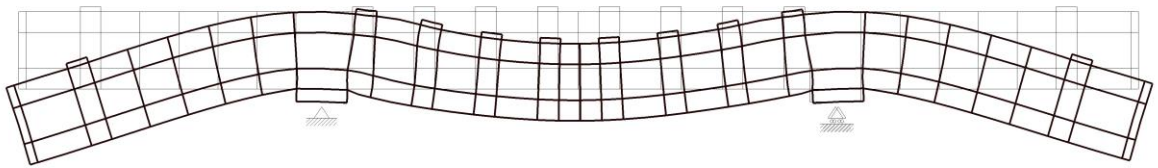


図 6-31 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 16)

<変形>

ステップ 768



×100.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 768

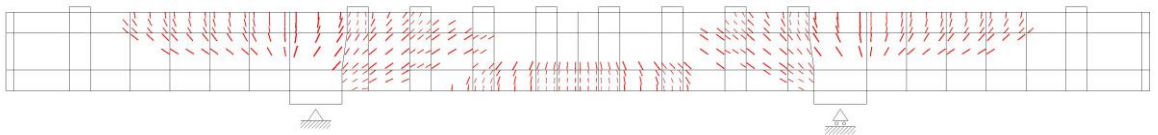


図 6-32 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 16)

No.17 荷重制御

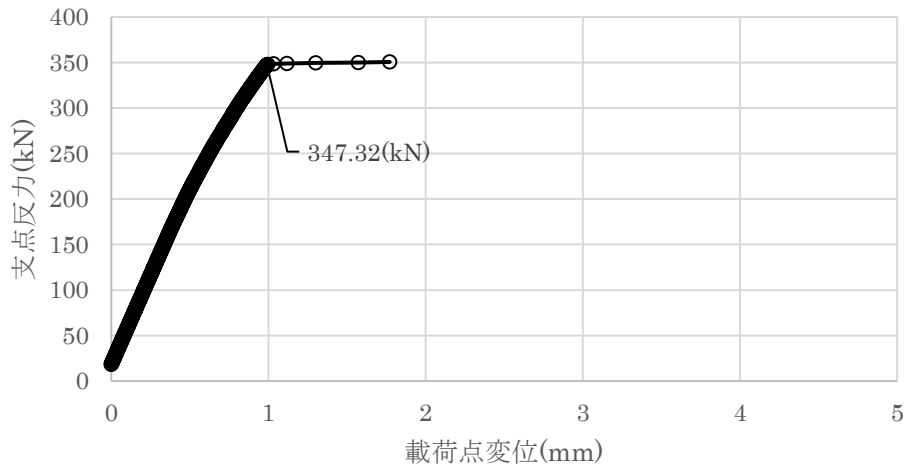
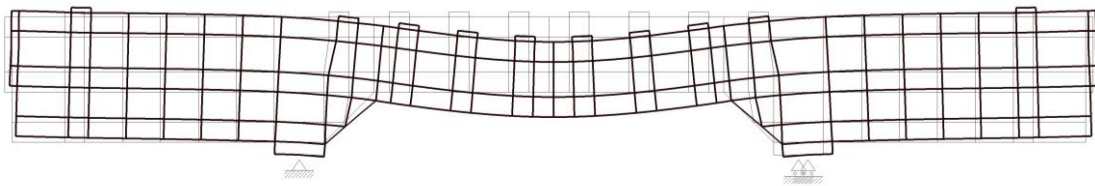


図 6-33 支点反力と载荷点変位の関係 (Case No. 17)

<変形>

ステップ 725



×100.0 倍率

<ひび割れ状態>

ステップ 725

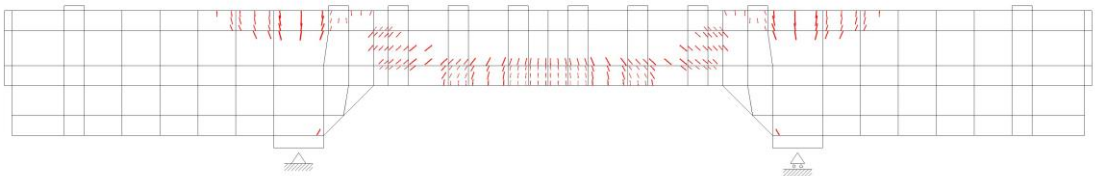


図 6-34 破壊時の変形及びひび割れ状態 (Case No. 17)

## 6.2 部材係数の設定

「土木学会マニュアル 2005」に準拠した部材係数  $\gamma_{b1}$  の算定を行った。算定結果を表 6-1 に示す。

材料非線形解析によるせん断耐力を評価する際に用いる部材係数  $\gamma_{b1}$  は、全モデルの部材係数で最大となる 1.12 とする。

表 6-1 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定

Case No.	試験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果) (②/①)	備考
	せん断耐力 (kN) ①	せん断耐力 (kN) ②		
1	475	426	0.90	
2	1187	1068	0.90	
3	324	361	1.11	
4	294	314	1.07	
5	581	522	0.90	
6	329	328	1.00	
7	1587	1713	1.08	
8	350	392	1.12	最大値
9	855	848	0.99	
10	165	104	0.63	
11	333	297	0.89	
12	127	124	0.97	
13	188	167	0.89	
14	163	171	1.05	
15	273	254	0.93	
16	356	370	1.04	
17	432	347	0.80	

## 参考資料 15 非線形はり要素のモデル化方法に関する補足

### 1. はじめに

地震応答解析に用いる解析コードは、全応力解析では「TDAPⅢ」を、有効応力解析では「FLIP」をそれぞれ使用している。構造物（鉄筋コンクリート部材）の非線形特性は、全応力解析ではファイバーモデル、有効応力解析ではM-φモデル（修正武田モデル）でモデル化している。

ファイバーモデル及びM-φモデルはいずれも鉄筋コンクリートの非線形特性としての実績を有するものの、M-φモデルでは地震時の軸力変動の影響を考慮できない点において差異がある。

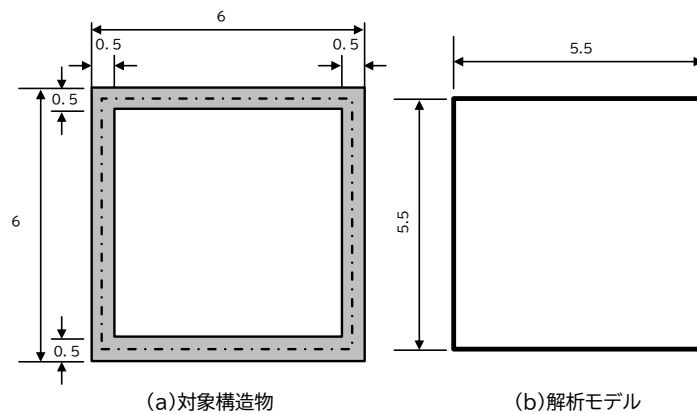
本書では、非線形はり要素のモデル化の違い（有効応力解析において軸力による影響を考慮できないM-φモデルを使用すること）が解析結果へ与える影響が軽微であることを確認する。

### 2. 評価方針

検証対象は、カルバート型構造物とする。図2-1に検証モデルの概要を示す。構造物の内空高さは5m、幅は5m、部材厚は0.5mであり、図2-1に示す鉄筋コンクリート断面を仮定する。表2-1に材料の諸元を示す。解析では、構造物を部材軸心位置に設置したはり要素によりモデル化する。

解析における荷重の載荷方法を図2-2に示す。まず、載荷ステップ1において、常時土圧を想定した鉛直荷重及び水平荷重を分布荷重として各部材に静的に作用させる。次に、載荷ステップ2において、地震時の繰り返し荷重を想定し正負交番載荷を行う。正負交番載荷は、部材降伏後の挙動までを追跡するため変位制御で行うこととし、頂版端部の節点に降伏変位 $\delta_y$ の0.5倍、1倍、1.5倍の水平変位振幅を静的に与える。図2-3に入力変位振幅を示す。

検討は、はり要素にファイバーモデルを使用した場合、及びM-φモデルを使用した場合について実施する。使用する解析コードは、ファイバーモデルは「TDAPⅢ」、M-φモデルは「FLIP」とする。



(単位：mm)

図 2-1 検証モデルの概要

表 2-1 材料の諸元

	項目	設定値
コンクリート	設計基準強度	20.6 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	2.33×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.2
鉄筋	降伏強度	345 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	2.00×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>

