

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-002-28改01
提出年月日	2023年3月6日

VI-2-2-28 取水管の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-2-28 R0

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.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	位置	2
2.2	構造概要	3
2.3	評価方針	6
2.4	適用規格・基準等	10
3.	管周方向の地震応答解析	11
3.1	評価対象断面	11
3.2	解析方法	12
3.2.1	構造部材	12
3.2.2	地盤	13
3.2.3	減衰定数	14
3.2.4	地震応答解析の解析ケースの選定	15
3.3	荷重及び荷重の組合せ	16
3.3.1	耐震評価上考慮する状態	16
3.3.2	荷重	16
3.3.3	荷重の組合せ	16
3.4	入力地震動	17
3.5	解析モデル及び諸元	30
3.5.1	解析モデル	30
3.5.2	使用材料及び材料の物性値	32
3.5.3	地盤及び砕石の物性値	32
3.6	地震応答解析結果	33
4.	管軸方向の地震応答解析	48
4.1	評価対象箇所	48
4.2	解析方法	48
4.2.1	地盤	48
4.2.2	減衰定数	48
4.3	入力地震動	48
4.4.1	解析モデル	49
4.4.2	地盤及び砕石の物性値	51
4.5	地震応答解析結果	52
5.	管軸方向の応力解析	56
5.1	評価対象箇所	56

5.2	解析方法	57
5.2.1	地震動の入射角	58
5.2.2	地盤変位	58
5.2.3	管軸方向応力の合成	58
5.3	解析モデル及び諸元	59
5.3.1	解析モデル	59
5.3.2	仕様材料及び材料定数	59
5.4	応力解析結果	60
6.	耐震評価	61
6.1	許容限界	61
6.1.1	構造部材の健全性に対する許容限界	61
6.1.2	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	61
6.2	評価方法	62
6.2.1	取水管の曲げ及びせん断評価	62
6.2.2	基礎地盤の支持性能評価	62
7.	耐震評価結果	63
7.1	構造部材の健全性に対する評価結果	63
7.1.1	管周方向の評価結果	63
7.1.2	合成応力度による評価結果	64
7.2	基礎地盤の支持性能評価結果	65

1. 概要

本資料は、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ものである。

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. 基本方針

2.1 位置

取水管の位置図を図 2-1 に示す。

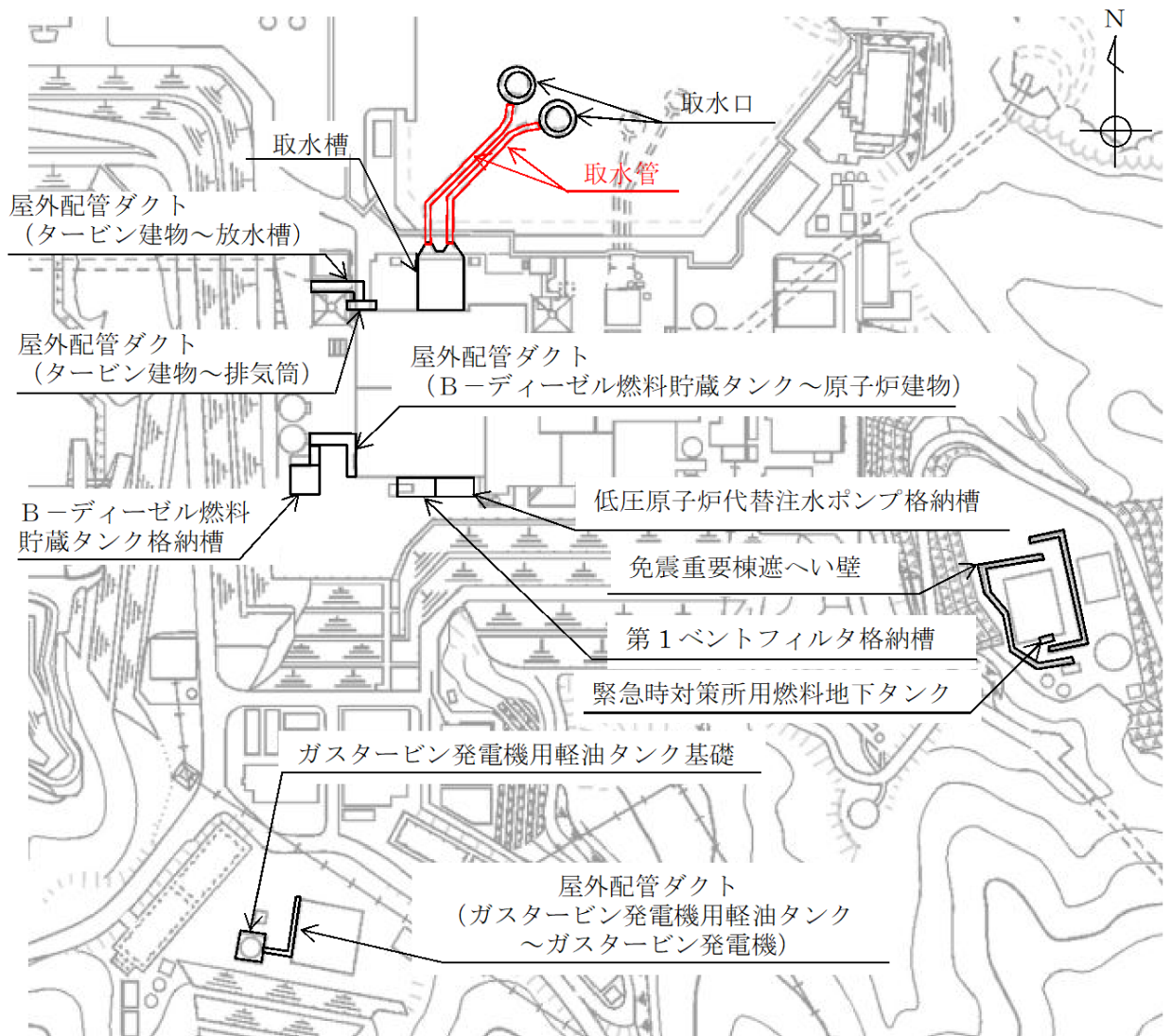


図 2-1 取水管 位置図

2.2 構造概要

取水管の平面図を図 2-2 に、縦断面図を図 2-3 及び図 2-4 に、断面図を図 2-5 及び図 2-6 に示す。

取水管は、延長約 140m、内径 $\phi 4.3\text{m}$ 、厚さ 17mm 及び 23mm の鋼製管 2 条で構成される。

取水管は、取水口から敷地護岸法先までの碎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き立て区間に大別される。

