

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-026-07 改 03
提出年月日	2023年3月24日

取水管の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2023年3月

中国電力株式会社

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。

## 目 次

1. 評価方法	1
2. 評価条件	1
2.1 評価対象断面の方向	1
2.2 評価対象断面の選定	4
2.3 使用材料及び材料の物性値	12
2.4 地盤及び砕石の物性値	13
2.5 海水位	14
2.6 耐震評価フロー	15
2.7 適用規格	17
3. 管周方向の地震応答解析	19
3.1 地震応答解析手法	19
3.2 地震応答解析モデルの設定	22
3.2.1 解析モデル領域	22
3.2.2 境界条件	23
3.2.3 地盤及び被覆コンクリートのモデル化	26
3.2.4 構造物のモデル化	26
3.2.5 ジョイント要素の設定	27
3.3 減衰定数	30
3.4 荷重及び荷重の組合せ	36
3.4.1 躯体自重	36
3.4.2 外水圧及び内水圧	37
3.4.3 動水圧	38
3.5 地震応答解析の解析ケース	39
3.5.1 耐震評価における解析ケース	39
3.6 評価内容	42
3.6.1 入力地震動の設定	42
3.6.2 入力地震動の結果	43
3.7 地震応答解析結果	55
3.7.1 解析ケース①（基本ケース）	55
3.7.2 解析ケース②及び解析ケース③（地盤物性のばらつきを考慮したケース）	75
4. 管軸方向の地震応答解析	80
4.1 地震応答解析手法	81
4.2 地震応答解析モデルの設定	82
4.2.1 境界条件	82
4.2.2 解析モデル領域	82

4.2.3	地盤のモデル化	82
4.3	入力地震動	84
4.4	耐震評価における解析ケース	84
4.4.1	地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース	84
4.4.2	耐震評価における解析ケースの組合せ	84
4.5	最大地盤ひずみ算出方法	87
4.5.1	地震動の波長の算定	88
4.6	地震応答解析結果	89
4.6.1	解析ケース①（基本ケース）	89
4.6.2	解析ケース②及び解析ケース③（地盤物性のばらつきを考慮したケース）	92
5.	管軸方向の応力解析	95
5.1	解析方法	95
5.2	応力解析モデルの設定	96
5.2.1	取水管のモデル化	96
5.2.2	境界条件	96
5.2.3	地盤ばね	96
5.3	荷重及び荷重の組合せ	99
5.4	入力地盤変位	99
5.5	管軸方向応力の合成	101
5.6	応力解析結果	102
6.	耐震評価	106
6.1	許容限界	106
6.1.1	構造部材の健全性に対する許容限界	106
6.1.2	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	107
6.2	評価方法	108
6.2.1	取水管の曲げ及びせん断評価	108
6.2.2	基礎地盤の支持性能評価	108
7.	耐震評価結果	109
7.1	構造部材の健全性に対する評価結果	109
7.1.1	管周方向の評価結果	109
7.1.2	合成応力による評価結果	111
7.2	基礎地盤の支持性能評価結果	112
8.	まとめ	115

参考資料 1 取水管の耐震評価における規格・基準類との関連性について

参考資料 2 等価線形化法を用いた地震応答解析の妥当性確認

参考資料 3 可撓管の耐震性評価

参考資料 4 静的地震力に対する耐震安全性評価

## 1. 評価方法

取水管は、非常用取水設備であり、通水機能が要求される構造物である。

取水管については、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、取水管が基準地震動  $S_s$  に対して十分な構造強度及び通水機能を有していることを確認する。

取水管に要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析及び応力解析に基づく構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価により行う。

## 2. 評価条件

### 2.1 評価対象断面の方向

取水管の位置図を図 2-1 に示す。

評価対象断面の方向の選定に係る考え方を表 2-1 に示す。取水管の縦断方向（通水方向）は、通水方向に対して空間を保持できるように管路が形成されていることから強軸となり、横断方向（通水に対する直交方向）が弱軸となる。

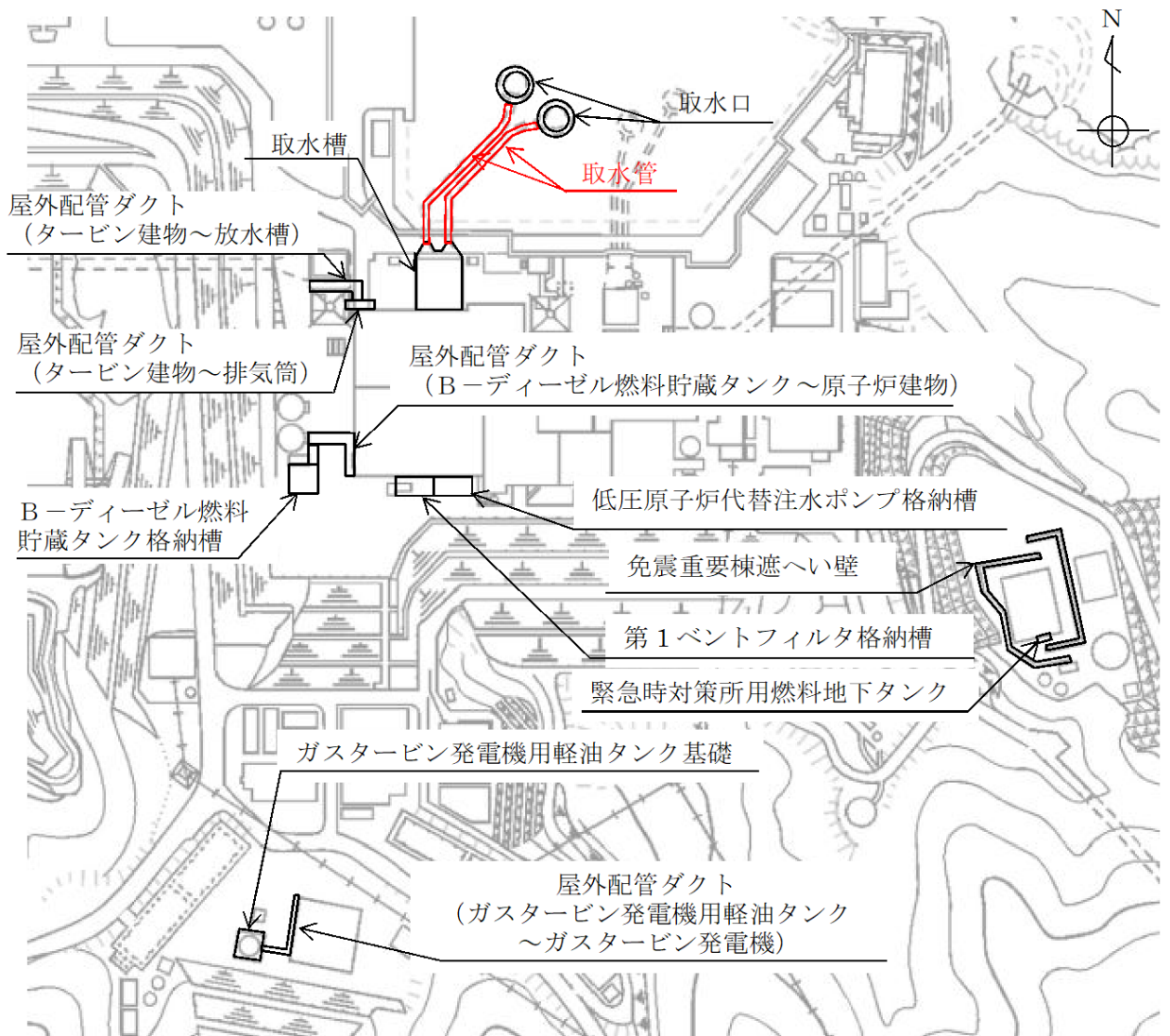


図 2-1 取水管 位置図

表 2-1 取水管の評価対象断面の方向の選定

	縦断方向（通水方向）	横断方向（通水に対する直交方向）
取水管	<p>通水方向に対して空間を保持できるように構造部材が配置されている強軸に対して、明確な弱軸方向となる横断方向（通水に対する直交方向）を評価対象断面とする。</p> <p>また、「水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006（日本水道鋼管協会，2006.2.2）」に基づき，一般的な地中埋設管路の設計で考慮される管軸方向断面についても評価対象断面として選定する。</p>	

## 2.2 評価対象断面の選定

取水管の評価対象断面は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づいて選定する。

取水管の平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3～図 2-8 に示す。取水管の南側については、取水槽を貫通する構造となっており、北側は取水口と接続されている。取水口との接続箇所については図 2-9 に示すとおり、取水口の接続管と取水管をボルト及び溶接にて接合している。また、取水管の地質断面図を図 2-10 及び図 2-11 に示す。

取水管は、延長約 140m、内径  の鋼製管 2 条で構成される水中構造物であり、通水方向に対して一様の断面形状を示す管路構造物である。

取水管は、取水口から敷地護岸法先までの砕石埋戻し区間と敷地護岸法先から取水槽取付部までのコンクリート巻立区間に大別される。

砕石埋戻し区間は、基盤となる岩盤を掘削し設置され、周辺を砕石で埋め戻されている。また、砕石上には被覆コンクリート（厚さ 1.0m）を打設している。

コンクリート巻立区間は、基盤となる岩盤を掘削し設置され、コンクリートで巻き立てている。

取水管には、海水による腐食防止のため、電気防食が施されている。

横断方向の断面（管周方向断面）のうち、コンクリート巻立部（B-B 断面、C-C 断面）については、周囲をコンクリートで巻き立てられているため、砕石埋戻部（D-D 断面～G-G 断面）と比較して取水管に作用する土圧荷重が小さいため評価対象断面として選定しない。

砕石埋戻部（D-D 断面～G-G 断面）における、取水管下部の地質状況は、図 2-10 に示すように、取水槽側（南側）方向に  層が厚くなっており、 層が厚く分布する E-E 断面を評価対象断面として選定する

また、「水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006（日本水道鋼管協会、2006.2.2）」に基づき、一般的な地中埋設管路の設計で考慮される管軸方向断面についても検討を行う。この際、取水管 I 及び取水管 II においては、取水管の延長が長い取水管 II（A-A 断面）を評価対象断面として選定する。管軸方向の評価対象断面として選定した（A-A 断面）については、砕石埋戻部（D-D 断面～取水口）の間に設置されている 2 箇所の可撓管で 3 区間に分割した際に、最も延長が長い区間を評価対象として選定する。



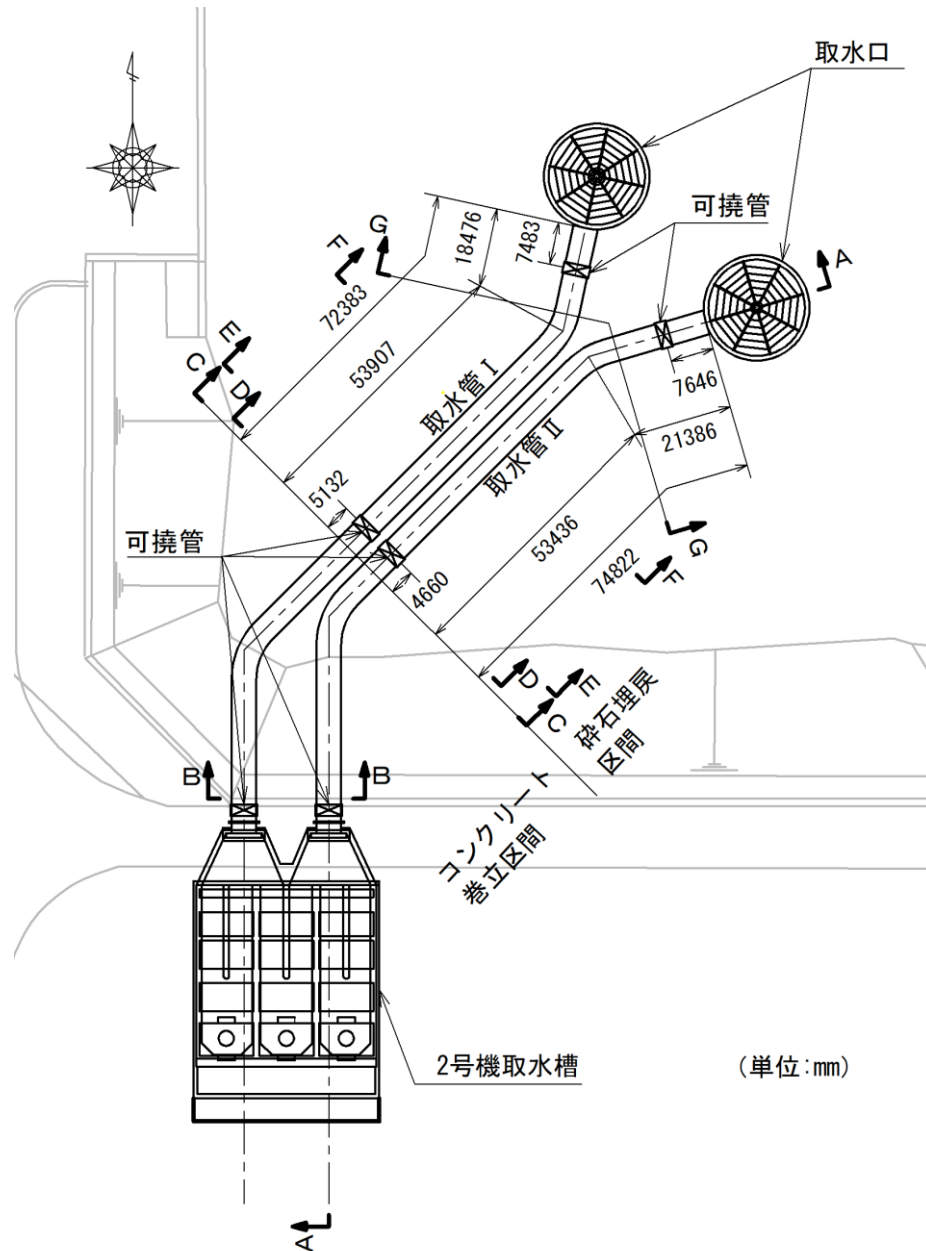


図 2-2 取水管 平面図

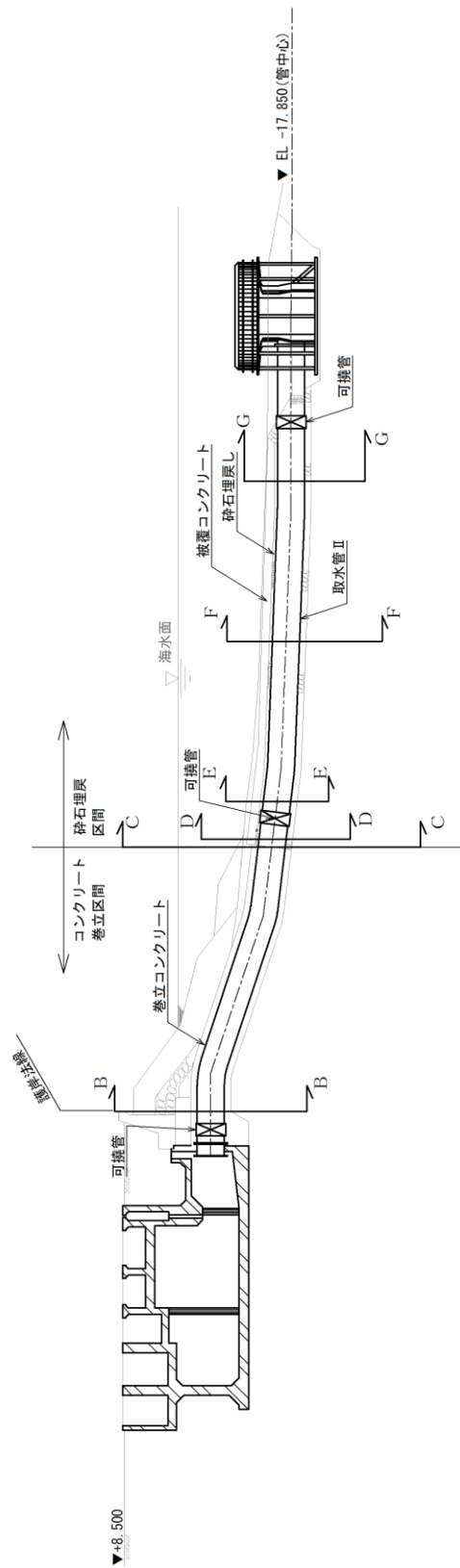


図 2-3 取水管 断面図 (A-A 断面)

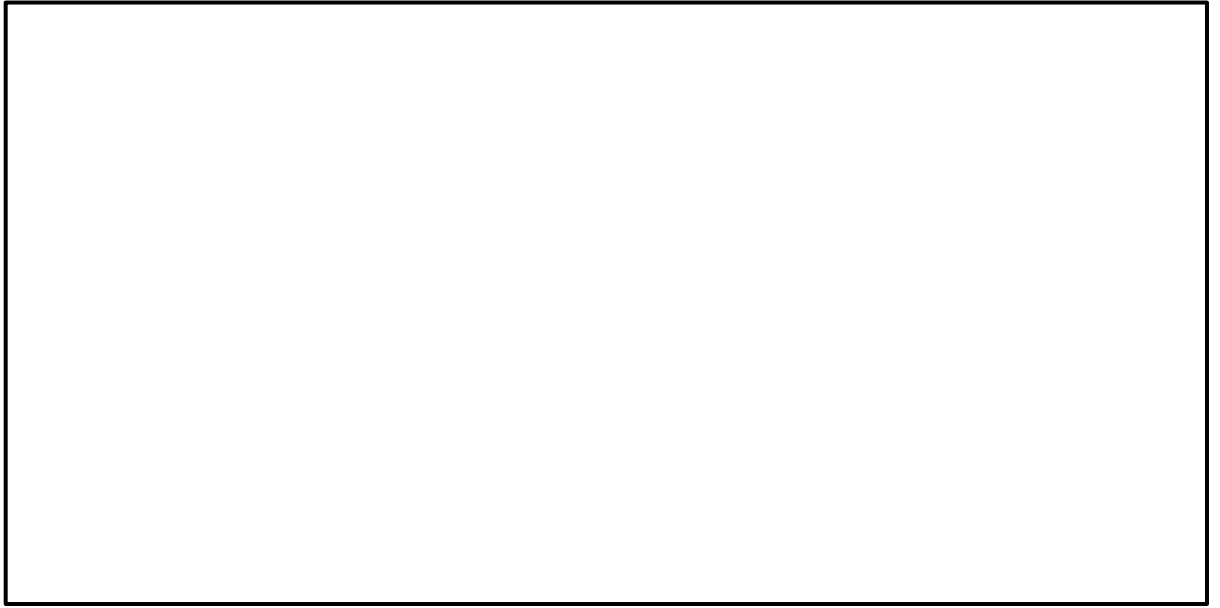


图 2-4 取水管 断面图 (B - B 断面)

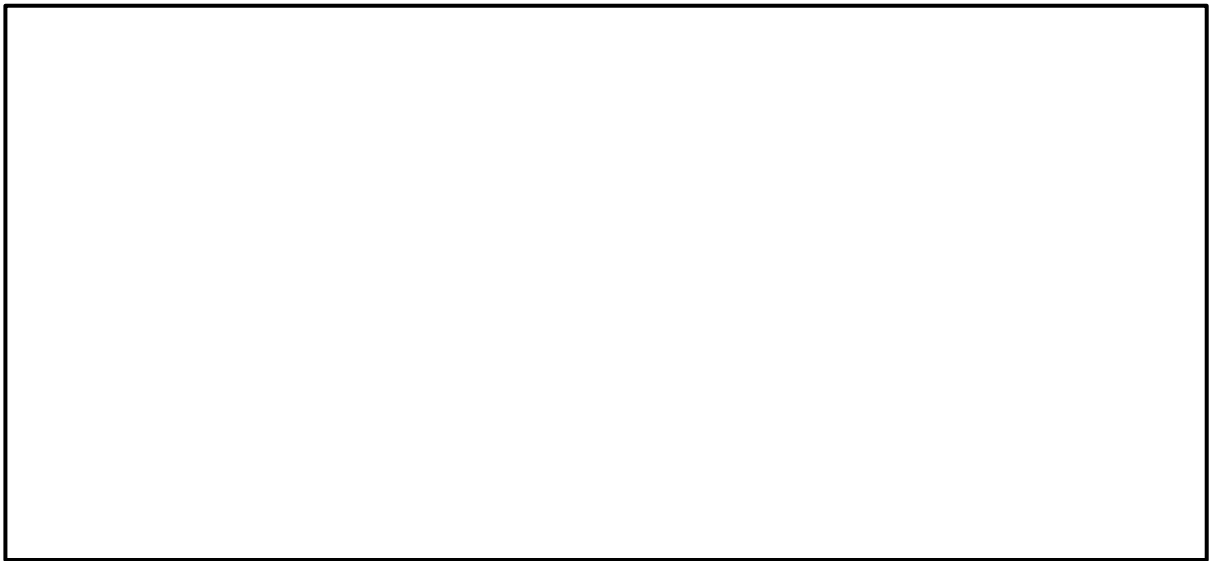


图 2-5 取水管 断面图 (C - C 断面)

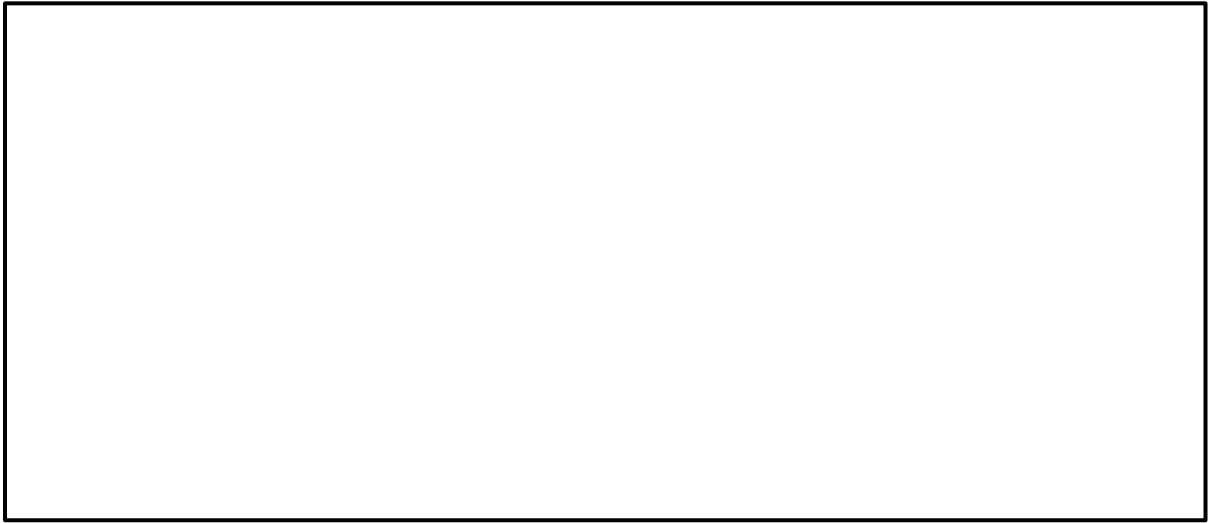


图 2-6 取水管 断面图 (D-D 断面)



图 2-7 取水管 断面图 (E-E 断面, F-F 断面)



图 2-8 取水管 断面图 (G-G 断面)

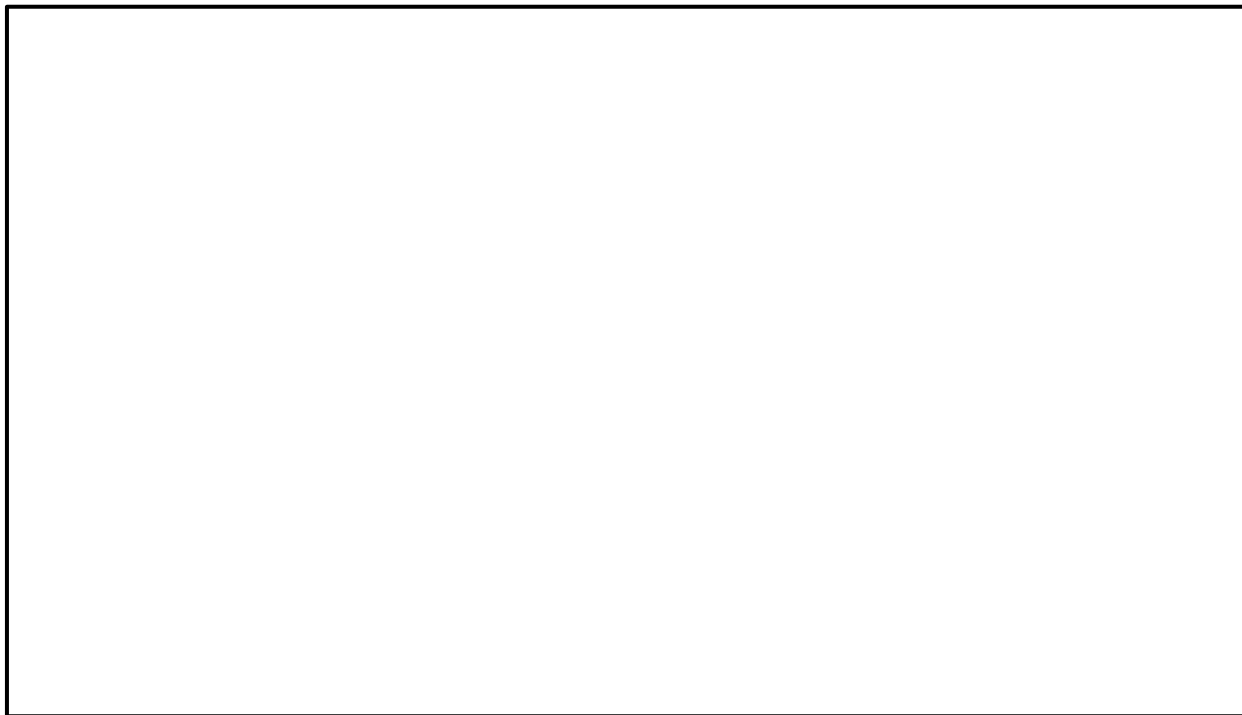
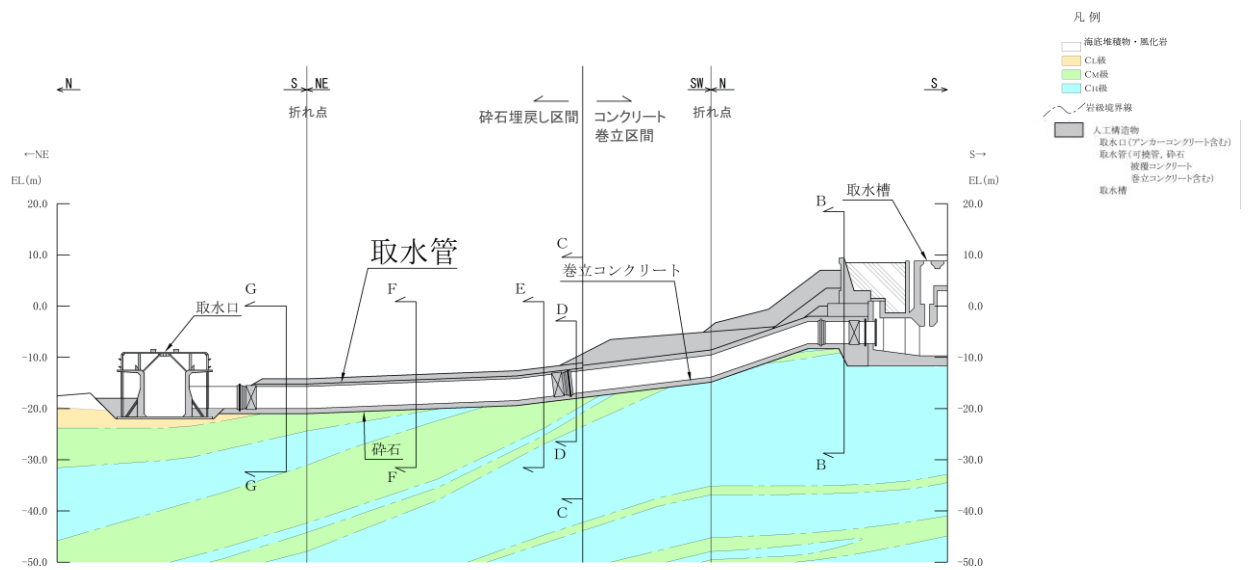
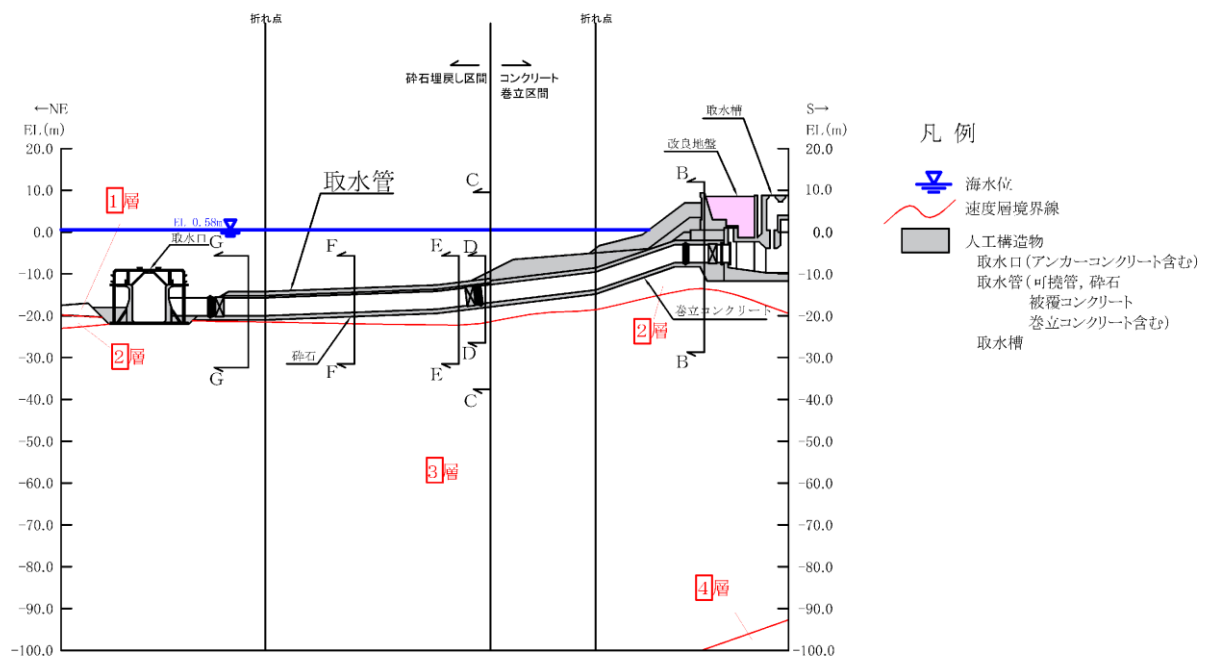


图 2—9 取水管 取水口接統箇所断面图



(岩級図)



(速度層図)

図 2-10 取水管 地質断面図 (A-A断面)

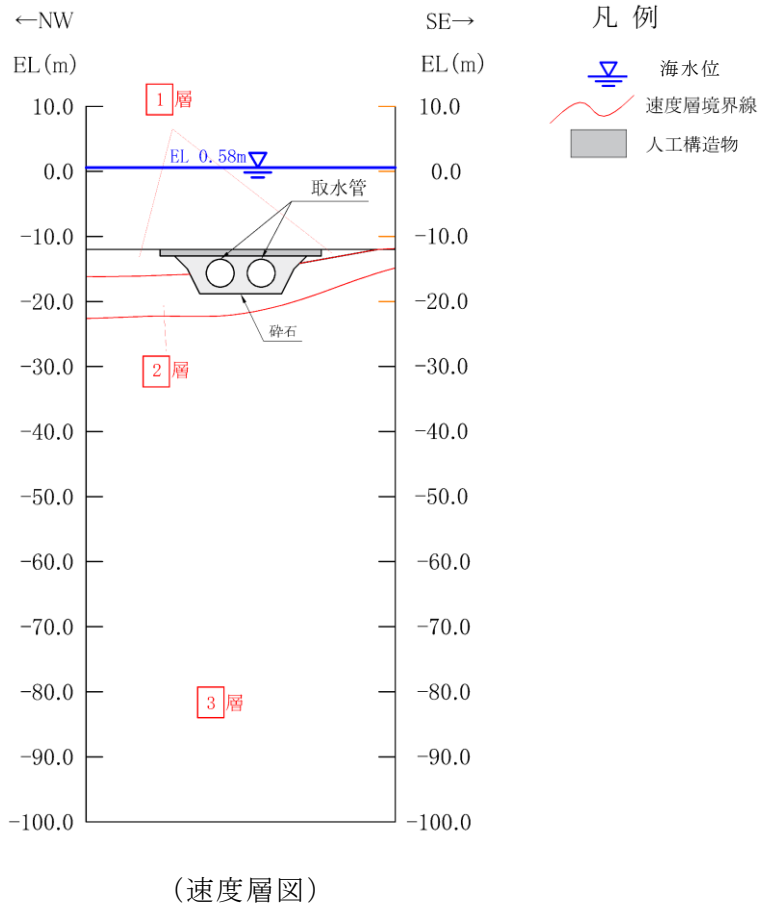
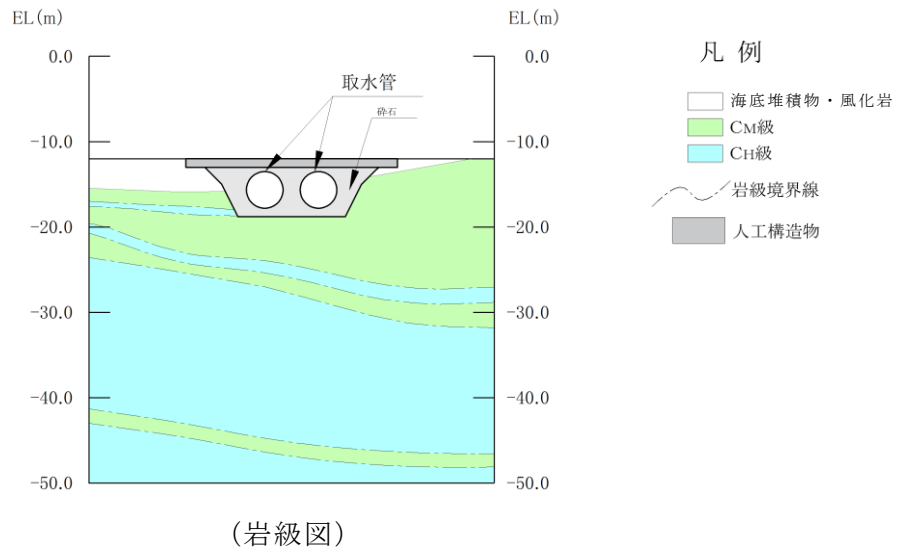


图 2-11 取水管 地質断面图 (E-E 断面)

### 2.3 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 2-2 に、材料の物性値を表 2-3 及び表 2-4 に示す。

表 2-2 使用材料

材料	断面形状	仕様
鋼製管	 t 23mm	SS400

注：片側 1mm の腐食代を考慮する。

表 2-3 材料の物性値

材料	項目	材料諸元
鋼製管	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	77.0
	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$2.00 \times 10^5$
	ポアソン比	0.3

表 2-4 上部被覆コンクリート材料の物性値

材料	項目	材料諸元
コンクリート 設計基準強度：20.6N/mm <sup>2</sup>	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	23.0
	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$2.33 \times 10^4$
	ポアソン比	0.2



## 2.4 地盤及び砕石の物性値

地盤及び砕石については，VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤及び砕石の物性値を表2-5及び表2-6に示す。

表 2-5 解析用物性値（岩盤）

層番号	S波速度 $V_s$ (m/s)	P波速度 $V_p$ (m/s)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比 $\nu$	せん断弾性係数 $G$ ( $\times 10^5$ kN/m <sup>2</sup> )	減衰定数 $h$ (%)
第①層	250	800	20.6	0.446	1.31	3
第②層	900	2100	23.0	0.388	19.0	3
第③層	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
第④層*	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
第⑤層*	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
第⑥層*	2350	4950	27.9	0.355	157.9	3

注記\*：入力地震動の算定においてのみ用いる解析用物性値

表 2-6 砕石の解析用物性値

		砕石
物理特性	密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.56
強度特性	初期せん断強度 $\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	0
	内部摩擦角 $\phi$ (°)	30.96
	残留強度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	0
静的変形特性	静弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	180000
	静ポアソン比 $\nu_s$	0.333
動の変形特性	動せん断弾性係数 $G_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_0=67600$ $G/G_0=1/(1+\gamma/0.000889)$
	動ポアソン比 $\nu_d$	0.45
減衰特性	減衰定数 $h$	$h=0.2557\gamma/(\gamma+0.00114)$

## 2.5 海水位

設計海水位については，取水管の外水圧・内水圧の設定時に考慮する。

設計海水位は，朔望平均満潮位の EL 0.58m とする。

## 2.6 耐震評価フロー

取水管の地震応答解析フロー及び耐震評価フローを図 2-12 及び図 2-13 に示す。

取水管の耐震評価のうち、管軸直交方向については 2 次元有限要素解析より得られた応力を許容応力度法にて照査を行う。また、管軸方向については 2 次元有限要素解析より得られた地盤変位を用いて、応答変位法による応力解析を実施し、算出された応力と、管軸直交方向の検討により算出された曲げ応力を合成した応力を用いて照査を行う。取水管の耐震評価における規格・基準類との関連性について参考資料 1 に記す。

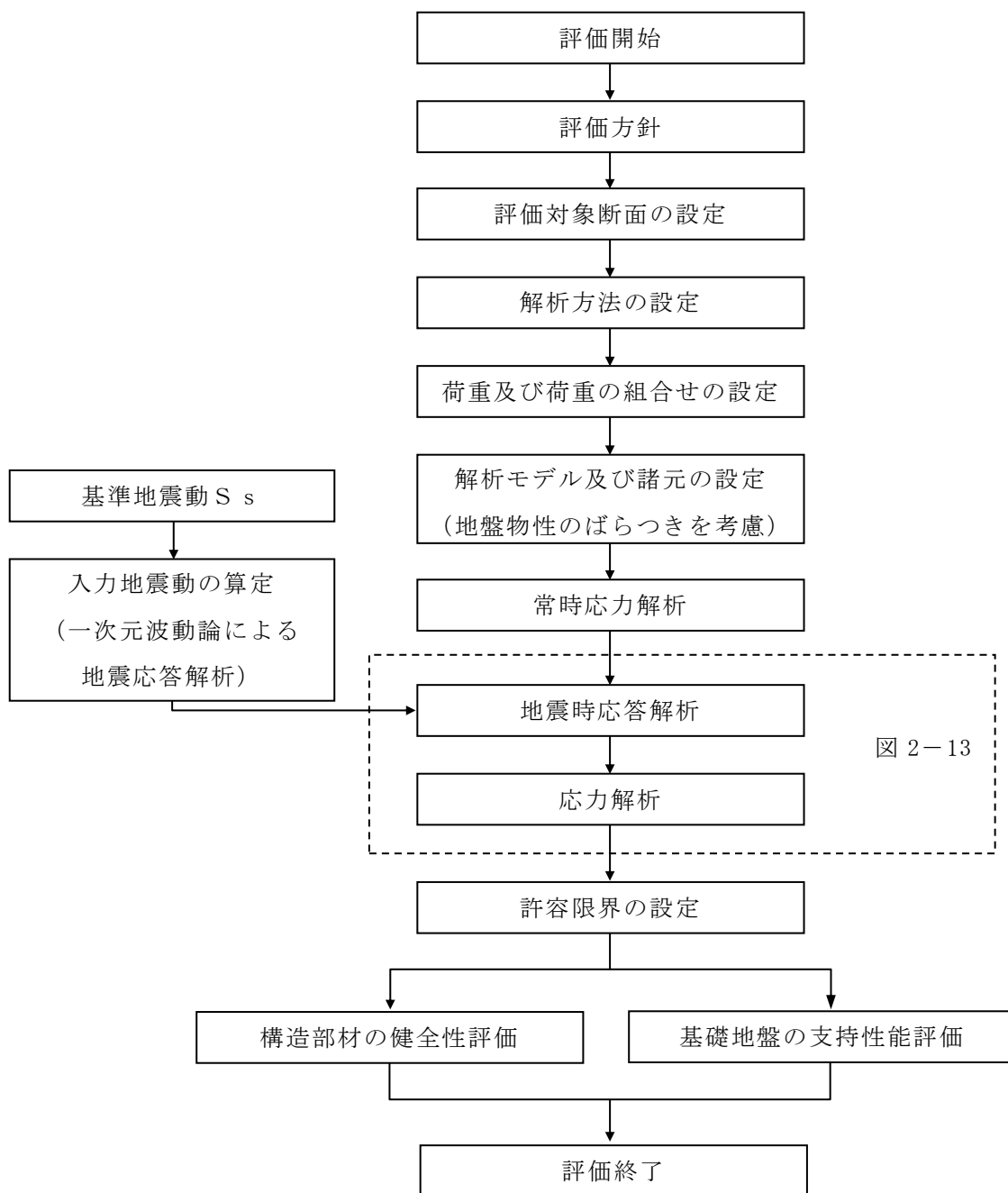


図 2-12 取水管の地震応答解析フロー

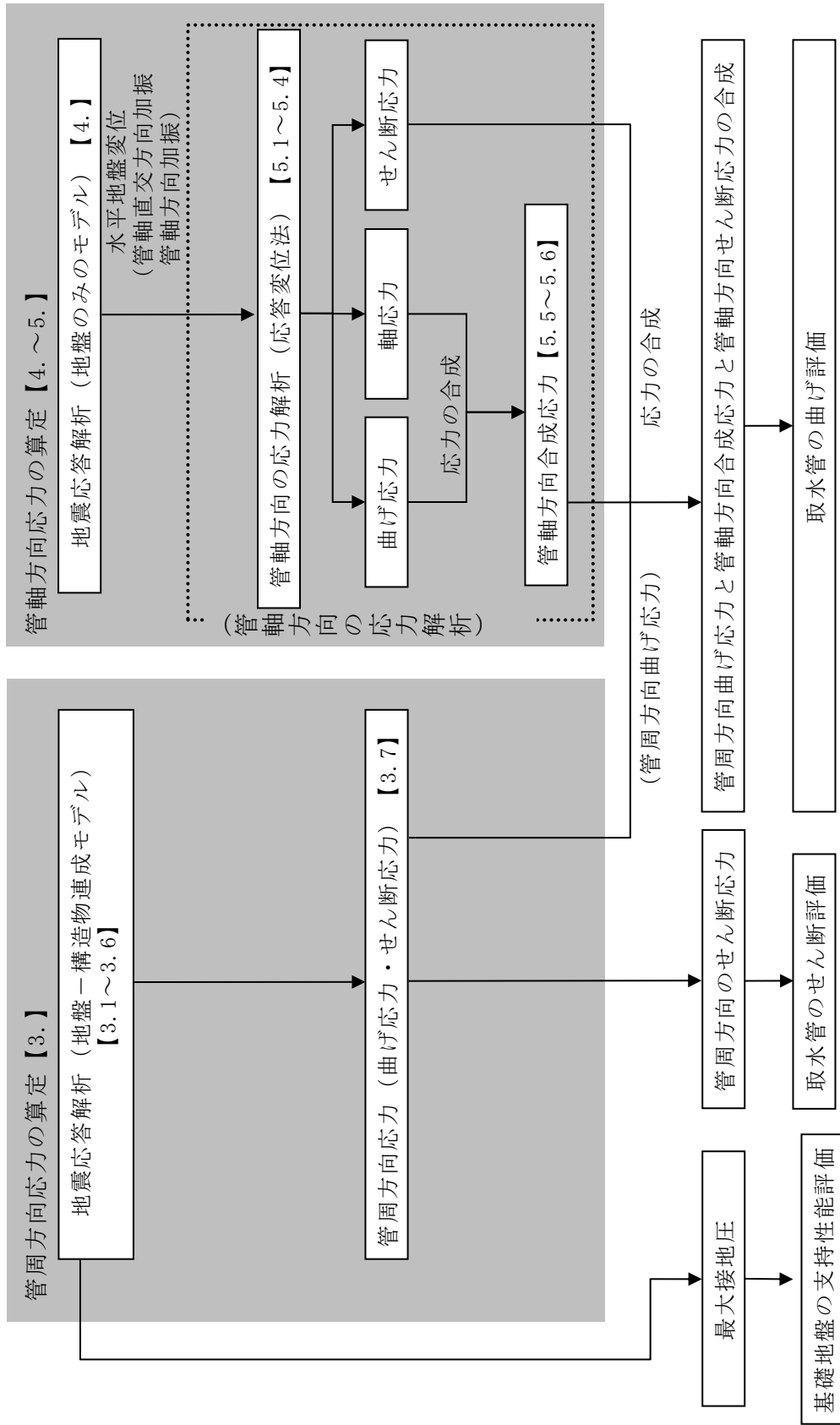


図 2-13 取水管の耐震評価フロー

注：【】内は該当する章番号を示す。

## 2.7 適用規格

取水管の耐震評価にあたり，基本的な耐震評価の流れについては，管周方向と管軸方向の発生応力の組合せを考慮した設計体系について記載のある「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」を参考とする。また，荷重の組合せや，地震応答評価については「コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会2002年制定）」（以下「コンクリート標準示方書2002」という。），「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会）」（以下「J E A G 4 6 0 1 -1987」という。）を適用するが，取水管の使用材料及び材料定数，許容限界については，「鋼構造設計規準 -許容応力度法- 2005年，（社）日本建築学会」を適用する。また，基礎地盤の支持性能の許容限界については，「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）（日本道路協会 平成14年3月）」を適用する。解析によって求められた応力の合成手法については，「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」及び「水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会，1997）」を適用する。

