

# 島根原子力発電所 2 号炉

## 地震による損傷の防止

令和元年11月  
中国電力株式会社

## 第4条：地震による損傷の防止

### <目次>

#### 第1部

1. 基本方針
  - 1.1 要求事項の整理
  - 1.2 追加要求事項に対する適合性
    - (1) 位置，構造及び設備
    - (2) 安全設計方針
    - (3) 適合性説明
  - 1.3 気象等
  - 1.4 設備等
  - 1.5 手順等

#### 第2部

1. 耐震設計の基本方針
  - 1.1 基本方針
  - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
  - 2.1 重要度分類の基本方針
  - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
  - 3.1 地震力の算定法
  - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
  - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
  - 5.1 建物・構築物
  - 5.2 機器・配管系
  - 5.3 屋外重要土木構造物
  - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備及び津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震動  $S_d$  ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価方針
- 別添－ 6 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－ 7 主要建物の構造概要について
- 別添－ 8 地震応答解析に用いる地質断面図の作成例及び地盤の速度構造

(別紙)

- 別紙－ 1 設置変更許可申請における既許可からの変更点及び既工認との手法の相違点の整理について
- 別紙－ 2 建物の地震応答解析モデルについて（建物基礎底面の付着力及び 3 次元 F E M モデルの採用）
- 別紙－ 3 基礎スラブの応力解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－ 4 原子炉建物屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用について
- 別紙－ 5 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－ 6 屋外重要土木構造物等の耐震評価における断面選定について
- 別紙－ 7 機器・配管系における手法の変更点について
- 別紙－ 8 サプレッション・チェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 9 下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別紙－ 1 0 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 1 1 液状化影響の検討方針について
- 別紙－ 1 2 既設設備に対する耐震補強等について
- 別紙－ 1 3 後施工せん断補強筋による耐震補強
- 別紙－ 1 4 地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 1 5 動的機能維持評価の検討方針について
- 別紙－ 1 6 建物・構築物の地震応答解析における入力地震動の評価について

下線は、今回の提出資料を示す。

# 島根原子力発電所 2 号炉

## 原子炉建物屋根トラスの

解析モデルへの弾塑性解析の適用について

(耐震)



## 目 次

1. 概要
2. 原子炉建物屋根トラスについて
  - 2.1 原子炉建物屋根トラスの概要
  - 2.2 原子炉建物屋根スラブの概要
  - 2.3 原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア
  - 2.4 既工認と今回工認における原子炉建物屋根トラスの解析モデルの比較
  - 2.5 弾塑性解析の採用について
    - 2.5.1 弾塑性解析を採用することの目的
    - 2.5.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について
    - 2.5.3 各部材のクライテリアについて
3. 原子炉建物屋根トラスの評価に関するまとめ
4. 参考文献

添付資料－1 原子炉建物屋根トラスの耐震補強について

参考資料－1 剛性比例型減衰の妥当性について

参考資料－2 屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

参考資料－3 屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

## 1. 概要

本資料は、島根原子力発電所2号炉の建物・構築物のうち、鉄骨構造部の詳細評価モデルを構築して評価を実施している原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルの内容について説明し、既工認時のモデルとの差異及びモデル変更の目的について説明するものである。

原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルについては、既工認では弾性解析を採用しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する予定である。

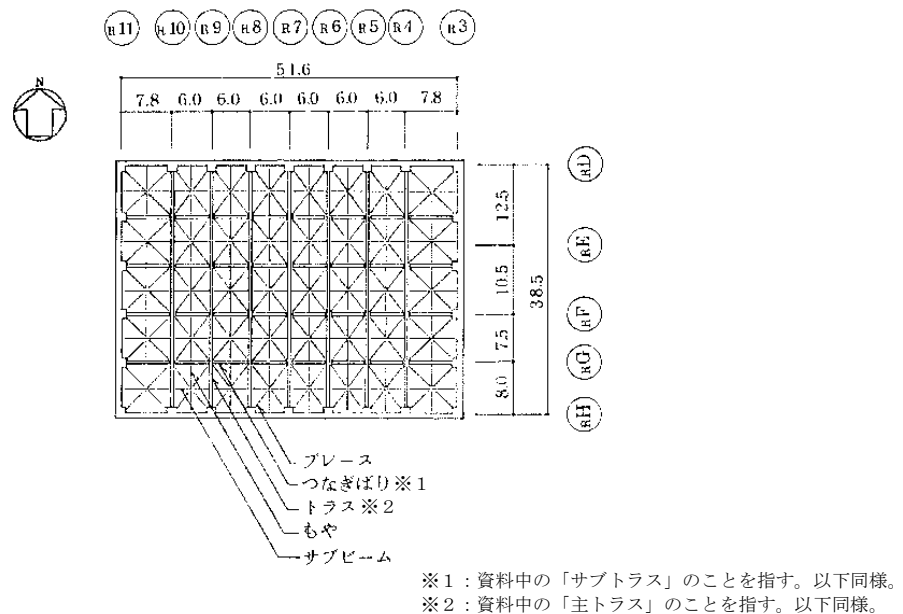
また、屋根トラスが二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブの間接支持構造物であることから、屋根トラスの3次元弾塑性解析の妥当性・適用性について確認し、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持評価について説明する。

## 2. 原子炉建物屋根トラスについて

### 2.1 原子炉建物屋根トラスの概要

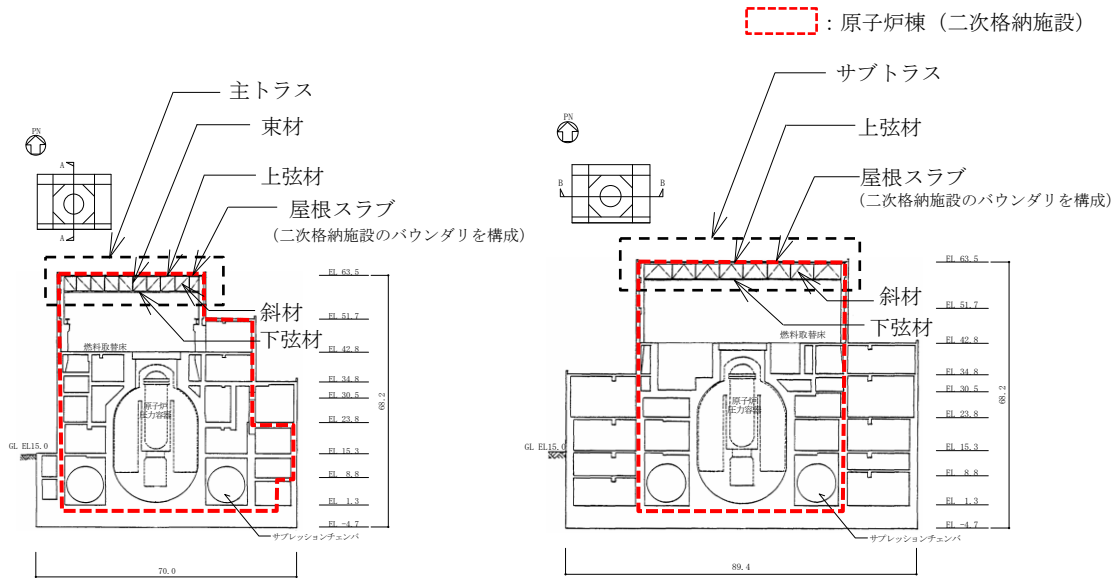
原子炉建物の上部構造は、鉄筋コンクリート造陸屋根をもつ鉄骨造の屋根トラスで構成されている。屋根トラスの平面は、38.5m（南北）×51.6m（東西）の長方形をなしており、燃料取替床レベル（E L 42.8m）からの高さは20.7mである。屋根トラスの概要を第2.1-1図に示す。第2.1-1表にトラス部材の諸元のうち、主トラス材について例示する。

屋根トラス各部材の主な要求機能は、屋根スラブからの鉛直荷重の支持機能であり、主トラスについては、既工認と同様に水平地震荷重及びクレーン荷重についても支持する設計としている。第2.1-2表に屋根トラスの各部材の要求機能を示す。



屋根伏図（E L 63.5m）

第2.1-1図(1) 原子炉建物屋根トラスの概要（単位：m）



NS方向断面図

EW方向断面図

第 2.1-1 図(2) 原子炉建物屋根トラスの概要 (単位 : m)

第 2.1-1 表 主トラスの部材諸元

部材	使用部材
上弦材	H-400×400×13×21
下弦材	BH-400×400×19×35
	H-400×400×13×21
斜材	2CTs-175×350×12×19
	2CTs-150×300×10×15
	2CTs-125×250×9×14
束材	2CTs-175×350×12×19
	2CTs-150×300×10×15
	2CTs-125×250×9×14

第 2.1-2 表 屋根トラスの各部材の要求機能

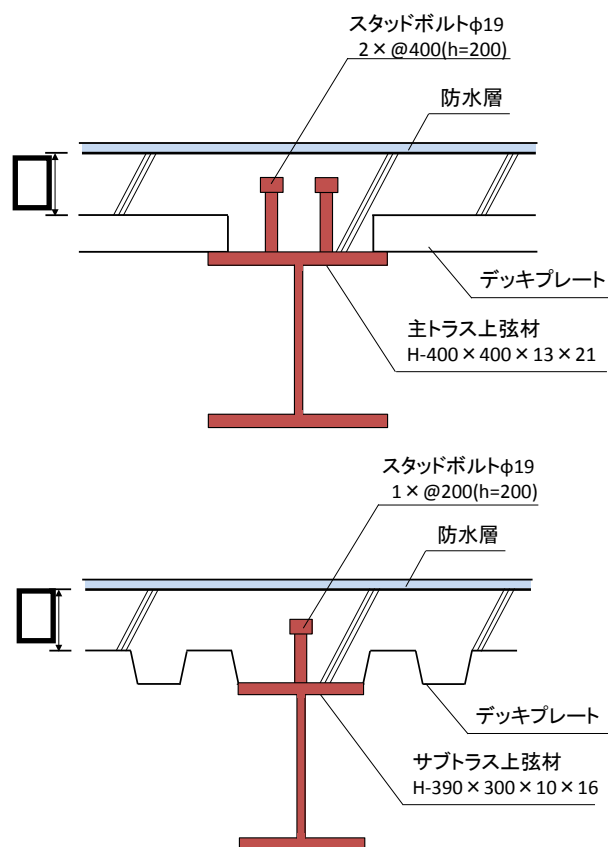
部位	部材	要求機能 <sup>注1</sup>
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持 フレームを構成する部材として 水平地震荷重, クレーン荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
	束材	
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
母屋		鉛直荷重の支持
サブビーム		鉛直荷重の支持
水平ブレース		—

注 1 : 主な機能を示しており基準地震動  $S_s$  に対する発生応力の負担も考慮する。

## 2.2 原子炉建物屋根スラブの概要

原子炉建物の屋根スラブは南北方向 39.9m×東西方向 53.8m の平面寸法、厚さ  の鉄筋コンクリート構造である。外周部は厚さ  (南北方向) 及び  (東西方向) の鉄筋コンクリート造の耐震壁並びに鉄骨鉄筋コンクリート造の柱で支持されており、南北方向に配置された7構面の主トラスと主トラスの中間の母屋、東西方向の4構面のサブトラスとサブトラスの中間のサブビームで支持されている。屋根スラブ下面に取りつく主トラス上弦材及びサブトラス上弦材はH型断面の鋼材であり、スタッドボルトで屋根スラブと一体化することにより面内及び面外に高い剛性を確保している。屋根スラブの断面図を第2.2-1図に示す。

屋根スラブには気密性の機能維持が要求されるため、換気性能とあいまって機能維持する方針である。なお、屋上面には防水材を施すことにより、防水性を確保している。



第2.2-1図 屋根スラブ断面図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 2.3 原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア

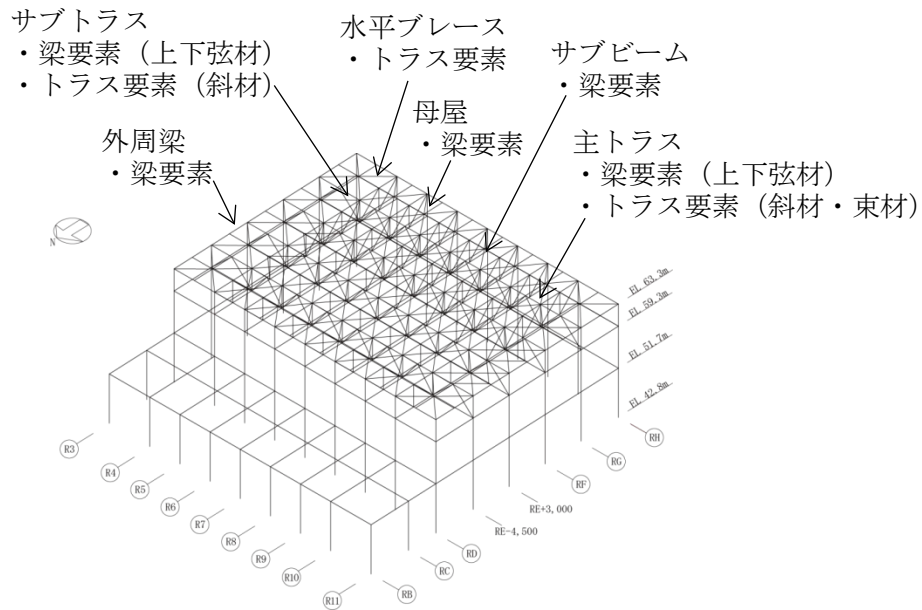
### (1) 解析モデルの概要

原子炉建物屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向地震力の同時入力による評価を行うために3次元モデルによる地震応答解析を採用する。

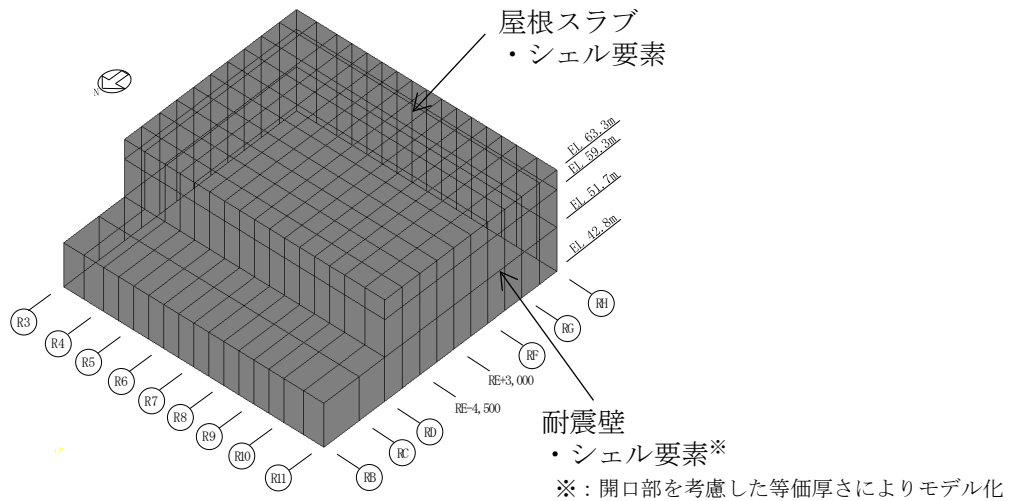
地震応答解析モデルは、燃料取替床レベル（E L 42.8m）より上部の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）の柱、梁、壁、鉄骨造の屋根トラス及び屋根面水平ブレース等を線材、面材により立体的にモデル化した3次元フレームモデルとし、部材に発生する応力を地震応答解析によって直接評価できるモデルとしている。解析モデルの概要を第2.3-1図に示す。

屋根トラス部は、主トラス、サブトラス（つなぎばり）、水平ブレース（屋根上弦面）、サブビーム及び母屋をモデル化する。各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮した梁要素（トラスの上下弦材及びサブビーム等）と軸変形のみを考慮したトラス要素（水平ブレース、トラスの斜材及び束材等）としてモデル化する。また、耐震壁及び屋根スラブはシェル要素、外周梁は軸、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化し、耐震壁の開口部についても考慮する。なお、柱脚の条件は固定とする。また、解析に用いる材料の物性値を第2.3-1表に示す。

また、屋根トラスは屋根スラブとスタッドボルトで一体化されていることにより、高い剛性を確保しているため、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいても屋根スラブの面内剛性を考慮することとする。なお、屋根トラス部材の応力評価に対する保守性を考慮し、屋根スラブの面外剛性は考慮しないこととする。屋根スラブのシェル要素は主トラス及びサブトラスの各交点、並びに主トラス及びサブトラスと母屋、サブビームの各交点で節点を共有するようにモデル化する。

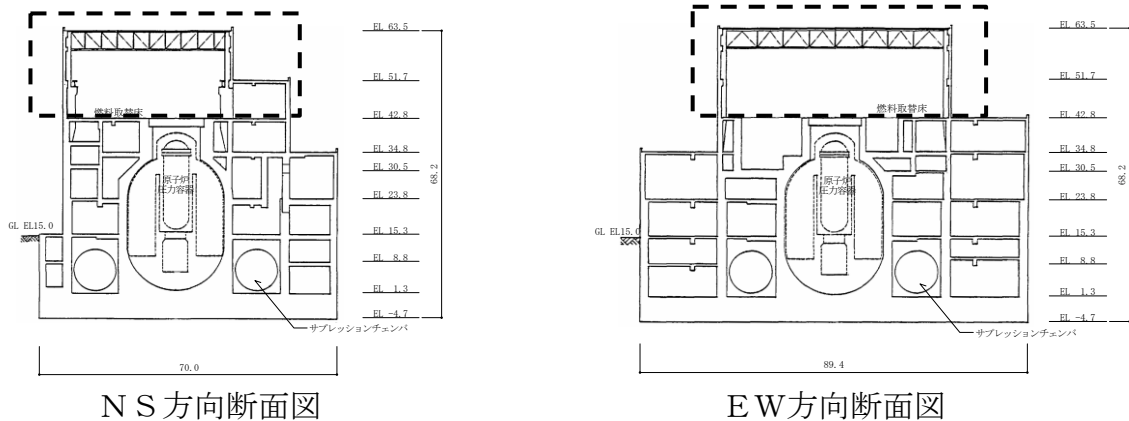


(a) 線材によるモデル化部分



(b) 面材によるモデル化部分

⌈ ⌋ : 屋根トラスモデル化範囲



(c) モデル化範囲

第 2.3-1 図 屋根トラスの解析モデルの概要

第 2.3-1 表 解析に用いる材料定数

部位	材料	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	減衰定数
屋根トラス	鉄骨	$2.05 \times 10^5$	0.3	0.02
躯体	コンクリート	$2.25 \times 10^4$	0.2	0.05

(2) 鉄骨部材の弾塑性評価

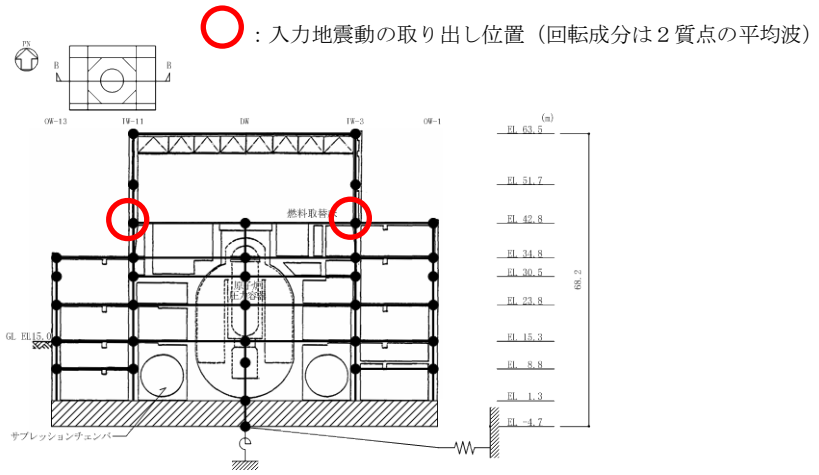
基準地震動  $S_s$  に対する評価を実施する際、トラス材としてモデル化した部材の一部については、塑性領域に入ると考えられるため、部材座屈後の挙動を模擬できる手法（修正若林モデル）に基づく弾塑性特性を考慮している。考慮した弾塑性特性の詳細については、「2.5 弾塑性解析の採用について」で示すこととする。

(3) 入力地震動，材料減衰

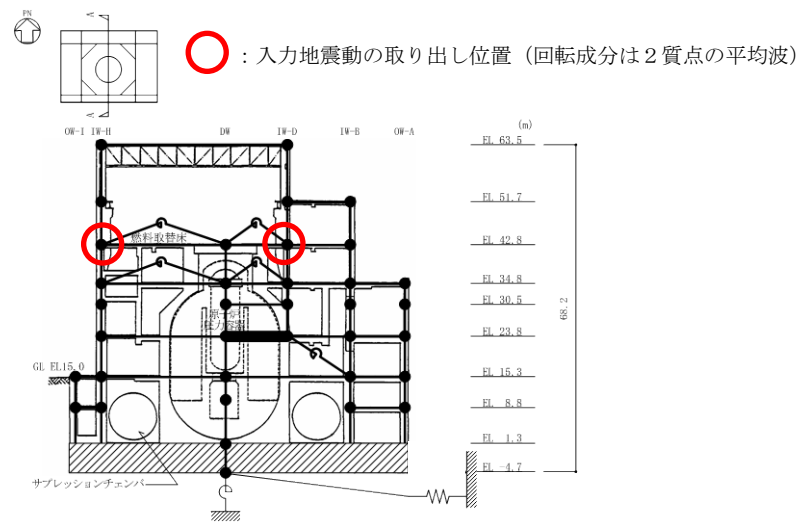
解析モデルへの入力地震動は、原子炉建物の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル（E L 42.8m）の応答結果（水平，鉛直及び回転成分）を用いることとし，燃料取替床位置を固定として，同時入力による地震応答解析を実施する。原子炉建物水平方向の質点系モデルは床剛モデルを採用しているため，加速度並進成分は燃料取替床レベルの各質点で同一応答となるが，回転成分は各質点で応答が異なるため，回転成分の入力波は，モデル脚部の 2 質点の平均波を入力する。入力地震動の取り出し位置を第 2.3-2 図に示す。また，地震応答解析における減衰評価について，鉄骨造部分については，水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数（4.60Hz）に対して減衰定数を 2% とし，鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造部分については，NS，EW 方向の短い方の 1 次周期に対して減衰定数を 5% とした減衰係数を設定する剛性比例型減衰（各部別）とする。

なお，剛性比例型減衰については，柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉の屋根トラスの設置変更許可段階の審査において採用している手法と同様である。

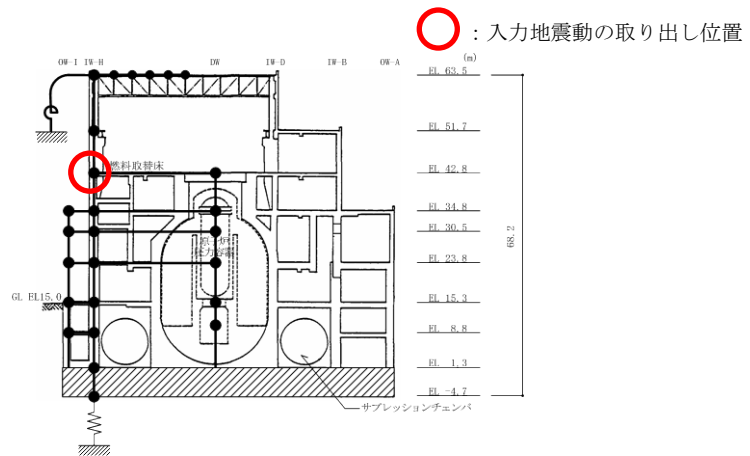




(a) NS方向



(b) EW方向



(c) 鉛直方向

第 2.3-2 図 入力地震動の取り出し位置

#### (4) 要求機能に対する設計方針（設計クライテリア）

屋根トラスの要求機能は屋根スラブの間接支持構造物であり、Sクラスである原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）のバウンダリを構成する屋根スラブの要求機能である気密性が確保されるように基準地震動  $S_s$  に対し屋根トラスの設計を行う。

屋根スラブの評価方針は、面内方向については屋根トラスの地震応答解析モデルにおいて屋根スラブの面内剛性を考慮しているため、屋根スラブに発生する面内応力を対象に機能維持評価を実施する。面外方向については、質点系モデルの屋根面に対応する鉛直方向震度を用いて、主トラス上弦材、サブトラス上弦材、サブビーム及び母屋に支持されるスラブとして評価する。また、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいては屋根スラブの面外剛性は考慮していないが、詳細設計段階では面外剛性を考慮した解析により、屋根スラブの応答性状や応力分布などを確認のうえ機能維持評価を実施する。

屋根トラスの評価方針については、基準地震動  $S_s$  に対して屋根スラブを支持できることを確認する。

第 2.3-2 表に屋根トラスの解析モデルのうち二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブ、耐震壁、屋根トラスの機能維持の評価方針を示す。

なお、屋根スラブにはひび割れに対して追従性のある防水材を全面に施工することにより、防水性を確保している。また、屋根スラブには防水材の他に下部の全面にデッキプレートを敷設してある。これらは気密性に対し有効な機能を有すると考えられるが、今回の気密性の検討においては、特にその性能は考慮しない。

第 2.3-2 表 機能維持の評価方針

部位	要求機能	評価方針
屋根スラブ 耐震壁 <sup>注1</sup>	気密性	(面内) 概ね弾性状態であることを算定される応力度より確認する。概ね弾性状態を超える場合は、面内せん断ひずみの許容値である最大せん断ひずみ ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) での漏えい量を算定し換気能力を下回ることを確認する。 (面外) 面外曲げに対して、鉄筋が降伏しないこと <sup>注2</sup> を確認する <sup>注3</sup> 。(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)
屋根トラス	間接支持 構造物	基準地震動 $S_s$ に対して屋根スラブを支持できること。(各部材のクライテリアは第 2.5.3-1 表参照)

注 1 : 耐震壁の気密性については質点系モデルによる算定結果を採用する。

注 2 : 「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (日本建築学会, 2005) (以下, 「RC-N 規準」という。)」の短期許容応力度の鋼材の基準強度  $F$  を「2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所, 2015) (以下, 「技術基準解説書」という。)」に基づき 1.1 倍した耐力を超えないこと。

注 3 : 屋根スラブについては、主トラス上弦材、サブトラス上弦材、サブビーム及び母屋に支持されるスラブとして鉛直方向の震度を考慮する。

## 2.4 既工認と今回工認における原子炉建物屋根トラスの解析モデルの比較

原子炉建物屋根トラスの解析モデルについて、既工認で採用した解析モデルと今回工認で採用する予定の解析モデルとの差異を整理する。既工認における屋根トラスの解析モデルと今回工認で採用予定の解析モデルの比較表を第2.4-1表に示す。

第2.4-1表のうち、解析コード、要素分割及び地震荷重の差異については、解析手法を変更したことに伴う変更である。また、モデル化については、原子炉建物屋根トラスが鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向地震力の同時入力による評価を適切に行うことを目的として3次元フレームモデルによる弾塑性時刻歴応力解析を採用している。コンクリートのヤング係数及びポアソン比については、適用基準を日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許容応力度設計法ー」(1999)に見直したことによるものである。

以上を踏まえると、既工認と今回工認における主要な差異として、「原子炉建物屋根トラスに対する弾塑性時刻歴応力解析の採用」を抽出し、以下で検討を行うこととした。

なお、今回工認の弾塑性時刻歴応力解析では、解析モデル全体の自重による変形及び地震時挙動を精度良く評価するために、屋根スラブも含めてモデル化している。屋根トラスは鉛直荷重を支持する部材として設計されており、主トラスについてはフレームを構成する部材として地震時の荷重も負担する設計としている。従って、屋根トラスの各部材に生じる応力としては、鉛直方向の自重による初期応力のほか、屋根スラブと一体となった屋根トラスの鉛直方向の面外振動による応力が加わる。また、主トラス方向の地震荷重に対しては主トラスの上下弦材やトラス材に応力が発生する。このように動的な地震応答解析では、屋根スラブをモデル化することにより、地震時の挙動が適切に評価されることから、今回工認では、燃料取替床レベルより上部を立体的なモデルとして動的な地震応答解析を実施する。

第 2.4-1 表 原子炉建物屋根トラスの解析モデルの比較

項目	既工認	今回工認
解析手法	・静的応力解析（弾性解析）	・時刻歴応力解析（弾塑性解析）
解析コード	・SD	・f a p p a s e
モデル化	・2次元フレームモデル	・3次元フレームモデル （屋根トラス部の耐震補強工事の内容を反映 <sup>注1</sup> ）
要素分割	梁要素：トラスの上下弦材等 トラス要素：トラスの斜材，束材	梁要素：トラスの上下弦材，外周梁等 トラス要素：水平ブレース，トラス斜材，束材等 シェル要素：耐震壁，屋根スラブ
材料物性	・鉄骨のヤング係数： $E=2.1 \times 10^7$ (t/m <sup>2</sup> ) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.1 \times 10^6$ (t/m <sup>2</sup> ) ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.167$	・鉄骨のヤング係数： $E=2.05 \times 10^5$ (N/mm <sup>2</sup> ) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.25 \times 10^4$ (N/mm <sup>2</sup> ) ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$
評価方法	・Aクラス施設として，基準地震動S1による地震力及び静的地震力に対して発生応力が許容限界を超えないことを確認 <sup>注2</sup>	・Sクラスである原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）のバウンダリを構成する屋根スラブの間接支持構造物として，基準地震動Ssによる地震力に対し，主トラスの各部材に発生する応力が，許容限界を超えないことを確認 ・弾塑性特性（修正若林モデル）を適用する部材が過度な塑性化はしないこと（破断の可能性がないこと）を確認 <sup>注3</sup>
地震荷重	・水平：原子炉建物の地震応答解析結果に基づく地震荷重を静的に考慮 ・鉛直：静的震度を鉛直力として入力	・水平及び鉛直： モデル脚部に原子炉建物の質点系モデルの地震応答解析による応答を同時入力
その他	・水平ブレース，屋根スラブ等の部材は重量として考慮し，剛性は考慮しない	・水平ブレース，屋根スラブ <sup>※</sup> 等の部材は3次元フレームモデルを構成する部材としてモデル化 <sup>※</sup> 屋根スラブはシェル要素としてモデル化し，面内剛性を考慮（保守性を考慮し，面外剛性は考慮しない）

注1：耐震補強工事の概要については，添付資料-1に示す。

注2：主トラスの耐震性を確認することにより，屋根スラブの要求機能は維持できると考え評価を実施。

注3：軸力のみを負担するトラス要素でモデル化した部材に弾塑性特性を考慮する。

## 2.5 弾塑性解析の採用について

### 2.5.1 弾塑性解析を採用することの目的

原子炉建物屋根トラスについては、基準地震動  $S_s$  による地震動の増大に伴い、トラスを構成する部材の一部が塑性領域に入ると考えられるが、弾性解析では当該部材の塑性化による影響を考慮できないため、解析と実現象に乖離が生じることになる。そこで今回工認では、屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価することを目的として、部材の弾塑性特性を考慮した地震応答解析を採用する予定としている。

原子炉建物屋根トラスの応力解析に弾塑性解析を取り入れることによる利点としては、既工認で採用していた弾性解析では表現できないような大入力時の弾塑性挙動を評価できることにある。弾塑性挙動を適切に評価するに当たっては、部材の弾塑性特性を適切に設定し解析を実施する必要があると考えられる。

今回工認で採用予定の屋根トラス部材の弾塑性特性について、第 2.5.1-1 表に示す。第 2.5.1-1 表に示すとおり、軸力のみを負担するトラス要素に対してのみ弾塑性特性として修正若林モデルを採用する予定である。当該モデルについては、先行電力の審査にて採用実績があり、モデルの妥当性自体に大きな論点はないと考えられるものの、島根原子力発電所 2 号炉原子炉建物屋根トラス部材の評価への適用性については、十分に確認する必要があると考えられる。

以下では、修正若林モデルの概要を確認した上で、原子炉建物屋根トラス部材への適用性を検討する。また、修正若林モデルを用いた弾塑性解析を実施することにより、一部部材の塑性化を考慮することとなるため、当該部材のクライテリアについても検討する。

第 2.5.1-1 表 屋根トラス部材の弾塑性特性について

評価部位		モデル要素	弾塑性特性
主トラス	上弦材	梁要素	考慮しない（弾性）
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル） <sup>注1</sup>
	束材		
サブトラス	上弦材	梁要素	考慮しない（弾性）
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル） <sup>注1</sup>
母屋		梁要素	考慮しない（弾性）
サブビーム		梁要素	考慮しない（弾性）
水平ブレース		トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）

注1：主トラス斜材，束材及びサブトラス斜材の細長比は修正若林モデルの適用範囲より大きい  
 が，修正若林モデルによる弾塑性特性を考慮しており，その適用性については詳細設  
 計段階で説明する。

## 2.5.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について

### (1) 今回工認で採用予定の弾塑性特性（修正若林モデル）の概要

原子炉建物屋根トラスを構成する部材のうち、軸力のみを負担するトラス要素としてモデル化した部材については、弾塑性特性として修正若林モデルを使用している。

修正若林モデルは、原子力発電所建物（実機）を対象として実施された谷口らの研究<sup>(1)</sup>に示される部材レベルの弾塑性特性である。修正若林モデルは、若林モデル<sup>(2)</sup>を基本としているが、谷口らの研究<sup>(1)</sup>で実施された実験のシミュレーション解析を踏まえて、繰り返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を累積塑性歪の関数で表現し、実験との対応度を向上させた手法であり、式（1）により評価される。

$$n/n_0 = 1/(\bar{\zeta} - Pn)^{1/6} \leq 1 \quad (1)$$

$$n = N/N_y \quad N : \text{軸力} \quad N_y : \text{降伏軸力}$$

$$n_0 : \text{無次元化初期座屈耐力} \quad \bar{\zeta} : \text{無次元化圧縮側累積塑性歪}$$

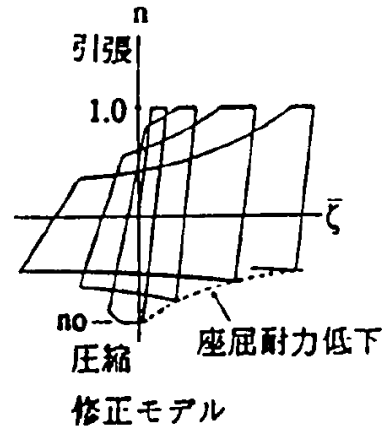
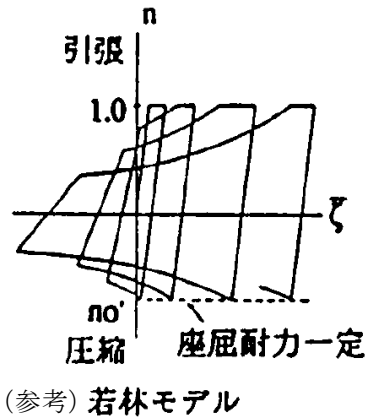
$$Pn = (n_E/4) - 5 \quad n_E = \pi^2 E / (\lambda e^2 \sigma_y) \quad \lambda e : \text{有効細長比}$$

修正若林モデルの弾塑性特性を第 2.5.2-1 図に示す。

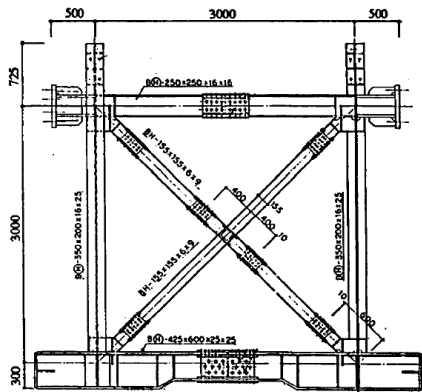
谷口らの研究<sup>(1)</sup>においては、実機の特徴を反映した X 型ブレース架構の静的繰り返し実験を実施している。また、修正若林モデルの妥当性を確認するに当たって、ブレース部材の弾塑性特性として修正モデルを適用した解析モデルによる実験のシミュレーション解析を実施しており、解析結果は実験結果を概ねよくとらえているとしている。試験体の概要を第 2.5.2-2 図、解析モデルを第 2.5.2-3 図、解析結果と実験結果の比較を第 2.5.2-4 図に示す。

なお、本復元力特性については、前述のとおり、川内原子力発電所タービン建屋の解析で考慮したブレースの弾塑性特性及び東海第二原子力発電所原子炉建屋の解析で考慮したトラス部材の弾塑性特性として採用されており、認可実績がある。

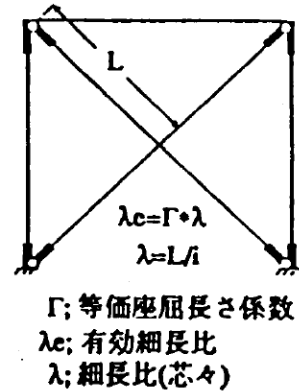




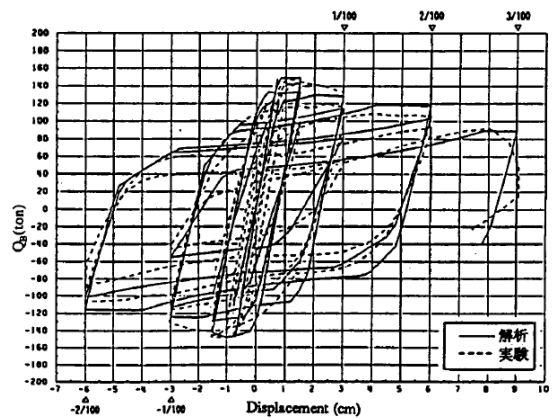
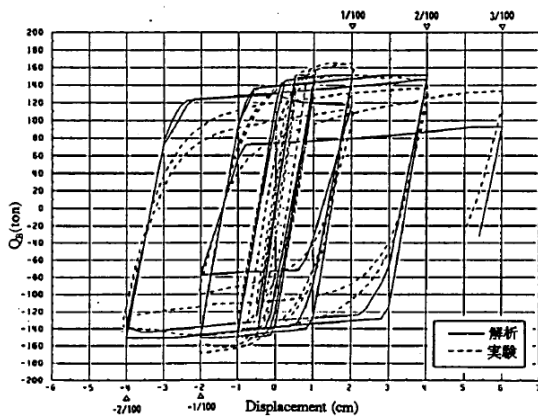
第 2.5.2-1 図 修正若林モデルの弾塑性特性 ((1)より引用, 一部加筆)



第 2.5.2-2 図 試験体の概要 ((1)より引用)



第 2.5.2-3 図 解析モデル ((1)より引用)



第 2.5.2-4 図 解析結果と実験結果の比較 ((1)より引用)

## (2) 原子炉建物屋根トラスに対する検証例

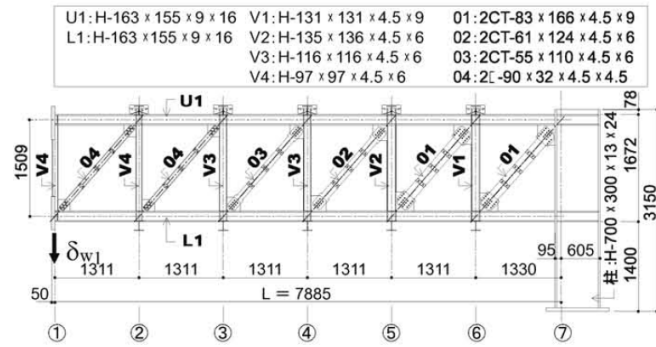
谷口らの研究<sup>(1)</sup>は、X型ブレース架構を対象としたものであったが、原子炉建物屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例として、鈴木らの研究<sup>(3)</sup>がある。

この研究は、原子炉建物屋根トラスの終局耐力について検討したものであるが、実験結果を高精度にシミュレーションするために構築したモデルの中で本弾塑性特性が適用されている。

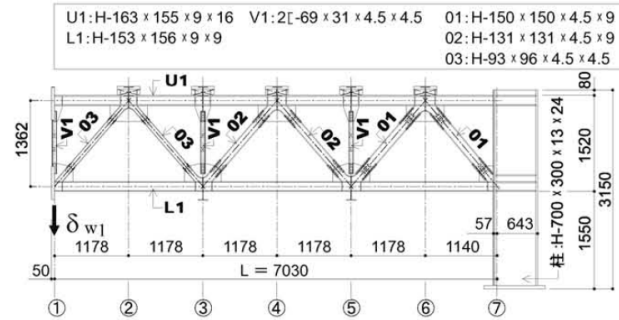
鈴木らの研究<sup>(3)</sup>では、終局耐力を検討するにあたり原子炉建物屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的載荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験に当たっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。島根原子力発電所2号炉の原子炉建物屋根トラスはこのうち、プラット形に該当する。試験体の概要を第2.5.2-5図に示す。

実験のシミュレーション解析においては、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として修正若林モデルが適用されており、実験結果とシミュレーション解析を比較し、精度良く実験結果を追跡できているとしている。結果の比較を第2.5.2-6図に示す。

以上のように修正若林モデルは、提案当初のX型ブレース材に加えて、ワーレン形、プラット形の鉄骨トラスでも実験結果を精度良く追跡できている。幅広い鉄骨架構形式において軸力のみを負担する部材の弾塑性特性として適用可能であると考えられる。

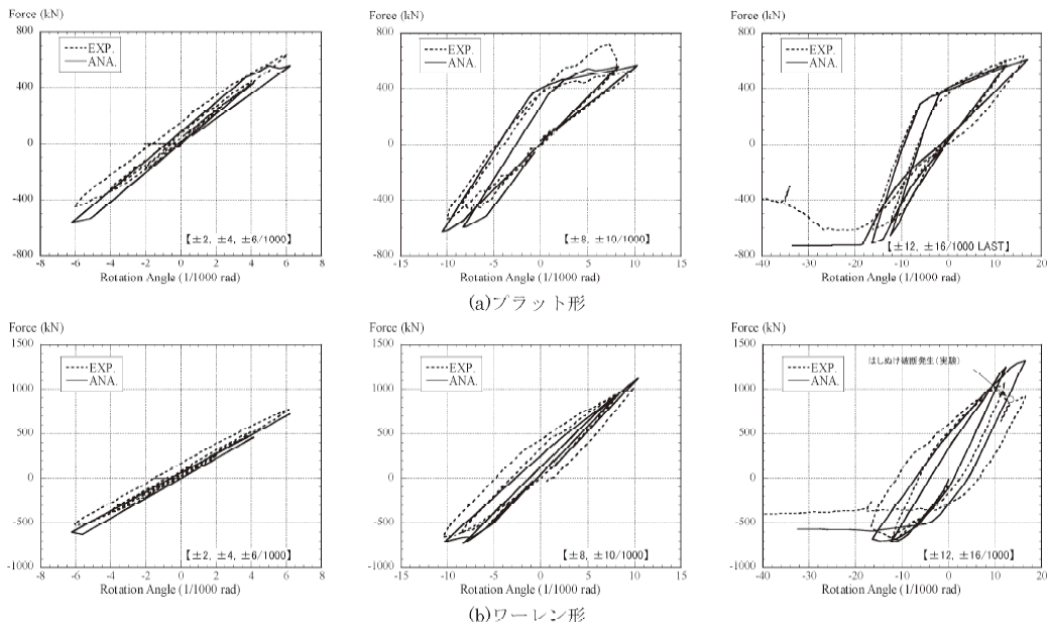


(a) プラット形試験体



(b) ワーレン形試験体

第 2.5.2-5 図 試験体の概要 ((3) より引用)



第 2.5.2-6 図 実験のシミュレーション解析結果 ((3) より引用)

(3) 原子力発電所鉄骨屋根トラスへの適用性

今回採用を予定している修正若林モデルについては、提案当初より、原子力発電所（実機）を対象として実施された実験により妥当性が検証されており、また、原子炉建物鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析においてもその適用性・妥当性が検証されている。これより、原子炉建物屋根トラスの鉄骨部材のうち、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として、修正若林モデルを採用することは妥当であると考えられる。

### 2.5.3 各部材のクライテリアについて

入力地震動の増大に伴い鉄骨部材の一部が塑性領域に入ると考えられることから、今回工認においては、弾塑性解析による評価を実施し、弾塑性特性を適用した部材が過度な塑性化はしないことを確認する予定である。これらのうち塑性化を許容する部材は、既工認時には地震力を負担しない部材として取り扱われていたが、3次元挙動を適切に評価するという観点からモデルに取り入れた部材である。ただし、主トラスの主要構造部材については、既工認時から地震力を負担する部材として取り扱われており、今回工認においては既工認と同様に弾性範囲内にあることを確認し、弾性範囲を上回る応答が生じた場合は別途詳細な検討を行う方針とする。また、その他の部材についても弾性範囲内にあることを確認する。第2.5.3-1表に各部材のクライテリアを示す。

塑性化する鉄骨部材が過度な塑性化はしないことの確認に当たっては、各部材の累積塑性変形倍率を整理した上で、累積塑性変形倍率が最も大きい部材について破断の可能性がないことを検討する。検討は、当該部材の履歴ループを参照し、局部集中ひずみの繰返し回数が、中込ほか(1995)<sup>(4)</sup>に基づき算定される当該部材の最大ひずみ度に対する破断寿命(繰返し回数)を下回っていることを確認する。この手法は先行審査(川内原子力発電所タービン建屋)でも認可実績のある手法であることから、手法自体に技術的な論点はないものと考えられる。

第 2.5.3-1 表 今回工認における屋根トラス各部材のクライテリア

評価部位		要求機能 <sup>注1</sup>	弾塑性特性	評価方法 <sup>注3</sup>
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持，フレームを構成する部材として水平地震荷重，クレーン荷重の支持	考慮しない（弾性）	弾性範囲内であることを確認 <sup>注2</sup>
	下弦材			
	斜材		弾塑性（修正若林モデル）	弾性範囲内であることを確認 <sup>注2</sup> （弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討）
	束材			
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	弾性範囲内であることを確認 <sup>注2</sup>
	下弦材		弾塑性（修正若林モデル）	過度な塑性化はしないこと（破断の可能性がないこと）を確認
	斜材			
母屋	鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	弾性範囲内であることを確認 <sup>注2</sup>	
サブビーム	鉛直荷重の支持	考慮しない（弾性）	弾性範囲内であることを確認 <sup>注2</sup>	
水平ブレース	—	弾塑性（修正若林モデル）	過度な塑性化はしないこと（破断の可能性がないこと）を確認	

注 1：主な機能を示しており基準地震動  $S_s$  に対する発生応力の負担も考慮する。

注 2：「RC-N 規準」の短期許容応力度の鋼材の基準強度  $F$  を「技術基準解説書」に基づき 1.1 倍した耐力を超えないこと。

注 3：接合部はボルト接合としており，保有耐力接合を基本とする。

### 3. 原子炉建物屋根トラスの評価に関するまとめ

今回工認では、原子炉建物屋根トラスの評価に当たって、3次元フレームモデルによる弾塑性解析（弾塑性特性としては修正若林モデルを考慮）を採用する予定である。修正若林モデルは先行審査で採用実績のある弾塑性特性であるが、X型ブレースを対象として検討されたものであったため、本検討においては、修正若林モデルの原子炉建物屋根トラスへの適用性を検討する必要があると判断した。既往文献（原子炉建物鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析）を参照し、その適用性・妥当性が検証されていることを確認した。また、屋根スラブの要求機能と評価方針を踏まえ、弾塑性特性を考慮する部材のクライテリアについても検討し、妥当性を確認した。

以上より、今回工認において原子炉建物屋根トラスの評価に弾塑性解析を採用することは妥当であると考えられる。また、弾塑性特性を採用した屋根トラスの評価及び屋根スラブの検討により、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持の評価方針を整理した。

なお、原子炉建物屋根トラスは、原子炉建物の地震応答解析結果に基づく燃料取替床レベルの応答を入力地震動として評価を実施しており、入力地震動の不確かさ（建物応答の不確かさ）を踏まえた場合でも許容値を満足することを確認することにより保守性に配慮した設計とする予定である。