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

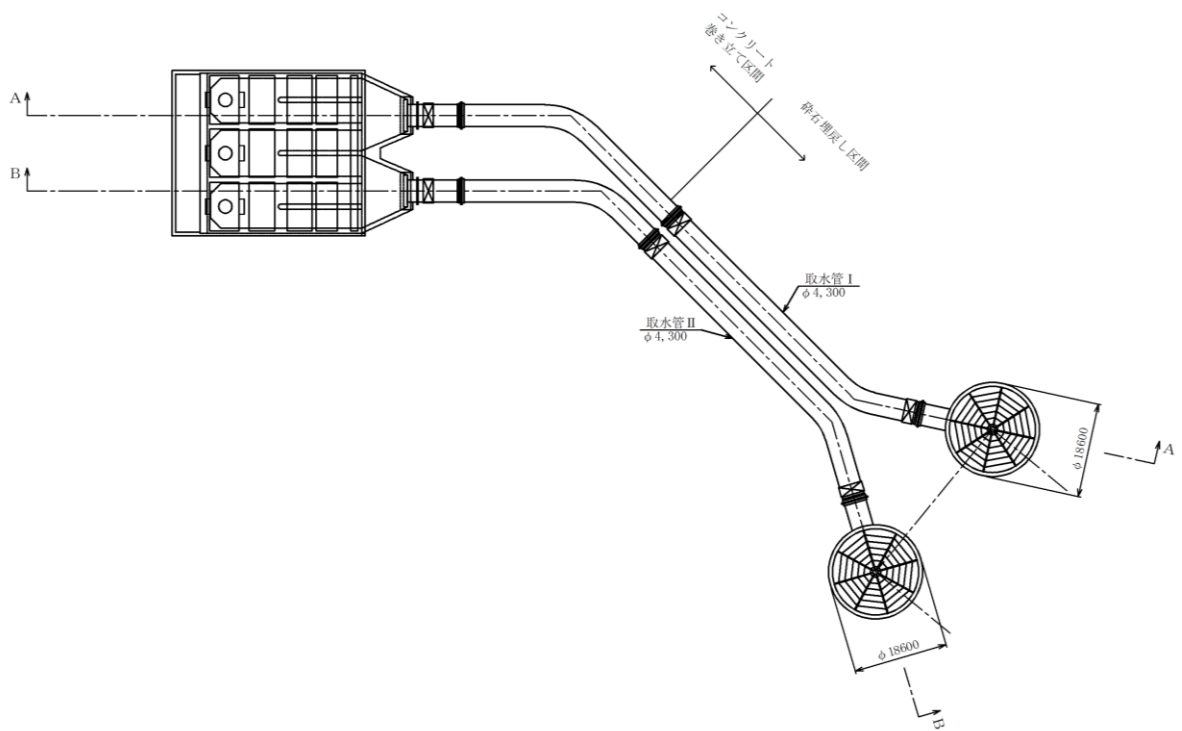


図 2-2 取水管 平面図

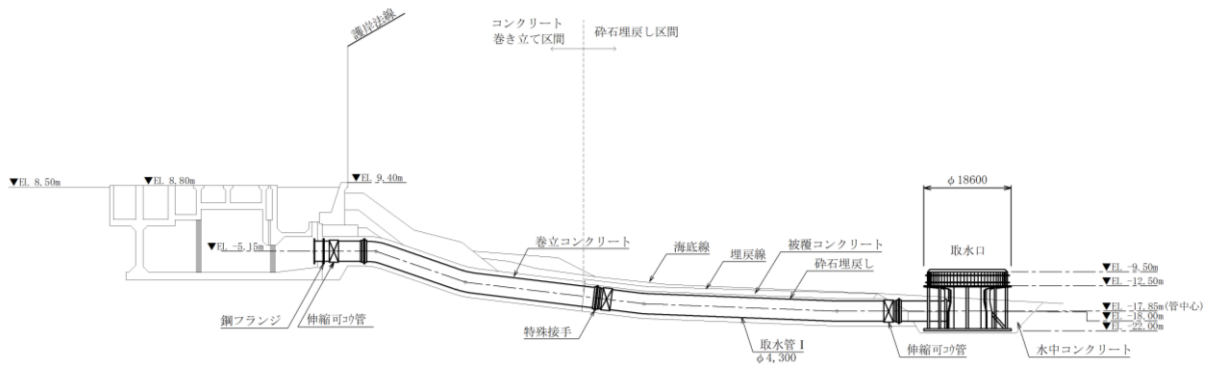


図 2-3 取水管 I 縦断面図 (A-A 断面)

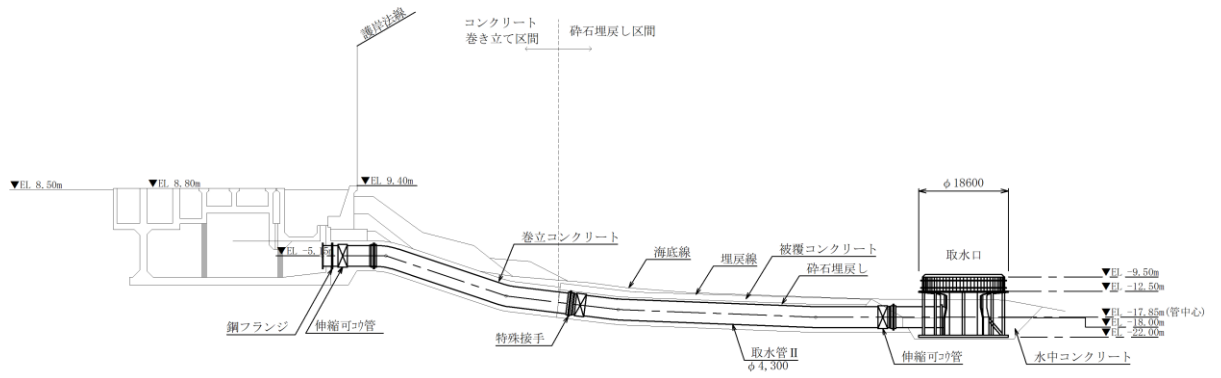


図 2-4 取水管 II 縦断面図 (B-B 断面)



図 2-5 取水管 断面図 (砕石埋戻し区間)

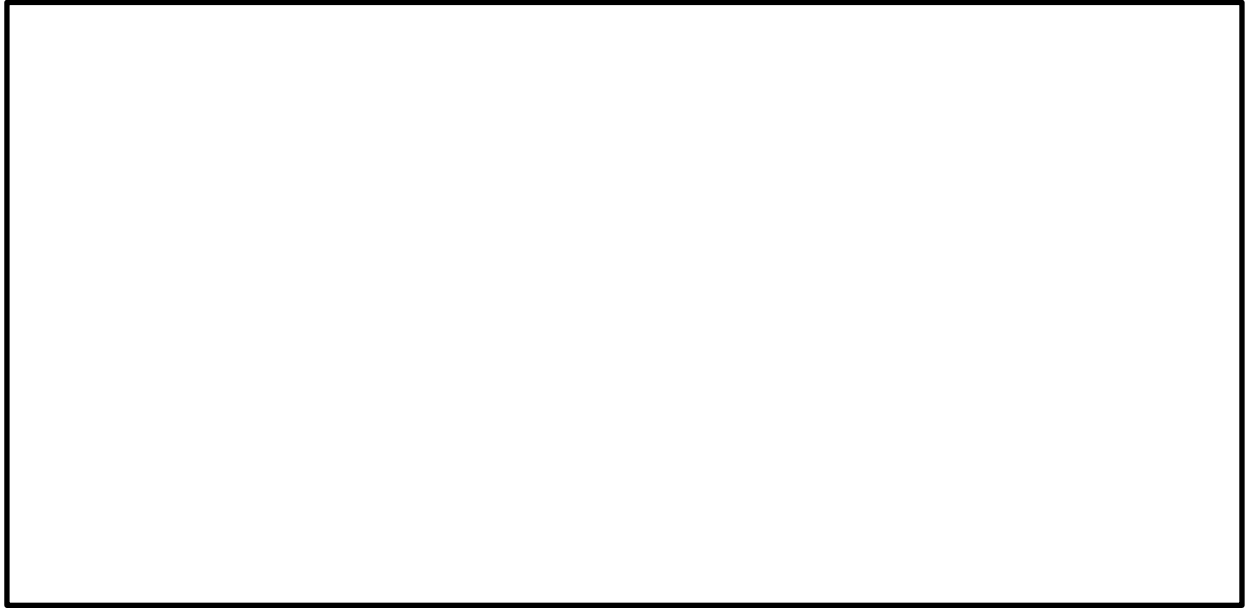


図 2-6 取水管 断面図 (コンクリート巻き立て区間)

2.3 評価方針

取水管は、設計基準対象施設においては、非常用取水設備として屋外重要土木構造物に、重大事故等対処施設においては、常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。

取水管の耐震評価フローを図 2-7 に、地震応答解析及び応力解析の詳細フローを図 2-8 に示す。

取水管は、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設として、表 2-1 に示すとおり、構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行う。構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施することで、構造強度を有することを確認し、これにより屋外重要土木構造物、常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備の機能を維持することができる。

構造部材の健全性評価については、地震応答解析及び応力解析に基づく発生応力が、許容限界以下であることを確認する。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に発生する接地圧が許容限界以下であることを確認する。