表2-7に適用する規格，基準類を示す。

表 2-7 適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
使用材料及び材料定数	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼構造設計規準 -許容応力度法- 2005 年，(社)日本建築学会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材の材料諸元 (<math>\gamma</math>, E, <math>\nu</math>)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材の減衰定数</li> </ul>
荷重及び荷重の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (土木学会 2002 年制定)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>永久荷重，偶発荷重等の適切な組合せを検討</li> </ul>
許容限界	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼構造設計規準 -許容応力度法- 2005 年，(社)日本建築学会</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材の短期許容応力度とする。</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IV 下部構造編) (日本道路協会 平成 14 年 3 月)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎地盤の支持性能に対する照査は，基礎に発生する応力が極限支持力を下回ることを確認</li> </ul>
評価手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示 (昭和 48 年 9 月 28 日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>管周方向応力と管軸方向応力より合成応力を算出する手法</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>水道用施設耐震工法指針・解説 (日本水道協会, 1997)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>管軸方向応力に生じる軸方向応力と曲げ応力より管軸方向合成応力を算出する手法</li> </ul>
地震応答解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>有限要素法による 2 次元モデルを用いた時刻歴非線形解析</li> <li>有限要素法による 2 次元モデルを用いた等価線形解析</li> </ul>

### 3. 管周方向の地震応答解析

#### 3.1 地震応答解析手法

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる2次元有限要素法解析を用いて、基準地震動  $S_s$  に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行う。

解析手法については、図 3-1 に示す解析手法の選定フローに基づき選定する。

取水管は、基盤となる岩盤を掘削し設置され、周辺を砕石又はコンクリートで埋戻されている。以上より、施設周辺に液状化対象層が存在しないため、解析手法のフローに基づき「②全応力解析」を選定する。

構造部材については、線形はり要素でモデル化する。

また、地盤については、平面ひずみ要素でモデル化することとし、岩盤及び被覆コンクリートは線形でモデル化する。砕石については、地盤のひずみ依存性を適切に考慮できるようマルチスプリングモデルを用いることとし、ばね特性は双曲線モデル（修正 GHE モデル）を用いて非線形性を考慮する。

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

地震応答解析手法の選定フローを図 3-2 に示す。

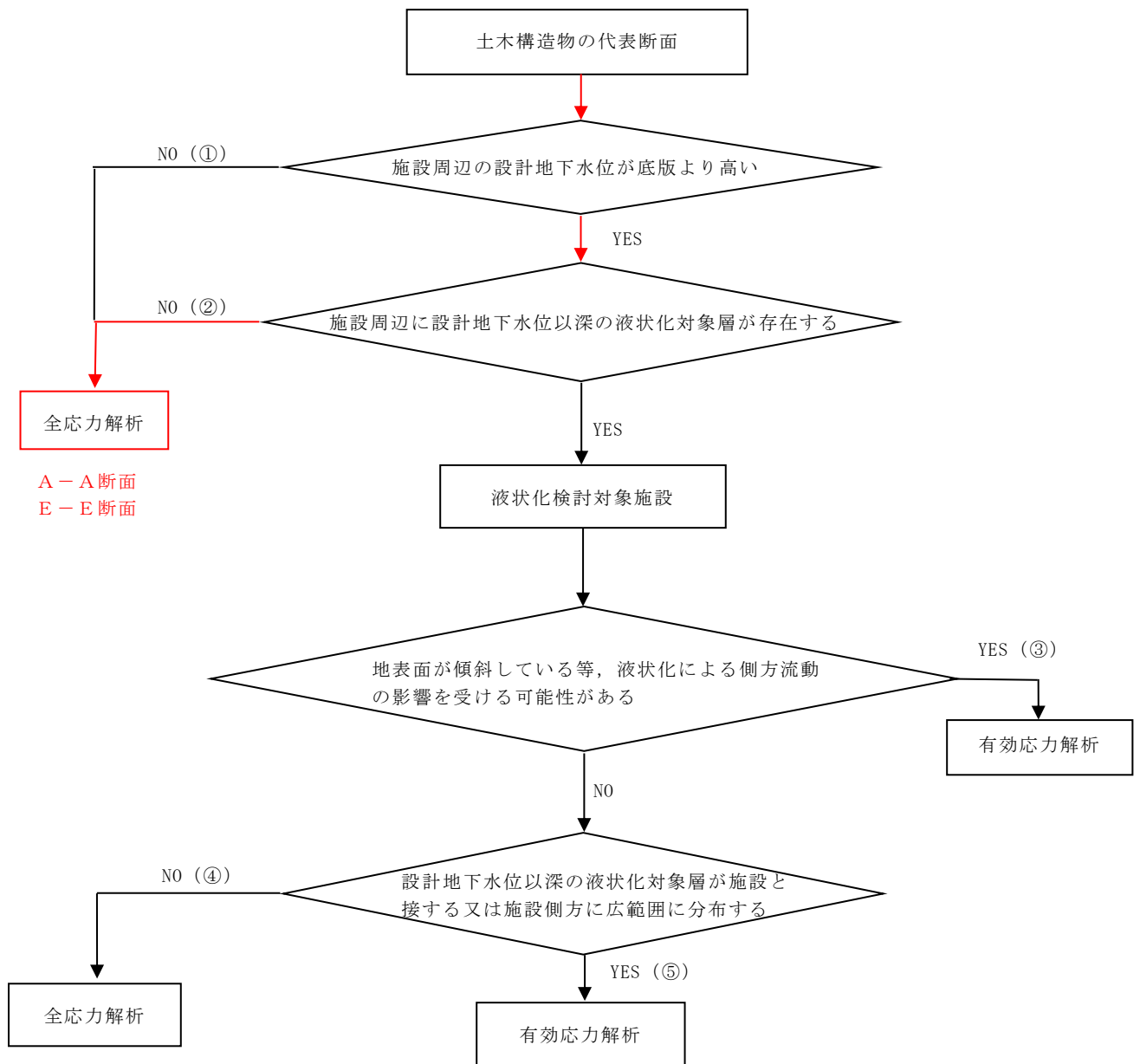


図 3-1 解析手法の選定フロー



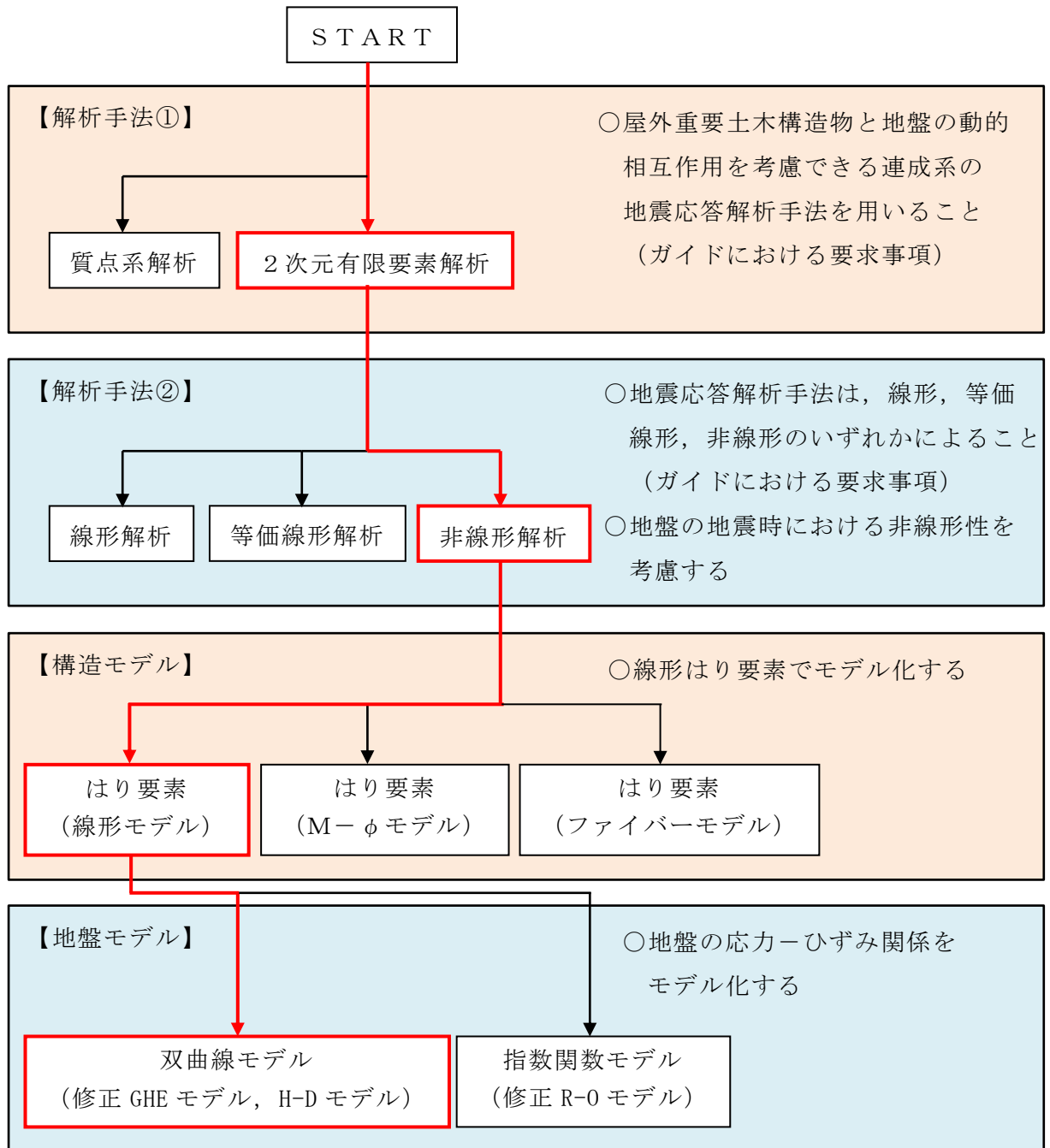


図 3-2 地震応答解析手法の選定フロー

### 3.2 地震応答解析モデルの設定

#### 3.2.1 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。「J E A G 4 6 0 1 -1987」を参考に、図 3-3 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、モデル高さを構造物基礎幅の 1.5 倍～2 倍以上とする。

解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、波動をなめらかに表現するために、対象とする波長の 5 分の 1 程度を考慮し、要素高さを 1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会 2005）」に従い、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度まで細分して設定する。

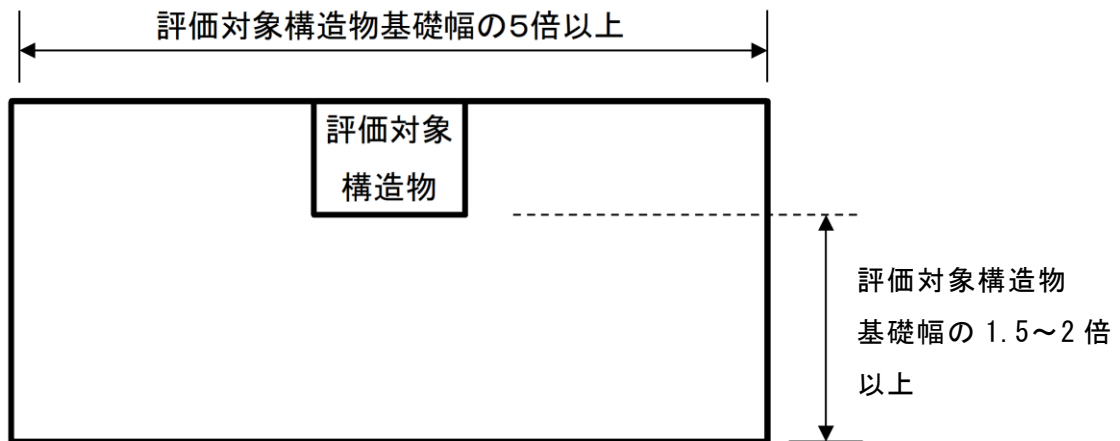


図 3-3 モデル化範囲の考え方

### 3.2.2 境界条件

#### (1) 固有値解析時

固有値解析を実施する際の境界条件は、境界が構造物を含めた周辺地盤の振動特性に影響を与えないよう設定する。ここで、底面境界は地盤のせん断方向の卓越変形モードを把握するために固定とし、側方境界はフリーとする。

境界条件の概念図を図 3-4 に示す。

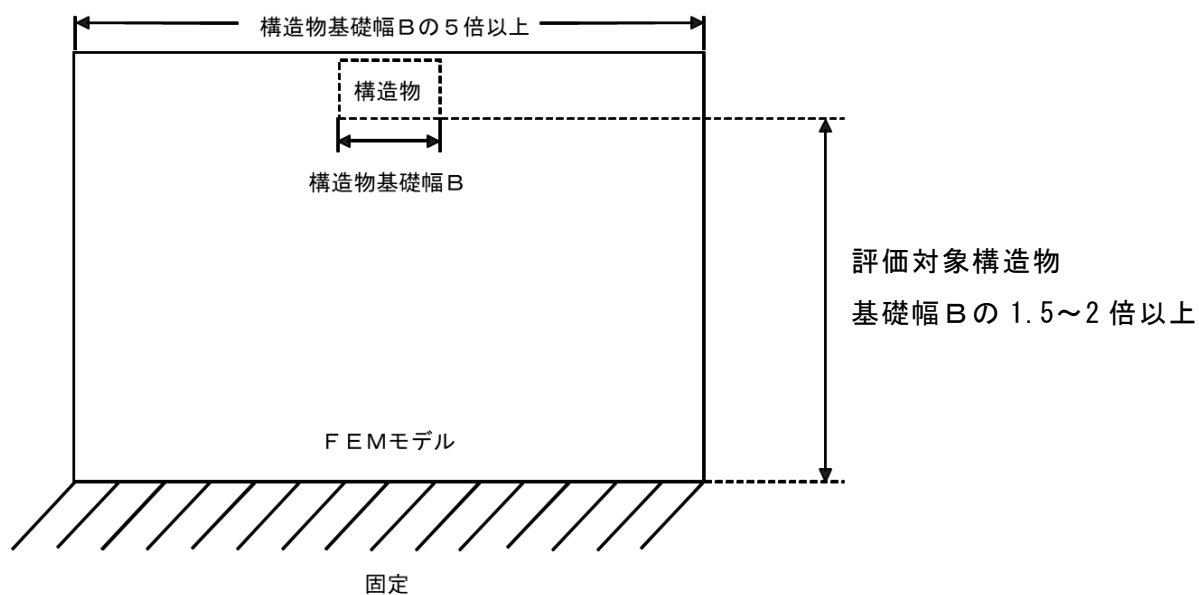


図 3-4 固有値解析における境界条件の概念図

(2) 常時応力解析時

常時応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時応力を算定するために行う。そこで、常時応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図 3-5 に示す。

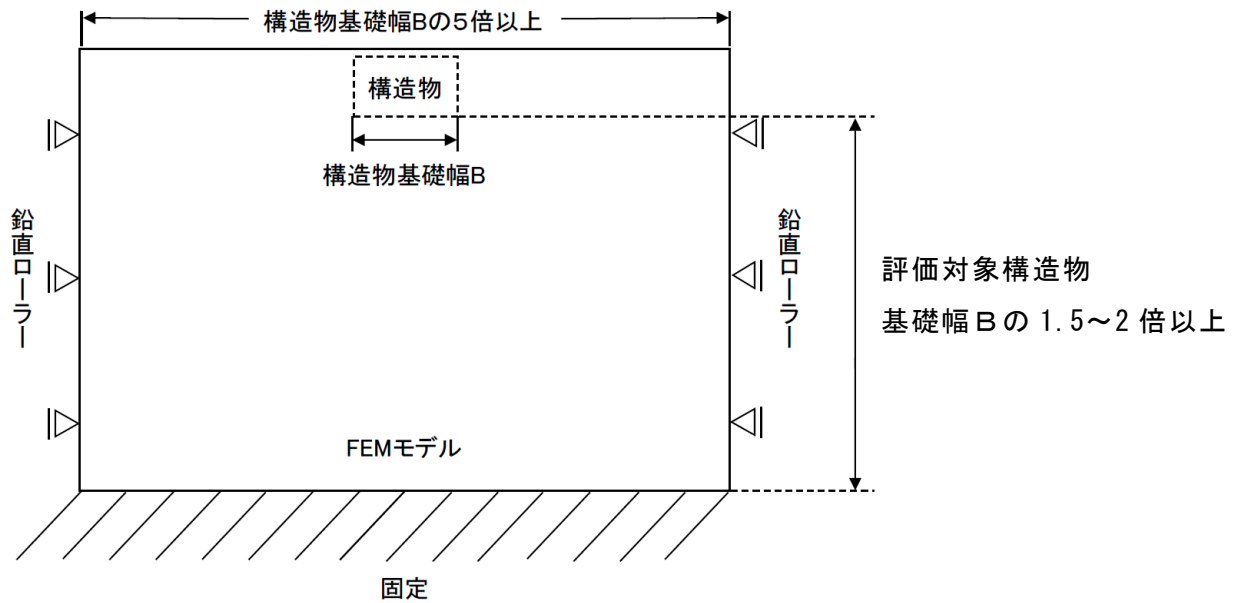


図 3-5 常時応力解析における境界条件の概念図

(3) 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については，有限要素解析における半無限地盤を模擬するため，粘性境界を設ける。地震応答解析モデル図を図 3-6 に示す。

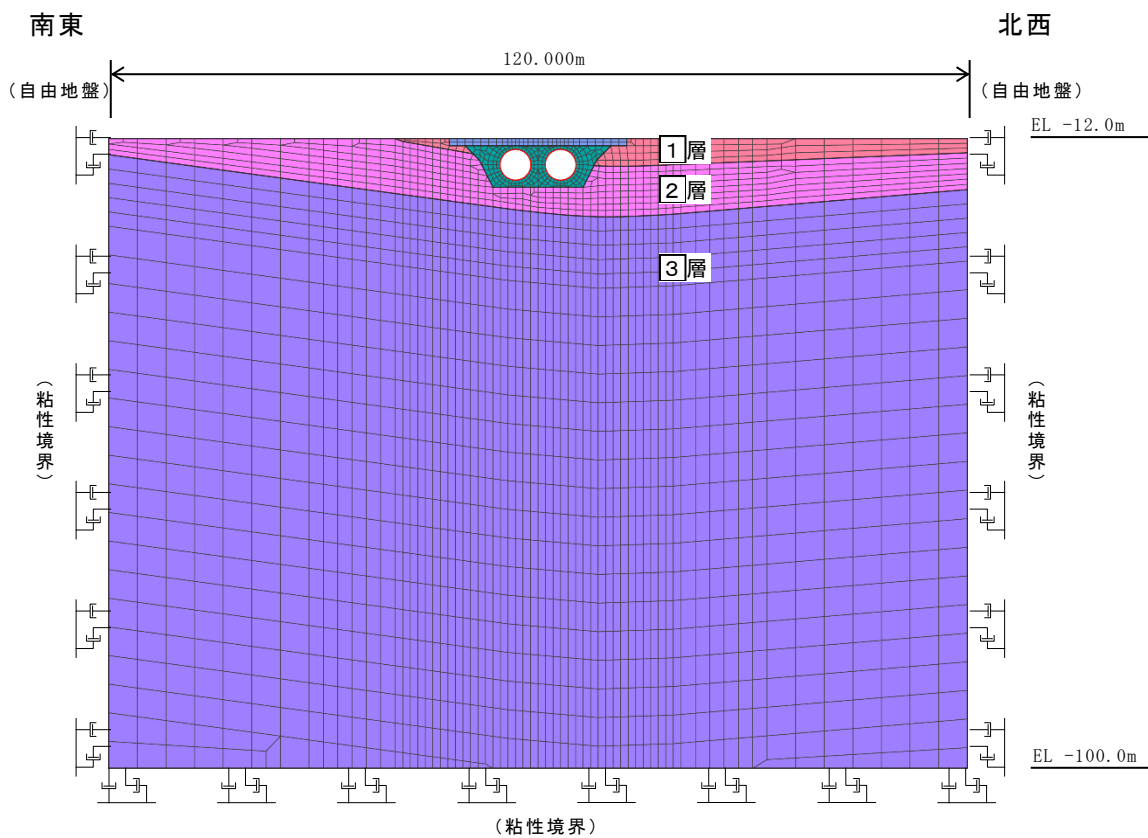


図 3-6 地震応答解析モデル図 (E-E 断面)

### 3.2.3 地盤及び被覆コンクリートのモデル化

岩盤及び被覆コンクリートは線形の平面ひずみ要素で、砕石は非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

### 3.2.4 構造物のモデル化

取水管は線形のはり要素でモデル化する。

取水管の解析モデルにおける構造物部分の拡大図を図 3-7 に示す。

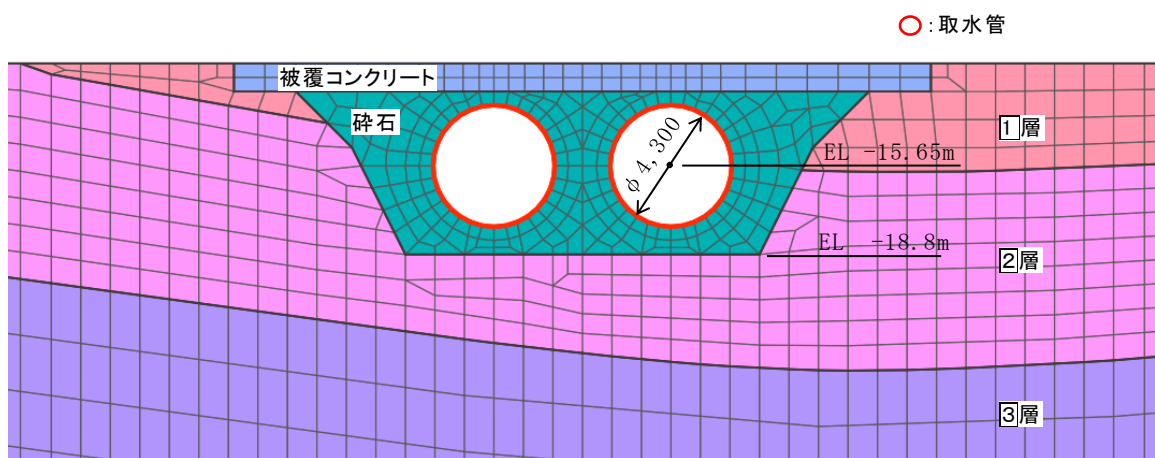


図 3-7 取水管 地震応答解析モデル  
(構造物部分拡大)

### 3.2.5 ジョイント要素の設定

地盤と構造物との接合面にジョイント要素を設けることにより、地震時の地盤と構造物の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、地盤と構造物の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時状態以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。せん断方向については、地盤と構造物の接合面におけるせん断強度以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性をゼロとし、すべりを考慮する。

せん断強度  $\tau_f$  は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  は碎石の  $c$ 、 $\phi$  とする。碎石の粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  は、「道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）（日本道路協会 平成 14 年 3 月）」に記載のある、土とコンクリートの間に栗石を敷く場合の粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  を適用する。強度特性は表 3-1 のとおりとする。また、要素間の粘着力  $c$  及び内部摩擦角  $\phi$  は表 3-2 のとおり設定する。

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

ここに、 $\tau_f$ ：せん断強度

$c$ ：粘着力（＝初期せん断強度  $\tau_0$ ）

$\phi$ ：内部摩擦角

表 3-1 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 $c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tan \phi$ ( $\phi$ ：内部摩擦角 (°))
碎石	0	0.6

表 3-2 要素間の粘着力と内部摩擦角

接合条件		粘着力 $c$ (N/mm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)
材料 1	材料 2		
取水管	碎石	材料 2 の $c$	材料 2 の $\phi$

ジョイント要素のばね定数は、「原子力発電所屋外需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）」を参考に、数値計算上、不安定な挙動を起こさない程度に周囲材料の剛性よりも十分に大きな値を設定する。表 3-3 にジョイント要素のばね定数を示す。

また、ジョイント要素の力学特性を図 3-8 に、ジョイント要素の配置を図 3-9 に示す。

表 3-3 ジョイント要素のばね定数

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

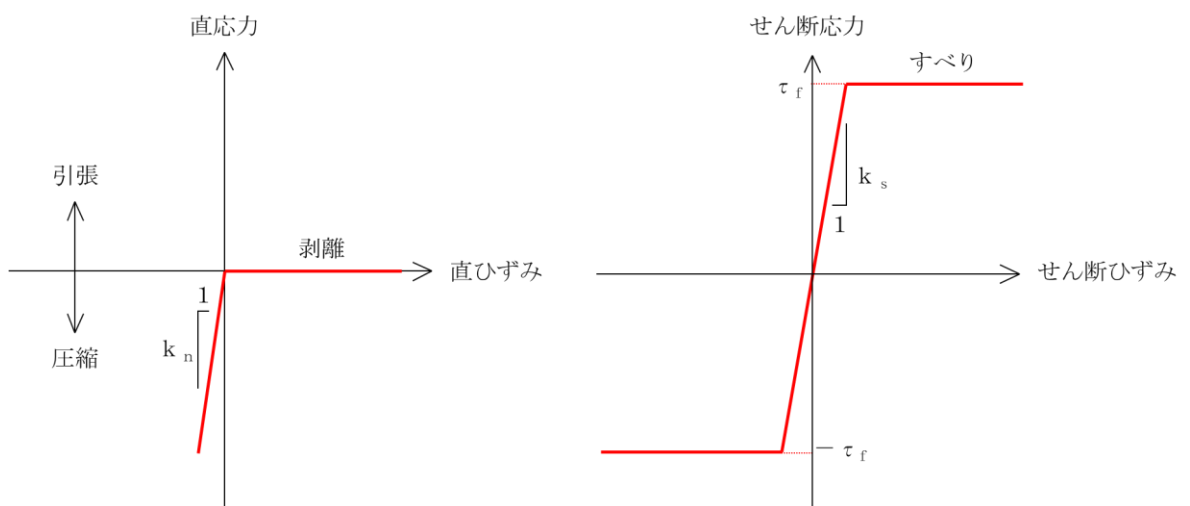


図 3-8 ジョイント要素の力学特性



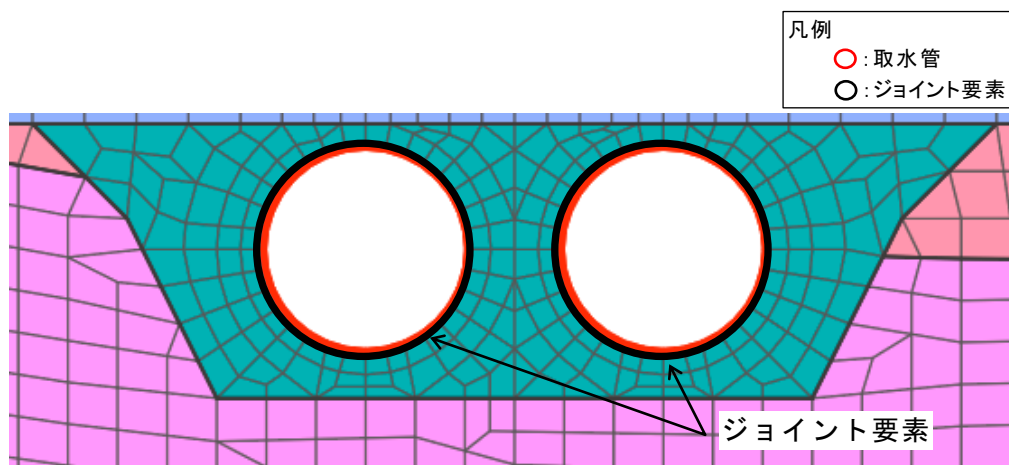


図 3-9 ジョイント要素配置箇所断面図

### 3.3 減衰定数

減衰定数は、「補足-026-01 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「9. 地震応答解析における減衰定数」に基づき、粘性減衰及び履歴減衰で考慮する。

粘性減衰は、固有値解析にて求められる解析モデル全体の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。

Rayleigh減衰の設定フローを図3-10に示す。

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

[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

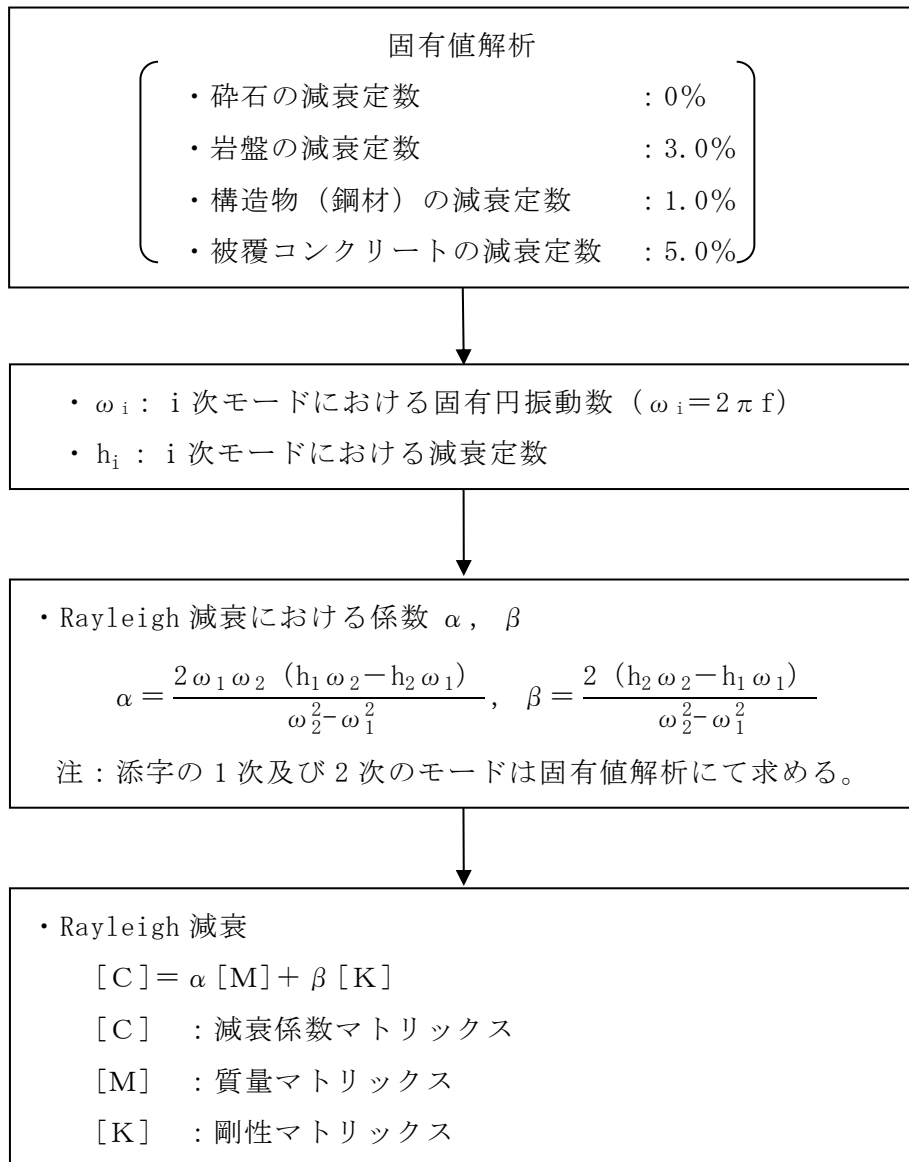


図 3-10 Rayleigh 減衰の設定フロー

Rayleigh 減衰における係数  $\alpha$  ,  $\beta$  は、低次のモードの変形が支配的となる地中埋設構造物に対して、その特定の振動モードの影響が大きいことを考慮して、固有値解析結果より得られる卓越するモードの減衰と Rayleigh 減衰が一致するように設定する。なお、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及びモード図にて決定するが、係数  $\alpha$  ,  $\beta$  が負値となる場合は当該モードを選定しない。

$$h_i = \alpha / 2 \omega_i + \beta \omega_i / 2$$

$h_i$  : 固有値解析により求められた  $i$  次モードの減衰定数

$\omega_i$  : 固有値解析により求められた  $i$  次モードの固有円振動数

固有値解析結果の一覧を表 3-4 に、固有値解析におけるモード図を図 3-11 及び図 3-12 に、係数  $\alpha$  ,  $\beta$  を表 3-5 に、固有値解析結果に基づき設定した Rayleigh 減衰を図 3-13 に示す。

表 3-4 固有値解析結果

	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)		刺激係数		備考
		Tx	Ty	$\beta_x$	$\beta_y$	
1	3.686	72	0	135.700	0.093	1次として採用
2	8.151	0	59	0.240	-122.300	—
3	8.774	14	0	-58.610	0.073	2次として採用
4	9.576	0	6	0.072	41.260	—
5	12.478	3	0	28.800	-4.065	—
6	13.539	0	12	-2.921	-54.880	—
7	13.783	0	2	4.087	18.790	—
8	16.805	2	0	-25.440	9.218	—
9	17.932	1	2	4.792	20.830	—
10	18.270	0	0	-12.760	0.4575	—

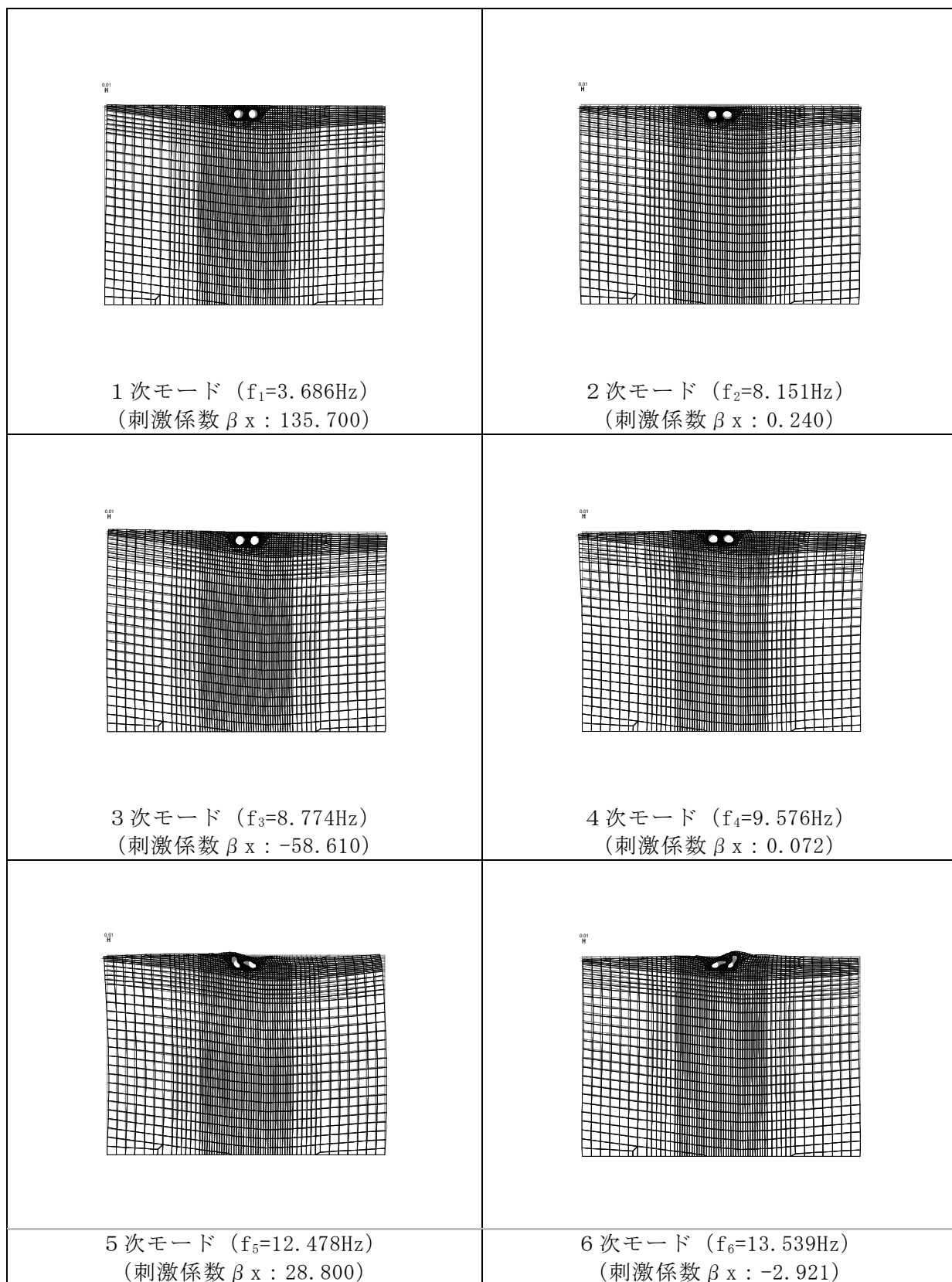


図 3-11 固有値解析結果 (モード図) (1/2)

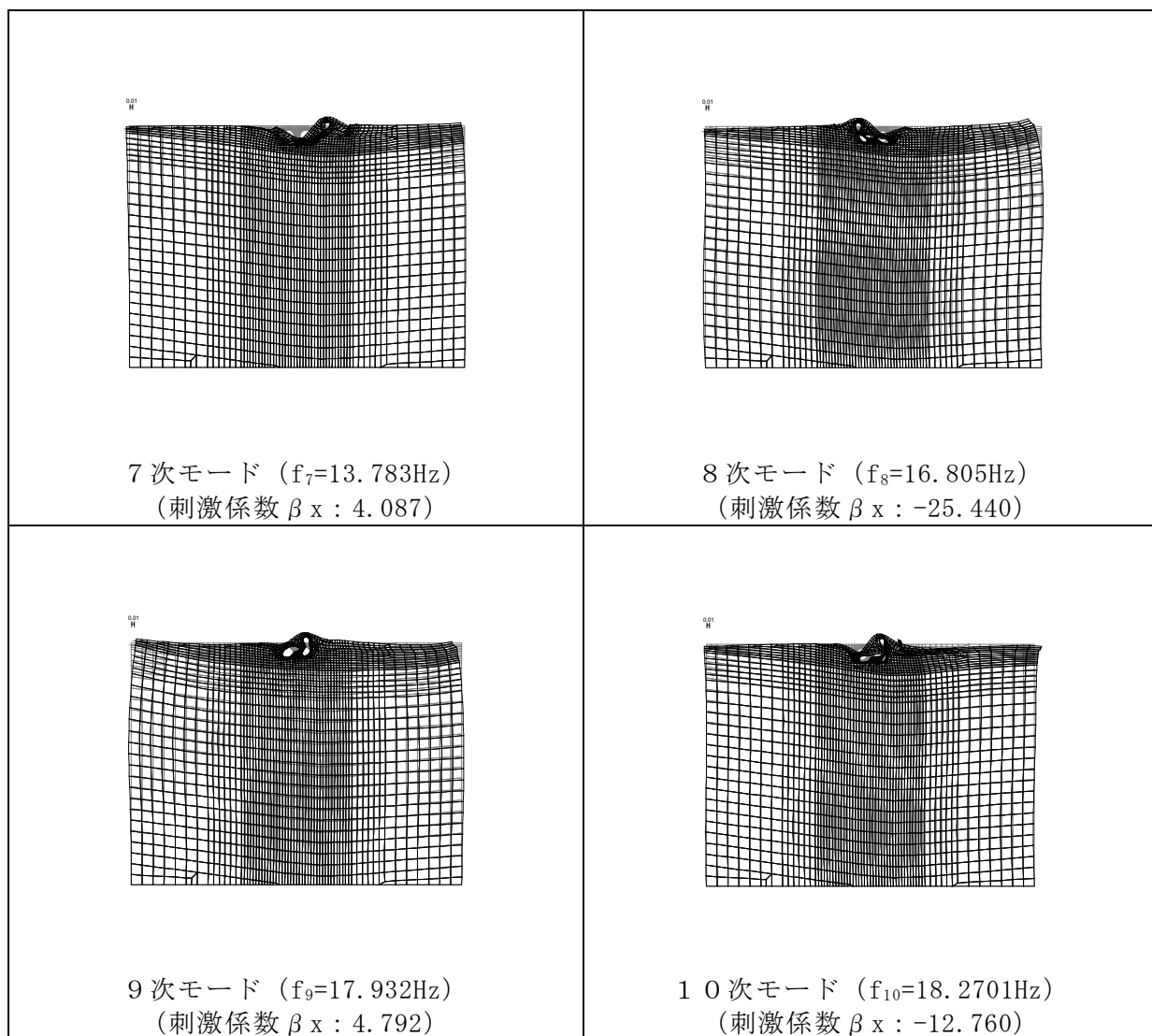


図 3-12 固有値解析結果 (モード図) (2/2)

表 3-5 Rayleigh 減衰における係数  $\alpha$ ,  $\beta$  の設定結果

評価対象断面	$\alpha$	$\beta$
E-E断面	$9.780 \times 10^{-1}$	$7.660 \times 10^{-4}$

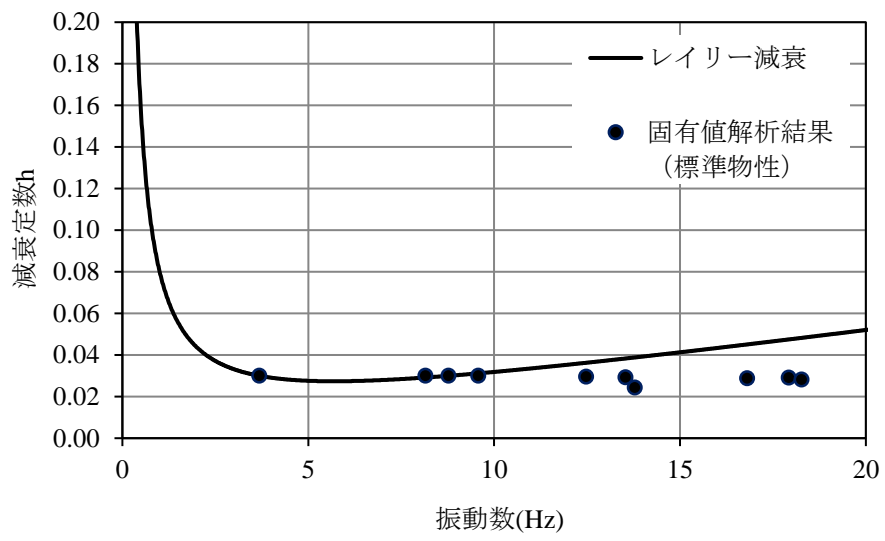


図 3-13 設定した Rayleigh 減衰

### 3.4 荷重及び荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせて設定する。

なお、取水管は運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態の影響を受けないことから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

種別	荷重		算定方法の概要	
永久荷重 (常時荷重)	固定荷重	躯体自重	○	設計図書に基づいて、浮力を考慮して設定する。
		機器・配管荷重	—	機器・配管等は設置されない。
	積載荷重	静止土圧	○	常時応力解析により設定する。
		外水圧	○	設計海水位を考慮して設定する。
		内水圧	○	設計海水位を考慮して設定する。
		積雪荷重	—	埋設構造物であるため、積雪荷重、風荷重、温度荷重等は作用しない。
		土被り荷重	○	常時応力解析により設定する。
永久上載荷重	○	被覆コンクリートの重量に基づいて設定する。		
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動		○	基準地震動 $S_s$ による水平・鉛直同時加振を考慮する。
	鉛直地震動		○	
	動水圧		○	地震時動水圧を付加質量により考慮する。

#### 3.4.1 躯体自重

取水管の躯体自重は、鋼材の単位体積重量と体積から算定する。なお、取水管はすべて水中に埋没しているため浮力が作用することから、鋼材の単位体積重量から海水の単位体積重量を差し引いた有効単位体積重量を用いる。



### 3.4.2 外水圧及び内水圧

外水圧及び内水圧は設計海水位 EL 0.58m を考慮して設定する。また、その際、内水圧については取水管の損失水頭を考慮して設定する。外水圧及び内水圧の設定概念図を図 3-14 に示す。