### 4. 参考文献

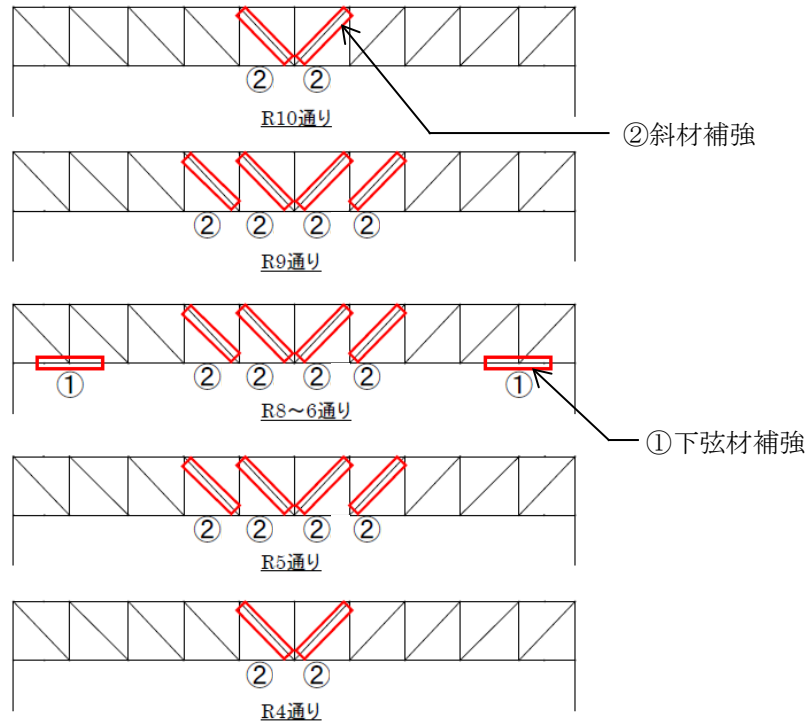
- (1) 谷口ほか：鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol. 37B 号，1991年3月，pp. 303-316
- (2) 柴田ほか：鉄骨筋違の履歴特性の定式化，日本建築学会論文報告集第316号，昭和57年6月，pp. 18-24
- (3) 鈴木ほか：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 Vol. 76 No. 661，2011年3月，pp. 571-580
- (4) 中込ほか（1995）：繰返し力を受けるSM490鋼の疲労性に関する研究，日本建築学会構造系論文集 No. 469，1995年3月，pp. 127-136

### 原子炉建物屋根トラスの耐震補強について

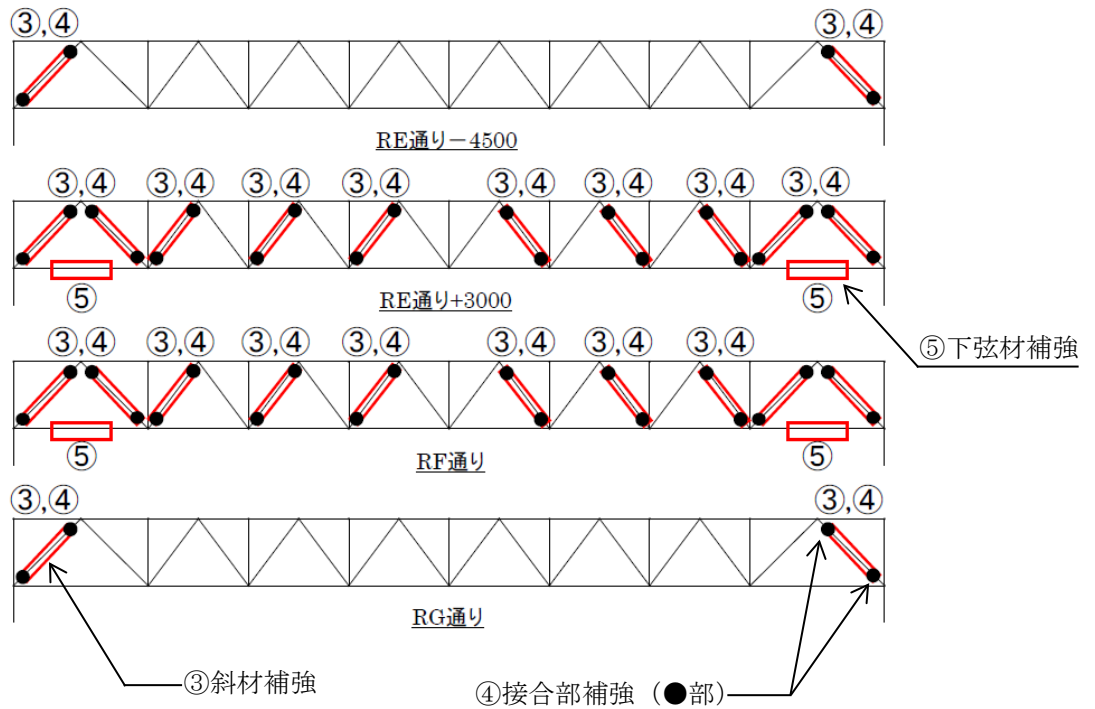
島根原子力発電所 2 号炉の原子炉建物屋根トラスについては耐震補強工事を実施しており、本資料では、当該工事における補強の内容について説明する。

屋根トラスの補強については、主トラスやサブトラスの余裕の少ない部材に対して、補強材の追加等による耐震補強工事を実施している。耐震補強箇所を第 1-1 図に、補強部材の詳細を第 1-1 表に示す。






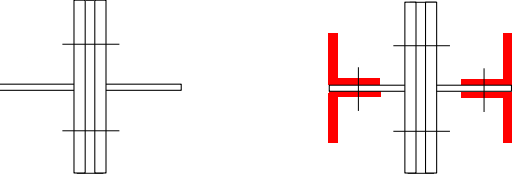
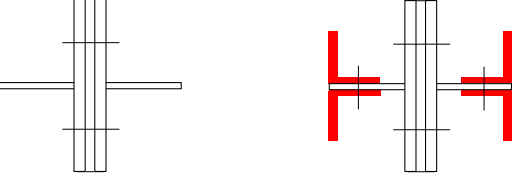
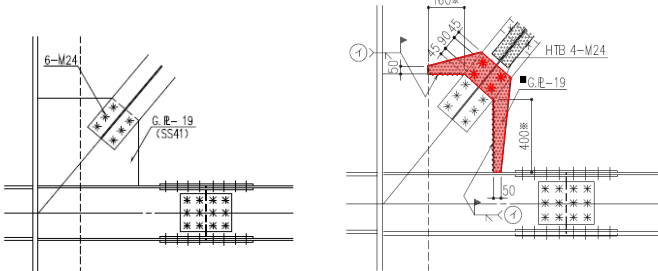
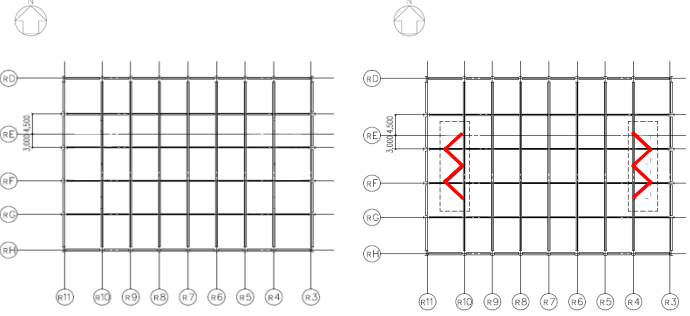
主トラス断面図



サブトラス断面図

第1-1図 屋根トラスの補強箇所

第1-1表 補強部材の詳細

No	箇所及び補強方法	
①	主トラス下弦材 補強材追加	 <p>補強材 PL-16</p> <p>補強前                      補強後</p>
②	主トラス斜材 補強材追加	 <p>補強材 4Ls-90×90×10</p> <p>補強前                      補強後</p>
③	サブトラス斜材 補強材追加	 <p>補強材 4Ls-65×65×6</p> <p>補強前                      補強後</p>
④	サブトラス斜材 接合部補強	 <p>接合部補強 (PL-19, ボルト)</p> <p>補強前                      補強後</p>
⑤	サブトラス下弦材 補強材追加	 <p>補強材 2Cs-150x75x9x12.5</p> <p>補強前                      補強後</p>

剛性比例型減衰の妥当性について

1. はじめに

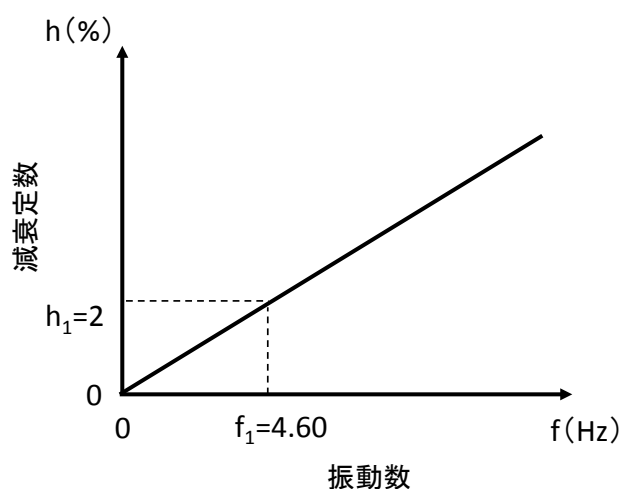
今回工認では，原子炉建物屋根トラスの地震応答解析における減衰評価について，鉄骨造の構造物に対して一般的に適用している剛性比例型としている<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>。

第 1-1 表に原子炉建物屋根トラスの暫定の固有値解析結果を，第 1-1 図に剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係を示す。

鉄骨造の屋根トラスは，水平材として鉛直方向の挙動が卓越すると考えられるため，水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数 (4.60Hz) に対して減衰定数が  $h = 2\%$  となる剛性比例型減衰を与えている。第 1-1 図より，剛性比例型減衰の特徴として高次モードの減衰を大きくとることになるが，高次モードが屋根トラスの応答へ及ぼす影響は小さいため，剛性比例型減衰の採用が屋根トラスの応答へ与える影響は小さいと考える。

第 1-1 表 原子炉建物屋根トラスの固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (秒)	刺激係数			備考
			N S 方向 (Y)	E W 方向 (X)	鉛直方向 (Z)	
1	4.60	0.217	0.085	-0.003	1.748	鉛直方向 1 次
2	6.23	0.160	-0.004	-0.040	-0.001	鉛直方向 2 次
3	7.87	0.127	-1.717	0.016	-0.002	N S 方向 1 次
4	8.12	0.123	-0.014	-1.988	0.006	E W 方向 1 次



第 1-1 図 剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係

## 2. 剛性比例型減衰設定の妥当性の確認

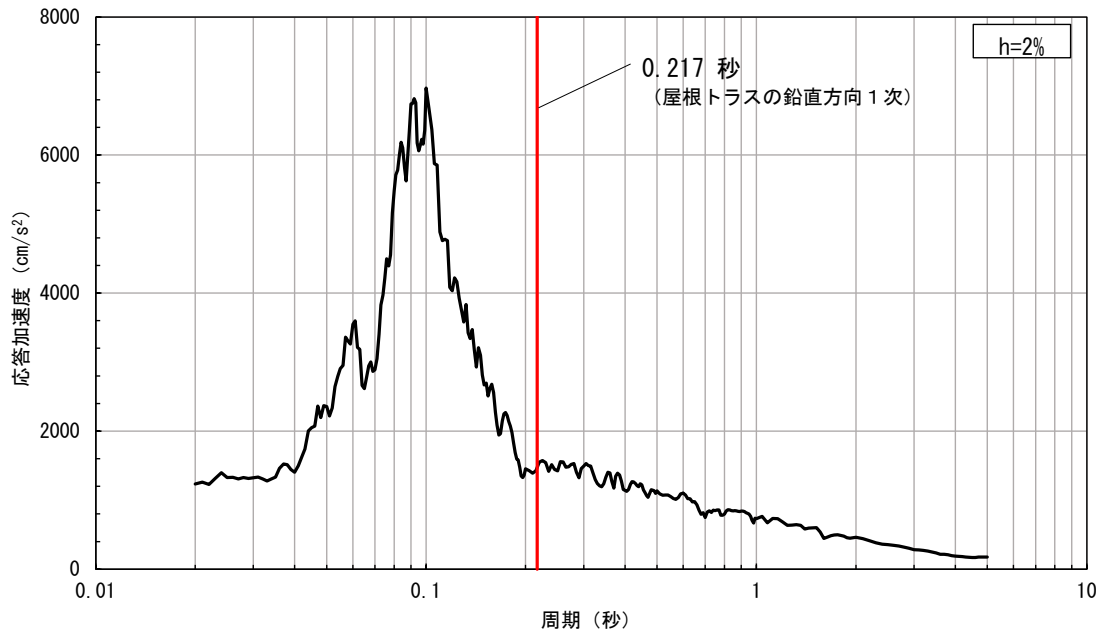
第1-1表に示すとおり屋根トラスの水平方向の1次固有振動数（固有周期）は、NS方向：7.87Hz（0.127秒），EW方向：8.12Hz（0.123秒）であり、鉛直方向の1次固有振動数は、4.60Hz（0.217秒）である。剛性比例型減衰の採用にあたっては、上記の振動数のいずれかの振動数を基準に設定することとする。

原子炉建物の地盤－建物連成系の水平方向の1次固有振動数はNS方向4.55Hz（0.220秒），EW方向4.94Hz（0.203秒）である。鉛直方向については、地盤－建物連成系の1次固有振動数は9.48Hz（0.105秒）である。これらの1次固有振動数から屋根トラスの応答に影響が大きい成分を判断することは難しい。屋根トラスの構造面からは、鉛直方向の振動の影響が大きいと判断されるため、剛性比例型減衰の設定は鉛直方向の1次固有振動数に対して設定することとする。

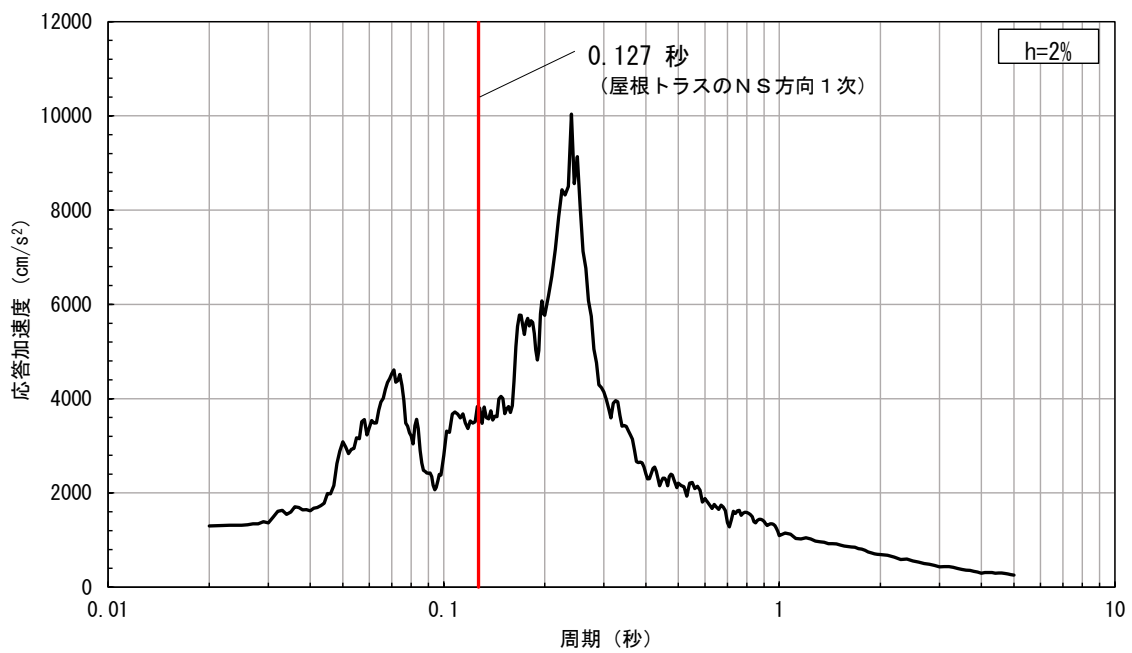
また、参考として屋根トラスの各方向の固有周期と解析モデルへの入力地震動の加速度応答スペクトル（基準地震動 $S_s-D$ ）の関係を第1-2図に示す。入力地震動の応答スペクトルの卓越周期は原子炉建物の地盤－建物連成系の各方向の1次周期に概ね対応しており、いずれの方向についても赤線で示す屋根トラスの1次固有周期とは離れた周期となっている。

以上のことから、屋根トラスの応答は、建物の各方向の1次固有振動数（固有周期）との関連性が小さく、また、高次モードが屋根トラスの応答へ及ぼす影響は小さいと考えられるため、屋根トラスの構造面から応答に影響が大きいと判断される屋根トラスモデルの鉛直方向の1次固有振動数（4.60Hz）に対して減衰定数が $h=2\%$ となる剛性比例型減衰を設定することは妥当であると考えられる。

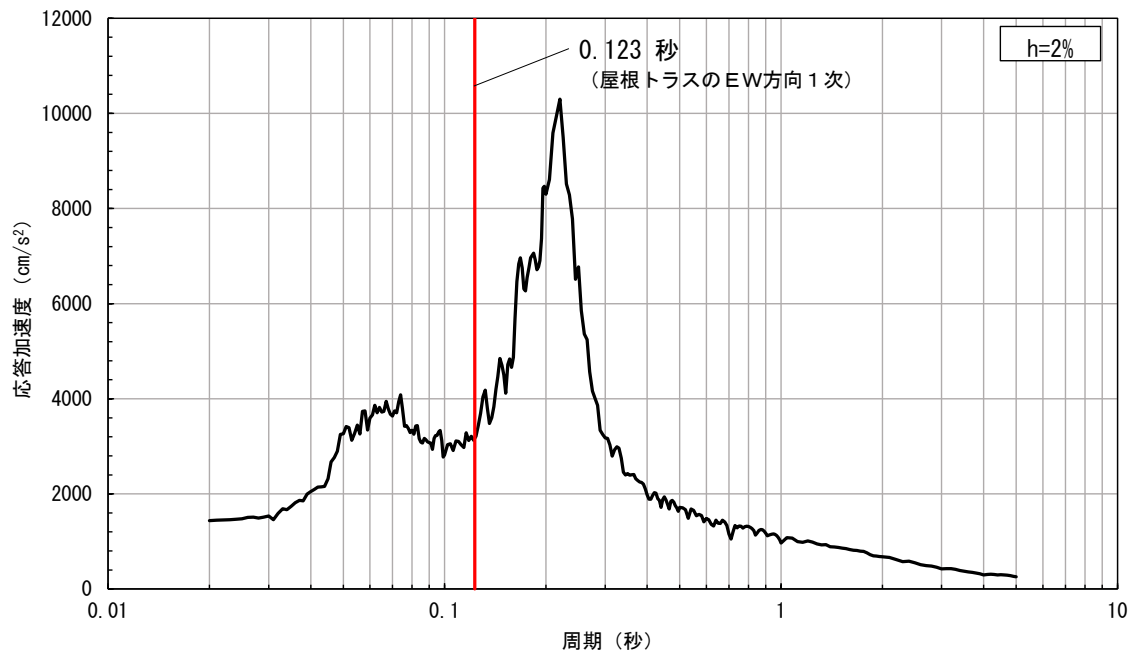
なお、詳細設計段階においては、代表ケースを選定して剛性比例型以外の減衰（例えば鉛直1次と2次で規定したレイリー減衰）を用いて、高次モードの影響を確認することとする。



第 1-2 図 (1) 屋根トラスの固有周期と入力地震動の加速度応答スペクトル (基準地震動 S<sub>s</sub>-D) の関係 鉛直方向



第 1-2 図 (2) 屋根トラスの固有周期と入力地震動の加速度応答スペクトル (基準地震動 S<sub>s</sub>-D) の関係 NS方向



第 1-2 図 (3) 屋根トラスの固有周期と入力地震動の加速度応答スペクトル (基準地震動 S<sub>s</sub>-D) の関係 EW 方向

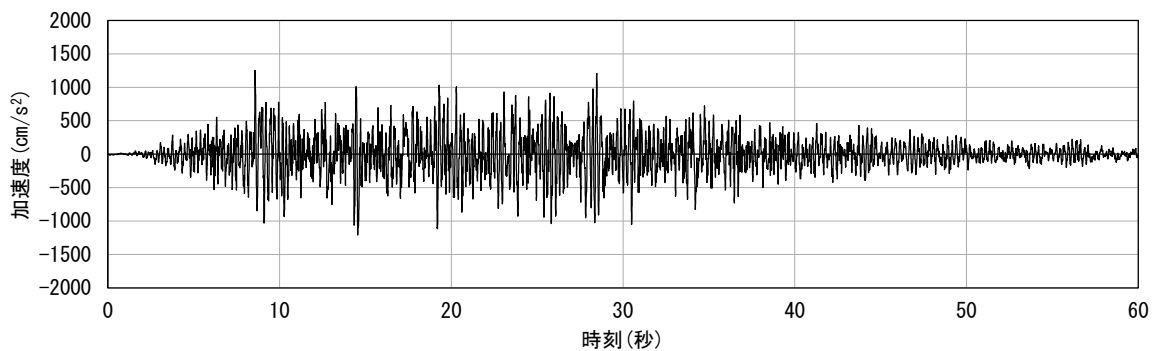
### 3. 参考文献

- (1) 日本建築センター：性能評価を踏まえた超高層建築物の構造設計実務—超高層・免震建築物の構造設計者が実際に行ってきた検討と判断を集大成—，2019
- (2) 日本建築学会：建築物の減衰，2000

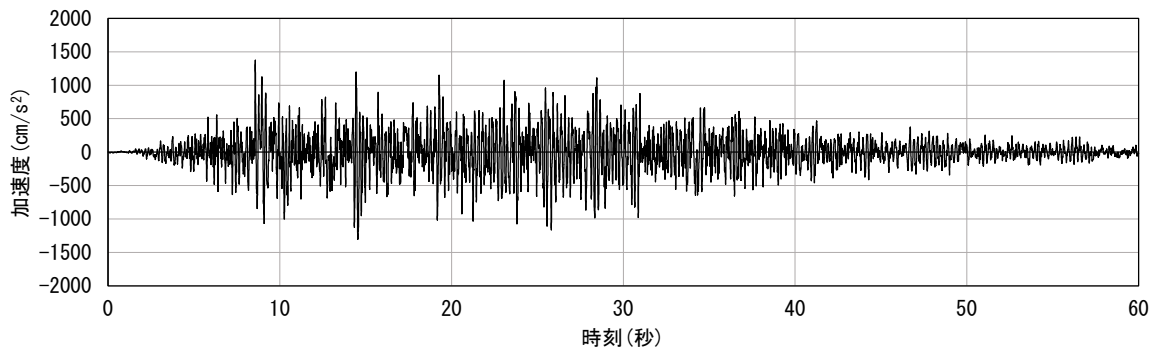
屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

1. 屋根トラスの入力地震動

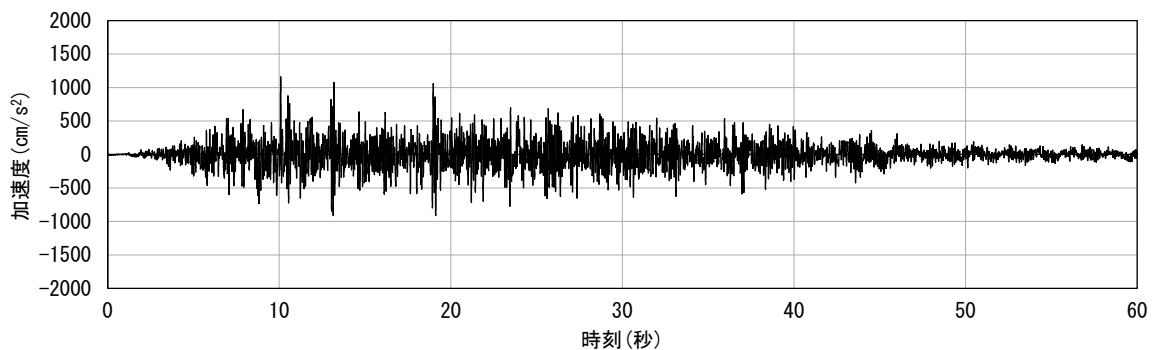
屋根トラスへの入力として用いている入力地震動（原子炉建物の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル（E L 42.8m）の応答結果）の時刻歴波形（暫定応答）について，基準地震動  $S_s - D$  を例として第2-1図に示す。地震応答解析を実施する際には，水平，鉛直成分は加速度時刻歴波形を，回転成分は回転角加速度時刻歴波形を入力している。



(a) NS方向（水平）

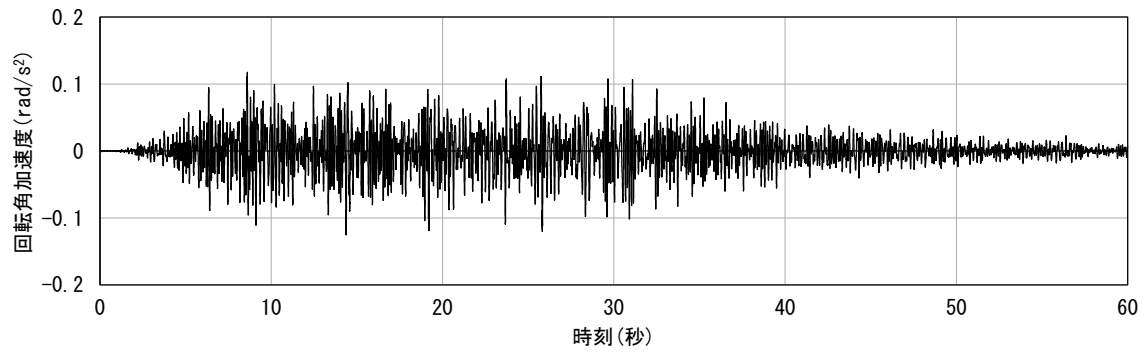


(b) EW方向（水平）

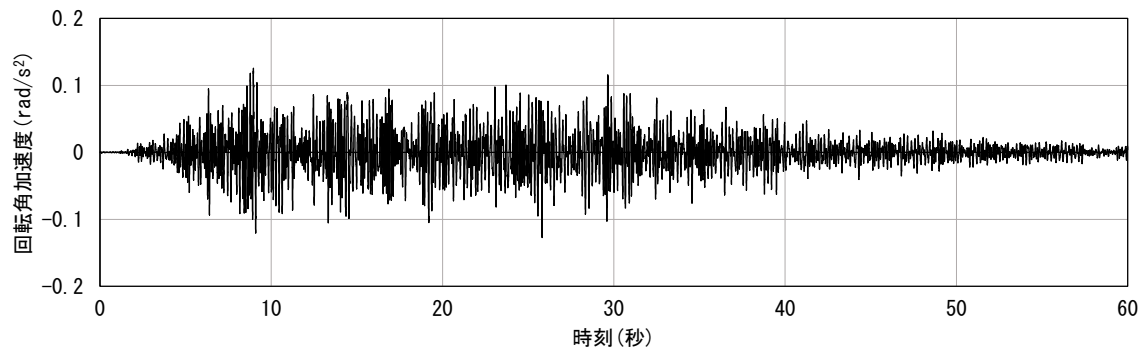


(c) 鉛直方向

第2-1図 (1) 入力地震動の時刻歴波形（加速度，水平，鉛直成分）



(a) NS方向 (回転)



(b) EW方向 (回転)

第2-1図 (2) 入力地震動の時刻歴波形 (加速度, 回転成分)



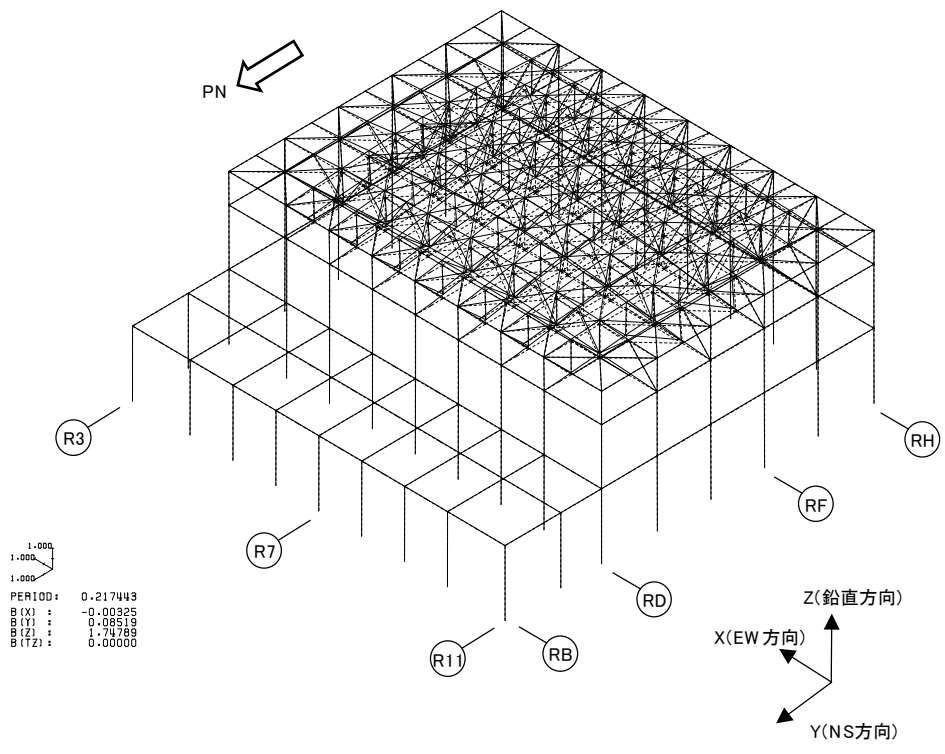
## 2. 屋根トラスの固有値解析結果

屋根トラスの暫定の固有値解析結果を第2-1表及び第2-2図に示す。

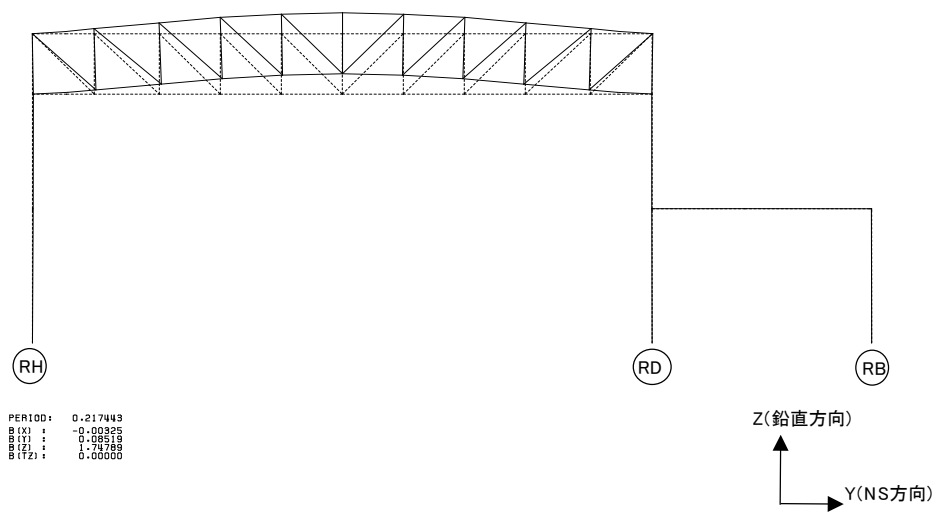
1次固有振動数は鉛直方向で4.60Hz, 水平方向で7.87Hz (NS方向), 8.12Hz (EW方向) となる。

第2-1表 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (秒)	刺激係数			備考
			NS方向 (Y)	EW方向 (X)	鉛直方向 (Z)	
1	4.60	0.217	0.085	-0.003	1.748	鉛直方向1次
2	6.23	0.160	-0.004	-0.040	-0.001	鉛直方向2次
3	7.87	0.127	-1.717	0.016	-0.002	NS方向1次
4	8.12	0.123	-0.014	-1.988	0.006	EW方向1次

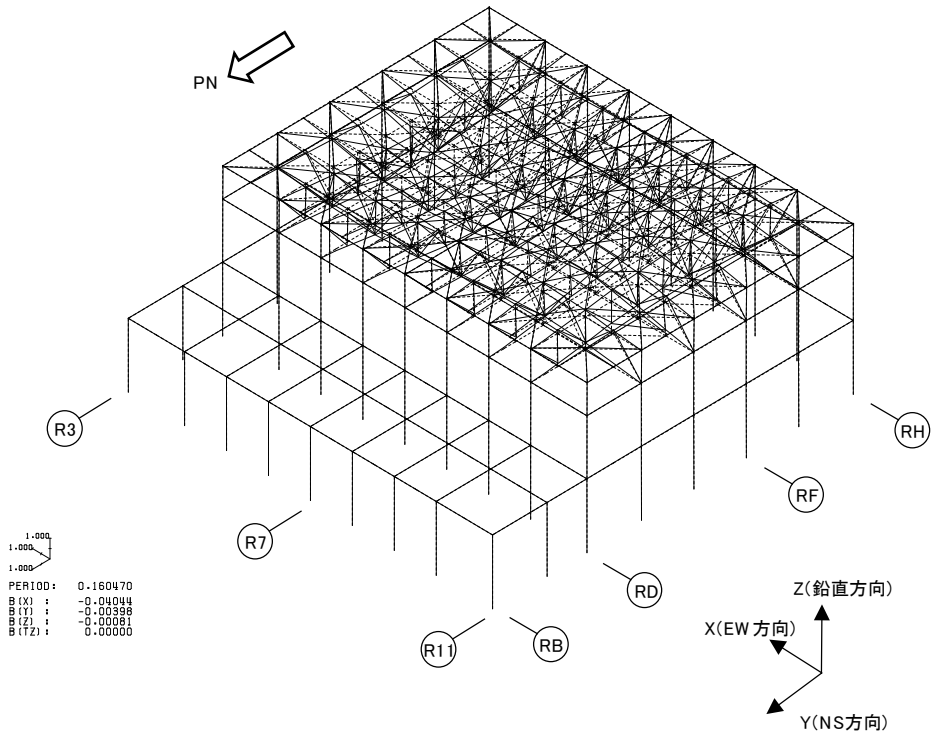


(a) 全体

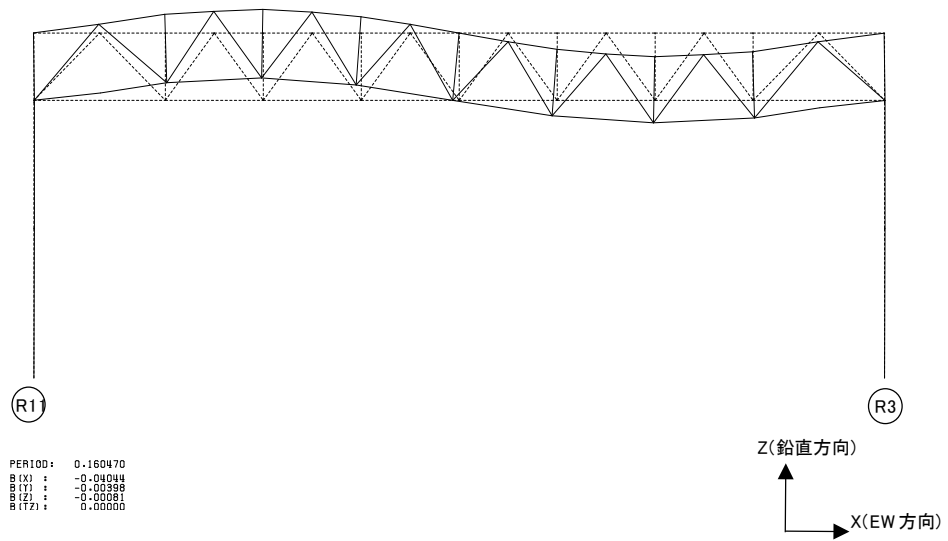


(b) 主トラス構面 (R7 通り)

第 2-2 図 (1) 固有モード図 (全体 1 次 : 屋根の鉛直 1 次)

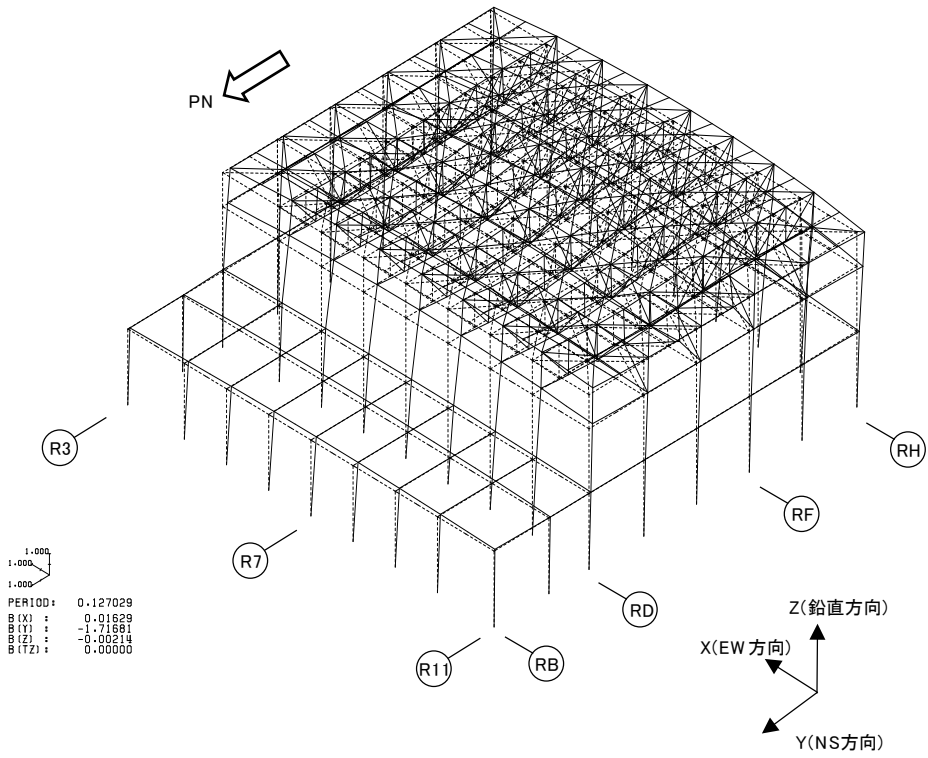


(a) 全体

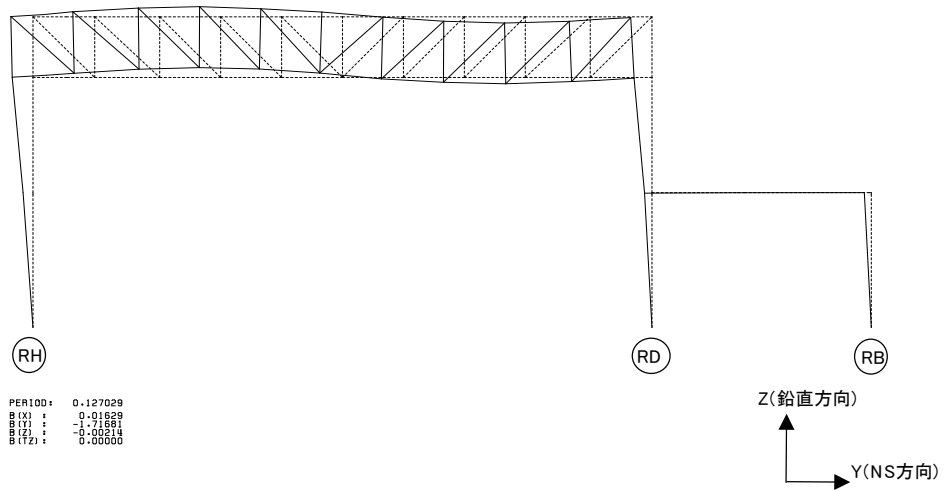


(b) サブトラス構面 (RF 通り)

第 2-2 図 (2) 固有モード図 (全体 2 次 : 屋根の鉛直 2 次)

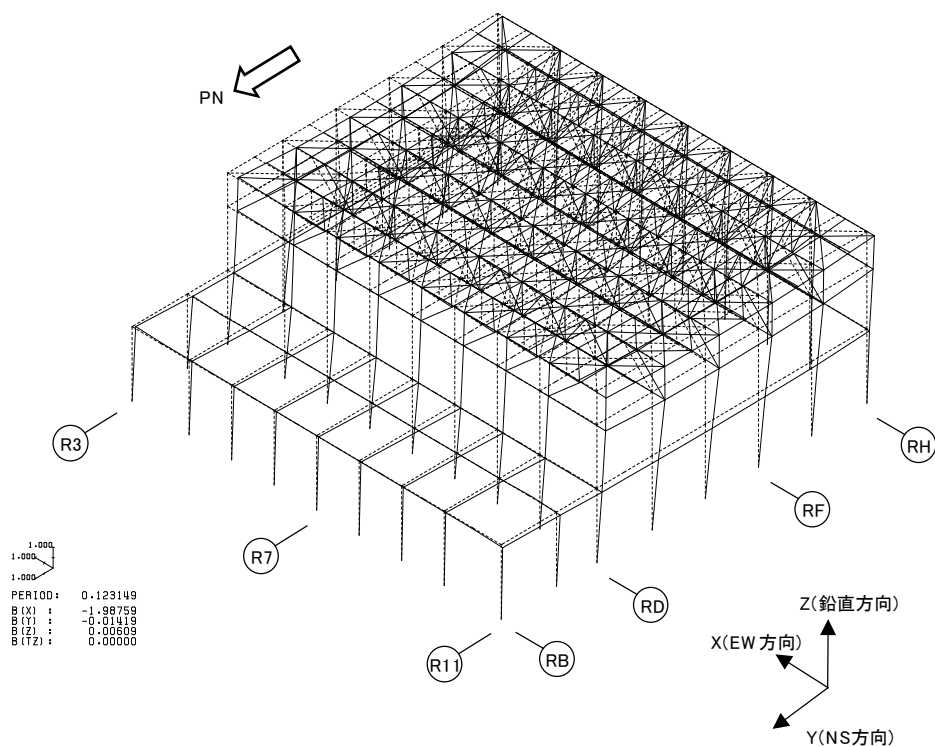


(a) 全体

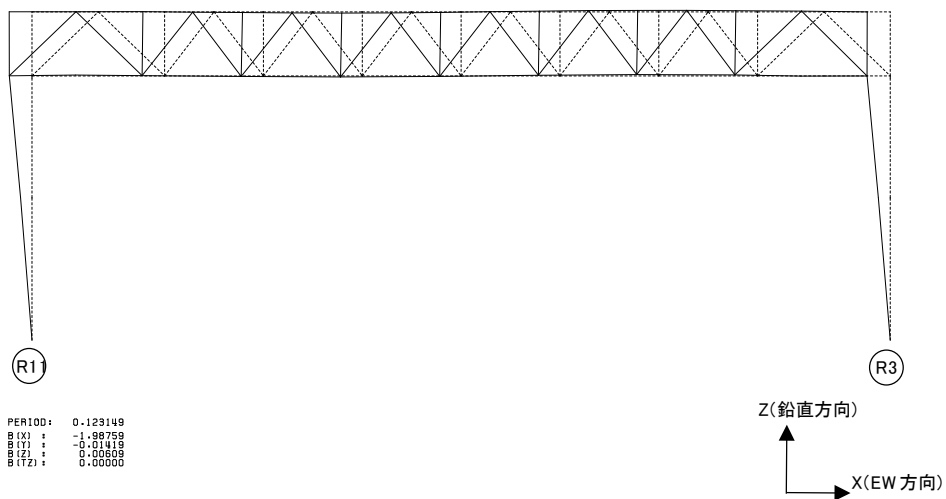


(b) 主トラス構面 (R7 通り)

第2-2図 (3) 固有モード図 (全体3次: NS方向水平1次)



(a) 全体



(b) サブトラス構面 (RF 通り)

第 2-2 図 (4) 固有モード図 (全体 4 次 : EW 方向水平 1 次)

### 3. 屋根トラスの耐震評価の見通し

屋根トラスの主要部材については、概ね弾性範囲となる見込みであるが、一部の部材が弾性範囲を超える場合については、詳細設計段階で別途詳細な検討をしていく。

## 屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

## 1. 概要

原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルへの入力地震動は、原子炉建物の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル（E L 42.8m）の応答時刻歴波形を用いるが、鉛直動に対する質点系モデルでは、屋根スラブの剛性は考慮していない。

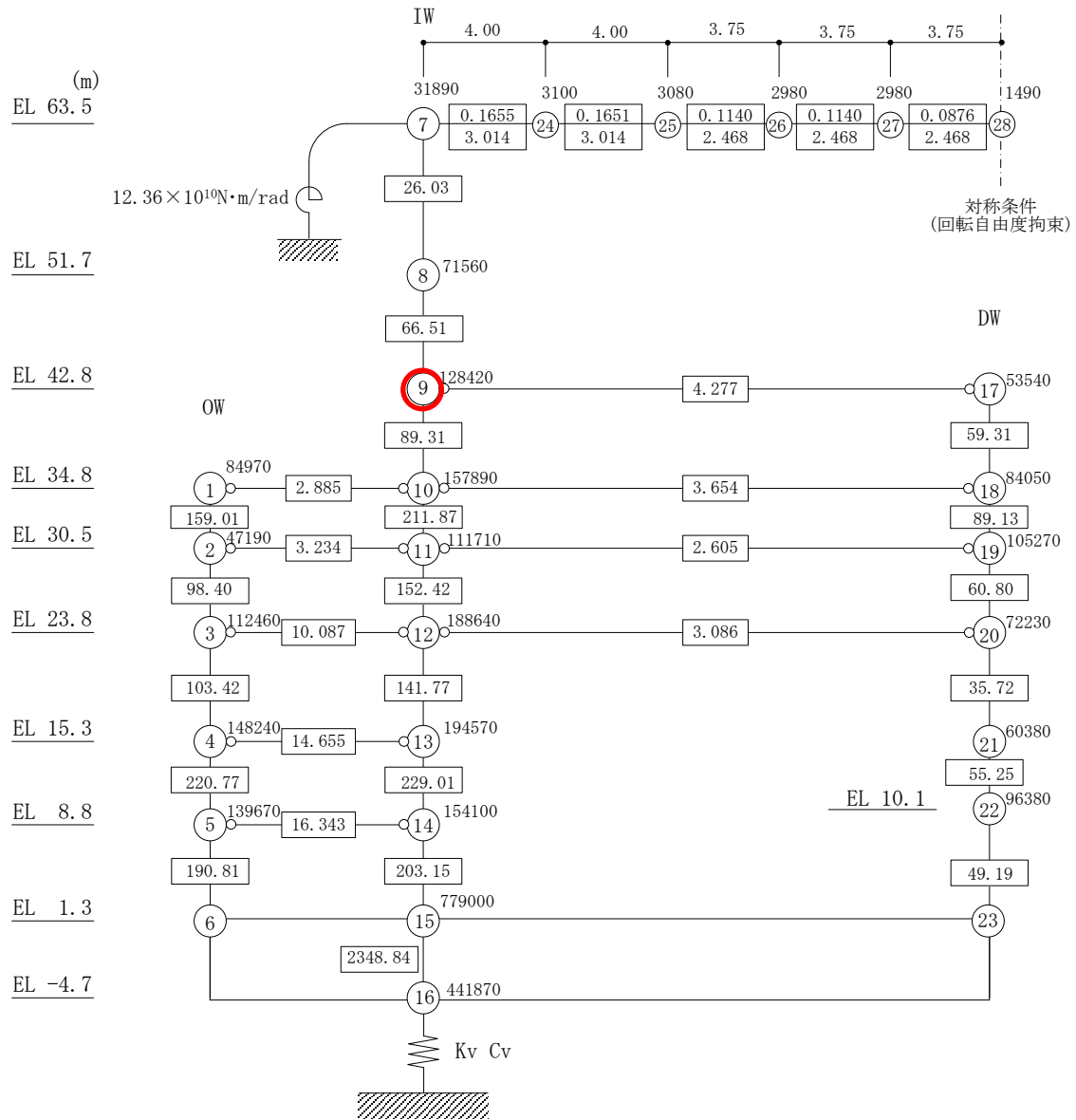
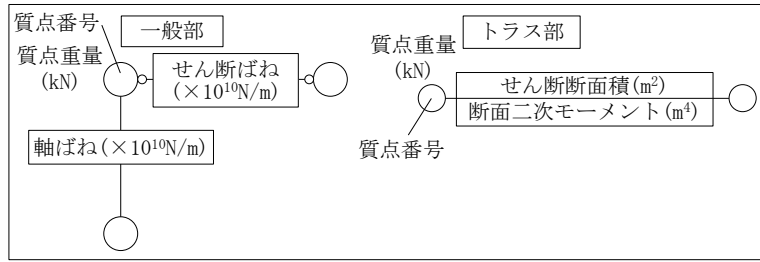
鉛直動に対する質点系モデルにおいて、屋根スラブの剛性を考慮した場合についても解析を実施し、原子炉建物屋根トラスの地震応答解析モデルへの入力地震動に与える影響を確認する。