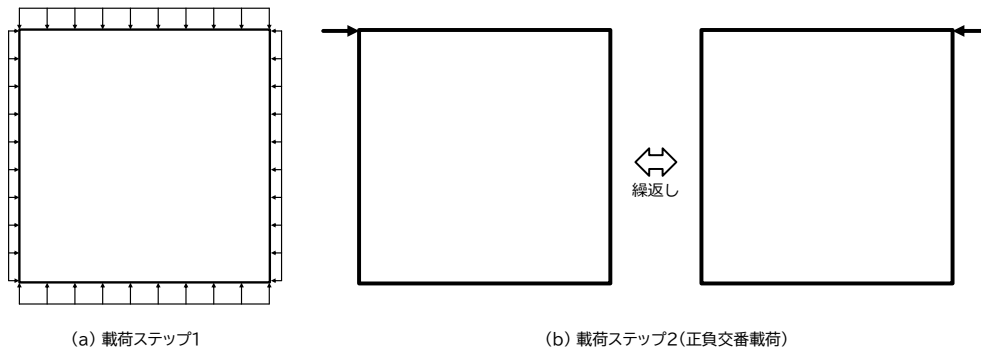


図 2-2 荷重の荷重方法

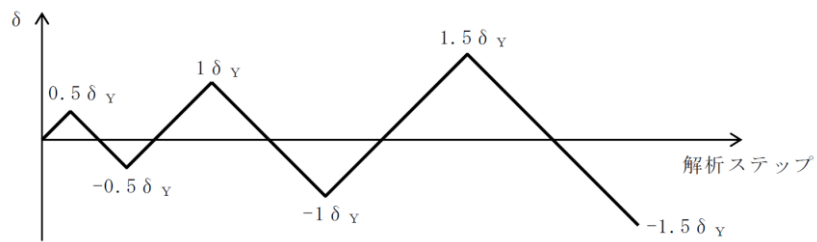


図 2-3 入力変位振幅 (正負交番荷重)

### 3. 検証結果

解析によって得られた荷重－変位関係を図 3-1 に示す。ファイバーモデルとM- $\phi$ モデルとで、荷重－変位の履歴は似ており、全体的な挙動は両解析でおおむね整合している。

解析の最終ステップにおける各部材の断面力分布を図 3-2 及び図 3-3 に示す。せん断力及び曲げモーメントの分布は、両解析でおおむね一致している。

以上から、非線形はり要素のモデル化の違い（有効応力解析において軸力による影響を考慮できないM- $\phi$ モデルを使用すること）が解析結果へ与える影響が軽微であることを確認した。

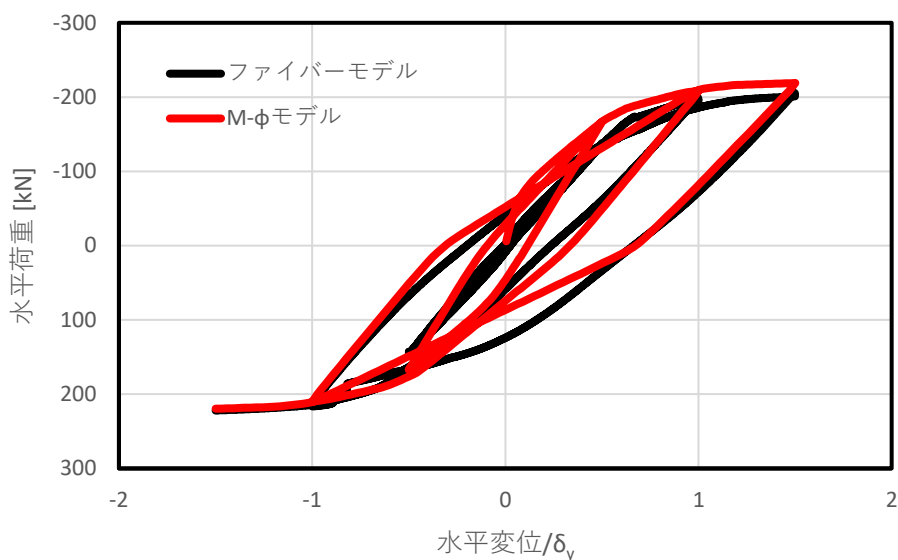
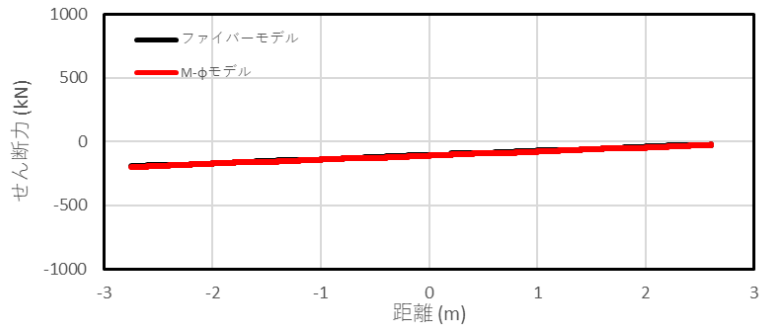
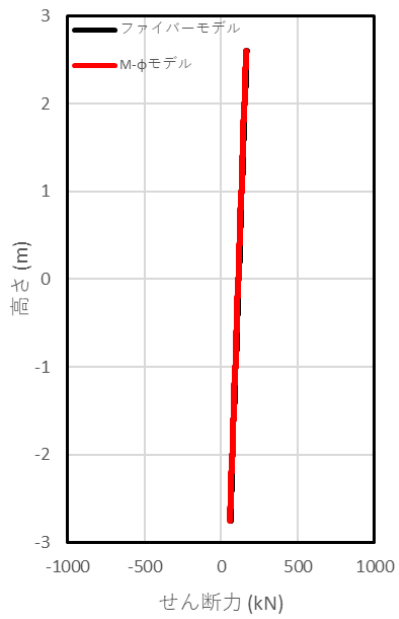


図 3-1 荷重－変位関係

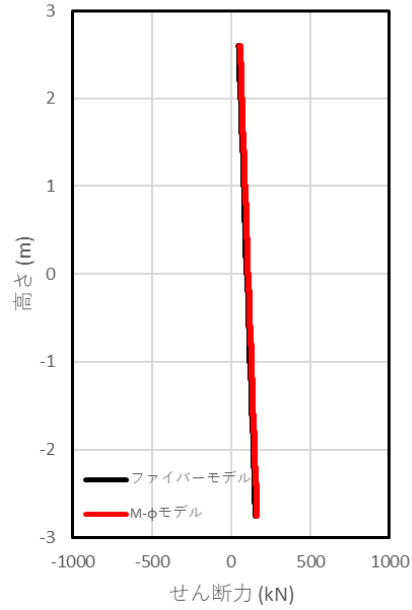




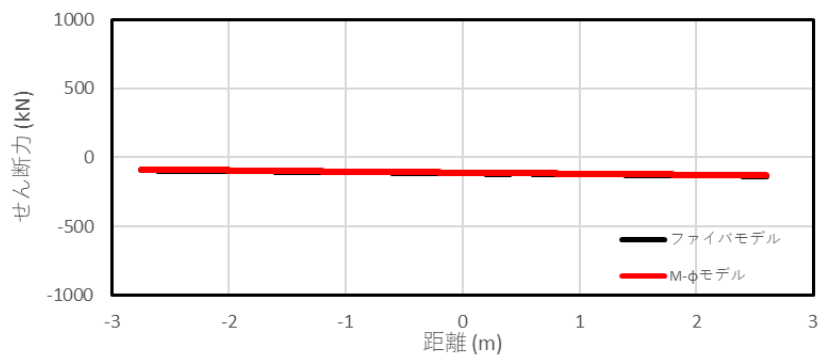
(a) 頂版



(b) 左側壁

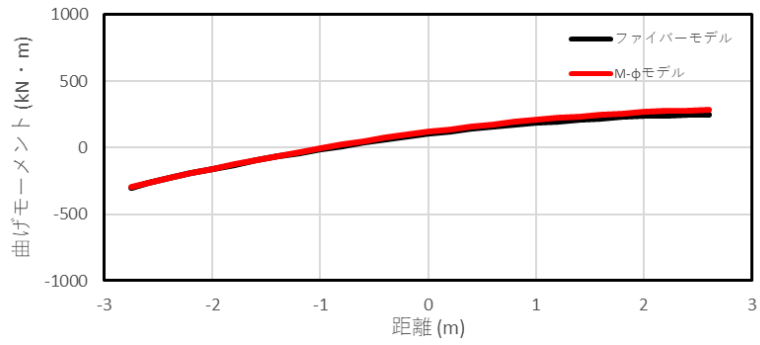


(c) 右側壁

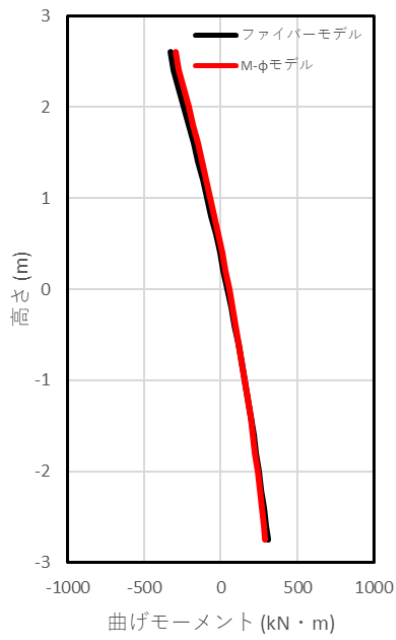


(d) 底版

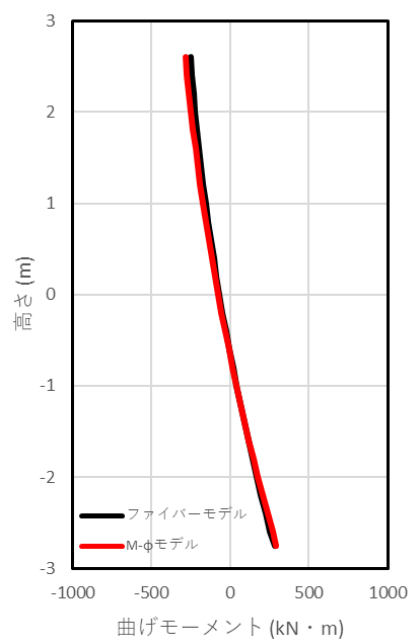
図 3-2 断面力分布 (せん断力)