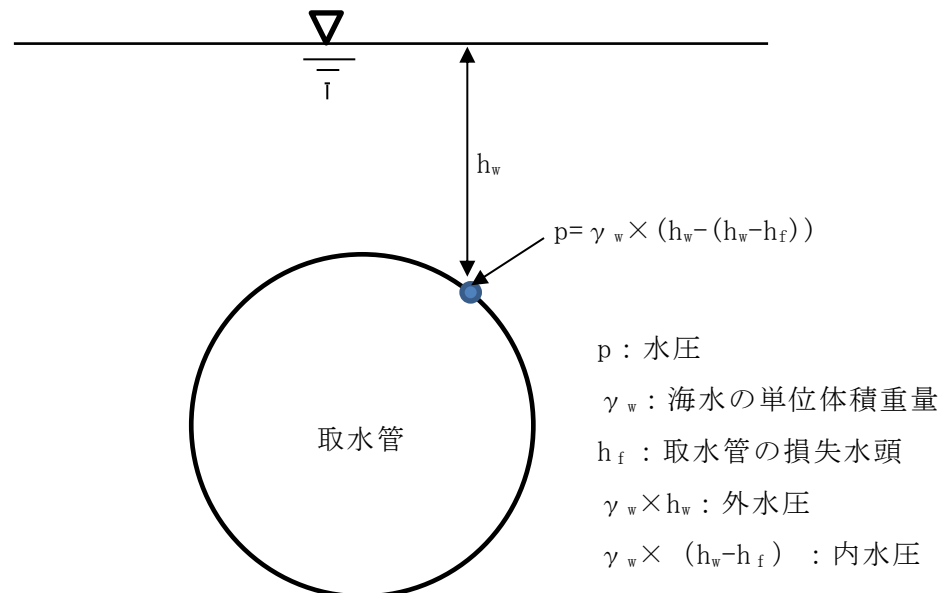


図 3-14 外水圧及び内水圧の概念図

### 3.4.3 動水圧

取水管の動水圧は，取水管内容水重量を付加質量として取水管構成節点に与えることで，応答加速度に応じた動水圧を作用させる。なお，各構成節点の付加質量は，取水管内空面積の分担を考慮して，図 3-15 に示すとおり水平成分と鉛直成分で個別に算定する。

$$P_{dwhi} = \pm k_{hi} \cdot \gamma_w \cdot A_{hi}$$

$$P_{dwvi} = \pm k_{vi} \cdot \gamma_w \cdot A_{vi}$$

ここに， $P_{dwhi}$  :  $i$  節点の動水圧の水平成分

$P_{dw}$  :  $i$  節点の動水圧の鉛直成分

$k_{hi}$  :  $i$  節点の水平震度 ( $= \alpha_{hi}/g$ )

$k_{vi}$  :  $i$  節点の鉛直震度 ( $= \alpha_{vi}/g$ )

$\alpha_{hi}$  :  $i$  節点の水平加速度

$\alpha_{vi}$  :  $i$  節点の鉛直加速度

$g$  : 重力加速度 ( $= 9.80665 \text{ m/s}^2$ )

$\gamma_w$  : 海水重量 ( $= 10.1 \text{ kN/m}^3$ )

$A_{hi}$  :  $i$  節点の水平成分の分担面積 (図 3-15 参照)

$A_{vi}$  :  $i$  節点の鉛直成分の分担面積 (図 3-15 参照)

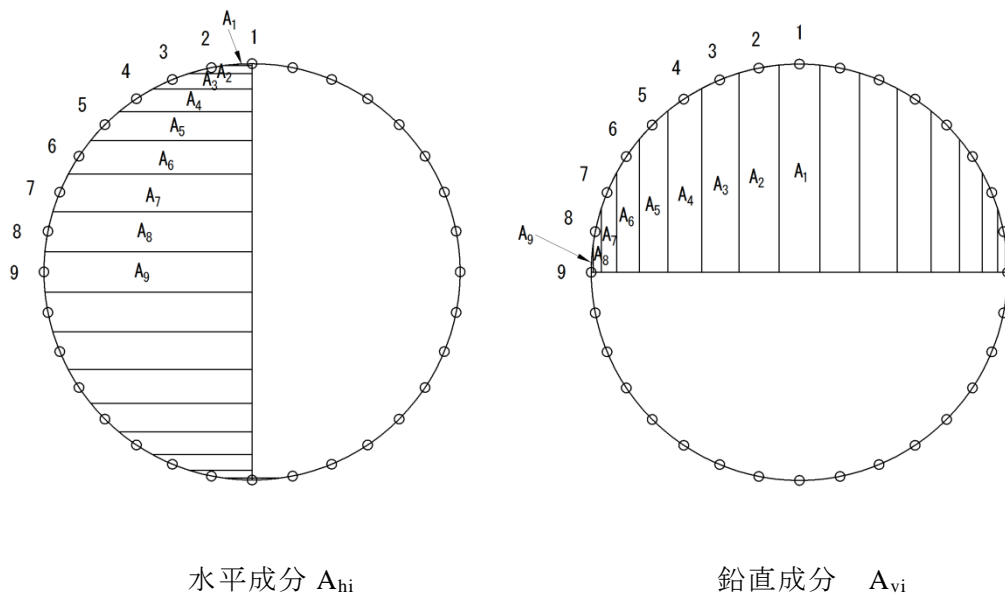


図 3-15 動水圧の概念図

### 3.5 地震応答解析の解析ケース

#### 3.5.1 耐震評価における解析ケース

##### (1) 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

取水管の周囲には、主として岩盤が分布しており、岩盤のばらつきについて影響を確認する。ばらつきを考慮する物性値は岩盤のせん断変形を定義するせん断弾性係数とし、平均値を基本ケース（表 3-7 に示すケース①）とした場合に加えて、平均値±1.0×標準偏差（ $\sigma$ ）のケース（表 3-7 に示すケース②及び③）について確認を行う。ここで、取水管周辺には碎石が存在するが、碎石については「補足-023-01 地盤の支持性能について」において繰り返し三軸試験の結果よりばらつきの影響が少ないことを確認しており、碎石のばらつきは考慮しない。

表 3-7 取水管の耐震評価における解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性
		岩盤 ( $G_d$ : 動せん断 弾性係数)
ケース① (基本ケース)	全応力解析	平均値
ケース②	全応力解析	平均値 + 1 $\sigma$
ケース③	全応力解析	平均値 - 1 $\sigma$

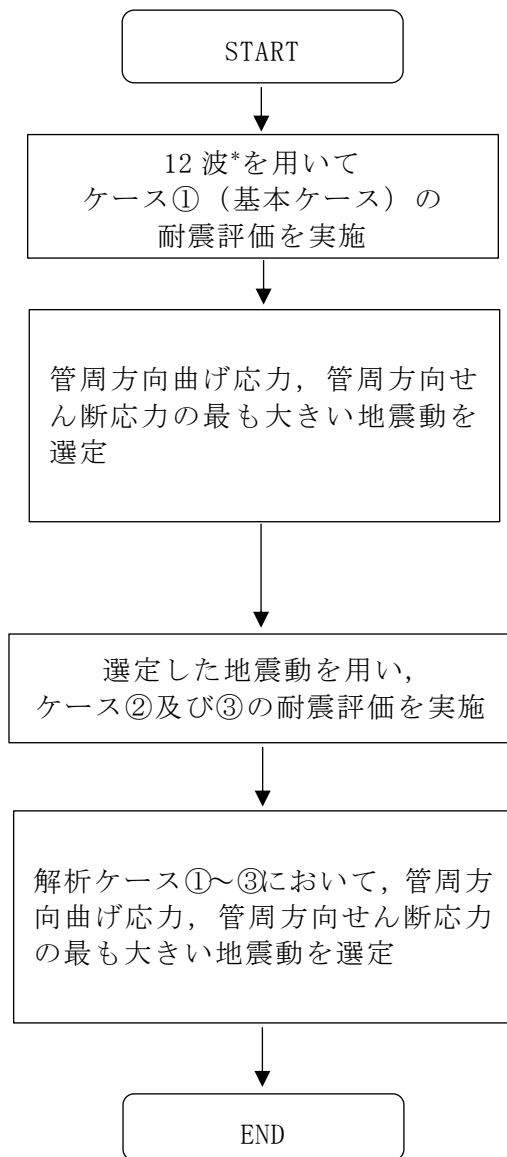
(2) 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価においては、基準地震動  $S_s$  全波（6波）及びこれらに位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた全12波に対し、基本ケース（ケース①）を実施する。基本ケースにおいて、管周方向曲げ応力並びに管周方向せん断応力の最も大きい地震動を用いて、表3-8に示す解析ケース（ケース②及び③）を実施する。また、応力解析の照査値が最大となる地震動の選定フローを図3-16に示す。

表3-8 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①		ケース②		ケース③	
		基本ケース		地盤物性のばらつき ( $+1\sigma$ )を考慮した解析ケース		地盤物性のばらつき ( $-1\sigma$ )を考慮した解析ケース	
地盤物性		平均値		平均値 $+1\sigma$		平均値 $-1\sigma$	
地震動 (位相)	$S_s - D$	++*	○	基準地震動 $S_s$ (6波) に位相反転を考慮した地震動 (6波) を加えた全12波に対し、ケース① (基本ケース) を実施し、管周方向曲げ応力、管周方向せん断応力の最も大きい地震動を用いてケース②及び③を実施する。			
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	$S_s - F1$	++*	○				
	$S_s - F2$	++*	○				
	$S_s - N1$	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - N2$ (NS)	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - N2$ (EW)	++*	○				
		-+*	○				

注記\*：地震動の位相について、++の左側は水平動，右側は鉛直動を表し、「-」は位相を反転させたケースを示す。



注記\*：基準地震動S s波（6波）に位相反転を考慮した地震動（6波）を加えた12波

図 3-16 応力解析の照査値が最大となる地震動の選定フロー

### 3.6 評価内容

#### 3.6.1 入力地震動の設定

入力地震動は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動  $S_s$  を一次元波動論により地震応答解析モデル下端位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

図3-17に入力地震動算定の概念図を示す。入力地震動の算定には、解析コード「SHAKE」及び「microSHAKE/3D」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

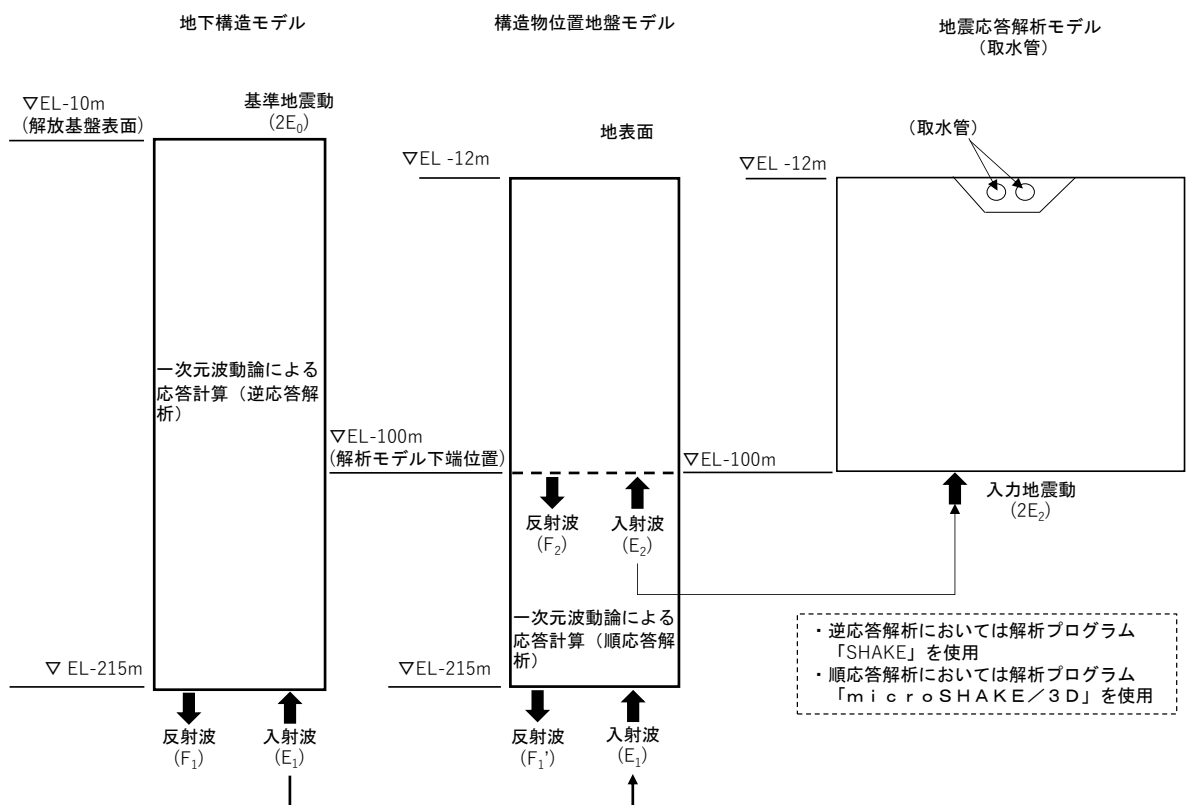
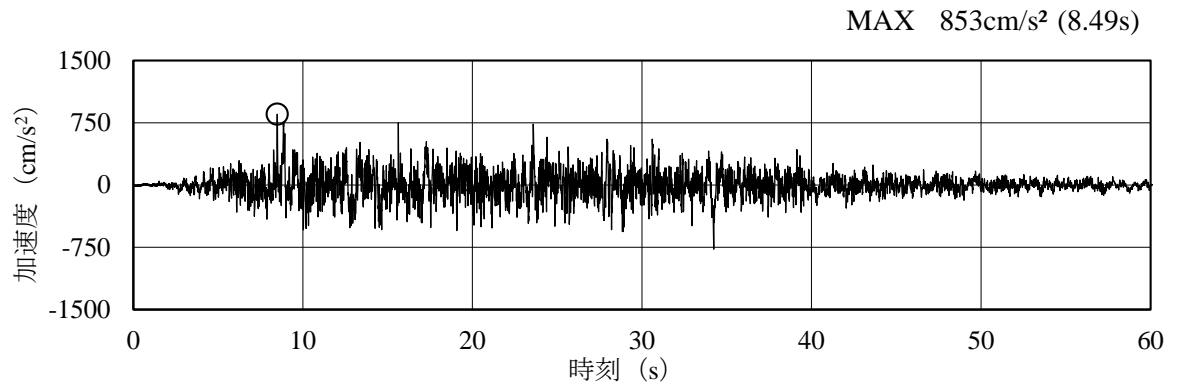


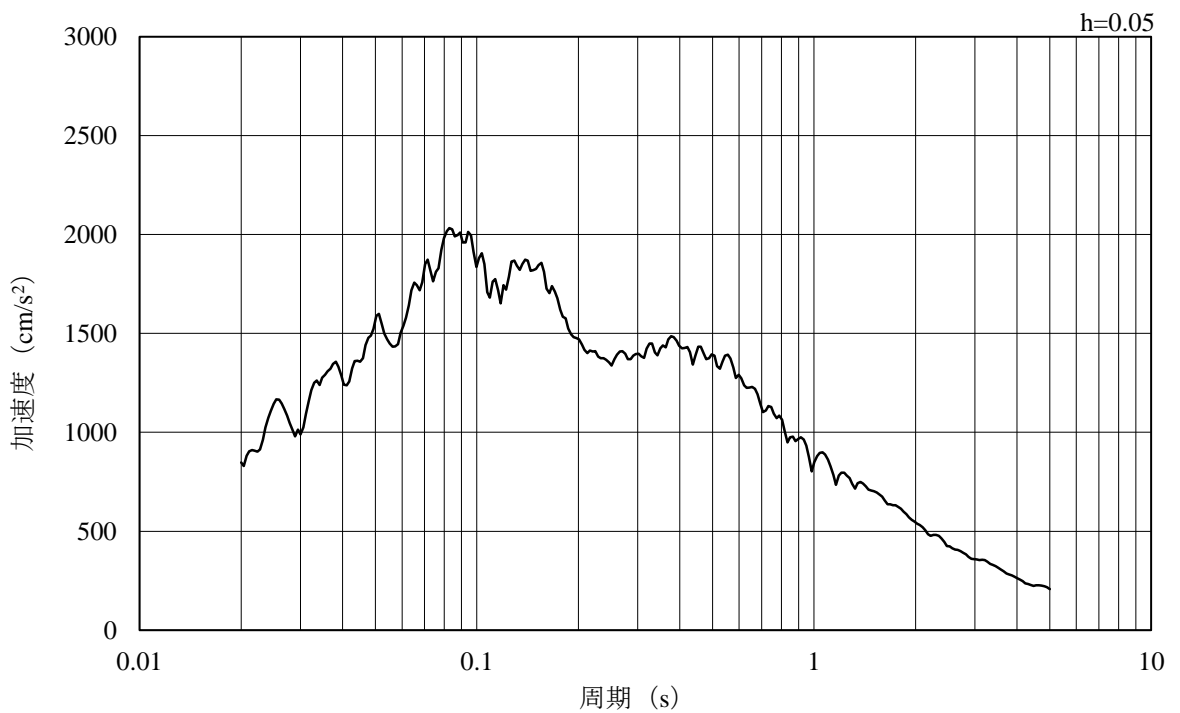
図3-17 入力地震動算定の概念図

### 3.6.2 入力地震動の結果

図 3-18～図 3-29 に入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを示す。

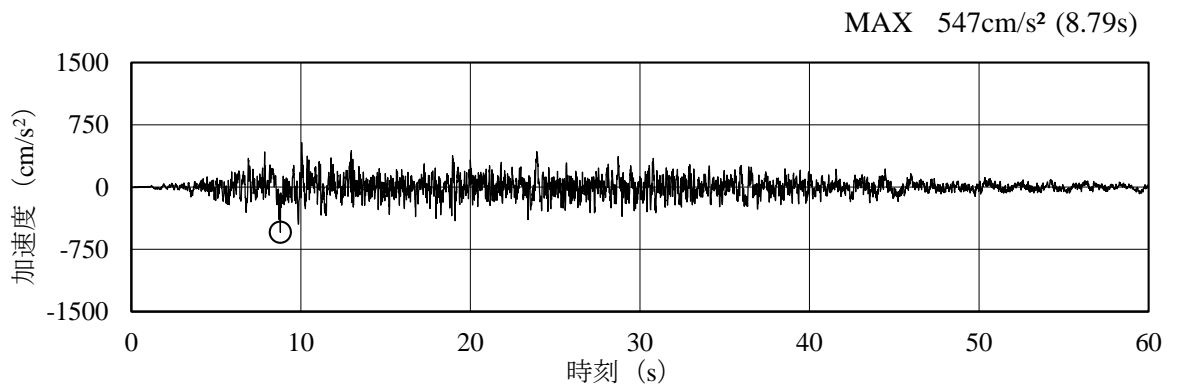


(a) 加速度時刻歴波形

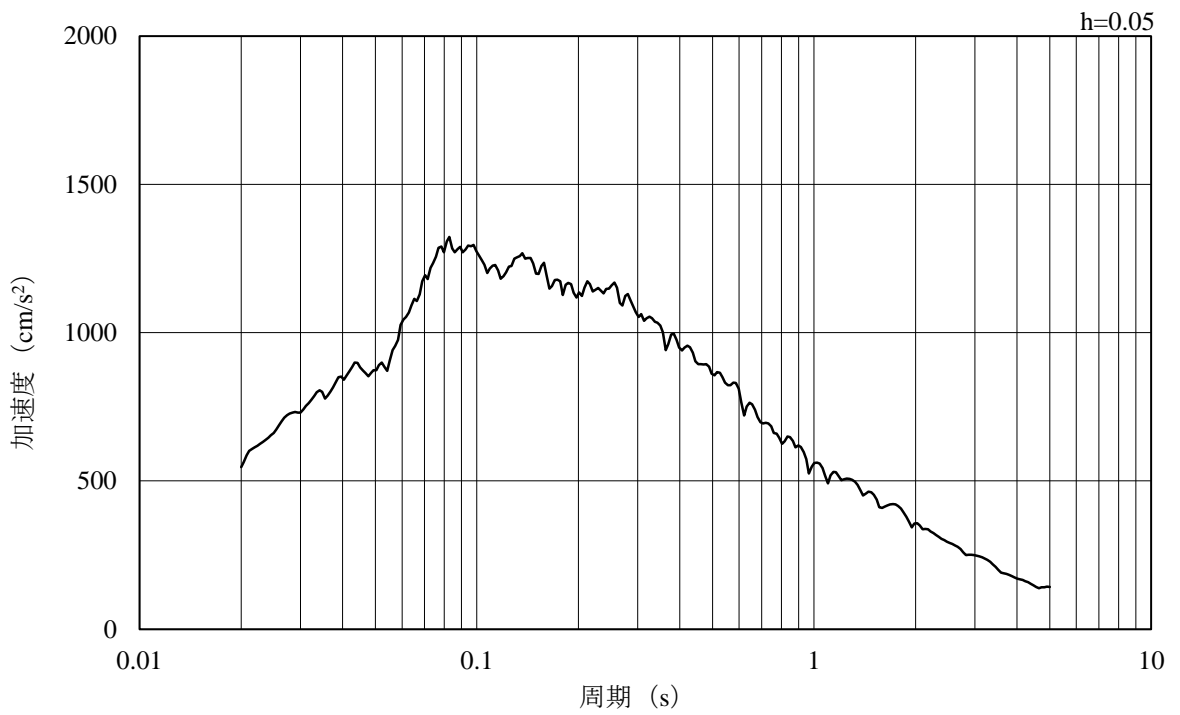


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-18 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(水平成分：S s - D)



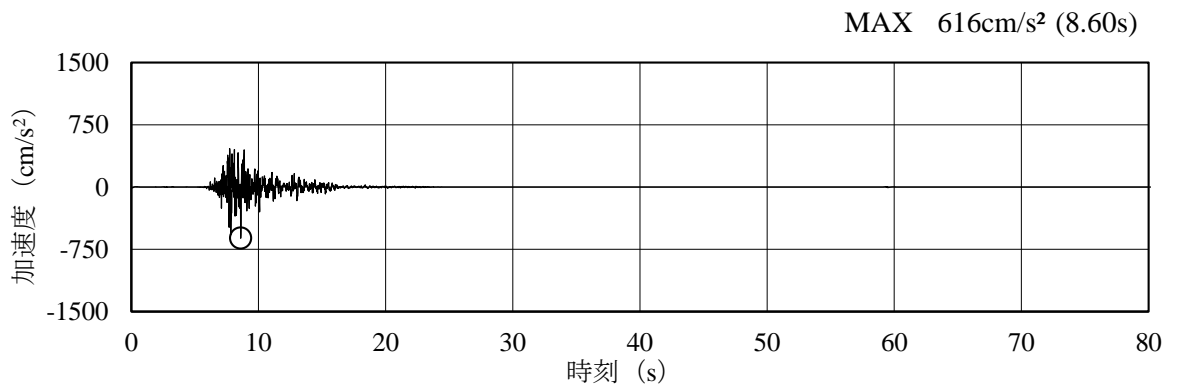
(a) 加速度時刻歴波形



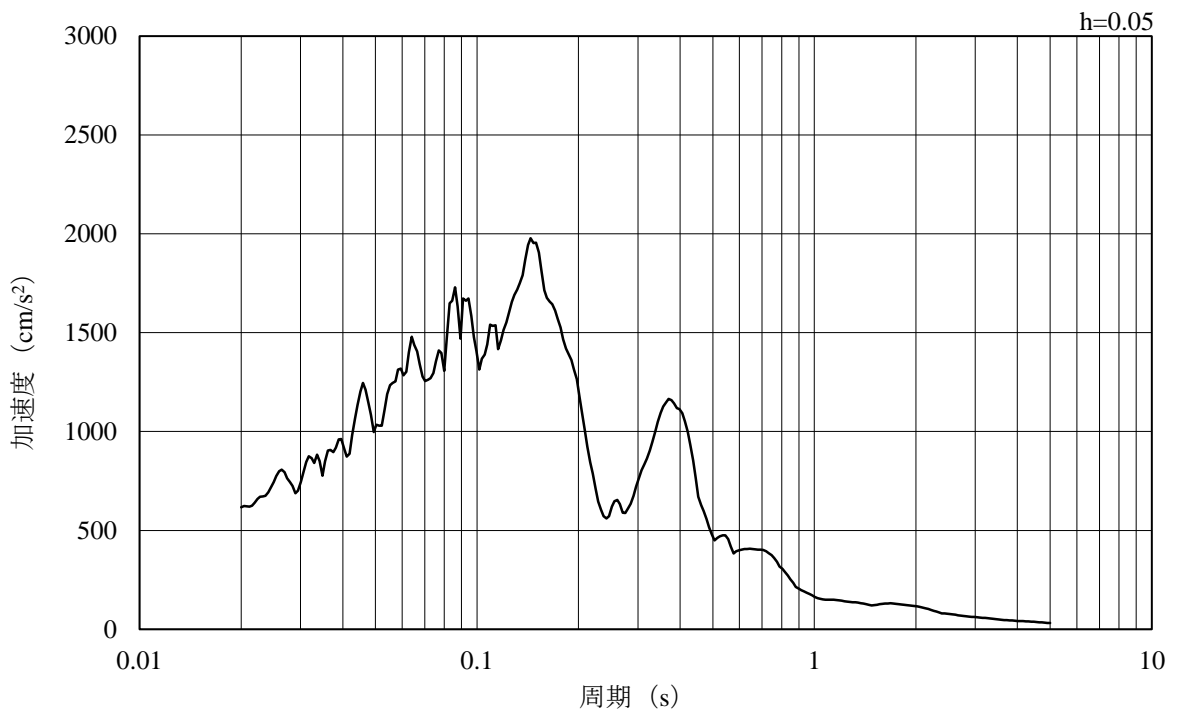
(b) 加速度応答スペクトル

図 3-19 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(鉛直成分 : S s - D)



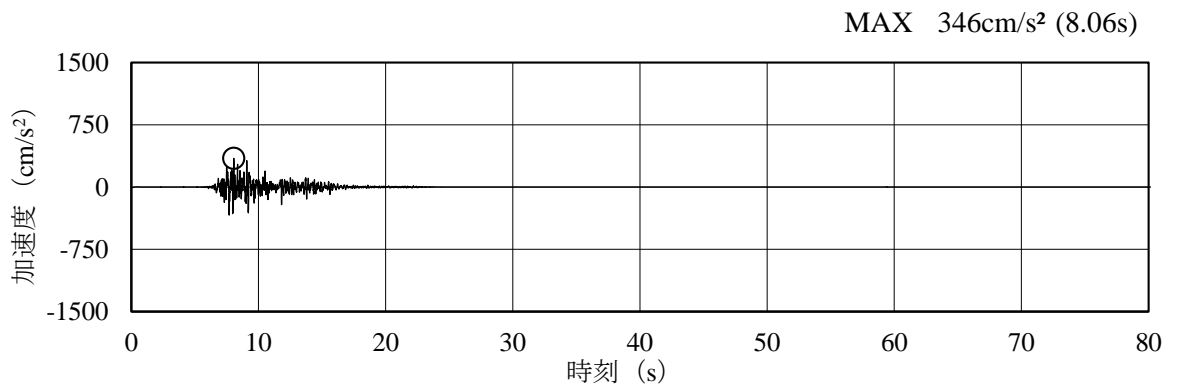


(a) 加速度時刻歴波形

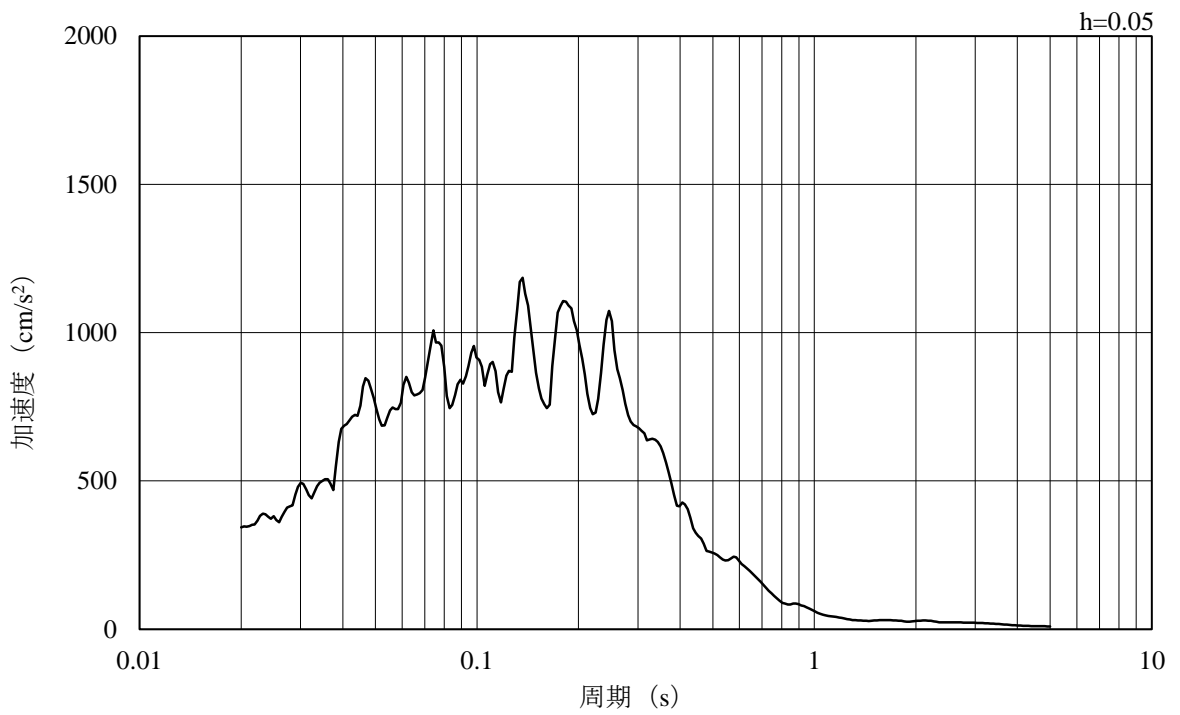


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-20 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(水平成分 : S<sub>s</sub> - F 1)

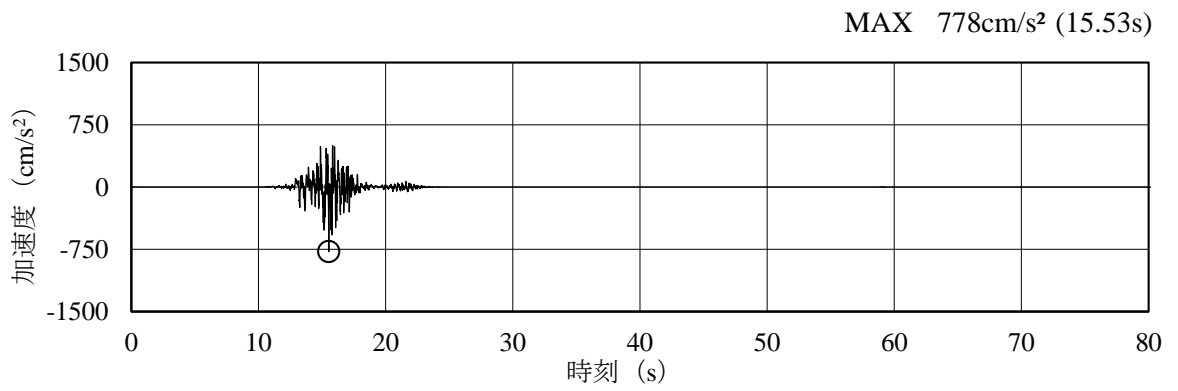


(a) 加速度時刻歴波形

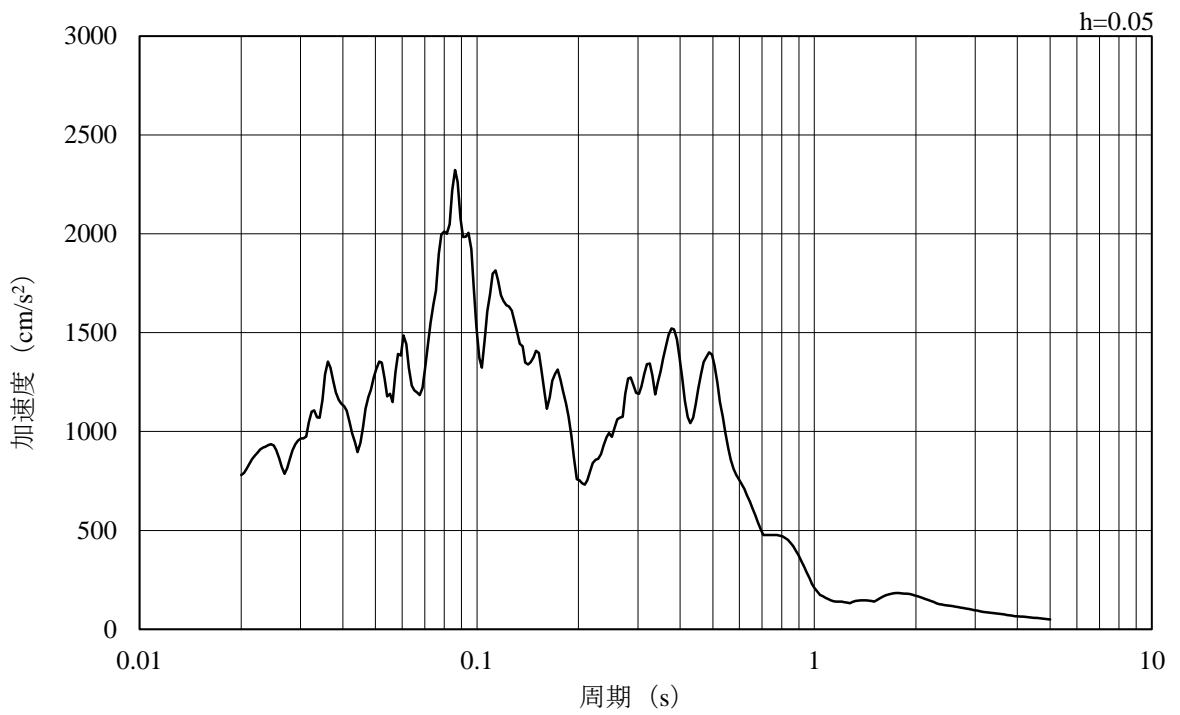


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-21 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(鉛直成分 : S<sub>s</sub> - F 1)

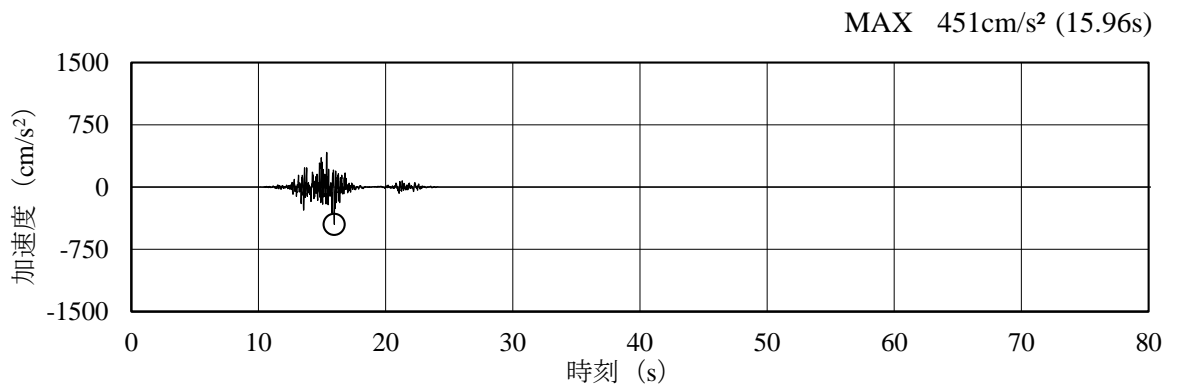


(a) 加速度時刻歴波形

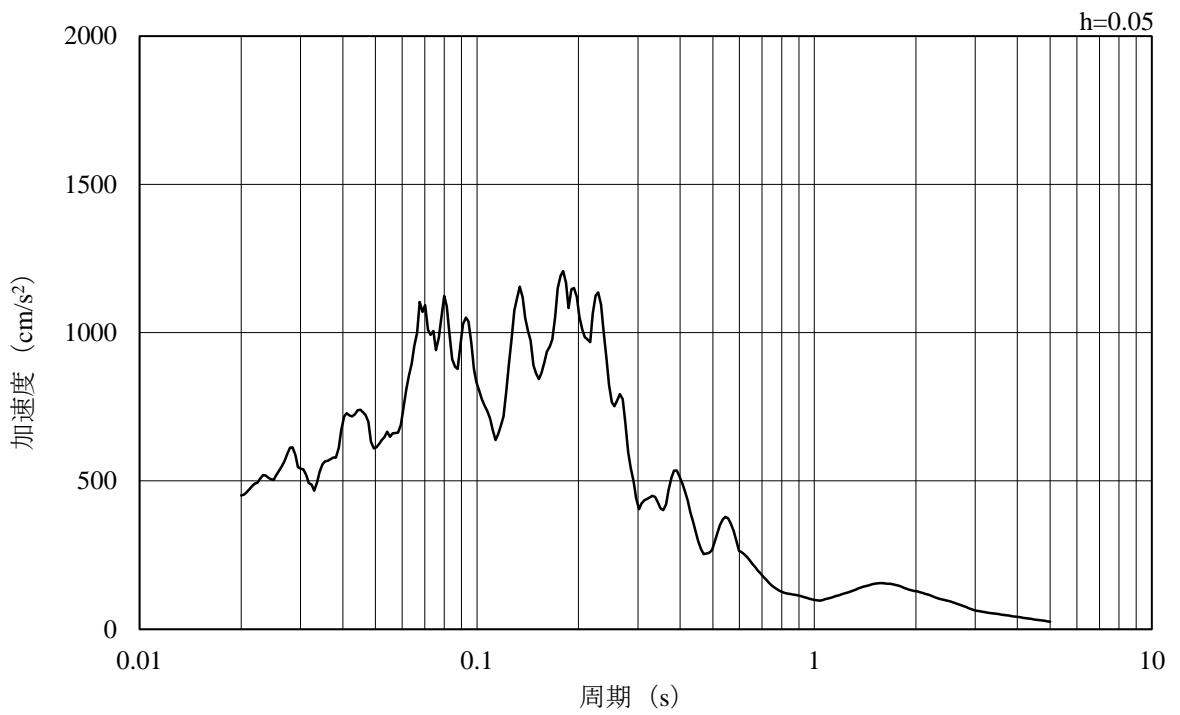


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-22 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(水平成分 : S<sub>s</sub> - F 2)

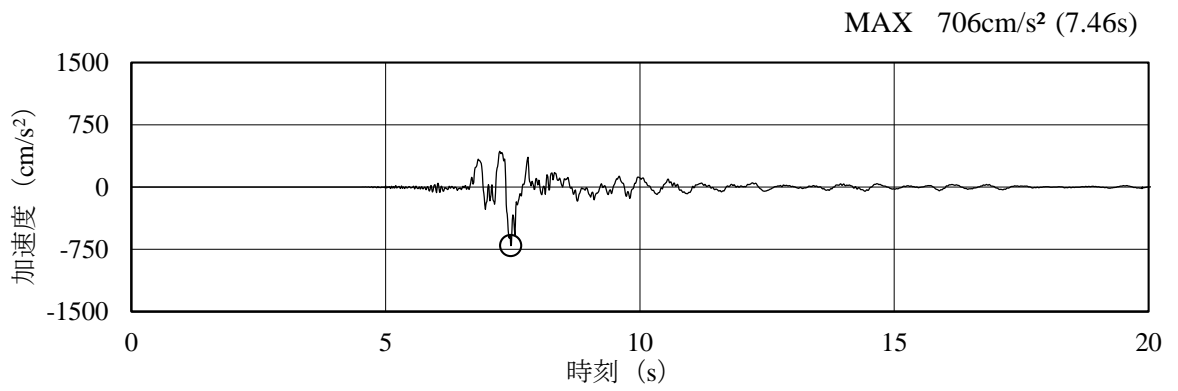


(a) 加速度時刻歴波形

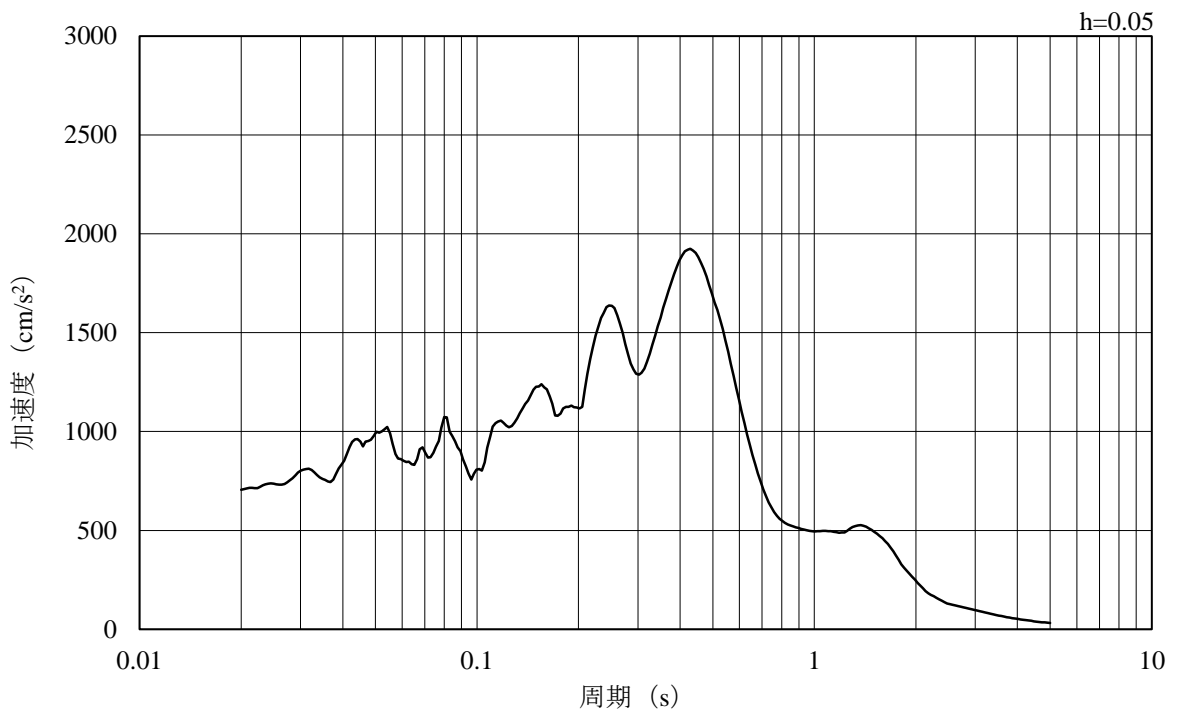


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-23 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(鉛直成分：S<sub>s</sub>-F2)

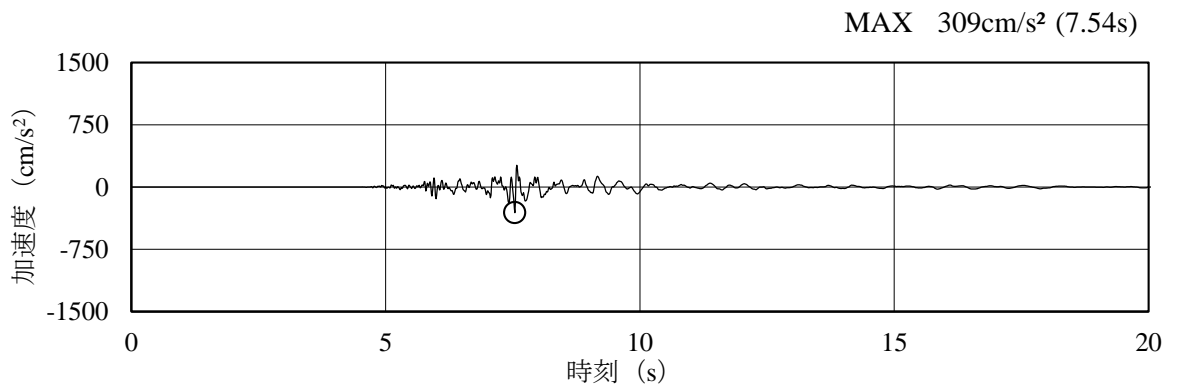


(a) 加速度時刻歴波形

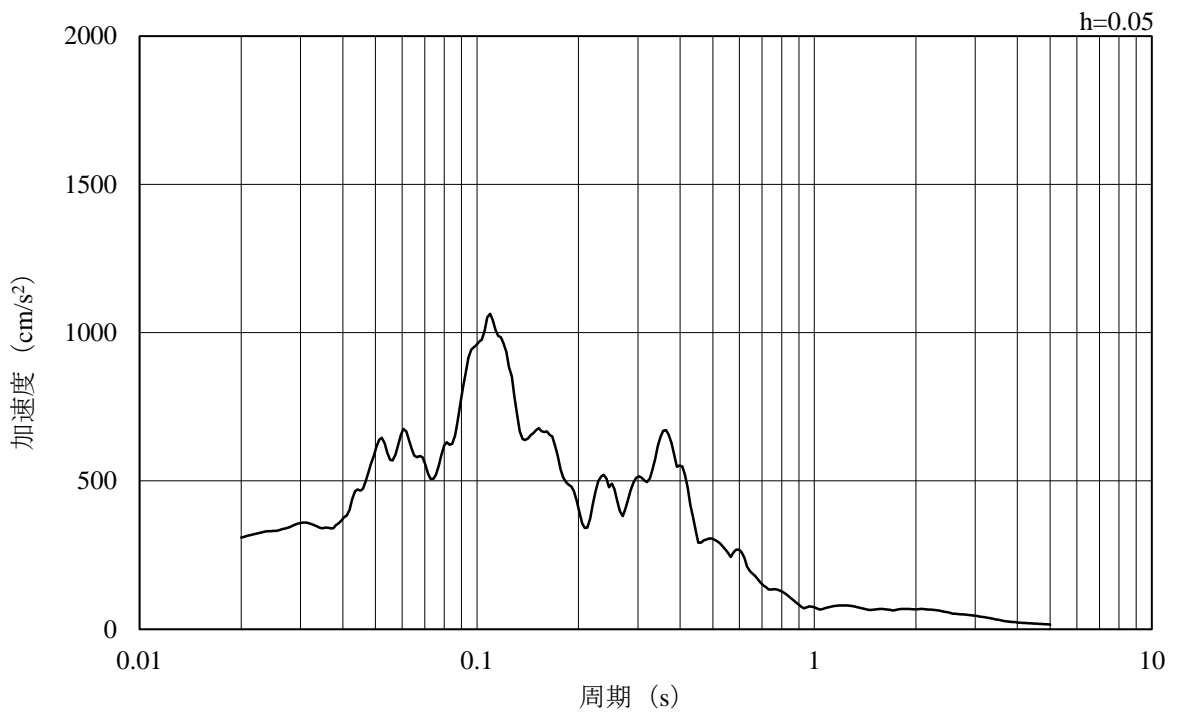


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-24 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(水平成分 : S<sub>s</sub> - N 1)