## 2. 検討結果

鉛直動に対する質点系モデルを第3-1図に、屋根スラブの面外剛性を屋根部分の剛性に考慮したモデルを第3-2図に示す。

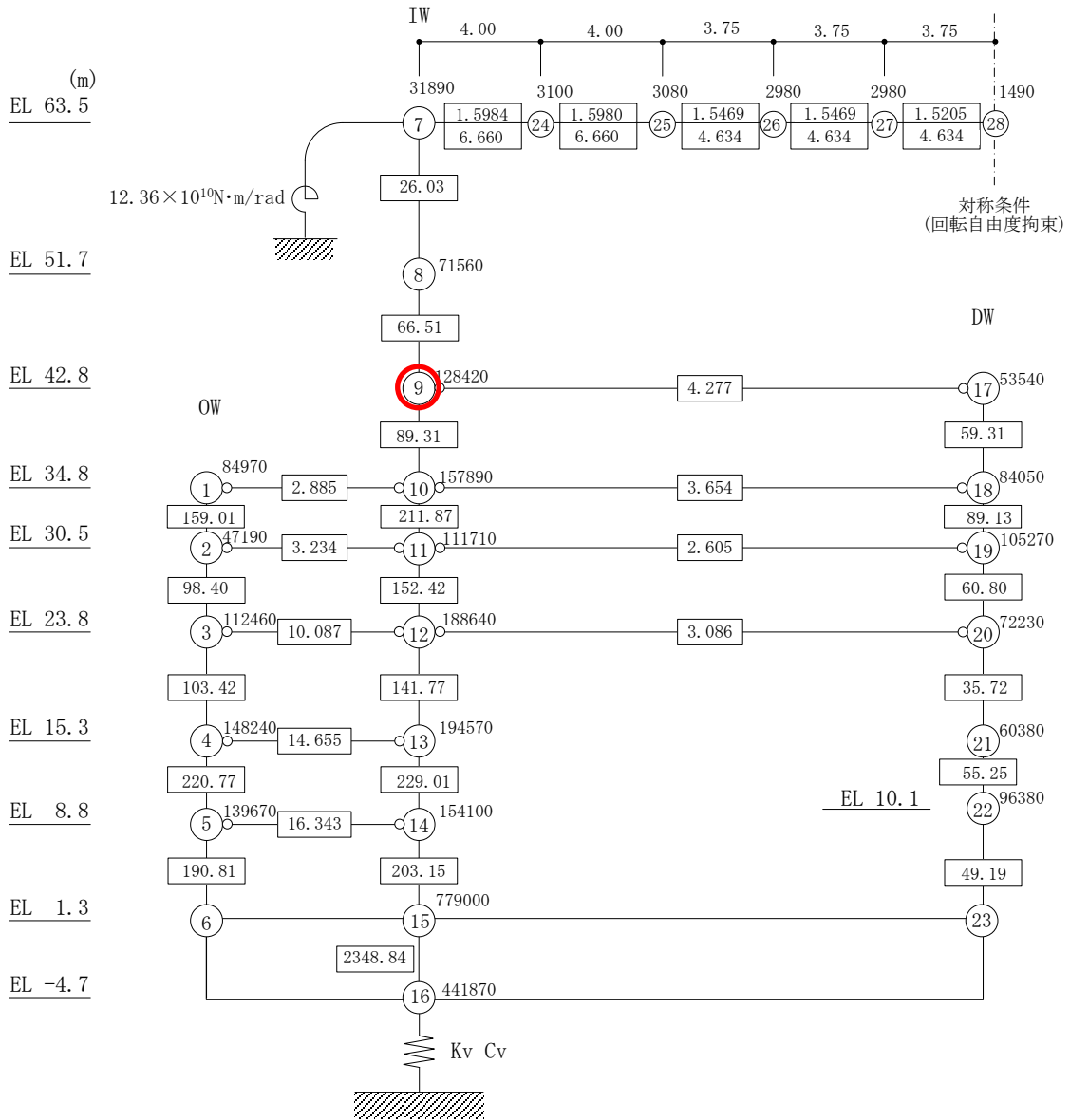
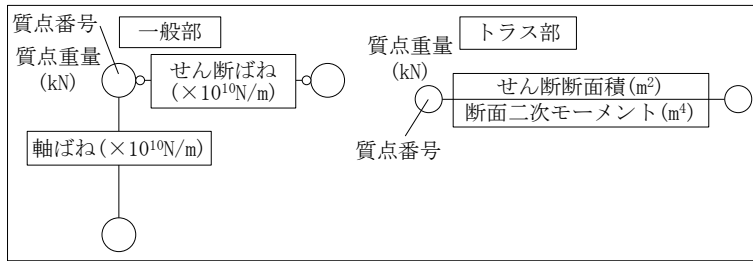
上記2つのモデルによる燃料取替床レベル（E L 42.8m）の応答スペクトル（ $h = 2\%$ ）の比較を、基準地震動  $S_s - D$  を例に第3-3図に示す。

全周期帯にわたり、2つのモデルによる応答値の差はほとんど無く、屋根トラスの評価において無視できる範囲である。

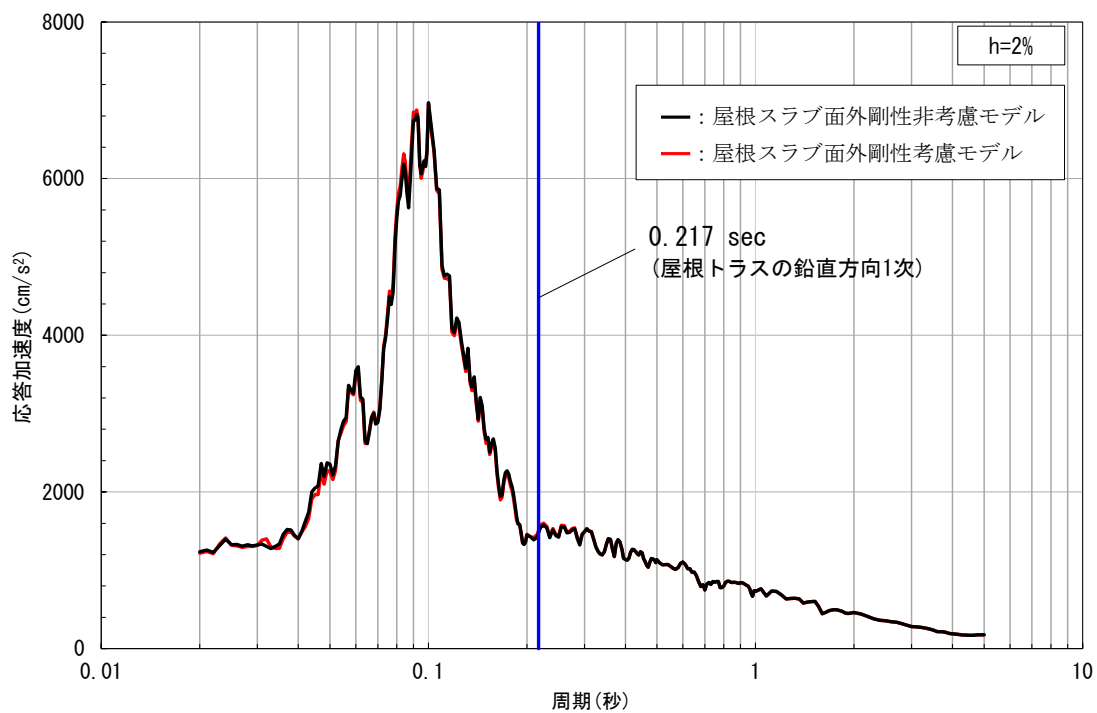


第3-1図 鉛直動に対する質点系モデル  
(屋根の面外剛性非考慮)





第3-2図 鉛直動に対する質点系モデル  
(屋根の面外剛性を考慮した場合)



第3-3図 燃料取替床レベル (E L 42.8m) の応答スペクトル  
 (基準地震動 S s - D, h=2%) の比較

# 島根原子力発電所 2 号炉

## 土木構造物の解析手法及び 解析モデルの精緻化について (耐震)

## 1. 屋外重要土木構造物の評価手法の概要

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について、島根原子力発電所2号炉の今回の工事計画認可申請書（以下「今回工認」という。）では、屋外重要土木構造物の変位や変形をより実状に近い応答に精緻化することを目的に、評価手法の高度化として、解析手法と減衰定数の変更及び隣接構造物のモデル化を予定している。島根原子力発電所2号炉の建設時の工事計画認可申請書（1984年2月）（以下「既工認」という。）と今回工認との手法の比較を第5-1-1表に示す。

既工認との相違点のうち、解析手法として適用している「時刻歴応答解析、限界状態設計法」は、新規制基準施行後の工事計画認可にて適用例がある手法である。

なお、土木構造物の地震時の挙動は、地盤の影響を受けることを踏まえると、地盤特性を適切にモデル化することにより、実応答に近い形で評価できるものと考えられる。このため、コンクリート強度は、既工認と同じく設計基準強度を採用する方針とする。

評価対象設備について、要求性能、解析手法、解析モデル及び許容限界を整理した。既工認の整理結果を第5-1-2表に、今回工認の整理結果を第5-1-3表に示す。また、評価対象設備の配置図を第5-1-1図に示す。

第5-1-1表 既工認と今回工認との手法の比較

	解析手法	解析モデル	減衰定数	コンクリート強度	隣接構造物
既工認	時刻歴応答解析及び周波数応答解析 許容応力度法等	ばね質点系モデル及び地質データに基づく水平成層地盤モデル	構造物の減衰5%	設計基準強度	地盤としてモデル化
今回工認	時刻歴応答解析 限界状態設計法	地質データに基づくFEMモデル	構造物の減衰2% +履歴減衰	設計基準強度	等価剛性でモデル化
比較結果	●異なる	●異なる	●異なる	○同じ	●異なる
適用例	○あり	○あり	○あり	○あり	○あり

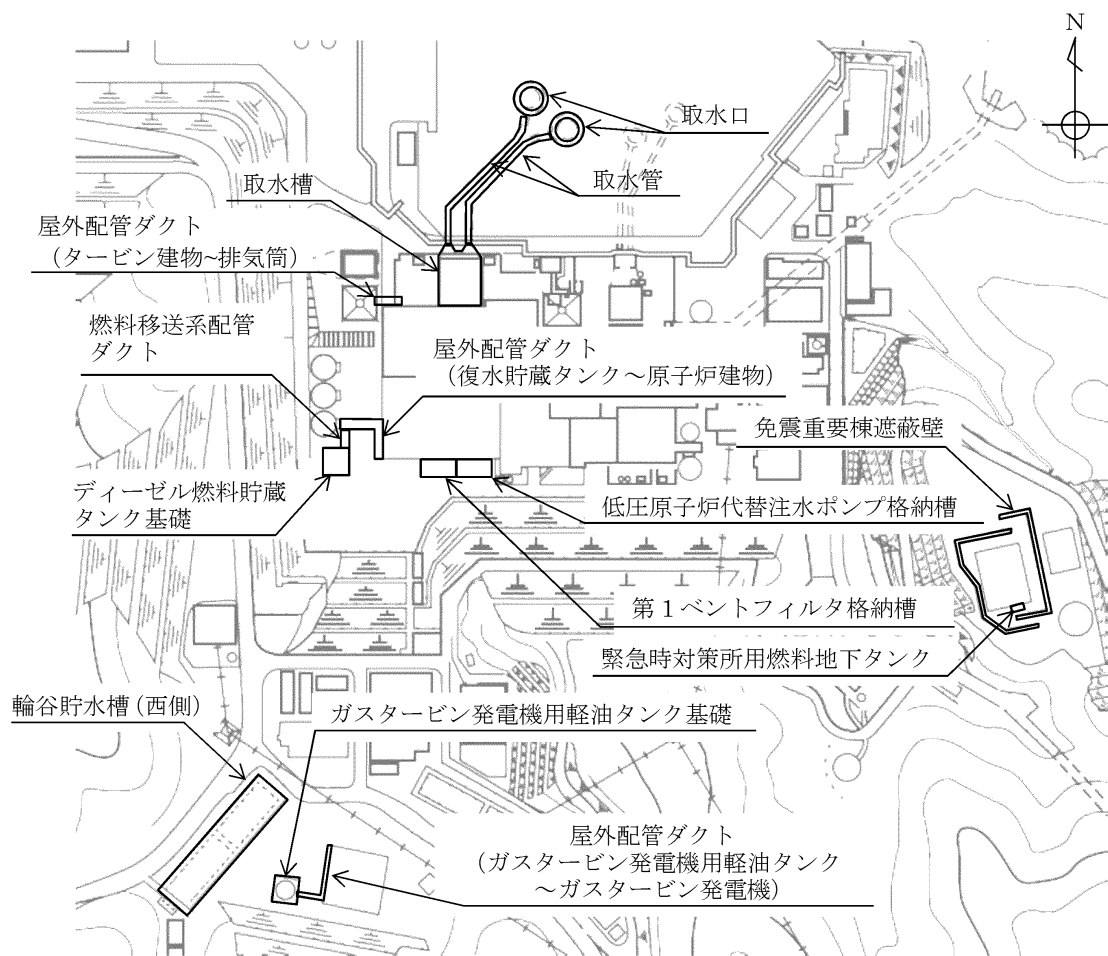
第5-1-2表 耐震評価条件整理一覧表（既工認）

分類	設備名称	要求性能	解析手法	解析モデル	許容限界	
					曲げ	せん断
設計基準対象施設のうち屋外重要土木構造物	取水槽	通水性能 間接支持性能	時刻歴応答解析	ばね質点系モデル	終局強度	許容せん断力
	屋外配管ダクト(タービン建物～排気筒)	間接支持性能	周波数応答解析	地質データに基づく水平成層地盤モデル(1次元波動論による)	終局強度	許容せん断力

第5-1-3表 耐震評価条件整理一覧表（今回工認）

分類	設備名称	要求性能	解析手法	解析モデル	許容限界	
					曲げ	せん断
設計基準対象施設のうち屋外重要土木構造物	取水槽	通水性能 止水性能 間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	屋外配管ダクト(タービン建物～排気筒)	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	燃料移送系配管ダクト	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	屋外配管ダクト(復水貯蔵タンク～原子炉建物)	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	取水管	通水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	許容曲げ応力	許容せん断応力
	取水口	通水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	許容曲げ応力	許容せん断応力
重大事故等対処施設のうち土木構造物※	第1ベントフィルタ格納槽	間接支持性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	間接支持性能 貯水性能	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	緊急時対策用燃料地下タンク	非常用発電装置に係る燃料の貯蔵	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	終局強度	許容せん断力
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	間接支持性能	時刻歴応答解析	【タンクモデル】 水平・多軸多質点系曲げせん断棒モデル 鉛直・多軸多質点系棒モデル 【相互作用】 SRモデル	終局強度	許容せん断力
	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)	間接支持性能	静的解析	フレーム解析モデル	終局強度	許容せん断力
波及的影響を及ぼすおそれのある施設のうち土木構造物	輪谷貯水槽(西側)	波及的影響	時刻歴応答解析	地質データに基づくFEMモデル	限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみ	せん断耐力
	免震重要棟遮蔽壁	波及的影響	時刻歴応答解析	質点系モデル(地盤～杭基礎～構造物の連成系モデル:SRモデル)	終局強度	許容せん断力

※ 設計基準対象施設と兼用する重要S A施設のうち、設計基準対象施設の評価手法と相違がない施設は設計基準対象施設の一覧表に代表して記載。



第5-1-1 図 評価対象設備 配置図

## 2. 解析手法

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について、既工認では、地震応答解析手法として時刻歴応答解析及び周波数応答解析を採用し、構造部材の曲げについては終局強度、せん断については許容せん断力に対して妥当な裕度を持つことを確認することを基本としていた。

今回工認では、屋外重要土木構造物の地震応答解析手法として時刻歴応答解析を適用した限界状態設計法による設計を採用する。減衰定数は、構造物の減衰2%及び履歴減衰とする。構造部材の曲げについては限界層間変形角、曲げ耐力、圧縮縁コンクリート限界ひずみ又は許容応力度に対して十分な安全余裕を持つこと、せん断についてはせん断耐力又は許容応力度に対して妥当な安全余裕を持つことを確認することを基本とし、各設備の要求性能（支持性能、通水性能、貯水性能、止水性能）を踏まえて照査項目・内容を追加する。

以下では、「耐震設計に係る工認審査ガイド」において、適用実績のある耐震設計に関連した規格及び基準等で示されていないが、先行サイトの審査で実績のある「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（土木学会，2005）」（以下「土木学会マニュアル」という。）の適用性について検討を行う。

### 2.1 曲げ照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認における曲げに対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用圧縮縁コンクリートひずみが、限界圧縮縁コンクリートひずみを超えないことを確認する。

「コンクリート標準示方書【構造的照査編】（土木学会，2002）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。）では、構造部材の終局変位は、部材の荷重-変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求めてよいとしている。コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方を第5-2-1図に示す。

一方、土木学会マニュアルでは、以下の考え方に基づいている。

屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験の結果より、かぶりコンクリートが剥落すると荷重が低下し始める。圧縮縁コンクリートひずみが1%に至る状態は、まだ応力を負担することができ、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることを確認しており<sup>1)2)</sup>、荷重が低下しない範囲にある。当該限界値を限界状態とすることで、構造全体としての安定性が確保できるものとして設定されたものである。コンクリートの圧縮試験の例を第5-2-2図に示す。

したがって、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書2002による照査よりも安全側の評価を与えるため、適用性を有している。

さらに、土木学会マニュアルでは「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説（日本建築学会，1997）」（以下「日本建築学会」という。）にて記載されている設計限界変形1/100、終局限界変形1/80等を基準値として

参照している。

対象は同じラーメン構造であり、軸力比(軸応力度/コンクリート圧縮強度比)は建築物よりも屋外重要土木構造物の方が小さいと考えられることから、変形性能がより大きくなる傾向にあり、層間変形角 1/100 は限界値として安全側であると考えられる。土木学会マニュアルでは、層間変形角が 1/100 以下であれば、圧縮縁コンクリートひずみ 1% の基準を保証したものとみなすと示されており、機能維持確保の観点からも耐荷性能が確保されることが担保できるため限界値として適切である。

参考に、日本建築学会における曲げ降伏先行型の部材について、復元力特性と限界状態(損傷度)の関係の概念図を第 5-2-3 図に、土木学会マニュアルにおける鉄筋コンクリートはり部材の荷重-変位関係と損傷状態に対する概念図を第 5-2-4 図に示す。日本建築学会と土木学会マニュアルにおいて概ね対応が取れており、土木学会マニュアルの各損傷状態の設定は妥当であると考えられる。第 5-2-4 図において圧縮縁コンクリートひずみ 1% は第 4 折れ点よりも手前にあり、屋外重要土木構造物の限界状態に至っていないと考えられる。また、第 3 折れ点は圧縮縁コンクリートひずみ 1% よりもさらに手前にある。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、十分な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の 5 種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第 5-2-5 図に示す。また、地盤物性のばらつきの考慮として、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差( $\sigma$ )のケースにおける影響の程度を安全係数として考慮した照査を、工事計画認可段階において実施する。

曲げに対する照査において考慮している安全係数は第 5-2-1 表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

#### (1) 材料係数

コンクリート強度の特性値は、製造において、その値を下回る強度が発現する確率が 5% 以内となるように設定する。また、鉄筋の機械的性質の特性値に関しても、日本工業規格(JIS)の規格範囲の下限値を設定してよいとしている。このように、双方とも特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定しており、応答値・限界値ともに安全側の照査がなされているため、材料係数は 1.0 としている。

#### (2) 部材係数

安全側に配慮した設定を行っていることから、部材係数は 1.0 としている。

#### (3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷



重係数は 1.0 としている。

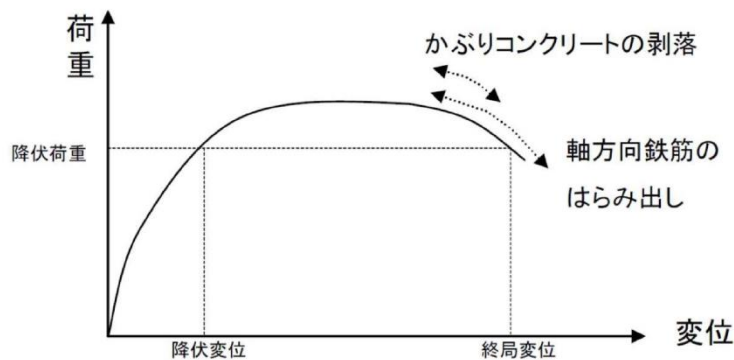
(4) 構造解析係数

限られた条件での実験であること、地盤パラメータの設定が応答解析結果に及ぼす影響などを考え併せて、構造解析係数は 1.2 以上を標準としている。

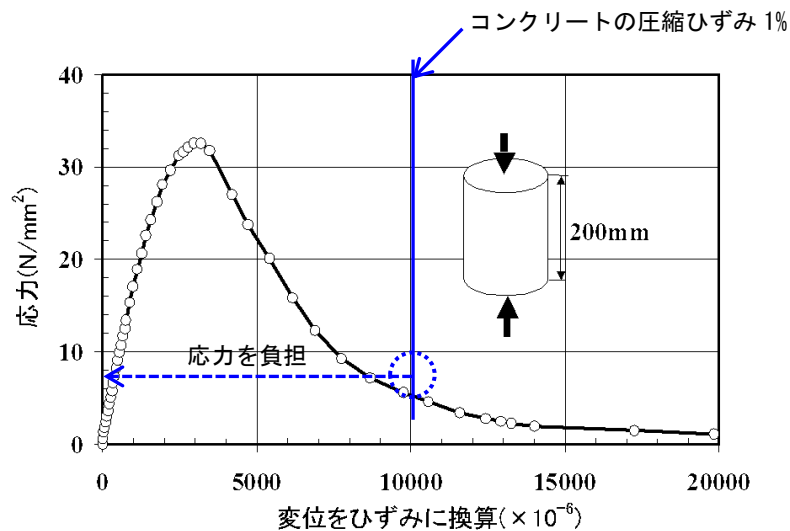
(5) 構造物係数

屋外重要土木構造物は重要度毎に適切な地震動が設定される。従って、構造物係数によりさらに構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は 1.0 としている。

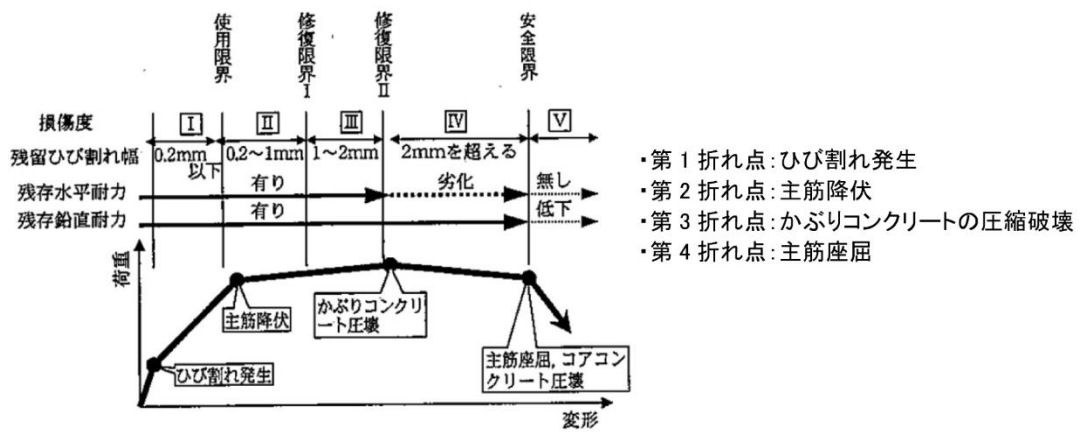
以上のことから、土木学会マニュアルによる曲げ照査手法は、コンクリート標準示方書 2002 による照査よりも安全側の評価を与えるため、技術的妥当性及び適用性を有するとともに適切な余裕が確保されていると判断できる。



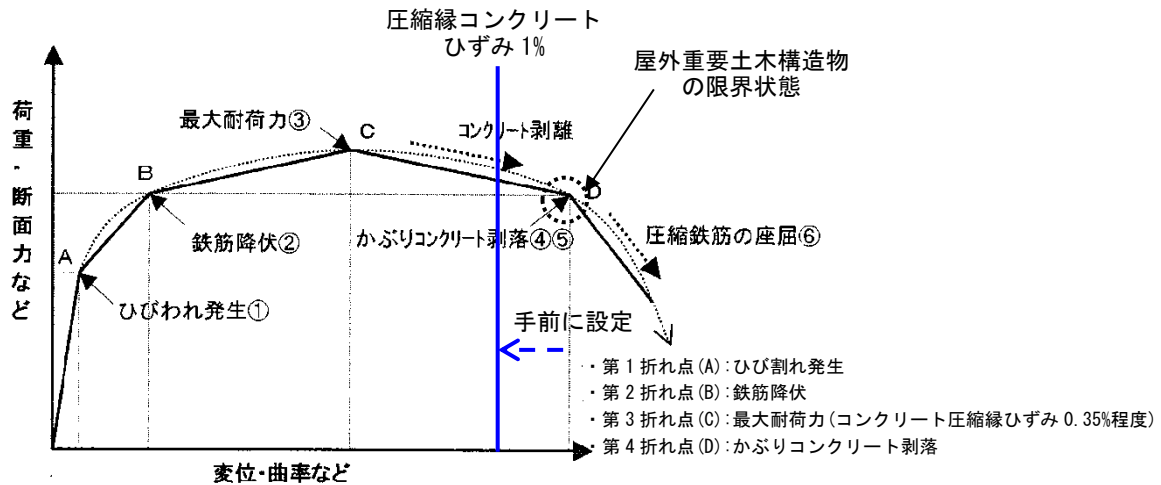
第5-2-1図 コンクリート標準示方書2002による構造部材の終局変位の考え方



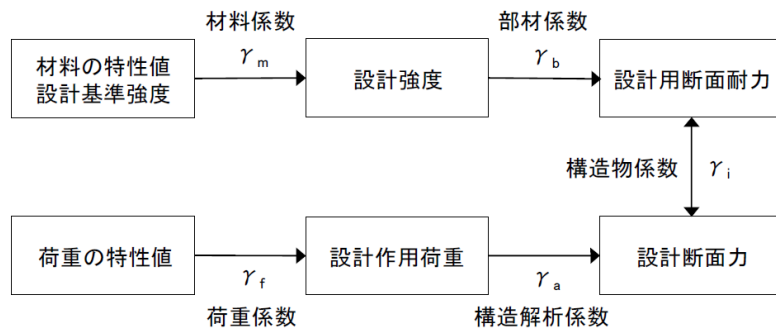
第5-2-2図 コンクリートの圧縮試験例<sup>3)</sup>



第5-2-3図 曲げ降伏先行型の部材の復元力特性と限界状態（損傷度）  
の関係の概念図（日本建築学会）



第5-2-4図 鉄筋コンクリートはり部材の荷重—変位関係と損傷状態に対する概念図 (土木学会マニュアル)



※上記に加えて、地盤物性のばらつきに関する安全係数を考慮する

第5-2-5図 安全係数の考え方

第5-2-1表 曲げ評価において考慮している安全係数

安全係数		曲げ照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.0
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数		—	1.0
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.2	—
構造物係数		1.0	

【参考文献】

- 1) 土木学会：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，2005
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002
- 3) 松尾豊史・金津努・大友敬三・福本彦吉：コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討，土木学会地震工学論文集，2003

## 2.2 せん断照査に係る土木学会マニュアルの適用性について

今回工認におけるせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、照査用せん断力が、せん断耐力を下回ることを確認する。

### 2.2.1 せん断破壊に対する照査

応答せん断力とせん断耐力の比に構造物係数を乗じた数値が、1.0を下回ることを確認をもってせん断破壊に対する照査とする。せん断耐力は、以下の3つの選択肢のいずれかを用いて評価する。

(1) せん断耐力評価式

(2) 分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法\*

分布荷重を受ける部材については、せん断耐力評価式を応用して、より合理的な評価を行うことができる。土木学会マニュアルでは、「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」の2法を示す。

(3) 材料非線形解析を用いる方法

ここでいう材料非線形解析とは、せん断耐力を求めるために用いる解析法を指し、応答解析で用いる解析とは区別している。部材が複雑な形状を有するなどの場合、これを選択できる。

(1)で全部材の照査を行った後、不合格と判定される部材だけを取り出して(2)や(3)で再照査を行う。

※(2)の中の「等価せん断スパン比を用いた方法」と「線形被害則を用いた方法」を同一構造物の異なる部材に対して使い分けることはできない。

### 2.2.2 せん断耐力評価式

コンクリート標準示方書 2002 では、棒部材及びディープビームについて第5-2-2 表に示すと通りのせん断耐力式を定義している。このうち、ディープビームについては、コンクリート標準示方書 2002 及び土木学会マニュアルにおいて同様の評価式となっている。

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書 2002 におけるせん断耐力式のうち棒部材式において、等価せん断スパンにより設定可能な係数 $\beta_a$ を考慮している。これは屋外重要土木構造物が地中に埋設されたラーメン構造で、土圧、水圧、地震時慣性力等の多数の分布荷重が作用していることによる分布荷重が卓越し、スパン内に反曲点が存在する等の載荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、コンクリート標準示方書 2002 のせん断耐力式を精緻化したものである。当該せん断耐力式は、第5-2-6 図に示すとおり、屋外重要土木構造物を模した破壊試験より得られるせん断耐力と整合的であり、合理的な評価が可能であることが確認されている<sup>1)2)</sup>。

また、これら多数の荷重の複合作用を個々に分解することは困難であることから、せん断耐力の算定時に個々の荷重作用を区分せず最終的な設計用断面力分布

を用いてせん断耐力を算定することとしている<sup>1)</sup>。

耐震安全性評価では、当該許容限界値に対して、妥当な安全余裕を確保するため、構造部材の照査の過程において複数の安全係数を考慮する。安全係数は、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数及び構造物係数の5種に分けられる。それぞれの安全係数の考え方を第5-2-8図に示す。また、地盤物性のばらつきの考慮として、周辺地盤の変形特性について、平均値を基本ケースとした場合に、平均値 $\pm 1.0 \times$ 標準偏差( $\sigma$ )のケースにおける影響の程度を安全係数として考慮した照査を、工事計画認可段階において実施する。

せん断に対する照査において考慮している安全係数は第5-2-3表に示すとおり、材料係数、部材係数、荷重係数、構造解析係数、構造物係数がある。これらの安全係数は土木学会マニュアルにおいて以下の考えにより定められている。

#### (1) 材料係数

応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が、特性値の段階で実強度に対して小さい値を設定していることから安全側の照査がなされているため1.0としている。限界値算定時に適用する材料係数はコンクリート標準示方書2002に準拠して、コンクリートに対して1.3、鉄筋に対して1.0としている。

#### (2) 部材係数

コンクリート標準示方書2002に準拠して、コンクリート寄与分に対して1.3、鉄筋寄与分に対して1.1としている。

#### (3) 荷重係数

地震の影響以外の荷重の評価精度は、かなり高いものと考えられ、地震の影響については入力地震動そのものが最近の研究成果に基づいて設定されるため、荷重係数は1.0としている。

#### (4) 構造解析係数

変形に関する応答値の評価精度に比較して、断面力に関する応答値の評価精度は高いと考えられることから、変形照査の場合より低減させて1.05としている。

#### (5) 構造物係数

基準地震動は地点毎にサイト特性を考慮して設定され、重要度分類に対応して入力地震動が選定される。したがって、構造物係数により更に構造物の重要性を考慮する必要はなく、耐震性能照査における構造物係数は1.0としている。

以上のことから、土木学会マニュアルによるせん断照査手法は、屋外重要土木構造物の構造的特徴を踏まえ設定された手法であるため、技術的妥当性及び適用性を有すると判断できる。

第5-2-2表 せん断耐力式の比較表

	コンクリート標準示方書2002	土木学会マニュアル
棒部材	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ $V_{yd}$ : せん断耐力 $V_{cd}$ : コンクリート負担 $V_{sd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_d, \beta_p$ : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 $\beta_n$ : 発生曲げモーメントで決まる係数 $f_{vcd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる $b_w$ : 腹部の幅 $d$ : 有効高さ $\gamma_b$ : 安全係数	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ $V_{yd}$ : せん断耐力 $V_{cd}$ : コンクリート負担 $V_{sd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_d, \beta_p$ : 構造寸法や鉄筋量で決まる係数 $\beta_n$ : 発生曲げモーメントで決まる係数 $\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d}$ $f_{vcd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる $b_w$ : 腹部の幅 $d$ : 有効高さ $\gamma_b$ : 安全係数
	せん断スパンより設定される係数 $\beta_a$ を考慮し コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化	
デュープビーム	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ $V_{ydd}$ : せん断耐力 $V_{cdd}$ : コンクリート負担 $V_{sdd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ $a_v$ : 荷重作用点から支承前面までの距離 $f_{dd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる	$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$ $V_{ydd}$ : せん断耐力 $V_{cdd}$ : コンクリート負担 $V_{sdd}$ : せん断補強筋負担 $V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $\beta_a = \frac{5}{1 + (a_v/d)^2}$ $a_v$ : 荷重作用点から支承前面までの距離 $f_{dd}$ : 設計基準強度、安全係数等で決まる
	同一の評価式	

- コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式

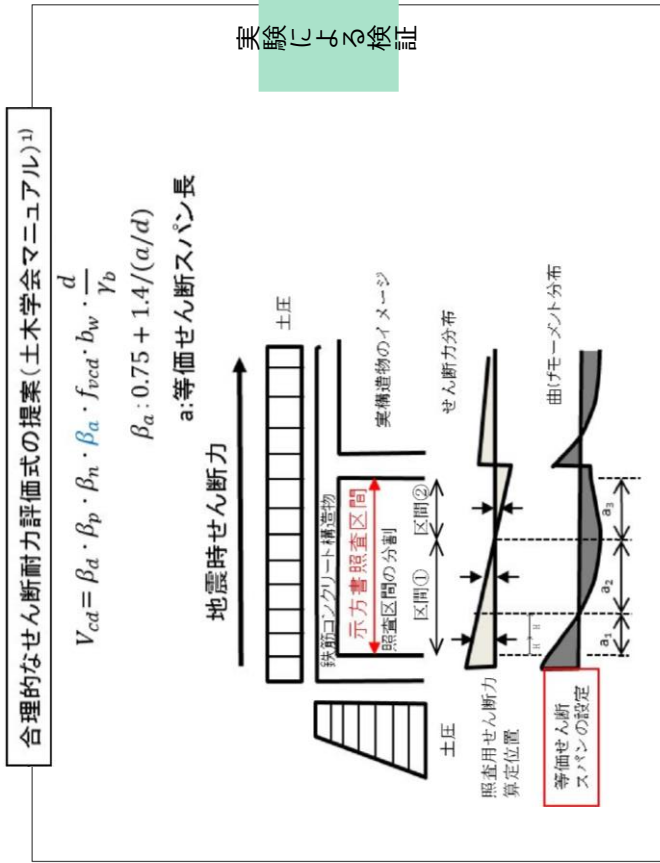
$$V_{yd} = \beta_a \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

2点载荷の単純ばりの実験結果に基づいた単純な載荷形態あるいは単純な断面力分布は精度良くせん断耐力を評価する。  
(問題点)

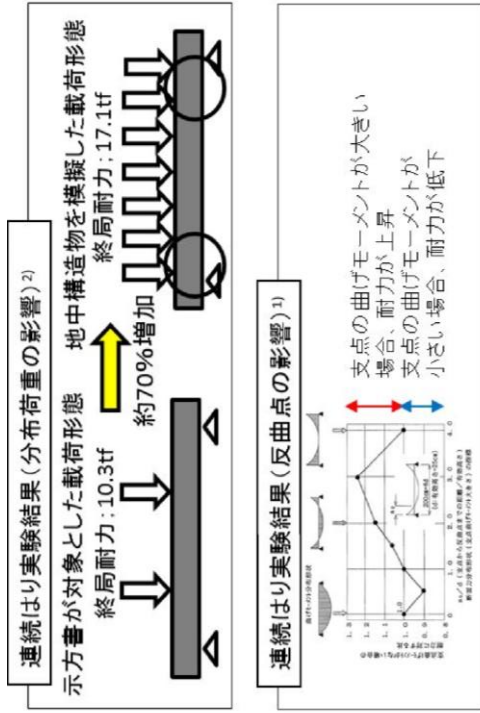
分布荷重が卓越する場合、支点付近に大きな荷重が加わる場合および支点反力が大きい場合において、せん断耐力を過小評価する。

- 地中構造物を模擬した実験によるせん断耐力評価式

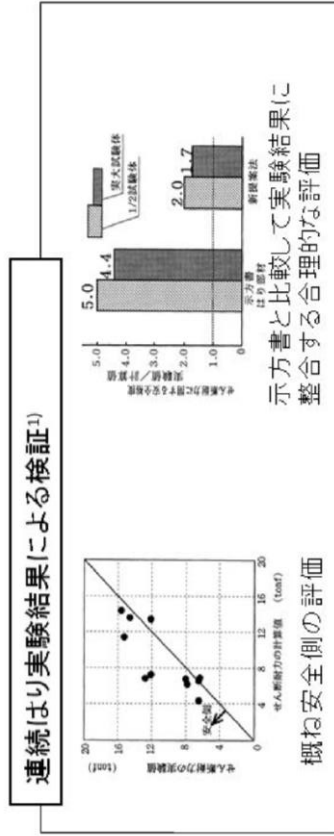
地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に反曲点が存在する等複雑な載荷形態を考慮してせん断耐力を評価する。



実験による検証



実験結果からの知見



1) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用－安全性照査マニュアルの提案－，土木学会論文集No.442/V-16，pp23-33，1992.2  
2) 遠藤達巳，青柳征夫，松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月



○応答解析の結果得られた断面力分布を基に耐力を算定する。

a. 部材の分割

応答せん断力分布を見て、部材中にせん断力の反転する点がある場合は、その点で領域分割する。照査は双方の領域に対して行う。

b. 荷重分布の設定

応答せん断力分布から、それと同じ状況を再現できる荷重分布を求める。部材非線形解析で応答を求めると、節点位置で階段状にせん断力が変化する。この変化分を着目節点位置に作用する荷重とすればよい。a. の操作による分割点における変化分は両側の領域に配分する。

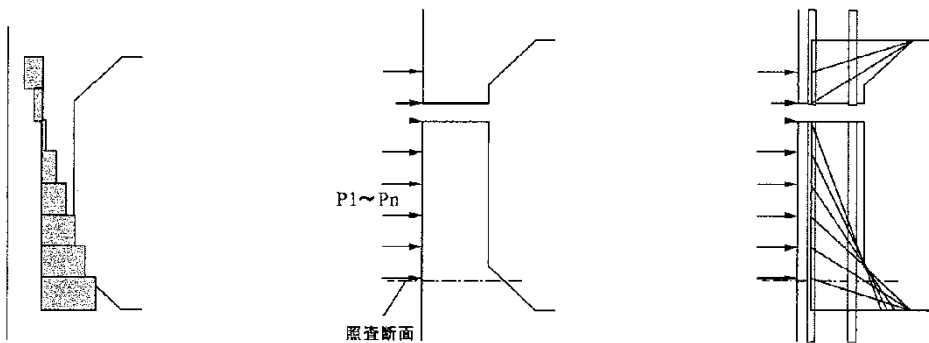
c. 照査断面の設定

照査断面は、せん断応力度（応答せん断力を断面積で除した値）が最大となる断面とする。

d. 線形被害則の適用

個々の作用  $P_j$ （応答値側の安全係数を含む）に対するせん断耐力  $V_j$ （限界値側の安全係数を含む）を評価し、作用力とせん断耐力の比の総和に構造物係数を乗じた値が 1.0 以内であることを確認を行う。

$$\gamma_i \cdot \sum_j \frac{P_j}{V_j} \leq 1.0$$

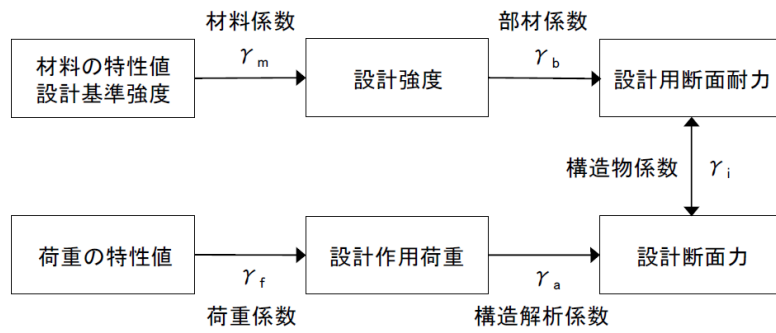


(a) 応答せん断力分布

(b) 外力分布の設定

(c) 作用点毎の a/d の設定

第 5-2-7 図 線形被害則を用いたせん断耐力評価法



※上記に加えて，地盤物性のばらつきに関する安全係数を考慮する

第5-2-8図 安全係数の考え方  
(第5-2-5図の再掲)

第5-2-3表 せん断耐力評価において考慮している安全係数

安全係数		せん断照査	
		応答値算定	限界値算定
材料係数	コンクリート	1.0	1.3
	鉄筋	1.0	1.0
	地盤	1.0	—
部材係数	コンクリート	—	1.3
	鉄筋	—	1.1
荷重係数		1.0	—
構造解析係数		1.05	—
構造物係数		1.0	

(6) 安全上適切と認められる規格及び基準を用いた評価について

屋外重要土木構造物の耐震安全性については、屋外重要土木構造物の構造上の特徴を踏まえ、土木学会マニュアルに基づき評価を実施しているが、当該マニュアルについては「耐震設計に係る工認審査ガイド（原子力規制委員会，2013）」（以下「工認審査ガイド」という。）において「安全上適切と認められる規格及び基準等」として取り扱われていない。このため代表構造物について、工認審査ガイドにおいて「安全上適切と認められる規格及び基準等」として適用可能な規格及び基準等に準拠した評価を実施し、土木学会マニュアルの評価結果と比較することで、現在の評価が妥当であることを確認する。

評価項目のうち、構造部材の曲げについては、工認審査ガイドにおいて「安全上適切と認められる規格及び基準等」として取り扱われているコンクリート標準示方書2002よりも保守的な手法を用いていることから、今回工認では、耐震裕度が厳しい構造部材のせん断に対して検討を実施する。

検討では、基準地震動  $S_s$  による地震応答解析により得られた応答値を用い、「安全上適切と認められる規格及び基準等」として、工認審査ガイド記載の「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会，2005制定）」（以下「建築学会基準」という。）によるせん断照査結果と比較を行うことで、土木学会マニュアルによるせん断照査が妥当であることを確認する。

【参考文献】

- 1) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所・鉄筋コンクリート製屋外重要土木構造物への限界状態設計法の適用－安全性照査マニュアルの提案－，土木学会論文集 No. 442/V-16，pp23-33，1992. 2
- 2) 遠藤達巳・青柳征夫・松村卓郎：鉄筋コンクリート製地中構造物の限界状態設計に用いるせん断耐力評価法，電力中央研究所報告，平成4年3月
- 3) 日本建築学会：原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2005

### 2.2.3 材料非線形解析を用いたせん断耐力評価

構造部材の照査において発生するせん断力が、(1)せん断耐力評価式及び(2)分布荷重を受ける部材のせん断耐力評価法によるせん断耐力を上回る部材については、以下で示す材料非線形解析を用いたせん断耐力評価を実施する。

#### (1) 評価条件

2.2.2 で示したせん断耐力式は、既往の実験等から一般化されたものであることから、構造部材の形状、作用荷重及び鉄筋コンクリートの非線形特性を踏まえた材料非線形解析を実施することにより、より高い精度でせん断耐力を求め、構造部材のせん断照査を行う。

材料非線形解析は、90年代までに、ひび割れの進展モデルや破壊エネルギーの概念等、基本となるモデルが提示され、様々な問題に適用されながら有効性と信頼性を高めており、「コンクリート標準示方書 設計編(土木学会, 2012)」(以下「コンクリート標準示方書 2012」という。)や土木学会マニュアル等で取り扱われている。

材料非線形解析にて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おり、コンクリート標準示方書 2012 において標準とされる以下の手法とする。

- ①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。
- ②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。
- ③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。

なお、材料非線形解析の適用にあたっては、当該構造物の構造的な特徴や荷重条件が類似する既往の実験等から得られたせん断耐力と、材料非線形解析によるせん断耐力を比較し、その適用性を判断した上で、モデル化や各種パラメータの設定に係る解析者の差を考慮した安全係数を設定する。

参考として、耐震性能照査における応答値の評価に用いる解析手法を第5-2-4表及び第5-2-5表に示す。

第5-2-4表 耐震性能と地震応答解析手法との対応

区分	限界状態	選択される標準的な解析手法と耐震性能に用いる物理量	
1	構造物の部材が降伏に至らない	①	① 線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力
		②	② 等価線形解析 ・鉄筋及びコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力、最大せん断力 ・最大曲げモーメント
2	構造物が最大耐力に至らない	③	③ 部材非線形解析 ・最大曲げモーメント ・最大曲率、最大変位 ・最大層間変形角、最大せん断力
		④	④ 材料非線形解析 ・最大変位 ・最大層間変形角 ・最大ひずみ、最大せん断力
3	構造物が崩壊しない		

- ・地震応答解析手法の使用に当たっては、新設土木構造物は、①線形解析を基本とする。
- ・また、既設構造物は、③部材非線形解析の使用を基本とするが、部材によっては、④材料非線形解析を用いる場合もある。

第5-2-5表 解析モデルの分類

	部材非線形解析	材料非線形解析		
モデル化	骨組モデル	有限要素		
解析次元	1次元		2次元	3次元
構成則	M-φ, M-θ 等	応力-ひずみ関係		
要素	はり要素	ファイバー要素	平面ひずみ要素	立体要素
特徴	(汎用性) (解析時間)	狭い ←	→ 広い	
		短い ←	→ 長い	

1) 適用基準

材料非線形解析については、土木学会マニュアル、コンクリート標準示方書2012等に基づき実施する。

第5-2-6表に参考とする主な基準・文献を示す。

第5-2-6表 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準等	備考
材料定数・材料特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート標準示方書2012</li> <li>・土木学会マニュアル</li> </ul>	—
許容限界	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往文献等により設定した許容限界（破壊基準）が、部材係数の設定における材料非線形解析にて、実験結果と整合的であることを確認。</li> </ul>

2) 材料定数

耐震安全性評価に用いる材料定数は、設計図書及び文献等を基に設定する。コンクリート及び鉄筋の材料定数を第5-2-7表及び第5-2-8表に示す。

第5-2-7表 コンクリートの材料定数

	設定値	諸元
単位体積重量	0.0kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
圧縮強度	18.1N/mm <sup>2</sup>	設計基準強度（設計図書23.5N/mm <sup>2</sup> ） ／材料係数（ $\gamma_{mc}=1.3$ ）
引張強度	1.45N/mm <sup>2</sup>	引張強度／材料係数
圧縮ピークひずみ	0.15%	コンクリート標準示方書2012
ひび割れ—せん断 伝達係数	1.0	コンクリート標準示方書2012
破壊エネルギー	0.0754N/mm	コンクリート標準示方書2012

第5-2-8表 鉄筋の材料定数

		設定値	諸元
単位体積重量		0.0kN/m <sup>3</sup>	材料非線形解析による荷重に含まれることから考慮しない
ヤング係数		200kN/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書2012
降伏 強度	主鉄筋	1000N/mm <sup>2</sup>	せん断破壊先行型の破壊形態となるよう、 曲げ耐力が増大するように設定
	せん断 補強筋	345N/mm <sup>2</sup>	設計図書

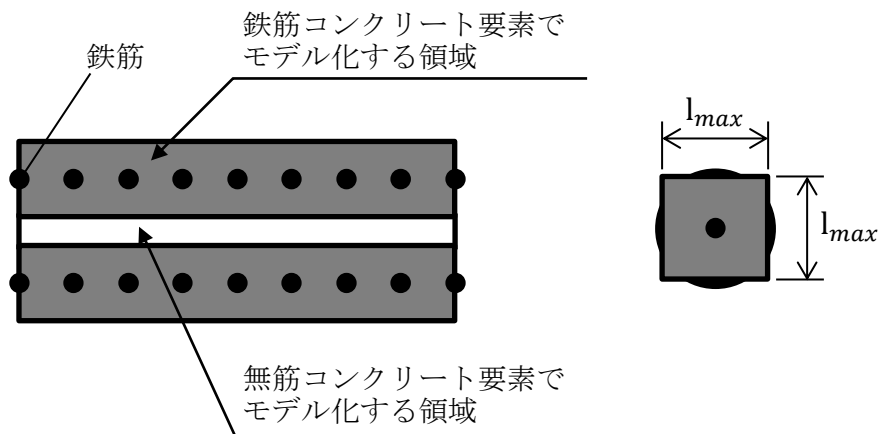
### 3) 解析モデルの要素分割

材料非線形解析の対象とする構造部材を平面ひずみ要素でモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、第5-2-9図に示すとおり、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コンクリート要素としてモデル化する。