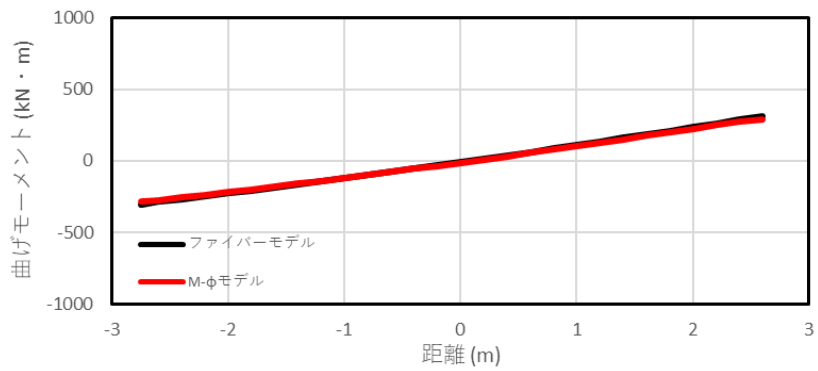
(a) 頂版



(b) 左側壁



(c) 右側壁



(d) 底版

図 3-3 断面力分布 (曲げモーメント)

## 参考資料 16 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について

### 1. 概要

屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）C-C断面の地震応答解析では、全応力解析及び有効応力解析を実施しており、鉄筋コンクリート部材を非線形はり要素にてモデル化している。有効応力解析においては、非線形特性（M- $\phi$ 関係）にはトリリニアモデルを適用しており、コンクリートの履歴特性は修正武田モデルを適用している。解析コードは「FLIP」としており、地震時における鉄筋コンクリート部材の軸力は一定として扱われる。

本項では、基準地震動 $S_s$ を入力とした地震応答解析による鉄筋コンクリート部材の軸力及び曲げモーメントの変動範囲を踏まえた上で、部材の非線形特性に与える影響を検討し、耐震評価において軸力が一定となる非線形特性を用いることの妥当性を検討する。

### 2. 検討内容

#### 2.1 検討ケース

本検討では、屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）C-C断面において、曲げ・軸力系の破壊に対する照査値が最も厳しい解析ケース、地震動を代表ケースとして選定する。部材の軸力変動範囲を確認するための検討ケースを表 2-1 に示す。

対象部材は、土被り荷重を分担する鉛直部材である側壁及び隔壁とし、それぞれの部材において曲げ損傷が大きい部位に着目する。検討ケースにおける対象部材・部位を図 2-1 に示す。

表 2-1 材料の諸元

項目	条件
解析ケース	解析ケース④（有効応力解析における地盤物性の平均値を考慮した解析ケース）
入力地震動	$S_s-D$ （--）
解析断面	屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）C-C断面
確認対象部材	図 2-1 に示すとおり

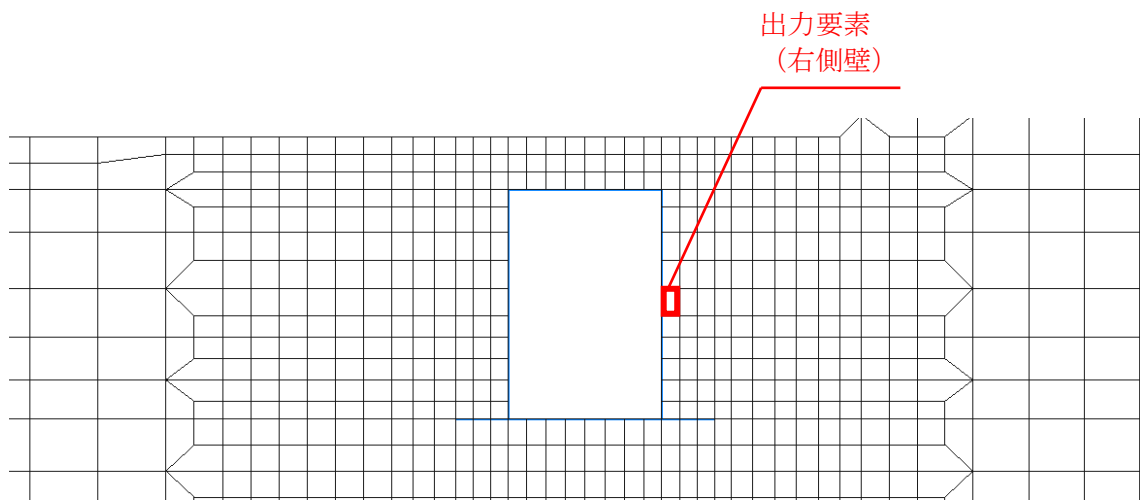


図 2-1 検討ケースにおける対象部材・部位

## 2.2 検討方法

地震応答解析により鉄筋コンクリート部材における軸力及び曲げモーメントの変動範囲を抽出し、当該部材の $M_u$ （終局モーメント）- $N$ （軸力）関係及び $M_y$ （降伏モーメント）- $N$ （軸力）関係と比較することにより、軸力変動の影響を検討する。

### 3. 検討結果

図 3-1 に、検討ケースにおける鉄筋コンクリート部材の軸力及び曲げモーメントの変動範囲と、当該部材の $M_u-N$ 関係及び $M_y-N$ 関係を示す。また、同図には、「FLIP」にて非線形特性として用いられている $M_u$ 及び $M_y$ の設定根拠である常時応力解析による当該部材の軸力をプロットしている。

これより、地震時の鉄筋コンクリート部材における軸力の変動範囲は、おおむね常時応力解析における軸力と同程度であることがわかる。また、本検討での評価対象部位に発生する曲げモーメントは、 $M_y$ （降伏モーメント）以下であり、弾性範囲内に収まっている。

以上より、鉄筋コンクリート部材において、軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響は軽微であり、耐震評価において軸力が一定となる解析コード「FLIP」の当該非線形特性を用いることは妥当である。

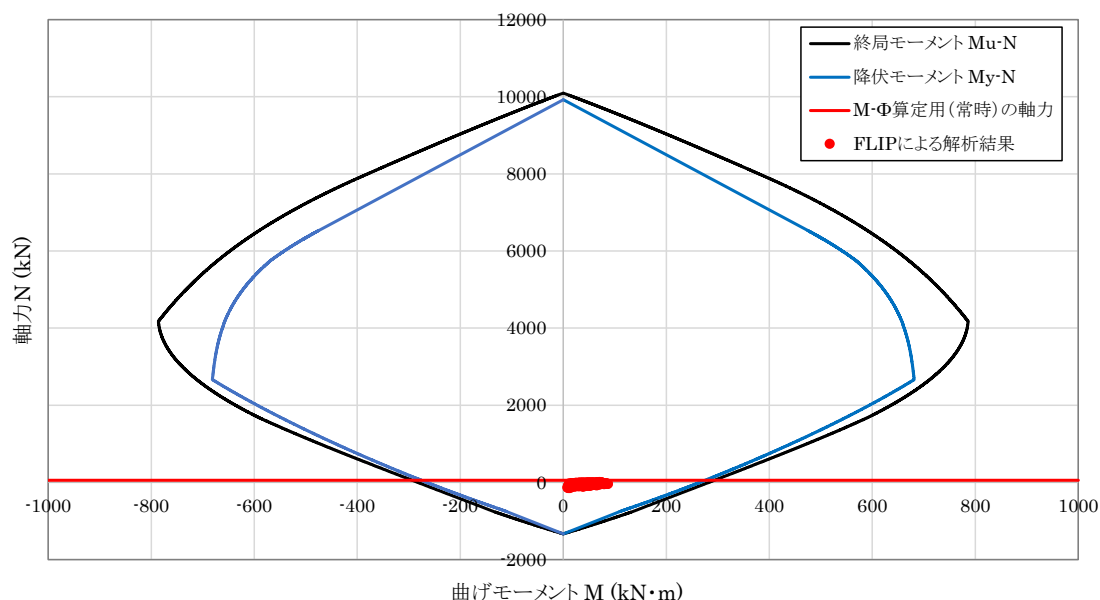


図 3-1 基準地震動  $S_s$  による屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）C-C断面の応答範囲

## 参考資料 17 線状構造物の強軸方向床応答の影響について

### 1. 概要

線状構造物について、機器・配管系の耐震評価に適用する床応答への保守的な配慮として、強軸方向の解析を実施する。

代表的な線状構造物として、屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）を選定し、強軸方向を評価対象断面とする。屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の平面図を図 1-1、断面図を図 1-2、評価対象断面図及び評価対象地質断面図を図 1-3 に示す。