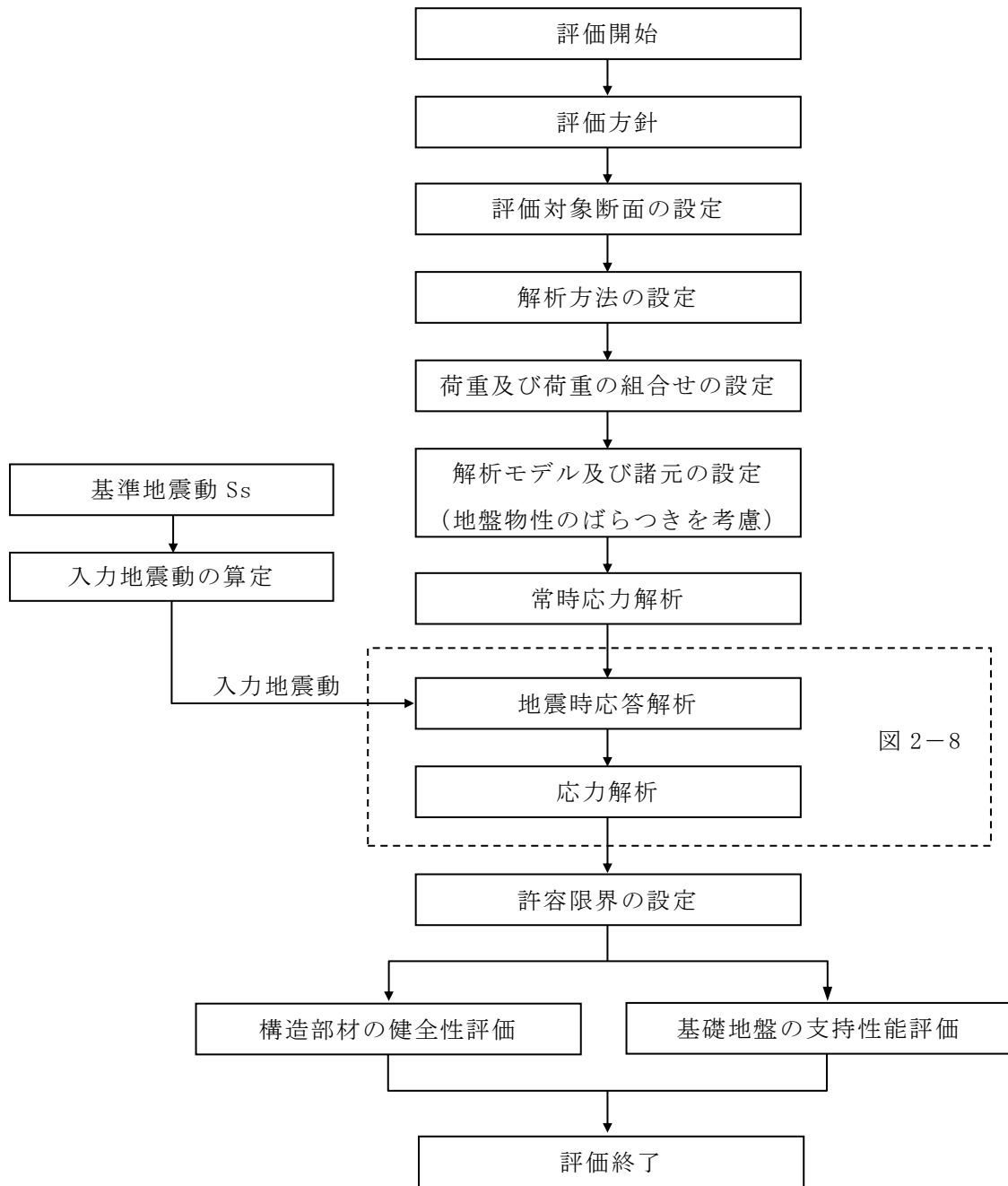


図 2-7 取水管 耐震評価フロー

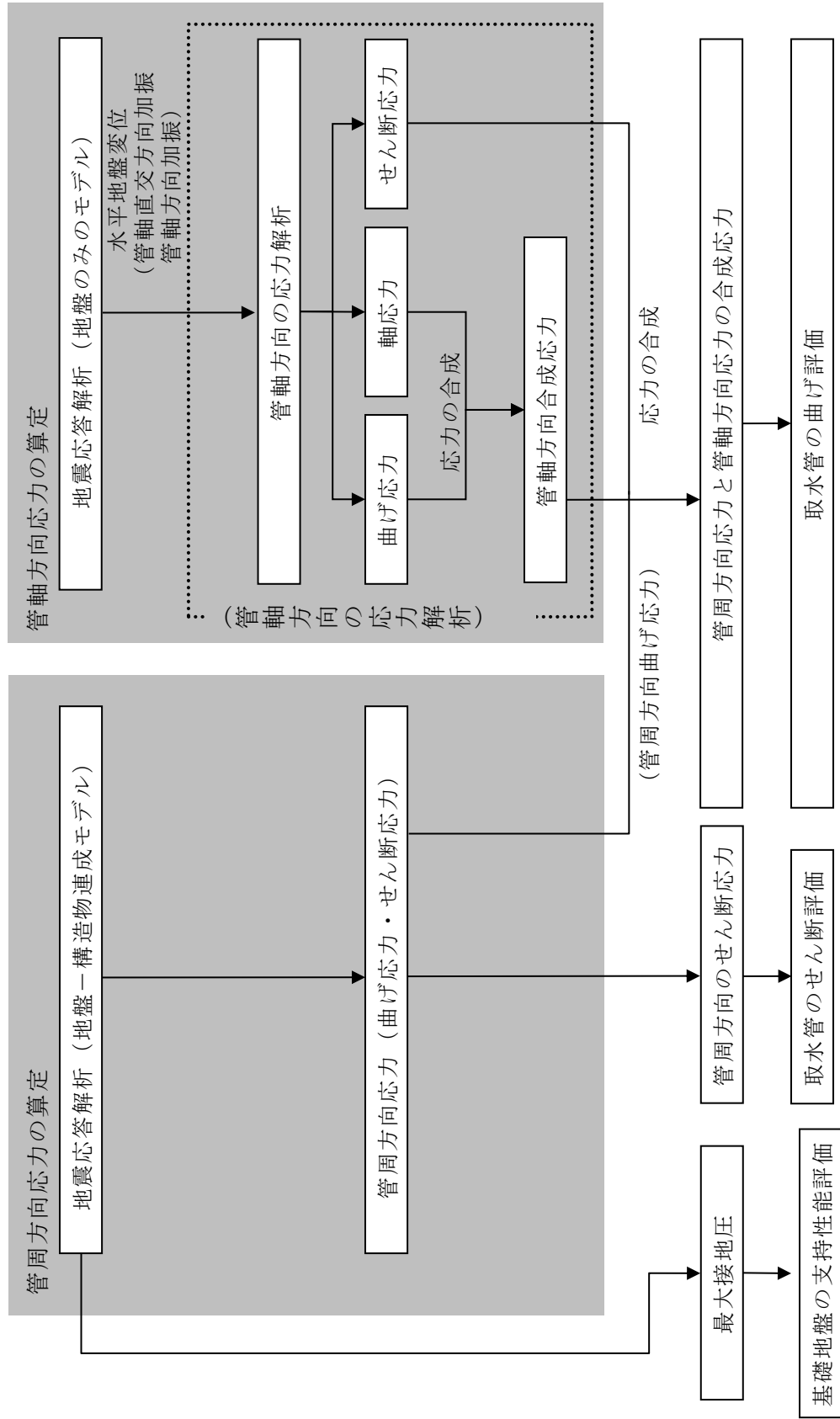


図 2-8 取水管の地震応答解析及び応力解析フロー

表 2-1 取水管の評価項目

評価方針	評価項目	部 位	評価方法	許容限界
構造強度を有すること	構造部材の健全性	鋼製管	発生する応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する接地圧が許容限界以下であることを確認	極限支持力度*
通水機能を有すること	構造部材の健全性	鋼製管	発生する応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（日本電気協会，1987）
- コンクリート標準示方書（土木学会，2002）
- 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会，2005 改定）
- 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）
- 水道用埋設鋼管路耐震設計基準 WSP 030-99（日本水道鋼管協会，1999 年）
- 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 29 年）