部材厚方向の要素分割数については、鉄筋を含む要素と無筋要素を明確に指定できる分割数が望ましいこと及び3層以上の分割数をとる場合、解析結果に大きな差異が生じないことから3層以上に設定することとする。

具体的には、鉄筋を含む要素は、鉄筋を中心としてかぶり厚さの2倍とし、無筋領域については、要素形状が極端に扁平とならないように分割する。

なお、対象とする構造部材に接合する部材は、弾性要素でモデル化し、モデル端部を固定境界とする。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{\frac{f_y}{f_t}}$$

ここに、 $l_{max}$  : 鉄筋一本当たりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

$D_b$  : 鉄筋の直径

$f_y$  : 鉄筋の降伏強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度

第5-2-9図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要



#### 4) コンクリートの非線形特性

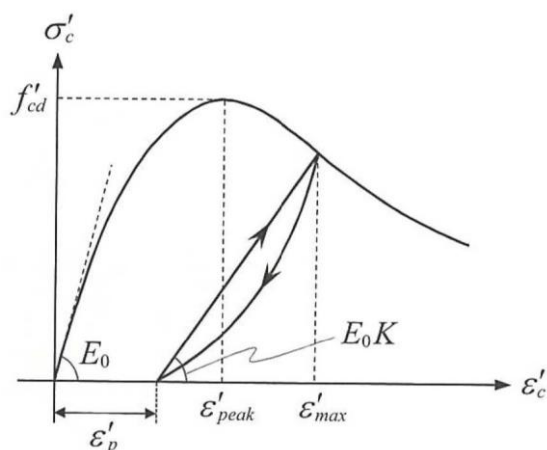
耐震安全性評価に用いる要素は鉄筋コンクリート要素及び無筋コンクリート要素に分類されるが、それぞれの非線形特性は同一の考え方で表される。

##### ・圧縮応力下における応力-ひずみ関係

第5-2-10図における一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を越えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、第5-2-11図に示す、低減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮する。



$$\sigma'_c = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left( 1 - \exp \left( -1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left( -0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck} / \gamma_{mc}$

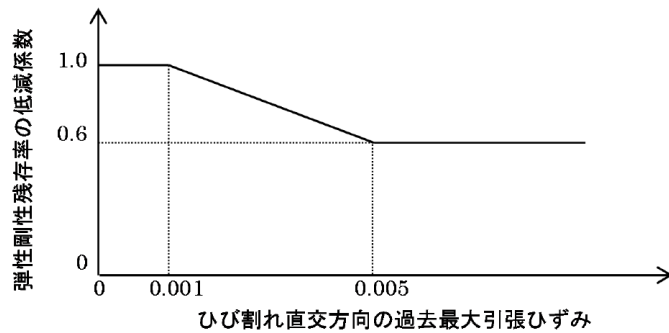
$\varepsilon'_{peak}$  : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002としてもよい)

$\varepsilon'_{max}$  : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

$\varepsilon'_p$  : 塑性ひずみ

$K$  : 弾性剛性残存率

第5-2-10図 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性

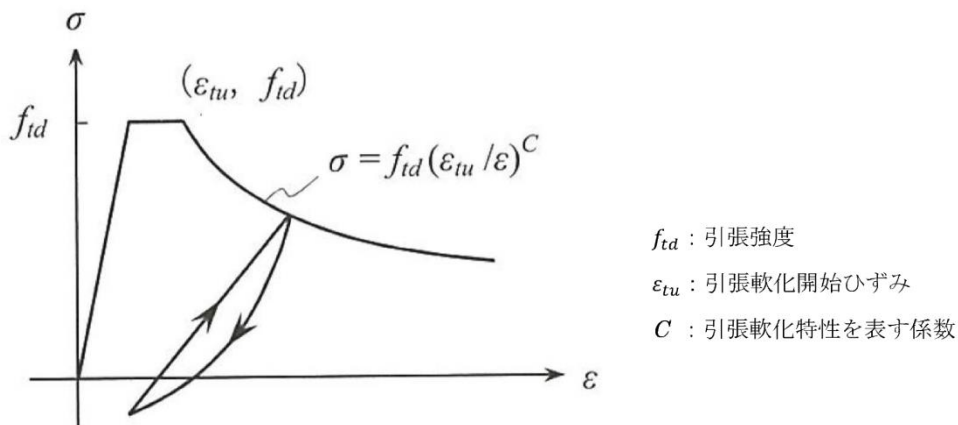


第5-2-11図 弾性剛性残存率の低減係数

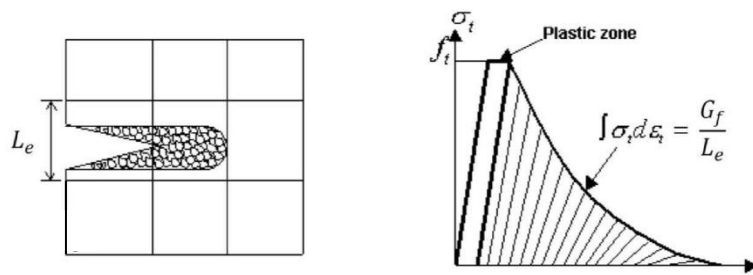
・引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、第5-2-12図に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

引張力を受ける無筋コンクリート要素では、引張軟化挙動は、破壊エネルギー  $G_f$  によって定義する。引張軟化挙動の考慮にあたっては、第5-2-13図に示すひび割れ発生後の軟化曲線とひび割れ発生点からの除荷曲線とで囲まれる面積が  $G_f/L_e$  (要素寸法) に一致するように、軟化特性を表す係数  $C$  を用いる。



第5-2-12図 引張応力下における鉄筋とコンクリートの付着効果を考慮した  
応力-ひずみ関係

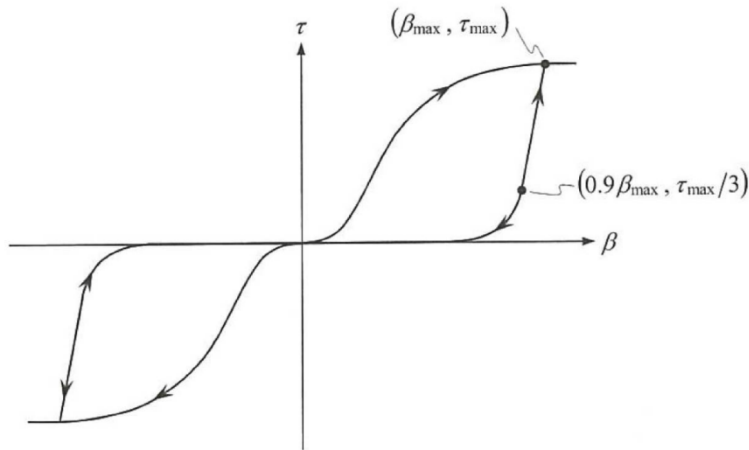


第5-2-13図 応力-ひずみ曲線と破壊エネルギー $G_f$ の関係

・ひび割れ面でのせん断伝達関係

コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、第5-2-14図に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比 $\beta$ をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。

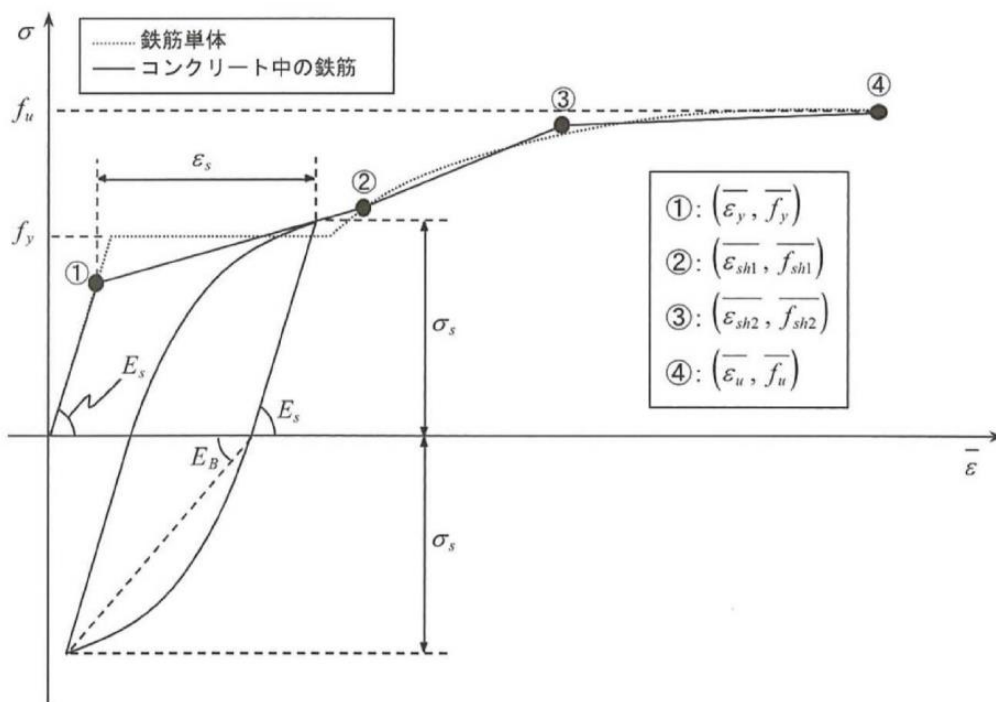


- $\beta$  : ひび割れ面におけるせん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比( $\gamma/\varepsilon$ )
- $\tau$  : ひび割れ面でのせん断応力
- $\tau_{max}$  : 除荷開始時せん断応力
- $\beta_{max}$  : 除荷開始時せん断ひずみ $\gamma$ とひび割れ開口ひずみ $\varepsilon$ の比

第5-2-14図 ひび割れ面でのせん断伝達モデル

5) 鉄筋の非線形特性

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、第5-2-15図に示すひずみ硬化特性を考慮する。



第5-2-15図 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係

6) 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果(引張特性が硬化する現象)として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式で表される。

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_c}{A_{RC}} \bar{\sigma}_c$$

ここに、 $\bar{\sigma}_s$ 、 $\bar{\sigma}_c$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

$A_s$ 、 $A_c$  : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積、 $A_{RC} = A_s + A_c$

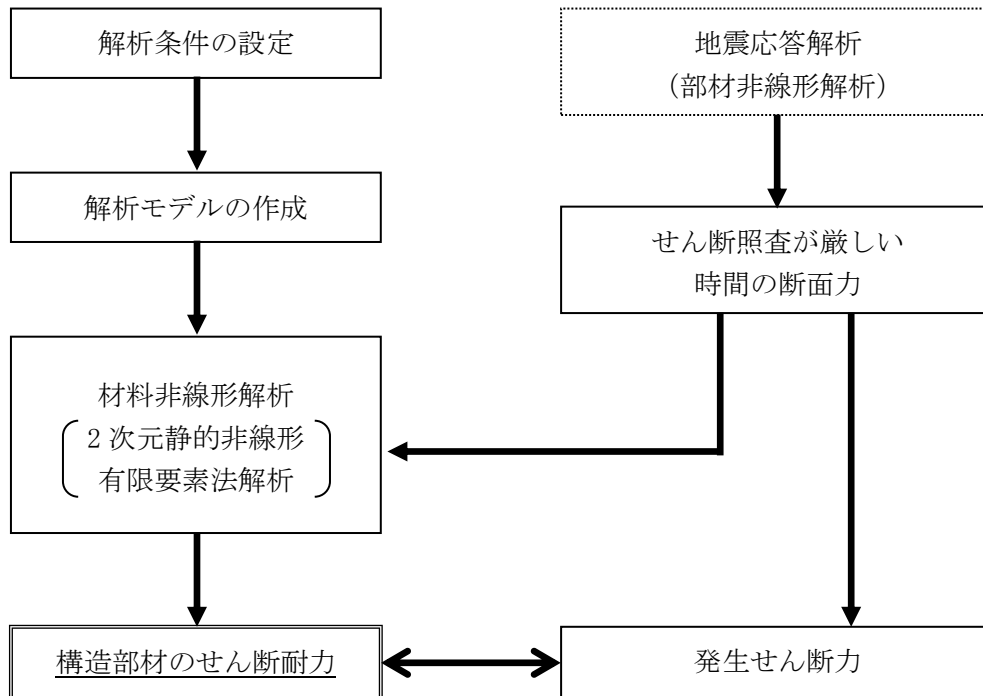
7) 荷重の組合せ

材料非線形解析においては、地震応答解析(部材非線形解析)により得られた荷重を用いることから、荷重の組み合わせは、地震応答解析と同様である。

(2) 評価方法

1) 耐震安全性評価フロー

材料非線形解析を用いたせん断耐力評価の評価フローを第5-2-16図に示す。



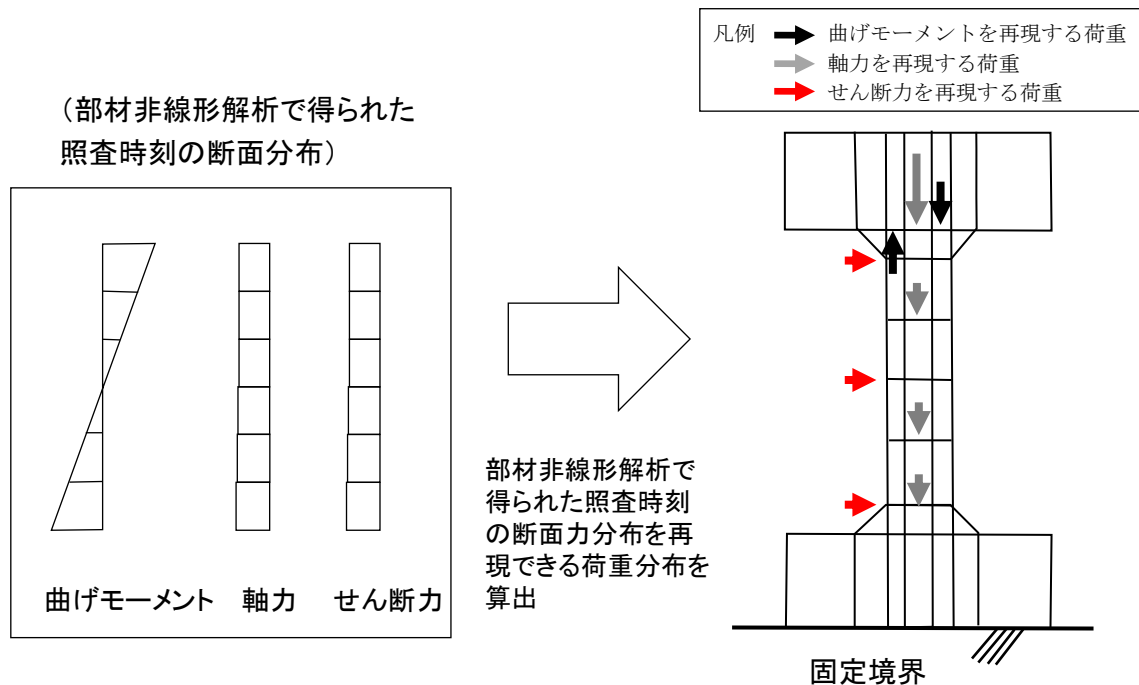
第5-2-16図 材料非線形解析の耐震安全性評価フロー

2) 荷重の設定

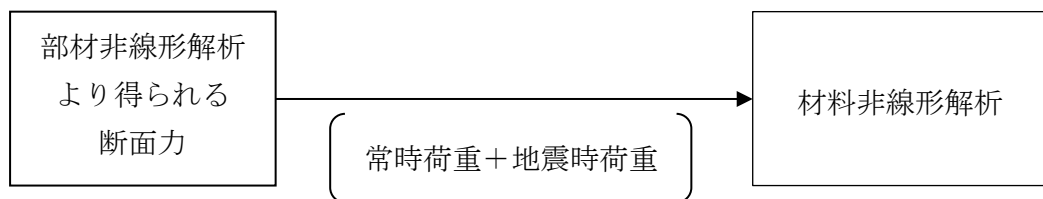
材料非線形解析にて考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる荷重を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）で評価対象部材のせん断照査結果が厳しくなる時刻における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析モデルに第5-2-17図に示すとおりに作用させる。

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られた照査時刻の断面力分布を再現できる荷重分布を算出し、この荷重比率を維持しながら漸増載荷する。

作用荷重は第5-2-18図に示すとおり、常時荷重と地震時荷重を足し合わせ、材料非線形解析を実施する。



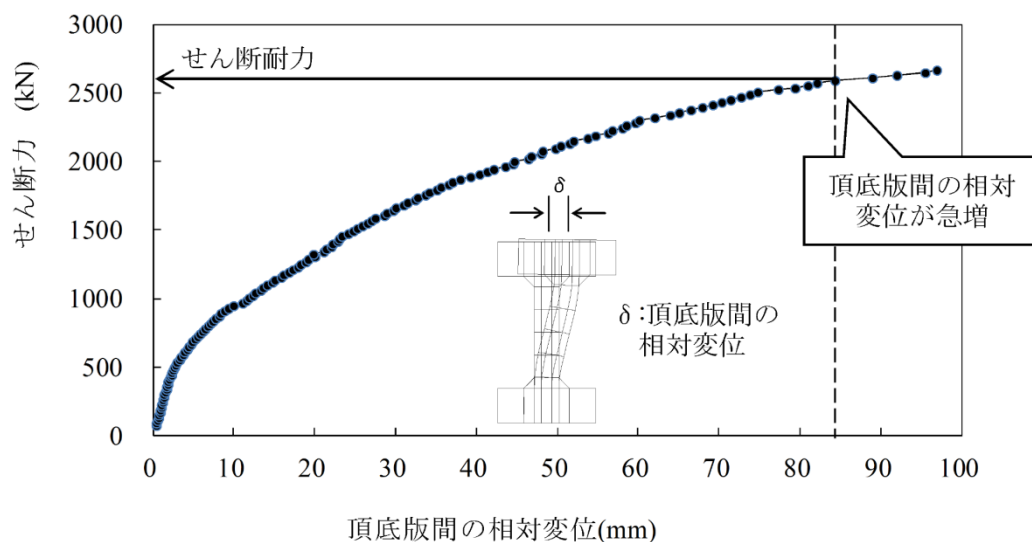
第5-2-17図 材料非線形解析における載荷状況



第5-2-18図 荷重の作用手順

### 3) せん断耐力

材料非線形解析を用いたせん断耐力は、材料非線形解析におけるせん断力－相対変位関係や要素ひずみの応答から設定する。具体的には、第5-2-19図に示す例のとおり、せん断力－相対変位関係においてせん断力の増分に対して相対変位が急増する点又はせん断力が最大となる点を部材のせん断耐力と判断する。



第5-2-19図 材料非線形解析を用いたせん断耐力の設定例

#### 4) 安全係数の設定

材料非線形解析では、地震応答解析（部材非線形解析）で得られる断面力  $P_0$ （曲げモーメント、軸力、せん断力）を材料非線形解析に作用させた時のせん断力  $V$  と材料非線形解析で得られるせん断耐力  $V_y$  に、下記の通り部材係数  $\gamma_{b1}$ 、 $\gamma_{b2}$ 、構造解析係数  $\gamma_a$ 、構造物係数  $\gamma_i$  を考慮し、照査用せん断力  $V_d$ 、設計せん断耐力  $V_{yd}$  を算定する。

$$V_d = \gamma_i \cdot \gamma_a \cdot V$$

$$V_{yd} = V_y / (\gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2})$$

考慮した安全係数を第5-2-9表に示す。ここで、部材係数  $\gamma_{b1}$  については、実験又はせん断耐力式により得られるせん断耐力と材料非線形解析により得られるせん断耐力との比率により設定することとし、解析における構成則の相違や、要素の種類、要素分割、材料物性の設定、入力増分等、多岐にわたる解析者間の差を考慮する。

具体的には、土木学会マニュアルに示される17ケースの材料非線形解析を実施し、実験又はせん断耐力との差が最も大きいCase No. 8の部材係数1.15を設定する（第5-2-10表）。

第5-2-9表 考慮した安全係数

安全係数		値	設定根拠
部材係数	$\gamma_{b1}$	1.15	別途実施する材料非線形解析により設定
	$\gamma_{b2}$	1.00	地震応答解析による層間変形角より設定
構造物係数	$\gamma_i$	1.00	構造物の重要度は、基準地震動 $S_s$ により評価することで包絡されていると判断
構造解析係数	$\gamma_a$	1.05	各種文献より保守的に設定
材料係数	$\gamma_{mc}$	1.3	各種文献より設定



第5-2-10表 部材係数  $\gamma_{b1}$  の設定

Case No.	実験結果	解析結果	部材係数 (解析結果/ 実験結果)
	せん断耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)	
1	475	461	0.97
2	1,187	1,167	0.98
3	324	363	1.12
4	294	314	1.07
5	581	510	0.88
6	329	343	1.04
7	1,587	1,716	1.08
8	350	402	1.15
9	855	863	1.01
10	165	108	0.65
11	333	346	1.04
12	127	105	0.83
13	188	128	0.68
14	163	120	0.74
15	273	188	0.69
16	356	324	0.91
17	432	252	0.58
平均	—	—	0.91
標準偏差	—	—	0.18

### 3. 屋外重要土木構造物の減衰定数

#### (1) 減衰の設定について

今回工認で採用している時刻歴応答解析において、地盤及び構造物の減衰は、粘性減衰と履歴減衰とで考慮している。

粘性減衰による減衰は、固有値解析にて求められる固有周期と各材料の減衰比に基づき、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下のRayleigh減衰を解析モデル全体に与える。なお、卓越する基準モードについては解析モデル全体の固有値解析において、卓越するモードを選定している。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

[C]：減衰係数マトリックス，[M]：質量マトリックス

[K]：剛性マトリックス， $\alpha$ ， $\beta$ ：係数

係数 $\alpha$ ， $\beta$ は、解析モデル全体系の固有値解析において、卓越するモードの減衰とRayleigh減衰が一致するように、以下の式により決定する。

$$h_n = \alpha / 2 \omega_n + \beta \omega_n / 2$$

$h_n$ ：固有値解析により求められたn次モードの減衰定数

$\omega_n$ ：固有値解析により求められたn次モードの固有円振動数

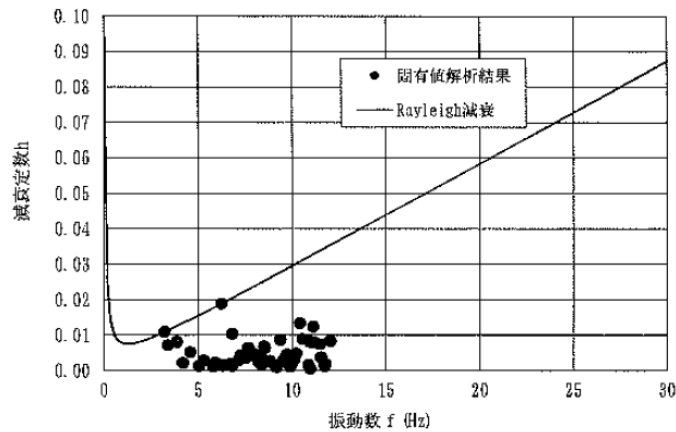
卓越するモードは、全体系の固有値解析における刺激係数にて決定する。

設定したRayleigh減衰の一例（取水槽）を第5-3-1表及び第5-3-1図に示す。取水槽の場合、刺激係数から1次モード及び10次モードを選定した。

第5-3-1表 固有値解析結果（取水槽の例）

モード 次数	固有円振動数 $\omega$ (rad/s)	固有振動数 F (Hz)	固有周期 T (s)	減衰定数 h	刺激係数(水平) $\beta$
1	20.275	3.227	0.310	0.0108	3159.600
2	21.257	3.383	0.296	0.0072	0.000
3	24.272	3.863	0.259	0.0079	922.350
4	26.316	4.188	0.239	0.0021	0.000
5	28.729	4.572	0.219	0.0051	348.170
6	31.765	5.056	0.198	0.0012	0.000
7	33.307	5.301	0.189	0.0028	383.250
8	36.410	5.795	0.173	0.0011	0.000
9	37.161	5.914	0.169	0.0020	603.040
10	39.201	6.239	0.160	0.0188	-3412.700
11	39.702	6.319	0.158	0.0013	0.000
12	40.138	6.388	0.157	0.0014	-423.950
13	42.302	6.733	0.149	0.0017	0.000
14	42.692	6.795	0.147	0.0012	-150.580
15	42.748	6.804	0.147	0.0103	0.000

■：Rayleigh減衰のフィッティングに用いた次数



第5-3-1図 設定したRayleigh減衰（取水槽の例）

固有値解析における減衰定数は、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰2%とした。

履歴減衰による減衰は、構造部材の部材非線形性（ファイバーモデルのコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係）における非線形の程度に応じた値となる。

### (2) 既工認と今回工認との相違について

今回工認において、固有値解析における減衰定数は、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰2%とした。

既工認では、時刻歴応答解析及び周波数応答解析における構造部材の減衰定数は5%を用いた（J E A G 4 6 0 1 -1987 記載）。

非線形解析における粘性減衰による減衰の値は、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（平成14年3月）<sup>1)</sup>において、構造部材の非線形性を非線形履歴モデルで表した場合には、この部材の履歴減衰は履歴モデルによって自動的に解析に取り入れられるため、非線形履歴モデルを用いて表した部材の減衰定数は、コンクリート部材は2%（0.02）程度、鋼部材は1%（0.01）程度とするのがよいとされている。

最新の道路橋示方書・同解説（平成29年11月）<sup>2)</sup>においても、構造部材の非線形性を非線形履歴モデルで表した場合の減衰定数について、鉄筋コンクリート橋脚は2%（0.02）とされている。

以上のように、粘性減衰の減衰定数は、履歴減衰が生じない状態等における解析上の安定のために設定される値であるため、構造物の減衰について減衰2%を採用していることは、技術的妥当性を有するものと判断した。

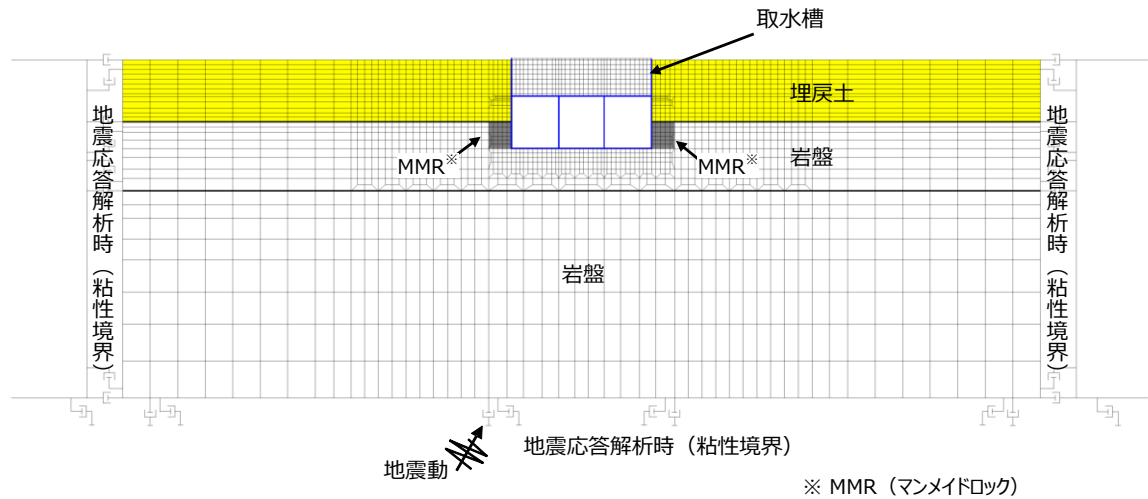
### (3) 構造物の減衰定数の影響

解析モデルの例を第5-3-2図に示す。解析モデルの中で構造物の占める割合は小さいため、構造物の減衰の影響は小さいと考えられる。

既工認と同様に、岩盤は減衰3%、埋戻土は減衰0%、構造部材は減衰5%に設定した固有値解析における解析モデル全体の一次モード減衰を確認したとこ

る、比率（既工認／今回工認）は 1.06 であった。

以上のことから、地盤の減衰の影響が支配的であり、構造物の減衰の影響は小さいと考えられる。



第 5-3-2 図 解析モデル（取水槽の例）

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成 14 年 3 月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 平成 29 年 11 月

#### 4. 耐震性能照査の手順

機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の照査では、想定される荷重条件に対して機器・配管の機能を維持することが主たる目的となる。このため、土木学会マニュアルでは、機器・配管を支持する屋外重要土木構造物の耐震性能評価においては、機器・配管の機能維持のために屋外重要土木構造物に求められる制約条件を与条件としている。

屋外重要土木構造物の耐震性能の照査に当たっては、地盤と構造物の連成解析を行い、床応答や変位を算定する。機器・配管の耐震安全性は、当該構造物を支持する屋外重要土木構造物の床応答や変位を用いて、別途確認を行う。第5-4-1表に対象構造物の例を示す。

第5-4-1表 検討対象構造物の例

屋外重要土木構造物	機器・配管
取水槽	原子炉補機海水ポンプ 原子炉補機海水ストレーナ 原子炉補機海水系配管
屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	非常用ガス処理系配管 非常用ディーゼル発電設備配管

#### 5. 隣接構造物のモデル化

既工認では、簡便かつ保守的に評価する観点から、評価対象構造物に隣接する建物等（以下「隣接構造物」という。）は地震応答解析モデルでは地盤としてモデル化していた。今回工認では、評価対象構造物に隣接する構造物の影響を考慮した現実的な挙動特性を把握する必要がある場合について、隣接する構造物を等価剛性でモデル化する。

##### 5.1 隣接構造物のモデル化方針

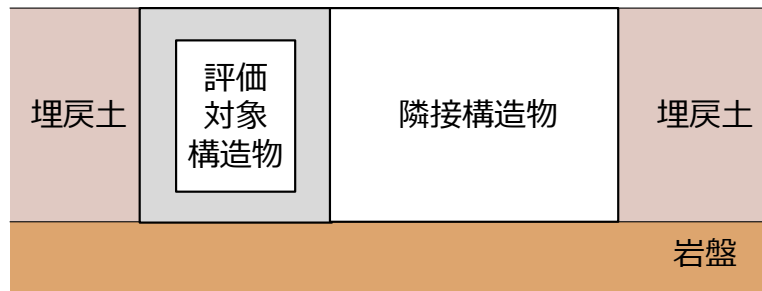
評価対象構造物と隣接する構造物が接している場合、又は評価対象構造物と隣接する構造物が近接している場合においては、隣接する構造物の挙動を含めた応答を正しく評価する必要がある。したがって、隣接する構造物については、評価対象構造物との間の埋戻し材料や、それぞれの設置状況に応じて、隣接構造物が評価対象構造物の地震時応答に与える影響を踏まえ、モデル化要否を検討する。

隣接構造物をモデル化する場合には、隣接構造物を等価剛性でモデル化する。隣接構造物のモデル化方針を以下に示す。

##### ①評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

評価対象構造物と隣接構造物が接している場合は、評価対象構造物と隣接構造物の応答が相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化す

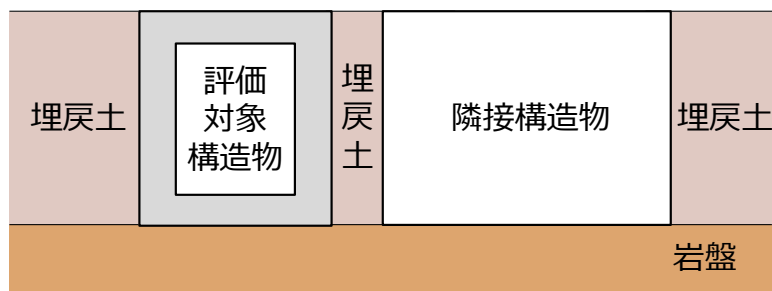
る。評価対象構造物と隣接構造物が接している場合の概略図を第5-5-1図に示す。



第5-5-1図 評価対象構造物と隣接構造物が接している場合 概略図

②評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

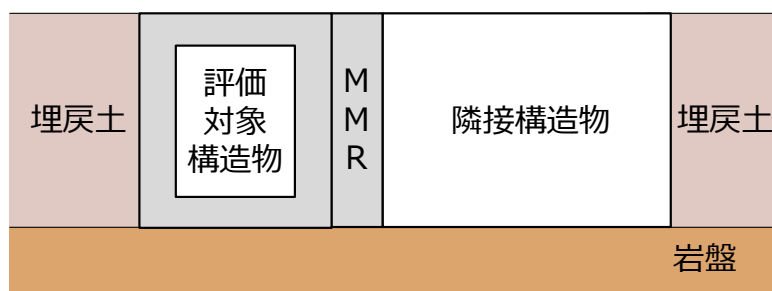
評価対象構造物と隣接構造物の間が埋戻土を介している場合は、評価対象構造物と隣接構造物が近接している場合は、評価対象構造物と隣接構造物の応答が相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合の概略図を第5-5-2図に示す。



第5-5-2図 評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合 概略図

③評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR（マンメイドロック）の場合

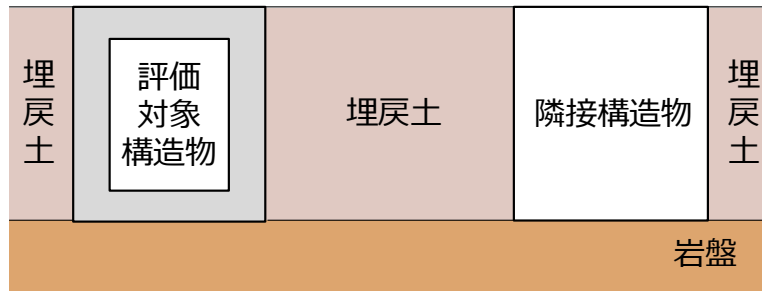
評価対象構造物と隣接構造物の間がMMRを介している場合は、評価対象構造物と隣接構造物の応答がMMRとともに相互に影響を受けながら振動するため、隣接構造物をモデル化する。評価対象構造物と隣接構造物との間がMMRの場合の概略図を第5-5-3図に示す。



第5-5-3図 評価対象構造物と隣接構造物との間がMMRの場合 概略図

④評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合

評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合、又は評価対象構造物と隣接構造物の間が十分な離隔を有する場合、隣接構造物の応答が評価対象構造物に影響を与えないため、隣接構造物をモデル化しない。評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合の概略図を第5-5-4図に示す。



第5-5-4図 評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合  
又は十分な離隔を有する場合 概略図

## 5.2 隣接構造物のモデル化

隣接構造物のモデル化方針を踏まえ、各評価対象設備について隣接構造物のモデル化を検討した。隣接構造物のモデル化(例)を第5-5-1表に、評価対象設備の配置図を第5-5-5図に示す。

第5-5-1表 隣接構造物のモデル化(例)

分類	設備名称	隣接構造物のモデル化方針 <sup>※2</sup>	隣接構造物のモデル化
設計基準対象施設のうち 屋外重要土木構造物	取水槽	①	する(南北断面のみ)
	屋外配管ダクト(タービン建物～排気筒)	②	する
	ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	④	しない
	燃料移送系配管ダクト	④	しない
	屋外配管ダクト(復水貯蔵タンク～原子炉建物)	②	する
	取水管	④	しない
	取水口	④	しない
重大事故等対処施設のうち 土木構造物 <sup>※1</sup>	第1ベントフィルタ格納槽	③	する
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	③	する
	緊急時対策所用燃料地下タンク	④	しない
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎 <sup>※3</sup>	—	—
	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) <sup>※3</sup>	—	—
波及的影響を及ぼすおそれのある施設のうち土木構造物	輪谷貯水槽(西側)	④	しない
	免震重要棟遮蔽壁 <sup>※3</sup>	—	—

※1 設計基準対象施設と兼用する重要SA施設のうち、設計基準対象施設の評価手法と相違がない施設は設計基準対象施設の一覧表に代表して記載。

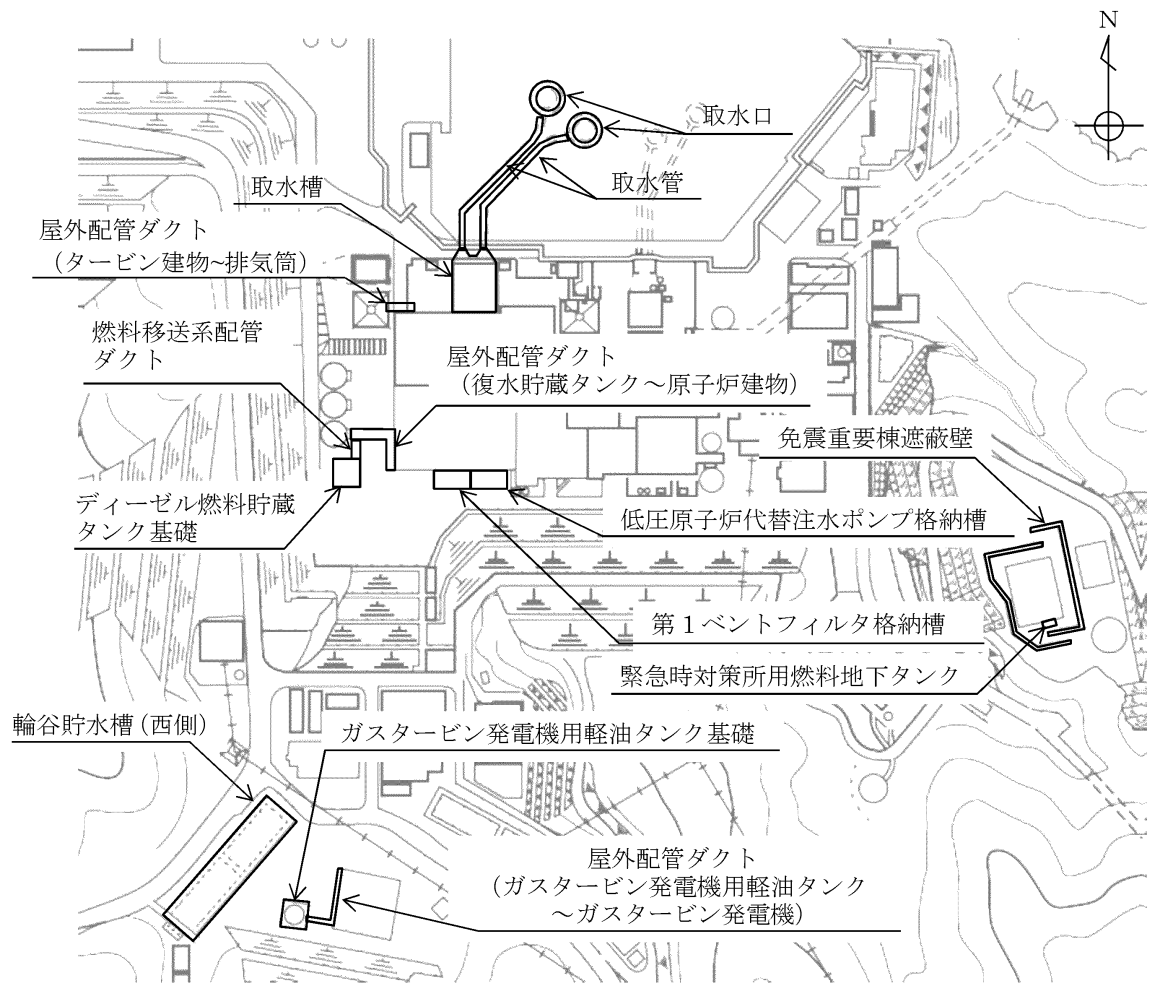
※2 ①評価対象構造物と隣接構造物が接している場合

②評価対象構造物と隣接構造物との間が埋戻土の場合

③評価対象構造物と隣接構造物との間がMMR(マンメイドロック)の場合

④評価対象構造物の周辺に隣接構造物が存在しない場合又は十分な離隔を有する場合

※3 2次元FEM解析による地震応答解析を実施する場合、隣接構造物のモデル化方針によりモデル化を実施する。



第5-5-5図 評価対象設備 配置図



## 島根原子力発電所 2 号炉

後施工せん断補強筋による耐震補強  
(耐震)

## 目次

	頁
1. 概要	1
2. PHb 工法について	1
2.1 PHb 工法の使用部位	1
2.2 PHb 工法の概要	2
3. 建設技術審査証明報告書の概要	3
3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け	3
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	4
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	5
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認	21
4. 島根原子力発電所 2 号炉における PHb の適用性確認	24
4.1 方針	24
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定	26
4.3 適用性確認項目の抽出	27
4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認	29
4.5 せん断補強効果の確認	33
4.6 施工実績・研究事例等の確認	39
4.7 PHb の施工上の確認	54
4.8 PHb の適用性確認結果	58

### 添付資料

- (添付資料 1) 建設技術審査証明書
- (添付資料 2) 解析によるせん断補強効果の確認について
- (添付資料 3) 「施工管理要領書(案)(取水槽耐震補強工事(ポストヘッドバー工法))」

## 1. 概要

取水槽については，せん断耐力の向上を目的に耐震補強を行う。取水槽は地中構造物であり，片側からしか施工できない制限を有することから，後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）工法を採用する。

本資料は，島根原子力発電所2号炉取水槽特有の各種条件に対して，PHb工法が適用性を有するか確認するものである。

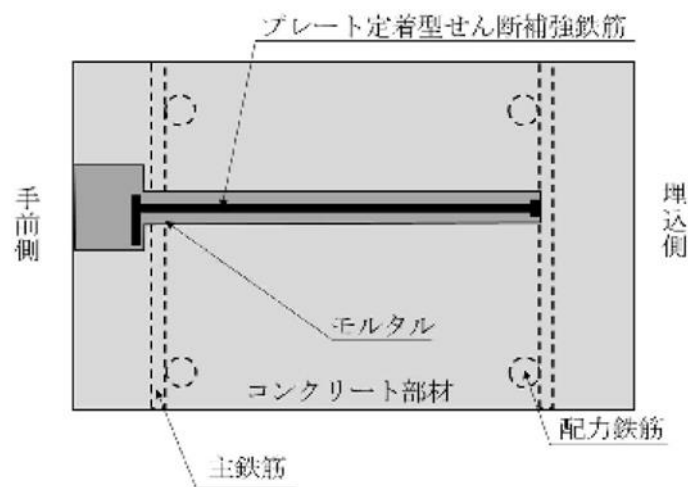
## 2. PHb工法について

### 2.1 PHb工法の使用部位

取水槽において，基準地震動発生時に屋外重要土木構造物としての機能（耐震安全上重要な機器・配管系の間接支持機能，もしくは非常時における海水の通水機能）を維持するためにせん断耐力を確保する必要がある。せん断耐力を向上させるためには躯体のせん断補強を実施する必要がある。部材増し厚等のせん断補強が困難な部材に対して「後施工」によるせん断補強鉄筋を追加するPHb工法を用いる。PHb工法は，取水槽スクリーン室の隔壁のせん断補強に用いる。

## 2.2 PHb 工法の概要

1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計した構造物はせん断補強鉄筋量が相当に少なく設計されていることから、現在の耐震設計法において部材のせん断耐力が不足することが想定される。そのような供用中の鉄筋コンクリート構造物にせん断補強を行うための工法が後施工タイプのプレート定着型せん断補強鉄筋（PHb）工法である。既存構造物の表面からドリルで削孔を行い、その孔内にプレート定着型せん断補強鉄筋を差込み、充てん材で固定することにより、構造躯体と一体化をはかり、部材のせん断耐力を向上させる（第 13-2-1 図参照）。



第 13-2-1 図 PHb 工法の模式図

### 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

取水槽のせん断補強が必要な各構造部材に設置予定の PHb については、『建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」<sup>1)</sup>』（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、高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC」<sup>※1</sup>という。）により、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。ただし、有効係数の上限値は 0.9 としている。なお、建設技術審査証明報告書では、片側からしか補強施工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。

※1：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、開発目標および技術内容、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。

#### 【参考文献】

- 1) 一般財団法人土木研究センター：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（建技審証第 0522 号） 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」

### 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。審査証明において、PHb が受け持つせん断耐力は、鉄筋の材質（SD295，SD345，SD390），径（D13～32）毎に定め、その値は、先施工によるせん断補強鉄筋のせん断耐力の最大 0.9 倍で評価可能としている。また、堰，水門，橋台や橋脚等の既設の半地下及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に寄与する補強後のせん断補強筋量の上限を定めて求めた部材の骨格曲線の範囲内にあることが必要となる。

### 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

#### (1) 後施工によるせん断耐力

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、その概要を次にまとめた。

##### a. 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、梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験（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。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を第 13-3-1 表に示す。

シリーズ 1 では、せん断補強筋のない梁試験体（CASE1）及び異なる量の PHb によりせん断補強を行った梁試験体（CASE2, 3）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

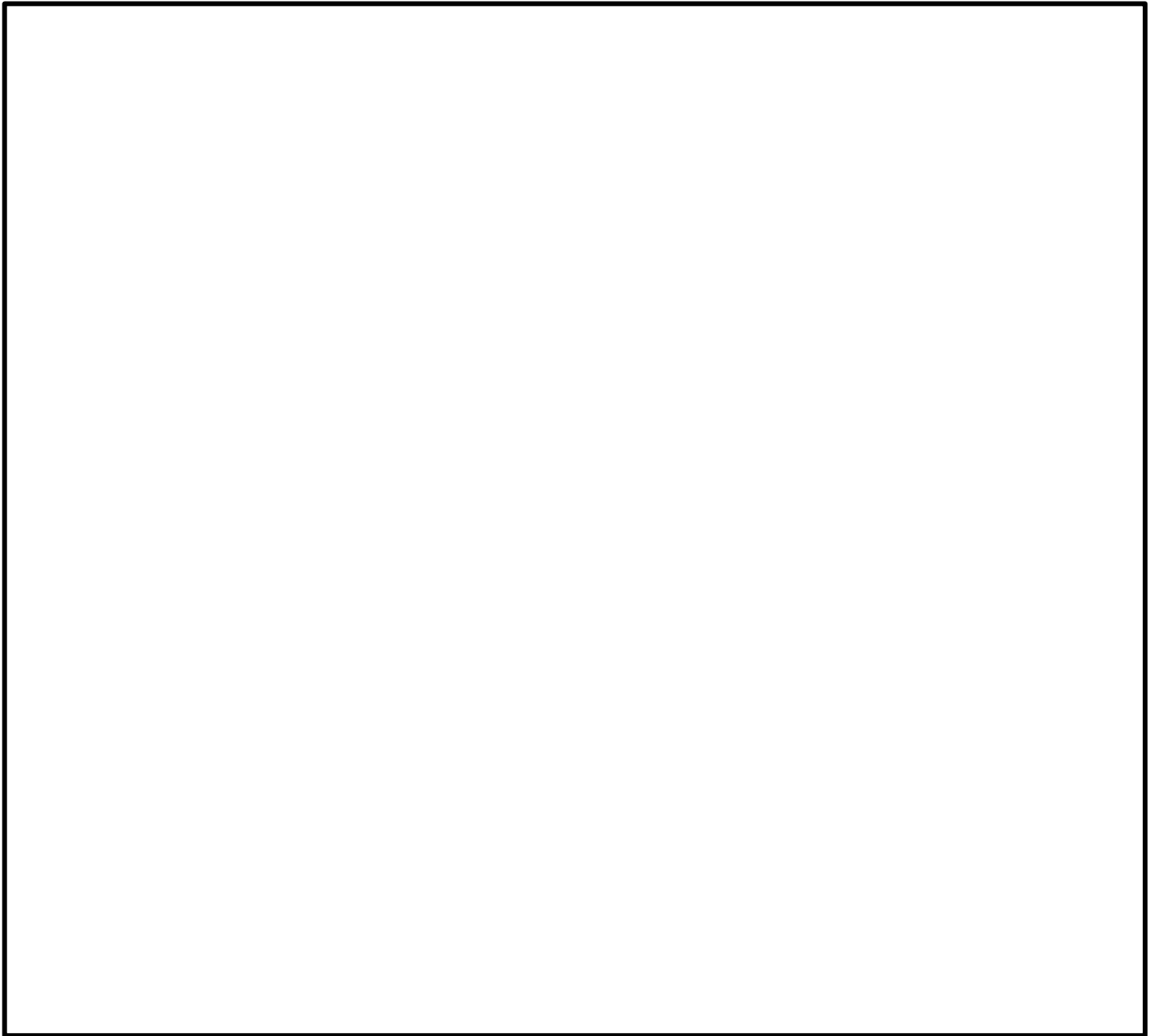
シリーズ 2 では、シリーズ 1 の CASE2 と同じ補強条件の試験体（CASE4）、CASE4 の PHb 先端の埋込み深さを埋込側の主鉄筋前面から 5mm 手前に留めた試験体（CASE5）、CASE5 の PHb の鉄筋量を 1.5 倍（3 列補強）とした試験体（CASE6）に対して、各々交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ 3 では、PHb を配置しない梁試験体 1 体（CASE3-1）、太径(D29・SD345)の PHb を設置した梁試験体 2 体(CASE3-2, CASE3-3)、せん断スパン比が小さい梁試験体 1 体（CASE3-4）、及び PHb を千鳥配置した試験体（CASE3-5）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ 4 では、高強度（D25・SD390）の PHb を設置した梁試験体（CASE4-1）に対して、正負交番繰返し加力試験を行った。シリーズ 3 と 4 では、PHb の径及び強度以外の配筋条件は同じである。