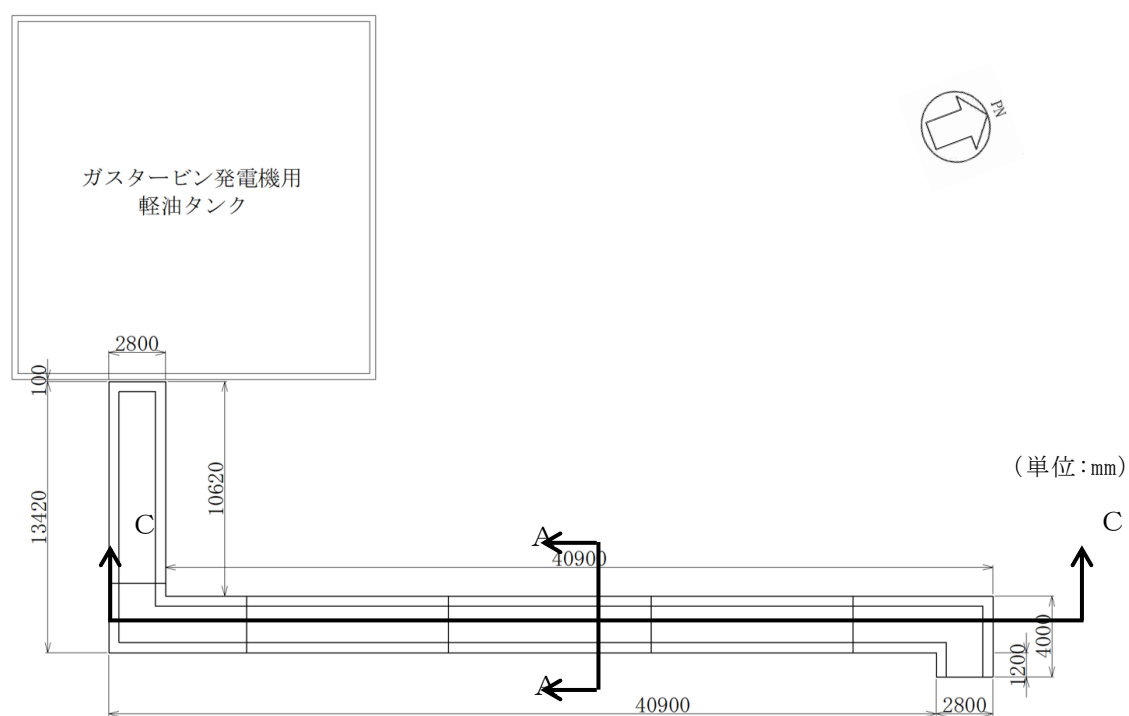


図 1-1 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）  
平面図

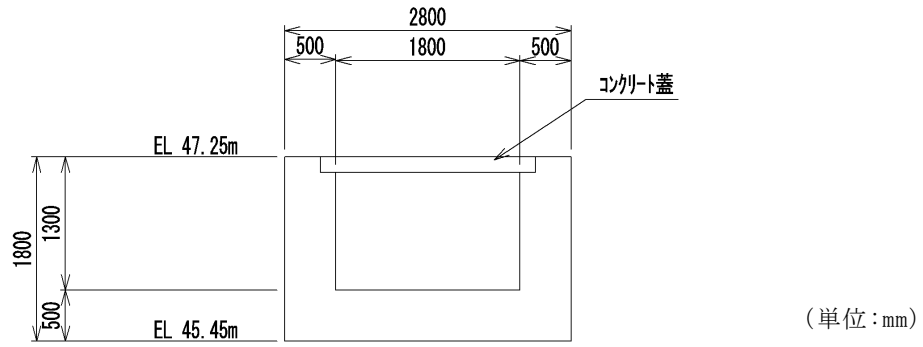


図 1-2 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
断面図 (A-A断面)

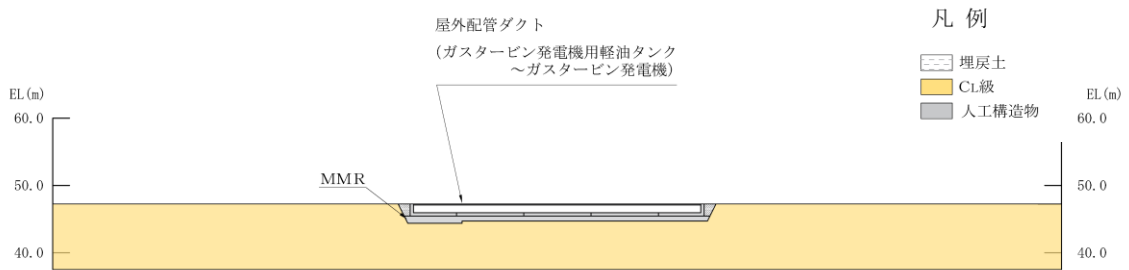


図 1-3 屋外配管ダクト (ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機)  
評価対象断面図 (C-C断面位置)

## 2. 解析方針

解析方針は、「補足-026-13 屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）の地震応答計算書及び耐震性についての計算書に関する補足説明資料」における評価条件に基づき実施する。強軸方向の解析モデル図を図 2-1 に示す。

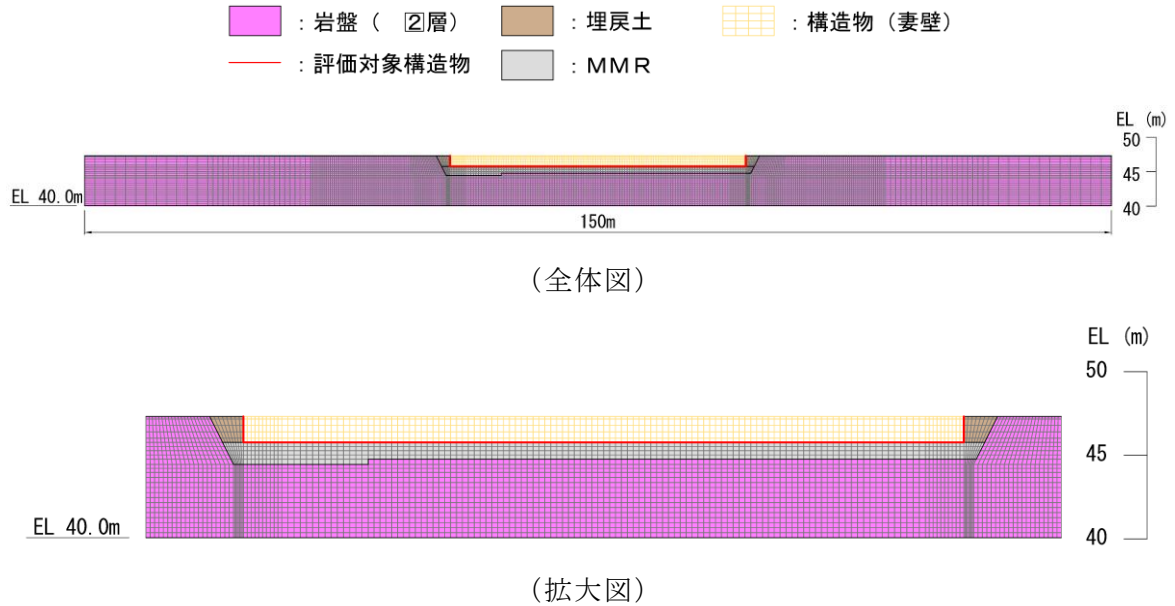
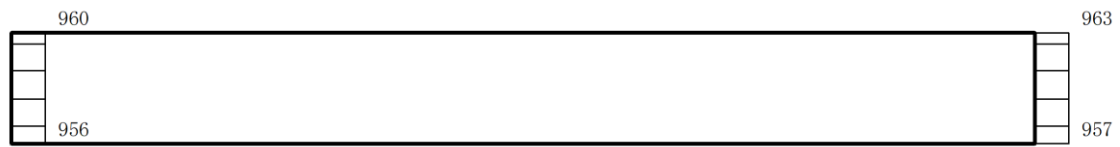


図 2-1 解析モデル図

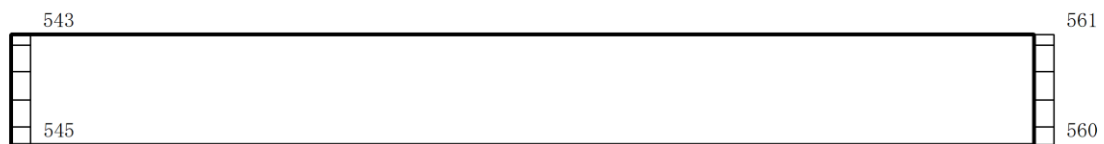


### 3. 解析結果

地震応答解析結果として、基準地震動  $S_s$  に対する最大加速度分布図を図 3-1 に示す。水平方向の最大応答加速度は  $963\text{cm/s}^2$  であり、弱軸方向の最大応答加速度と比較して小さいことから、線状構造物の強軸方向床応答は機器・配管系の耐震評価に影響しないことを確認した。



(a)  $S_s - D$  (++) 水平



構造スケール 0 1 (m)