3. 管周方向の地震応答解析

3.1 評価対象断面

取水管管周方向の評価対象断面位置図を図 3-1 に示す。耐震設計における評価対象断面は、砕石埋戻し区間とし、評価対象断面図を図 3-2 に示す。

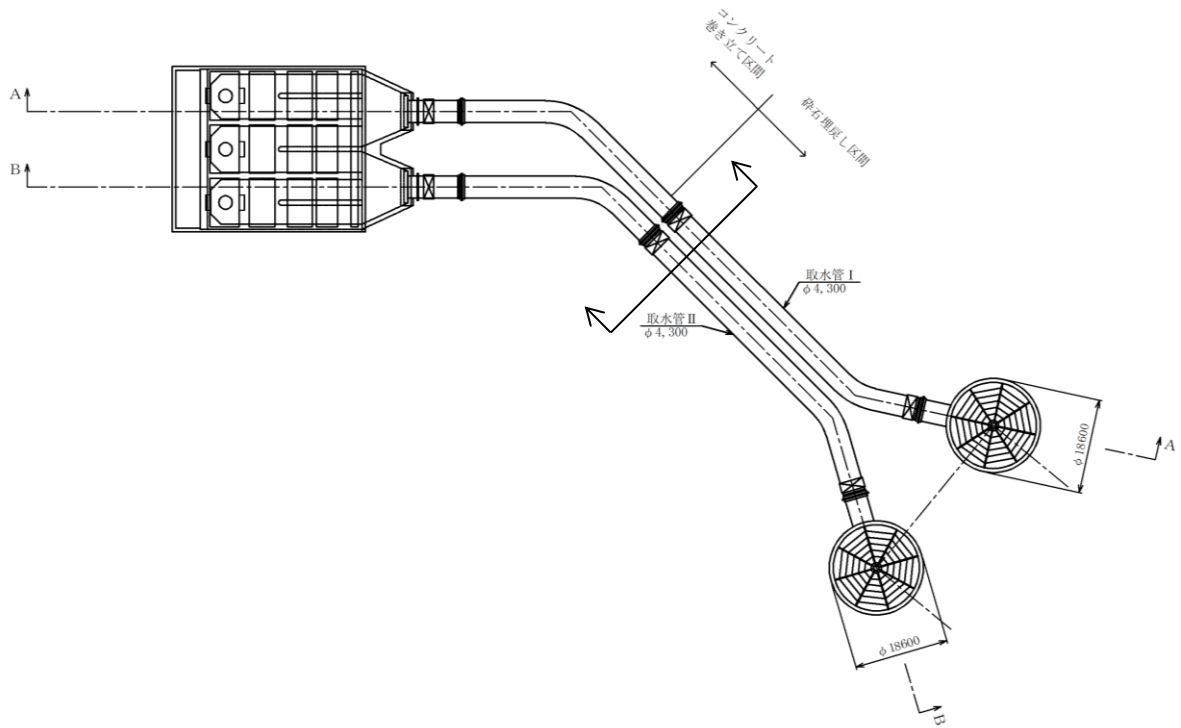


図 3-1 取水管 評価対象断面位置図



図 3-2 取水管 評価対象断面図

3.2 解析方法

取水管の地震応答解析は、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」に示す解析方法及び解析モデルを踏まえて実施する。

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。取水管は、周辺を砕石で囲まれていることから、解析手法は全応力解析とする。

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。

3.2.1 構造部材

取水管は、はり要素でモデル化する。

3.2.2 地盤

地盤材料のうち、岩盤は線形平面ひずみ要素でモデル化し、砕石は、地盤の非線形性を考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。また、地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、動せん断弾性係数の標準偏差 σ を用いて設定した解析ケース②及び③を実施する。地盤剛性のばらつきを考慮した解析ケースを表3-1に示す。

詳細な解析ケースの考え方は、「3.2.4 地震応答解析の解析ケースの選定」に示す。

表3-1 解析ケース

解析ケース	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)	平均値
ケース②	平均値 + 1 σ
ケース③	平均値 - 1 σ

3.2.3 減衰定数

構造部材の減衰定数は、粘性減衰で考慮する。

粘性減衰は、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。固有値解析結果に基づき設定した α 、 β を表 3-2 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

α 、 β : 係数

表 3-2 Rayleigh 減衰における係数 α 、 β の設定結果

α	β
9.780×10^{-1}	7.660×10^{-4}

3.2.4 地震応答解析の解析ケースの選定

耐震評価における解析ケースを表 3-3 に示す。耐震評価においては、すべての基準地震動 S_s に対し、解析ケース①（基本ケース）を実施する。解析ケース①において、取水管の管周方向における発生応力、また取水管の管軸方向における発生ひずみを算定するための地盤ひずみを算定する。その中で、取水管の管周方向の発生応力及び管軸方向における発生応力を算定するための地盤ひずみが最も大きくなる地震動を用いて、表 3-1 に示す解析ケース②及び③を実施する。

表 3-3 耐震計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 σ) を考慮した 解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した 解析ケース
地盤物性		平均値	平均値+1 σ	平均値-1 σ
地震動 (位相)	S_s-D	++*	○	
		-+*	○	
		+ -*	○	
		---*	○	
	S_s-F1	++*	○	
	S_s-F2	++*	○	
	S_s-N1	++*	○	
		-+*	○	
	S_s-N2 (NS)	++*	○	
		-+*	○	
S_s-N2 (EW)	++*	○		
	-+*	○		

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、解析ケース①において、取水管の管周方向における発生応力、また取水管の管軸方向における発生応力を算定するための地盤ひずみを算定する。その中で、取水管の管周方向の発生応力及び管軸方向における発生応力を算定するための地盤ひずみが最も大きくなる地震動を用いて、表 3-1 に示す解析ケース②及び③を実施する。

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。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.3.1 耐震評価上考慮する状態

取水管の地震応答解析において、地震以外に考慮する状態を以下に示す。

(1) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり、通常の条件下におかれている状態。ただし、運転時の異常な過渡変化時の影響を受けないことから考慮しない。

(2) 設計基準事故時の状態

設計基準事故時の影響を受けないことから考慮しない。

(3) 設計用自然条件

海中に設置された構造物であることから積雪及び風荷重は考慮しない。

(4) 重大事故時の状態

重大事故時の影響を受けないことから考慮しない。

3.3.2 荷重

取水管の地震応答解析において、考慮する荷重を以下に示す。

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、躯体自重を考慮する。

(2) 積載荷重 (P)

積載荷重として、土圧、外水圧及び内水圧による荷重を考慮する。

(3) 地震荷重 (S s)

基準地震動 S s による荷重を考慮する。

3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S s)	G + P + S s

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S s : 地震荷重 (基準地震動 S s)

3.4 入力地震動

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3-3に入力地震動算定の概念図を、図3-4～図3-14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。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。