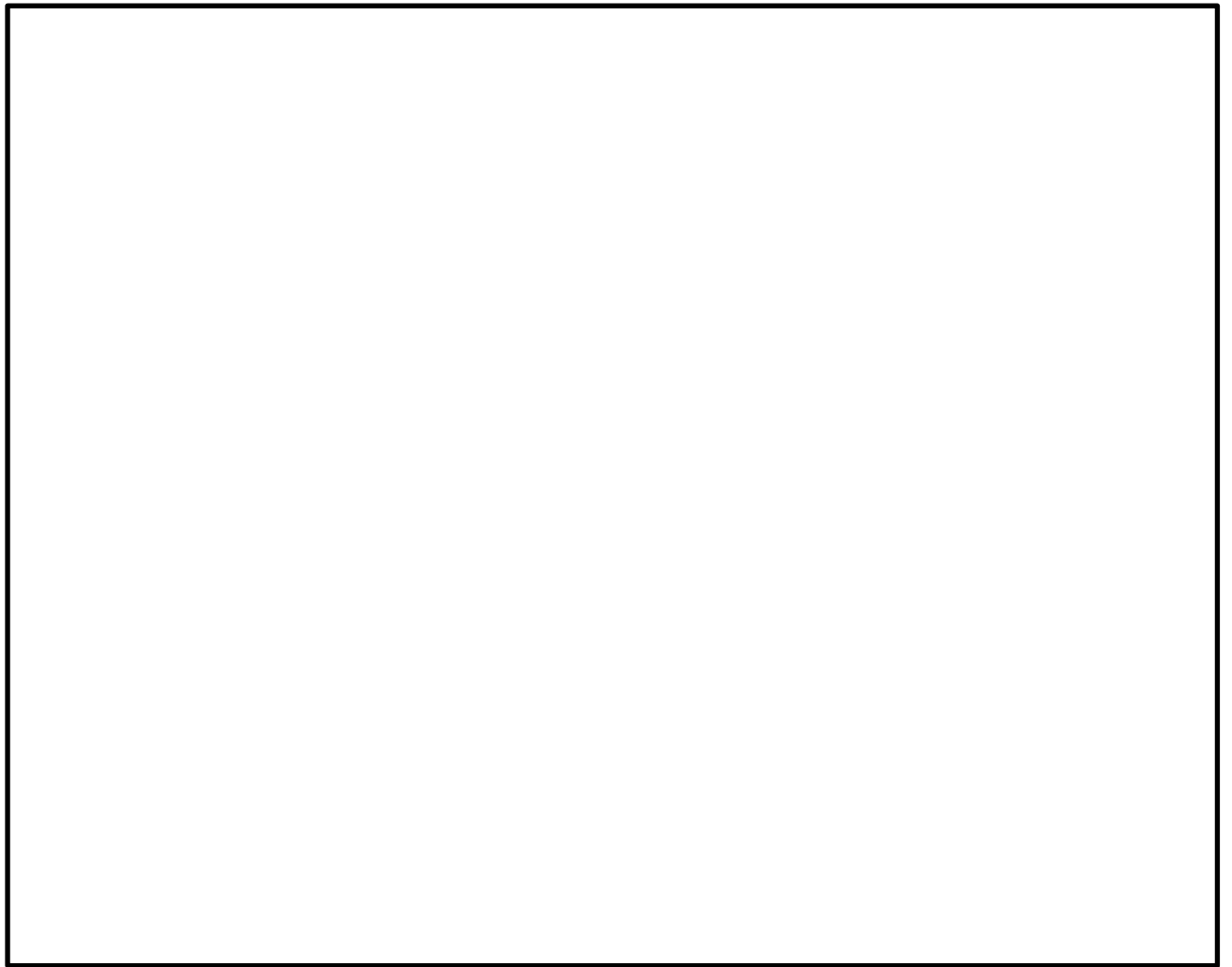
試験体及び補強方法を第 13-3-1 図に、加力要領を第 13-3-2 図に示す。

第 13-3-1 表 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)



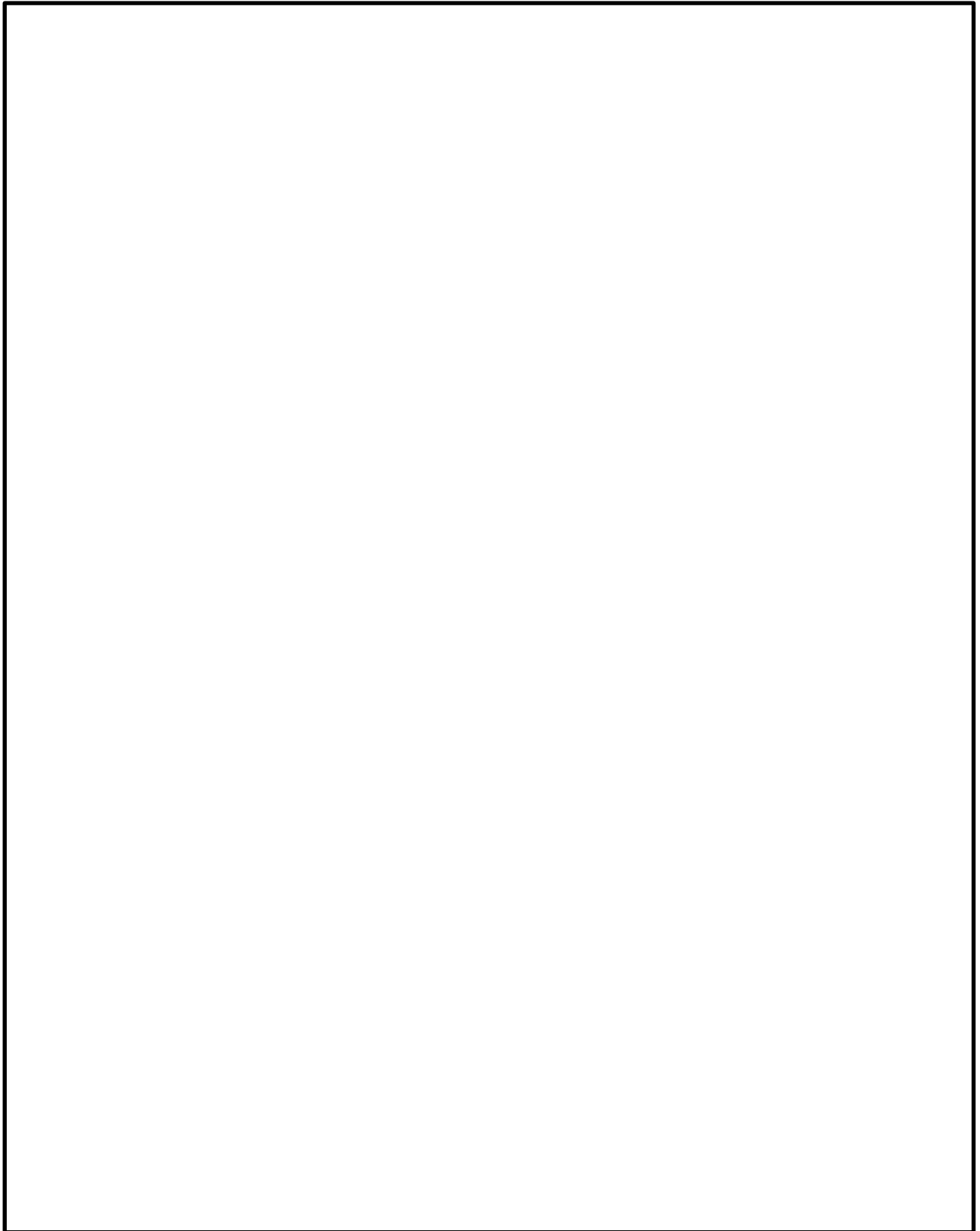
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





第 13-3-1 図 せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法(抜粋)  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



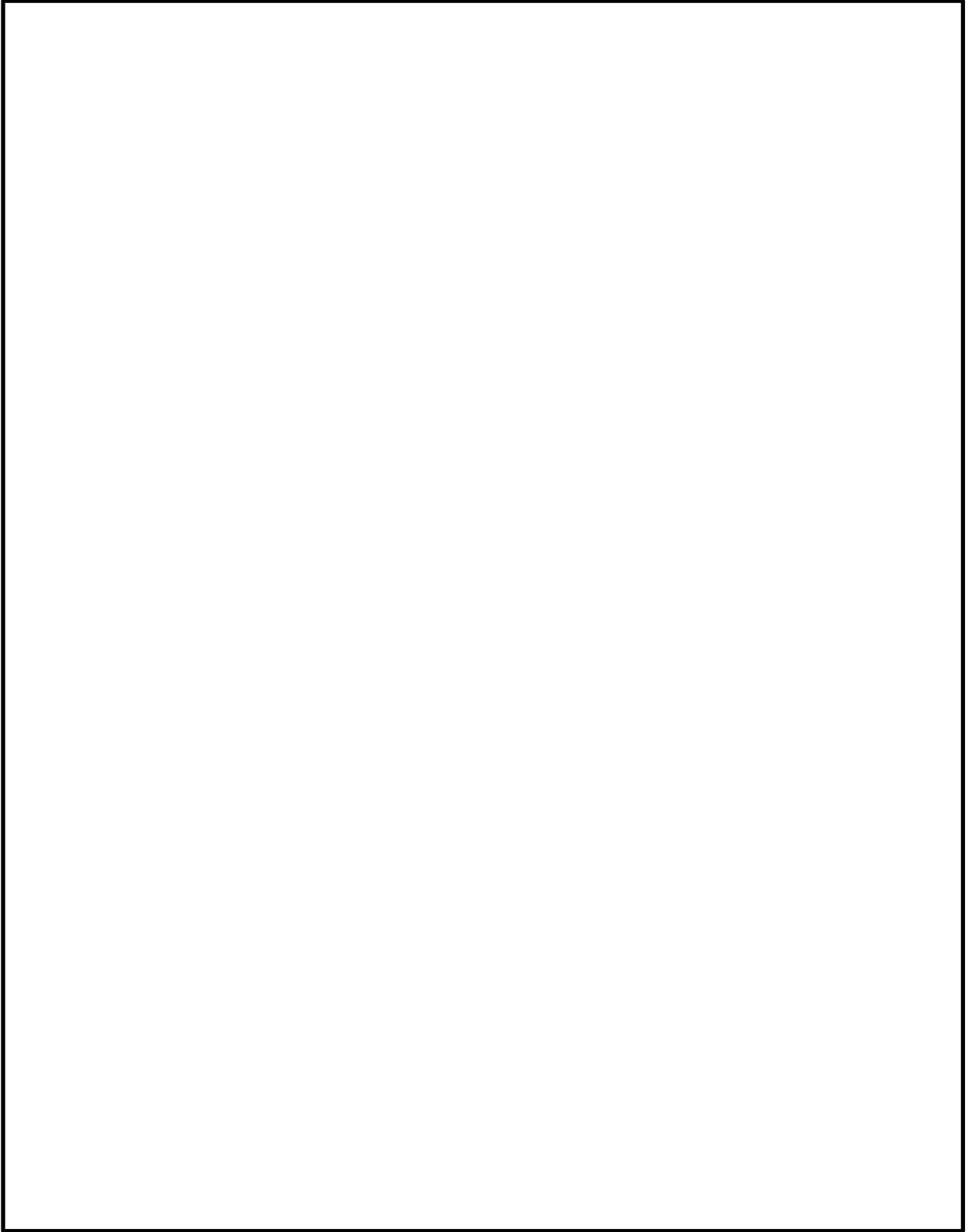
第 13-3-2 図 せん断耐力向上性能試験の加力要領  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## b. 実験結果

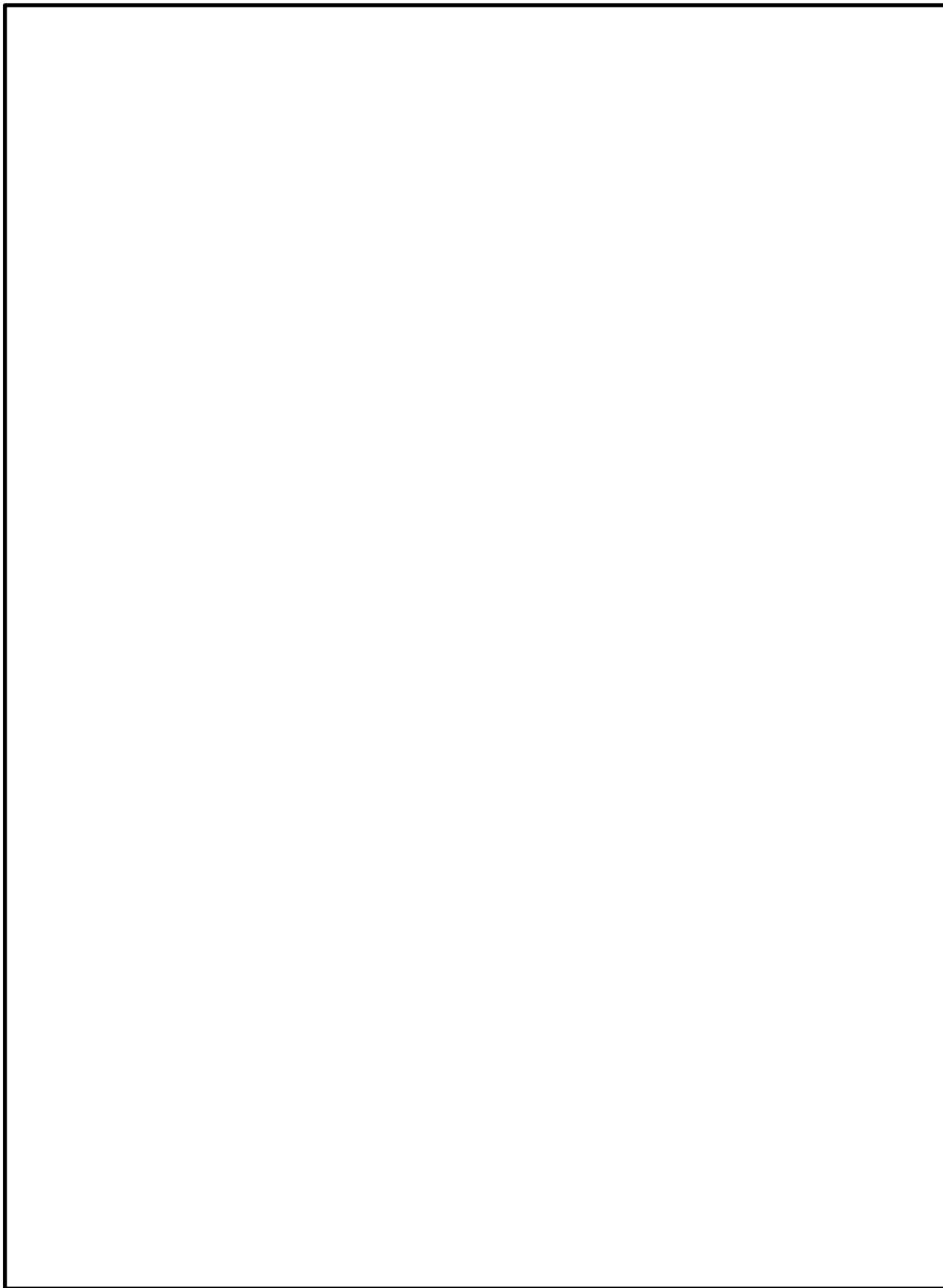
a. の試験結果を第 13-3-2 表に示す。PHb の有効係数は、PHb を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力  $V_s$  に対して PHb が分担できるせん断耐力の比率である。有効係数の算定において、コンクリートの分担するせん断力  $V_c$  はコンクリート標準示方書（安全係数 1.0）に基づく場合と、実験での斜めひび割れ発生時のせん断力を用いた場合について算定した。CASE2 については、载荷装置の制御が不十分で大変位時に偏荷重が作用した実験条件上の理由により、検討ケースから除外した。これは、本来は 2 点の载荷点に均等に荷重がかかることで実験せん断耐力を（左右の合計荷重）/2 より算出していたが、CASE2 については、左右で作用荷重が異なっていたため、他の実験データと比較することが不適切と判断したことによる。

第 13-3-2 表 実験結果の一覧  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

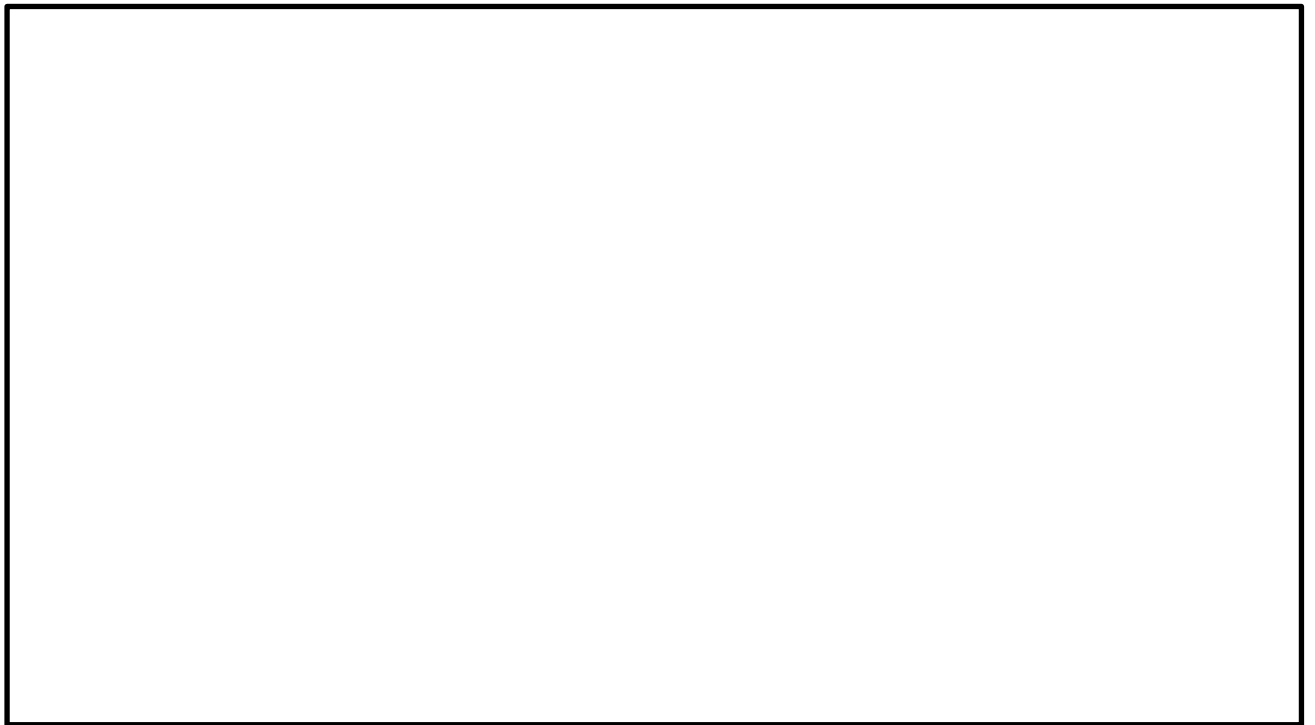


本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

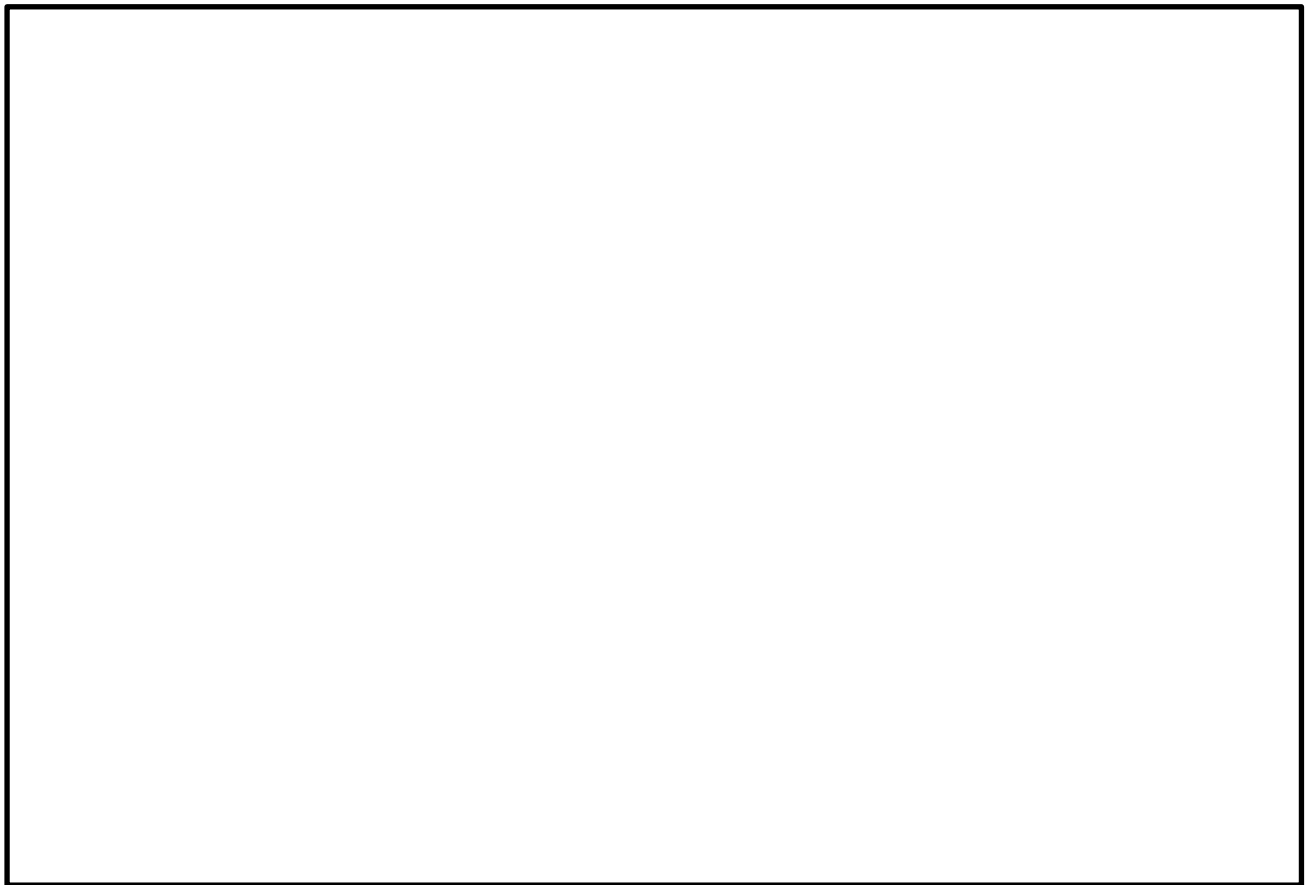
c. PHb のせん断補強の考え方



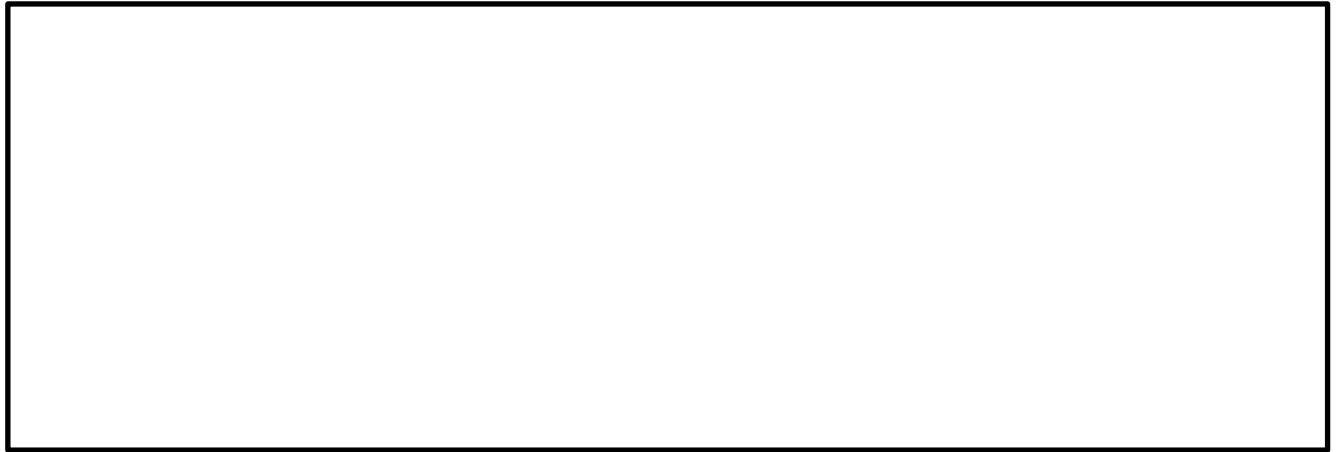
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



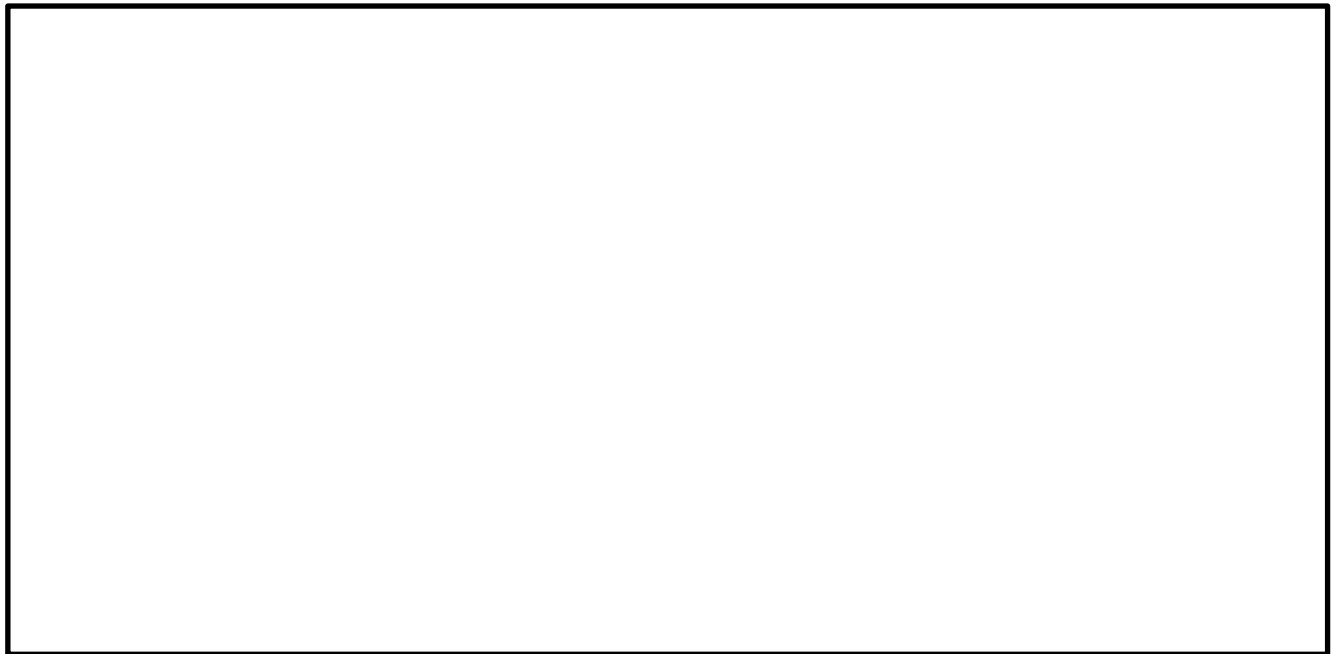
第 13-3-3 図 斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13-3-4 図 斜めひび割れ内の後施工せん断補強鉄筋応力  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

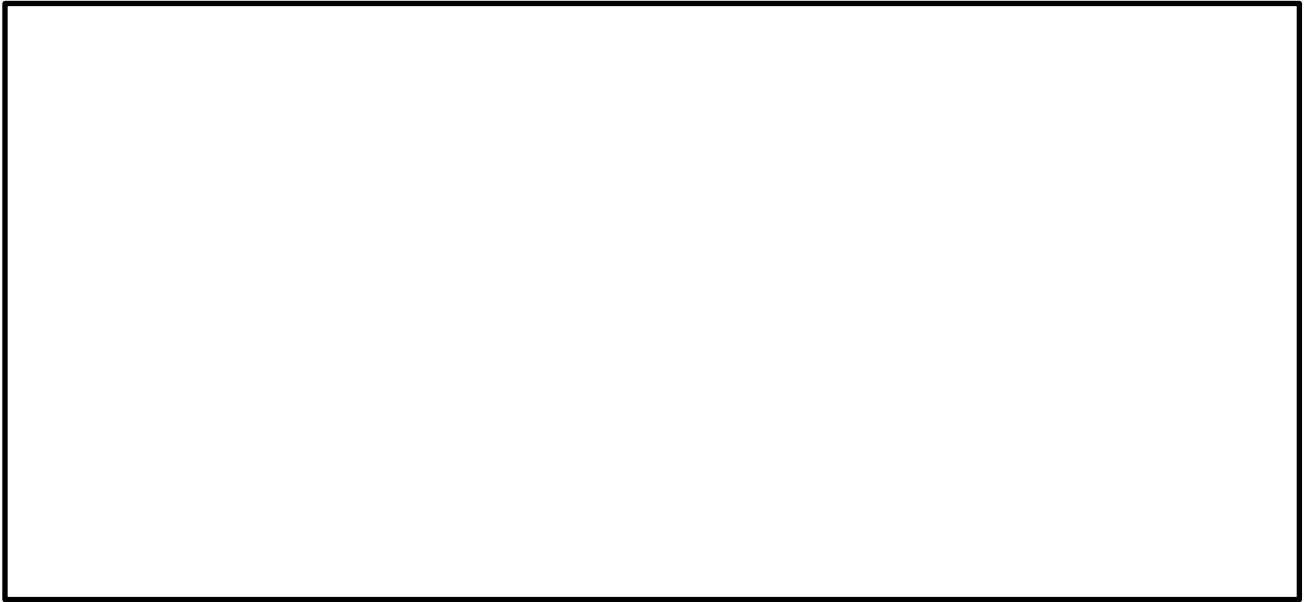


第 13-3-5 図 PHb と寸切り鉄筋の有効係数の比較

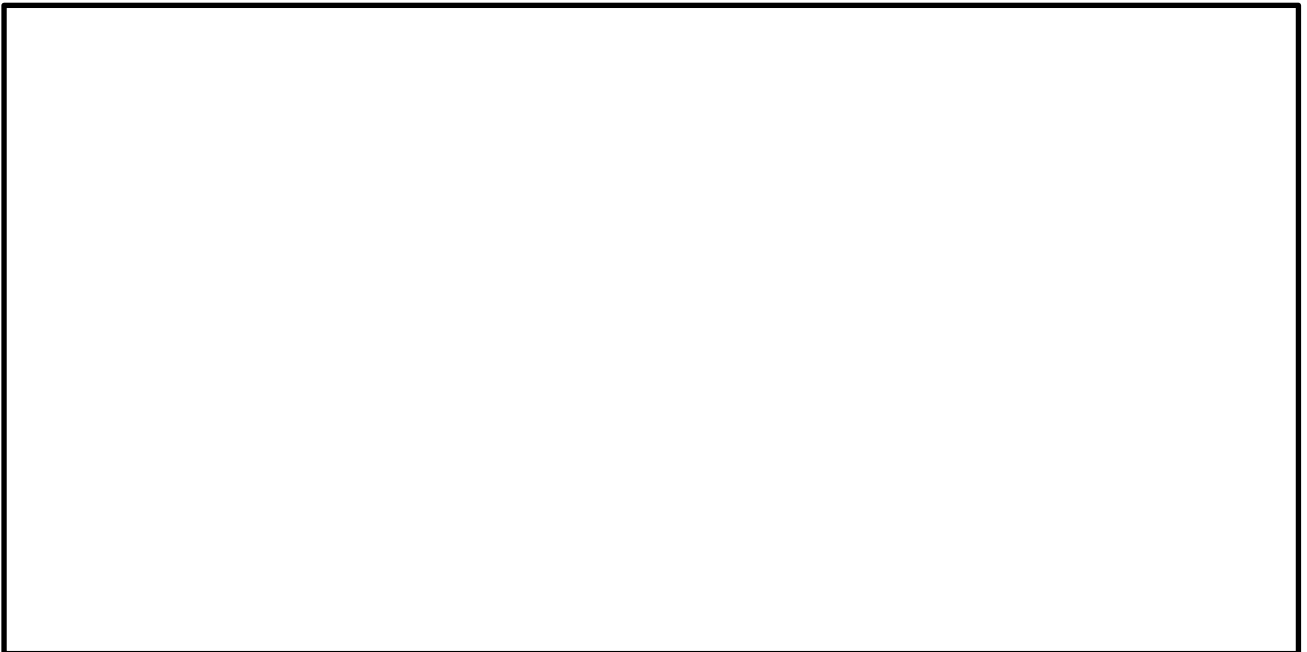
d. 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

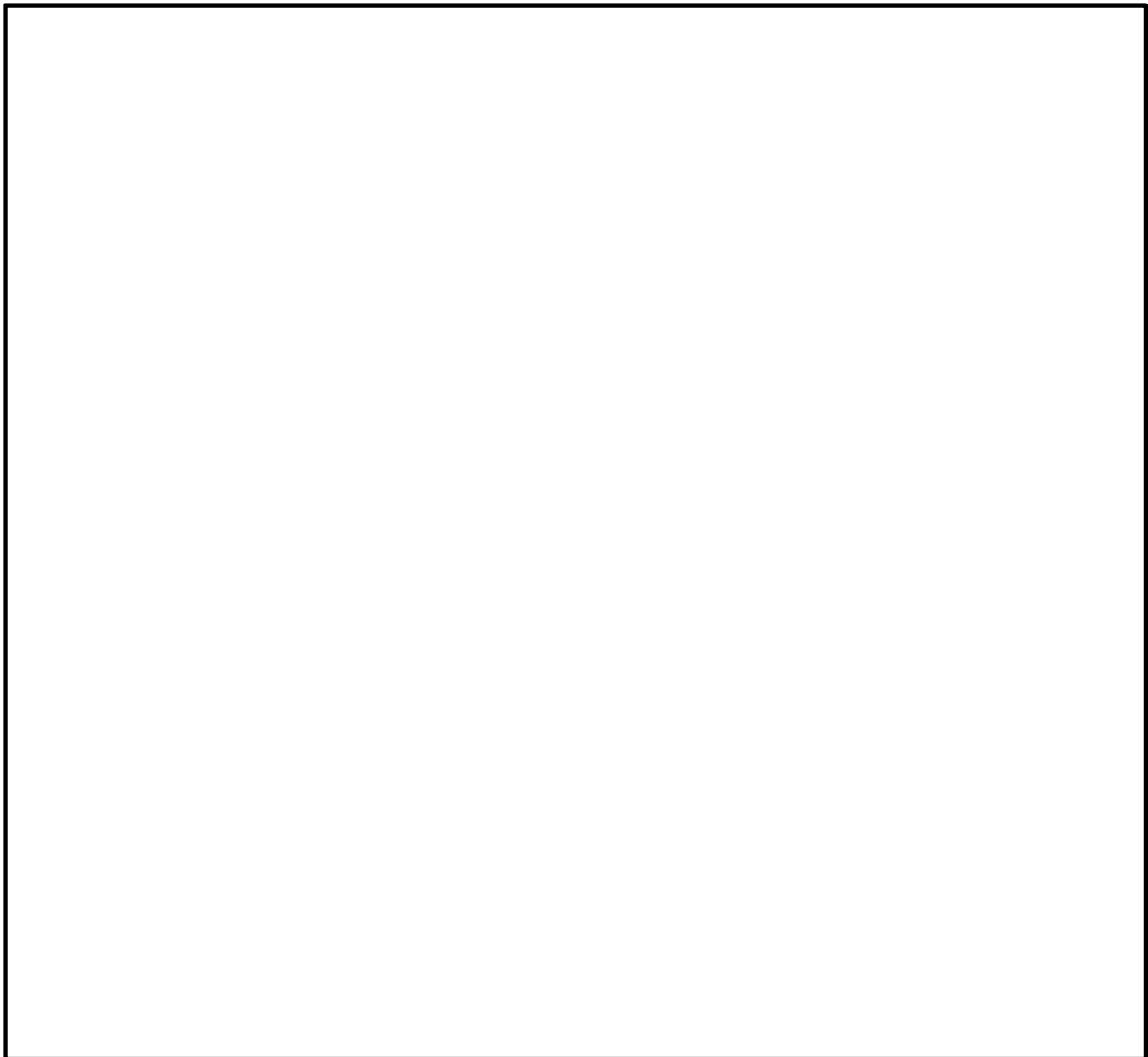


第 13-3-3 表 PHb の有効係数の比較  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。





第 13-3-6 図 圧縮鉄筋と引張鉄筋との間隔と有効係数の関係  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

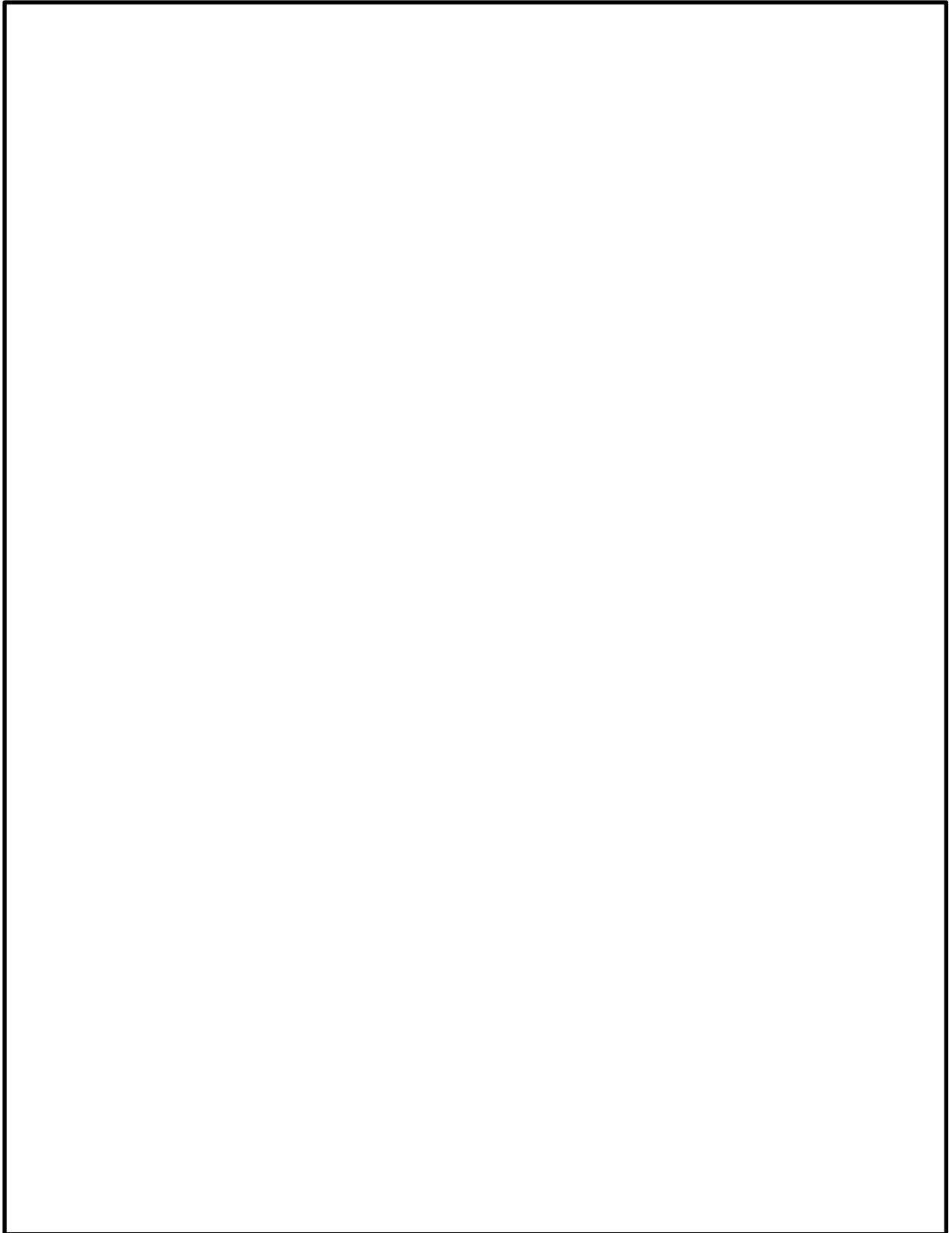
(2)使用材料・許容応力度・強度

実験を元にした本設計法では、第 13-3-7~9 図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・許容応力度・強度を用いて設計する。



第 13-3-7 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13-3-8 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4 条一別紙 13-17

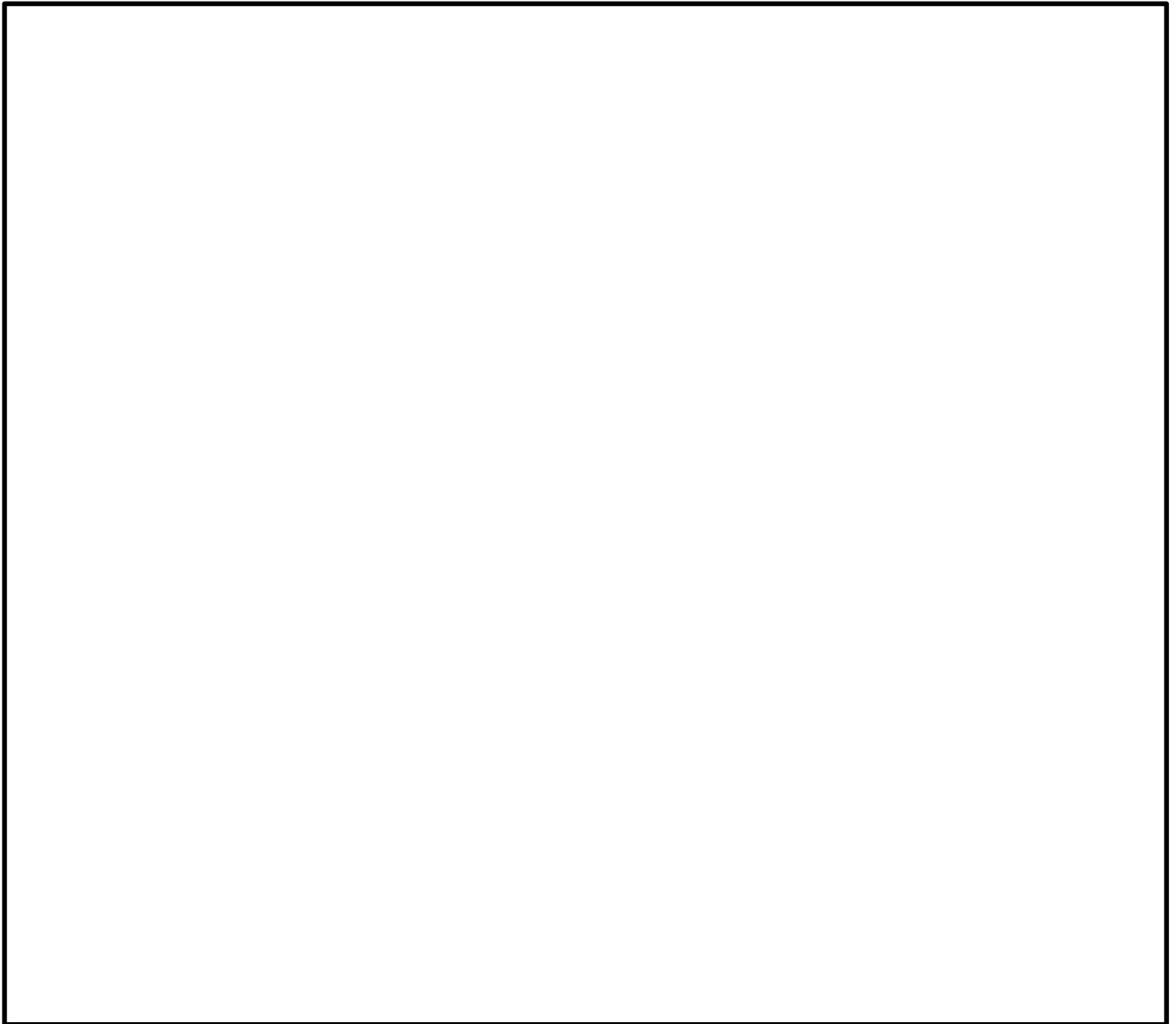


第 13-3-9 図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) 構造部材の評価

(1)で示した基本的考え方に基づき，第13-3-10図で示す，コンクリート標準示方書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。

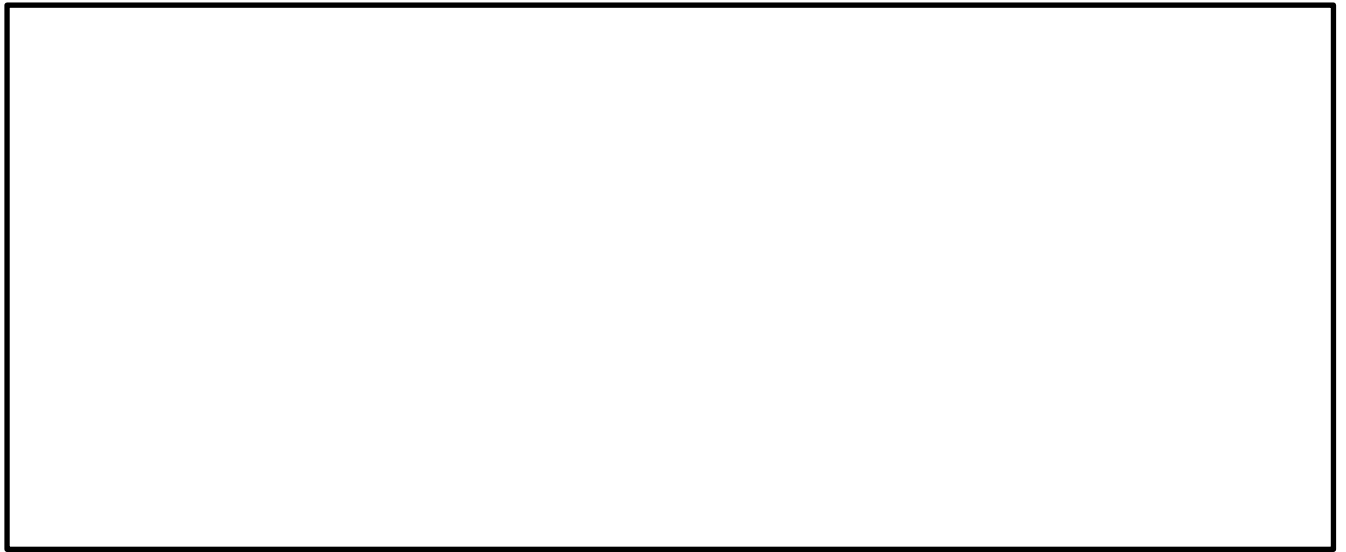


第13-3-10図 使用材料・許容応力度・強度  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(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様に、第 13-3-11 図で示す構造細目を定めている。

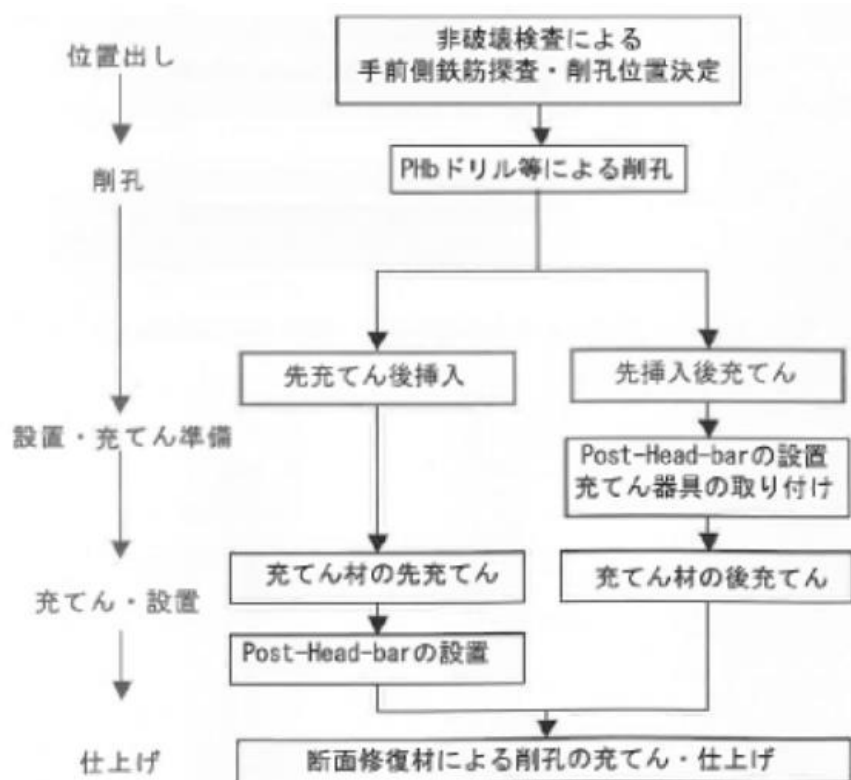


第 13-3-11 図 構造規定（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認

建設技術審査証明報告書では、施工性に関して、片側からしか補強施工できない部材に対してもせん断補強できることを、試験施工等に基づき確認している。確認にあたっては、第 13-3-12 図に示す通り PHb を設置する手順を設定し、この工事に必要な施工要素に対して施工性を確認している。各施工要素に対する施工性の確認内容について、概要を下記に示す。