応答値スケール 0 2000 ( $\text{cm/s}^2$ )

(b)  $S_s - D$  (++) 鉛直

図 3-1 最大応答加速度分布図

## 参考資料 18 入力地震動の算定に用いる地盤モデルの作成方針について

### 1. 概要

屋外重要土木構造物等の地震応答解析に用いる入力地震動については、解放基盤面で定義される基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  を、逆応答解析及び順応答解析により解析モデル底面位置まで引き上げた地震動を用いている。

本書では、入力地震動算定における地盤モデルのモデル化方針を説明する。

### 2. 地盤モデル作成方針

順応答解析に用いる地盤モデルの作成方針を以下に示す。

- ・ 構造物周辺の地盤状況を踏まえて代表地点を選定し、地盤モデルを作成する。なお、評価対象断面を複数有する構造物（例：線状構造物）についても、屋外重要土木構造物等に延長の長い構造物が無いことから、構造物周辺で代表 1 地点を選定し、地盤モデルを作成する。
- ・ 順応答解析では水平成層を仮定するため、表 2-1 に示すとおり局所的な構造物等はモデル化せず、埋戻土又は岩盤の物性値のみを用いる。

表 2-1 順応答解析における地盤モデル作成の考え方

実際の地質状況	地盤モデル
埋戻土	埋戻土としてモデル化する。
岩盤	岩盤としてモデル化する。
構造物	配置が局所的であるため、構造物の周辺の地盤状況を踏まえ、埋戻土又は岩盤としてモデル化する。
改良地盤	
MMR・置換コンクリート ・埋戻コンクリート	

地盤モデル作成の例として、取水槽（除じん機エリア）及び屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）（A-A断面）における地盤モデルを図 2-1 及び図 2-2 に示す。

取水槽（除じん機エリア）は、構造物の周囲に埋戻土が分布し、その直下には岩盤（**2**層）が分布している。このため、EL 8.5～-5.0m については埋戻土でモデル化し、EL -5.0～-20.0m については、岩盤でモデル化する。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）（A-A断面）は、構造物及びMMRの周囲に埋戻土が分布し、その直下には岩盤（**2**層もしくは**3**層）が分布している。このため、EL 8.5～-5.5m については埋戻土でモデル化する。

なお、いずれの構造物についても、埋戻土の物性は、地下水位以深・以浅で区分する。

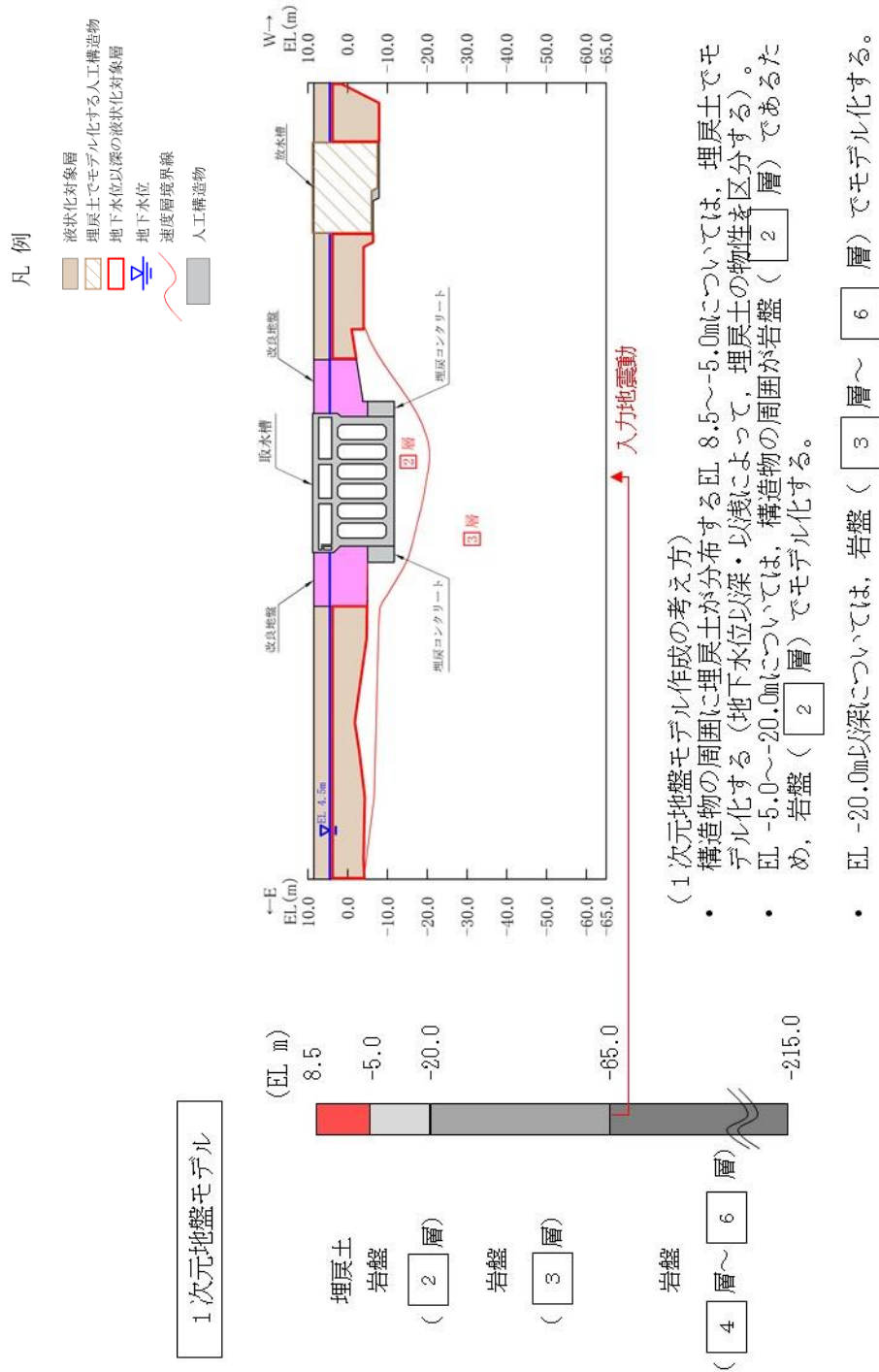


図 2-1 地盤モデル（取水槽（除じん機エリア））

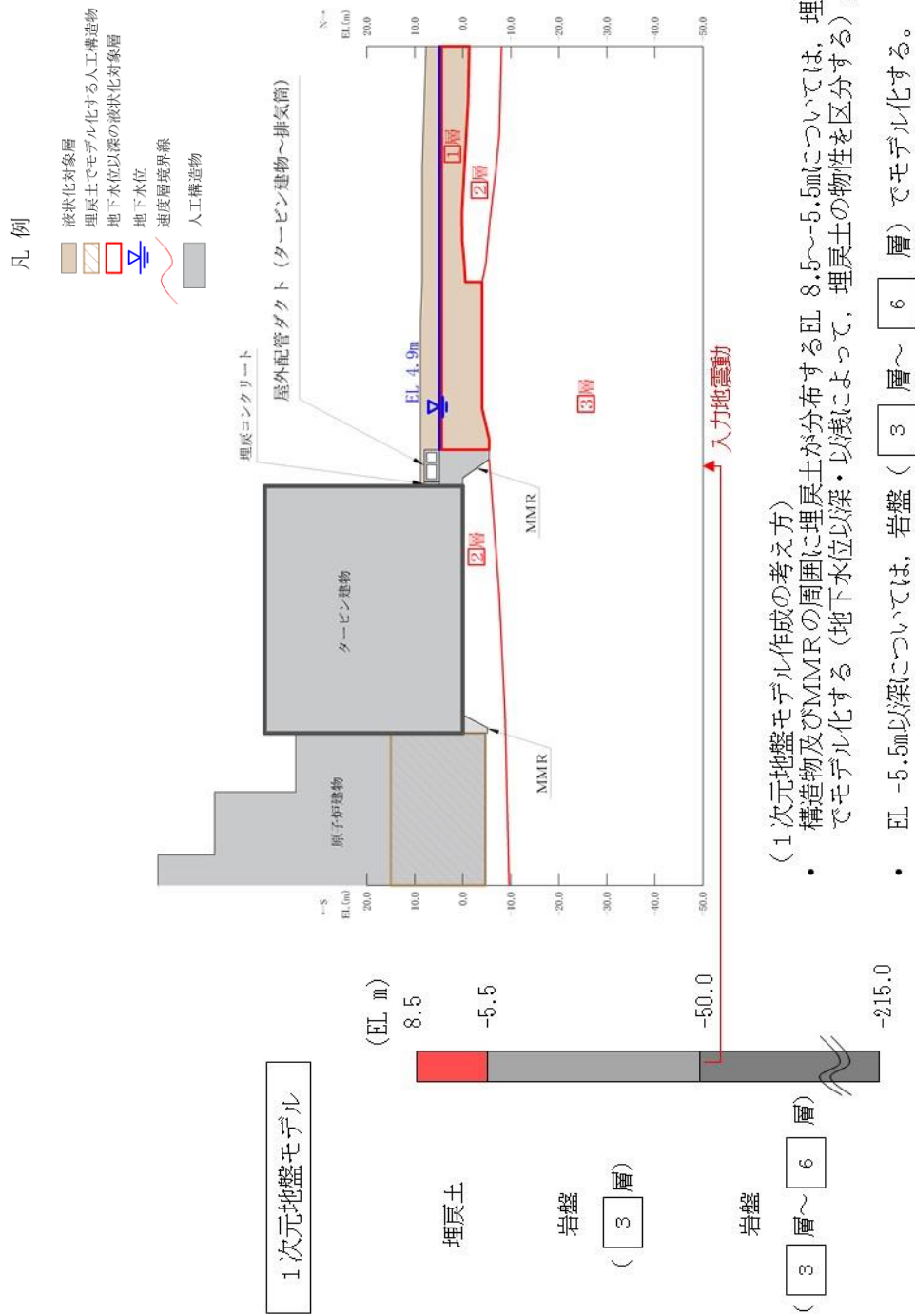


図 2-2 地盤モデル (屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) (A-A断面位置))