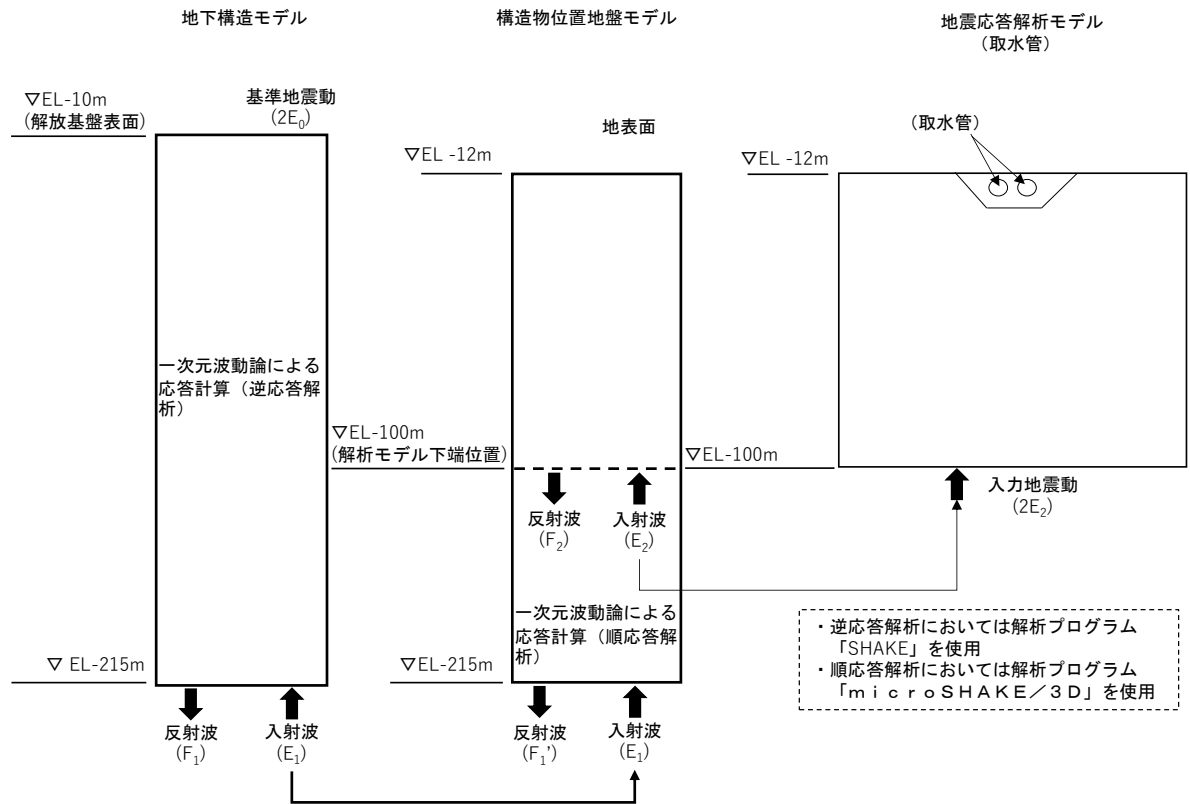
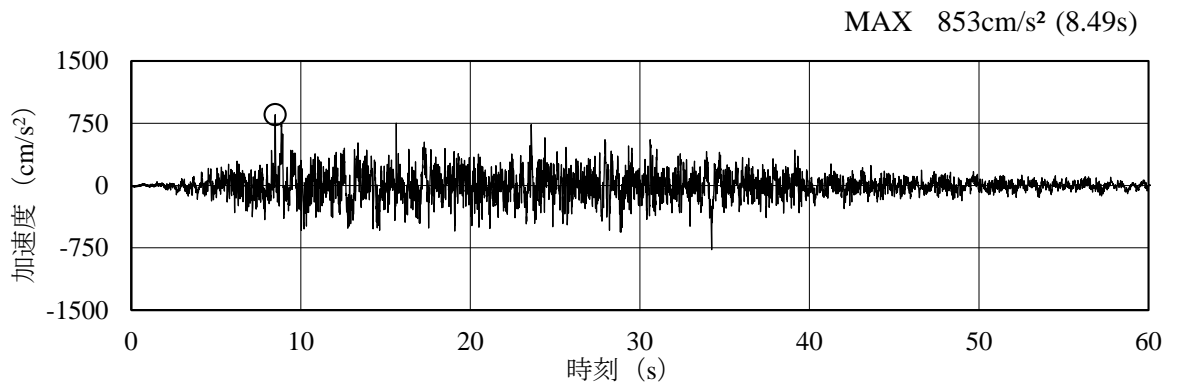
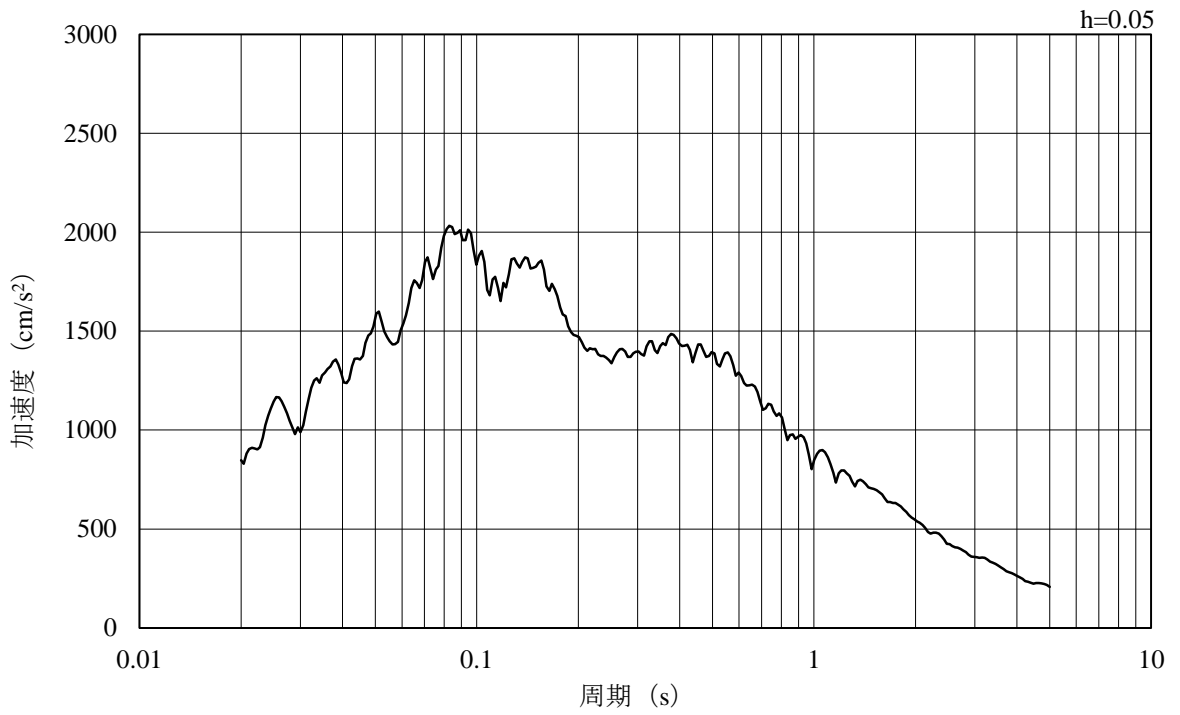