第 13-3-12 図 PHb の施工手順

#### (1) 補強設計に基づく PHb の配置

PHb を差し込むためには、補強対象部材の手前側に設置されている主鉄筋・配力鉄筋を避けた場所に削孔位置を定める必要がある。例えば、電磁波レーダ法を使用すれば、部材手前側の配筋の探査は容易であるので、当該主鉄筋、配力鉄筋を避けての削孔位置の決定が可能である。

## (2) PHb 配置位置での削孔方法

削孔は PHb ドリルなどにより行う。PHb ドリルによる削孔は以下のような特徴がある。

- ・切孔ではないので、鉄筋を切断することがない（鉄筋に当たった時点で停止可能）。
- ・ロッドの向きと貫入深さが作業中にわかるので、削孔方向と削孔深さの精度が確保できる。
- ・削孔内部が凸凹のある仕上がりとなる。高圧空気で清掃すれば異物の付着もない。
- ・コンプレッサによる空気圧で駆動するので、削孔部・制御部が軽量小型であり、人力による取り扱いが容易。駆動源であるコンプレッサは比較的大きいが、100m 程度以上離れた位置に設置できる。
- ・ロッド長を短くすれば、さらに狭い空間で施工可能である。
- ・削孔速度が速い。
- ・削孔に水を使用しない。
- ・削孔屑を回収することができる。
- ・削孔反力が小さいので、架台などの支保が軽微。
- ・細径および拡幅削孔に対応した削孔ビットにより削孔が容易である。

したがって、駆動源が入らない狭い空間で、水が流せないような環境においても、最小の作業員数で、比較的軽微な仮設により（あるいは仮設なしでも）効率の良い削孔が可能である。そして、既設の鉄筋を切断することなく精度の良い位置・方向に、所定の深さに削孔が可能で、かつ削孔内を凸凹で清浄に仕上げられる。すなわち、施工性と PHb を定着固定する性能の双方の観点から PHb ドリル削孔は適した方法であると確認された。

## (3) 削孔内への PHb の固定方法

先充てん後挿入の場合、削孔内に先に充てん材を充てんした後に PHb を差し込むだけで、PHb の固定を完了する。削孔内面は、モルタル充てん直前に湿潤状態にするかあるいはドライアウト防止剤を散布し、充てん材が吸湿されないようにする。先充てん後挿入用の充てん材は、PHb モルタルを標準とするが、下向きの場合には PHb グラウトを使用してもよい。

PHb モルタルの可塑性によって、削孔内からモルタルがたれないので、この方法によって容易に PHb の削孔内への固定が可能であることを確認した。充てん材が PHb モルタルであれば、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た。



PHb モルタルはプレミックス材料であり，施工現場では，所定量の水を混ぜてハンドミキサで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。所要のモルタル量も少量で，手押しのポンプで充てん可能であるので，最小限の設備と人員での PHb の設置が可能である。

#### (4)PHb 設置後の仕上げ等施工性

先充てん後挿入については，充てん材をパッカー等で抑えて養生した後に，断面修復によって削孔部分の充てん復旧を行う。断面修復材もプレミックス品であり，施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。施工も左官仕上げによるので容易である。断面修復の専用材料であるので，品質の信頼性は高い。

## 4. 島根原子力発電所2号炉におけるPHbの適用性確認

### 4.1 方針

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、また、これまでに数多くの施工実績がある。PHb工法を島根原子力発電所2号炉の取水槽に適用するにあたり、建設技術審査証明報告書の適用範囲やせん断補強効果等についての確認を行い、島根原子力発電所2号炉の構造形式・諸元、地盤条件、使用環境、補強内容等が適用範囲に該当することを確認する。適用性の確認は、先行サイトとの類似点及び相違点を整理した上で行う。確認フローを第13-4-1図に示す。

#### 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に収まっているか

島根原子力発電所2号炉の構造物に採用する補強仕様が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に収まっているかの確認をする。収まっていない場合は適用範囲内に収まる補強仕様になるように再設計を実施する。

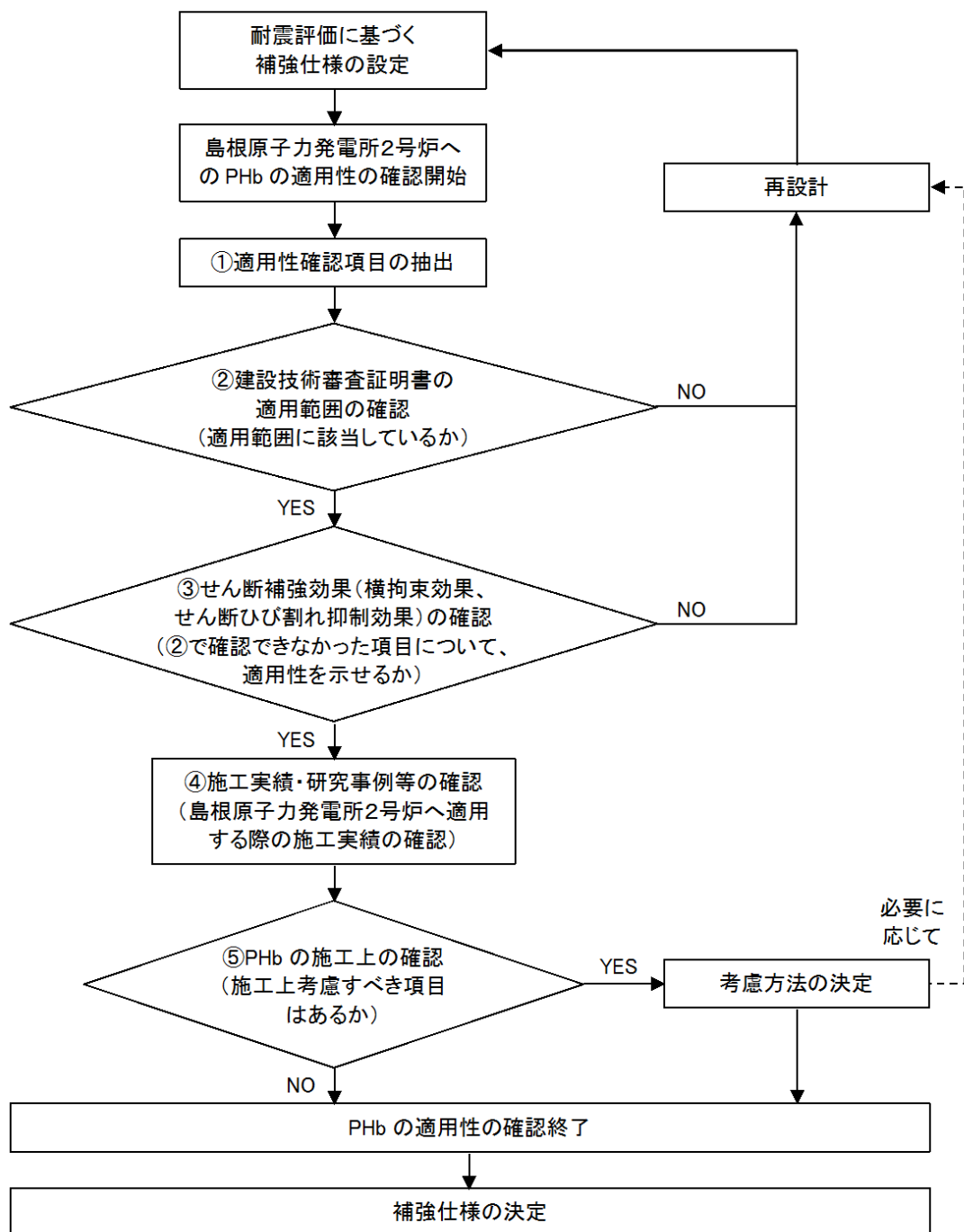
#### ③ 補強仕様に対して②以外の項目においてもせん断補強効果を期待できるか

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を実施する。

#### ④ 後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、目的、試験体諸元等を整理し、島根原子力発電所2号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

#### ⑤ PHbの施工において考慮すべき項目はあるか

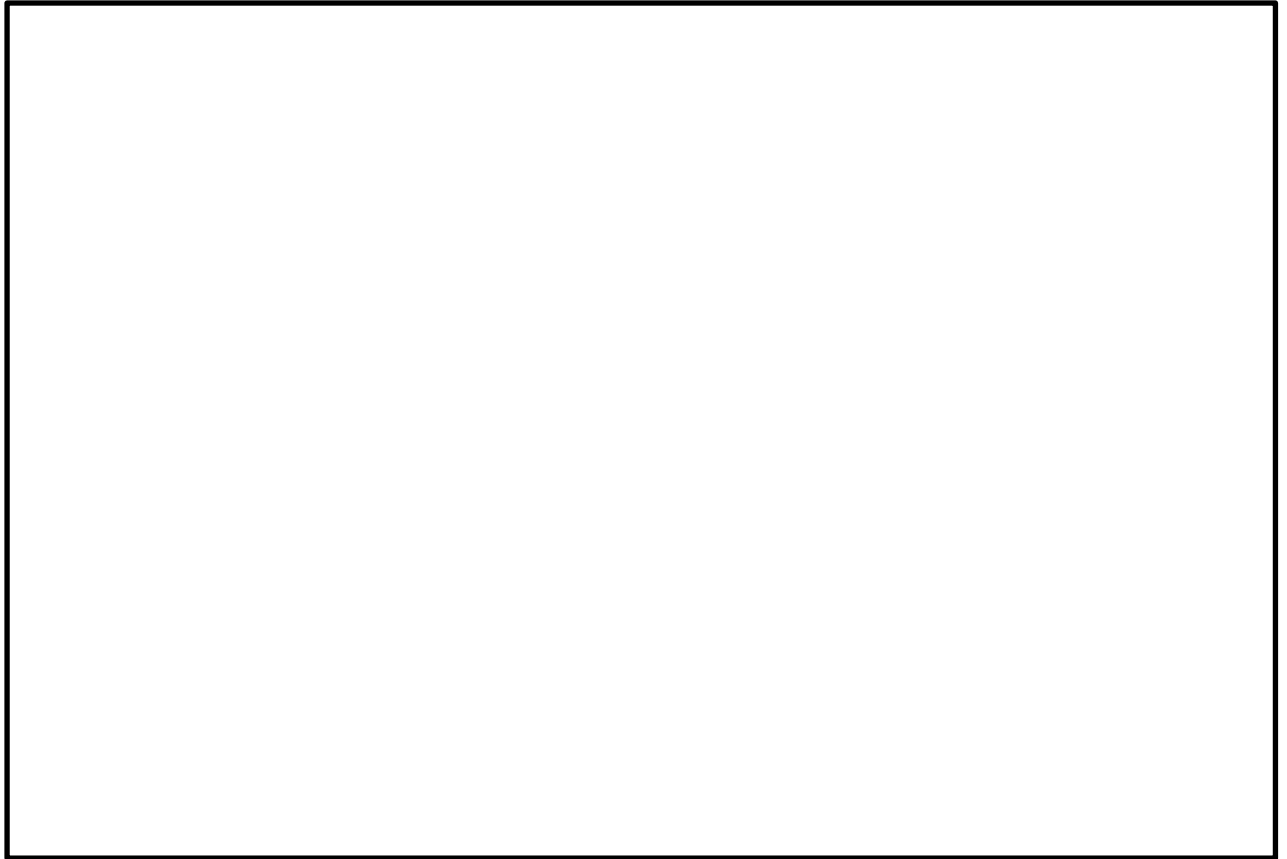
島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物に対してPHb工法の施工をする際に、考慮しておくべき事項がないか確認を行う。ある場合は施工上または設計上どのように考慮するかを決定した上で考慮方法によっては再設計を実施するか適宜判断を行う。



第 13-4-1 図 確認フロー図

#### 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、各部材において不足するせん断耐力を満足するように設定した結果、第 13-4-2 図のような補強仕様となった。



第 13-4-2 図 補強仕様

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

#### 4.3 適用性確認項目の抽出

PHb 工法の特徴及び島根原子力発電所 2 号炉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検討項目を抽出する。以下に確認項目を挙げる。

##### a. 使用目的

適用の前提として、審査証明の範囲として明記されている目的に該当している必要がある。

##### b. 構造形式

適用の前提として、審査証明において想定している構造形式に該当している必要がある。

##### c. 構造細目

PHb 工法では、想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当している必要がある。

##### d. 部材諸元

部材厚については、建設技術審査証明報告書内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であることを確認する。

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は、応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること、または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

##### e. 使用材料（せん断補強鉄筋）

PHb に使用する鉄筋の種別・径に応じて必要な定着長が設定されているため、島根原子力発電所 2 号炉の土木構造物の補強では適用が確認された補強鉄筋を用いる必要がある。

##### f. 使用材料（プレート）

審査証明において確認されている材料を用いる必要がある。

##### g. 使用材料（充てん材）

応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等である必要がある。

##### h. 使用材料（断面修復材）

応力伝達の観点から、構造体コンクリートと同等である必要がある。

##### i. 載荷方法

応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること、または、範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

j. せん断補強筋の定着長

適用の前提として審査証明において設定している定着長を考慮して設計している必要がある。

k. せん断ひび割れ抑制効果

材料非線形解析を実施して、特異なひび割れが発生していないか確認する。

l. 応力状態（損傷程度）

PHbの構造の特徴として、両端の定着プレートが有効に機能する必要がある、そのために構造物が概ね弾性範囲内であることを確認する。

m. 変形量（横拘束効果の確認）

PHbの適用範囲として「地震時の変形量が限定される地中構造物等」とされている。変形に関しては、変形に伴う曲げひび割れの影響が考えられるが、変形量に関する定量的な影響検討は行われていないため、変形量に対しては、適用確認実験の変形量を超えない必要があると考えられる。

n. 使用環境

島根原子力発電所2号炉固有の使用環境として、取水槽は海水に接することが挙げられることから海水環境下での実績があることを確認する。

#### 4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

PHb の適用について、建設技術審査証明報告書に記載の、a. 使用目的、c. 構造細目、e～h. 使用材料及び j. せん断補強筋の定着長の確認結果を下記に示す。

##### a. 使用目的

使用目的は、先行サイト（美浜3号炉及び東海第二）と同様、第13-4-1表に示すとおり、審査証明の範囲として明記されている目的に該当していることを確認した。

第13-4-1表 PHb の適用範囲と適用条件（使用目的）

--	--

建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	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。
	地中構造物に適用し、せん断補強の目的で用いる。（変形性能（じん性）の向上を目的として用いているわけではないため、左記に示す変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限値の規定については不問である。）

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

c. 構造細目

構造細目は、先行サイトと同様、第 13-4-2 表に示すとおり、審査証明において規定している構造細目に該当していることを確認した。

第 13-4-2 表の構造細目②においては、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がコンクリート標準示方書に記述されているので、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（せん断スパン方向の最大間隔 300mm 以下）を外すことができる。

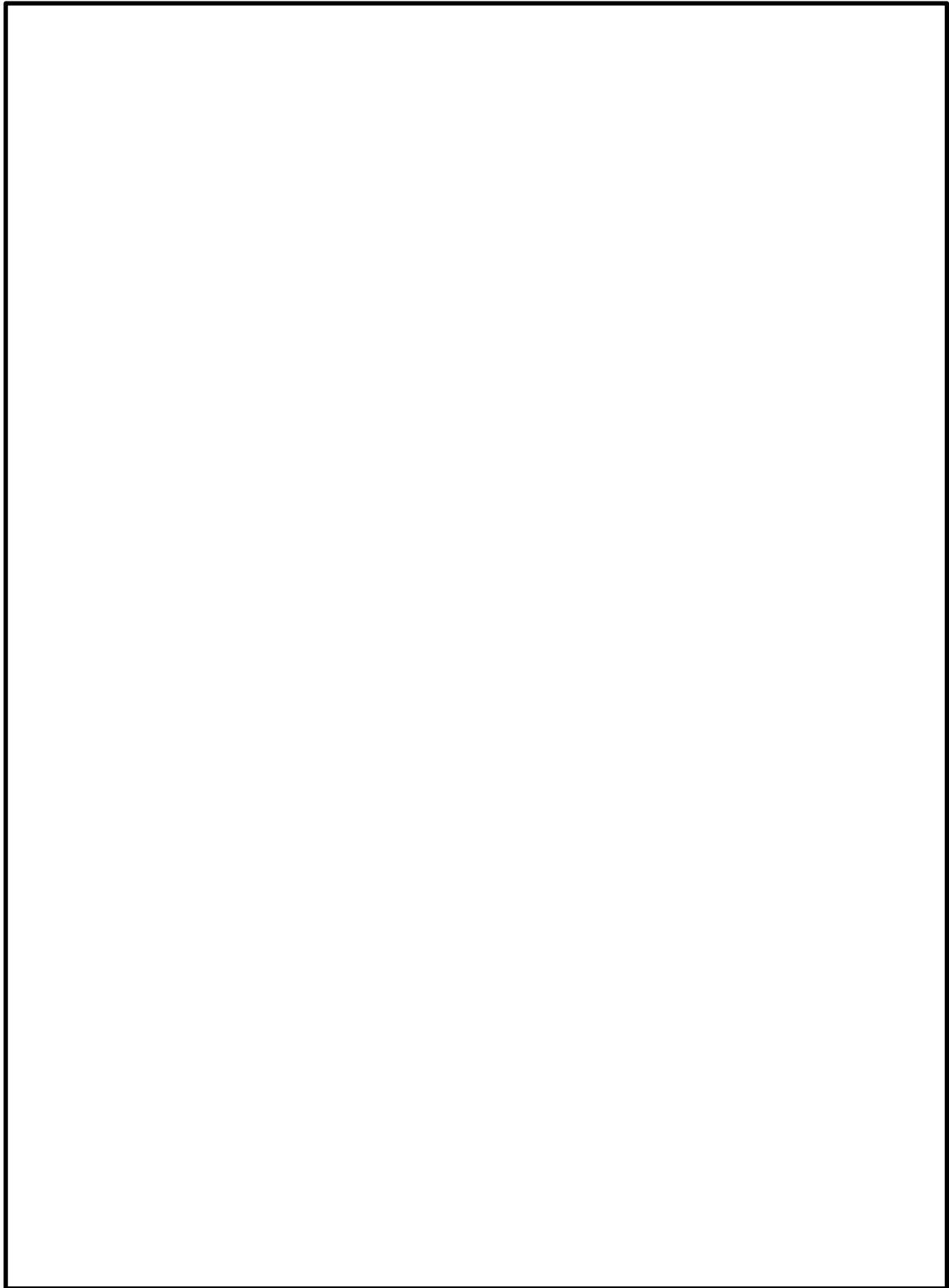
なお、PHb の配置は第 13-4-3 図に示す標準配置によるものとする。

第 13-4-2 表 PHb の適用範囲と適用条件（構造細目）

確認項目	美浜 3 号炉 (PHb 工法)	東海第二 (PHb 工法)	島根 2 号炉 (PHb 工法)	建設技術審査証明 報告書の適用範囲
構造細目① (せん断補強鉄筋の断面積比)	0.21～0.94%	0.43%	0.51%	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。
構造細目② (PHb 配置のせん断スパン方向の最大間隔)	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 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	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 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	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 倍以下で、かつ 300 mm 以下。	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 倍以下で、かつ 300 mm 以下。
構造細目③ (埋込先端のかぶり)	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、100 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	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、75 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	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、130 mm+主筋径の 1/2 とし、50 mm 以上を確保している。	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つつ 50 mm 以上とする。

他サイトの情報に係る記載内容については、会合資料や HP 等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものである。





第 13-4-3 図 PHb の標準配置  
(建設技術審査証明報告書より抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

e～h. 使用材料及び j. せん断補強筋の定着長

構造細目は、先行サイトと同様、第 13-4-3 表に示すとおり、審査証明に明記されている適用範囲に合致することを確認した。

第 13-4-3 表 PHb の適用範囲及び適用条件  
(使用材料及びせん断補強筋の定着長)

--	--	--

	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	実使用材料
せん断補強筋		左記範囲内の材料を使用する。 (D19～D32 SD345)
プレート		材質は、SM490 相当を用い、品質証明書でその品質を確認する。
充てん材		躯体コンクリート以上の強度
断面修復材		躯体コンクリート以上の強度
定着長		左記の定着長を考慮して設計を実施する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

#### 4.5 せん断補強効果の確認

##### (1) せん断補強効果の確認内容

「4.3 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、建設技術審査証明報告書では確認できなかった項目についてもせん断補強効果が期待できるかを確認する。以下に確認する項目を挙げる。PHb 工法と先施工のせん断補強鉄筋とで大きく異なる部分は、PHb 工法ではコンクリートに定着をとっていることである。したがって、コンクリート部分に関する項目が主となって、せん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる。なお、b～f の項目については、(2)以降において、解析的にせん断補強効果が得られていることを確認する。

- b. 構造形式
- d. 部材諸元
- i. 載荷方法
- k. せん断ひび割れ抑制効果
- l. 応力状態（損傷程度）
- m. 変形量
- n. 使用環境

##### (2) せん断補強効果の確認

###### b. 構造形式

建設技術審査証明報告書に構造形式の具体的な記載はないが、使用目的として、「地震時の変形量が限定される地中構造物など」という記載があることから地中に埋設されたボックスカルバートの構造物を想定していると考えられる。

先行サイトにおいても同様の考察を行っており、島根 2 号炉取水槽は先行サイトと同様の構造形式であることから、島根 2 号炉取水槽は PHb 工法が適用可能な構造形式であると考えられる。

###### d. 部材諸元, i. 載荷方法, k. せん断ひび割れ抑制効果

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。建設技術審査証明報告書では、実験を上回る部材厚については、理論式により求められる有効係数  $\beta_{aw}$  を実験の部材厚で得られた値である 0.9 を上限として用いることで保守的な設計としている。（第 13-3-10 図参照）島根原子力発電所 2 号炉取水槽の部材厚は、実験で用いた部材と比べて大きいため、実験を上回る部材厚でも PHb の補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また、部材諸元のうち、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比及びコンクリート設計基準強度、及び載荷方法が島根原子力発電所 2 号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって、先行サイトと同様、せん断ひび割れ抑制効果の確認とともに、上記の項目についても島根原子力発電所 2 号炉の実際の構造物の設計荷重等と同じ条件でもせん断補強効果が期待できるかの確認を解析により補足する。

解析の詳細については、添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」に記載する。添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」にて記載したとおり、実験条件と異なる項目であるb～fの項目においてもせん断補強効果を確認する。また、弾性挙動内においても特異なひび割れや変形が発生しないことを確認する。

・部材厚

項目	建設技術審査証明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所における審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽のPHb適用部材 <sup>※2</sup>
部材厚	500 mm	2,000 mm (海水ポンプ室 底板)	3,190 mm (取水ピット中頂板) 1,500 mm (左・右側壁) 1,200 mm (取水ピット底板, 隔壁) 1,000 mm (上記以外の部材)	・1,200 mm (取水槽スクリーン室隔壁)
実験または解析により得られた有効係数 $\beta_{exp}$	0.90	0.92	0.97	0.96
式 <sup>※1</sup> により計算した有効係数 $\beta_{aw}$	0.89	0.90 (上限値)	0.90 (上限値)	0.90 (上限値)

【検証結果】

- ・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材について、その部材厚は実証実験（500 mm）～審査実績（3,190 mm）の範囲内に収まっている。
- ・添付資料2の3. ②及び4. ③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、スクリーン室隔壁に対するPHbによるせん断補強効果を確認した。

以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、部材厚の観点について適用性を有すると判断した。

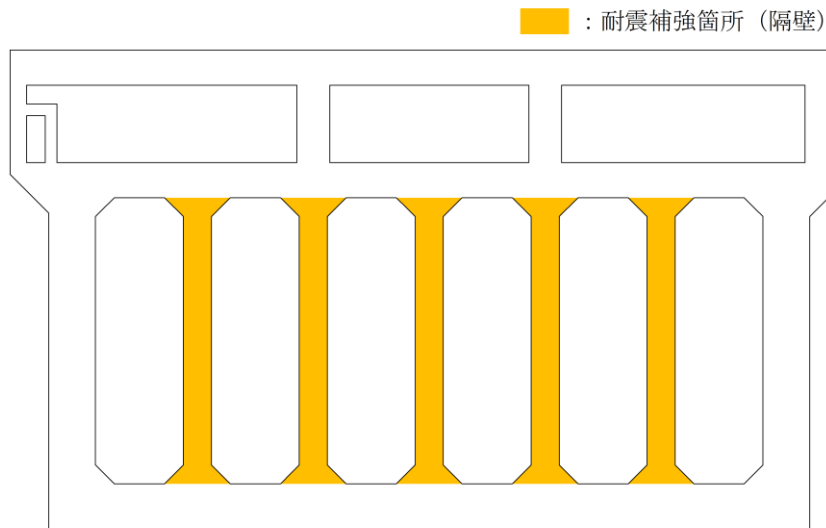
注記 ※1. 建設技術審査証明報告書における実証試験結果より設定された以下の設計式

$$\beta_{aw} = 1 - l_y / \{2 \cdot (d - d')\} \quad (\text{ただし, } \beta_a \leq 0.9)$$

$l_y$ : 後施工せん断補強筋の埋込側に必要な定着長

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

※2. 取水槽（スクリーン室）の各部材配置を以下に示す。



・せん断スパン比

項目	建設技術審査証明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所における審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽のPHb適用部材
せん断スパン比	1.19~2.79	1.92	2.15	11.40
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材のせん断スパン比は、実証試験における試験体のせん断スパン比（1.19~2.79）及び先行原子力発電所の審査実績のせん断スパン比（1.92~2.15）の範囲に収まっていないため、添付資料2の4.③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、せん断補強効果を確認した。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、せん断スパン比の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

・主鉄筋比

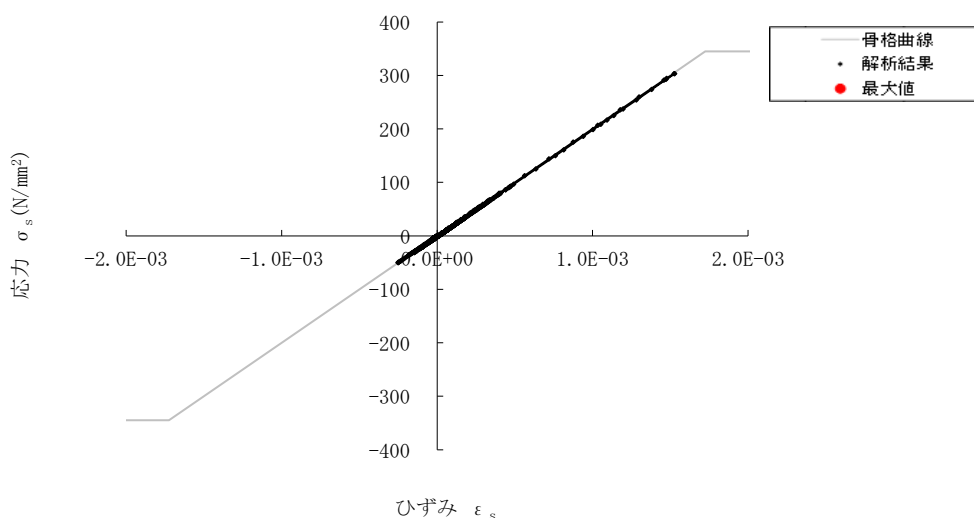
項目	建設技術審査証 明報告書 (実証試験)	先行原子力発電 所における審査 実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電 所における審査 実績 (東海第二)	島根2号炉取水 槽のPHb適用部 材
主鉄筋比	1.48	0.47	0.46	0.85
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材の最大の主鉄筋比は、先行原子力発電所における審査実績（0.47、0.46）と比較して大きいですが、実証試験（1.48）と比較して主鉄筋比が十分に小さいため、PHbの定着性能に影響を与えるような付着割裂破壊は生じないと推察される。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、主鉄筋比の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

・コンクリート強度

項目	建設技術審査証 明報告書 (実証試験)	先行原子力発電所に おける審査実績 (美浜3号炉)	先行原子力発電所 における審査実績 (東海第二)	島根2号炉取水槽 のPHb適用部材
コンクリ ート強度	32.0～38.3 (圧縮強度)	23.5 (設計基準強度)	20.6 (設計基準強度)	23.5 (設計基準強度)
<p><b>【検証結果】</b></p> <p>・島根2号炉取水槽（スクリーン室）におけるコンクリート設計基準強度は23.5N/mm<sup>2</sup>であり、先行原子力発電所における審査実績（20.6、23.5）と同等の値となっている。</p> <p>・設計基準強度23.5N/mm<sup>2</sup>の鉄筋コンクリートに対するPHbのせん断補強効果については、添付資料2の4.③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により、その有効性を確認した。</p> <p>以上より、島根2号炉取水槽（スクリーン室）のPHb適用部材に対し、コンクリート設計基準強度の観点について適用性を有すると判断した。</p>				

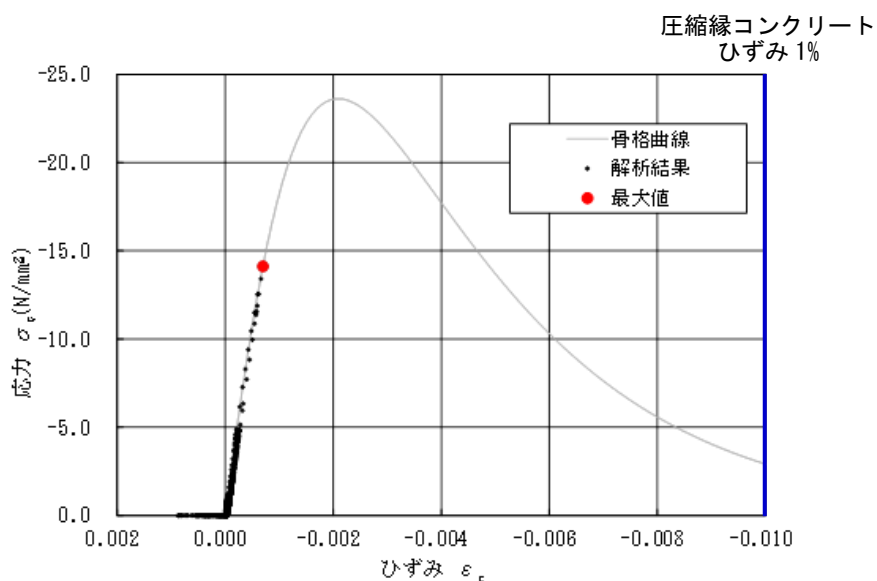
### 1. 応力状態（損傷状態）

部材の応力状態について、鉄筋コンクリートが健全であることを主鉄筋の引張応力-引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果により確認する。第13-4-4図に、取水槽（スクリーン室）隔壁における評価結果のうち、PHb適用部材の照査値が最も厳しくなる基準地震動 Ss-N1 の損傷程度を示す。隔壁において、主鉄筋の引張応力度の最大値は鉄筋の降伏強度を下回ることから、コンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全であるといえる。なお、取水槽の圧縮縁コンクリートひずみは1%を大きく下回る 0.07%程度であり、かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生せず、健全であることを確認した。また、添付資料2「解析によるせん断補強効果の確認について」で確認したとおり、材料非線形解析における弾性範囲内の挙動においても特異なひび割れや変形は発生していないことを確認した。



第13-4-4(1)図 取水槽の損傷図

(主鉄筋の引張応力-引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果)



第13-4-4(2)図 取水槽の損傷図

(コンクリートの圧縮応力-圧縮ひずみ関係の骨格曲線と解析結果)

#### m. 変形量

変形量については、先行サイトと同様、取水槽の変形量が適用確認実験の変形量を超えないことを確認する。適用確認実験における層間変形角は0.4%程度以上であるが、取水槽においては最大でも層間変形角0.42%であり、適用確認実験の最小変形量程度であることを確認した。なお、適用実験における層間変形角は、実験において発生している変位量及びせん断スパン比から算出した。

#### n. 使用環境

島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物におけるPHb工法による耐震補強では、先行サイトと同様、気中及び水中の部材に対してPHb工法を適用する。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、「4.6 施工実績・研究事例等の確認」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。



#### 4.6 施工実績・研究事例等の確認

##### (1) 施工実績の整理

PHb の施工実績としては、2018 年 4 月 1 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(第 13-4-4 表参照)。

第 13-4-4 表 PHb の施工実績



PHb の施工実績を部材厚、鉄筋径毎に整理する。部材厚毎に整理した結果を第 13-4-5 表に、鉄筋径毎に整理した結果を第 13-4-6 表に、使用環境毎に整理した表を第 13-4-7 表に示す。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～D22 の鉄筋を用いている場合は D13, 16, 19, 22 の全てにカウント)。水中における施工実績のうち、鹿島共同発電所の取水路においては、海水通水部における実績として挙げられる。今回島根原子力発電所 2 号炉の構造物に採用する項目についてハッチングしている。表に示す通り、十分に実績のある範囲にあることが確認できる。

また、島根原子力発電所 2 号炉建設時期以前に施工された構造物に対しての施工実績があることを確認している。先にも述べた通り、後施工せん断補強鉄筋工法は、1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計された構造物に対してせん断補強を行うことを想定した工法である。

なお、島根原子力発電所 2 号炉については高経年化技術評価を行い、健全性を確認している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13-4-5(1)表 PHb の施工実績 (部材厚) (1/2)

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

第 13-4-5(2)表 PHb の施工実績 (部材厚)  
(上記実績のうち横向き施工) (2/2)

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

第 13-4-6 表 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

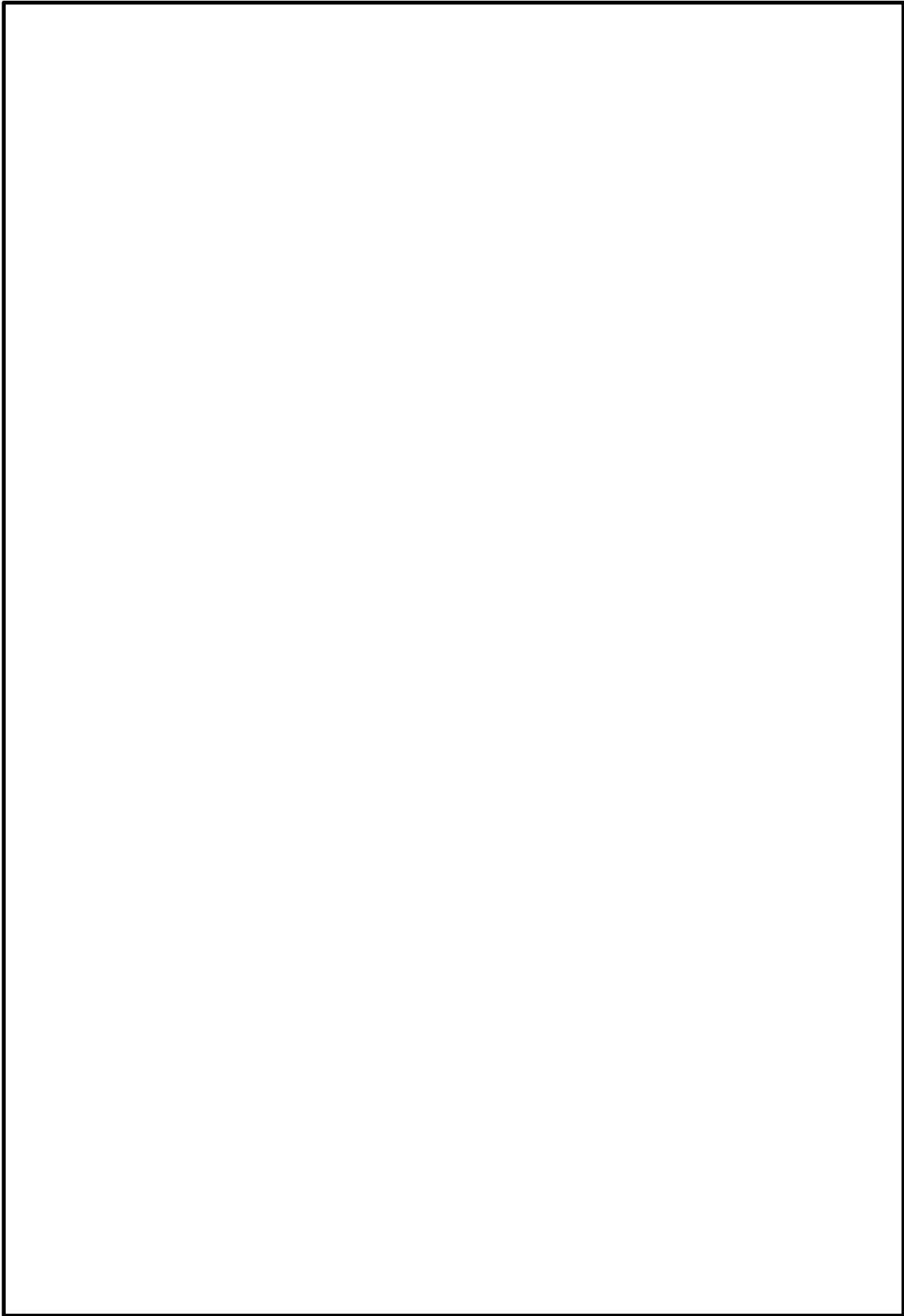
第 13-4-7 表 PHb の施工実績 (使用環境)

施工場所	件数
気中	48
水中	694

## (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もしくは施工中であった実績を抽出した。

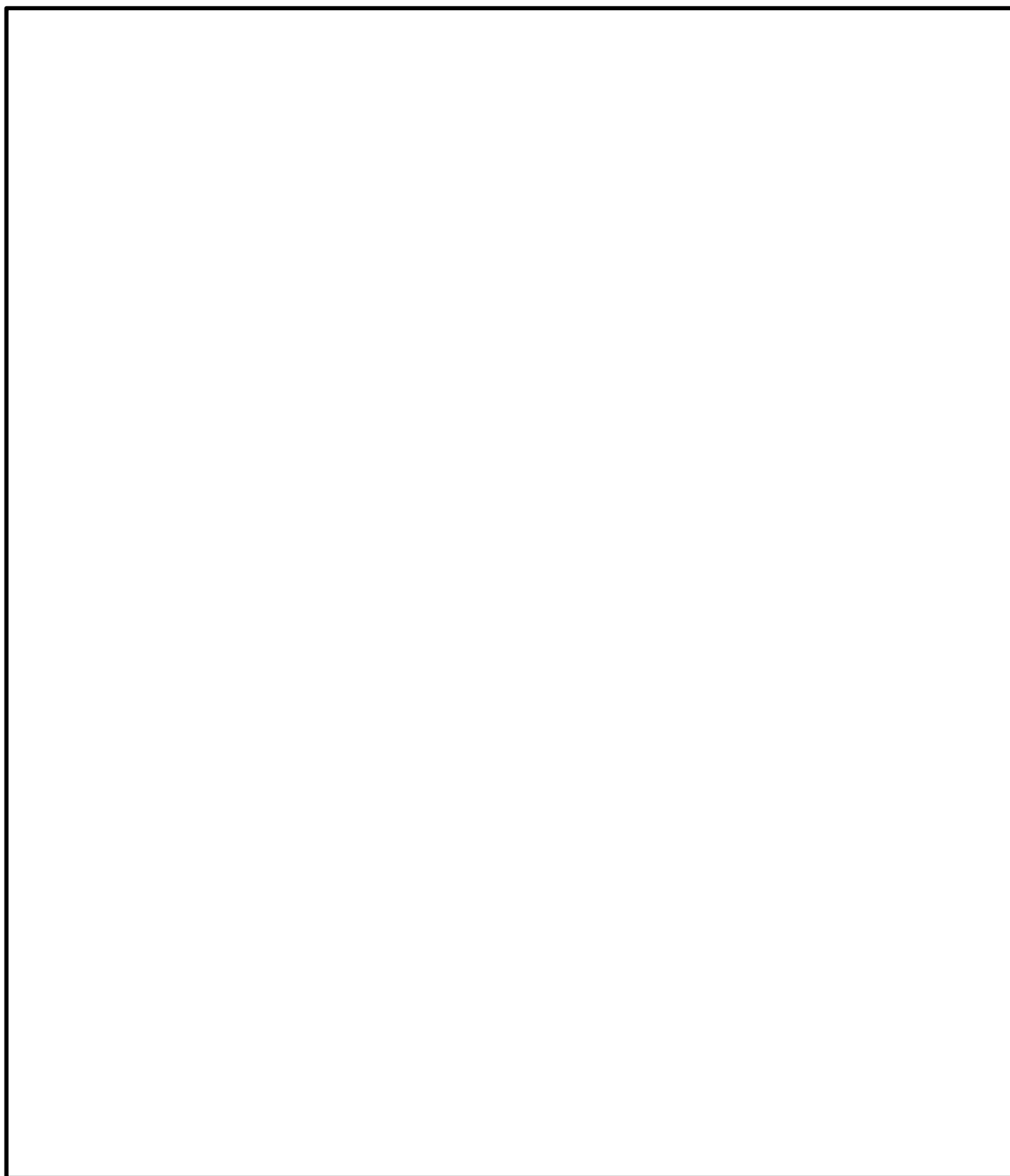
東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において K-NET または KIK-NET で観測された加速度及び PHb を施工した箇所の位置関係を第 13-4-5 図及び第 13-4-6 図に示す。東北地方太平洋沖地震においては、最大震度 6 強、熊本地震においては、最大震度 6 弱の地震を受けた事例があることを確認した。PHb 工法研究会に確認したところ、いずれの地点においても、現時点では、被害・不具合が発生したという報告はない。



第 13-4-5 図 東北地方太平洋沖地震の強震域にある施工実績

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4 条-別紙 13-42



第 13-4-6 図 熊本地震の強震域にある施工実績

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4 条一別紙 13-43

### (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ものによる。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。構造形式等の詳細については、「(5)後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例」に記載する。

#### ※参考文献

岡崎大宜：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

### (4) 後施工せん断補強鉄筋工法の比較

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鉄筋工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強鉄筋工法の比較結果を第 13-4-8 表に示す。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概ねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

第13-4-4-8(1)表 後施工せん断補強鉄筋工法の比較 (1/2)

--

※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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第13-4-4-8(2)表 後施工せん断補強鉄筋工法の比較 (2/2)

--

※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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



#### (5) 後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例

後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について、目的、試験体諸元等を整理し、島根原子力発電所2号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

##### ① コンクリート構造物の後（あと）施工せん断補強技術

###### ・目的

挿入された鉄筋やグラウトが既存のコンクリートと一体化し、挿入鉄筋の定着長を考慮したせん断鉄筋の補強効果により、所要の地下壁構造のせん断耐力が得られることを確認する。

###### ・試験体諸元

部材厚：685mm

せん断補強鉄筋径：D22

荷重条件：正負交番載荷

###### ・特記事項

実験により得られたせん断耐力は、有効係数を用いて算出される設計せん断耐力以上であることはもちろん、標準フック筋での補強に比べ、そんな色のないせん断補強効果が得られていることを示している。

###### ・影響確認

島根原子力発電所2号炉では試験例として記載されている PHb 工法を採用している。

## 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）

- ・ 目的

RMA 工法の概要及び性能確認実験，設計方法を示す。

- ・ 試験体諸元

部材厚：600mm（せん断スパン比  $a/d$ =約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D19（SD345）

荷重条件：正負交番載荷

- ・ 特記事項

定着性能試験の結果，定着長が 4D 以上で SD345 の規格降伏強度相当の定着力を確保できる。

宮城県沿岸地域で採用された RMA 工法による補強構造物は，東日本大震災においても損傷がなかった

- ・ 影響確認

PHb も同様の定着性能試験を実施し，定着長を設定している。

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

・目的

既存構造物であるボックスカルバートやU型擁壁などの連続壁に対して、異形鉄筋を埋込むことでせん断補強部材とする方法を提案し、補強方法の有効性を確認することを目的として、はり供試体を用いたせん断実験を行った。

・試験体諸元

部材厚：460mm（せん断スパン比  $a/d$ =約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D10（SD295）

荷重条件：単調載荷

・特記事項

実験結果より後施工は先施工と同等のせん断耐力を有することを確認した。

・影響確認

島根原子力発電所2号炉のせん断補強においては、建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値 0.9）を用いて低減したせん断耐力を算出し、保守的な設計をしている。

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

・目的、概要

広島空港の基本施設直下を通る地下構造物（用倉トンネル）において、レベル 2 地震動に対してせん断耐力が不足していた。用倉トンネルはアーチカルバートの上に 20m 弱の盛土を行った構造物であるため、この盛土部分とアーチカルバートを対象に耐震対策が必要な範囲と耐震補強工法の選定・検討を行い、RMA 工法で現地施工を行った。

・構造体諸元

構造形式：アーチカルバート

補強対象部位：側壁

部材厚：1600mm

・特記事項

重要施設に対して後施工型せん断補強工法（RMA 工法）による耐震補強を実施した。

・影響確認

レベル 2 地震動を対象とした重要構造物かつ島根原子力発電所 2 号炉取水槽の鉛直部材厚さ（隔壁：1200mm）相当の構造物に対して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

##### ・目的, 概要

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い, せん断スパンが正載荷・負載荷で異なることを考慮したせん断耐力算定方法を提案した。また, 前施工補強と後施工補強との耐力比較, ならびに後施工せん断補強鉄筋の埋込長の違いによる耐力比較を行った。

##### ・試験体諸元

部材厚：側壁 460mm, 底版 800mm (せん断スパン比 正側

a/d=約 2.25, 負側 a/d=約 3.25)

せん断補強鉄筋径：D10 (SD295)

荷重条件：正負交番載荷

##### ・特記事項

後施工によるせん断補強の場合, 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た。

##### ・影響確認

実験で用いた補強鉄筋は端部を 45° にカットした直鉄筋であり, 端部に定着プレートを有する PHb よりもせん断耐力が小さくなる。PHb では, 実験により低減係数に相当する有効係数を設定し, せん断耐力を算定している。

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

・目的, 概要

せん断補強鉄筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を検討することを目的として, せん断補強鉄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た。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した。

・試験体諸元

部材厚 : 350mm (せん断スパン比  $a/d$  = 約 3.2)

せん断補強鉄筋径 : D6

荷重条件 : 単調載荷

・特記事項

定着不良部から鋼材径の 10 倍程度を鋼材無効区間として要素内鉄筋比を等価に規定すれば, 2 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。

・影響確認

部材厚の検討において, 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

・目的，概要

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について報告する。充填材の温度と強度の関係を把握するための試験施工を実施した。

・試験体諸元

350mm×350mm×650mm

・特記事項

充填材料が 0℃以下の履歴を受けた場合では，強度発現が低下することが確認された。

・影響確認

充填材料が 0℃以下とならないように，施工上の管理基準（5℃以上）を設けて適切に施工する。

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

奥平幸男・岩下正美・小林亨・清宮理

・目的，概要

東京都港湾局が同工法における補強効果を確認するために行った室内せん断実験の概要と結果，設計条件と施工基準設定の考え方および適用工事に関する施工結果について考察。

・試験体諸元

部材厚:460mm（せん断スパン比  $a/d=2.25$ ）

・特記事項

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 を乗じる。

・影響確認

低減係数 0.75 は 2002 年の「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」でも提案されているが，その後 PHb 工法等の後施工せん断補強工法について第三者機関による審査証明が行われており，その中では施工性についても審査対象となっており，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と考えられる。なお，後述の「4.7 PHb の施工上の確認」にて施工精度の向上に向けた方策を記載する。

後施工せん断補強鉄筋に関する各研究事例を踏まえて，島根原子力発電所 2 号炉の設計，施工への反映事項を下記に示す。

- ・建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値 0.9）を用いて，PHb のせん断耐力を算定する。
- ・充填材の施工管理基準（5℃以上）を設ける。
- ・施工上予測される不具合の考慮については，施工精度の向上方策を講じるとともに，設計上の配慮についても検討する。