## 参考資料 19 解析コードの差異による応答への影響について

### 1. 概要

屋外重要土木構造物の耐震性評価にあたっては、「4.3 解析手法選定の方針」における解析手法の選定フローに基づき、施設周辺の設計地下水位及び液状化対象層の有無等に応じた解析手法（全応力解析又は有効応力解析）を選定している。

有効応力解析を実施する構造物は、不確かさケースとして全応力解析を実施することとしており、有効応力解析では地震応答解析コード「FLIP」を使用しているのに対し、全応力解析では地震応答解析コード「TDAPⅢ」を使用している。

同一の構造物で異なる解析コードを使用していることから、本書では、「TDAPⅢ」と「FLIP」の解析コードの違いが構造物の応答値に及ぼす影響を確認する。

なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

### 2. 評価対象断面

評価対象断面は、「FLIP」による有効応力解析及び「TDAPⅢ」による全応力解析を実施しており、液状化対象層（埋戻土）と直接接する屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のC-C断面とする。

評価対象構造物の位置図を図2-1に示す。また、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）C-C断面の地質断面図を図2-2に示す。

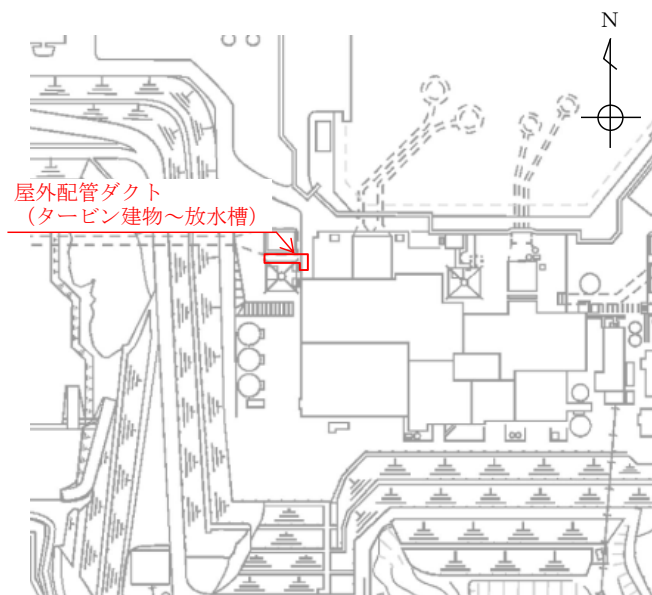


図 2-1 評価対象構造物位置図

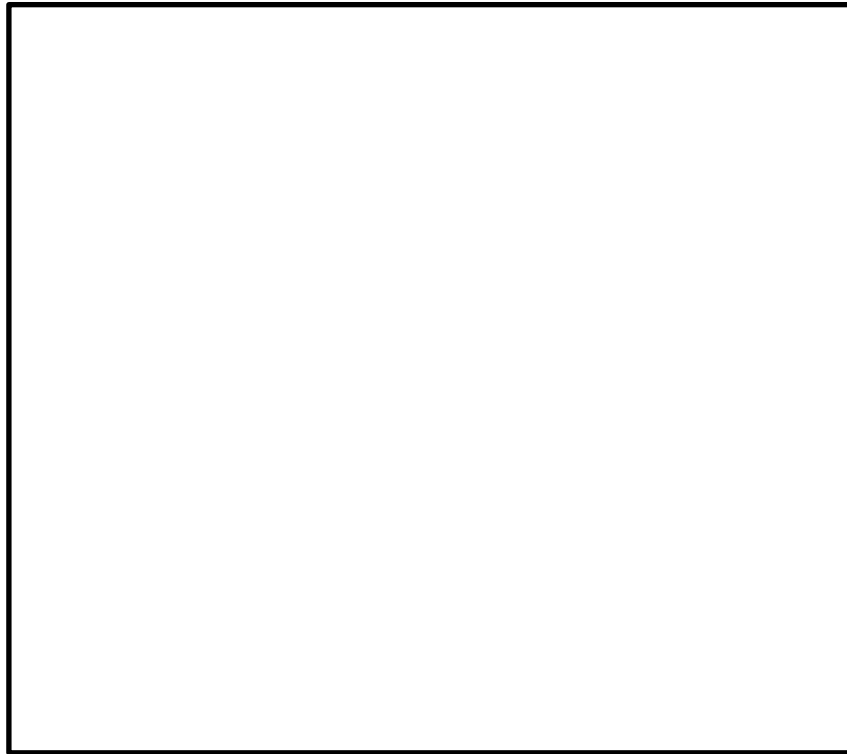


図 2-2(1) 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【C-C 断面位置】  
地質断面図

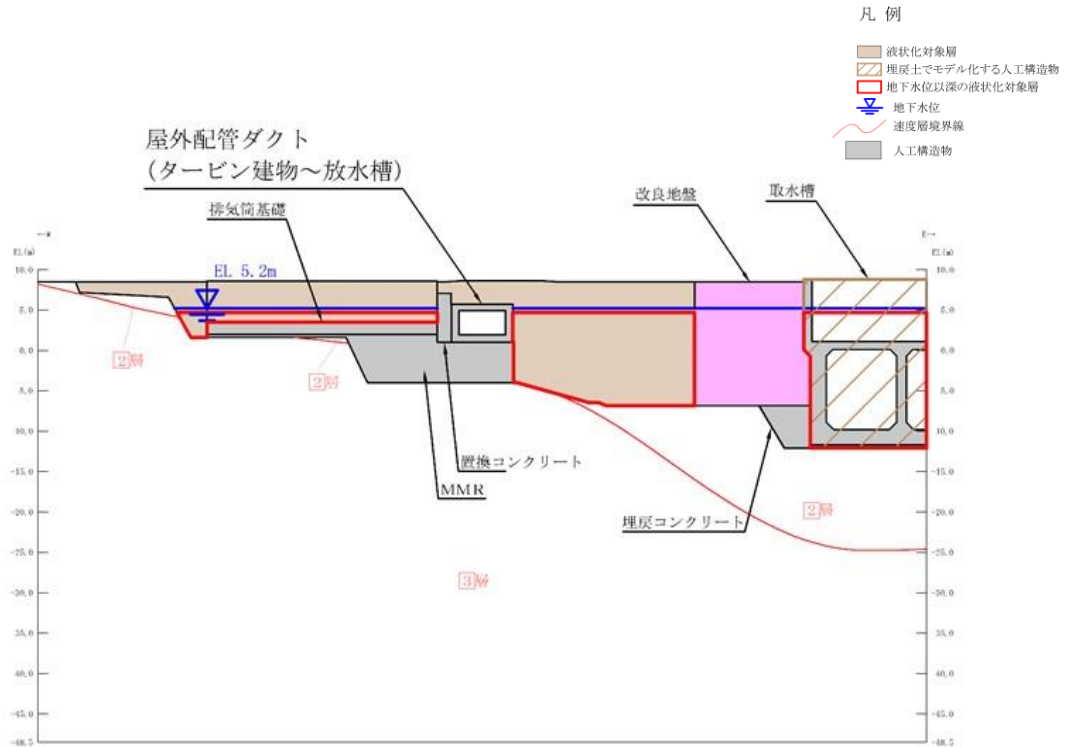


図 2-2(2) 屋外配管ダクト (タービン建物～放水槽) 【C-C 断面位置】  
地質断面図

### 3. 評価方針

VI-2-2-26「屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の地震応答計算書」に基づき、液状化パラメータをOFFとした「FLIP」（以下「FLIP（液状化パラメータOFF）」という。）による全応力解析を実施する。解析コードの違いによる応答結果への影響の確認として、「FLIP（液状化パラメータOFF）」による全応力解析から得られる加速度応答スペクトルと、同計算書の「TDAPⅢ」による全応力解析から得られる加速度応答スペクトルを比較する。

加速度応答スペクトルの抽出点を図3-1に示す。抽出点は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の機器・配管系の耐震評価に用いる抽出点のうち、埋戻土と接しており、解析コードの違いによる影響が比較的大きくなる可能性が高いと考えられる東側壁とする。