図 3-3 入力地震動算定の概念図

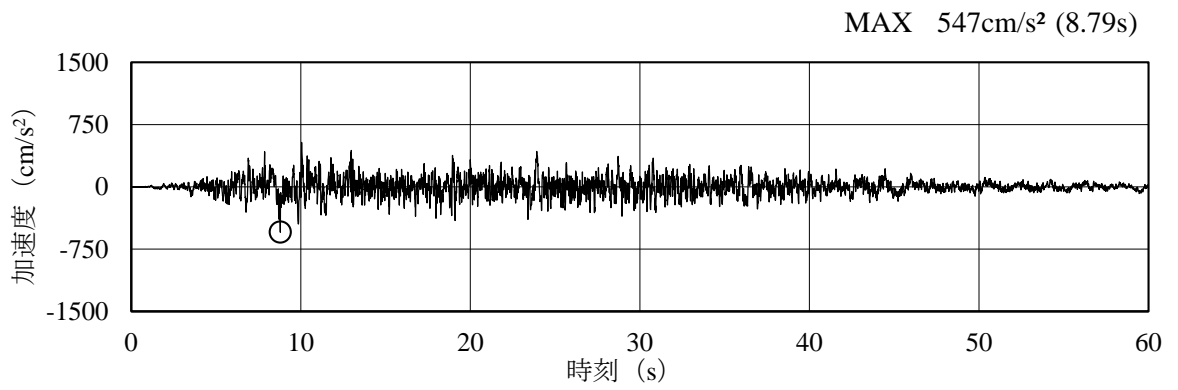


(a) 加速度時刻歴波形

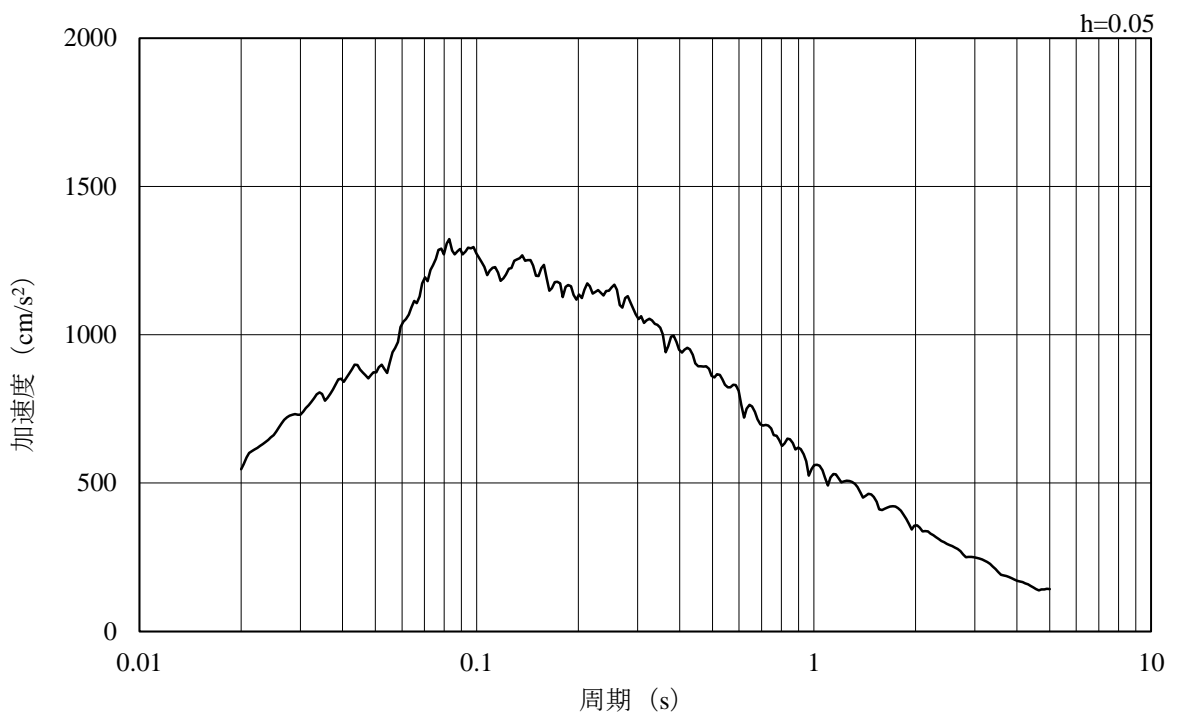


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 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
(S s -D, 水平方向)

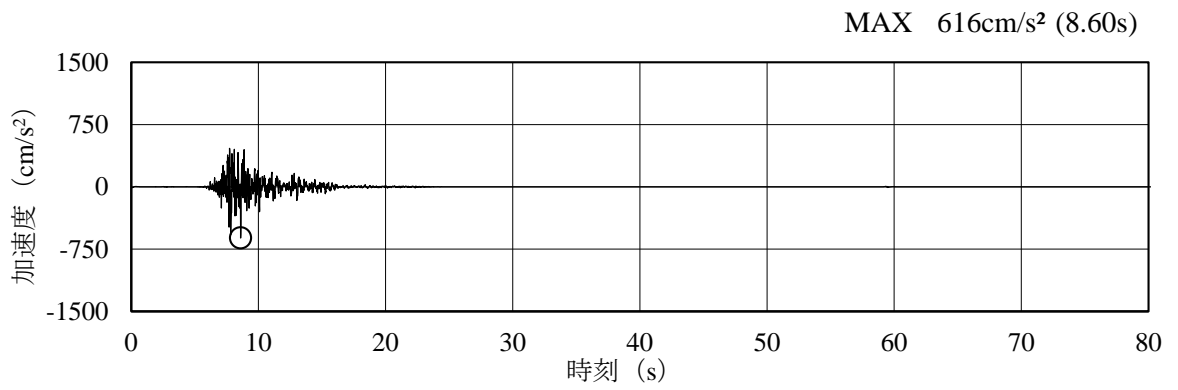


(a) 加速度時刻歴波形

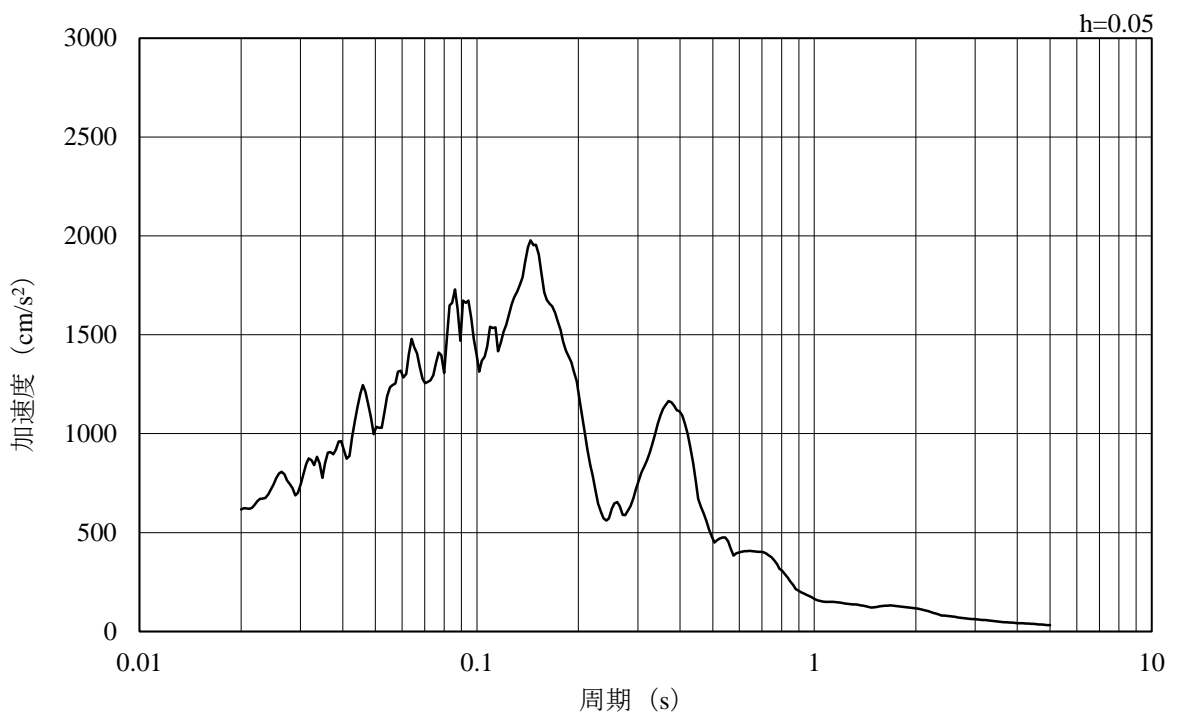


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-5 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
(S s - D, 鉛直方向)