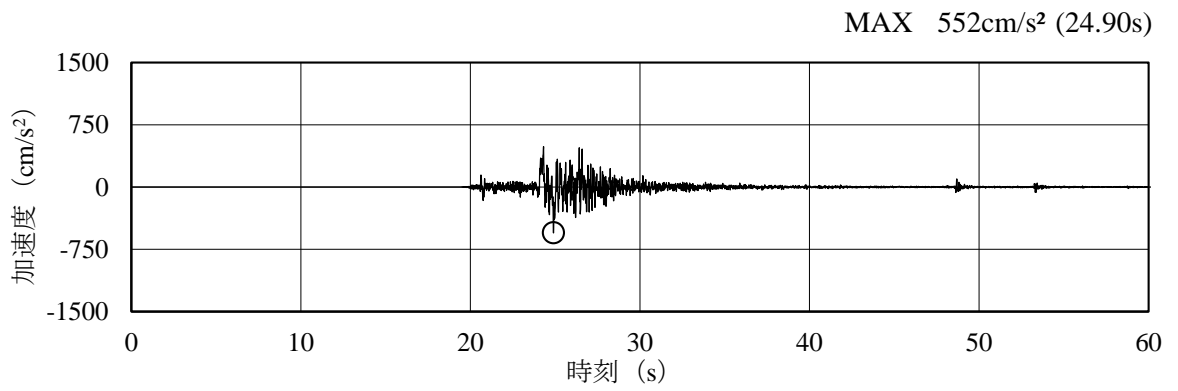


(a) 加速度時刻歴波形

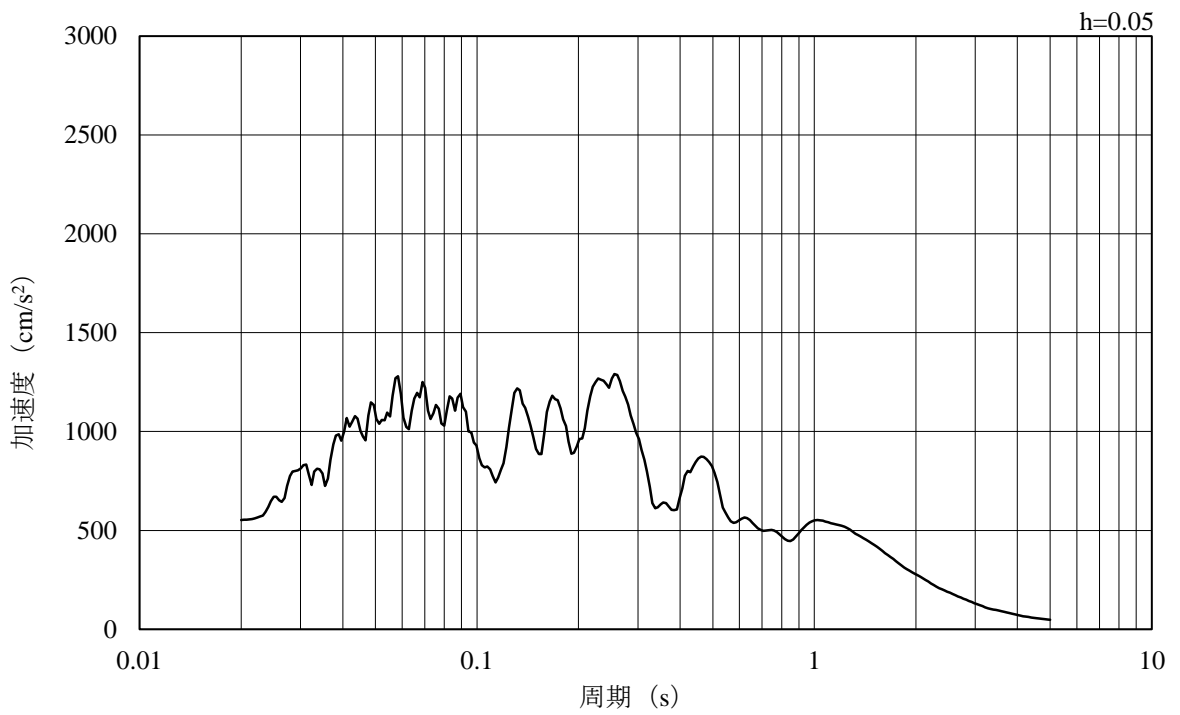


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-25 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(鉛直成分：S<sub>s</sub>-N1)

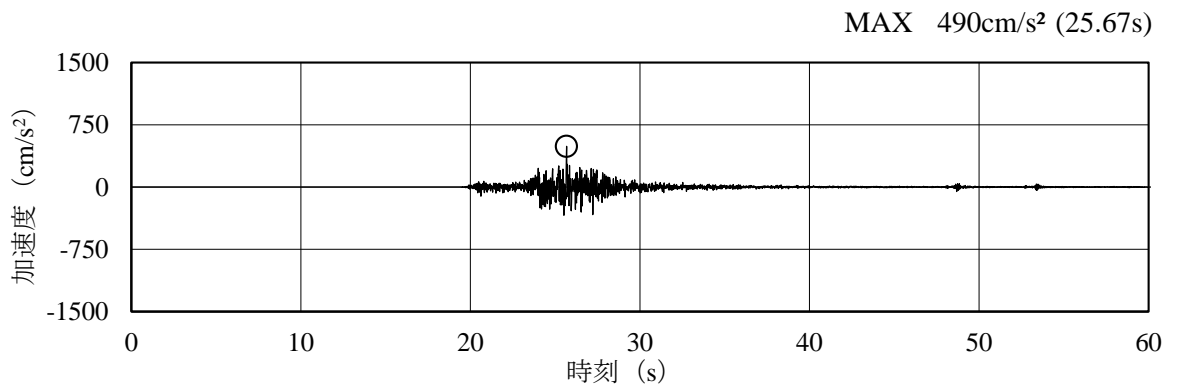


(a) 加速度時刻歴波形

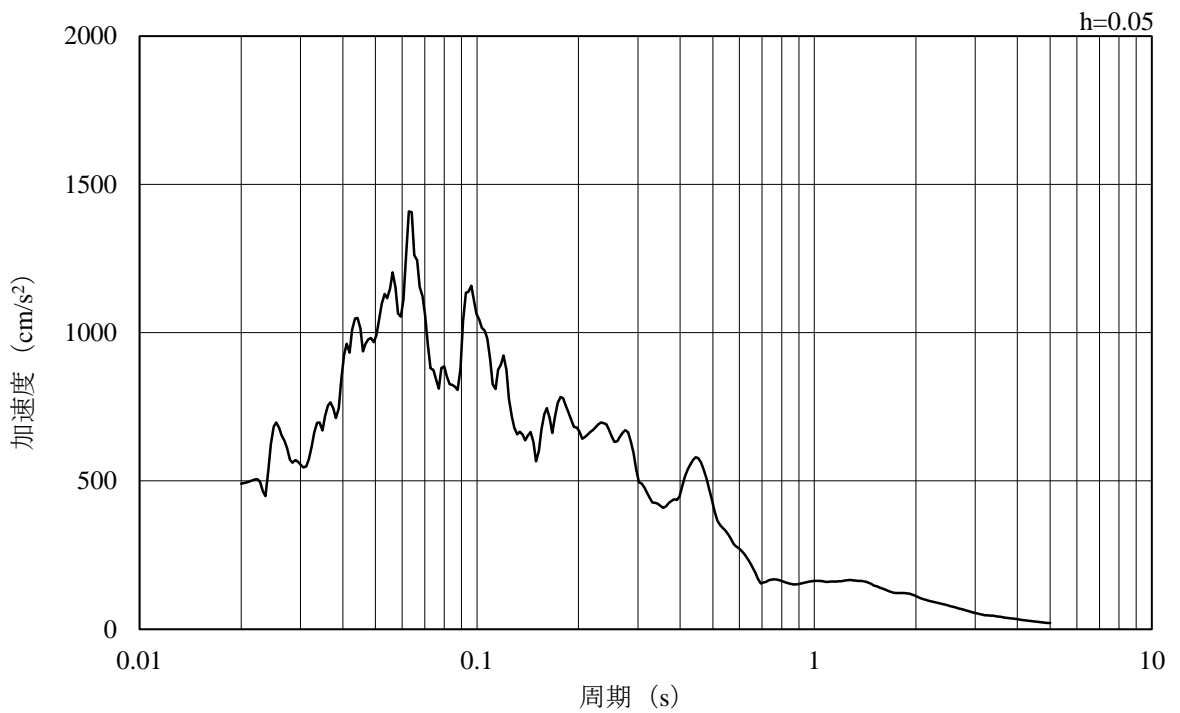


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-26 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(水平成分 : S s - N 2 (NS))



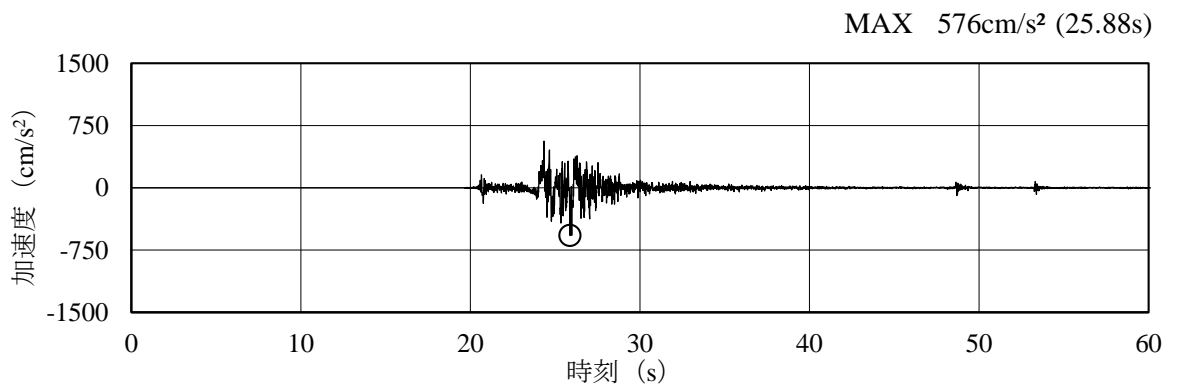
(a) 加速度時刻歴波形



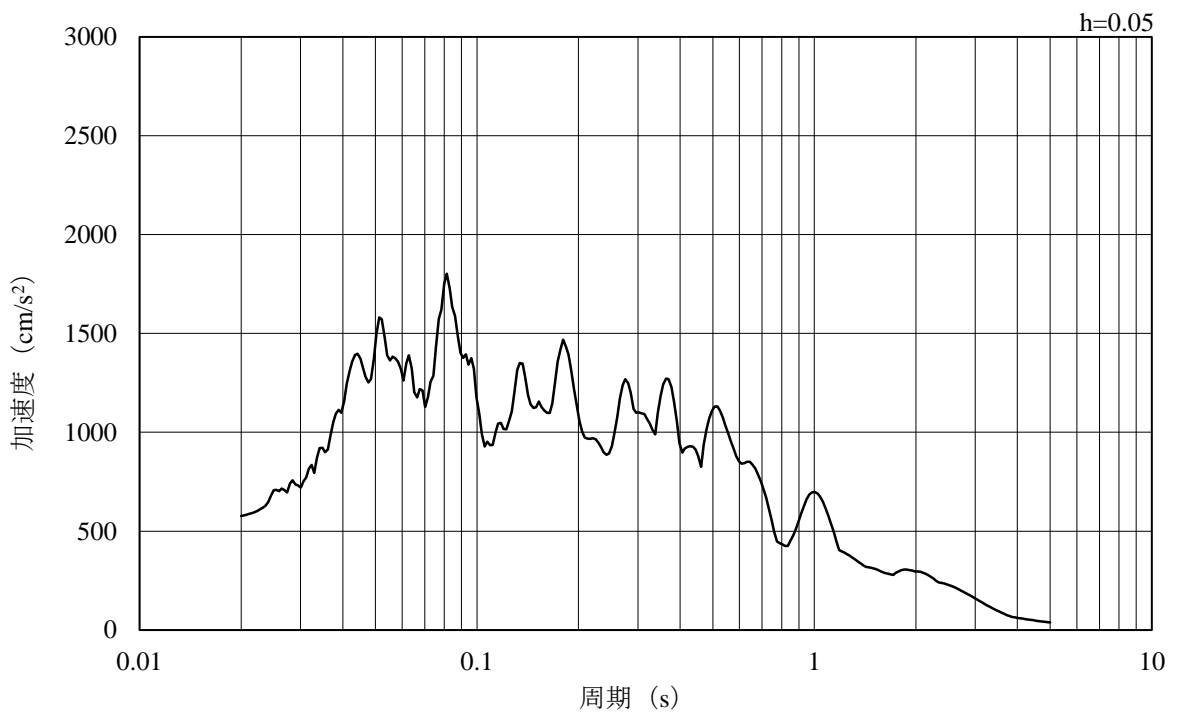
(b) 加速度応答スペクトル

図 3-27 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
 (鉛直成分 : S s - N 2 (NS))



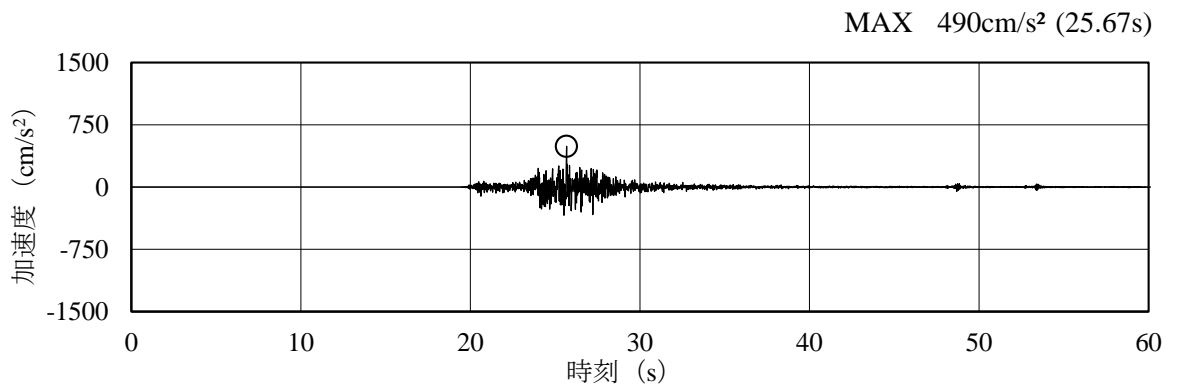


(a) 加速度時刻歴波形

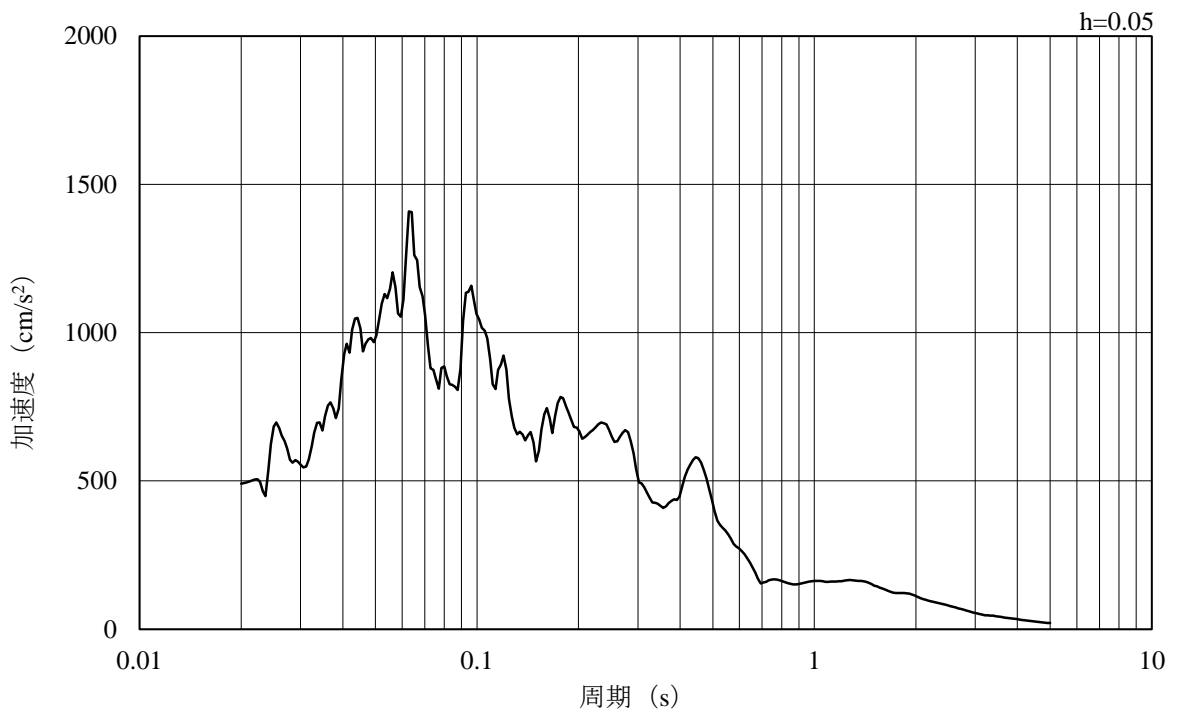


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-28 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
 (水平成分：S s - N 2 (EW))



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-29 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル  
(鉛直成分：S s - N 2 (EW))

### 3.7 地震応答解析結果

#### 3.7.1 解析ケース①（基本ケース）

取水管の管周方向応力は、曲げ応力及びせん断応力について評価する。ここで、取水管の曲げ応力  $\sigma_\theta$  は次式より算定するため、曲げ応力は管の外側と内側それぞれで整理する。曲げ応力算定の概念図を図 3-30 に示す。

$$\sigma_\theta = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{Z}$$

N：軸力

A：断面積

M：曲げモーメント

Z：断面係数

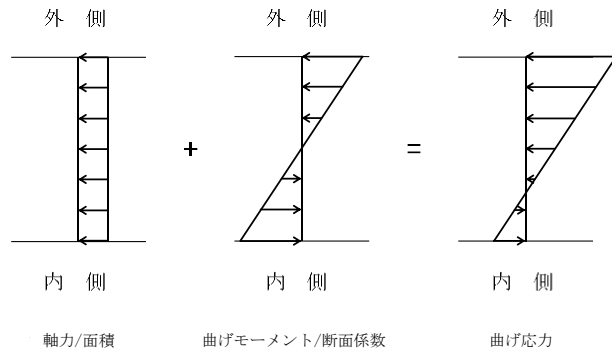


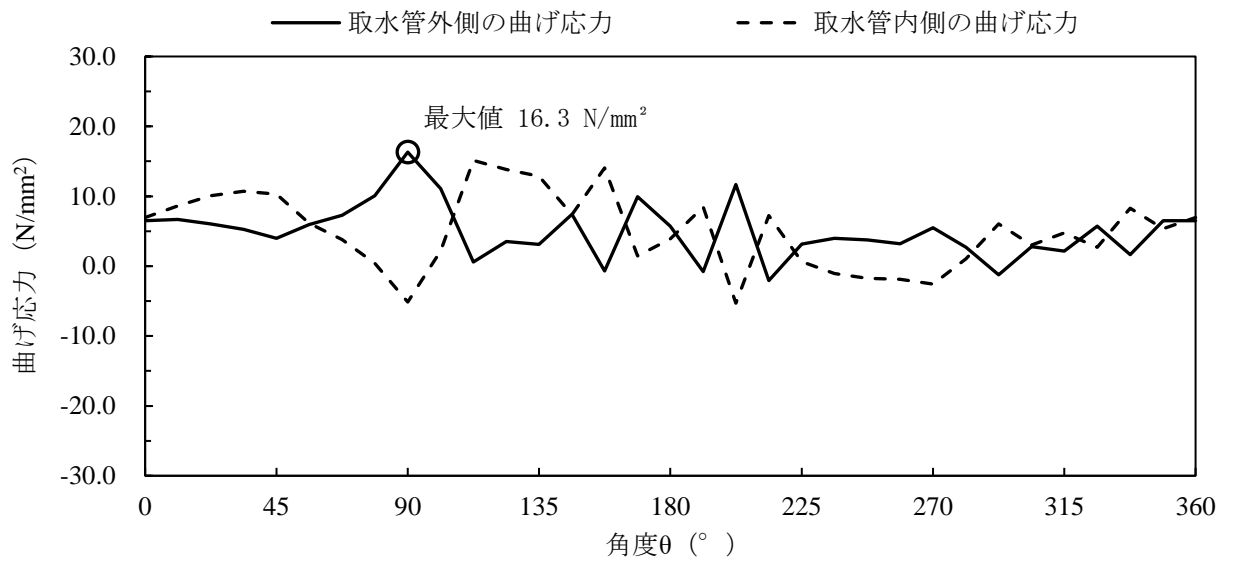
図 3-30 曲げ応力概念図

解析ケース①（基本ケース）について、すべての基準地震動  $S_s$  に対する応力分布図を図 3-31～図 3-42 に示す。なお、本図は、取水管に発生する曲げ応力及びせん断応力が最大となる時刻における応力分布を示している。

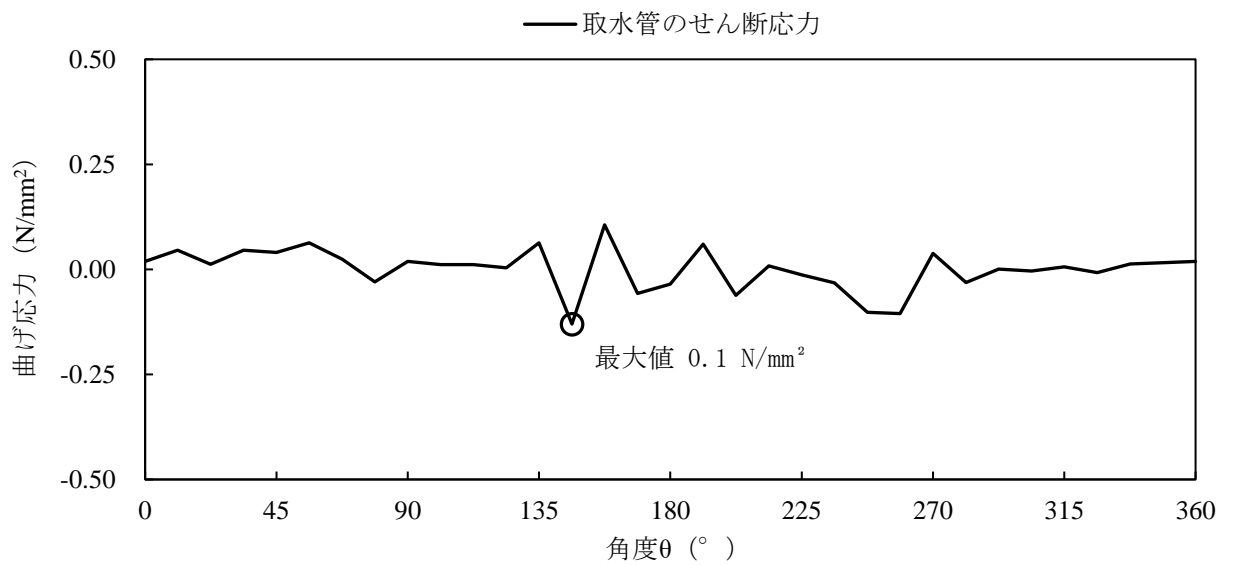
また、曲げ応力及びせん断応力の地震動との関係を表 3-9、表 3-10 に示す。

解析ケース①（基本ケース）について、管周方向の曲げ応力、管周方向のせん断応力が卓越する基準地震動はどちらも  $S_s - F2$  となることが確認された。

なお、基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図を図 3-43～図 3-54 に示す。本図は、全時刻において各要素に発生した最大せん断ひずみを示したものであり、取水管周辺の地盤に発生する最大せん断ひずみは、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$  オーダーの値のため、「補足-023-01 地盤の支持性能について」で示した繰返し三軸試験にてその挙動を確認しているひずみレベルの範囲内であることを確認した。



(曲げ応力分布 t=23.66s)

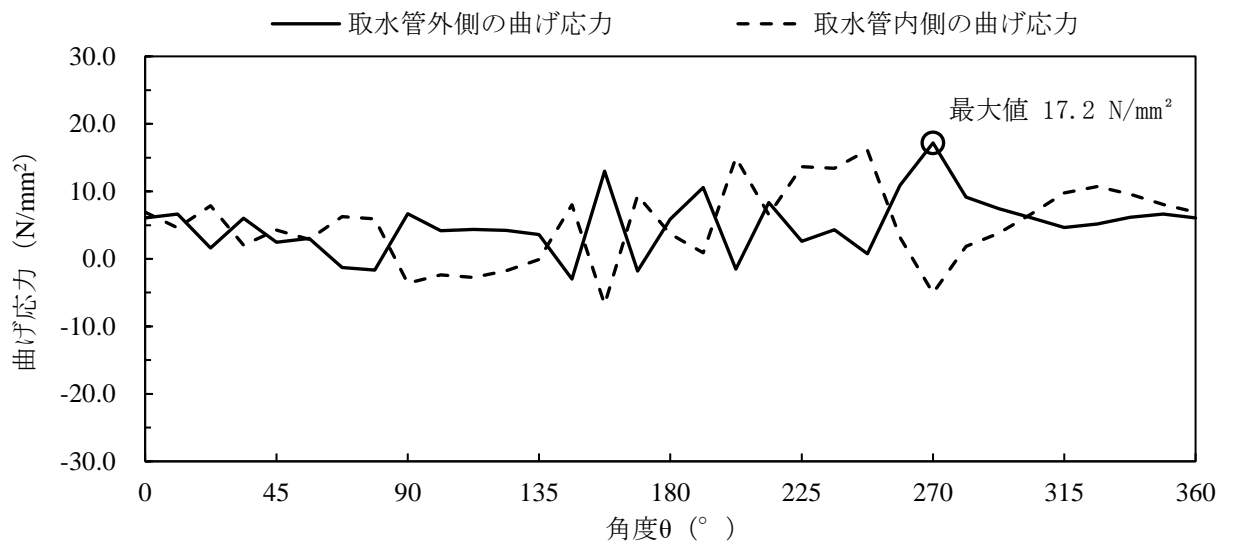


(せん断応力分布 t=23.66s)

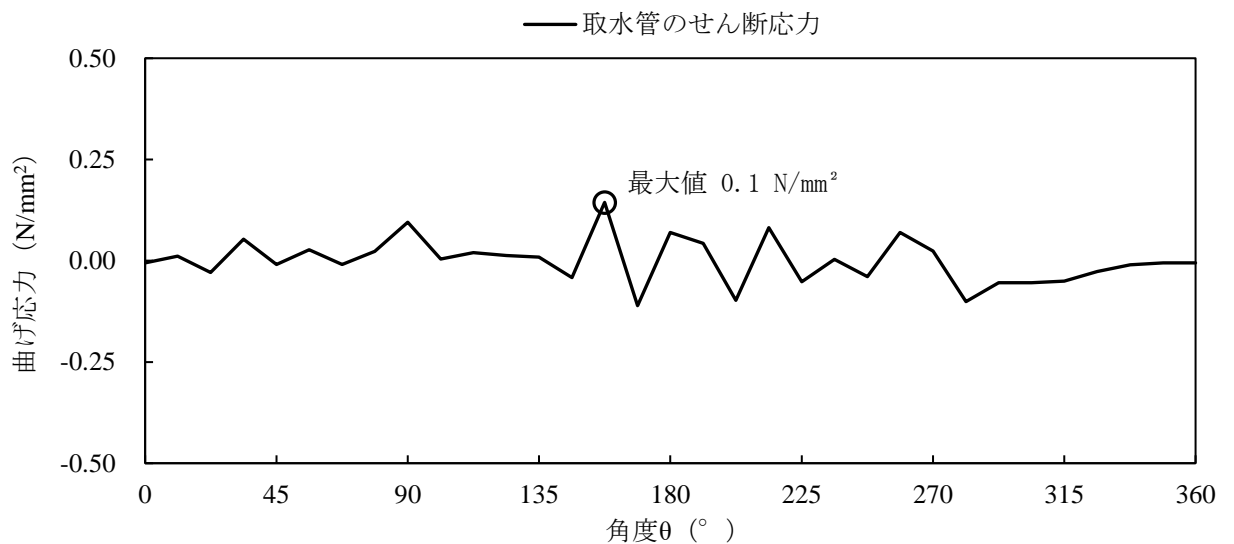
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-31 取水管管周方向の応力分布図 (1/12)

(解析ケース①, S s - D (++) )



(曲げ応力分布 t=23.66s)

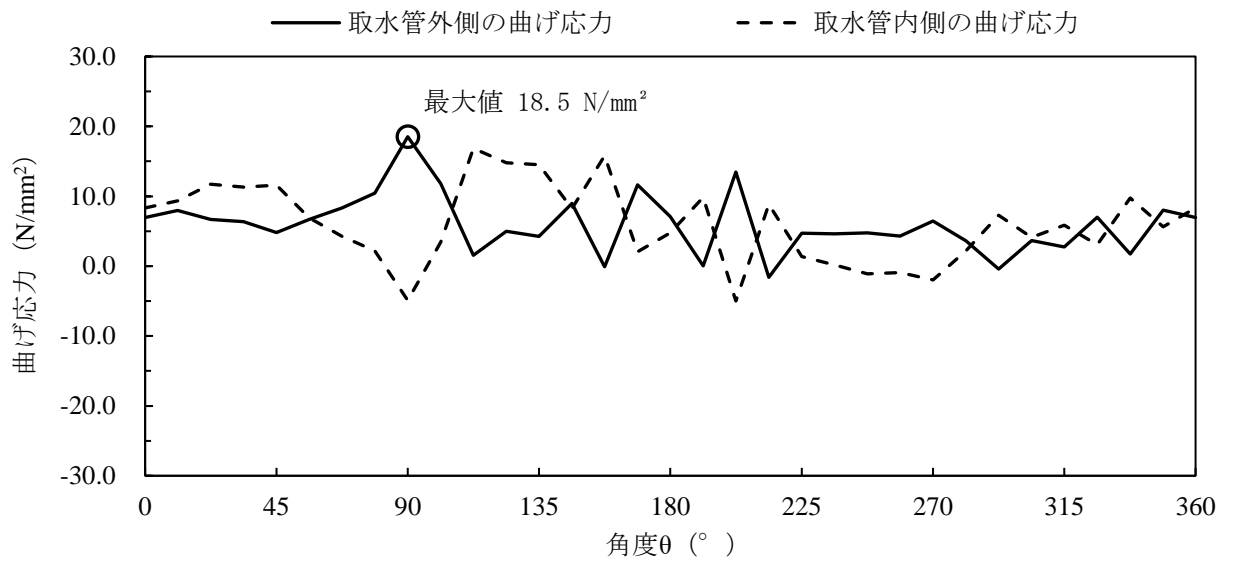


(せん断応力分布 t=23.66s)

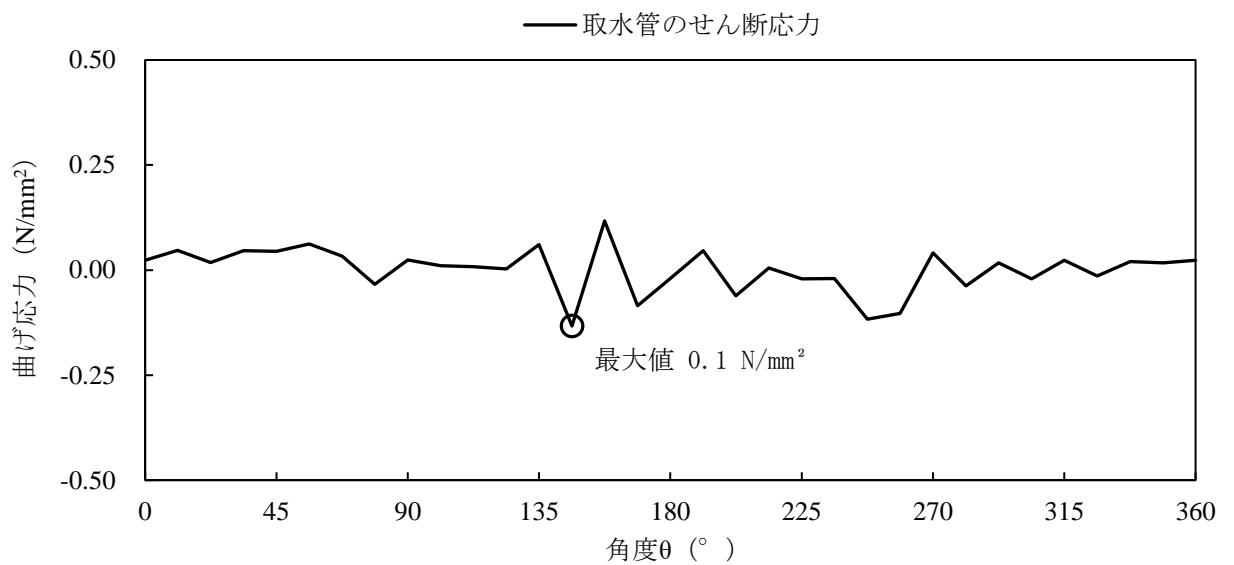
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-32 取水管管周方向の応力分布図 (2/12)

(解析ケース①, S s - D (-+))



(曲げ応力分布 t=23.66s)

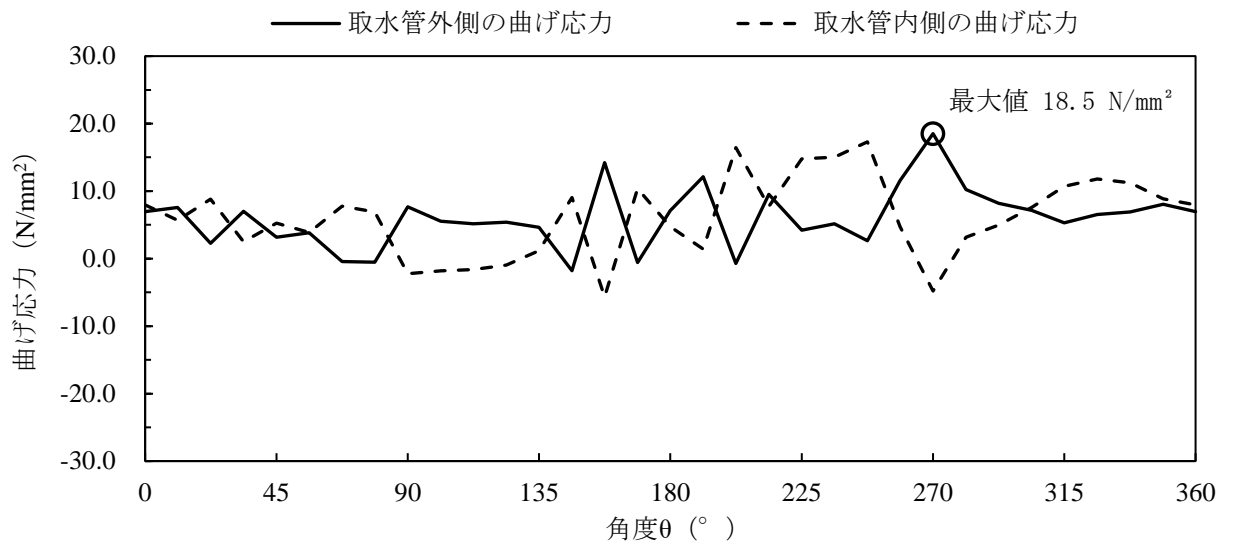


(せん断応力分布 t=23.66s)

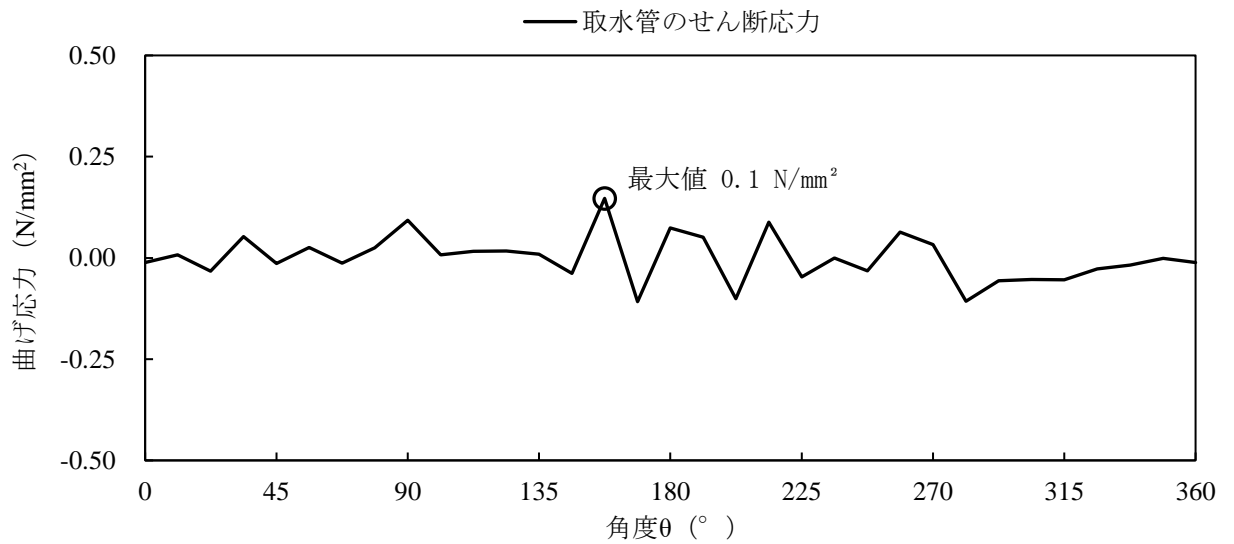
注：横軸の角度  $\theta$  は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-33 取水管管周方向の応力分布図 (3/12)

(解析ケース①, S s - D (+ -))



(曲げ応力分布 t=23.66s)

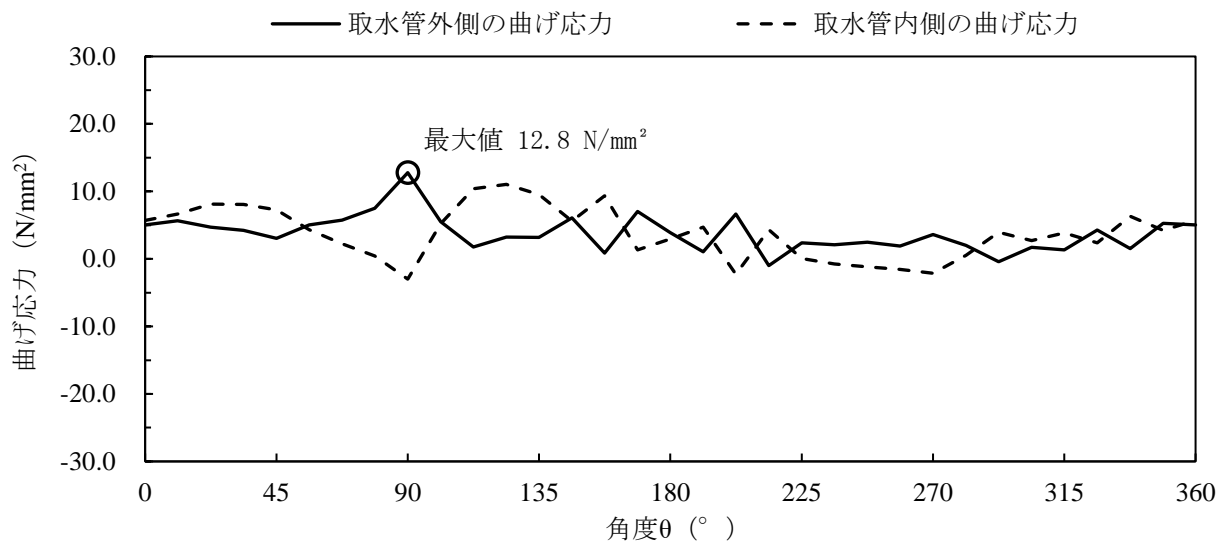


(せん断応力分布 t=23.66s)

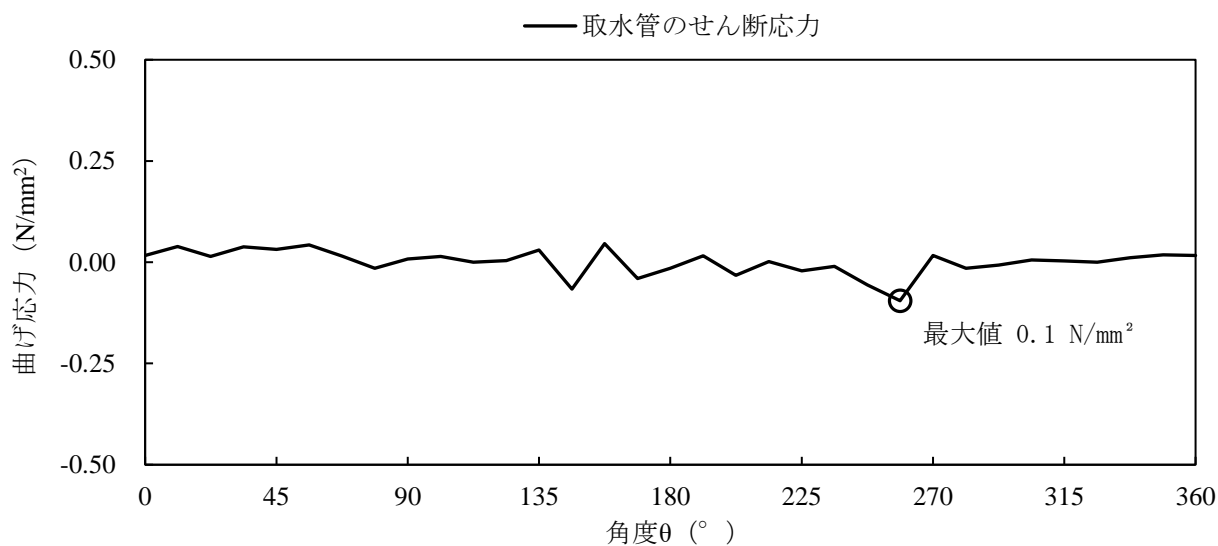
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-34 取水管管周方向の応力分布図 (4/12)

(解析ケース①, S s - D ( - - ) )



(曲げ応力分布  $t=8.67s$ )