また、「FLIP（液状化パラメータOFF）」及び「TDAPⅢ」による全応力解析における変形図を比較し、構造物への影響を確認する。

検討に使用する地震動は、位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s-D(++)$ とし、地盤物性は平均物性とする。

なお、本検討は解析コードの差異を確認する目的で実施するため、「FLIP（液状化パラメータOFF）」は「FLIP 研究会 14 年の検討成果のまとめ「理論編」」，「TDAPⅢ」は固有値解析を基に、それぞれ Rayleigh 減衰を設定する。

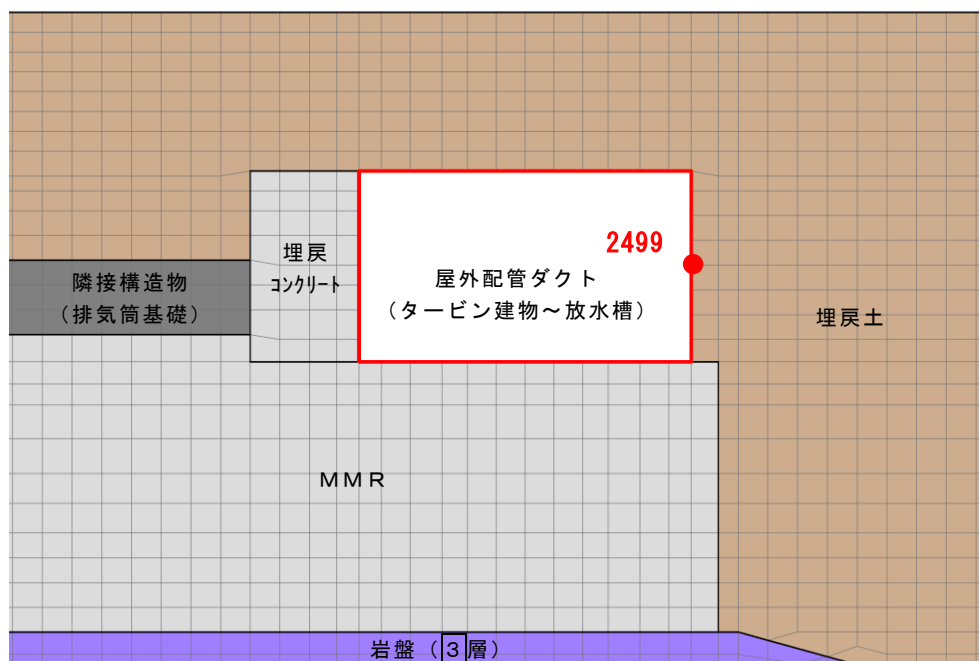


図 3-1 加速度応答スペクトルの抽出点

#### 4. 評価結果

##### 4.1 加速度応答スペクトルによる比較

「FLIP（液状化パラメータOFF）」及び「TDAPⅢ」による全応力解析から得られた加速度応答スペクトルを図4-1に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のC-C断面における配管系の固有周期は0.11s程度であり，当該周期において，水平方向及び鉛直方向共に，屋外重要土木構造物の全応力解析で使用している「TDAPⅢ」における加速度応答スペクトルは，「FLIP（液状化パラメータOFF）」における加速度応答スペクトルとおおむね同等であることを確認した。



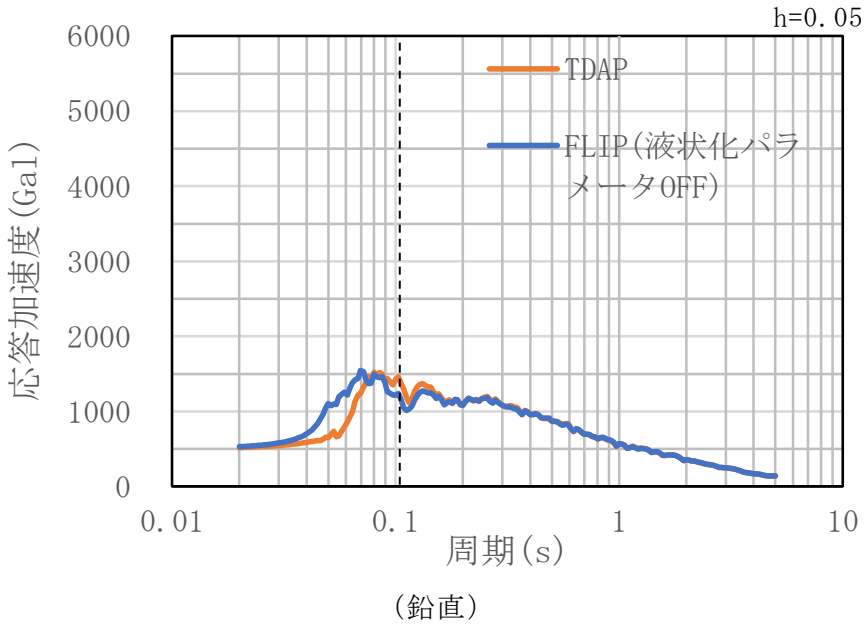
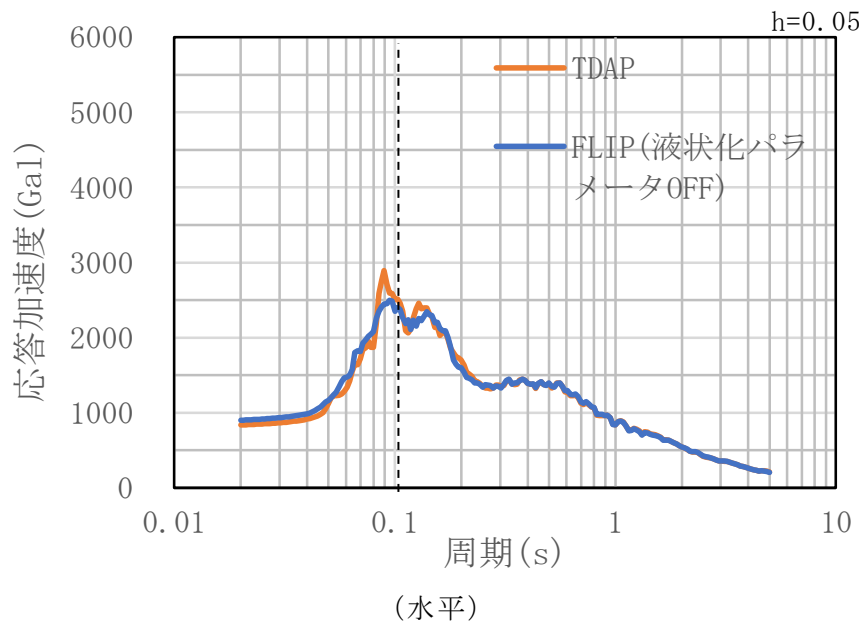


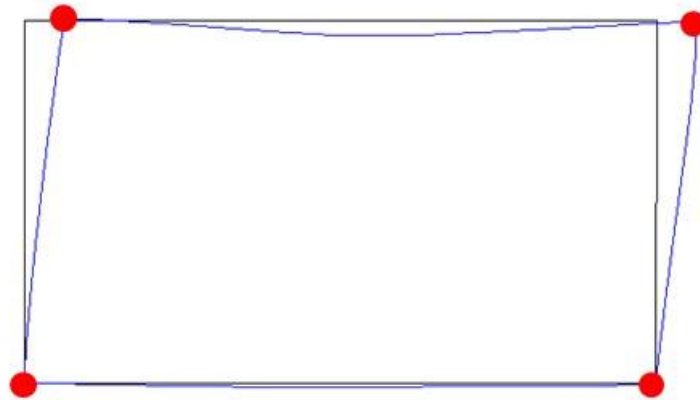
図 4-1 加速度応答スペクトル (抽出点 2499 (東側壁))

#### 4.2 変形図による比較

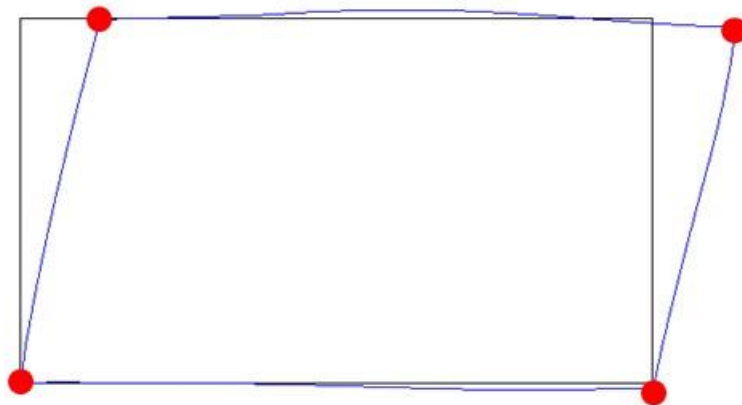
「FLIP（液状化パラメータOFF）」及び「TDAPⅢ」による全応力解析から得られた最大変形図を図4-1に示す。

「FLIP（液状化パラメータOFF）」における最大変形量は1.4mm（層間変形角：0.036/100），TDAPⅢの最大変形量は3.0mm（層間変形角：0.078/100）である。