#### 4.7 PHb の施工上の確認

PHb 工法によるせん断補強にあたっては、既設鉄筋配置のずれ等施工のばらつきにより計画通り施工できなかつた場合、期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そこで施工上せん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある施工のばらつきに関する項目を抽出し、適切な施工管理によりばらつきを生じさせない、もしくはせん断補強効果に大きな影響を及ぼさないことを確認する。

##### (1) 削孔角度

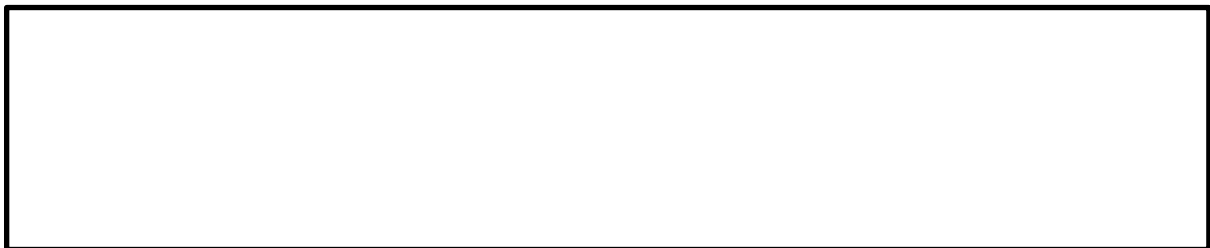
PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが、削孔角度に誤差が生じた場合、PHb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そこで施工用架台にドリルを設置し、ドリルの鉛直方向、水平方向が削孔面に対して垂直となるようスラントルール、金尺等で確認し削孔する。第 13-4-7 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直・水平の確認状況を示す。以上より、削孔時に施工用架台を使用することで削孔角度のばらつきは生じない。

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およびせん断補強筋「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（第 13-4-8 図）。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た。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を第 13-4-9 表に示す。ここで、削孔表面から試験体 I 裏まで 1200mm であり、島根原子力発電所 2 号炉取水槽の部材厚である隔壁 1200mm となることから、第 13-4-9 表の試験体 I 裏の結果を参考にする。試験体 I 裏では削孔誤差は最大 15mm となり、削孔角度誤差を換算すると約  $0.7^\circ$  となり、十分精度あることが示されている。

さらに、論文「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」において、削孔角度誤差について記載されているが、そこではドリルによる削孔時に 2 方向より定規を添えて初期削孔を行い、途中 2～3 回確認することで施工用架台を使用せず誤差  $2^\circ$  以内を確保している（第 13-4-9 図）。今回は施工用架台を使用し、より精度良く削孔することが可能である。

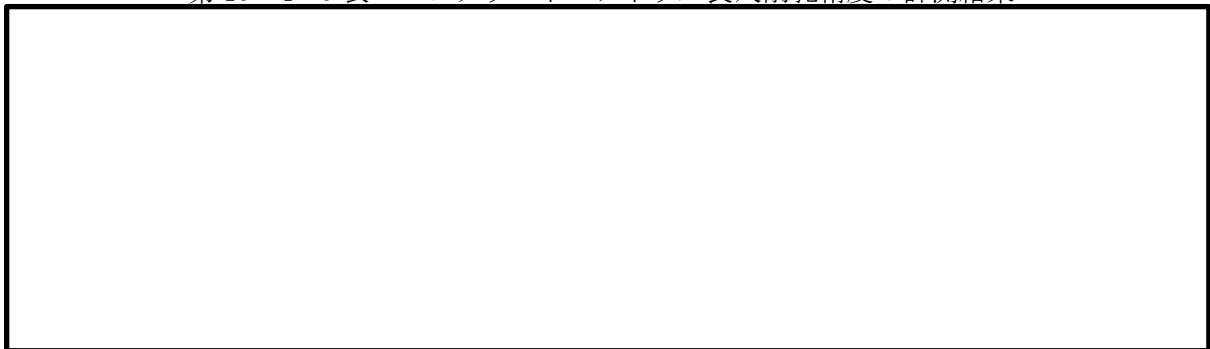


第 13-4-7 図 削孔準備工



第 13-4-8 図 試験概要図

第 13-4-9 表 コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果



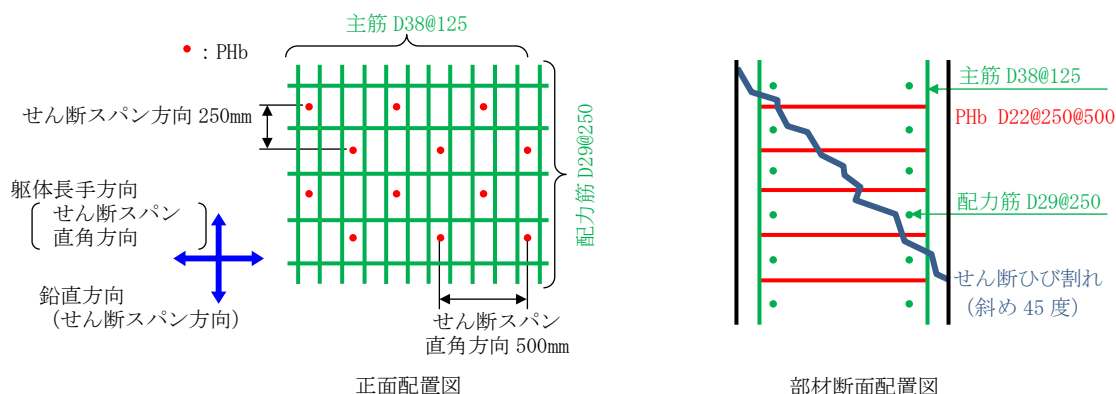
第 13-4-9 図 レッグドリルによる削孔

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## (2) 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 を計画通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補強鉄筋量を確保する。ただし、再削孔し PHb を配置する際は「4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す建設技術審査証明報告書に記載の構造細目を満足するものとする。なお、第 13-4-10 図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。なお、孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際、削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され、再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで、孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし、再削孔時の精度向上を図る。

以上より、削孔位置にばらつきが生じても必要鉄筋量を確保するためせん断補強効果に影響を及ぼさない。



第 13-4-10 図 取水槽のせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

## (3) 定着効果

充填材の定着効果については、建設技術審査証明報告書にて充填確認試験を実施しており、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填され、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。

(1)～(3)に示した通り、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のばらつきは生じないと考えられる。しかし、現時点では後施工による施工のばらつき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、施工のばらつきによる影響が生じる可能性を完全に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ばらつきに対する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。

その他施工上の留意点の確認等については、添付資料 3「施工管理要領書（案）（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法）」にて実施する。

#### 4.8 PHb の適用性確認結果

「4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定」で設定した補強仕様が「4.1 方針」に沿って、PHb の島根原子力発電所 2 号炉の屋外重要土木構造物の耐震補強における適用性を検討した結果、PHb を採用し、建設技術審査証明報告書のとおりせん断補強効果を期待できることを確認した。決定した補強仕様を第 13-4-11 図に示す。



第 13-4-11 図 補強仕様

#### 添付資料

(添付資料 1) 建設技術審査証明書

(添付資料 2) 解析によるせん断補強効果の確認について

(添付資料 3) 「施工管理要領書 (案) (取水槽耐震補強工事 (ポストヘッドバー工法))」

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



## 建設技術審査証明書

建技審証第 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施工できない供用中の既設構造物においても、構造物の片側からの施工が可能で、かつ、せん断耐力の補強に限定してせん断余裕度を向上させることで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降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径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」円形プレート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。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の 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。
  - 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率が確保されること。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、大型機材を必要とせず、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。

平成 17 年	12 月 21 日	
平成 22 年	12 月 21 日	内容変更・更新 (依頼者変更)
平成 23 年	8 月 22 日	内容変更
平成 27 年	12 月 21 日	更新
平成 28 年	10 月 17 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 西川 和廣

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) 力学的性能
    - 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降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径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」円形プレート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。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の 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率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、補強前のせん断補強鉄筋と「Post-Head-bar」を合わせた実配型に対し、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、大型機材を必要とせず、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、適正な機材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) 地震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約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) 環、水門、橋台や橋脚等の既設の半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、曲げ破壊モードにある構造物の変形性能の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、変形の応答値は変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限を「Post-Head-bar」の矩形プレート側で 0.30%、円形プレート側で 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) 杭で支持される橋脚のワーキ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. 審査証明の詳細: 建設技術審査証明報告書
6. 審査証明の有効期限: 平成 32 年 12 月 20 日
7. 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



## 添付資料 2

### 解析によるせん断補強効果の確認について

#### 1. せん断補強効果の確認

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。建設技術審査証明報告書では、実験を上回る部材厚については、理論式により求められる有効係数 $\beta_{aw}$ を実験の部材厚で得られた値である0.9を上限として用いることで保守的な設計としている。島根原子力発電所2号炉取水槽の部材厚は、実験で用いた部材と比べて大きいため、実験を上回る部材厚でもPHbの補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また、部材厚以外にもせん断スパン比、主鉄筋比、コンクリート設計基準強度、せん断ひび割れ抑制効果及び荷重載荷方法が島根原子力発電所2号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって、これらの項目についても実構造物諸元相当の解析により、PHb工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを解析により補足する。

##### 1.1 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、島根原子力発電所2号炉取水槽のPHbの適用性をステップ①～③により確認する（第1-1図）。

なお、比較のために、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以下の各ケースで実施することとする。

##### ①PHbの解析モデル上の考慮方法について検証

材料非線形解析を実施するにあたり、PHbの解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。そこで、建設技術審査証明報告書における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においてせん断耐力を比較することにより、解析モデルの妥当性を検証する。

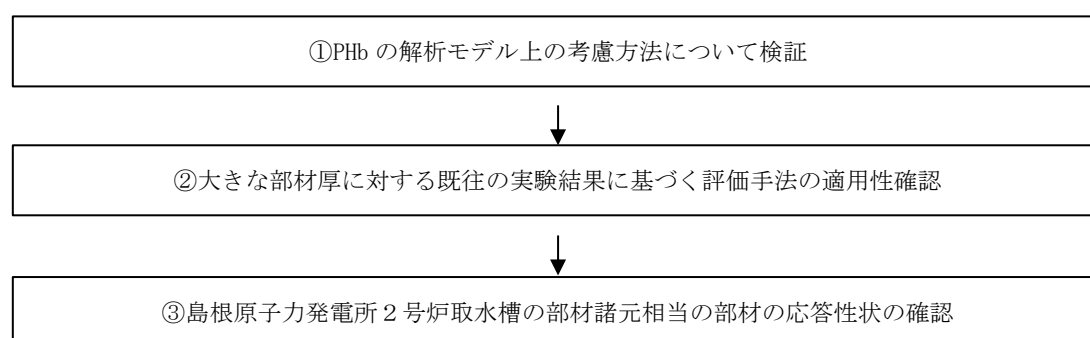
なお、先施工せん断補強鉄筋はフックを有し鉄筋に定着をとっているが、フックを有しないせん断補強鉄筋であるPHbはコンクリートに定着をとっていることから、その違いをモデル上で考慮する必要がある。そのため「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 2, 2004 せん断補強筋の定着不良がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に、供試体をモデル化する際に要素内鉄筋比を0とする区間を設けることとし、実験への再現性が高い区間設定を基に②以降の検討を実施する。

## ②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価手法の適用性の確認

建設技術審査証明報告書の各種実験では、部材厚の大きい供試体で実験を行っていないため、有効係数 $\beta_{aw}$ の上限値を0.9としている。そこで、部材厚が大きい対象に対しても適用可能であることを示すため、島根原子力発電所2号炉取水槽を想定した大きな部材厚を参考に、せん断スパン比がステップ①と同等となる部材寸法に対して材料非線形解析を実施する。なお、解析モデルのせん断スパン比は①と同様（相似形）とする。材料非線形解析により既往の実験結果の再現解析と比較して傾向を把握し、大きな部材厚に対してもPHbを適用できることを確認する。

## ③島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

①、②を確認の上、島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し、PHbの適用性を確認する。適用性を確認する際には、部材の応答性状により島根原子力発電所2号炉取水槽の部材諸元相当でも変形量、ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。



第 1-1 図 島根原子力発電所2号炉取水槽スクリーン室のPHbの適用性確認フロー



## 2. ①の解析内容

材料非線形解析にて用いる RC 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 設計編 (土木学会 2012)」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。

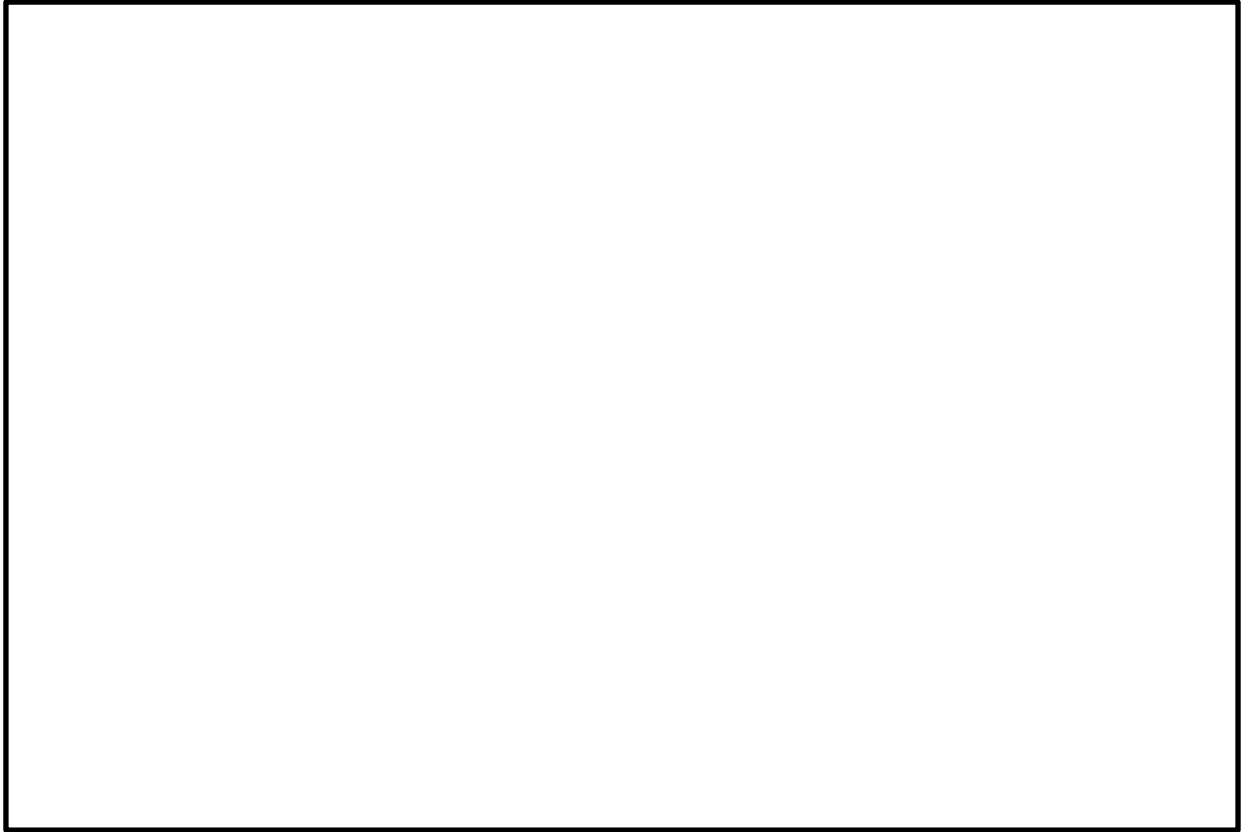
材料非線形解析について用いる解析コードは、上記の RC の構成則を有する解析コードの 1 つとして「UC-win/WCOMD ver2.01」とする。

まず、PHb の考慮の仕方を検討するための予備解析を実施した後、その考慮方法を用いて CASE5 の再現解析を実施する。

### 2.1 モデル化について

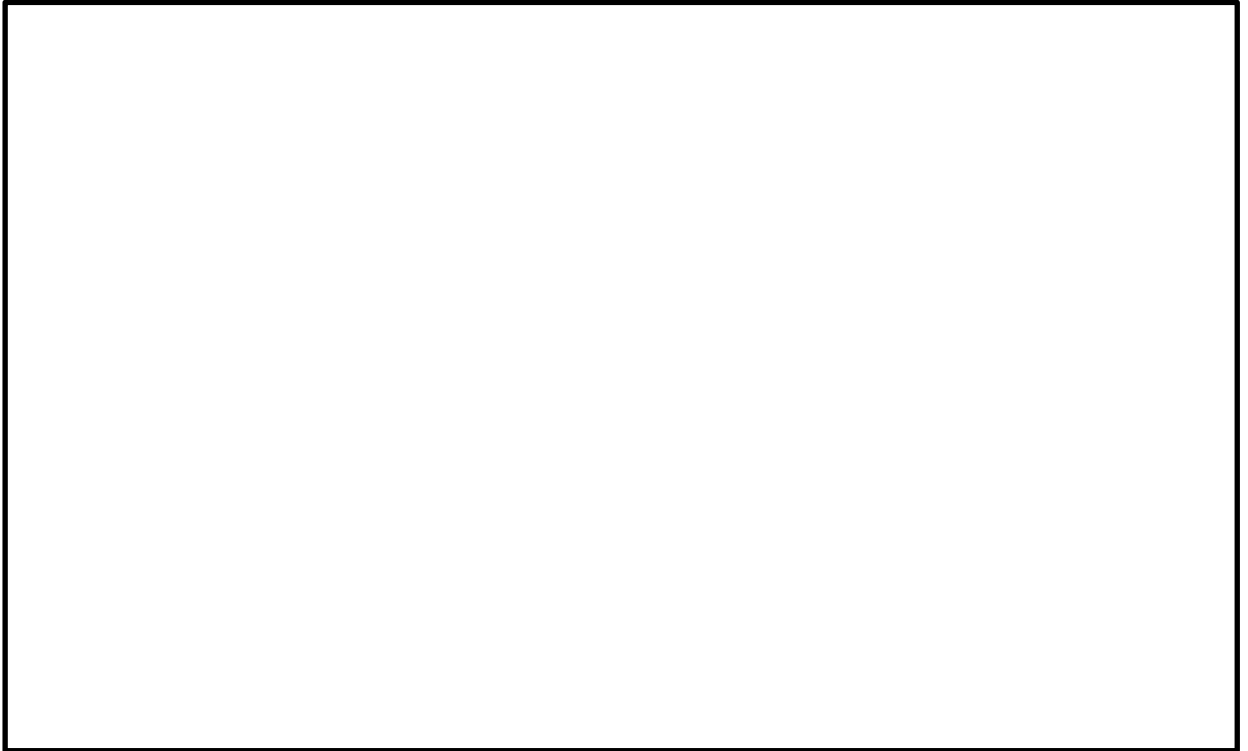
材料非線形解析では、建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体 (CASE5) をモデル化する。第 2-1 図にモデル化の対象とする試験体 (CASE5) を、第 2-2 図にせん断耐力の向上性能確認試験の加力要領を示す。なお、CASE5 は PHb 先端位置が主鉄筋手前であり、施工時の条件と一致している。また、第 2-1 表に示すとおり、CASE5 は破壊形態がせん断破壊先行であり、適切にせん断耐力を評価できること、かつ①の再現解析においては実験値と理論値が整合的である必要があるため、その条件を満たす CASE5 を選定した。

構造部材をモデル化する際は、平面応力要素にてモデル化する。構造部材のモデル化にあたっては、第 2-3 図に示す通り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。主筋領域については付着領域を考慮して芯かぶりの厚さを基準として設定する。



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

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

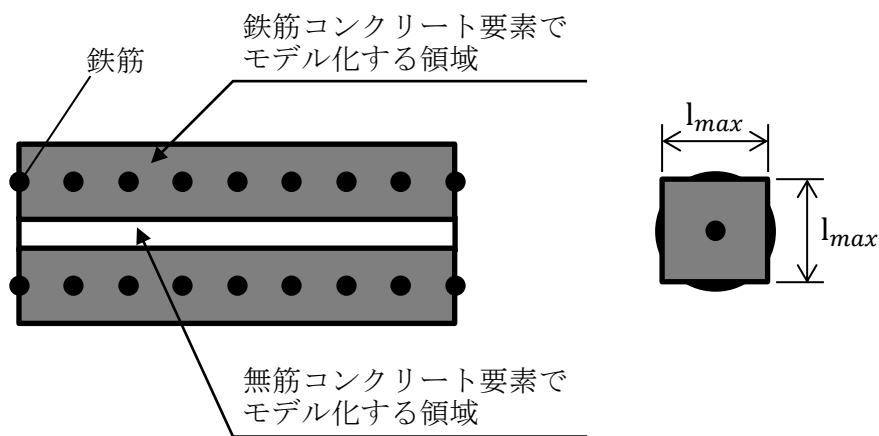


第 2-2 図 せん断耐力の向上性能確認試験の加力要領（抜粋）  
 （建設技術審査証明報告書より抜粋）

第 2-1 表 各実験ケースの破壊形態

	シリーズ 1			シリーズ 2			シリーズ 3					シリーズ 4
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE3-1	CASE3-2	CASE3-3	CASE3-4	CASE3-5	CASE4-1
破壊形態	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{f_y / f_t}$$

ここで、 $l_{max}$  : 鉄筋一本あたりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

$D_b$  : 鉄筋の直径

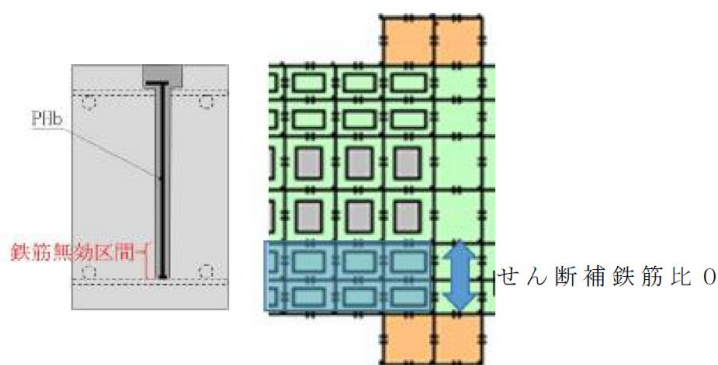
$f_y$  : 鉄筋の降伏強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度

### 第 2-3 図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

PHb を適切にモデル化するため、「コンクリート工学年次論文集 Vol. 26, No. 2, 2004 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」を参考に、PHb 先端の領域では、付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ものとして PHb のモデル化を検討する。具体的には、該当する部分のせん断補強鉄筋比を 0 としてモデル化を実施する。モデル化のイメージを第 2-4 図に示す。以上の考え方をベースに PHb のモデル化を実施する際は以下のケースを実施して PHb のモデル化手法を検討する。

- PHb1 : 主鉄筋領域 (芯かぶりの 2 倍分) に相当する厚さ (PHb 先端から 4.4D) のせん断補強鉄筋比を 0 とするケース
- PHb2: 上記のモデルをベースに PHb の必要定着長である 5D 分の厚さのせん断補強鉄筋比を 0 とするケース



第 2-4 図 PHb のモデル化イメージ

上記の予備解析の結果，実験値のせん断耐力の再現性が高い条件を用いて，以下のケースを実施する。

- ・ケース①-A：先施工によるせん断補強鉄筋を想定してモデル化するケース
- ・ケース①-B：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース  
(単調載荷) (PHb1 のケースと同じ)
- ・ケース①-C：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース  
(交番載荷)

なお，解析の入力データとなるコンクリートの材料特性および鉄筋の材料特性を第 2-2 表及び第 2-3 表に示す。

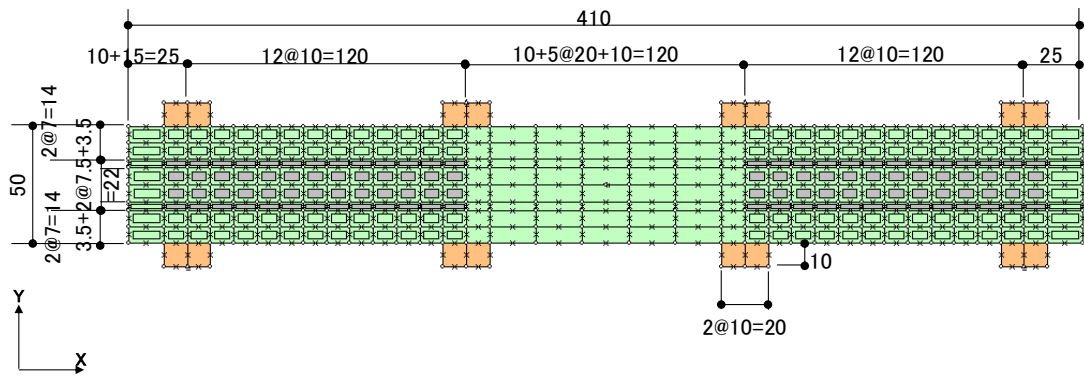
以上，条件により設定した解析モデル図を第 2-5 図に示す。

第 2-2 表 コンクリートの材料特性

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

第 2-3 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋およびせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm <sup>2</sup>
主鉄筋の降伏強度	999N/mm <sup>2</sup>
PHb 鉄筋の降伏強度	384N/mm <sup>2</sup>
その他鉄筋 (D16, D19) の降伏強度	345N/mm <sup>2</sup>



(単位 : cm)

第 2-5 図 解析モデル図

## 2.2 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、十分小さい値を漸次載荷する。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確認することとする。

## 2.3 破壊判定基準

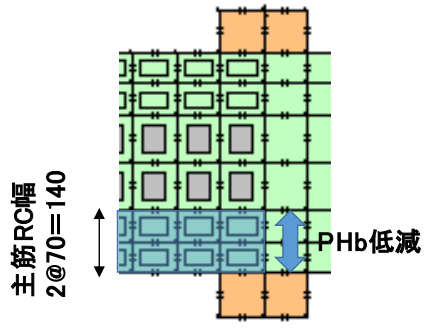
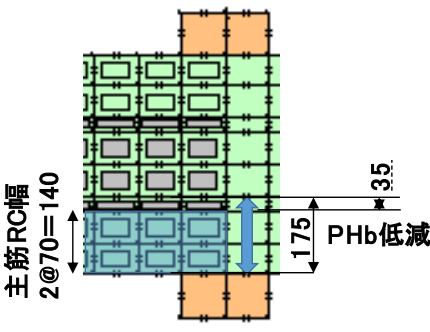
材料非線形解析における構造部材の破壊判定基準は、既往の研究事例に基づき圧縮ひずみ 1%、せん断ひずみ 2%、引張ひずみ 3%とする。(以下「1, 2, 3%破壊基準」という。)

## 2.4 PHb のモデル化の検討

PHb のモデル化検討の結果を第 2-4 表に示す。表に示す通り、実験で得られたせん断耐力 486kN に対し、PHb1 のケースでのせん断耐力は 477kN (実験値の 98%)、PHb2 のケースでのせん断耐力は 341kN (実験値の 70%) であった。

評価の結果、PHb1 のケースが実験値のせん断耐力を再現できており、PHb2 のケースでは、実験値のせん断耐力を再現できない結果となった。材料非線形解析のモデル化では、鉄筋の付着領域を考慮してモデル化を実施するため、PHb の鉄筋径の倍数に合わせて小さい無筋要素を挿入することが有意に働かない結果となった。したがって、PHb を材料非線形解析でモデル化する際は、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とする。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。

第 2-4 表 PHb の定着区間のモデル化

<p>PHb1</p>		<p>主筋領域 2 要素分 (PHb 先端から 4.4D 分) の鋼材比を 0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験値 (CASE5) : 486kN</li> <li>・ 1, 2, 3%破壊基準 : 477kN (実験値の 98%)</li> </ul>
<p>PHb2</p>		<p>PHb 先端から必要定着長である 5D 分の要素の鋼材比を 0 とするために無筋要素を挿入</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実験値 (CASE5) : 486kN</li> <li>・ 1, 2, 3%破壊基準 : 341kN (実験値の 70%)</li> </ul>

## 2.5 解析結果と実験結果の比較

材料非線形解析で得られる結果と建設技術審査証明報告書における実験値を比較して概ね整合的であることを確認する。

ケース①-A~①-Cの解析結果について第 2-6 図~第 2-8 図に、実験結果について第 2-9 図に示す。破壊基準に至るまでの最大荷重をせん断耐力とする。

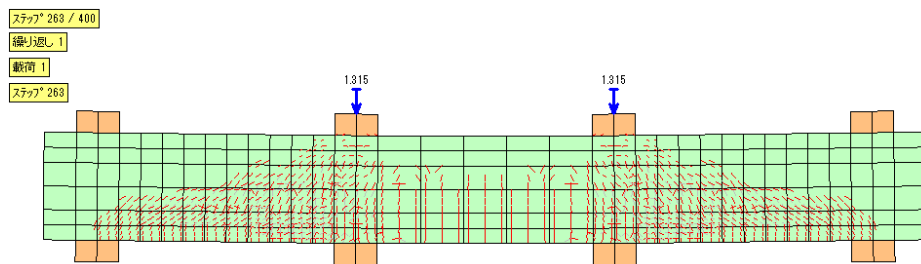
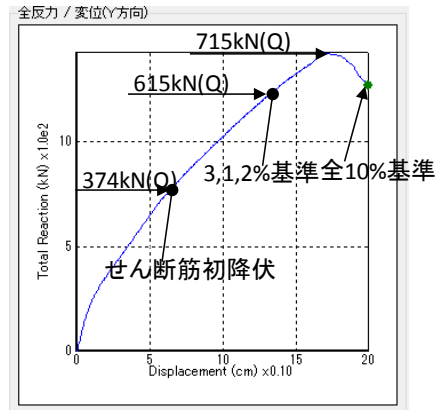
実験値 (CASE5 : 486kN) に対して、ケース①-Aは PHb の定着不良領域を設定していないため実験値に対して上回ったと考えられ、ケース①-B及びケース①-Cではせん断耐力は概ね実験を再現できている。また、ひび割れ状況については①-Aが部材全体にひび割れが分散しているのに対し、①-Bにおいては、若干ひび割れの分散性が低下しており、スパン中央側に寄った部位に発生している。これは、参考にした論文である「コンクリート工学年次論文集 Vol.26, No.2, 2004 せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」においても同様の傾向が確認できており、PHb の定着不良分を適切にモデル化できていると考えられ、応力の伝達状況も再現できていると考えられる。一方、荷重-変位図については、解析結果は実験よりも早い段階でピークに達しており、荷重については再現性が認められるものの、変位については十分には再現できなかった。

実験では正負交番荷重が行われており、再現解析においては载荷条件が模擬できることが望ましい。しかし、第 2-8 図で示すように荷重-変位曲線の再現が十分ではない現段階においては、正負交番を模した解析を実施することは必ずしも有意とは限らない。単調荷重でも荷重の再現性は確認されており、せん断耐力やひび割れの発生 (応力の伝達) 状況は良好に再現されている。なお、ケース①-

Cにおいては、破壊基準に達した時点で解析は終了しており、その後の繰返し載荷に対して剛性が低下して荷重－変位曲線の傾きが小さくなる現象までは確認できていない。

・ケース①－A

1, 2, 3%破壊基準までの最大荷重：615kN



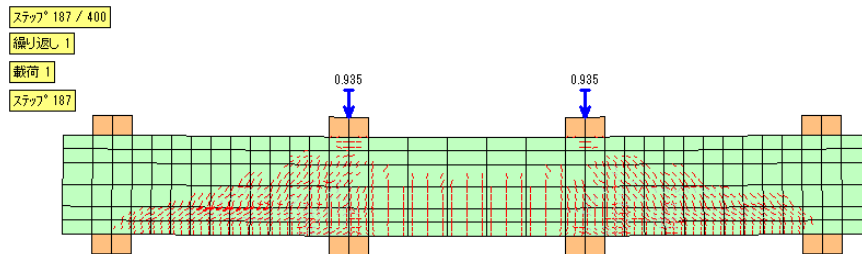
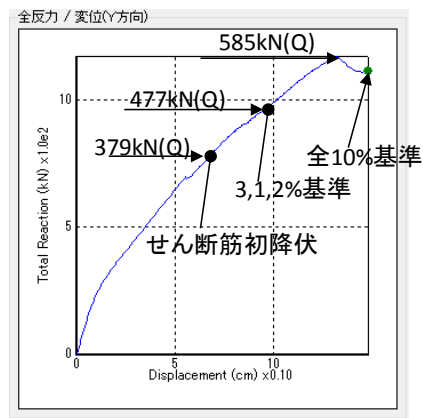
第 2-6 図 ケース①－A の荷重－変位関係とひび割れ状況



・ ケース①-B

1, 2, 3%破壊基準までの最大荷重：477kN（実験値の98%）

実験値（CASE5）：486kN

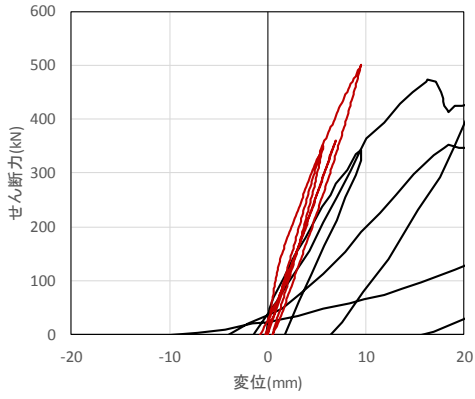
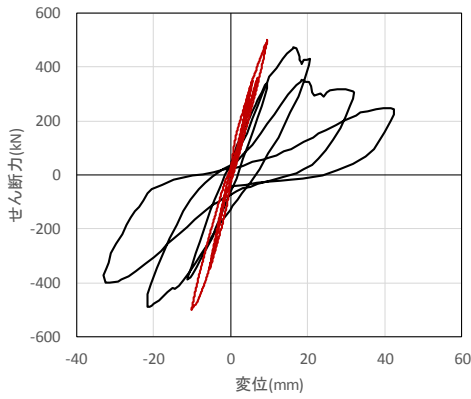
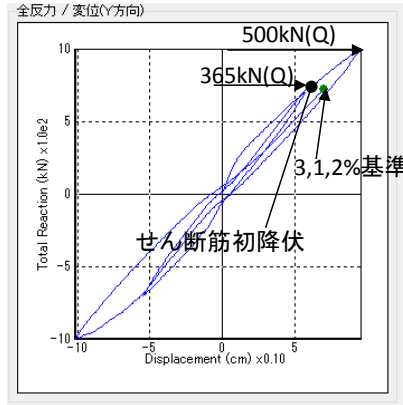


第 2-7 図 ケース①-B の荷重-変位関係とひび割れ状況

・ケース①-C

1, 2, 3%破壊基準までの最大荷重：500kN（実験値の 103%）

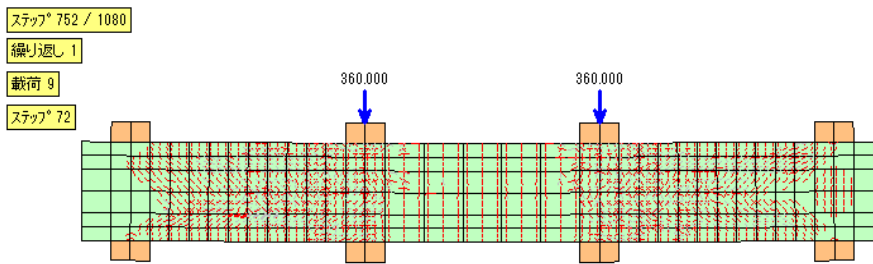
実験値（CASE5）：486kN



荷重変位図

荷重変位図（拡大図）

（赤：材料非線形解析 黒：実験値）



第 2-8 図 ケース①-C の荷重-変位関係とひび割れ状況

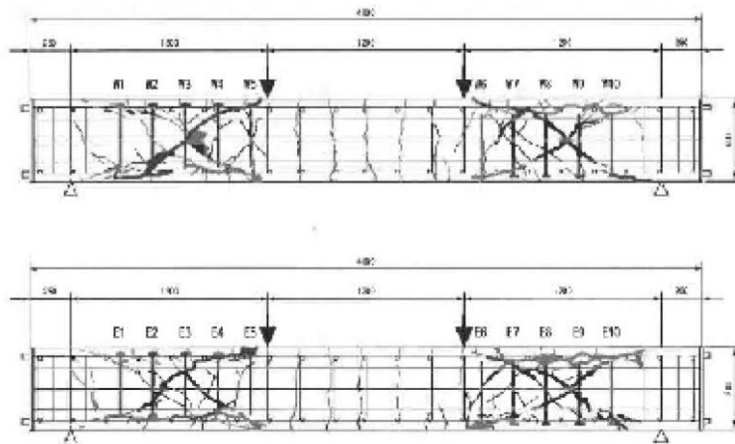
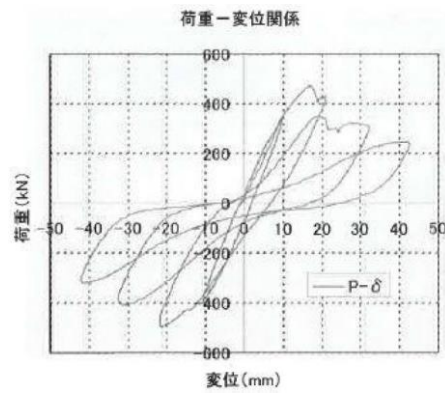


図-8.2 Post-Head-bar (2列) を後施工したはり試験体 (先端: 主鉄筋手前) の破壊状況 (CASE5)

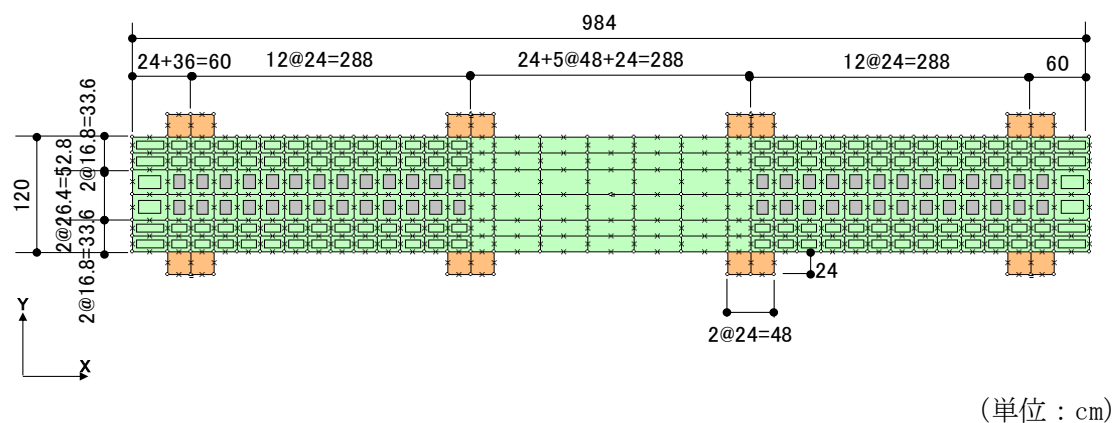
第 2-9 図 構造実験 (CASE5) の荷重-変位関係とひび割れ状況

### 3. ②の解析内容

#### 3.1 モデル化について

部材厚は島根原子力発電所2号炉取水槽の部材を参考に設定し、せん断スパン比 (a/d) が①と同等となるような部材寸法 (①の躯体の相似形) とする。配筋については、主鉄筋、せん断補強筋共に鉄筋比が一定となるように設定する。「2.1 モデル化について」に準じて設定する。なお、PHbの鉄筋無効区間は①で確認された主筋領域 (芯かぶりの2倍) を目安とする。また、材料物性については、構造実験と同一とする。

解析モデル図を第3-1図に示す。



第3-1図 解析モデル図

#### 3.2 荷重条件

「2.2 荷重条件」に準じて設定する。

#### 3.3 破壊判定基準

「2.3 破壊判定基準」に準じて設定する。

### 3.4 解析結果

在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とし、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とする。参考に交番載荷としたケースを②-Cとする。実施するケースを第 3-1 表に示す。それぞれの結果を第 3-2～4 図に示す。ケース②-Aのせん断耐力は 1335kN、ケース②-Bのせん断耐力は 1235kN であり、在来工法と PHb 工法のせん断耐力の比率は約 93%となった。ここで、ケース①-Aとケース①-Bから得られるせん断耐力の比率は約 78%であった。これは、建設技術審査証明報告書における  $\beta_{aw}$  の算出する際の理論と同様の傾向であり、部材厚が大きい部材程、PHb によるせん断補強効果が大きくなることが確認できた。ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており、在来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ①では PHb によるひび割れの分散性が低下したが、ステップ②においては、部材厚が大きくなることで PHb 端部定着の影響が小さくなったと考えられる。PHb によるせん断ひび割れ抑制効果についても在来工法と PHb 間で顕著な差は見られなかった。

また、ケース②-Cの交番載荷のケースにおけるせん断耐力は 1200kN であり、在来工法と PHb 工法の比率は約 90%となった。ひび割れ状況についても、部材全体にひび割れが分散しており、特異な応答は確認されなかった。

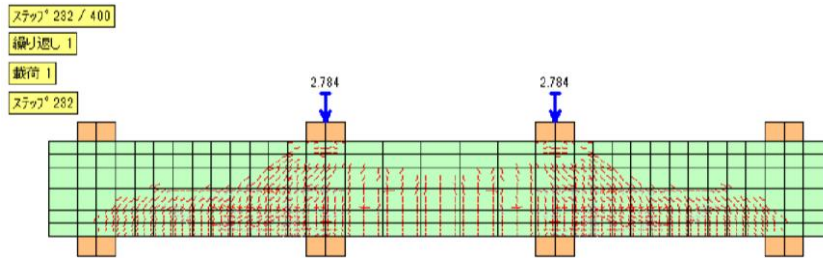
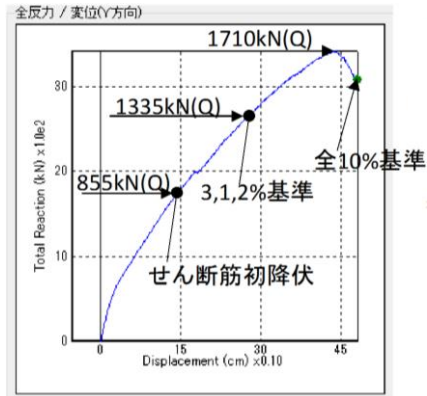
ステップ①、②の評価結果一覧を第 3-2 表に示す。また、ステップ②の解析結果を第 3-5～7 図に示す。

第 3-1 表 ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
②-A	単調載荷
②-B	単調載荷
②-C	交番載荷

・ケース②-A

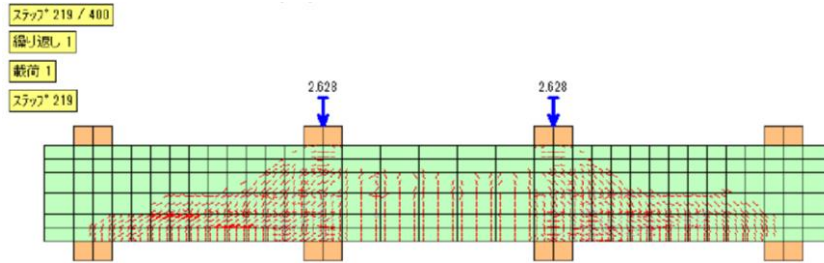
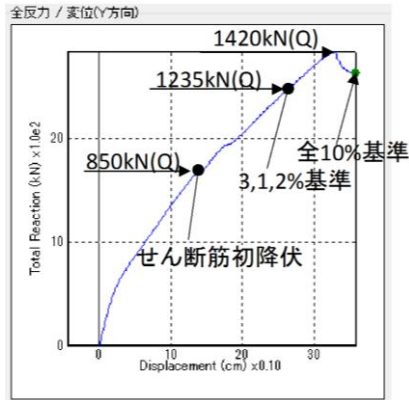
破壊基準時の最大荷重：1335kN



第 3-2 図 ケース②-A の荷重-変位関係とひび割れ状況

・ケース②-B

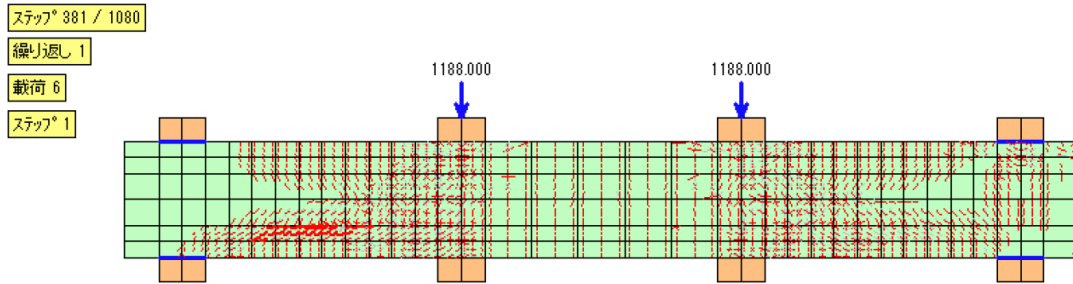
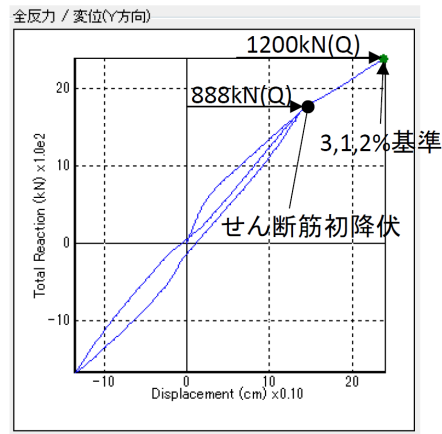
破壊基準時の最大荷重：1235kN