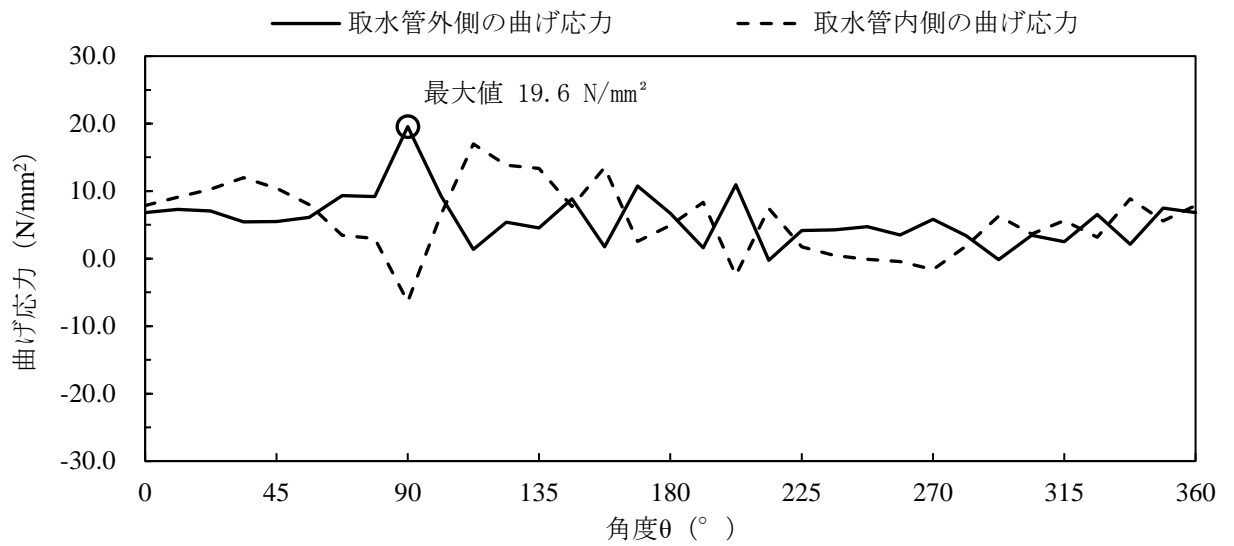
(せん断応力分布  $t=8.67s$ )

注：横軸の角度  $\theta$  は，管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

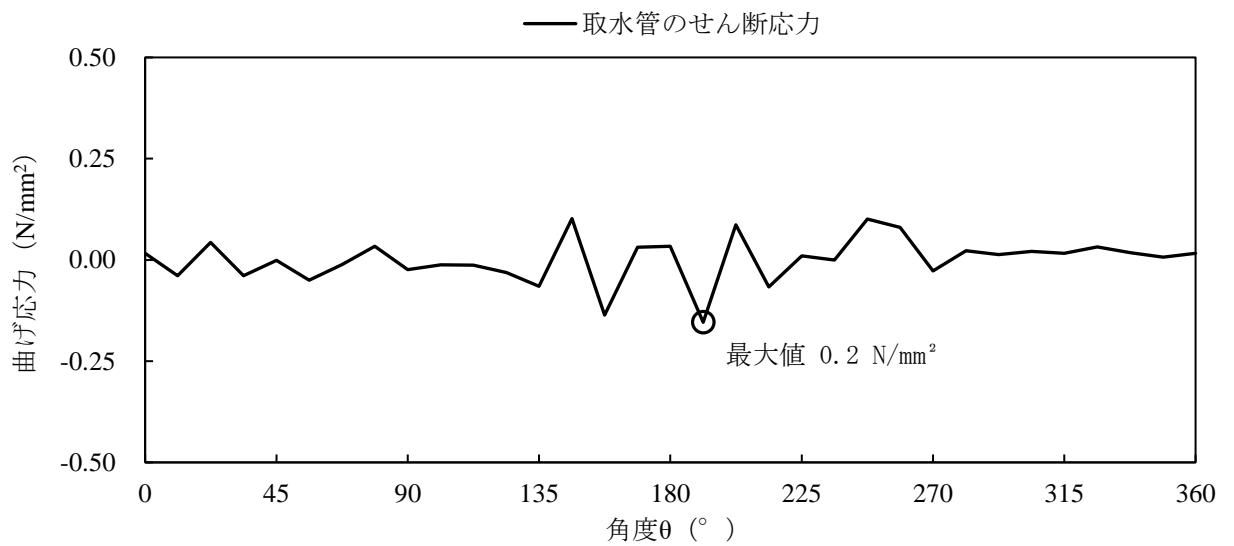
図 3-35 取水管管周方向の応力分布図 (5/12)

(解析ケース①,  $S_s - F_1 (++)$ )





(曲げ応力分布 t=15.84s)

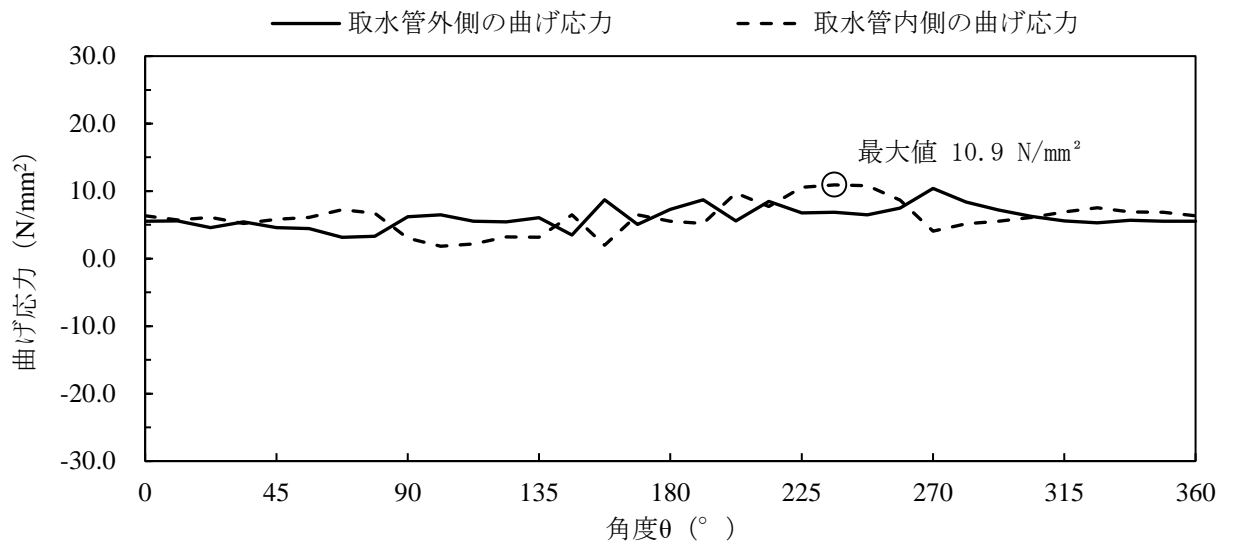


(せん断応力分布 t=15.89s)

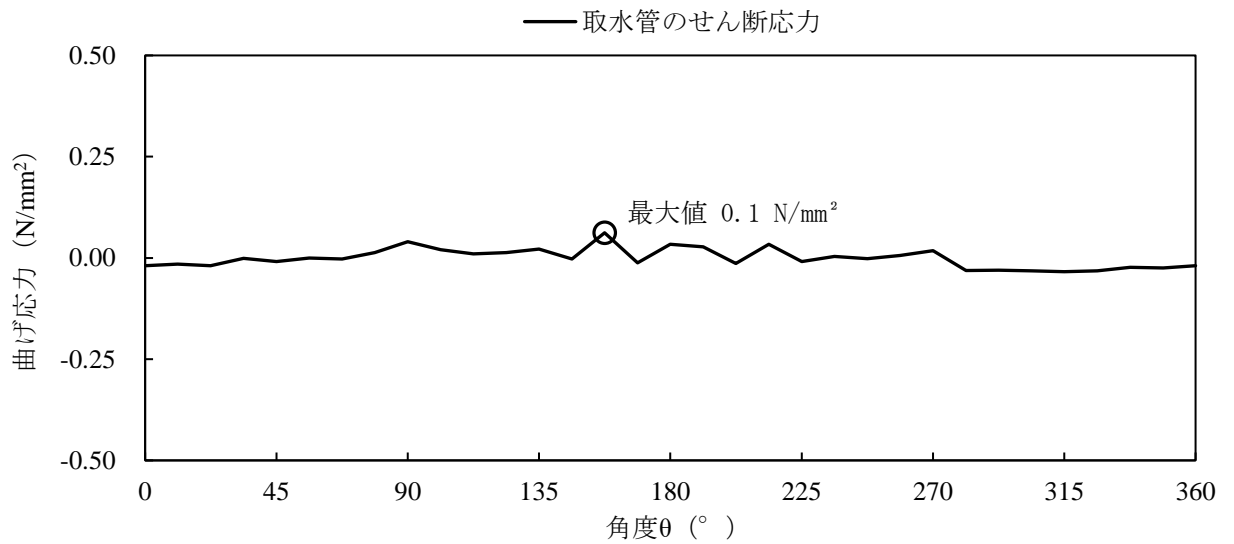
注：横軸の角度 $\theta$ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-36 取水管管周方向の応力分布図 (6/12)

(解析ケース①, S s - F 2 (++) )



(曲げ応力分布 t=7.60s)

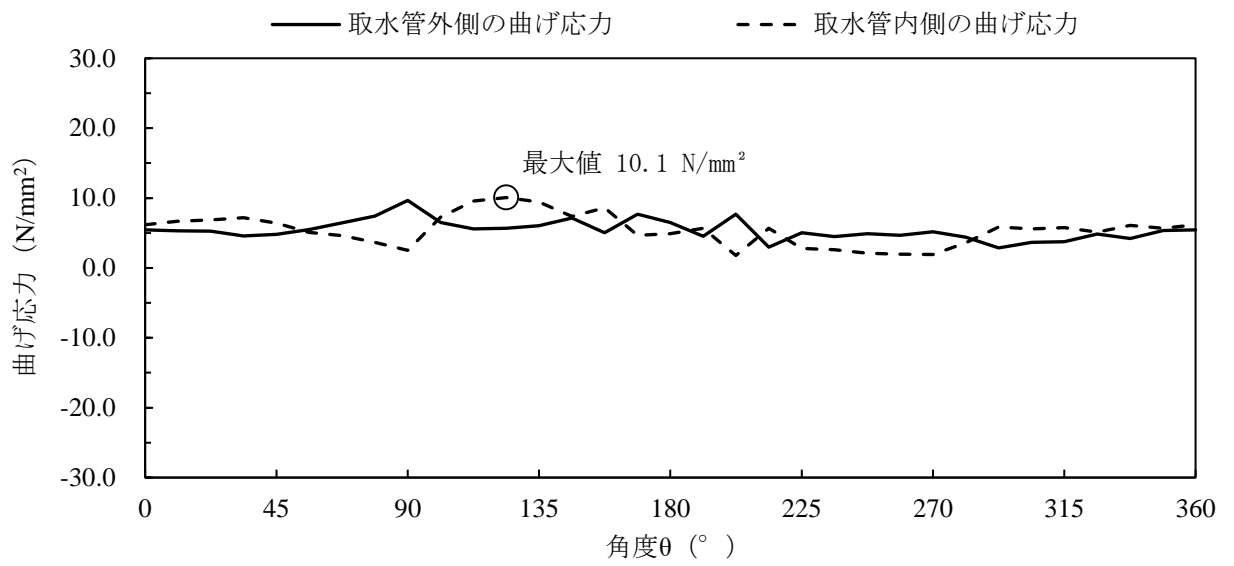


(せん断応力分布 t=7.60s)

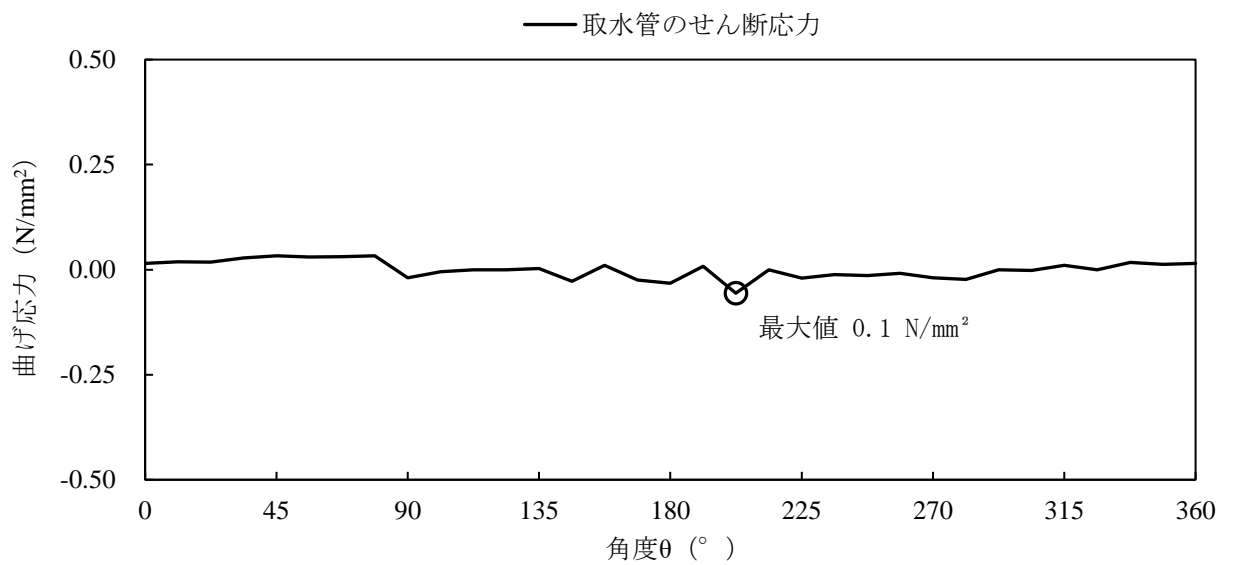
注：横軸の角度θは，管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-37 取水管管周方向の応力分布図 (7/12)

(解析ケース①, S s - N 1 (++) )



(曲げ応力分布 t=7.60s)

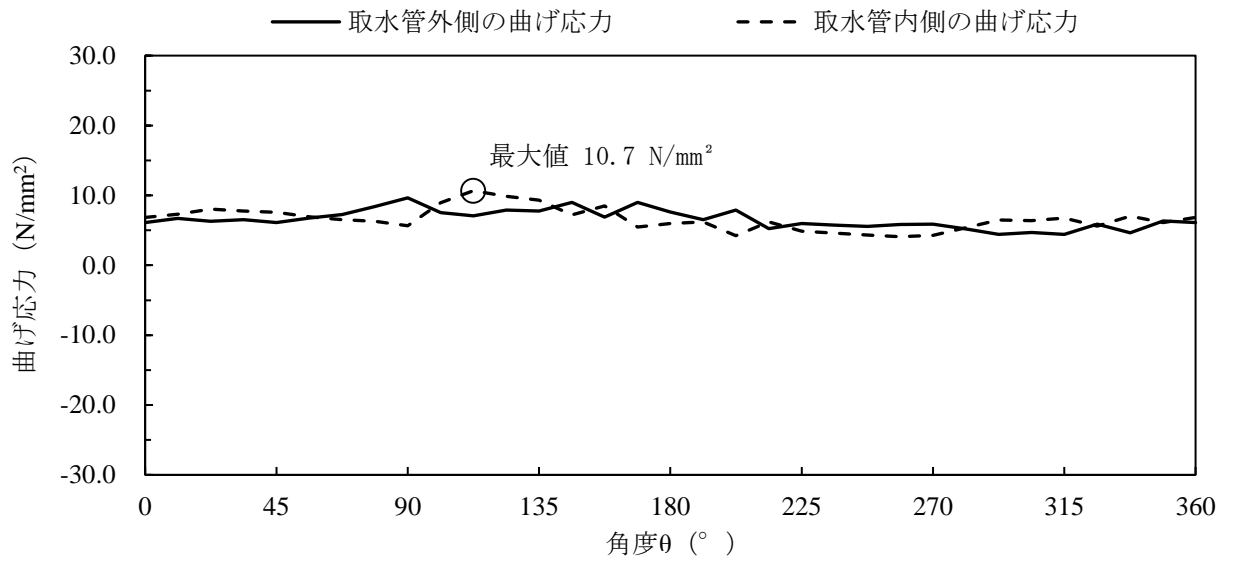


(せん断応力分布 t=7.60s)

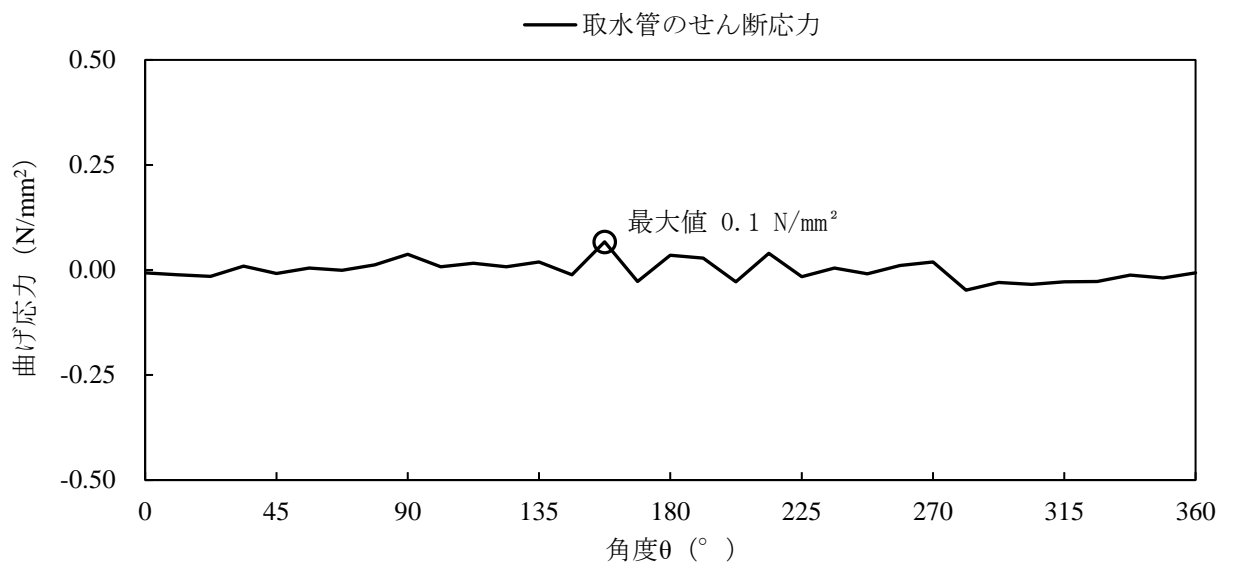
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-38 取水管管周方向の応力分布図 (8/12)

(解析ケース①, S<sub>s</sub>-N1 (-+))



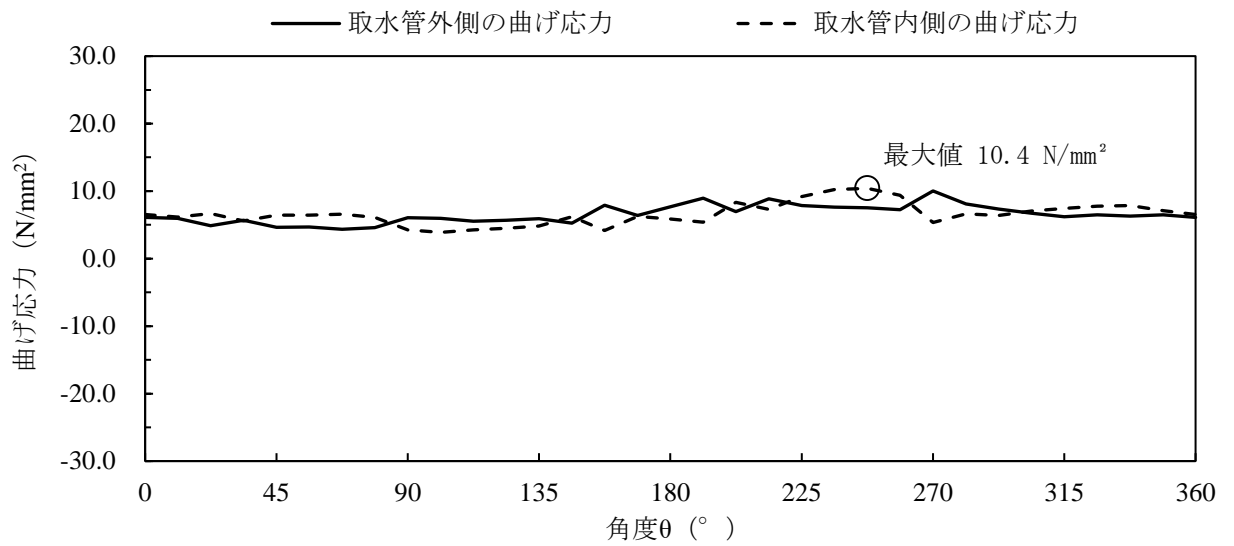
(曲げ応力分布 t=25.68s)



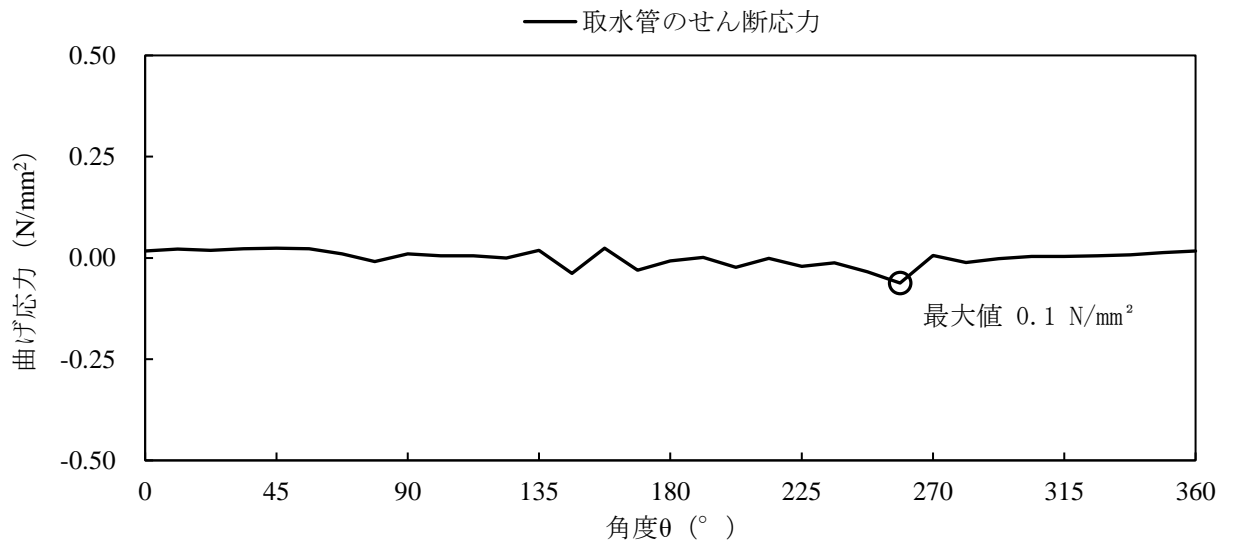
(せん断応力分布 t=25.24s)

注：横軸の角度  $\theta$  は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-39 取水管管周方向の応力分布図 (9/12)  
(解析ケース①, S s - N 2 (N S) (++) )



(曲げ応力分布 t=25.68s)

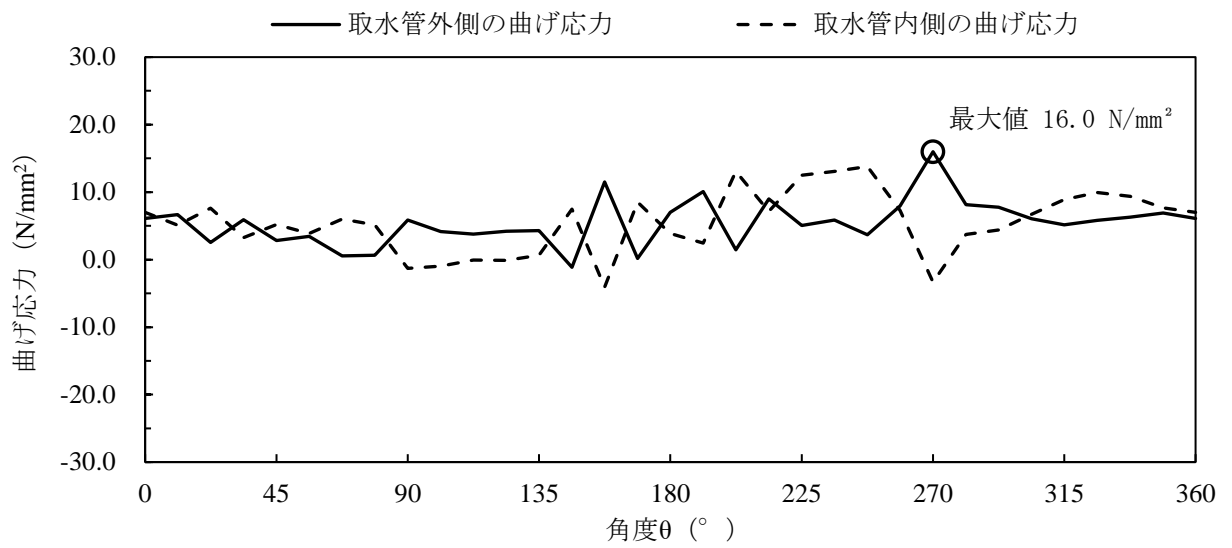


(せん断応力分布 t=24.70s)

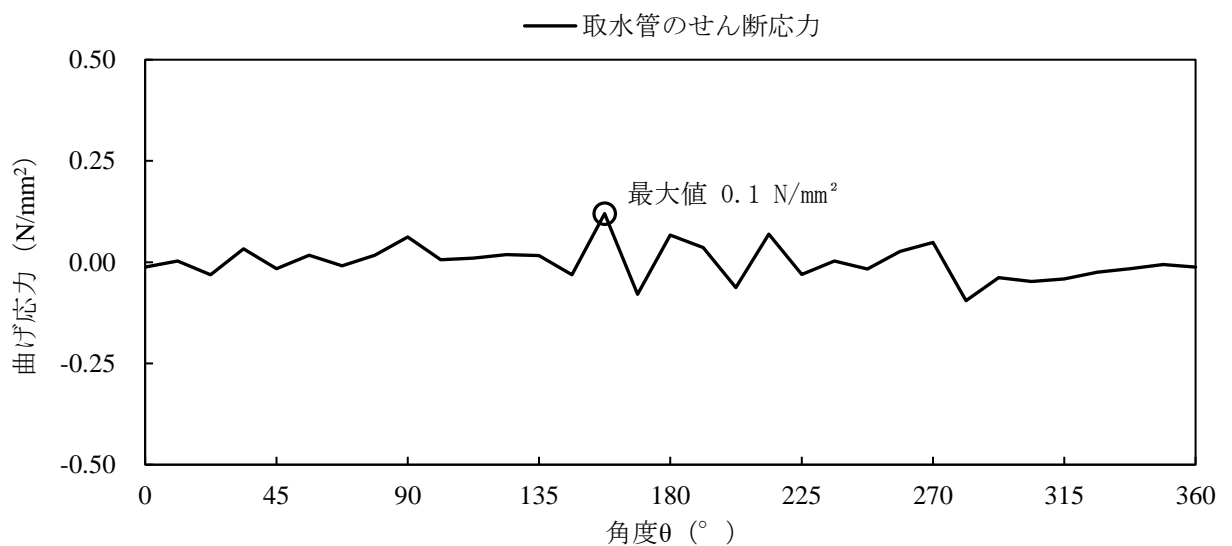
注：横軸の角度  $\theta$  は，管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-40 取水管管周方向の応力分布図 (10/12)

(解析ケース①, S s - N 2 (N S) (-+))



(曲げ応力分布 t=24.84s)

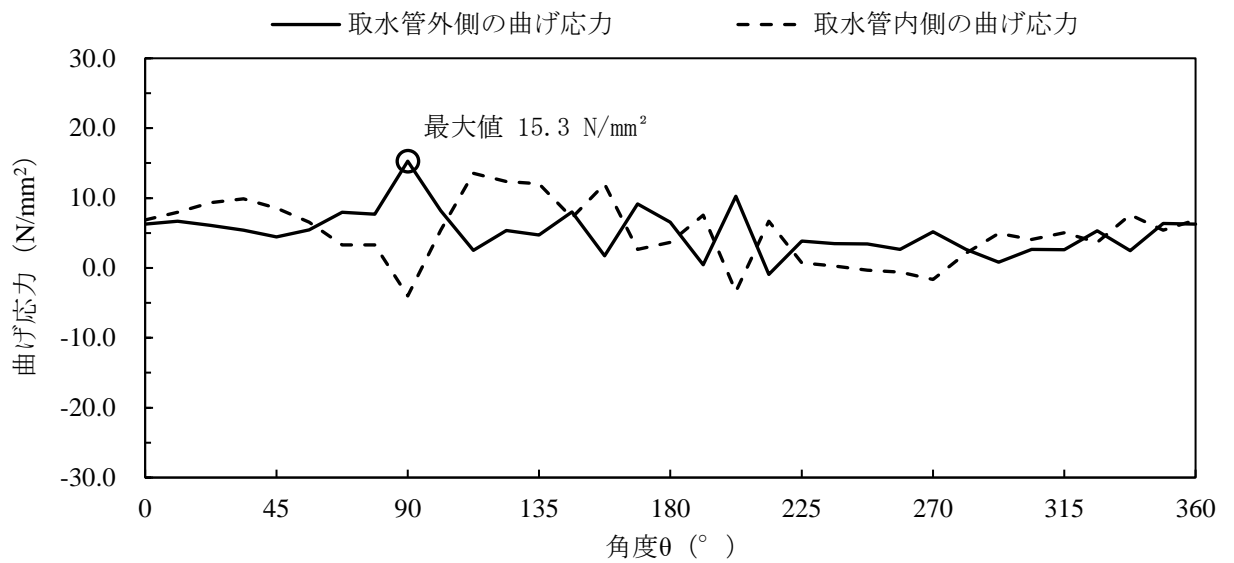


(せん断応力分布 t=24.84s)

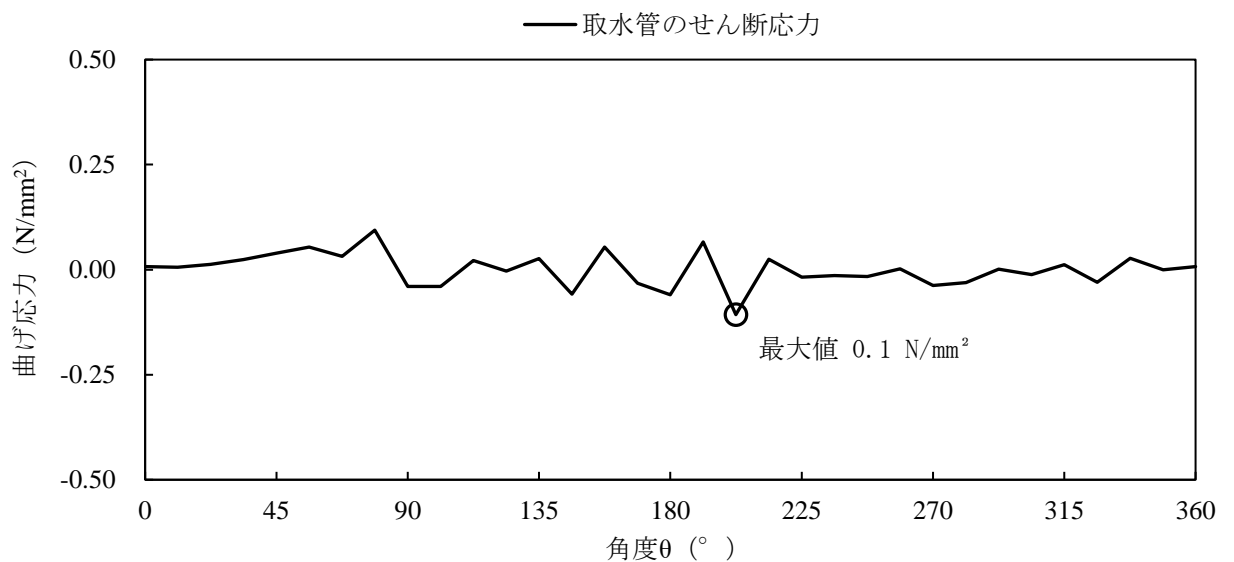
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-41 取水管管周方向の応力分布図 (11/12)

(解析ケース①, S<sub>s</sub>-N<sub>2</sub>(EW)(++))



(曲げ応力分布 t=24.84s)



(せん断応力分布 t=24.84s)

注：横軸の角度 $\theta$ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-42 取水管管周方向の応力分布図 (12/12)

(解析ケース①, S<sub>s</sub>-N<sub>2</sub>(EW) (-+))

表 3-9 解析ケース①における発生最大曲げ応力度一覧表

地震動		解析ケース	
		発生最大曲げ応力度 N/mm <sup>2</sup>	
		全応力解析	
		①	
S <sub>s</sub> -D	++	16.3	
	-+	17.2	
	+-	18.5	
	--	18.5	
S <sub>s</sub> -F 1	++	12.8	
S <sub>s</sub> -F 2	++	19.6	
S <sub>s</sub> -N 1	++	10.9	
	-+	10.1	
S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	10.7	
	-+	10.4	
S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	16.0	
	-+	15.3	

表 3-10 解析ケース①における発生最大せん断応力度一覧表

地震動		解析ケース	
		発生最大せん断応力度 N/mm <sup>2</sup>	
		全応力解析	
		①	
S <sub>s</sub> -D	++	0.1	
	-+	0.1	
	+-	0.1	
	--	0.1	
S <sub>s</sub> -F 1	++	0.1	
S <sub>s</sub> -F 2	++	0.2	
S <sub>s</sub> -N 1	++	0.1	
	-+	0.1	
S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	0.1	
	-+	0.1	
S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	0.1	
	-+	0.1	



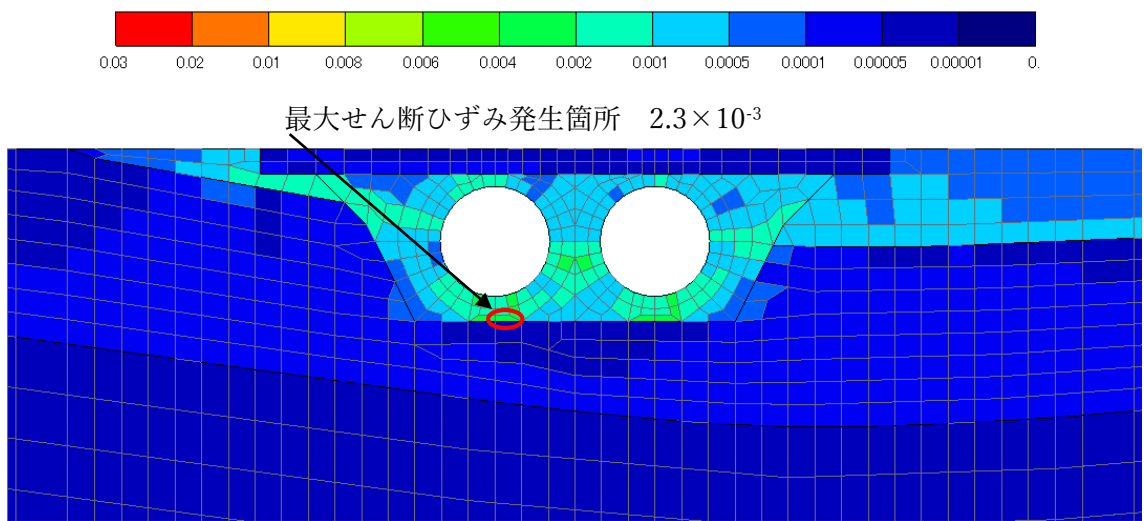


図 3-43 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (1/12)  
(解析ケース①,  $S_s - D(++)$ )

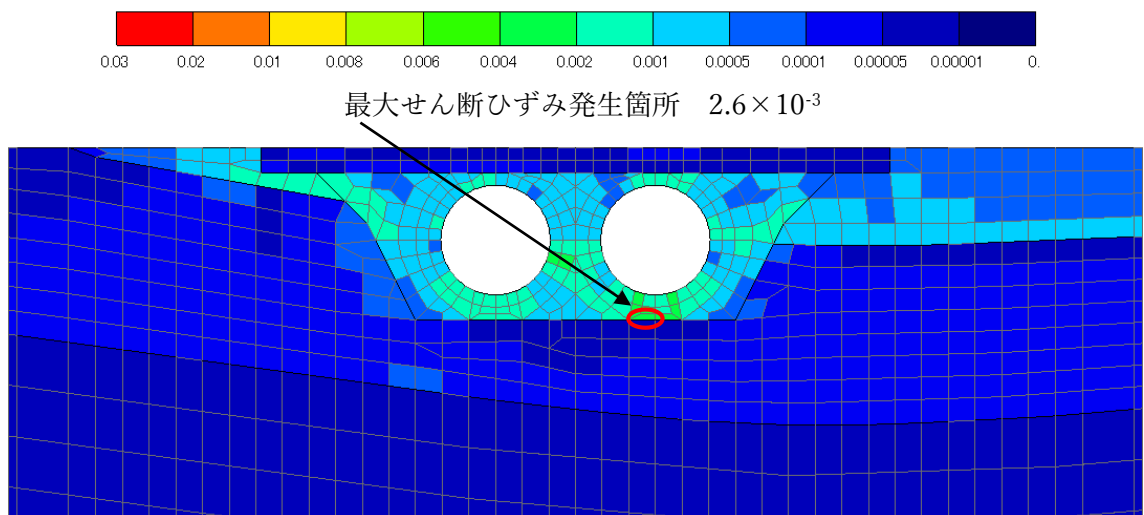


図 3-44 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (2/12)  
(解析ケース①,  $S_s - D(-+)$ )

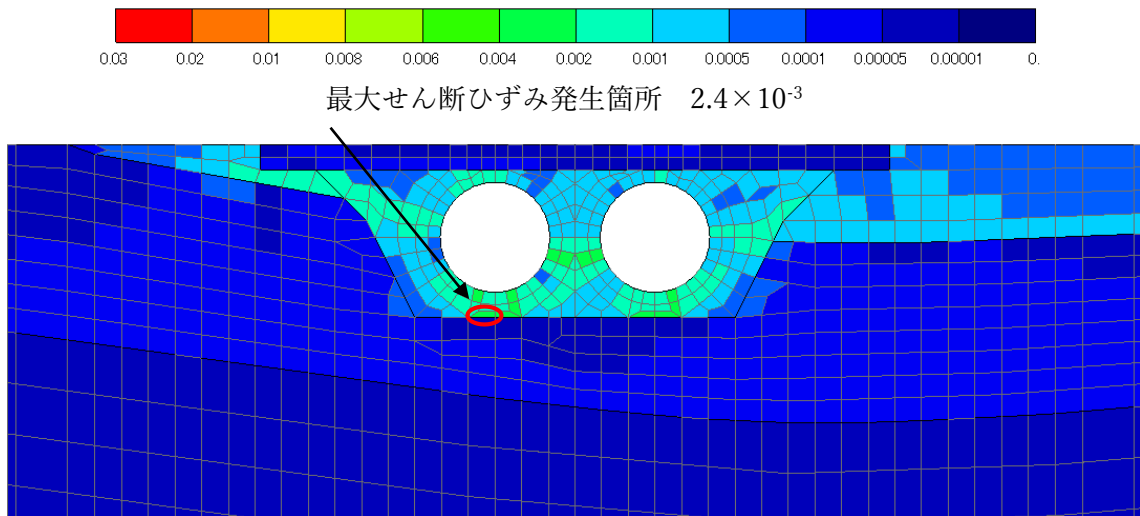


図 3-45 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (3/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - D (+ -)$ )

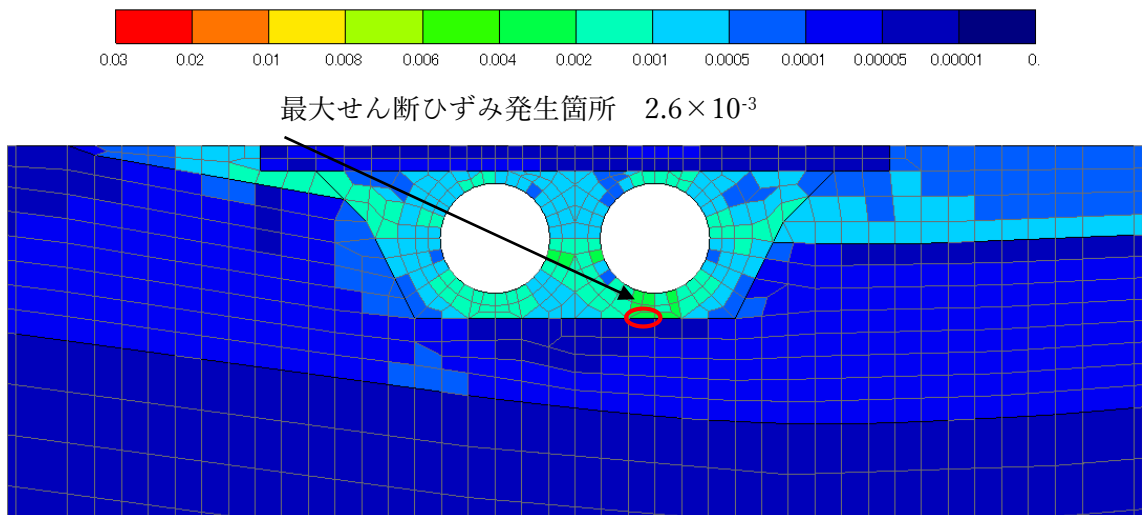


図 3-46 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (4/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - D (- -)$ )

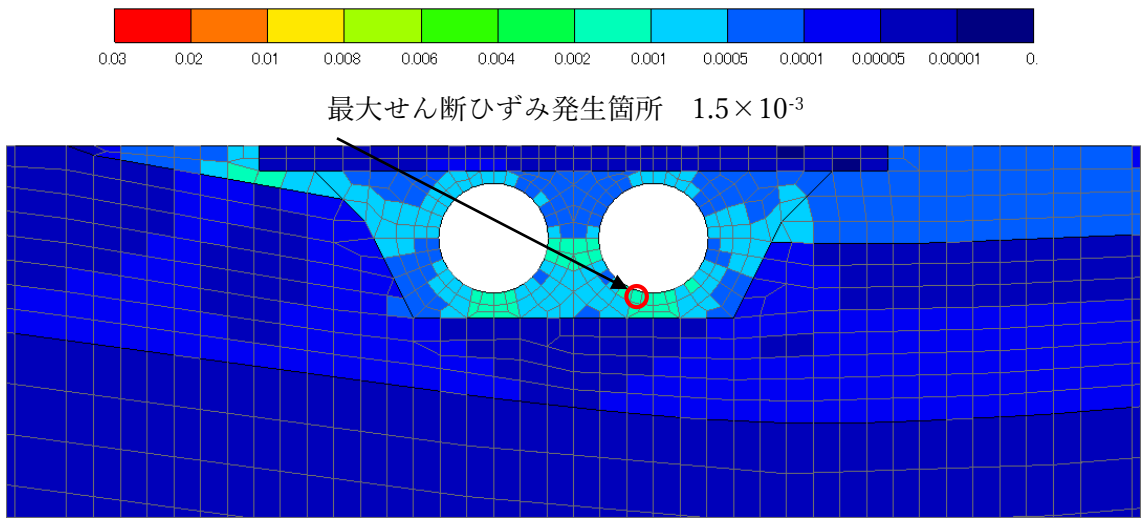


図 3-47 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (5/12)  
 (解析ケース①, S<sub>s</sub>-F 1 (++) )

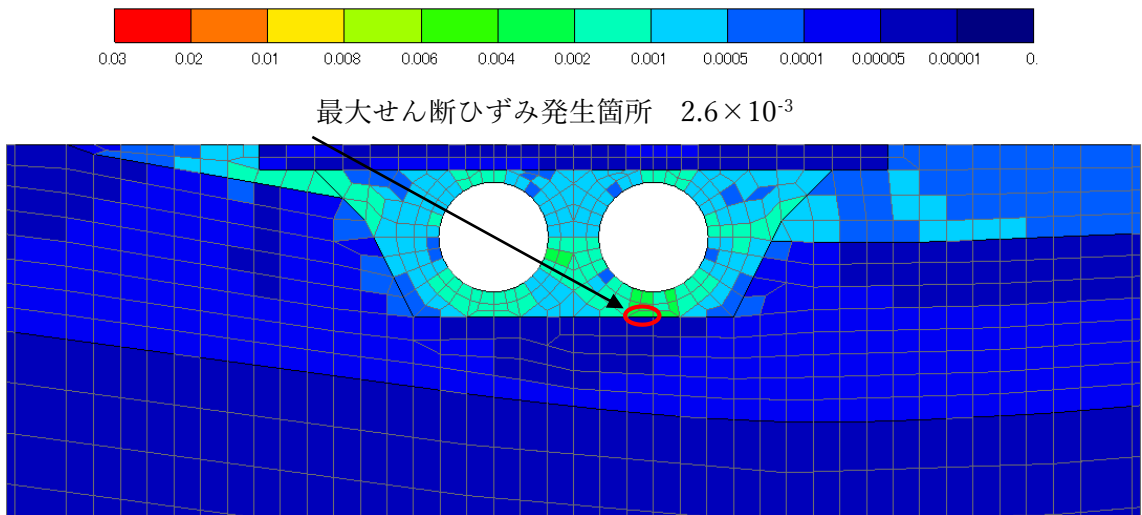
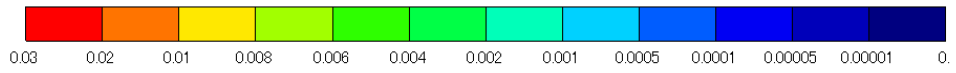