以上から，屋外重要土木構造物の全応力解析で使用している「TDAPⅢ」における最大変形量は「FLIP（液状化パラメータOFF）」における最大変形量と同等であり，「TDAPⅢ」，「FLIP（液状化パラメータOFF）」共に限界層間変形角（1/100）よりも十分小さいことを確認した。



（「FLIP（液状化パラメータOFF）」，最大変形量：1.4mm）



（「TDAPⅢ」，最大変形量：3.0mm）

図4-2 最大変形図（変形倍率：300倍）

注：図中の赤丸は解析後（変形後）の変形量抽出点を示す。

## 5. まとめ

解析コードの違いが構造物の応答値に及ぼす影響の確認として、「FLIP（液化パラメータOFF）」及び「TDAPⅢ」による全応力解析から得られた加速度応答スペクトル及び変形図を比較した。

屋外重要土木構造物の全応力解析で使用している「TDAPⅢ」は「FLIP（液化パラメータOFF）」と比較して構造物の応答値はおおむね同等であり、解析コードの違いが構造物の応答値に及ぼす影響は軽微であることを確認した。

## 参考資料 20 新設する構造物のコンクリートの圧縮強度の設定について

屋外重要土木構造物等の耐震安全性評価においては、地盤物性及び材料物性のばらつき（コンクリートの剛性のばらつき）を考慮した評価を行う。そのうち、材料物性のばらつきを考慮した解析については、ヤング係数（剛性）がコンクリートの設計基準強度に対応して定まることを踏まえ、既設構造物から採取したコアの圧縮強度試験結果より算定したヤング係数（剛性）を用いて解析を行う。

また、新設する屋外重要土木構造物等のコンクリートについては、材齢の経過に伴って強度が上がり剛性も高くなることが想定され、コンクリートの剛性を実強度とすることで構造物と周囲の地盤との剛性差が大きくなり地中構造物において土圧が大きくなるが、構造物の耐力向上が支配的となり耐震評価における裕度の向上が考えられる。

以上のことから、コンクリートの剛性に設計基準強度を用いる方が安全側の評価となるため、土木構造物の設計においては、剛性上昇側のばらつきは不確かさとして考慮しない。

また、実強度が設計基準強度を上回るよう施工管理されていることから剛性低下側のばらつきも不確かさとしては考慮しない。

ただし、間接支持する機器・配管系の耐震安全性評価においては、推定した圧縮強度より算定したコンクリートの剛性（ヤング係数）の影響を確認する。

ここでは、新設する屋外重要土木構造物等のコンクリートの圧縮強度の設定方法について示す。圧縮強度の設定に当たっては、「建築工事標準仕様書・同解説 J A S S 5 N 原子力発電所における鉄筋コンクリート工事（（社）日本建築学会，2013 年）」（以下「J A S S 5 N」という。）による方法、及び「日本原子力学会標準原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準（（社）日本原子力学会，2015 年）」（以下「日本原子力学会標準」という。）による方法を比較し、保守的な配慮として圧縮強度が大きい方の値を採用する。

## 1. JASS 5Nによる圧縮強度の設定方法

「JASS 5N」の方法により推定される調合強度は、算定式の違い（以下に示す式 1-(1)及び式 1-(2))から 2 つの値が得られるが、圧縮強度の推定値は大きい方の値とする。

「JASS 5N」による圧縮強度の設定方法の詳細を以下に示す。

### (1) コンクリートの調合強度の算定

コンクリートの調合強度は、コンクリートの調合管理強度と構造体コンクリートの強度管理用供試体の圧縮強度の標準偏差を用いて算定する。

調合強度は、次の式 1-(1)及び式 1-(2)を満足するように定める。

$$F \geq F_m + 1.73 \sigma \quad \text{式 1-(1)}$$

$$F \geq 0.85 F_m + 3 \sigma \quad \text{式 1-(2)}$$

ここに

$F$  : コンクリートの調合強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_m^{*1}$  : コンクリートの調合管理強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma^{*2}$  : 構造体コンクリートの強度管理用供試体の圧縮強度の標準偏差 (N/mm<sup>2</sup>)

注記\*1:以下の「(2)コンクリートの調合管理強度の算定」に示す方法により求める。

\*2:  $\sigma$  は 3.5N/mm<sup>2</sup> もしくは 0.1( $F_q + {}_m S_n$ )<sup>\*3</sup> の大きい方の値とする。

\*3:  $F_q$  はコンクリートの品質基準強度（設計基準強度もしくは 24N/mm<sup>2</sup>のうち大きい方の値）， ${}_m S_n$  は標準養生した供試体の材齢 m 日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢 n 日における圧縮強度との差によるコンクリート強度の補正值を示す。

(2) コンクリートの調合管理強度の算定

コンクリートの調合強度は、コンクリートの品質基準強度（設計基準強度もしくは24N/mm<sup>2</sup>のうち大きい方の値）とコンクリート強度の補正值から算定する。

$$F_m \geq F_q + {}_m S_n$$

ここに

$F_m$  : コンクリートの調合管理強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$F_q^{*1}$  : コンクリートの品質基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

${}_m S_n^{*2}$  : 標準養生した供試体の材齢m日における圧縮強度と、構造体コンクリートの材齢n日における圧縮強度との差によるコンクリート強度の補正值を示す (N/mm<sup>2</sup>)。ただし、 ${}_m S_n$ は0以上の値とする。

注記\*1：設計基準強度もしくは24N/mm<sup>2</sup>のうち大きい方の値を採用する。

\*2： ${}_m S_n$ は図1-1を参照して定めるが、圧縮強度が大きくなるよう6を採用する。

表5.1 構造体強度補正值 ${}_{28}S_{91}$ の標準値

セメントの種類	コンクリートの打込みから材齢28日までの予想平均養生温度 (°C)	
	$8 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 8$
普通ポルトランドセメント	$8 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 8$
フライアッシュセメントB種	$9 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 9$
中庸熱ポルトランドセメント	$11 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 11$
中庸熱フライアッシュセメント	$11 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 11$
低熱ポルトランドセメント	$14 \leq \theta$	$0 \leq \theta < 14$
構造体強度補正值 ${}_{28}S_{91}$ (N/mm <sup>2</sup> )	3	6

[注] 普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュセメントB種においては、暑中コンクリート工事の適用期間中は、補正值は6N/mm<sup>2</sup>とする。

図1-1 構造体強度補正值の ${}_{28}S_{91}$ の標準値(「JASS 5N」に加筆)

コンクリートの調合管理強度及び調合強度の算定を踏まえ、式1-(1)及び式1-(2)から算定される調合強度のうち大きい方の値を「JASS 5N」により算定される圧縮強度とする。

## 2. 日本原子力学会標準による圧縮強度の設定方法

「日本原子力学会標準」に示す「コンクリート実強度の標準的なデータベース」に基づき、圧縮強度を設定する。「コンクリート実強度の標準的なデータベース」には、原子力発電所施設を対象に実機の13週管理コンクリートの実強度について調査・検討した結果が図2-1のとおり整理されている。

図2-1に示すとおり、コンクリートの打設から1年後の実強度は、設計基準強度の1.40倍（平均値）であることに基づき、設計基準強度の1.40倍を「日本原子力学会標準」により算定される圧縮強度として設定する。

表 BZ.2 コンクリート実強度の統計値

	統計値	
	平均値	変動係数
13週シリンダー強度/設計基準強度 (13週管理)	1.35	0.07
1年シリンダー強度/13週シリンダー 強度	1.1	—
実強度(1年)/1年シリンダー強度	0.95	0.11
実強度(1年)/設計基準強度(13週 管理)	1.40	0.13

図 2-1 コンクリート実強度の統計値（「日本原子力学会標準」に加筆）

3. 新設する構造物に設定する圧縮強度について

新設する構造物のコンクリートの圧縮強度は、「JASS 5N」により算定される圧縮強度と「日本原子力学会標準」により算定される圧縮強度のうち大きい方の値を採用する。

屋外重要土木構造物のうち、新設する構造物に設定する圧縮強度一覧を表3-1に示す。

表3-1 新設する構造物に設定する圧縮強度一覧

	B-ディーゼル燃料 貯蔵タンク格納槽	第1ペントフィルタ 格納槽	低圧原子炉代替注水 ポンプ格納槽	ガスタービン発電機 用軽油タンク基礎	屋外配管ダクト（ガ スタービン発電機用 軽油タンク～ガスタ ービン発電機）
セメントの種類	フライアッシュB種	フライアッシュB種	フライアッシュB種	フライアッシュB種	フライアッシュB種
設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
圧縮強度① (N/mm <sup>2</sup> ) *1	36.1	36.1	36.1	36.1	36.1
圧縮強度② (N/mm <sup>2</sup> ) *2	33.6	33.6	33.6	33.6	33.6
圧縮強度の採用 (N/mm <sup>2</sup> ) *3	36.1	36.1	36.1	36.1	36.1

注記\*1：「JASS 5N」により推定される圧縮強度

\*2：「日本原子力学会標準」により推定される圧縮強度

\*3：圧縮強度①と圧縮強度②を比較して大きい方の値