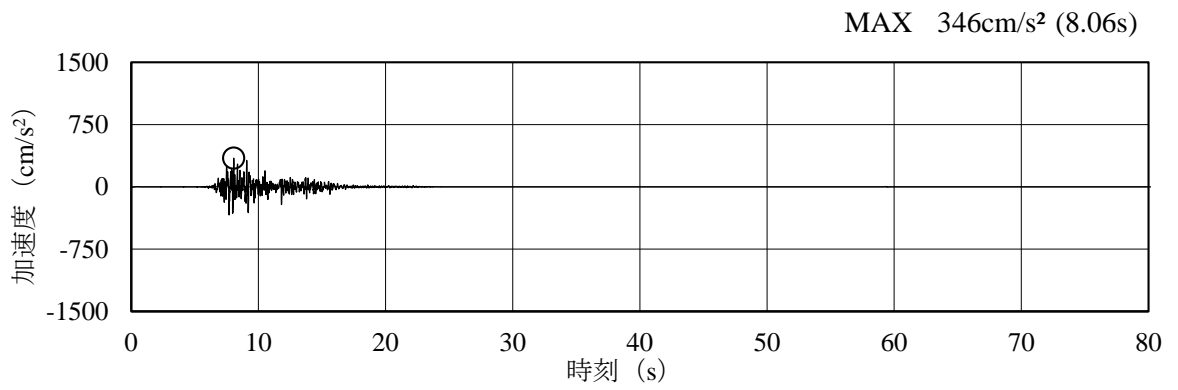


(a) 加速度時刻歴波形

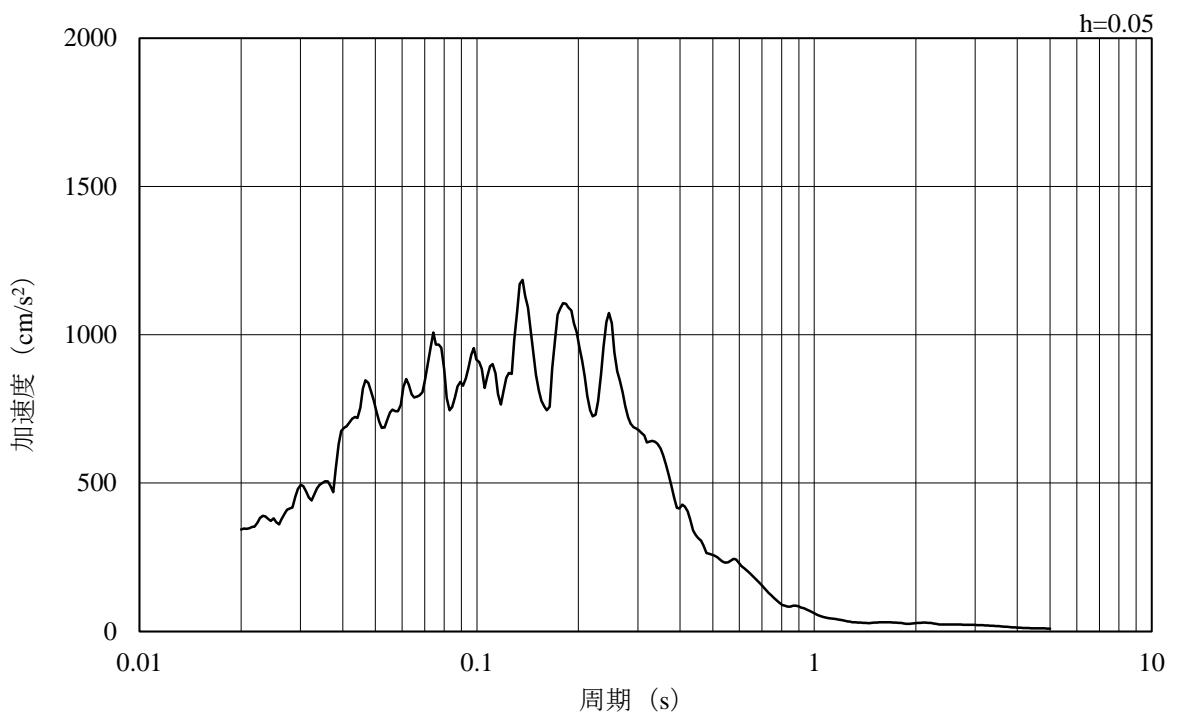


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-6 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
(S s - F 1, 水平方向)

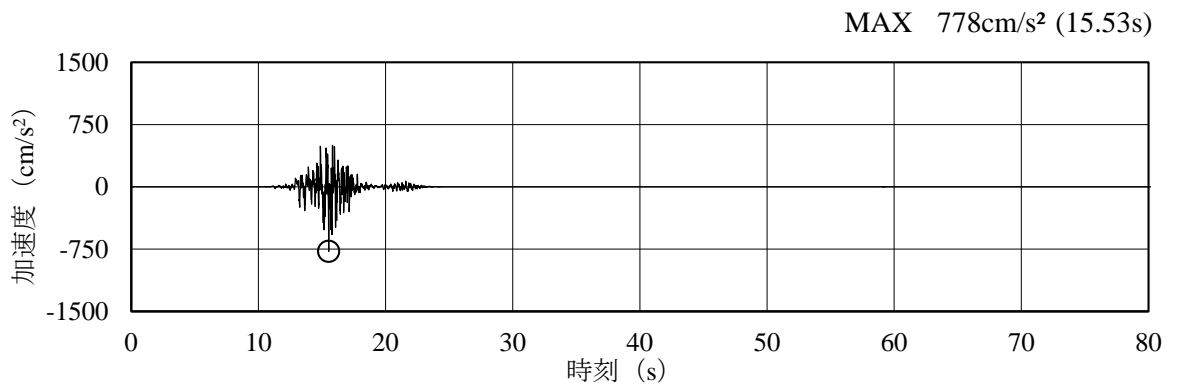


(a) 加速度時刻歴波形

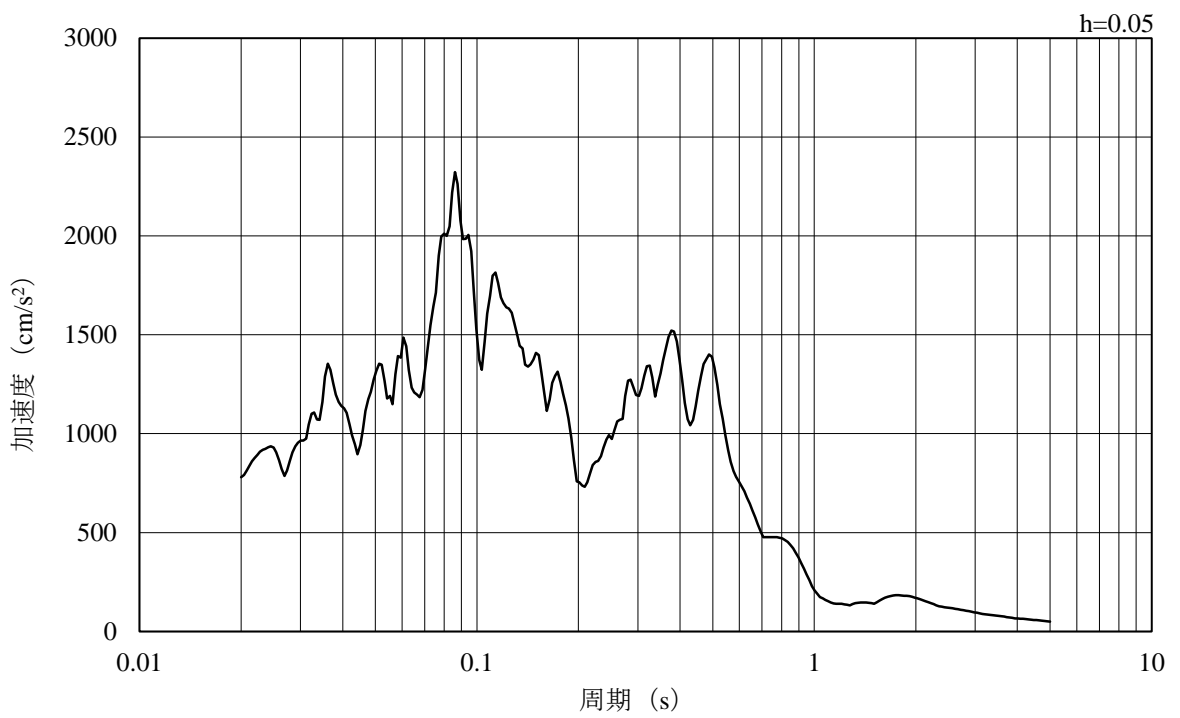


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-7 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
(S s - F 1, 鉛直方向)