図 3-48 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (6/12)  
 (解析ケース①, S<sub>s</sub>-F 2 (++) )



最大せん断ひずみ発生箇所  $1.1 \times 10^{-3}$

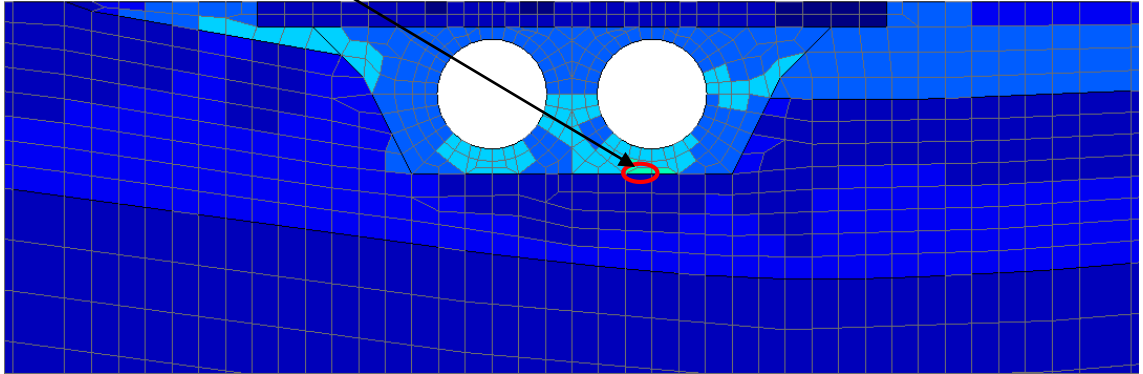
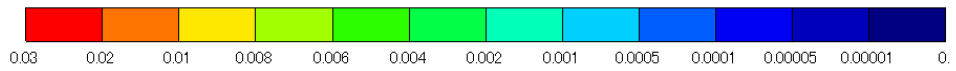


図 3-49 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (7/12)

(解析ケース①,  $S_s - N 1 (+ +)$ )



最大せん断ひずみ発生箇所  $1.0 \times 10^{-3}$

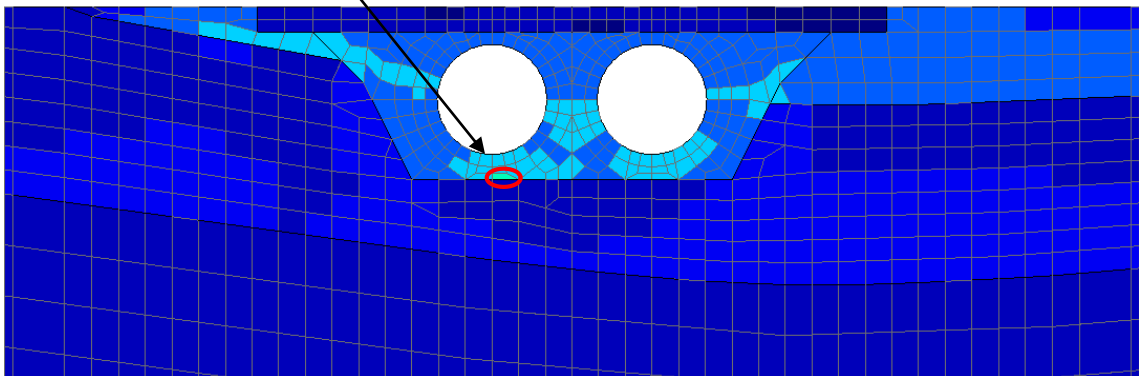


図 3-50 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (8/12)

(解析ケース①,  $S_s - N 1 (- +)$ )

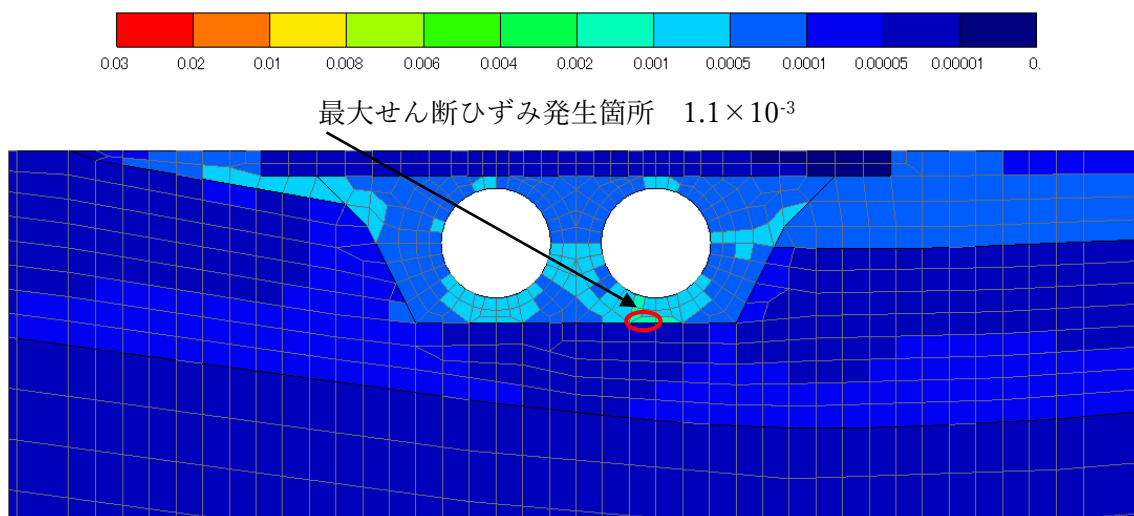


図 3-51 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (9/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - N_2 (NS) (+ +)$ )

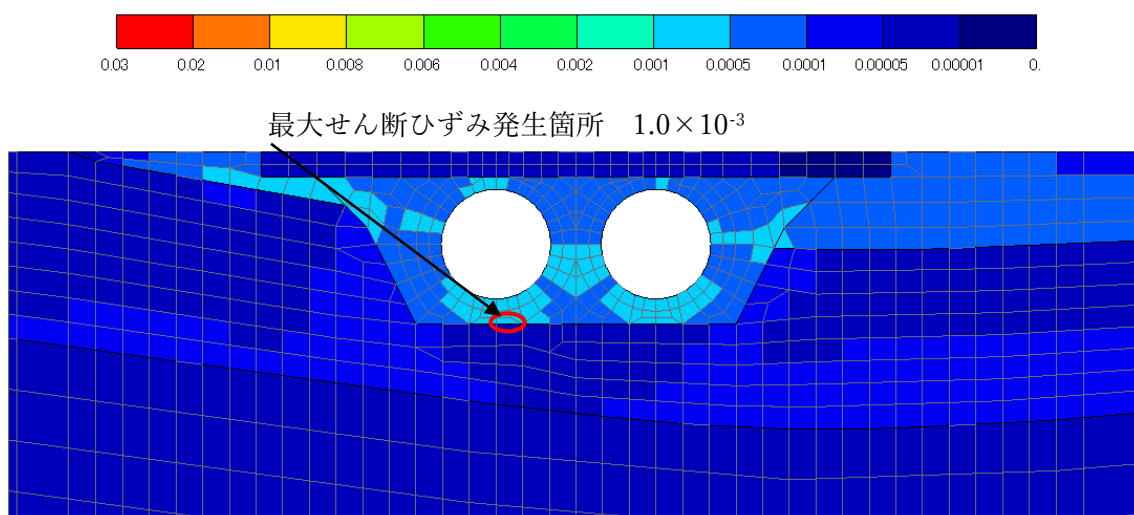


図 3-52 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (10/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - N_2 (NS) (- +)$ )

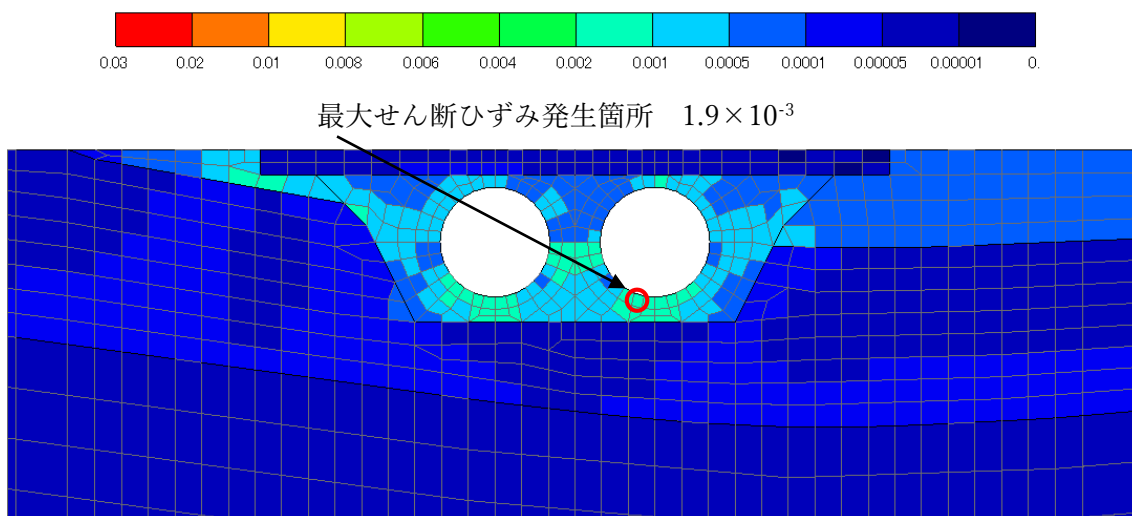


図 3-53 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (11/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - N_2 (EW) (+ +)$ )

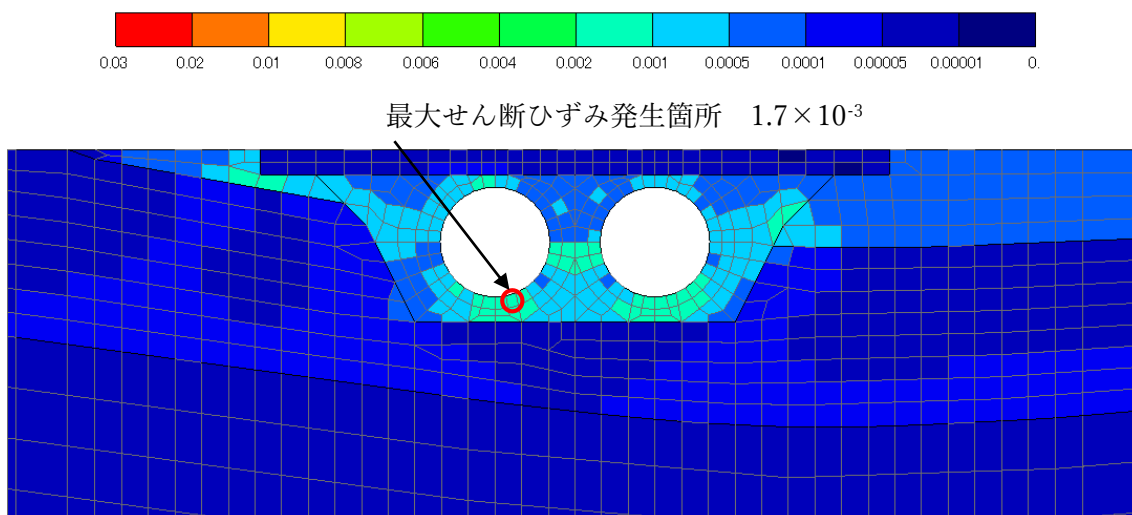


図 3-54 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (12/12)  
 (解析ケース①,  $S_s - N_2 (EW) (- +)$ )

### 3.7.2 解析ケース②及び解析ケース③（地盤物性のばらつきを考慮したケース）

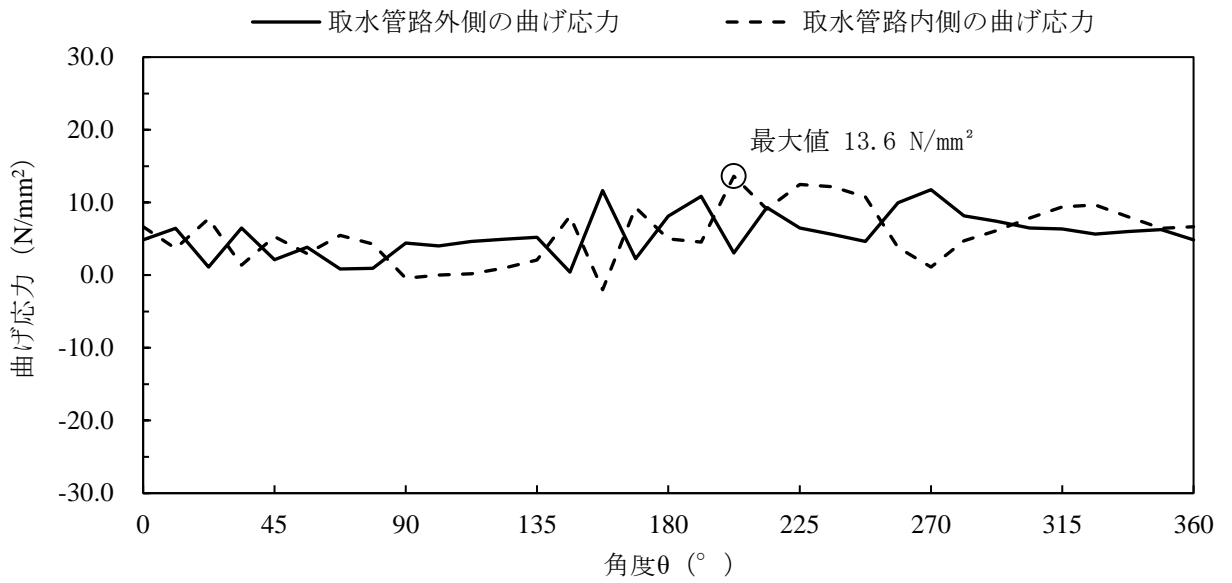
「3.7.1 解析ケース①（基本ケース）」より，発生最大曲げ応力並びに最大せん断応力は，どちらも  $S_s - F_2$  で最大値を示す。

そこで， $S_s - F_2$  に対して地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース②，解析ケース③を実施する。その際の応力分布図を図 3-55 及び図 3-56 に示す。

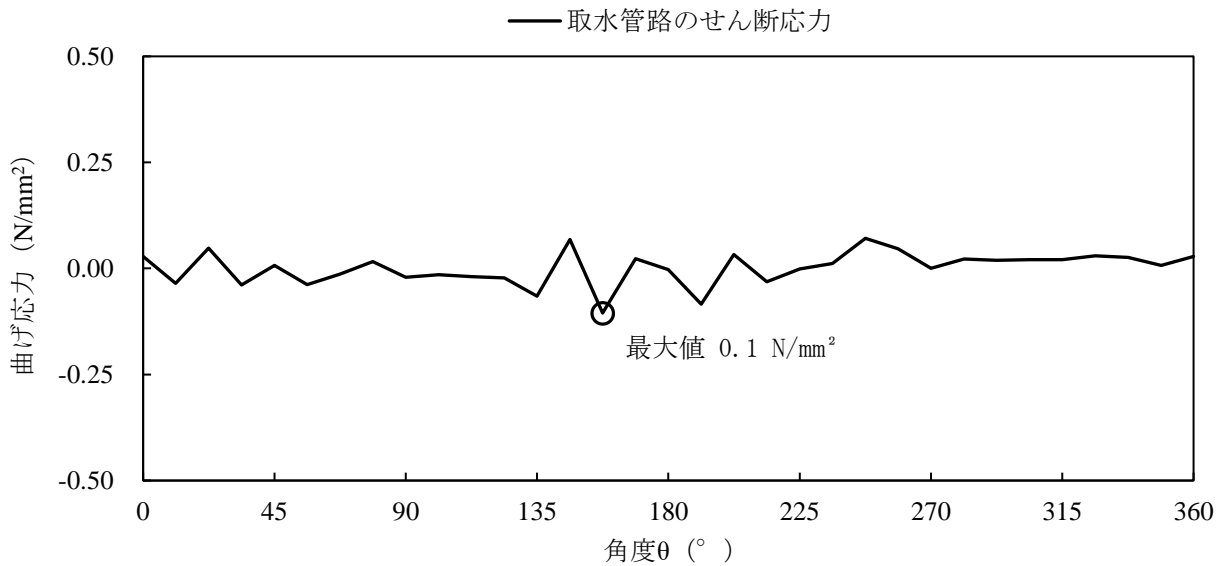
なお，本図は，取水管に発生する曲げ応力及びせん断応力が最大となる時刻における応力分布を示している。

また，それぞれのケースにおける曲げ応力・せん断力の最大値を表 3-11，3-12 に整理する。

なお，基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図を図 3-57 及び図 3-58 に示す。本図は，全時刻において各要素に発生した最大せん断ひずみを示したものであり，取水管周辺の地盤に発生する最大せん断ひずみは， $10^{-3} \sim 10^{-4}$  オーダーの値のため，「補足-023-01 地盤の支持性能について」で示した繰返し三軸試験にてその挙動を確認しているひずみレベルの範囲内であることを確認した。



(曲げ応力分布 t=15.87s)



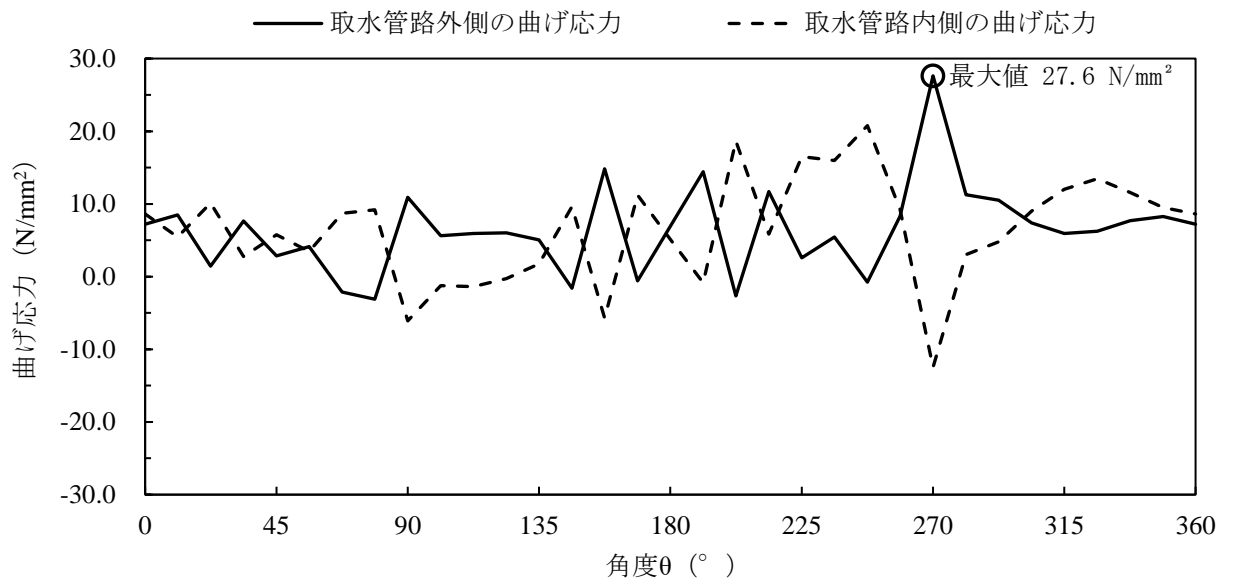
(せん断応力分布 t=15.87s)

注：横軸の角度 $\theta$ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

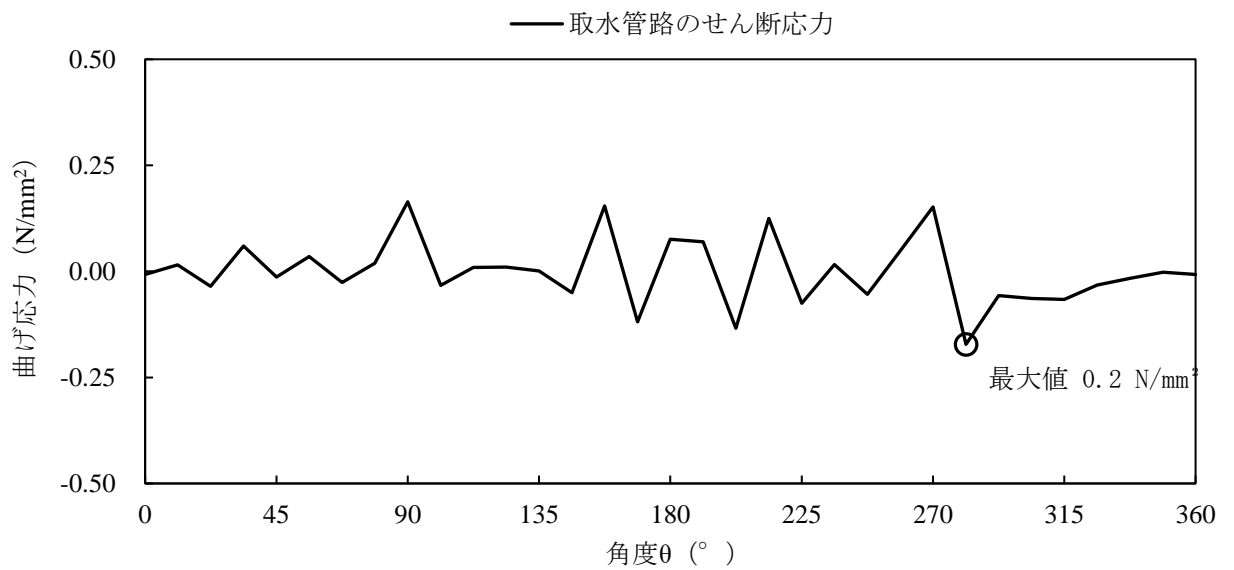
図 3-55 取水管管周方向の応力分布図 (1/2)

(解析ケース②, S<sub>s</sub>-F 2 (++) )





(曲げ応力分布 t=15.91s)



(せん断応力分布 t=15.90s)

注：横軸の角度 $\theta$ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-56 取水管管周方向の応力分布図 (2/2)

(解析ケース③, S<sub>s</sub>-F 2 (++) )

表 3-11 各ケースにおける発生最大曲げ応力度一覧表

地震動		解析ケース		発生最大曲げ応力度 $N/mm^2$		
				全応力解析		
				①	②	③
S s - D	++		16.3	-	-	
	-+		17.2	-	-	
	+-		18.5	-	-	
	--		18.5	-	-	
S s - F 1	++		12.8	-	-	
S s - F 2	++		19.6	13.6	27.6	
S s - N 1	++		10.9	-	-	
	-+		10.1	-	-	
S s - N 2 (N S)	++		10.7	-	-	
	-+		10.4	-	-	
S s - N 2 (E W)	++		16.0	-	-	
	-+		15.3	-	-	

表 3-12 各ケースにおける発生最大せん断応力度一覧表

地震動		解析ケース		発生最大せん断応力度 $N/mm^2$		
				全応力解析		
				①	②	③
S s - D	++		0.1	-	-	
	-+		0.1	-	-	
	+-		0.1	-	-	
	--		0.1	-	-	
S s - F 1	++		0.1	-	-	
S s - F 2	++		0.2	0.1	0.2	
S s - N 1	++		0.1	-	-	
	-+		0.1	-	-	
S s - N 2 (N S)	++		0.1	-	-	
	-+		0.1	-	-	
S s - N 2 (E W)	++		0.1	-	-	
	-+		0.1	-	-	

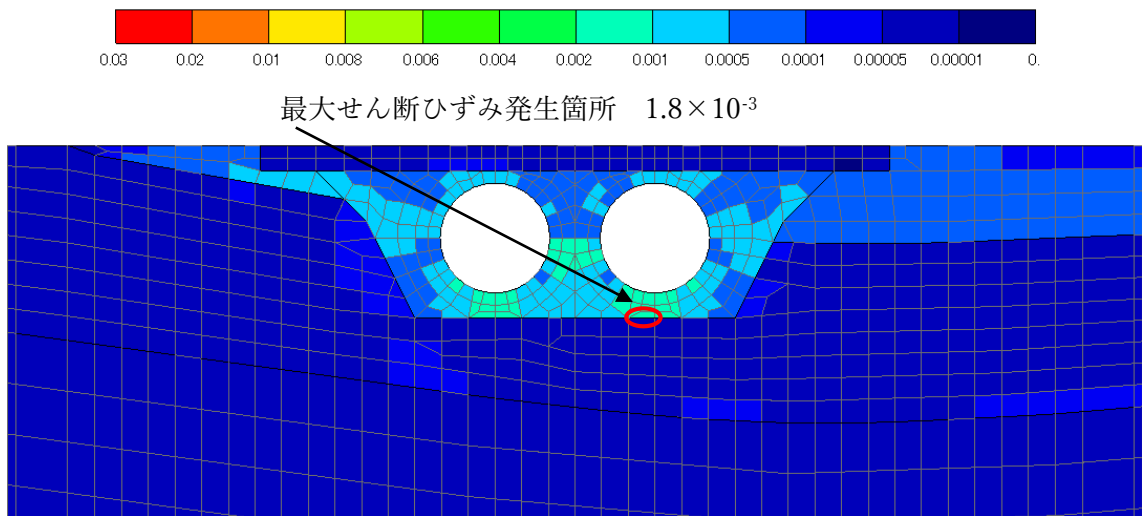


図 3-57 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (1/2)  
 (解析ケース②,  $S_s - F_2$  (++) )

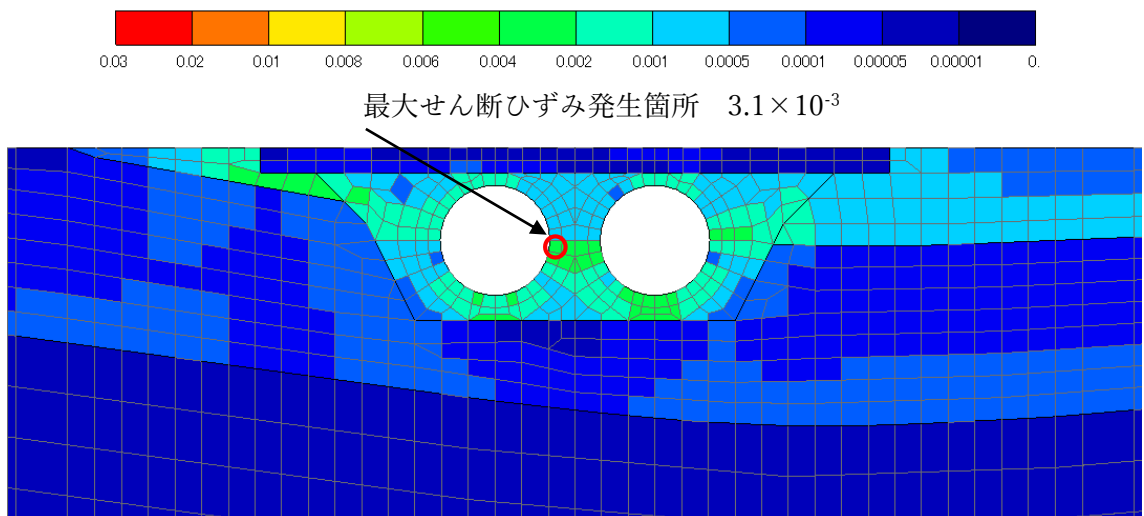


図 3-58 基礎地盤の最大せん断ひずみ分布図 (2/2)  
 (解析ケース③,  $S_s - F_2$  (++) )

#### 4. 管軸方向の地震応答解析

本章では管軸方向の検討を行うための地震応答解析について記載する。管軸方向の検討フローについて図 4-1 に示す。管軸方向の地震応答解析は、算出された地盤変位を用いて管軸方向の応力解析に用いるために行う。

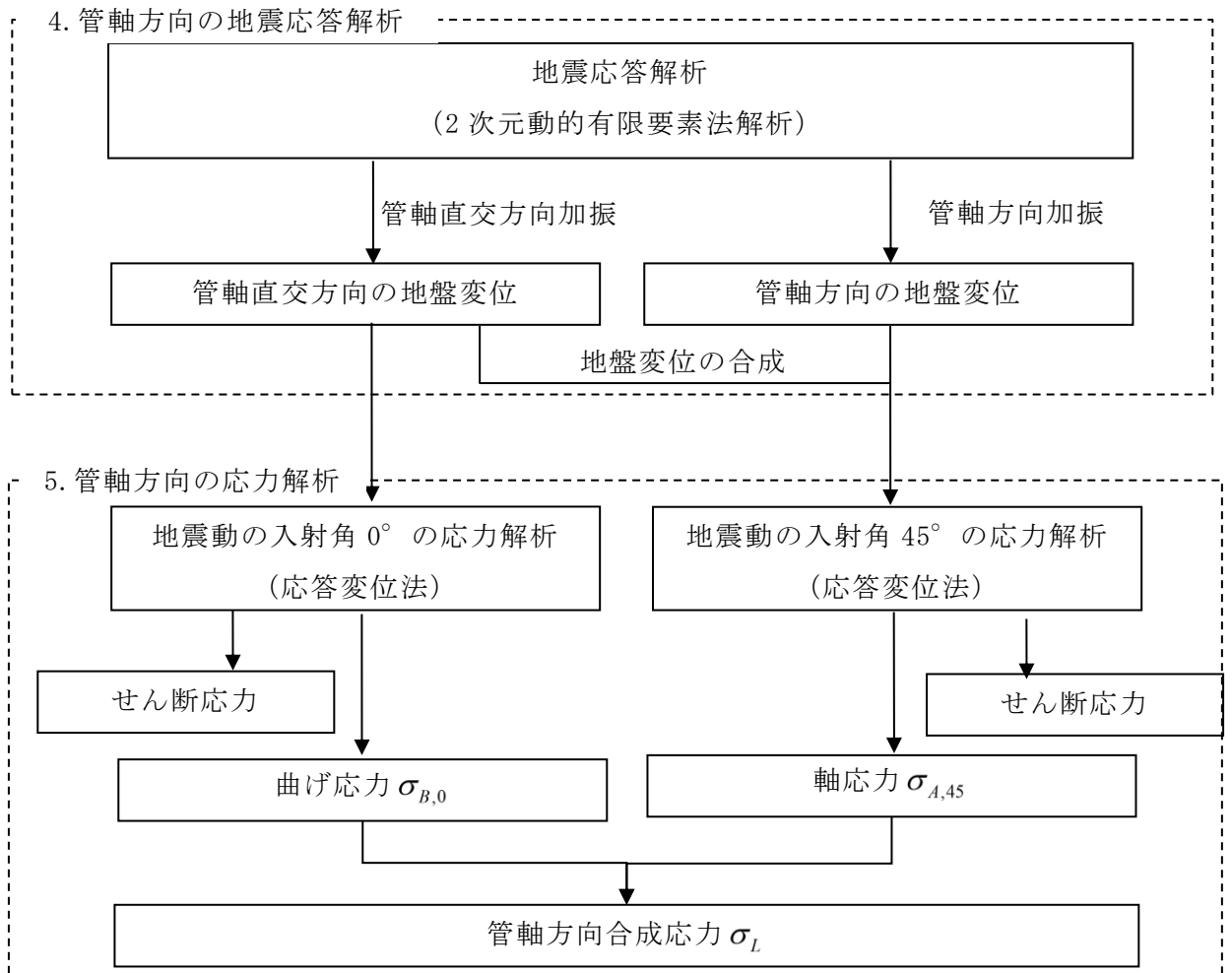


図 4-1 取水管管軸方向の地震応答解析モデル

#### 4.1 地震応答解析手法

地震応答解析手法は、「3.1 地震応答解析手法」に基づき選定する。解析手法のフローに基づき全応力解析を選定する。

取水管の管軸方向応力の評価に用いる地震応答解析は、管軸直交方向及び管軸方向加振が可能な二次元有限要素法モデルを用いた周波数応答解析にて行う。

地震応答解析に用いる解析モデルは、管軸直交方向断面にてモデル化し、奥行き方向に一樣な断面が存在するとして、管軸直交方向並びに管軸方向の検討を行う。応力解析時に必要となる地盤変位については、管軸直交方向の地盤変位及び管軸方向の地盤変位を合成して使用する。

地震応答解析については、解析コード「S u p e r F L U S H / 2 D」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。また、等価線形化法を用いた周波数応答解析の妥当性については、「参考資料2 等価線形化法を用いた地震応答解析の妥当性確認」に示す。

## 4.2 地震応答解析モデルの設定

### 4.2.1 境界条件

エネルギーの逸散効果を評価するため、解析領域の側面にはエネルギー伝達境界を、底面には粘性境界を設ける。

なお、管軸直交方向加振、管軸方向加振については同様の境界条件とする。

### 4.2.2 解析モデル領域

管軸方向の検討に用いる、地震応答解析モデルの領域の設定は、「3.2.1 解析モデル領域」を基準に設定する。

### 4.2.3 地盤のモデル化

本地震応答解析の地盤モデルは、「3.2.3 地盤及び被覆コンクリートのモデル化」より取水管を取り除いた解析モデルとする。この際、岩盤及び被覆コンクリートは線形材料にてモデル化する。また、砕石は等価線形化法を適用し、動せん断弾性係数及び減衰定数の非線形特性を考慮する。

地震応答解析によって得られる砕石の収束剛性を精度よく算出するために砕石層を3層に分けて、それぞれの層の収束剛性を求める。図4-2に砕石部の拡大図を添付する。

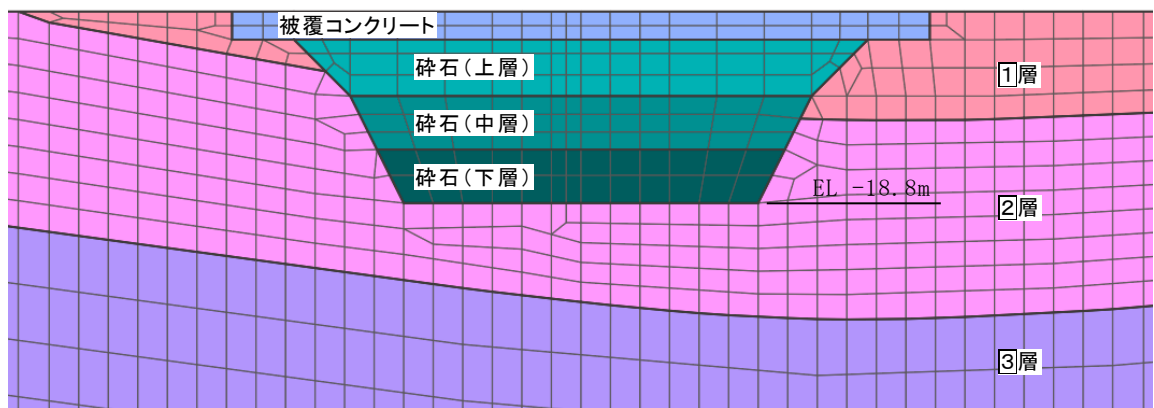
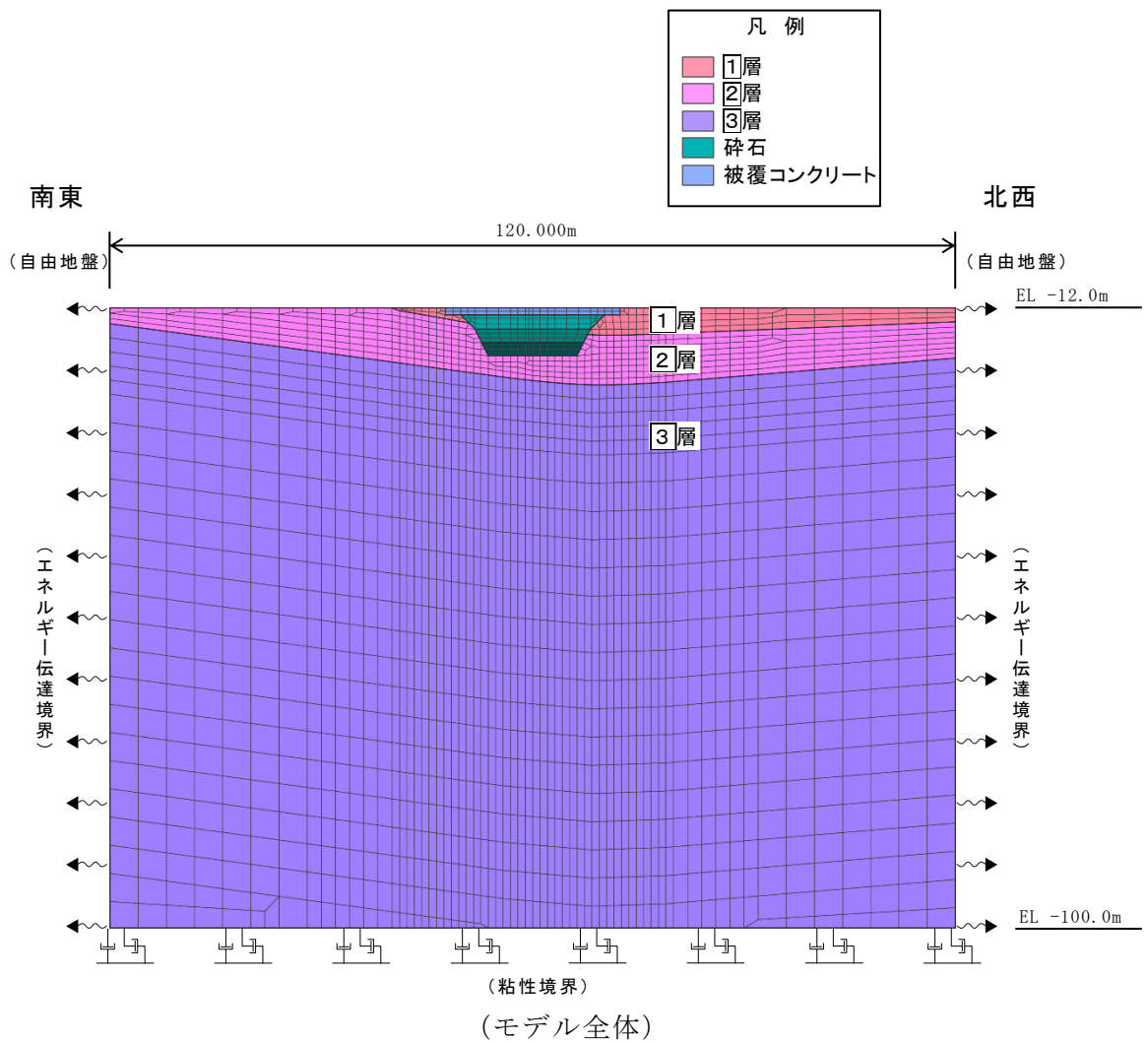


図 4-2 取水管管軸方向の地震応答解析モデル

#### 4.3 入力地震動

入力地震動は、「3.6.2 入力地震動の結果」で示した水平方向の地震動を用いる。

#### 4.4 耐震評価における解析ケース

##### 4.4.1 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

管軸方向の応力評価に用いる地震応答解析については、「3.5.1 耐震評価における解析ケース」と同様に岩盤のばらつきについて影響を確認する。ばらつきを考慮するケースについては表 3-7 に記す。

##### 4.4.2 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価においては、基準地震動  $S_s$  全波（6波）に対し、基本ケースを実施する。基本ケースにおいて、最大地盤ひずみ及び最大水平変位が最大となる地震動に対してケース②及びケース③を実施する。耐震評価における解析ケースを表 4-1 に示す。また、応答変位法による応力解析を実施する地震動の選定フローを図 4-3 に示す。



表 4-1 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①	ケース②	ケース③
		基本ケース	地盤物性のばらつき (+1σ)を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1σ)を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値+1σ	平均値-1σ
地震動	S <sub>s</sub> -D	○		
	S <sub>s</sub> -F1	○	基準地震動S <sub>s</sub> (6波)に対し、ケース①(基本ケース)を実施する。 最大地盤ひずみ及び最大水平変位が最も大きくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。	
	S <sub>s</sub> -F2	○		
	S <sub>s</sub> -N1	○		
	S <sub>s</sub> -N2(EW)	○		
	S <sub>s</sub> -N2(NS)	○		

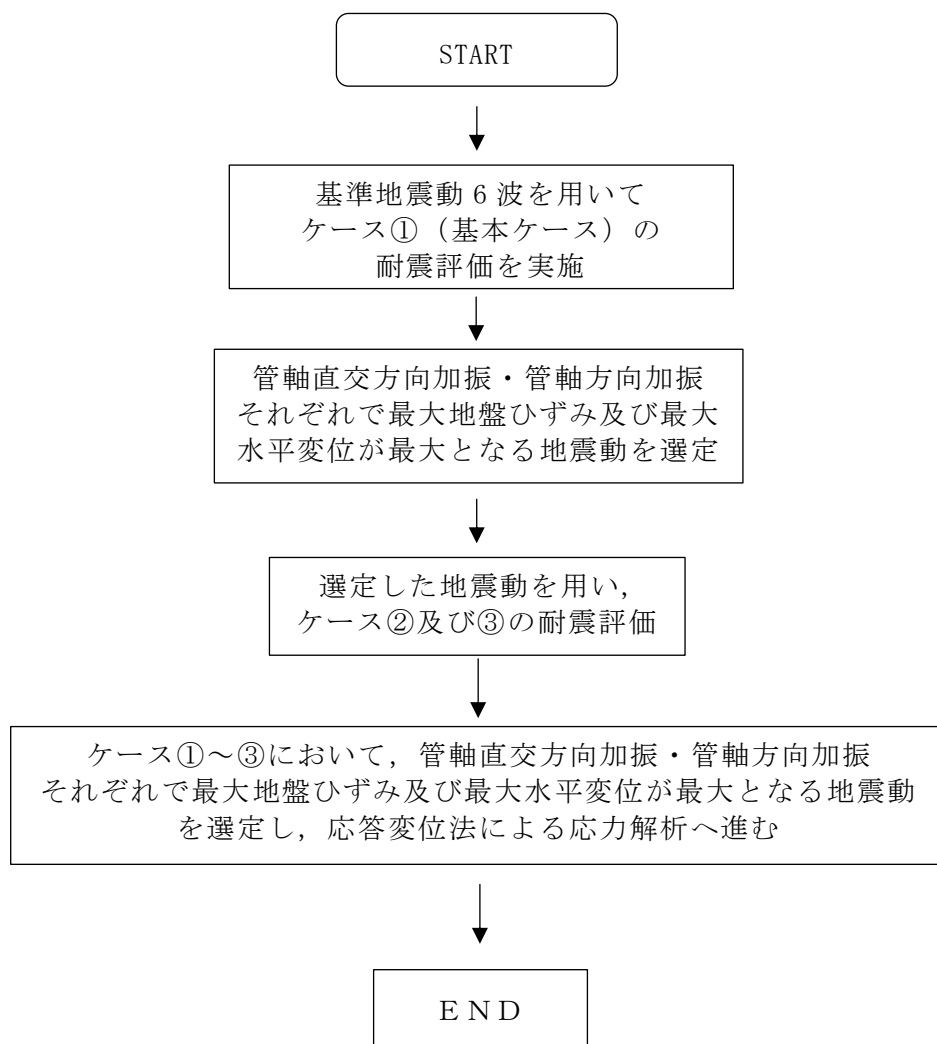


図 4-3 応答変位法による応力解析を実施する地震動の選定フロー

#### 4.5 最大地盤ひずみ算出方法

管軸方向の応力解析（応答変位法）の概念図を図4-4に示す。

同図より、管軸方向の応力解析においては、地盤に生じる水平変位と地震動の波長  
の関係、つまり、地盤ひずみに支配される。

地盤ひずみ  $\varepsilon_G(x)$  は、地盤に生じる変位と波長より、次式で与えられる。

$$\varepsilon_G(x) = \frac{dU(x)}{dx} = 2\pi \frac{U_0}{L} \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}x + \varphi\right)$$

ここで、

$U_0$  : 管軸位置の地盤の水平方向最大応答変位 (m)  
(応答解析の結果より)

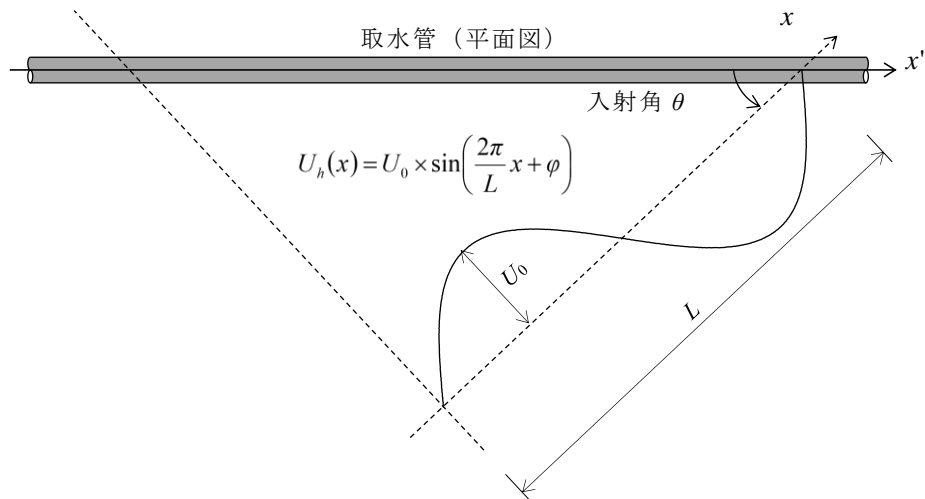
$L$  : 地震動の波長 (m)