第 3-3 図 ケース②-B の荷重-変位関係とひび割れ状況

・ケース②-C

破壊基準時の最大荷重：1200kN

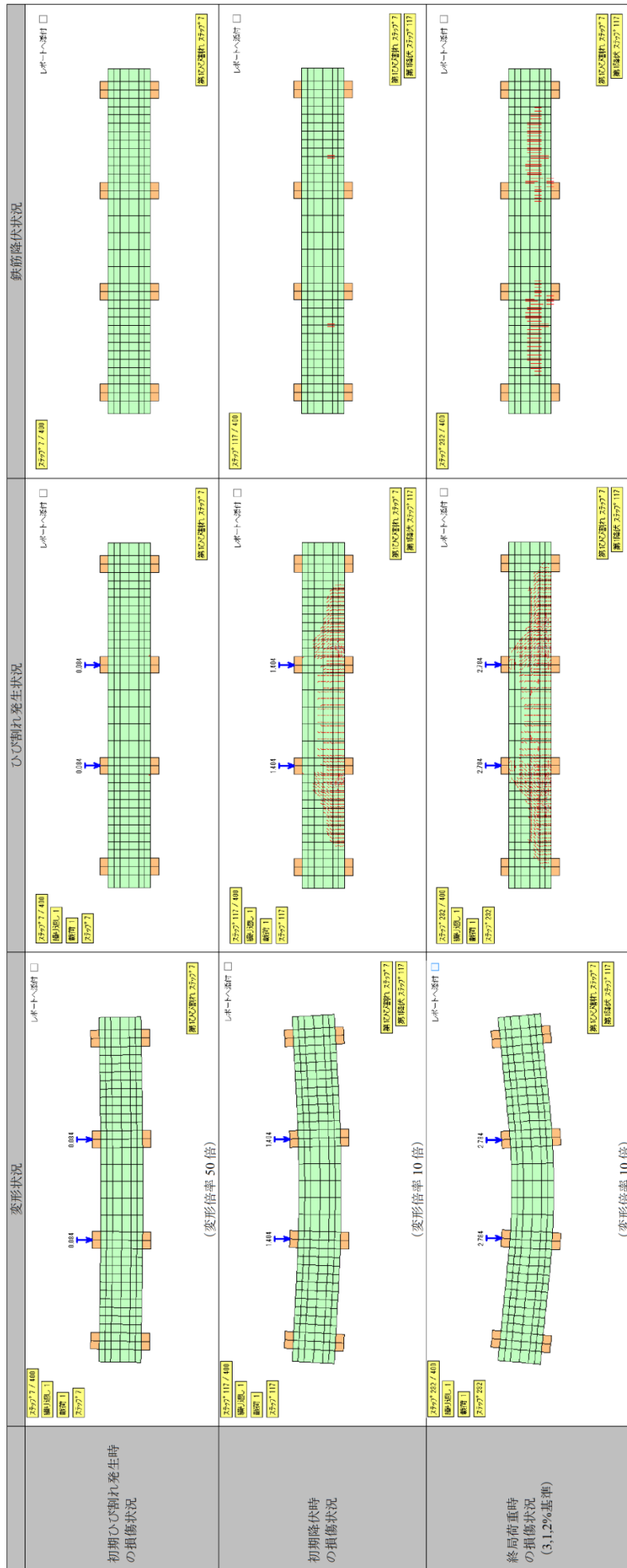


第 3-4 図 ケース②-C の荷重-変位関係とひび割れ状況

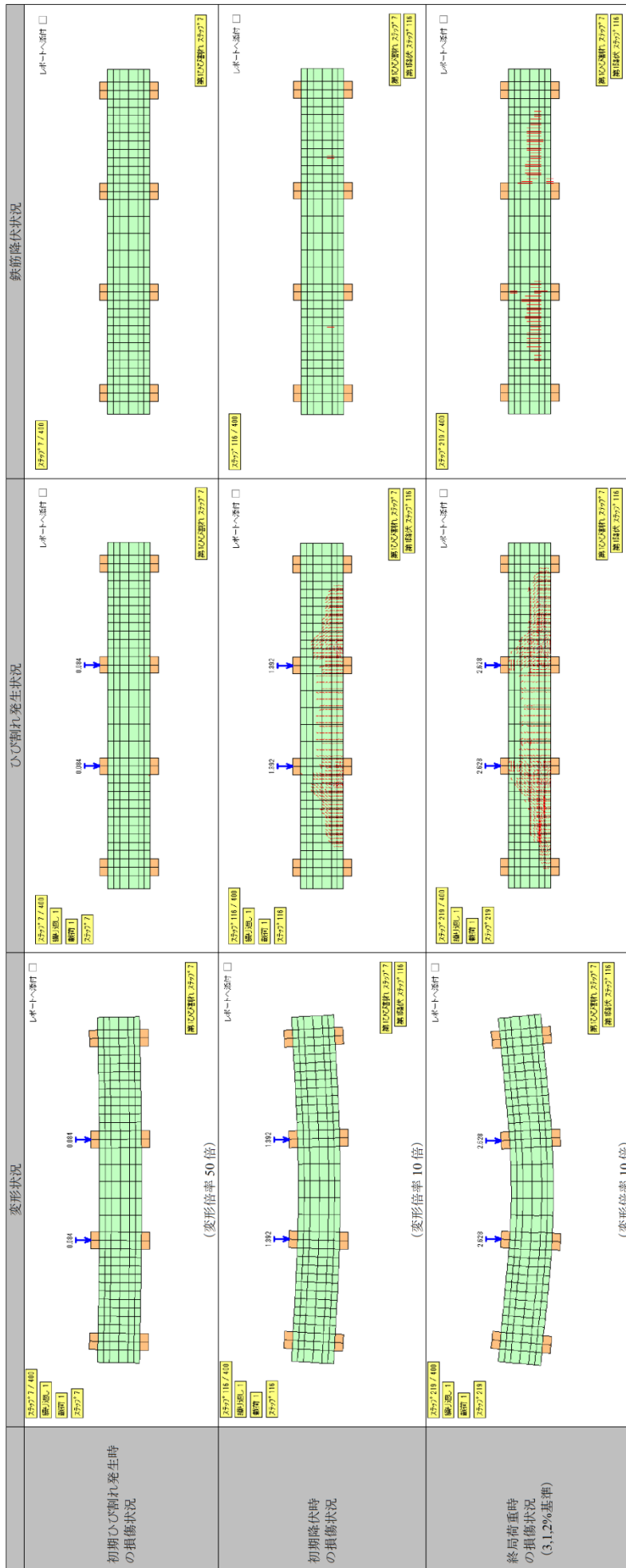
第 3-2 表 評価結果一覧

ケース	せん断耐力 (kN)	在来工法と PHb 工法の比率
①-A (在来工法)	615	—
①-B	477	0.78
①-C	500	0.81
②-A (在来工法)	1335	—
②-B	1235	0.93
②-C	1200	0.90

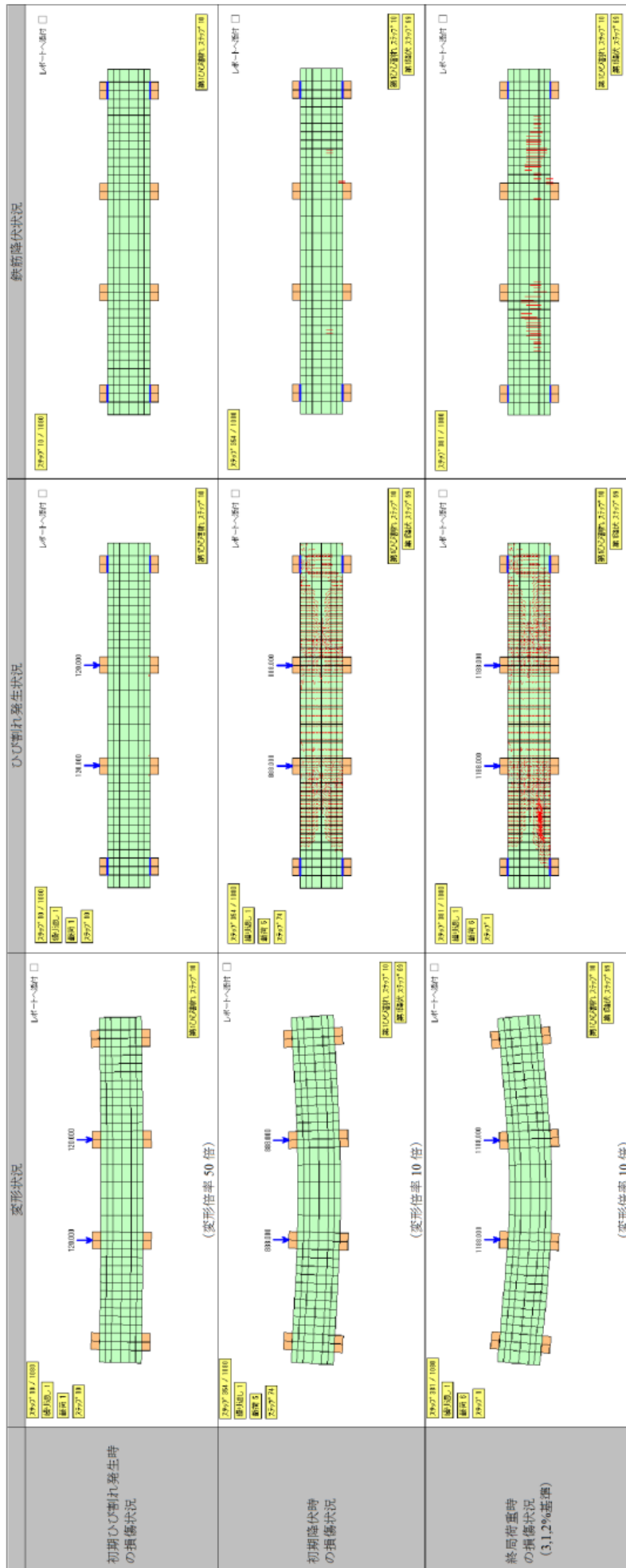




第 3-5 図 ケース②-A の解析結果



第 3-6 図 ケース②-B の解析結果



第 3-7 図 ケース②-C の解析結果

#### 4. ③の解析内容

##### 4.1 モデル化について

「2.1 モデル化について」に準じて設定する。なお、部材諸元は島根原子力発電所2号炉取水槽の隔壁とする。対象とする部位はせん断照査結果が最も厳しくなった隔壁③を対象とする。対象とする部材を第4-1図に示す。この部位に設置するPHbの径はD22である。



第4-1図 評価対象部材

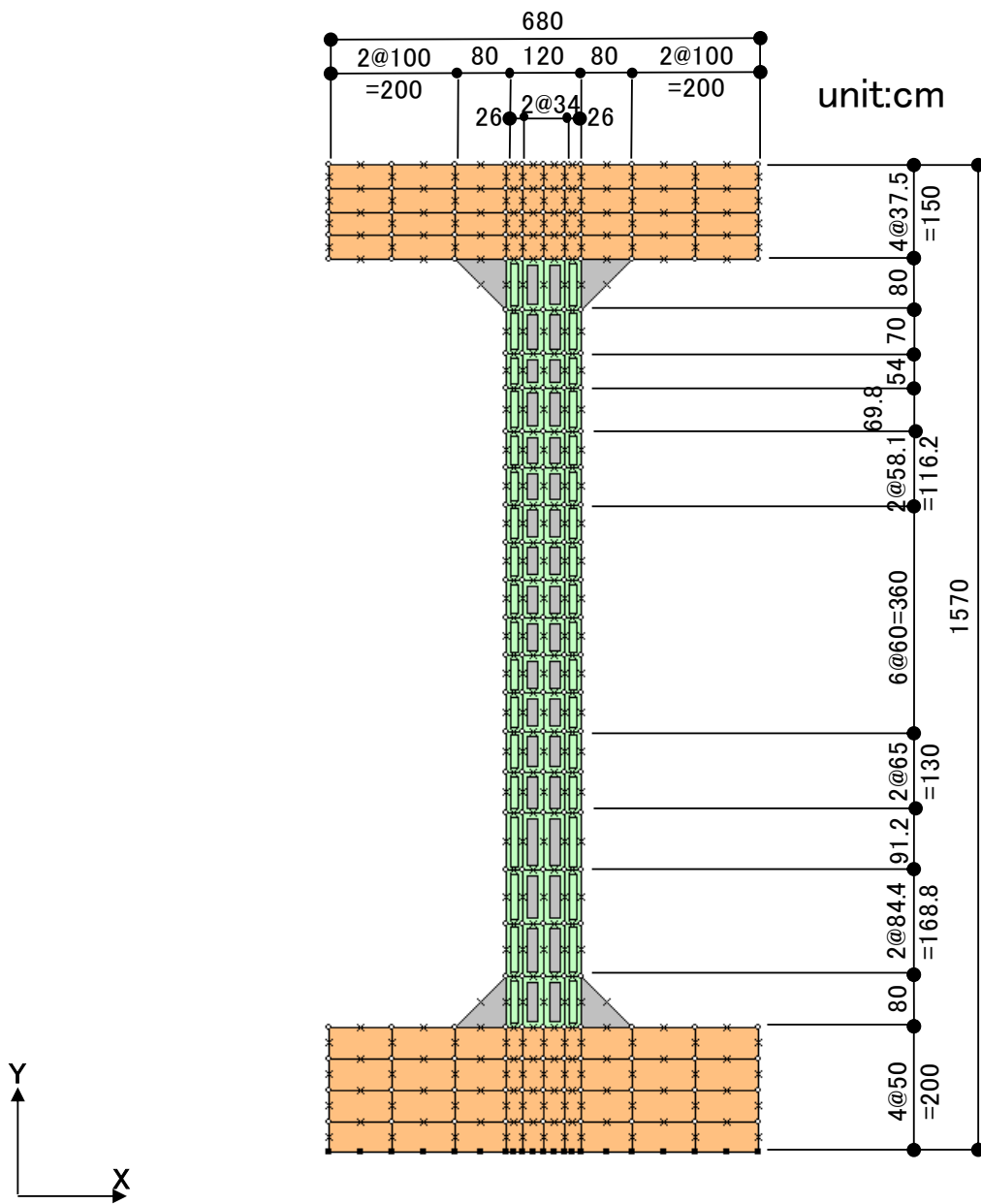
解析モデルについては、主鉄筋位置やPHbの鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。なお、奥行き方向の厚さは100cmとする。

部材厚さ方向の分割は4分割とする。両外側2要素は、軸方向主筋が配置されることから、芯かぶり130mmの2倍の要素幅260mmとし、RC要素として設定する。

なお、要素の縦横比は1:5以下を目安に分割し、ハンチ部（上下部とも800mm×800mm）は1要素とする。

解析モデル図を第4-2図に示す。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 4-2 図 解析モデル図

解析の入力データとなるコンクリートの材料特性および鉄筋の材料特性を第 4-1 表及び第 4-2 表に示す。

ステップ②における解析モデルとステップ③における解析モデルによる違いを第 4-3 表に示す。表に示す通り，せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度及び荷重の載荷方法についても解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するか確認する。

第 4-1 表 コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f' c	23.5N/mm <sup>2</sup>
引張強度 ft	1.91N/mm <sup>2</sup> (小数 2 位に四捨五入) (=0.23×24.0 <sup>2/3</sup> =1.91367)
ヤング係数 Ec	WCOMD で自動計算

第 4-2 表 鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋およびせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm <sup>2</sup>
主鉄筋の降伏強度	999N/mm <sup>2</sup>
PHb 鉄筋の降伏強度	345N/mm <sup>2</sup>

第 4-3 表 解析モデルの違い

項目	ステップ②	ステップ③
部材厚	1,200mm	1,200mm
せん断スパン比	2.79	11.40
主鉄筋比	1.48	0.85
コンクリート設計基準強度	32.0N/mm <sup>2</sup>	23.5N/mm <sup>2</sup>
載荷方法	強制変位	断面力に基づく節点力

#### 4.2 荷重条件

考慮する荷重は、地震応答解析（部材非線形解析）から得られる断面力を考慮する。具体的には、地震応答解析（部材非線形解析）における断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力）から得られる節点力を材料非線形解析モデルに作用させる。

材料非線形解析では、鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため、当該節点力をそれぞれ 1/100 したものを漸次載荷する。

荷重ケースについては、隔壁の照査値が最も厳しくなる S<sub>s</sub>-N1 を対象とする。取水槽の照査結果一覧を第 4-4 表に示す。

第 4-4 表 取水槽の照査結果一覧

基準地震動	隔壁の照査値*
S <sub>s</sub> -D	0.37
S <sub>s</sub> -N1	0.51
S <sub>s</sub> -N2 (NS)	0.28
S <sub>s</sub> -N2 (EW)	0.28
S <sub>s</sub> -F1	0.26
S <sub>s</sub> -F2	0.27

※照査値＝照査用せん断力/せん断耐力

ここで、照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数

#### 4.3 破壊判定基準

「2.3 破壊判定基準」に準じて設定する。

#### 4.4 解析結果

検討ケースを第4-5表に示す。Ss-N1の地震時における在来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-Aとし、PHb工法によるせん断補強を想定したケースをケース③-Bとする。ケース一覧を第4-5表に、せん断耐力の結果を第4-6表に示す。ケース③-Aのせん断耐力は1,610kN、ケース③-Bのせん断耐力は1,549kNであり、在来工法とPHb工法の比率は約96%となった。それぞれの結果を第4-7表～第4-8表に示す。表に示す通り、初期ひび割れ発生時、作用荷重時のそれぞれの段階において、変形状況は在来工法とPHb工法で顕著な差は見られず、概ね整合的な結果となった。ひび割れ状況や鉄筋の降伏位置においても在来工法と顕著な差は見られず、ステップ①、②と同様の傾向となった。

したがって、島根原子力発電所2号炉の構造物に作用する荷重の範囲においては、在来工法と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特異な応答等は確認されなかった。参考に作用荷重を超える範囲における初期降伏時、終局荷重時における変形状況、ひび割れ状況、鉄筋降伏の状況についても第4-7表～第4-8表に示す。

第4-5表 ケース一覧

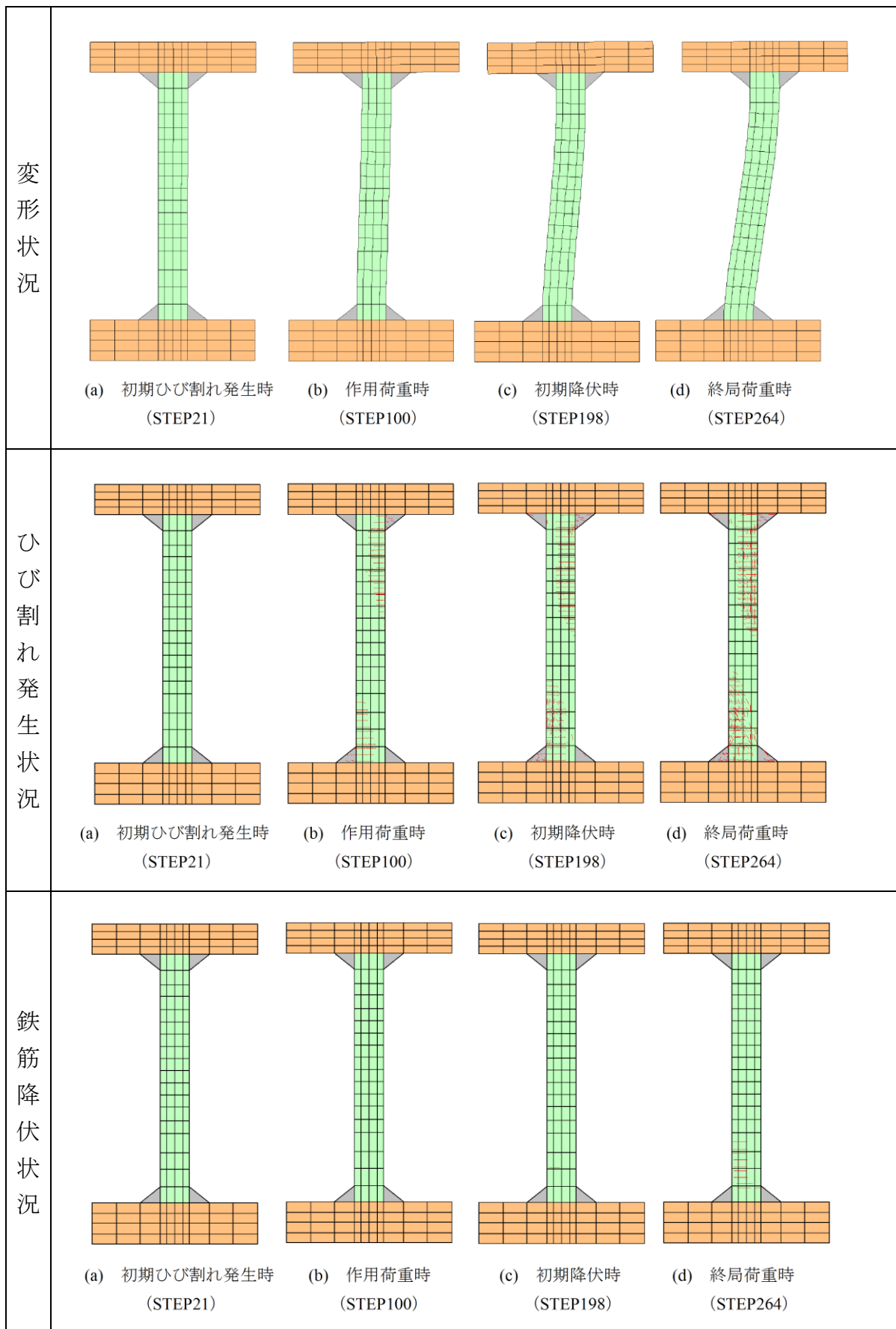
ケース	地震動	せん断補強筋設置方法
③-A	Ss-N1	在来工法（先施工）
③-B	Ss-N1	PHb（後施工）

第4-6表 せん断耐力結果一覧

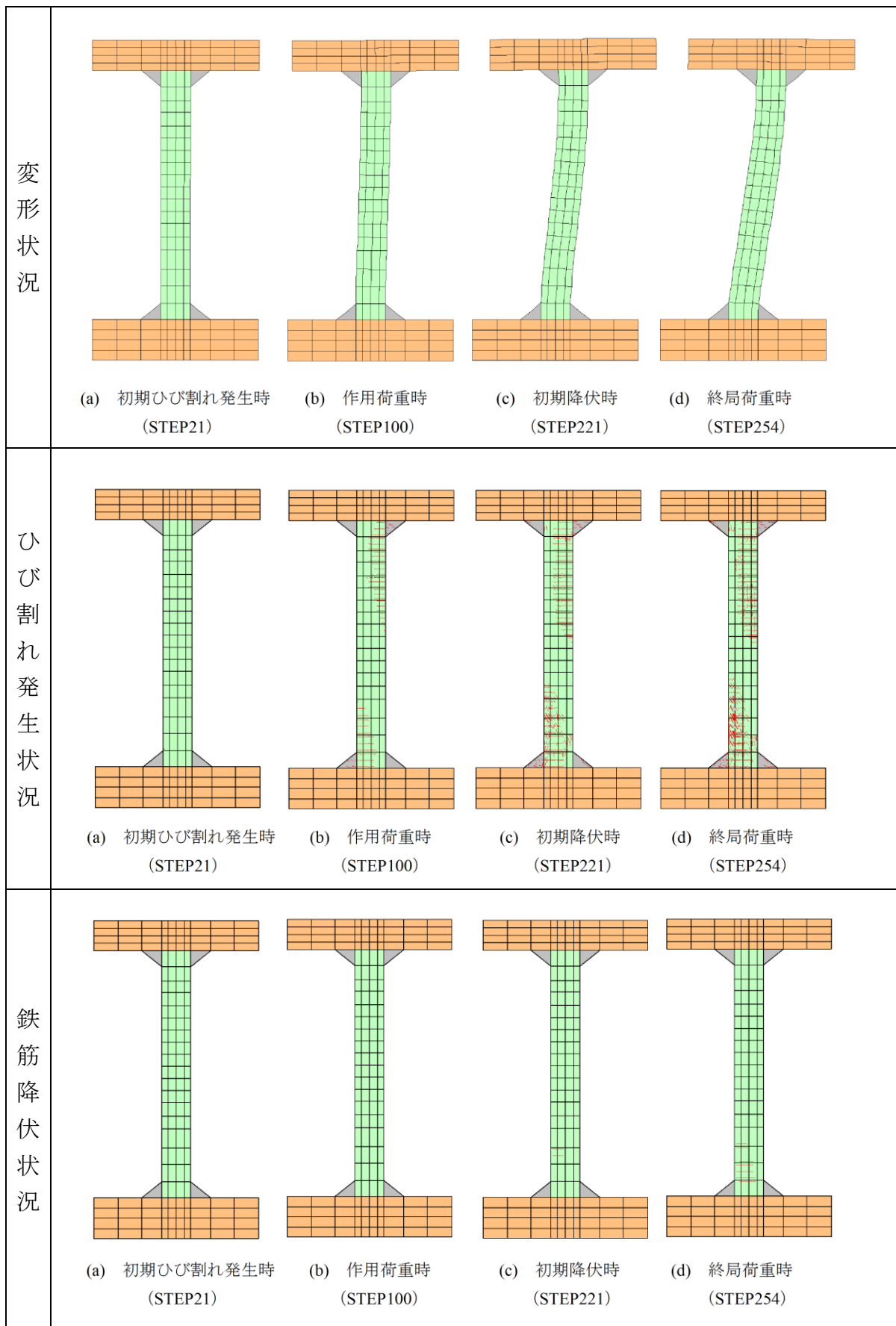
ケース	せん断耐力 (kN)	在来工法とPHb工法の比率
①-A（在来工法）	615	—
①-B	477	0.78
①-C	500	0.81
②-A（在来工法）	1,335	—
②-B	1,235	0.93
②-C	1,200	0.90
③-A（在来工法）	1,610	—
③-B	1,549	0.96



第4-7表 ケース③-Aの解析結果



第 4-8 表 ケース③-B の解析結果



## 5. まとめ

ステップ①～③における材料非線形解析を用いて、島根原子力発電所2号炉の屋外重要土木構造物における PHb 工法の適用性の確認を実施した。解析の結果、建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚に対しても応答性状に変化はないことが確認できた。また、実構造物諸元相当の解析により、PHb 工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっても、応答性状に変化はなく、建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを確認した。

中国電力株式会社  
島根原子力発電所

施工管理要領書（案）  
（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））

中国電力株式会社

## 目次

	頁
1. 目的	91
2. 準拠事項	91
3. 工事の管理	91
4. 耐震補強工事	91
4.1 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質	91
4.2 注入材の種類及び品質	91
4.3 断面修復材の種類及び品質	91
4.4 品質管理及び検査	91
5. 施工要領	94
5.1 施工フロー	94

## 1. 目的

本指針は、島根原子力発電所2号炉取水槽耐震補強工事にあたり、補強する構造物が技術基準等に適合した材料及び構造を有するように施工管理を行うために、中国電力株式会社が定めた管理方法、判断基準等の大綱を示したものである。

## 2. 準拠事項

施工及び施工管理は、本要領書によるほか下記の基準等に準じて行う。

- (1) 日本工業規格（以下「JIS」という。）
- (2) 土木学会「コンクリート標準示方書」（以下「コンクリート標準示方書」という。）
- (3) 建設技術審査証明報告書（建技審証 第0522号）（以下「建設技術審査証明報告書」という。）

## 3. 工事の管理

施工及び施工管理に先立ち、作業要領書を確認した上で本工事の管理を行う。

## 4. 耐震補強工事

### 4.1 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質

本工事に用いる後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）は、JIS、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。PHbの品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.2 注入材の種類及び品質

注入材は、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。注入材の品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.3 断面修復材の種類及び品質

断面修復材は、建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。断面修復材の品質は、建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

### 4.4 品質管理及び検査

耐震補強工事における各種検査は、第4-1表により行い、判定基準に適合していることを確認する。

第 4-1 表 後施エプレート定着型せん断補強鉄筋 (PHb) 品質, 出来形および検査一覧 (1/2)

工程	項目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期
機材・資 材搬入	PHb	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 矩形プレートの科学的性質, 機械的性質は JIS G3106 規格のうち SM490A (又は同等品 (SM490B, SM490C)) の適合品であること。</li> <li>・ 円形プレートの科学的性質, 機械的性質は JIS G4051 規格のうち S35C もしくは S45C の適合品であること。</li> <li>・ 定着筋の科学的性質, 機械的性質は JIS G3112 の適合品であること。</li> </ul>		ミルシート	材料搬入時
		外観・寸法検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各プレートの形状, 寸法が, JIS G3194 に適合していること。</li> <li>・ 圧接位置がメーカーの定める基準値内であること。</li> <li>・ 鉄筋仕上がり長さがコンクリート標準示方書「施工編」『7.3 鉄筋工の検査』の基準に適合していること。</li> </ul>	PHb 出来形検査表	材料搬入時	
		引張強度試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 引張強度は, 矩形プレート側摩擦接合部の引張強度が鉄筋の引張強度以上であること。</li> </ul>		試験成績表	材料搬入時
	注入材	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PHb モルタル-N 又は同等品であること。</li> </ul>		試験成績書	材料搬入時
	断面修復材	材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ RS モルタル-P 又は同等品であること。</li> </ul>		試験成績書	材料搬入時
削孔	削孔	削孔径	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 削孔径が設計図どおりであること。</li> </ul>	設計値以上	コンベックス ノギス	削孔完了後
		削孔深さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 削孔深さが設計図どおりであること。</li> </ul>	-10mm~+20mm	コンベックス ノギス	削孔完了後
			PHb 工法研究会の定める管理値	PHb 工法研究会の定める管理値		

第 4-1 表 後施エプレート定着型せん断補強鉄筋 (PHb) 品質, 出来形および検査一覧 (2/2)

工程	項目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期
PHb 挿入	かぶり	かぶり	・かぶりが設計図どおりであること。 PHb 工法研究会の定める管理値	設計かぶり以上	コンベックス, ノギス	設置後
		注入材	フレッシュ時の性状 材料温度 圧縮強度試験	・フロッワーが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。 ・材料温度が 5°C 以上であること。 ・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	190mm ± 20mm	フロッワー試験 温度計 圧縮強度試験
定着	断面修復材	フレッシュ時の性状 材料温度 圧縮強度試験	・フロッワーが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。 ・材料温度が 5°C 以上であること。 ・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	150mm ± 20mm	フロッワー試験 温度計 圧縮強度試験	注入前 注入前 打設後 28 日

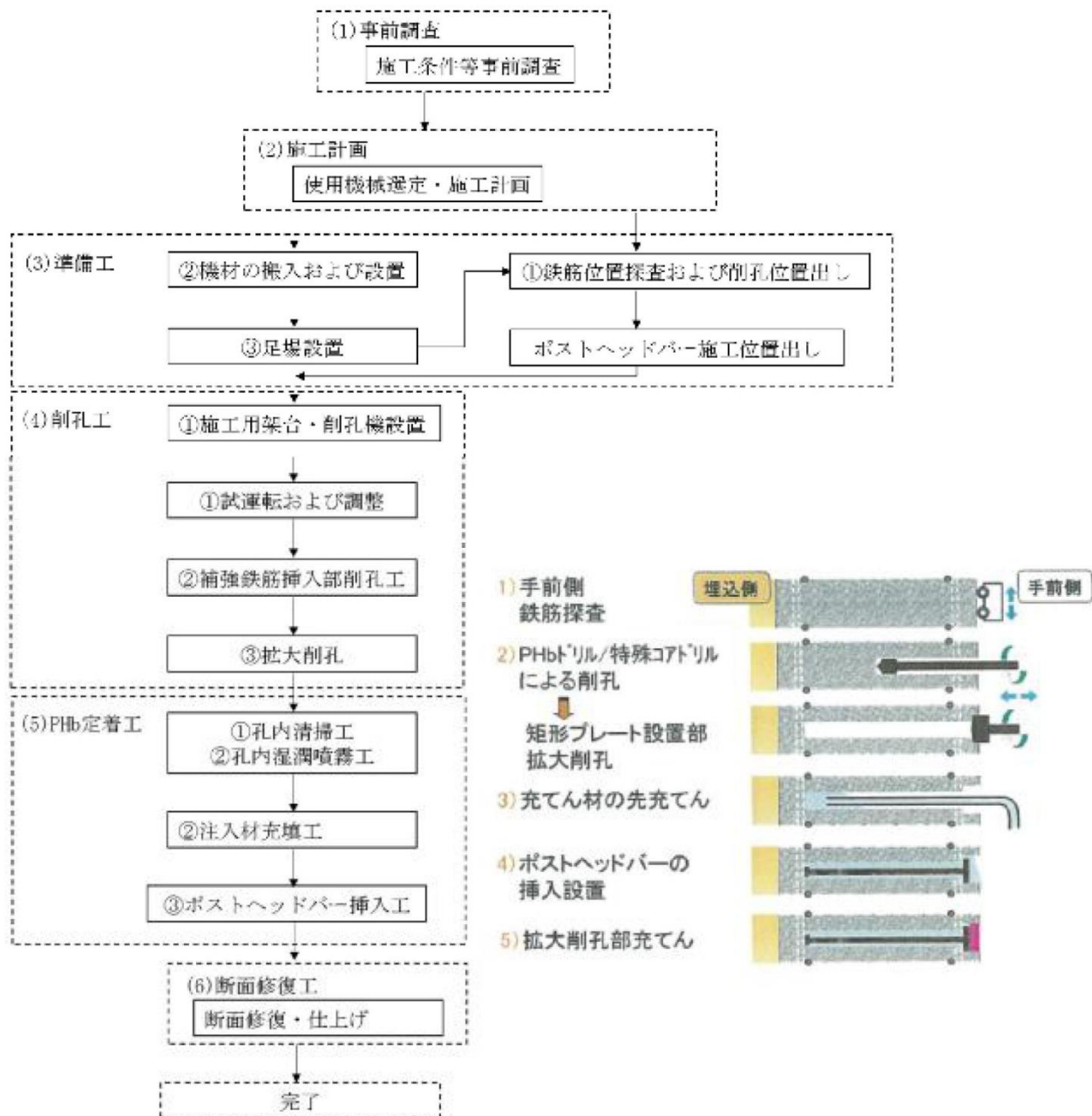
注) 引用資料・・・コンクリート標準示方書「施工編」(土木学会), 建設技術証明報告書後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」



## 5. 施工要領

### 5.1 施工フロー

施工フローを第 5-1-1 図に示す。



第 5-1-1 図 施工フロー

### 5.1.1 事前調査

様々な既存設備の存在が施工や資機材の搬入に対する制約となる場合がある。したがって、施工条件を把握する為に、施工に先立ち事前調査を行う。

事前調査を実施して現状を把握した結果、既存設備が施工上の制約になる場合には、当社と事前にその対策について協議する。

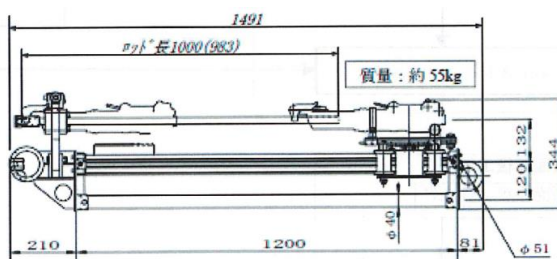
### 5.1.2 施工計画（使用機器選定）

既存設備に関する協議結果に基づいて施工計画を立案し、適切な施工機械や削孔方法を選定する。第 5-1-2-1 図に主な削孔機器として PHb ドリルと特殊コアドリルを示す。

削孔には PHb ドリルを用いることを標準とする。ただし、施工スペースが狭い場合や鉄筋が輻輳することが多いはり部やハンチ部の施工では特殊コアドリルを使用する。

PHb ドリルは、ビットの回転と打撃で削孔する機械であり、圧縮空気により作動する。特殊コアドリルは、コアビットを低トルクで高速回転させることにより、既存鉄筋などに接触した場合に瞬時にコアドリルの回転が停止する機能を備えた削孔機械であり、電力により作動する。

なお、孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際、削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され、再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで、孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし、再削孔時の精度向上を図る。



c) ベンチャードリルの諸元 (例)

第 5-1-2-1 図 削孔機械の種類

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### 5.1.3 準備工

#### (1) 鉄筋位置探査及び削孔位置出し

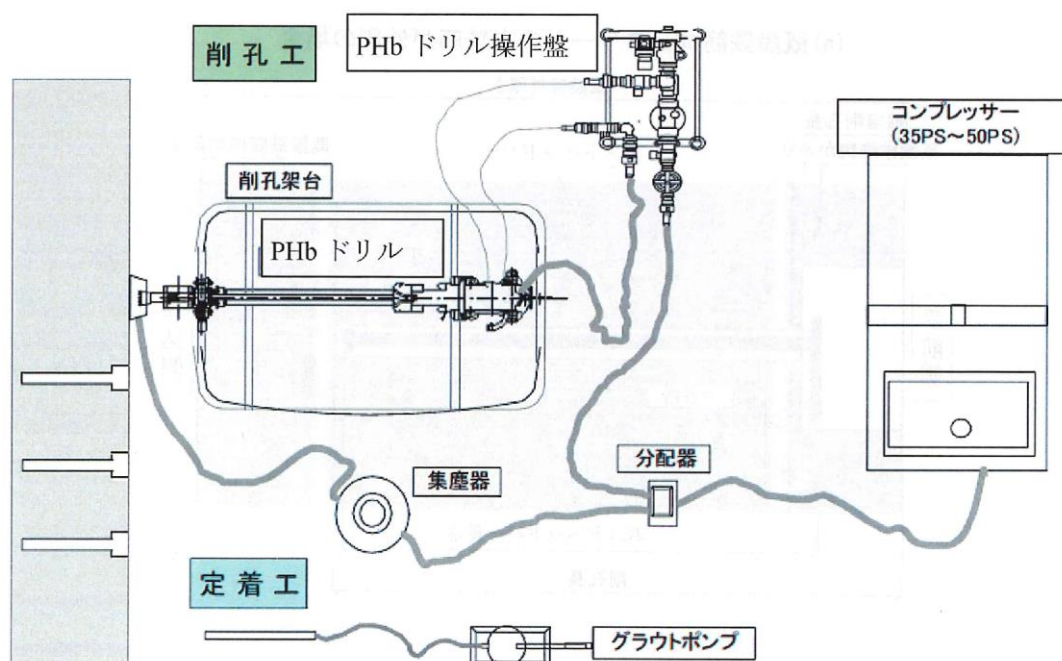
事前に PHb の設計位置を墨出し、内空側既存鉄筋の位置を鉄筋探査装置により調査する。調査結果をもとに、内空側既存鉄筋位置と PHb の設計位置とを確認し、PHb の施工位置を決定する。第 5-1-3-1 図に鉄筋探査の概要を示す。



第 5-1-3-1 図 鉄筋探査工

#### (2) 機材の搬入および配置

第 5-1-3-2 図に主な機材とその配置を示す。



第 5-1-3-2 図 機材配置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### (3) 足場設置

高所作業の場合など施工位置に応じて必要な足場設備を設置する。

#### 5.1.4 削孔工

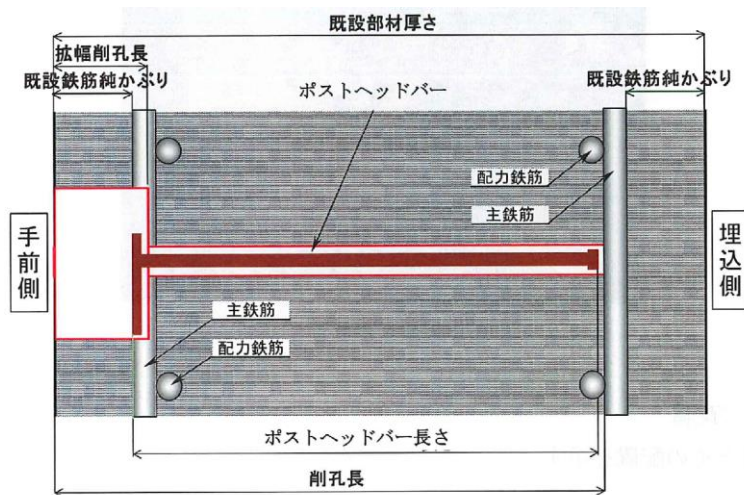
第5-1-4-1図に示すように、PHbの施工では下記の削孔深さを原則とする。

- ・補強鉄筋挿入部の削孔長

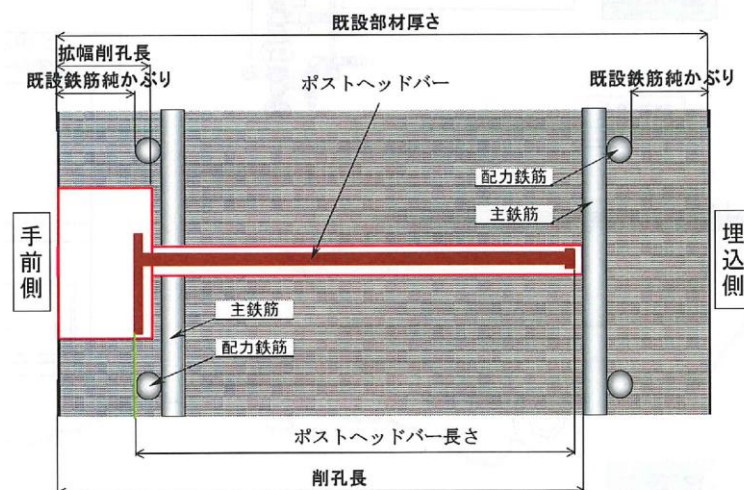
手前側削孔表面から埋込側既設主鉄筋の手前側までの距離

- ・矩形プレート部の拡幅削孔長

PHbの矩形プレートのかぶりが手前側既設鉄筋のかぶりと同様になるように設置した時、手前側削孔表面から矩形プレートの埋込側の面より5mm内側までの距離



(a) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が外側の場合



(b) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が内側の場合

第5-1-4-1図 PHb工法の施工概要図

(1) 施工用架台・削孔機設置および試運転・調整

PHb ドリル施工用架台を使用し、PHb ドリルを削孔位置にあわせる。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スラントルール、金尺等で確認しながら設置する。

第 5-1-4-2 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直・水平の確認状況を示す。



第 5-1-4-2 図 削孔準備工

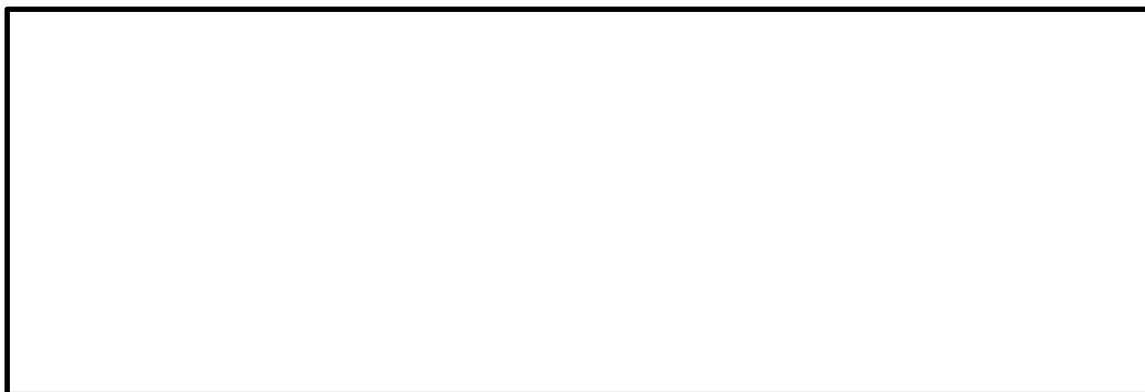
(2) 補強鉄筋挿入部削孔工

水平削孔時は、粉塵の吸出し方向が横向きあるいは下向きとなるように、下向き削孔時は、粉塵の吸出し方向が横向きとなるように集塵装置を削孔位置にセットする。

PHb ドリルで補強鉄筋挿入部を所定の深さまで削孔する。所定の深さは原則として「5.1.4 削孔」に図示した寸法とし、削孔深さの誤差は-10mm～+20mm とする。

埋込側既存鉄筋を切断しないように、埋込側鉄筋位置の手前から、削孔スピード、回転速度を落として慎重に削孔する。削孔完了後に削孔深さを測定する。万が一地山側既存鉄筋に当たった場合は、ドリルを即時停止する。もし削孔深さの管理値を超える場合は、付近の位置で再削孔する。

第 5-1-4-3 図に補強鉄筋挿入部削孔状況を示す。



第 5-1-4-3 図 補強鉄筋挿入部削孔工

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

### (3) 拡大削孔工

拡大削孔用のビットおよび集塵装置に取換え、所定の深さまで拡大削孔を行う。所定の深さは、原則として「5.1.4 削孔」に示した寸法とする。

手前側既存鉄筋を切断しないように、鉄筋探査により測定した手前側既存鉄筋のかぶりの手前から削孔スピード、回転速度を落として慎重に削孔する。万が一手前側既存鉄筋に当たった場合は、ドリルを即時停止する。PHbの矩形プレートのかぶりが既存鉄筋の設計かぶりを確保できない場合は付近の位置で再削孔する、または防錆処理を実施するかを協議する。

第 5-1-4-4 図に拡大部削孔状況を示す。



第 5-1-4-4 図 拡大削孔工

### 5.1.5 PHb 定着工

PHb 定着工においては、横向き施工・下向き施工ともに、可塑性を有する PHb モルタルを使用することを標準とする。PHb モルタルは、施工性・充填性に優れており、孔内の埋込側先端まで隙間無く充填することができる。

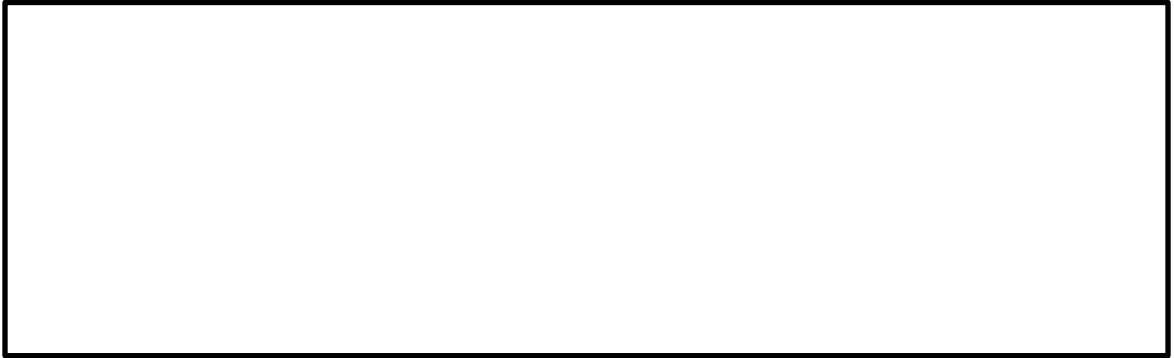
#### (1) 孔内清掃工

孔内湿潤噴霧工に先立ち、バキュームクリーナーを用いて、削孔が完了した孔内の清掃を行う。

#### (2) 孔内湿潤噴霧工

水分の逸失による注入材の粘性増加に起因して、PHb の挿入が困難あるいは不可能になることを未然に防止するために、孔内への注入材充填に先立ち、孔内の湿潤処理を行う。

第 5-1-5-1 図に孔内清孔工および孔内湿潤噴霧工の概要を示す。



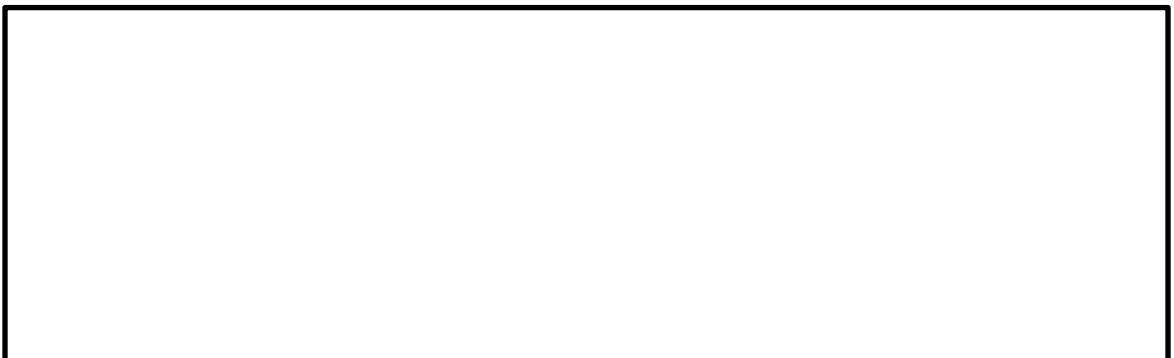
第 5-1-5-1 図 孔内清掃工および孔内湿潤噴霧工

(3) 注入材充填工

ペール缶に所定の水を計量し、ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の注入材料（プレミックス品）を加えて練り混ぜる。

空隙を生じさせないように孔内先端まで注入ホースを差込み、PHb 定着用の注入材を電動ポンプで注入する。

第 5-1-5-2 図に注入材充填工の概要を示す。



第 5-1-5-2 図 注入材充填工

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

#### (4)PHb 挿入工

注入材で満たされた孔内に PHb を所定の位置まで人力で挿入し, 余分な注入材を取り除く。

PHb の挿入後, PHb の位置ずれを防止するために手前側矩形定着プレートを抑え治具で固定する。

第 5-1-5-3 図に PHb 挿入工の概要を示す。



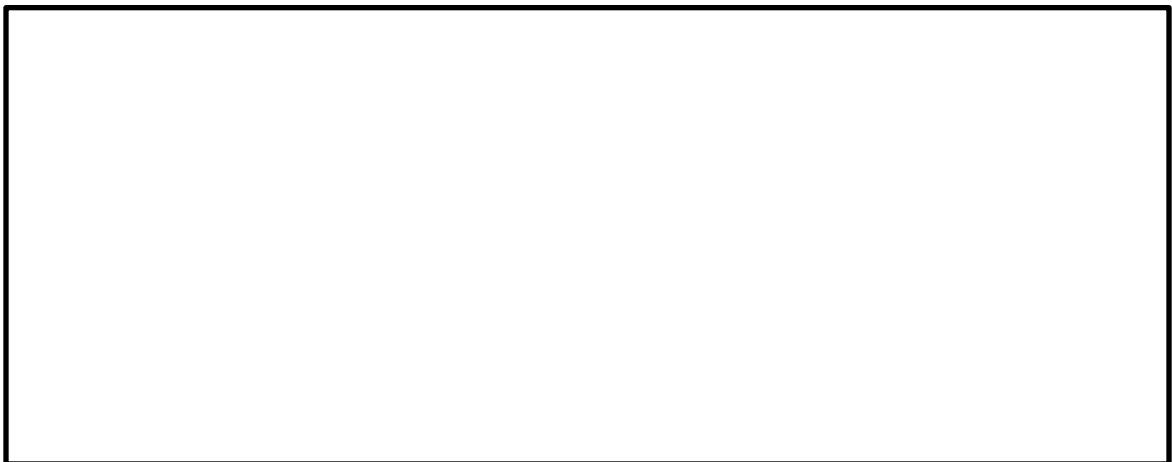
第 5-1-5-3 図 PHb 挿入工

#### 5.1.6 断面修復工

ペール缶に所定の水を計量し, ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の断面修復材 (プレミックス品) を加えて練り混ぜる。

拡大削孔部を断面修復材で充填する。断面修復材の充填はモルタル・グラウトの硬化後に行う。金ごてにより表面仕上げを行う。

第 5-1-6-1 図に拡大削孔部の断面修復の状況写真を示す。



第 5-1-6-1 図 断面修復工

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。