$x$  : 地震動に沿った距離 (m)

$\varphi$  : 地震動の位相 (度)

以上より、最大地盤ひずみは、次式で表される。

$$\varepsilon_{Gmax} = 2\pi \frac{U_0}{L}$$



$U_h$  : 水平変位 (m)

$U_0$  : 管軸位置の地盤の水平方向最大応答変位 (m) (応答解析の結果より) \*

$L$  : 地震動の波長 (m)

$x$  : 地震動に沿った距離 (m)

$\varphi$  : 地震動の位相 (°)

$\theta$  : 入射角 (°)

注記\* : 応力解析における地盤変位は、「水道施設耐震工法指針・解説 (日本水道協会, 1997)」に基づき、管軸位置の水平変位を用いる。

図 4-4 管軸方向の応力解析 (応答変位法) の概念図

#### 4.5.1 地震動の波長の算定

表層地盤の 1 次固有周期を、地震応答解析の伝達関数より算定し、地震動の見かけの伝播速度を求め、次式より地震動の波長を算定する。

$$L = V \cdot T_G$$

$L$  : 地震動の波長 (m)

$T_G$  : 表層地盤の固有周期 (sec)

$V$  : 表層地盤の伝播速度 (m/sec)

伝達関数は解析モデル中央の地表面から抽出し、伝達関数のピーク周波数から表層地盤の固有周期を算定する。算定された固有周期を用いて、図 4-5 より伝播速度を求める。

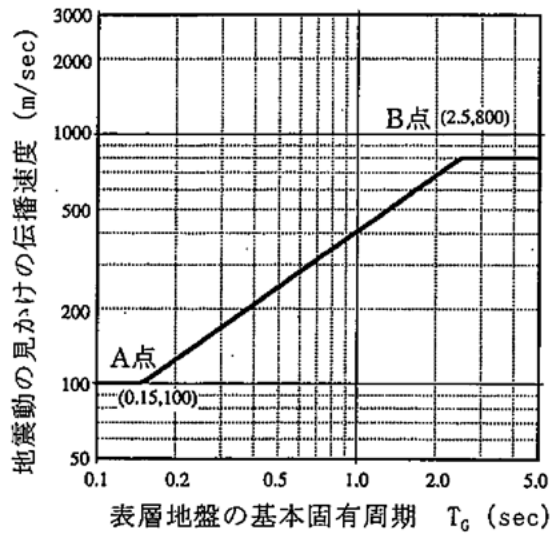


図 4-5 地震動の見かけの伝播速度

「水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006（日本水道鋼管協会，2006.2.2）」より引用

#### 4.6 地震応答解析結果

##### 4.6.1 解析ケース①（基本ケース）

耐震評価のために用いる砕石の水平方向の最大応答変位分布図として，解析ケース①（基本ケース）について，すべての基準地震動  $S_s$  に対する全時刻における最大応答変位分布図を図 4-6 及び図 4-7 に示す。

また，水平地盤変位及び地震動の波長から求まる地盤ひずみについて表 4-2 に示す。

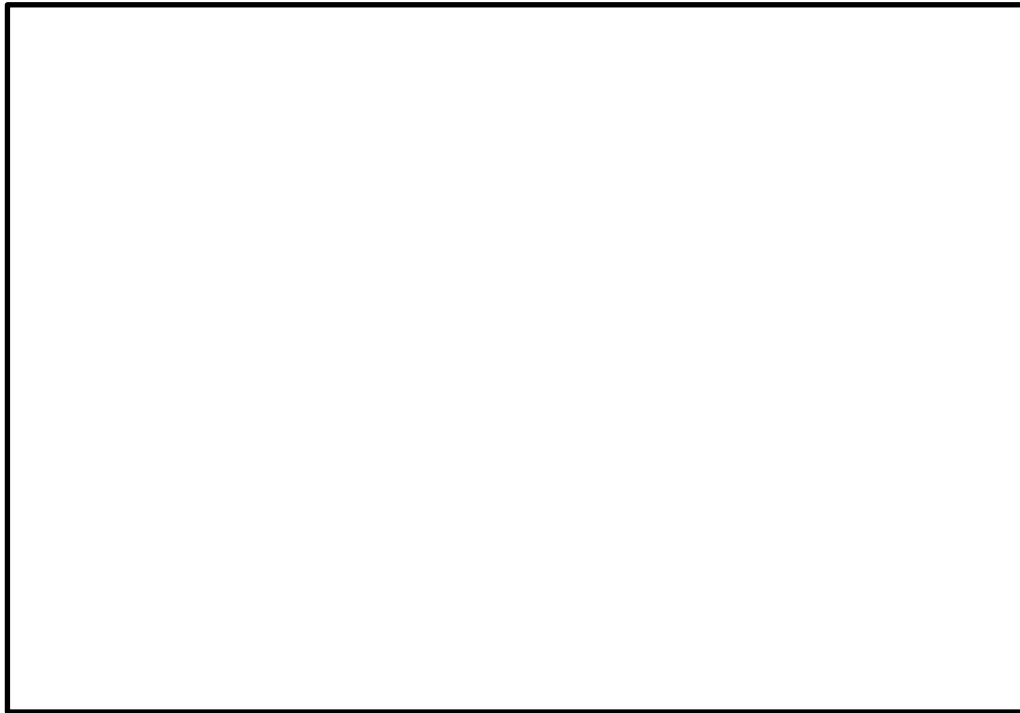


図 4-6 碎石の最大応答変位分布図（管軸直交方向加振）（解析ケース①）

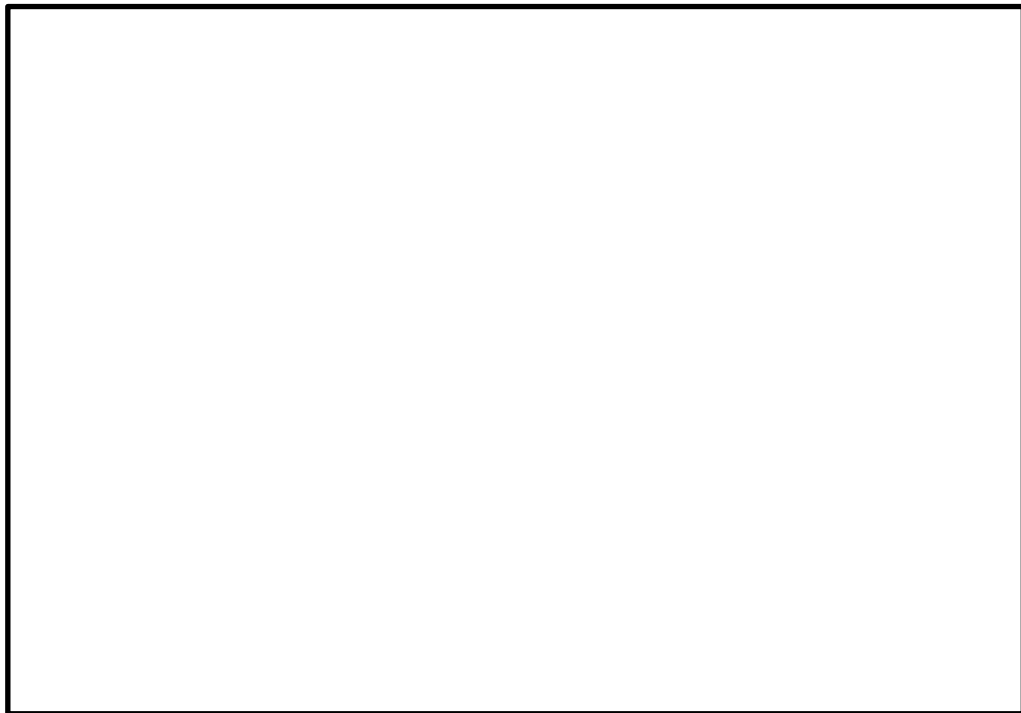


図 4-7 碎石の最大応答変位分布図（管軸方向加振）（解析ケース①）

表 4-2 地盤の最大ひずみ（解析ケース①）

解析 ケース	地震動	管軸直交方向加振			管軸方向加振		
		最大変位 U <sub>o</sub> * (mm)	波長 L (m)	最大地盤 ひずみ (%)	最大変位 U <sub>o</sub> * (mm)	波長 L (m)	最大地盤 ひずみ (%)
ケース①	S s - D	3.30	8.0	0.259	4.35	9.4	0.291
	S s - F 1	2.37	7.8	0.191	3.20	9.0	0.223
	S s - F 2	3.16	8.0	0.248	4.28	9.4	0.286
	S s - N 1	1.51	7.6	0.125	1.93	8.6	0.141
	S s - N 2 (NS)	1.65	7.6	0.136	2.14	8.7	0.155
	S s - N 2 (EW)	2.12	7.7	0.173	2.90	9.0	0.202

注記\*：最大水平変位U<sub>o</sub>は、取水管中心座標高位置における変位

#### 4.6.2 解析ケース②及び解析ケース③（地盤物性のばらつきを考慮したケース）

「4.6.1 解析ケース①（基本ケース）」より，最大地盤ひずみ及び最大水平変位は，管軸直交方向及び管軸方向の地震応答解析ともに  $S_s - D$  で最大値を示す。そこで，当該地震動に対して地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース②及び解析ケース③の最大応答変位分布図を図 4-8，図 4-9 に示す。

また，水平地盤変位及び地震動の波長から求まる地盤ひずみについて表 4-3 に示す。最大地盤ひずみの値は，解析ケース②で最大となっているが，最大水平変位の値は解析ケース③で最大となっている。そこで，管軸方向の応力解析については，解析ケース②及び解析ケース③（ $S_s - D$ ）を対象とする。



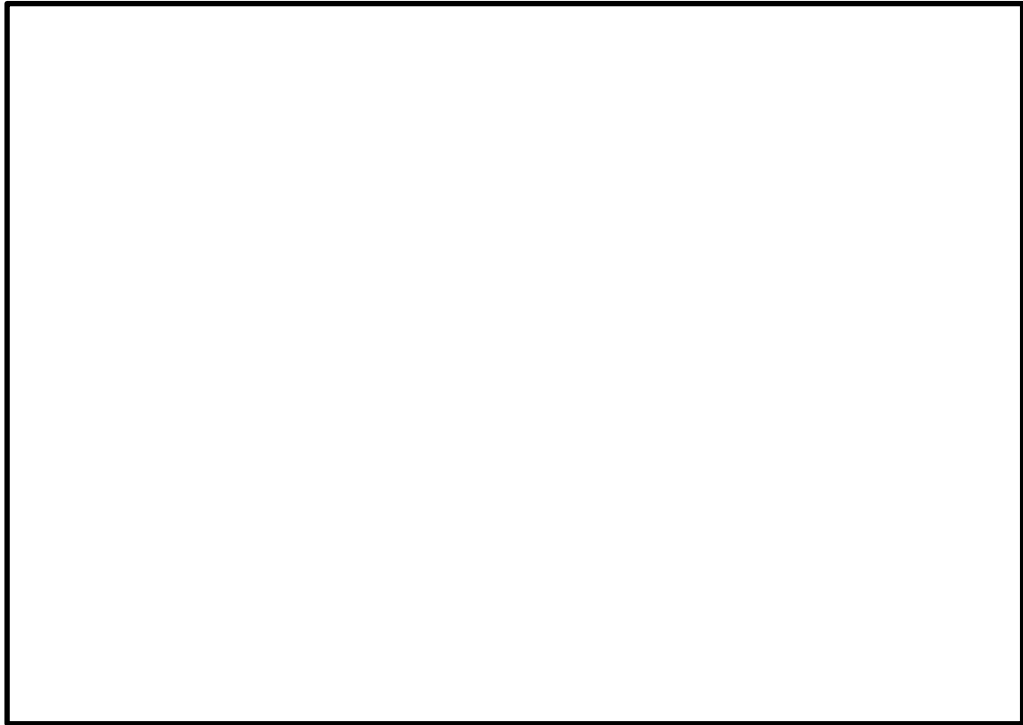


図 4-8 碎石の最大応答変位分布図（管軸直交方向加振）（解析ケース②，③）

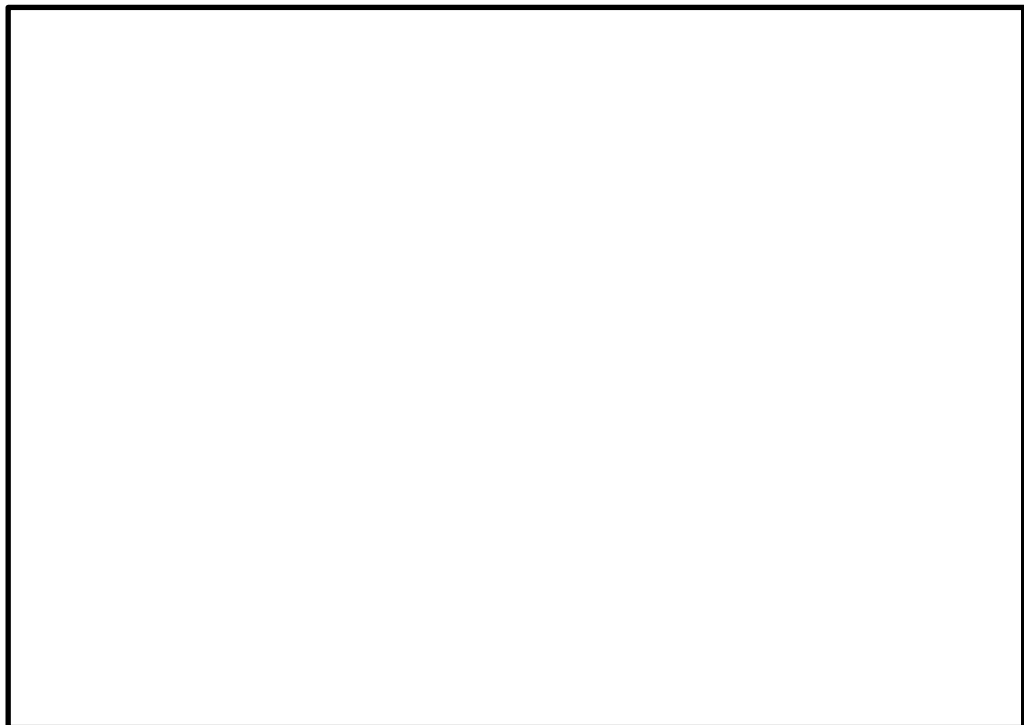


図 4-9 碎石の最大応答変位分布図（管軸方向加振）（解析ケース②，③）

表 4-3 地盤の最大ひずみ（解析ケース①，②，③）

解析 ケース	地震動	管軸直交方向加振			管軸方向加振		
		最大変位 $U_0^*$ (mm)	波長 L (m)	最大地盤 ひずみ (%)	最大変位 $U_0^*$ (mm)	波長 L (m)	最大地盤 ひずみ (%)
ケース①	S s - D	3.30	8.0	0.259	4.35	9.4	0.291
ケース②	S s - D	2.61	4.9	0.335	4.30	9.0	0.300
ケース③	S s - D	3.94	9.1	0.272	4.38	10.4	0.265

注記\*：最大水平変位 $U_0$ は，取水管中心座標高位置における変位

## 5. 管軸方向の応力解析

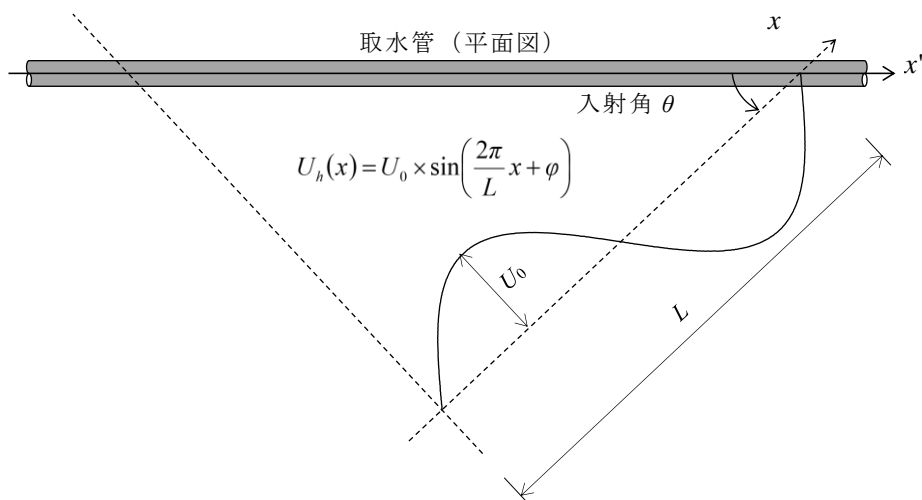
取水管管軸方向の応力解析（応答変位法）は、「4. 管軸方向の地震応答解析」より、取水管の耐震性に最も影響を及ぼす地震動を対象に実施するものとし、地震応答解析結果を基に算出した地盤ひずみが最大となる解析ケース②（ $S_s - D$ ）及び、水平変位が最大となる解析ケース③（ $S_s - D$ ）を対象とする。

### 5.1 解析方法

管軸方向の応力については、周辺の砕石の変位及びひずみを考慮し、管軸方向の曲げ応力及び軸力を組み合わせる。管軸方向の応力解析の概念図は図5-1に示す。

管軸方向の応力解析は、それぞれの解析ケースにおける砕石の最大水平変位振幅、地震波の波長及び地震波の入射角を考慮する。

応力解析には、解析コード「NX NASTRAN」を使用する。解析コードの検証及び妥当性の確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



$U_h$  : 水平変位 (m)

$U_0$  : 管軸位置の地盤の水平方向最大応答変位 (m) (応答解析の結果より) \*

$L$  : 地震動の波長 (m)

$x$  : 地震動に沿った距離 (m)

$\varphi$  : 地震動の位相 (°)

$\theta$  : 入射角 (°)

注記\* : 応力解析における地盤変位は、「水道施設耐震工法指針・解説 (日本水道協会, 1997)」に基づき、管軸位置の水平変位を用いる。

図5-1 管軸方向の応力解析（応答変位法）の概念図

## 5.2 応力解析モデルの設定

管軸方向の応力解析モデルを図 5-2 に示す。

### 5.2.1 取水管のモデル化

取水管は、断面性能及び鋼材のヤング係数に基づく線形はり要素でモデル化する。

### 5.2.2 境界条件

取水管端部については、取水管が取水口及び巻立コンクリートにて拘束されることから、固定端としてモデル化する。可撓管が設置される箇所については、自由端とし回転及び変位を許容することで、可撓管の自由度を考慮する。可撓管を 2 重接点として自由度を考慮したモデルとすることで、可撓管を基準に別々の挙動を示すモデルとしてモデル化を行う。

なお、可撓管の耐震評価については「参考資料 3 可撓管の耐震性評価」に記す。

### 5.2.3 地盤ばね

地盤ばねは、管軸方向のせん断ばね及び管軸直交方向の直ばねを 1m ピッチで設定する。

地盤ばね定数は、岩盤の掘削形状を考慮した 2 次元有限要素法解析モデル及び 3 次元有限要素法解析モデルにおいて、強制変位を与えた場合の地盤反力から算定する。この際、取水管中心位置より取水管に向かって剛はりを設定したのち、中心位置に強制変位をかける。強制変位をかけた際の荷重と変位の関係性を用いて地盤のばね定数を算出する。

地盤ばね定数を求める砕石の動せん断弾性係数は、「4. 管軸方向の地震応答解析」における収束値を用いる。地盤ばね定数を表 5-1 に示す。

地盤ばね算定モデル概念図を図 5-3 に示す。管軸方向解析モデル概念図を図 5-4 に示す。

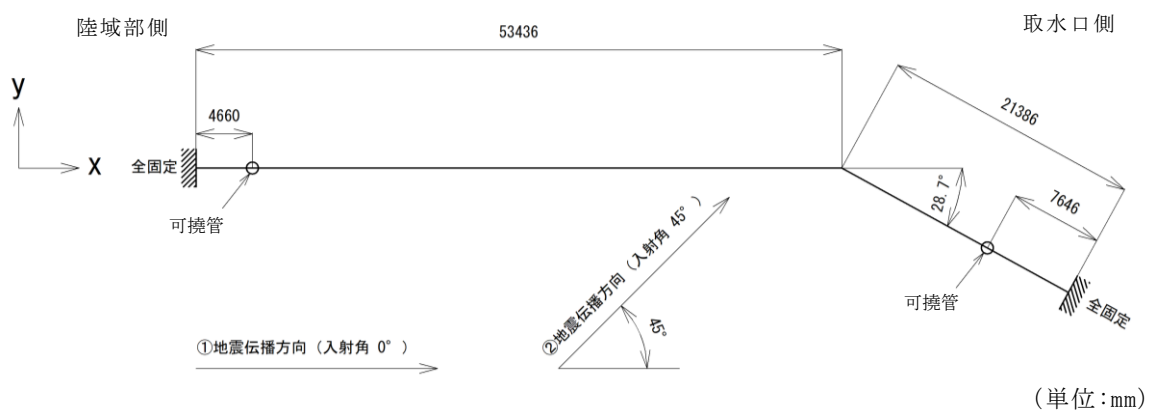
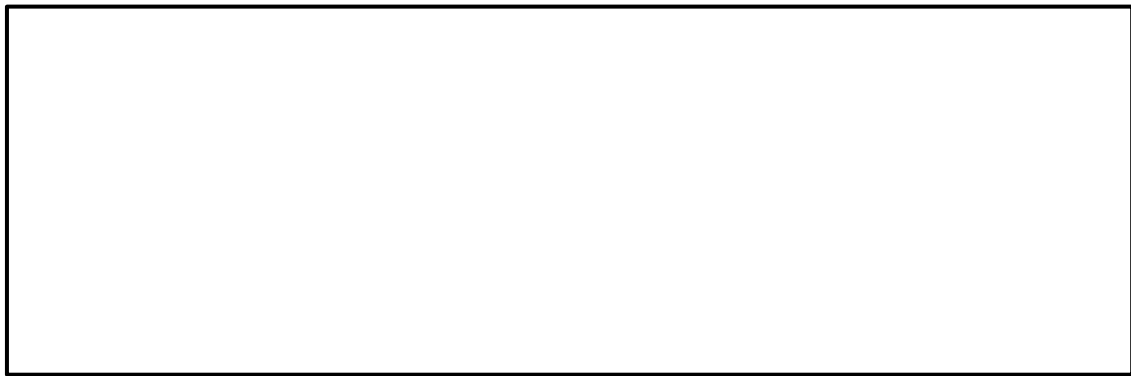


図 5-2 管軸方向の応力解析モデル

表 5-1 地盤ばね定数

地震動	地盤ばね定数(kN/m <sup>2</sup> )	
	管軸直交方向	管軸方向
S <sub>s</sub> -D	7.663 × 10 <sup>5</sup>	2.370 × 10 <sup>5</sup>



a) 管軸直交方向地盤ばね算定モデル



b) 管軸方向地盤ばね算定モデル

図 5-3 地盤ばね算定モデル概念図

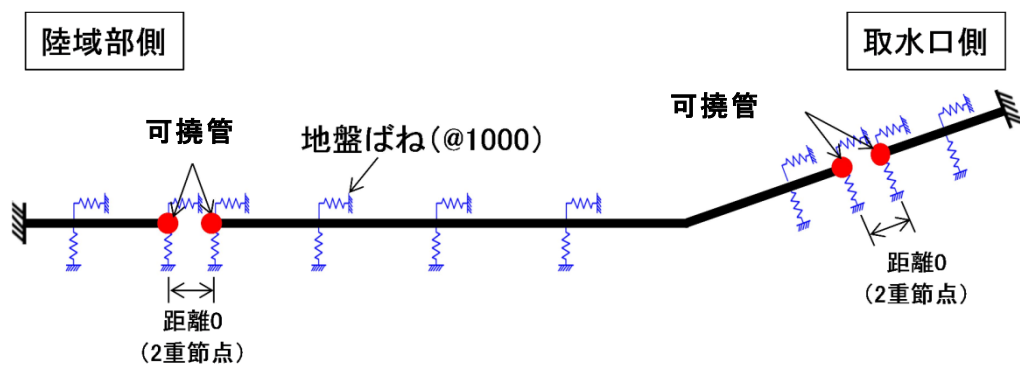


図 5-4 管軸方向解析モデル概念図

### 5.3 荷重及び荷重の組合せ

管軸方向の応答変位法で考慮する荷重は、地震時における動土圧（地盤変位）のみとし、躯体に作用する慣性力や内水圧等は、管周方向の検討で考慮する。

### 5.4 入力地盤変位

取水管位置における地盤の応答変位は、「4. 管軸方向の地震応答解析」にて求めた最大水平相対変位 $U_0$ 、地震動の波長 $L$ を考慮し、次式により算定する。

$$U_h(x) = U_0 \times \sin\left(\frac{2\pi}{L}x + \varphi\right)$$

ここで、

- $U_h$  : 最大水平変位 (m)
- $U_0$  : 地震応答解析における最大水平変位 (m)
- $L$  : 地震動の波長 (m)
- $x$  : 地震動に沿った距離 (m)
- $\varphi$  : 地震動の位相(°)で15°ピッチで与える

ここで、管軸方向の応力解析にて取水管に発生する応力は、地震動（地盤変位）の入射角 $\theta$ により発生値が変化する。表5-2に示すとおり、入射角0°で曲げ応力、入射角45°で軸応力が最大となることから地震動の入射角は0°及び45°とする。

地震動の入射角については図5-5で示すとおり、取水管延長が長くなる陸域部側から屈曲部までを基準として考える。

入射角0°の場合の最大水平変位 $U_0$ は、2次元有限要素法解析における管軸直交方向加振のものをを用い、入射角45°の場合の最大水平変位 $U_0$ は、管軸直交方向加振と管軸方向加振の最大水平変位を合成したものをを用いる。図5-6に、管軸方向に対して入射角0°の場合と図5-6に管軸方向に対して入射角45°の場合の入力地盤変位 $U_h$ を示す。

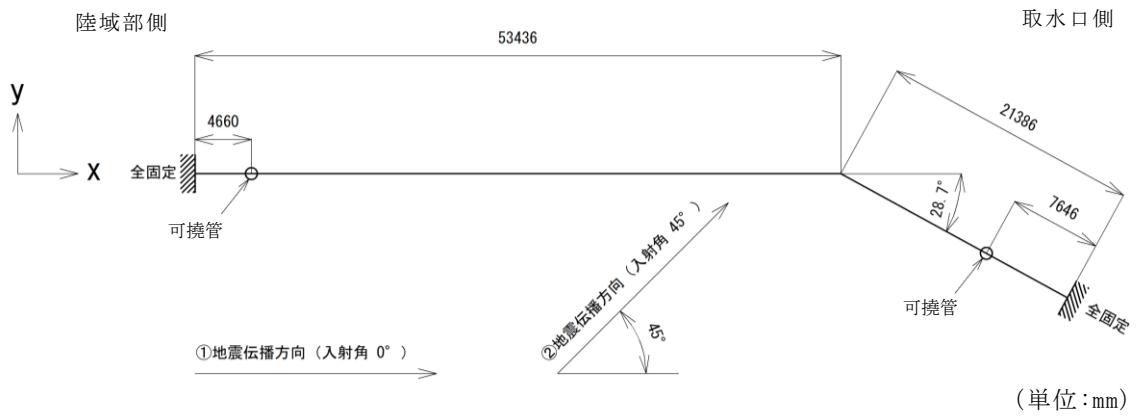
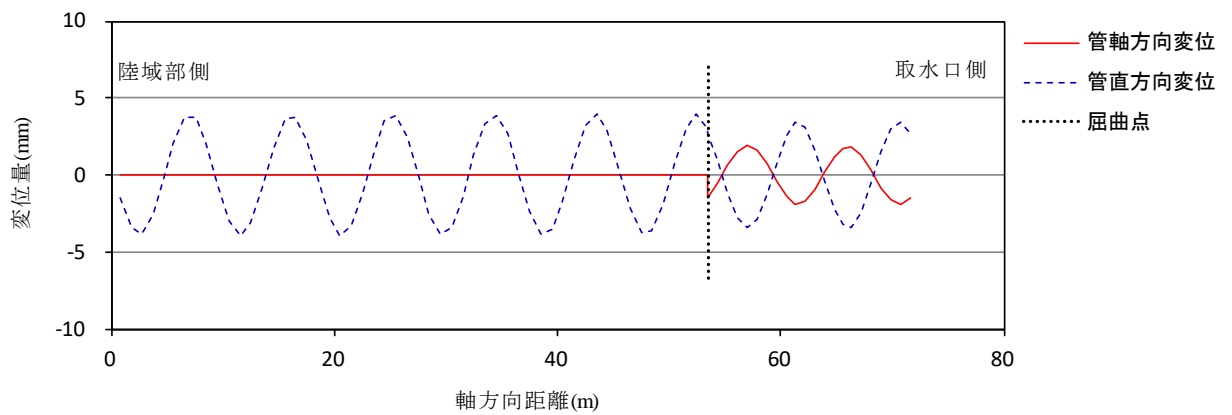


図 5-5 管軸方向の応力解析モデル

表 5-2 管軸方向応力解析における地震動の入射角と発生応力の関係

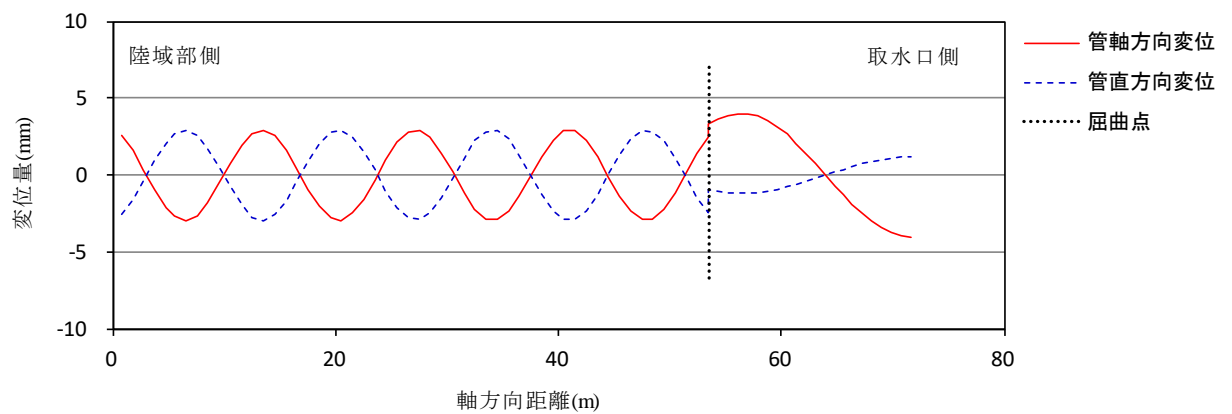
地震動の入射角 $\theta$	応力発生イメージ	備考
0°		地震動の入射角が 0° の場合、管軸直交方向の地盤変位が最大となるため、取水管に発生する曲げ応力が最大となる。
45°		地震動の入射角が 45° の場合、取水管と平行方向の地盤変位が最大となるため、取水管に発生する管軸方向応力が最大となる。なお曲げ応力も発生するが、0° 入射の場合よりも小さい。





注：横軸は図 5-5 の陸域部側固定端を原点とする。

図 5-6 入力地盤変位（入射角 0°）



注：横軸は図 5-5 の陸域部側固定端を原点とする。

図 5-7 入力地盤変位（入射角 45°）

### 5.5 管軸方向応力の合成

管軸方向応力は、入射角 0° の場合の応力と入射角 45° の場合の応力は、「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和 48 年 9 月 28 日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」に基づき以下の式にて合成したものとする。

$$\sigma_L = \sqrt{3.12 \times (\sigma_{A,45})^2 + (\sigma_{B,0})^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$\sigma_L$  : 管軸方向合成応力

$\sigma_{A,45}$  : 入射角 45° の場合の軸方向応力（軸応力）

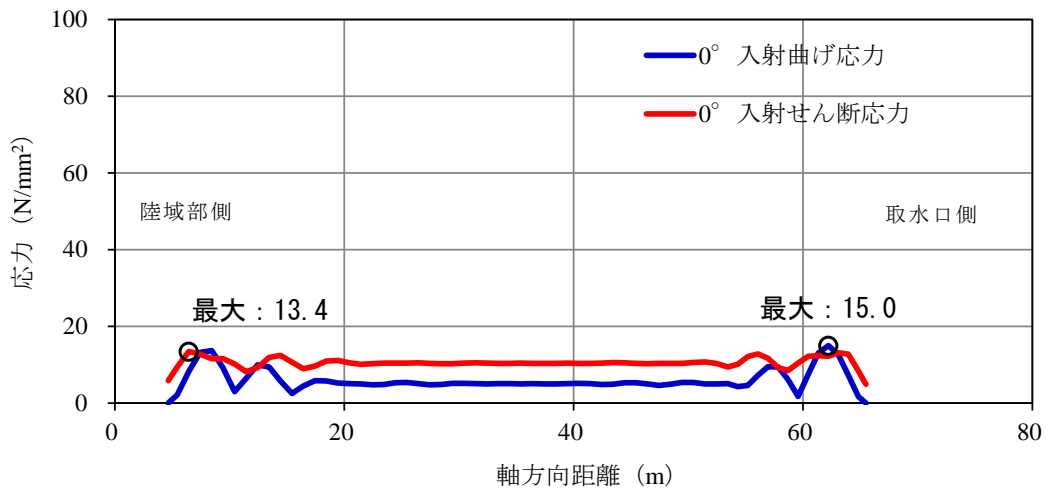
$\sigma_{B,0}$  : 入射角 0° の場合の軸方向応力（曲げ応力）

## 5.6 応力解析結果

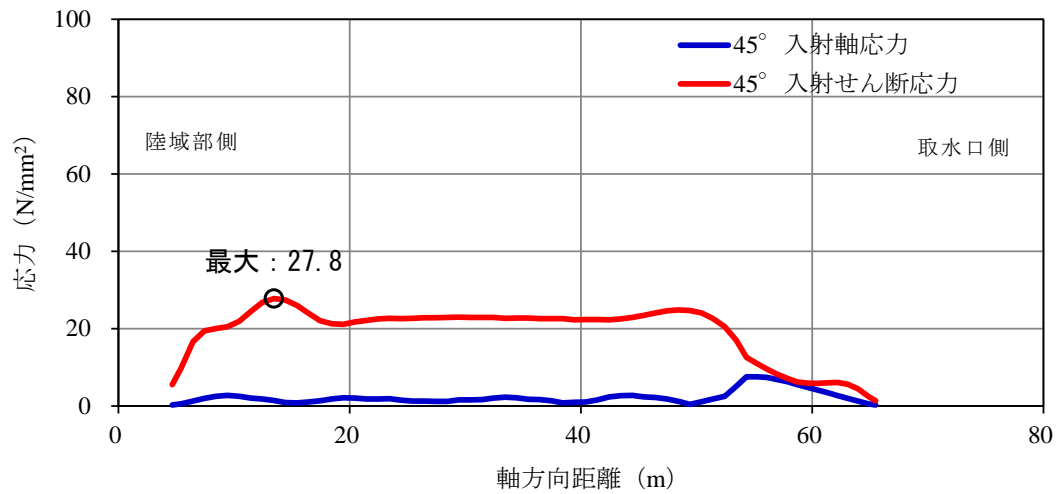
各解析ケースにおける，管軸方向の応力解析結果を図 5-8 及び図 5-9 に示す。

本図は，地震動の位相を  $15^\circ$  ピッチで与えた結果（24 ケース）のうち，各要素に生じた最大応力を抽出した値を示している。表 5-3 に管軸方向の応力比較を行った。

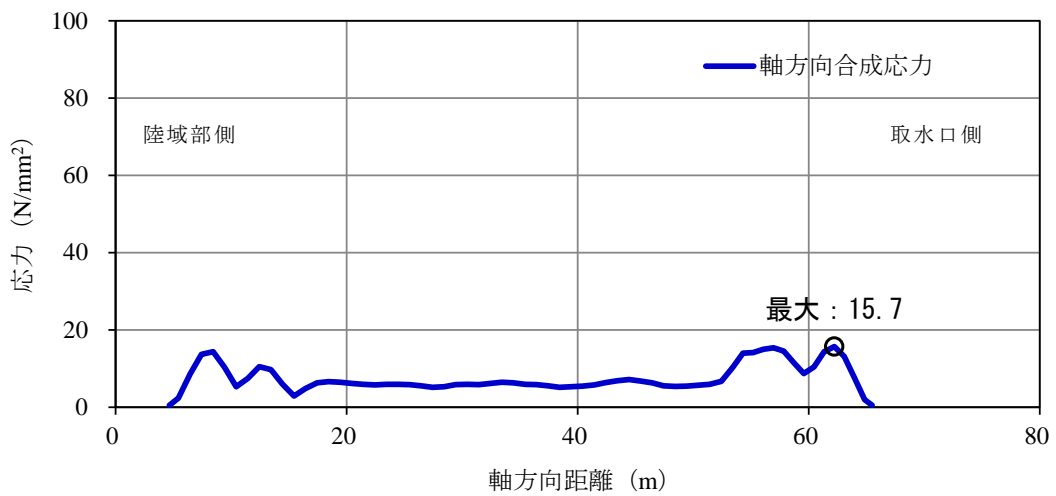
表 5-3 より，解析ケース③が軸方向合成応力及び入射せん断応力が大きいことから管軸方向応力に最も影響を及ぼす地震動は解析ケース③であることが分かる。次章以降の耐震評価においては解析ケース③の結果を用いることとする。



(0° 入射の応力解析結果)



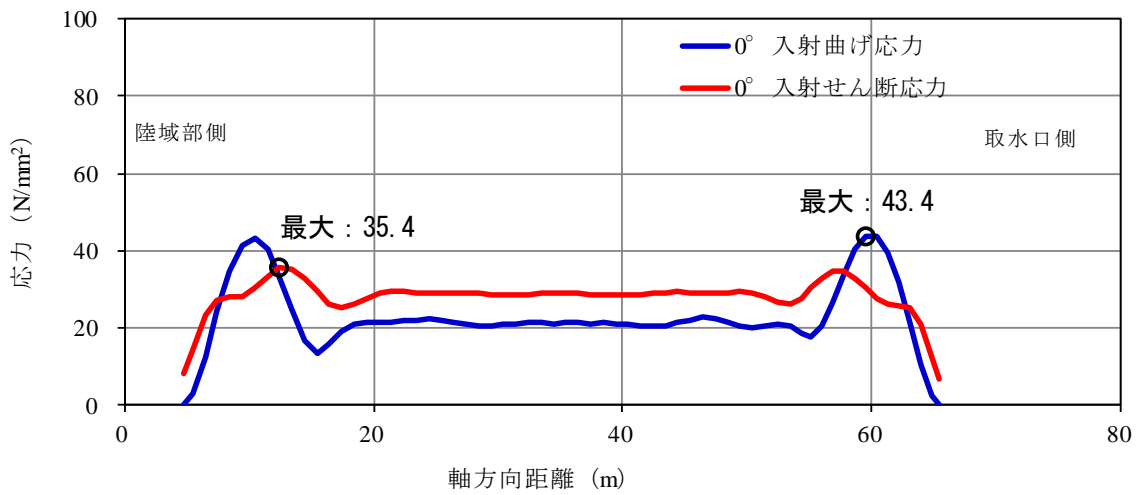
(45° 入射の応力解析結果)



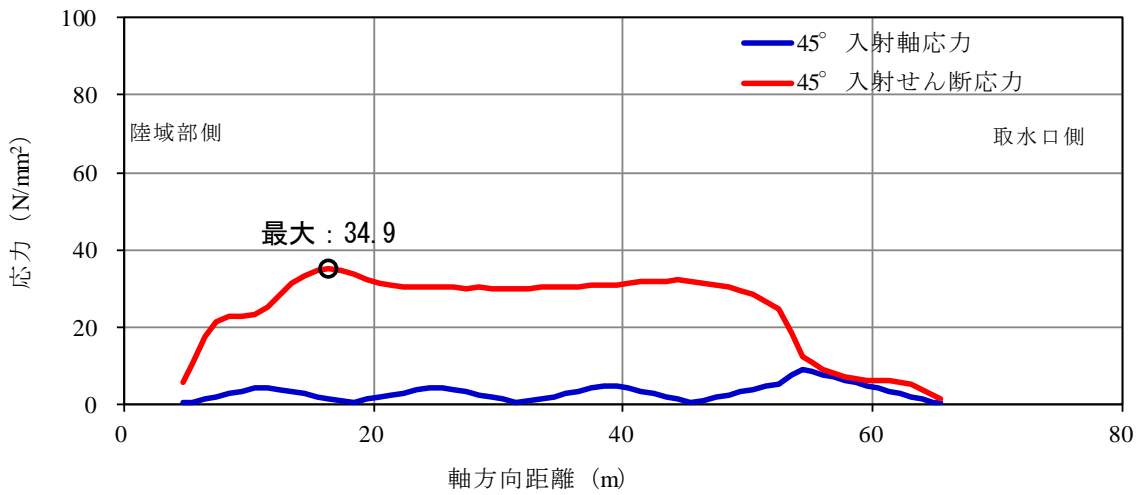
(0° 入射と 45° 入射の軸方向応力の合成)

注：横軸は図 5-5 の陸域部側固定端を原点とする。

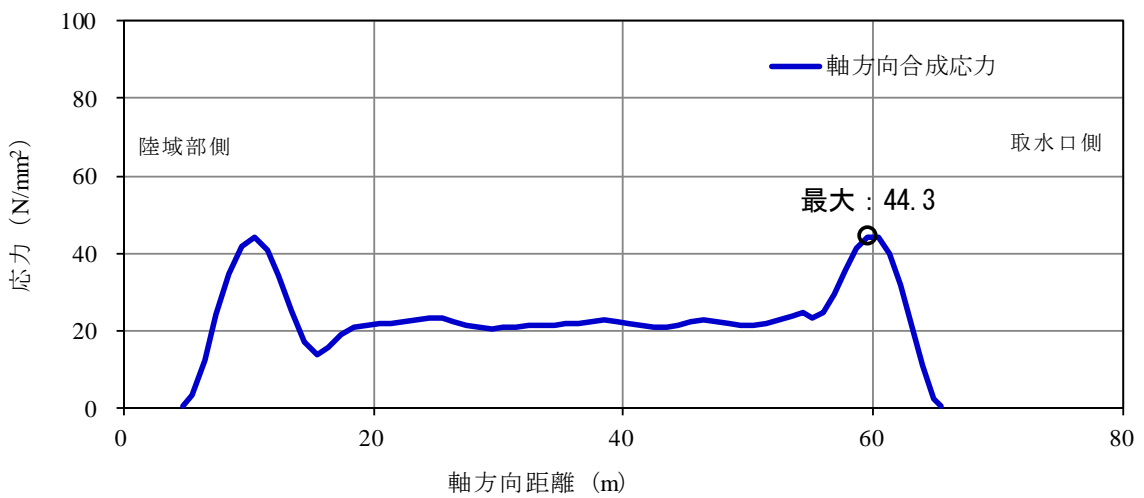
図 5-8 管軸方向の応力解析結果 (解析ケース②, S<sub>s</sub>-D)



(0° 入射の応力解析結果)



(45° 入射の応力解析結果)



(0° 入射と 45° 入射の軸方向応力の合成)

注：横軸は図 5-5 の陸域部側固定端を原点とする。

図 5-9 管軸方向の応力解析結果 (解析ケース③, S s-D)

表 5-3 各地震ケースにおける管軸方向の応力度

	軸方向合成応力度最大値 (N/mm <sup>2</sup> )	入射せん断応力度最大値 (N/mm <sup>2</sup> )
解析ケース②	15.7	27.8
解析ケース③	44.3	35.4

## 6. 耐震評価

### 6.1 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

#### 6.1.1 構造部材の健全性に対する許容限界

構造部材となる鋼製管の曲げ及びせん断破壊に対する許容限界は、「鋼構造設計規準-許容応力度法-（日本建築学会，2005）」に基づき，鋼材の種類に応じた短期許容応力度とする。

鋼製管の許容限界を表 6-1 に示す。

表 6-1 鋼製管の許容限界

鋼材の種類	項目	短期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
SS400	曲げ	235
	せん断	135

### 6.1.2 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、C<sub>M</sub>級岩盤の極限支持力度とする。

また、砕石に発生する接地圧に対する許容限界は、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会 平成14年3月）」に基づき、以下の式にて算定する。

$$Q_u = a\kappa c N_c S_c + \kappa q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \beta B_e N_\gamma S_\gamma$$

ここで、

- $Q_u$  : 荷重の偏心傾斜，支持力係数の寸法効果を考慮した地盤の極限支持力 (kN/m<sup>2</sup>)
- $c$  : 地盤の粘着力であるが，保守的に考慮しない (kN/m<sup>2</sup>)
- $q$  : 上載荷重 (kN/m<sup>2</sup>)  $q = \gamma_2 D_f$
- $A_e$  : 有効載荷面積 (m<sup>2</sup>)
- $\gamma_1, \gamma_2$  : 支持地盤及び根入れ地盤の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)  
但し，地下水位以下では水中単位体積重量を用いる。
- $B_e$  : 荷重の偏心を考慮した基礎の有効載荷幅 (m)  
 $B_e = B - 2e_B$
- $B$  : 基礎幅 (m)
- $e_B$  : 荷重の偏心量 (m)
- $D_f$  : 基礎の有効根入れ深さ (m)
- $\alpha\beta$  : 基礎の形状係数
- $\kappa$  : 根入れ効果に対する割増係数
- $N_c, N_q, N_\gamma$  : 荷重の傾斜を考慮した支持力係数
- $S_c, S_q, S_\gamma$  : 支持力係数の寸法効果に関する補正係数

上記の式にて求まる砕石の極限支持力度並びにC<sub>M</sub>級岩盤の極限支持力度を表6-2に示す。

表6-2 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

基礎地盤	極限支持力度 (N/mm <sup>2</sup> )
C <sub>M</sub> 級岩盤	9.8
砕石	0.56

## 6.2 評価方法

### 6.2.1 取水管の曲げ及びせん断評価

取水管は、「3. 管周方向の地震応答解析」に基づく管周方向曲げ応力と「5. 管軸方向の応力解析」に基づく管軸方向合成応力及びせん断応力を組み合わせた合成応力が、「6.1 許容限界」で設定した許容限界以下であることを確認する。この際、管軸方向合成応力及びせん断応力は、取水管の耐震性に与える影響が最大となる地震動で評価しているが、管周方向曲げ応力と合成する際には保守的に当該地震動の結果を用いることとする。

また、「3. 管周方向の地震応答解析」に基づくせん断応力が、「6.1 許容限界」で設定した許容限界以下であることを確認する。

合成応力は、管周方向の曲げ応力及び管軸方向の応力から、以下の式で求める。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_C^2 + \sigma_L \times \sigma_C + 3 \times \tau_S^2}$$

ここで、

$\sigma$  : 合成応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_L$  : 管軸方向合成応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_C$  : 管周方向曲げ応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_S$  : 管軸方向せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)

### 6.2.2 基礎地盤の支持性能評価

基礎地盤の支持性能評価は、「3. 管周方向の地震応答解析」に基づく基礎岩盤及び砕石に生じる最大接地圧が、「6.1 許容限界」で設定した許容限界を以下であることを確認する。



## 7. 耐震評価結果

### 7.1 構造部材の健全性に対する評価結果

#### 7.1.1 管周方向の評価結果

管周方向の曲げ及びせん断評価の最大照査値を表 7-1 及び表 7-2 に示す。

取水管の曲げ応力度及びせん断応力度が許容限界以下であることを確認した。

表 7-1 管周方向の曲げ評価結果

解析ケース	地震動		曲げ応力度 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	許容曲げ応力度 $\sigma_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\sigma / \sigma_a$	
①	S <sub>s</sub> -D	++	16.3	235	0.07	
		-+	17.2	235	0.08	
		+ -	18.5	235	0.08	
		--	18.5	235	0.08	
	S <sub>s</sub> -F 1	++	12.8	235	0.06	
	S <sub>s</sub> -F 2	++	19.6	235	0.09	
	S <sub>s</sub> -N 1	++	10.9	235	0.05	
		-+	10.1	235	0.05	
	S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	10.7	235	0.05	
		-+	10.4	235	0.05	
	S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	16.0	235	0.07	
		-+	15.3	235	0.07	
	②	S <sub>s</sub> -F 2	++	13.6	235	0.06
	③	S <sub>s</sub> -F 2	++	27.6	235	0.12

表 7-2 管周方向のせん断評価結果

解析ケース	地震動		せん断応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	許容せん断応力度 $\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\tau / \tau_a$
①	S <sub>s</sub> -D	++	0.1	135	0.01
		-+	0.1	135	0.01
		+ -	0.1	135	0.01
		--	0.1	135	0.01
	S <sub>s</sub> -F 1	++	0.1	135	0.01
	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.2	135	0.01
	S <sub>s</sub> -N 1	++	0.1	135	0.01
		-+	0.1	135	0.01
	S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	0.1	135	0.01
		-+	0.1	135	0.01
	S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	0.1	135	0.01
		-+	0.1	135	0.01
②	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.1	135	0.01
③	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.2	135	0.01

### 7.1.2 合成応力による評価結果

合成応力による評価結果の最大照査値を表7-3に示す。

取水管に発生する合成応力は、許容限界以下であることを確認した。

なお、管軸方向の合成応力度及びせん断応力度については、「5.6 応力解析結果」より、取水管の耐震性に最も影響を与えるケース③の $S_s - D$ の値を用いる。

表7-3 合成応力度による評価結果

解析 ケース	地震動		管周方向	管軸方向( $S_s - D(-\sigma)$ )		合成 応力度*2 $\sigma$ ( $N/mm^2$ )	許容 応力度 $\sigma_a$ ( $N/mm^2$ )	照査値 $\sigma / \sigma_a$
			曲げ応力度 $\sigma_c$ ( $N/mm^2$ )	合成応力度*1 $\sigma_L$ ( $N/mm^2$ )	せん断 応力度 $\tau_s$ ( $N/mm^2$ )			
①	$S_s - D$	++	16.3	44.3	35.4	81.9	235	0.35
		-+	17.2	44.3	35.4	82.3	235	0.36
		+-	18.5	44.3	35.4	83.0	235	0.36
		--	18.5	44.3	35.4	83.0	235	0.36
	$S_s - F1$	++	12.8	44.3	35.4	80.3	235	0.35
	$S_s - F2$	++	19.6	44.3	35.4	83.5	235	0.36
	$S_s - N1$	++	10.9	44.3	35.4	79.5	235	0.34
		-+	10.1	44.3	35.4	79.2	235	0.34
	$S_s - N2$ (NS)	++	10.7	44.3	35.4	79.4	235	0.34
		-+	10.4	44.3	35.4	79.3	235	0.34
	$S_s - N2$ (EW)	++	16.0	44.3	35.4	81.8	235	0.35
		-+	15.3	44.3	35.4	81.4	235	0.35
②	$S_s - F2$	++	13.6	44.3	35.4	80.7	235	0.35
③	$S_s - F2$	++	27.6	44.3	35.4	87.8	235	0.38

注記\*1：管軸方向の曲げ応力度と軸応力度の合成応力度

\*2：管周方向の曲げ応力度 $\sigma_c$ 、管軸方向の合成応力度 $\sigma_L$ 及び管軸方向せん断応力度 $\tau_s$ の合成応力度

## 7.2 基礎地盤の支持性能評価結果

基礎地盤の支持性能評価の照査結果を表 7-4 及び表 7-5 に示す。また、最大接地圧分布図を図 7-1 及び図 7-2 に示す。

取水管の基礎地盤に作用する最大接地圧は、すべてのケースにおいて極限支持力度以下であることを確認した。

表 7-4 基礎地盤の支持性能評価結果（岩盤）

解析ケース	地震動		最大接地圧	極限支持力度	照査値
			$R_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_d/R_u$
①	S <sub>s</sub> -D	++	0.19	9.8	0.02
		-+	0.21	9.8	0.03
		+ -	0.21	9.8	0.03
		--	0.24	9.8	0.03
	S <sub>s</sub> -F 1	++	0.17	9.8	0.02
	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.21	9.8	0.03
	S <sub>s</sub> -N 1	++	0.19	9.8	0.02
		-+	0.16	9.8	0.02
	S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	0.15	9.8	0.02
		-+	0.17	9.8	0.02
	S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	0.19	9.8	0.02
		-+	0.17	9.8	0.02
②	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.19	9.8	0.02
③	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.21	9.8	0.03

表 7-5 基礎地盤の支持性能評価結果（砕石）

解析ケース	地震動		最大接地圧	極限支持力度	照査値
			$R_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_d/R_u$
①	S <sub>s</sub> -D	++	0.16	0.56	0.30
		-+	0.17	0.56	0.30
		+ -	0.16	0.56	0.28
		--	0.17	0.56	0.30
	S <sub>s</sub> -F 1	++	0.13	0.56	0.24
	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.16	0.56	0.29
	S <sub>s</sub> -N 1	++	0.15	0.56	0.27
		-+	0.09	0.56	0.17
	S <sub>s</sub> -N 2 (NS)	++	0.15	0.56	0.27
		-+	0.15	0.56	0.27
	S <sub>s</sub> -N 2 (EW)	++	0.15	0.56	0.27
		-+	0.15	0.56	0.28
②	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.15	0.56	0.28
③	S <sub>s</sub> -F 2	++	0.17	0.56	0.30

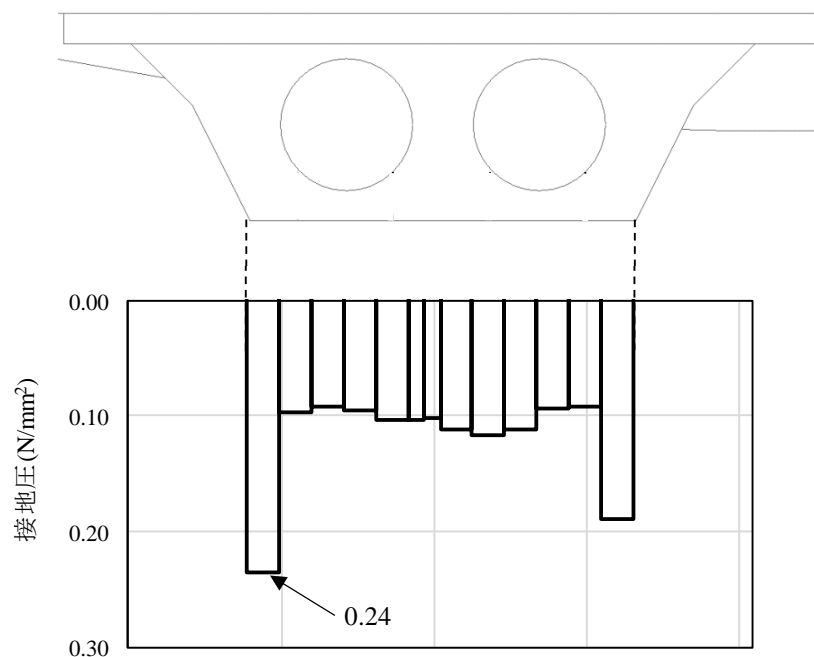


図 7-1 基礎地盤（岩盤）の最大接地圧分布  
（解析ケース①，S<sub>s</sub>-D（--））

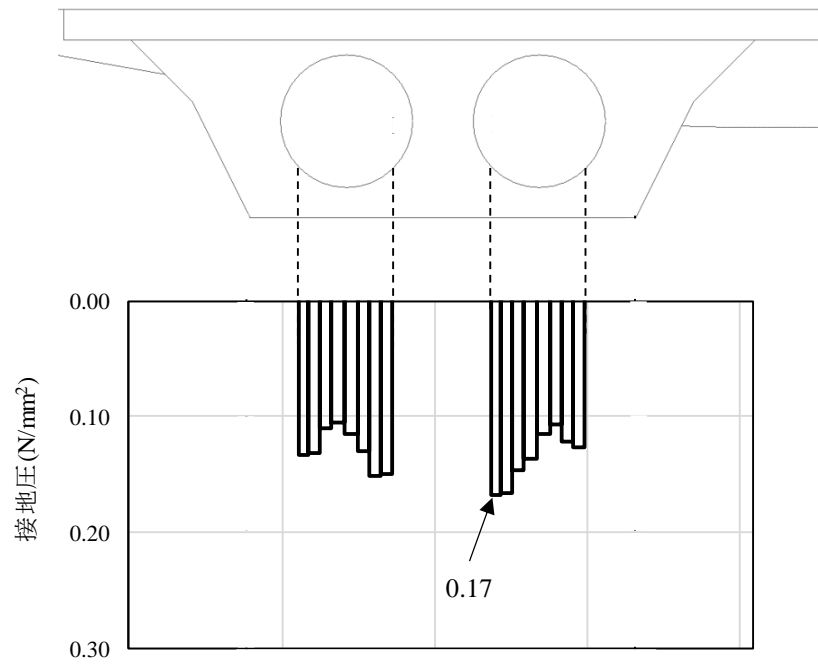


図 7-2 基礎地盤（碎石）の最大接地圧分布  
 （解析ケース③，S s -F 2（++））

## 8. まとめ

非常時における海水の通水機能を求められる土木構造物である，取水管について基準地震動  $S_s$  による地震力に対し，構造部材の曲げ，せん断応力が許容限界を下回ること及び最大接地圧が許容限界を十分下回ることを確認した。

以上のことから，取水管は，基準地震動  $S_s$  による地震力に対して，通水機能を維持できることを確認した。

## 参考資料1 取水管の耐震評価における規格・基準類との関連性について

### 1. 概要

取水管の耐震評価は、表1-1に示す規格・基準類を基に評価を行う。本資料では、取水管の耐震評価を行うために準拠した規格・基準類等についてまとめたうえで、取水管の耐震評価手法について整理する。

表1-1 取水管の耐震評価において準拠する規格・基準類一覧

準拠した基準類	対象設備 (一般的な管径*)
石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示 (昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号)	送油導管 (~650mm)
水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006 (日本水道鋼管協会, 2006. 2. 2)	水輸送用埋設鋼管路 (~3000mm)
水道施設耐震工法指針・解説 (日本水道協会, 1997)	水輸送用埋設鋼管路 (特になし)

注記\* : 規格・基準類において材料の規格として取り扱われているJIS規格等の最大径を記載したもので、適用範囲を限定するものではない。

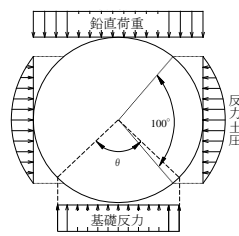
### 2. 準拠した規格・基準類における評価手法の整理

表1-1に示した規格・基準類において、一般的な埋設鋼製管路は、周辺地盤の変位に伴う管軸方向の発生応力を中心に耐震評価を行う設計となっている。

表2-1に規格・基準類の評価手法の整理を行う。ここで、表2-1の規格・基準類の中で管周方向（管軸直交方向）発生応力を考慮するものは「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」であり、管周方向発生応力と管軸方向発生応力を組み合わせた合成応力で評価する設計となっている。管周方向発生応力の算出については鉛直方向地震動のみを考慮する設計となっている。



表2-1 取水管の耐震評価において準拠する各規格・基準類の概要

規格・基準名	耐震評価の概要			
	①管軸方向	②管周方向		①と②の組合せ
	管軸方向応力 $\sigma_L$ 管軸方向ひずみ $\varepsilon_L$	鉛直方向地震力	水平方向地震力	
石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）	地盤変位を考慮した応答変位法使用 管路に生じる軸応力 $\sigma_L$ と曲げ応力 $\sigma_B$ を合成 $\sigma_i = \sqrt{3.12 \cdot \sigma_L^2 + \sigma_B^2}$	管路のたわみ性を考慮した土圧分布モデル(IOWA 公式)により求める。 	考慮しない	考慮する*
水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006（日本水道鋼管協会，2006.2.2）	地盤変位を考慮した応答変位法使用 管路に生じる軸ひずみ $\varepsilon_L$ と曲げひずみ $\varepsilon_B$ を合成 $\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_B^2}$	考慮しない	考慮しない	考慮しない
水道施設耐震工法指針・解説（日本水道協会，1997）	地盤変位を考慮した応答変位法使用 管路に生じる軸ひずみ $\varepsilon_L$ と曲げひずみ $\varepsilon_B$ を合成 $\varepsilon_i = \sqrt{\alpha \cdot \varepsilon_L^2 + \varepsilon_B^2}$ $\alpha = 1.00 \sim 3.12$	考慮しない	考慮しない	考慮しない

注記\*：管軸方向応力と管周方向応力の組合せについては以下の式にて行う。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_C^2 + \sigma_L \times \sigma_C + 3 \times \tau_S^2}$$

ここで、

$\sigma$ ：合成応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_L$ ：管軸方向合成応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_C$ ：管周方向曲げ応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_S$ ：管軸方向せん断応力 (N/mm<sup>2</sup>)

### 3. 取水管の耐震評価方針について

取水管は、管軸方向の設置スパンが比較的長いことから、一般的な埋設鋼製管路の設計で用いられる管軸方向の影響について評価を行う。さらに、取水管は一般的な埋設鋼管路と比較して大口径であることから、構造上の弱軸が管周方向（管軸直交方向）であると考えられるため、表2-1に示す「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」に基づいて管軸方向発生応力と管周方向発生応力を組み合わせた合成応力で評価する。

#### 3.1 管周方向の評価

「石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準の細目を定める告示（昭和48年9月28日通商産業省・運輸省・建設省・自治省告示第一号）」における管周方向の評価で用いる地震動は鉛直方向の地震動のみであり、管周方向応力の算出方法は一般式より求める手法が記載されているが、取水管の耐震評価においては、その他の屋外重要土木構造物と同様に2次元動的FEM解析（水平・鉛直同時加振）による応答値を用いた評価を実施する。

#### 3.2 管軸方向の評価

管軸方向の評価については、照査手法が詳細に記載されている「水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 029-2006（日本水道鋼管協会，2006.2.2）」に基づいて行い、地震時の周辺地盤の変位に基づいた耐震評価として、他の規格・基準においても記載されている応答変位法を用いて行う。ここで、一般的な埋設管路の設計では応答変位法に用いる地盤変位を定めるためのパラメータ（水平震度、応答速度等）が地震動レベル毎に定められていることから、地震応答解析や構造計算を伴わずに、応力（ひずみ）を算出が可能であるが、取水管の評価においては、基準地震動 $S_s$ を対象とすること及び取水管路が屈曲していることを考慮し、地震応答解析（補足説明資料 4章）及び応力解析（補足説明資料 5章）に示すとおり、管軸方向応力を算出する。

## 参考資料 2 等価線形化法を用いた地震応答解析の妥当性確認

### 1. 概要

取水管の管軸方向応力の算定には、等価線形化法を用いた周波数応答解析により取水管周辺の砕石の水平変位を求めている。

等価線形化法を用いた地震応答解析は最大せん断ひずみに 0.65 を乗じた有効ひずみに対応するせん断剛性及び減衰定数を用いた線形解析にて行うのが一般的である。従って、ひずみが卓越した場合（一般に数%オーダー），図 1-1 に示すとおり，せん断応力や最大加速度を過大評価することが知られている。

そこで，等価線形化法を用いた地震応答解析の妥当性確認として最大せん断ひずみの発生量の確認を行う。

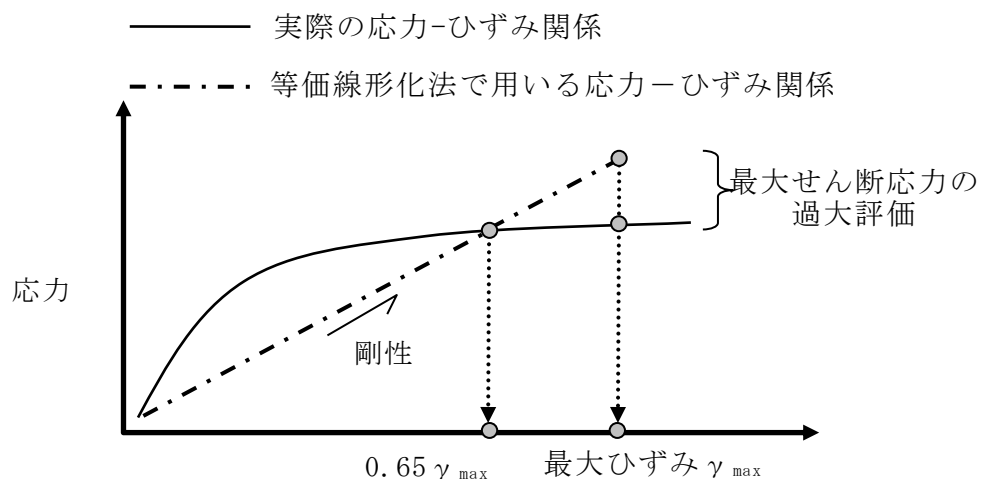


図1-1 等価線形化法の概要

## 2. 最大せん断ひずみの確認

図 2-1～図 2-2 に，地震応答解析における最大せん断ひずみ分布図を示す。

最大せん断ひずみは，面内加振と面外加振の 2 ケースにおいて明確な違いは見られ  
ない。面内加振の最大せん断ひずみは 0.18%，面外加振の最大せん断ひずみは 0.26% であ  
り，全体的に 1.0% 未満であり，等価線形化法の適用範囲内であることを確認した。

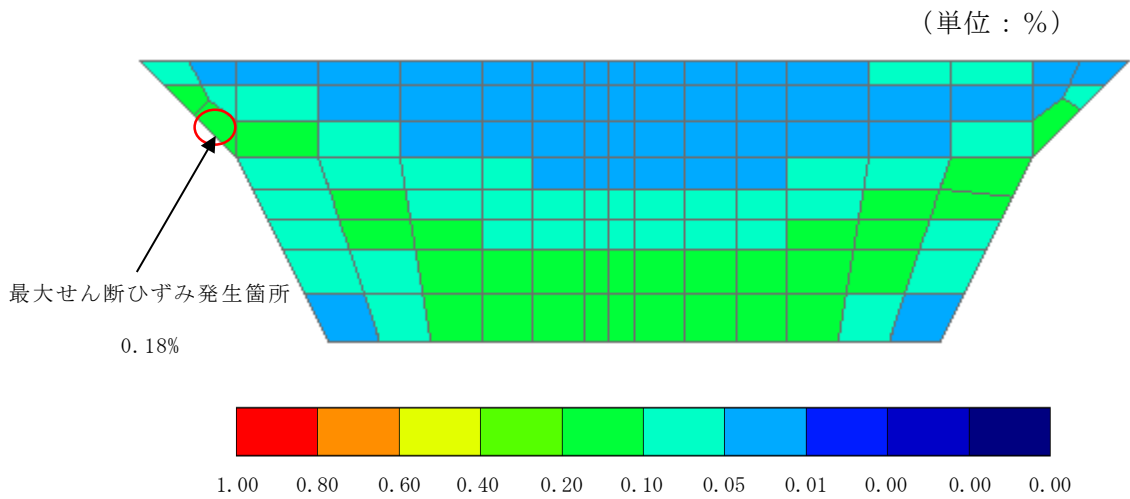


図 2-1 最大せん断ひずみ分布図 (面内加振)

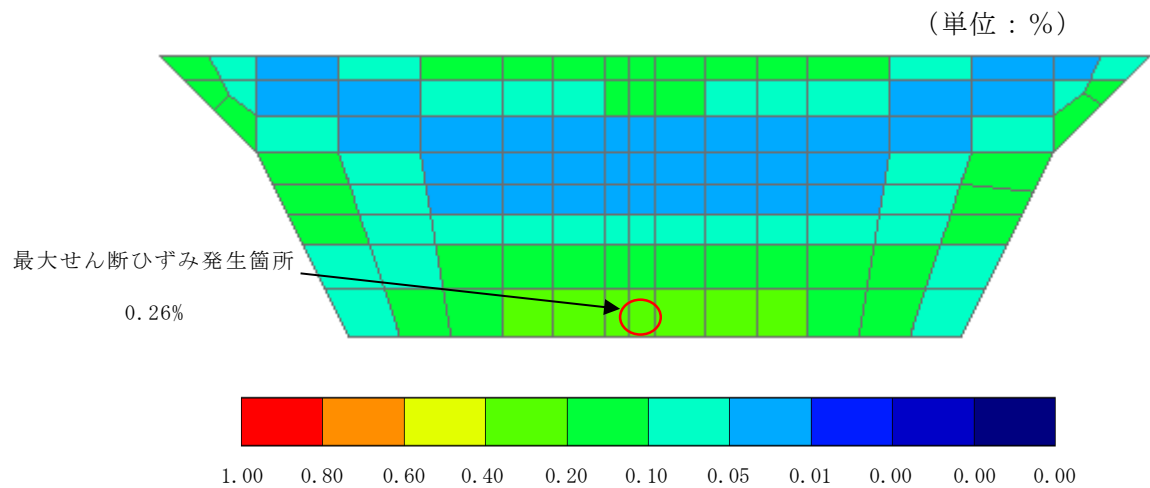


図 2-2 最大せん断ひずみ分布図 (面外加振)

### 参考資料 3 可撓管の耐震性評価

#### 1. 概要

取水管の管軸方向の応力解析では、端部における変位及び回転を可撓管が吸収するものとして、自由端としている。

ここでは、取水管に生じる変位について、端部に設置された可撓管が十分に吸収可能か評価を行う。

ここで、表 1-1 に示すとおり、可撓管は、取水管よりもわずかに内径が大きいものの厚みが同程度である。また、可撓管は軸方向の地盤変位に対して追随することができるため、管軸方向応力も作用しない。

取水管は照査値に対する裕度が大きいため、可撓管については、取水管の耐震評価を踏まえ、耐震性を有すると判断する。

表1-1 可撓管と取水管の仕様の比較

--

## 2. 評価方針

取水管管軸方向の応力解析において可撓管設置位置にて生じる伸縮量及び偏心量が、可撓管の許容値以下であることを確認する。

## 3. 評価条件

### 3.1 評価対象

評価対象とする可撓管は、軸方向応力解析を実施した取水管Ⅱとする。  
評価対象とする可撓管を図3-1、可撓管の詳細図を図3-2に示す。

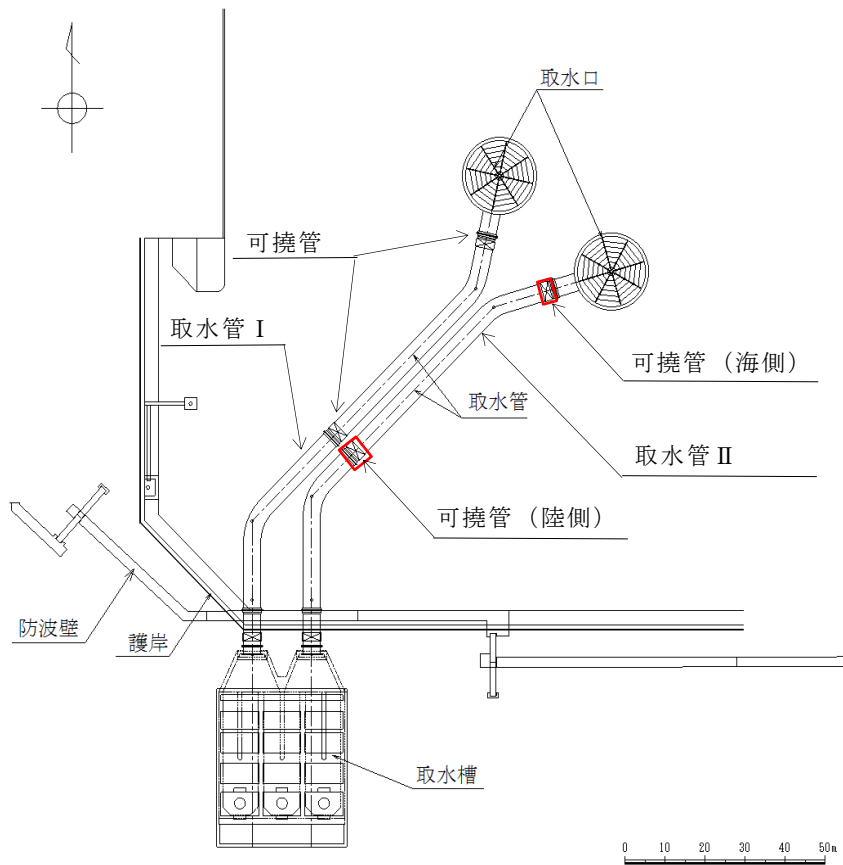


図3-1 検討対象とする可撓管位置図

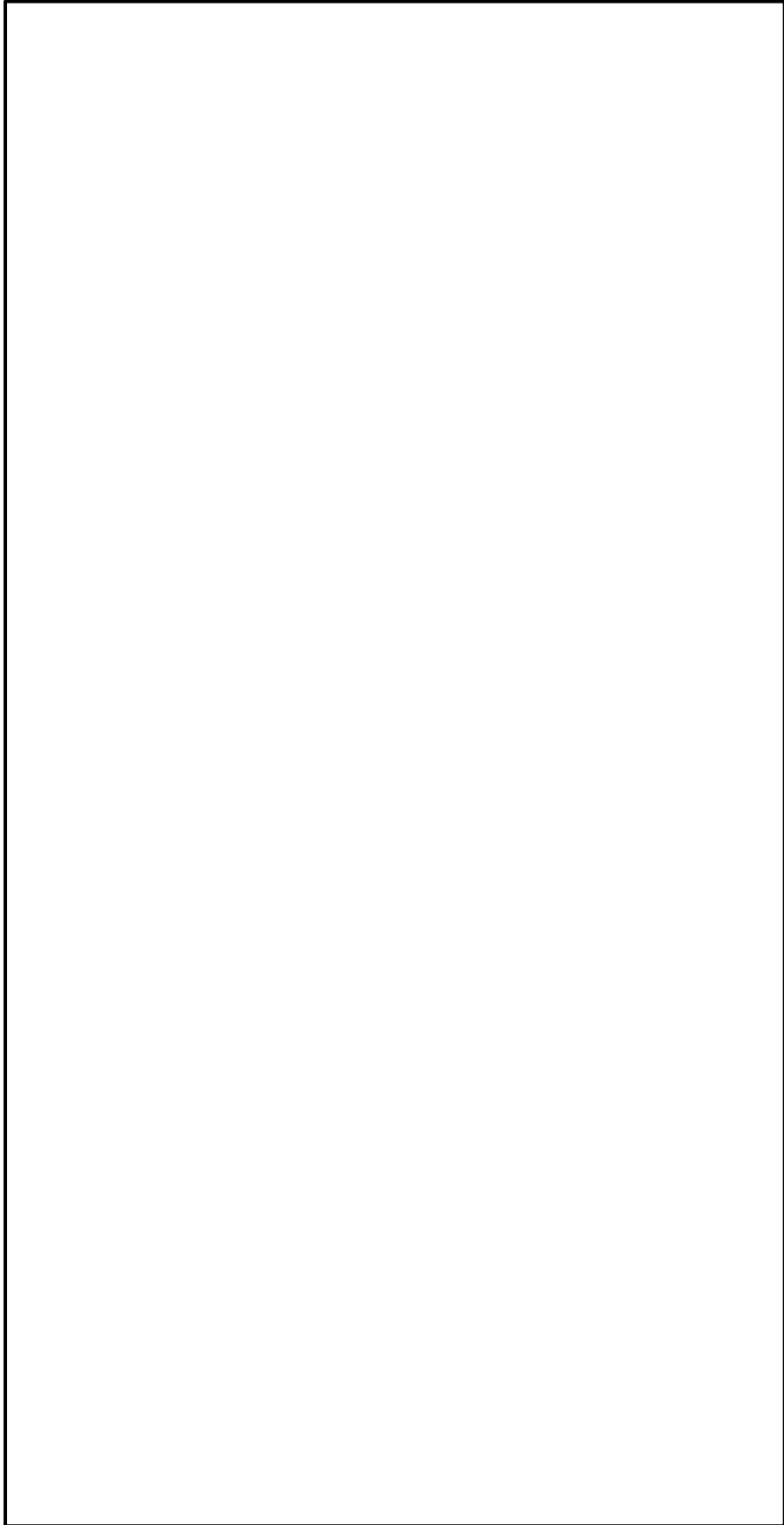


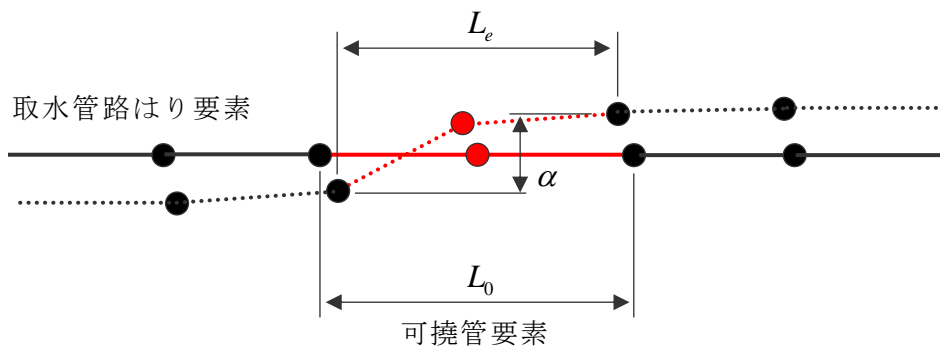
図3-2 可撓管詳細図  
(参考) 3-3

### 3.2 可撓管部の伸縮量及び偏心量

可撓管の伸縮量及び偏心量は、図3-3に示す管軸方向の応力解析結果を基に、以下のとおり求める。

$$\text{伸縮量 } \delta = L_0 - L_e$$

$$\text{偏心量 } \varepsilon = \alpha$$



実線：初期のはり要素

破線：地震時のはり要素

(取水管路海域部の管軸方向の応力解析モデル)

図3-3 管軸方向の応力解析結果により得られる変位量



### 3.3 可撓管の許容値

可撓管の伸縮量及び偏心量の許容値を表 3-1 に示す。

可撓管の許容値については、可撓管の形状特性より算定する。図 3-4 に可撓管の寸法図を示す。

取水管が管軸方向に変位した際に許容される伸縮量を図 3-5 に示す。図 3-5 より可撓管の伸縮量は保守的に 168mm とする。

また、取水管が上下に変位した際に許容される偏心量の算定図を図 3-6 に示す。図 3-6 より可撓管の偏心量の許容値は 104mm とする。

表 3-1 可撓管の伸縮量及び偏心量の許容値

	伸縮量	偏心量
許容値 (mm)	168	104

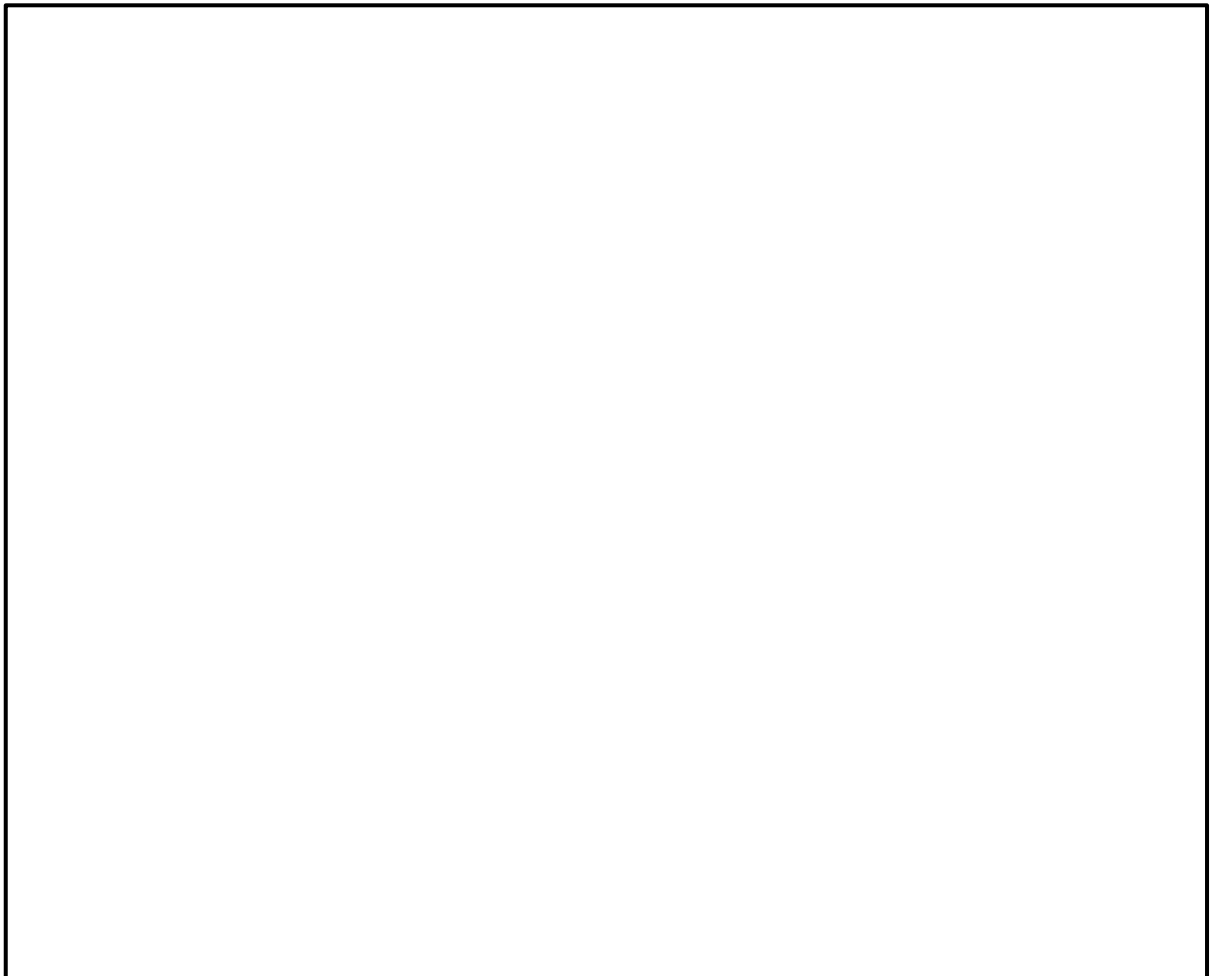


図 3-4 可撓管の寸法図



図 3-5 伸縮量の算定根拠（拡大）

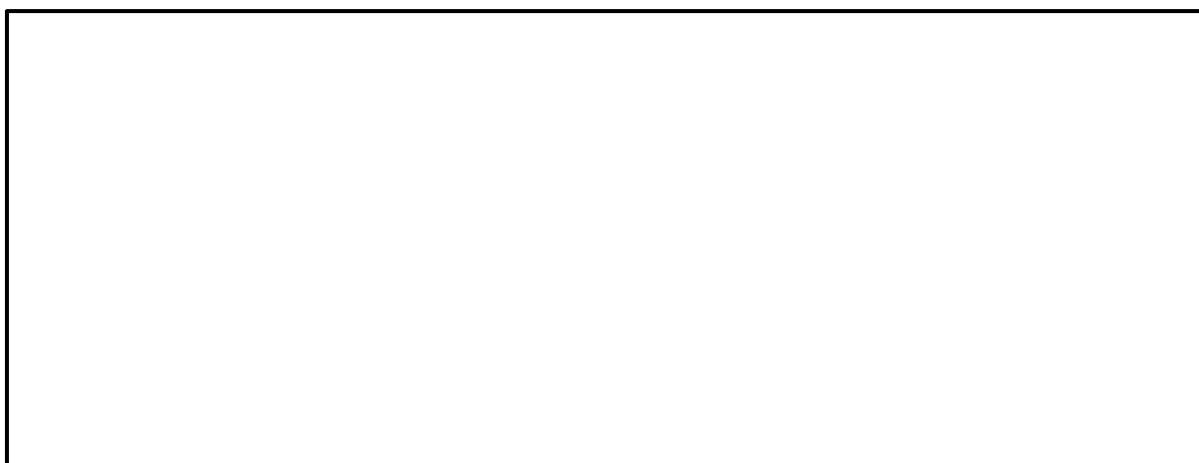


図 3-6 偏心量の算定根拠（拡大）

#### 4. 評価結果

##### 4.1 伸縮量

可撓管に生じる伸縮量を図 4-1 に示す。

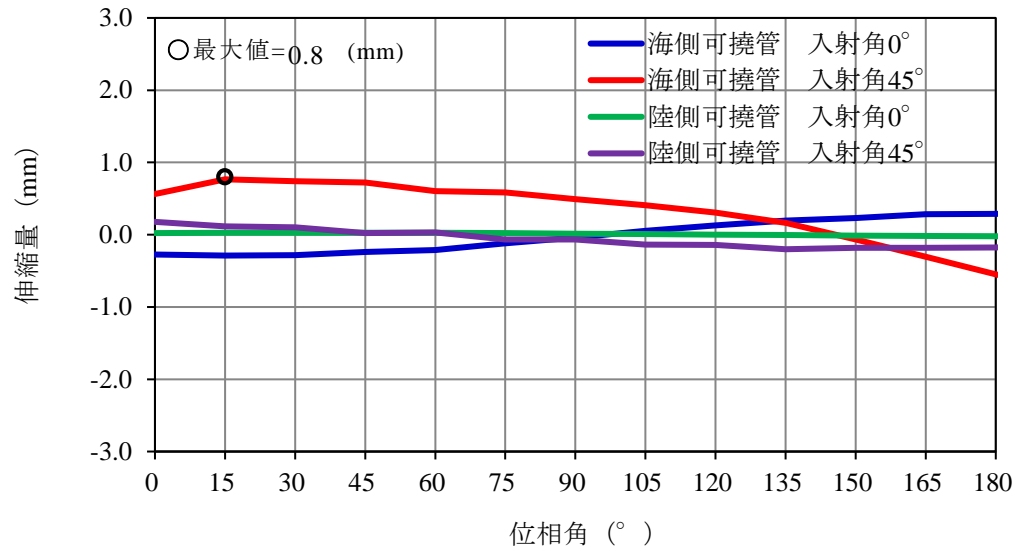


図4-1 可撓管の伸縮量

##### 4.2 偏心量

可撓管に生じる偏心量を図 4-2 に示す。

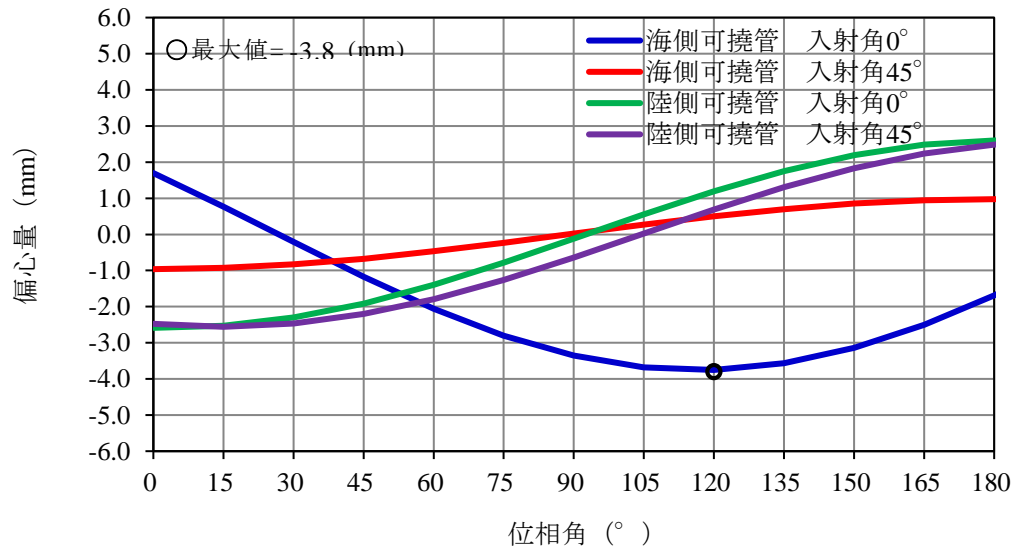


図 4-2 可撓管の偏心量

#### 4.3 評価結果まとめ

表 4-1 に可撓管の伸縮量及び偏心量に対する評価結果を示す。

取水管に生じる伸縮量及び偏心量は、可撓管にて十分吸収できることを確認した。

表4-1 伸縮量及び偏心量に対する評価結果

	可撓管 位置	入射角	①最大発生値 (mm)	② 許容限界 (mm)	照査値 ①/②
伸縮量	海側	0°	0.4	168	0.003
		45°	0.8		0.005
	陸側	0°	0.1		0.001
		45°	0.3		0.002
偏心量	海側	0°	3.8	104	0.037
		45°	1.0		0.010
	陸側	0°	2.6		0.025
		45°	2.6		0.025

## 参考資料 4 静的地震力に対する耐震安全性評価

### 1. 静的地震力に対する耐震性評価

取水管については、以下の式に基づいて算出するCクラス施設に求められる静的地震力（ $kh=0.16$ ）を上回る、基準地震動  $S_s$  による地震力に対して許容応力度法にて耐震評価を実施していることから、静的地震力による評価は省略する。

$$Q_i = n \cdot Z \cdot C_i \cdot W_i$$

$$C_i = R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

ここで、

- $Q_i$  : 第  $i$  層に生じる水平地震力
- $n$  : 施設の重要度分類に応じた係数
- $Z$  : 地震地域係数 (1.0)
- $C_i$  : 第  $i$  層の地震層せん断力係数
- $W_i$  : 第  $i$  層が支える重量
- $R_t$  : 振動特性係数 (0.8)
- $A_i$  : 第  $i$  層の地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数
- $C_0$  : 標準せん断力係数 (0.2)