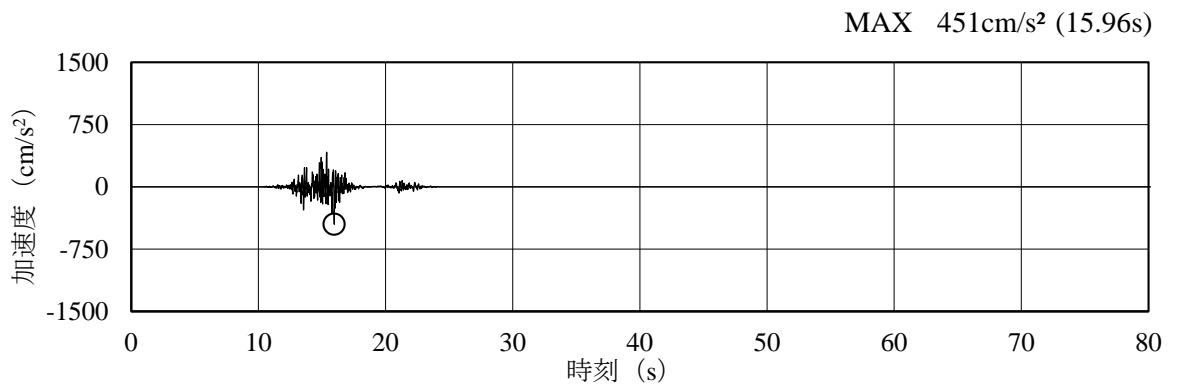


(a) 加速度時刻歴波形

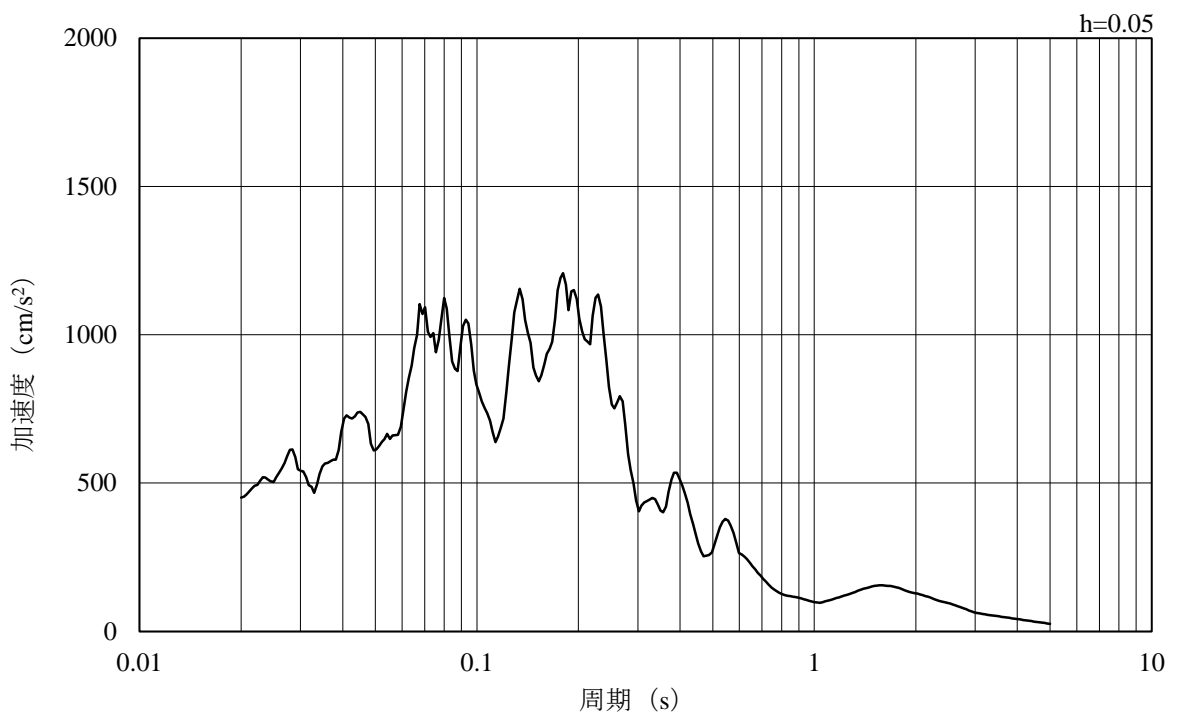


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-8 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
(S s - F 2, 水平方向)

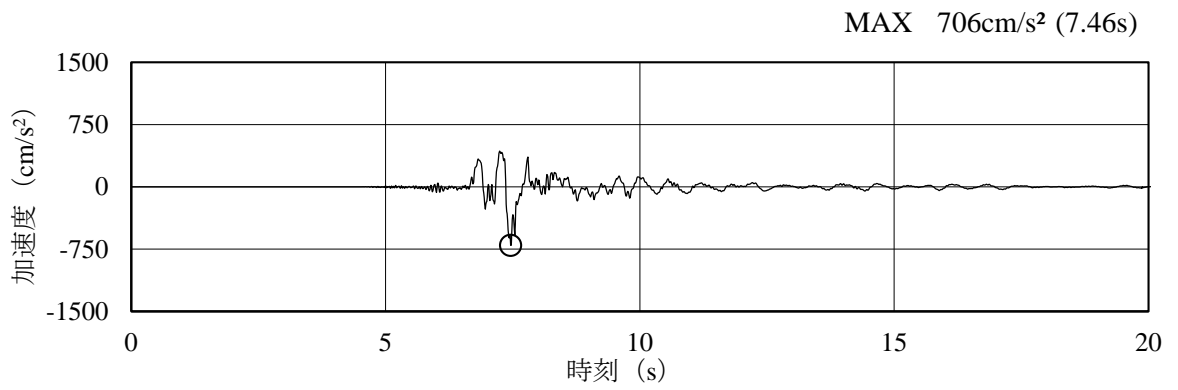


(a) 加速度時刻歴波形

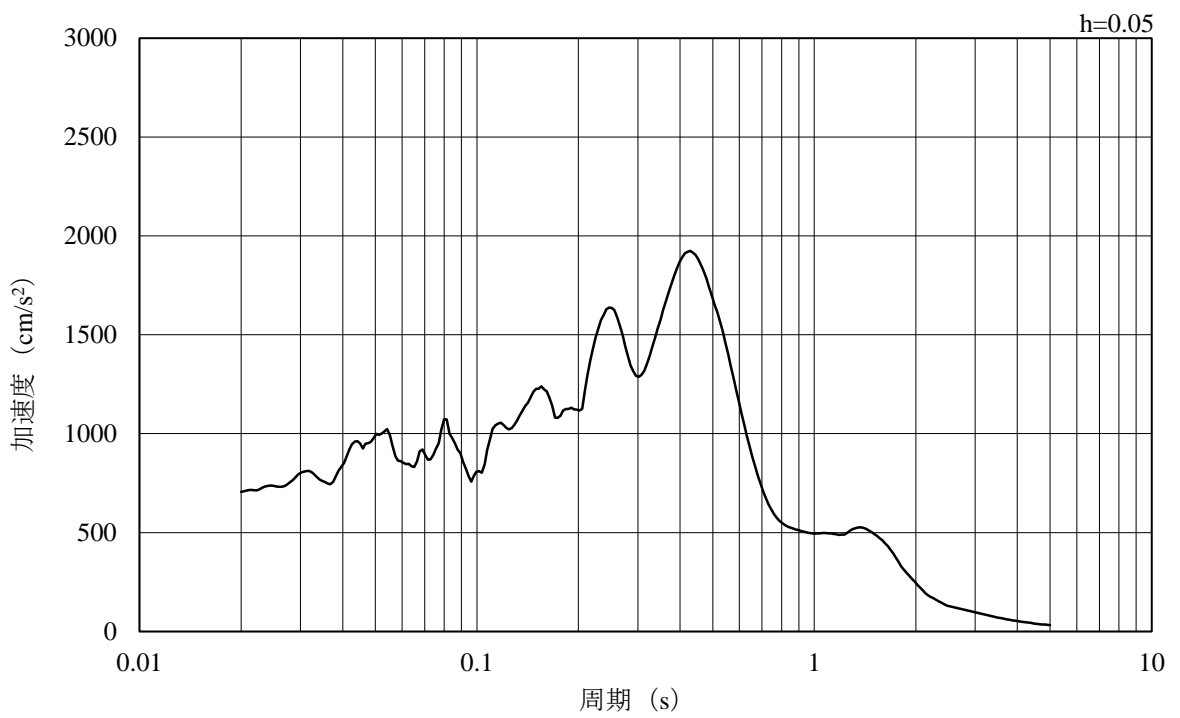


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-9 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
(S s - F 2, 鉛直方向)

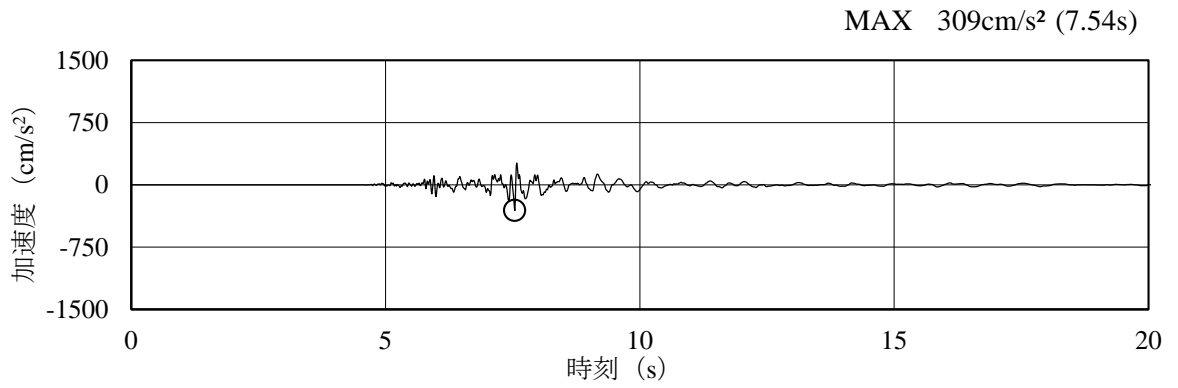


(a) 加速度時刻歴波形

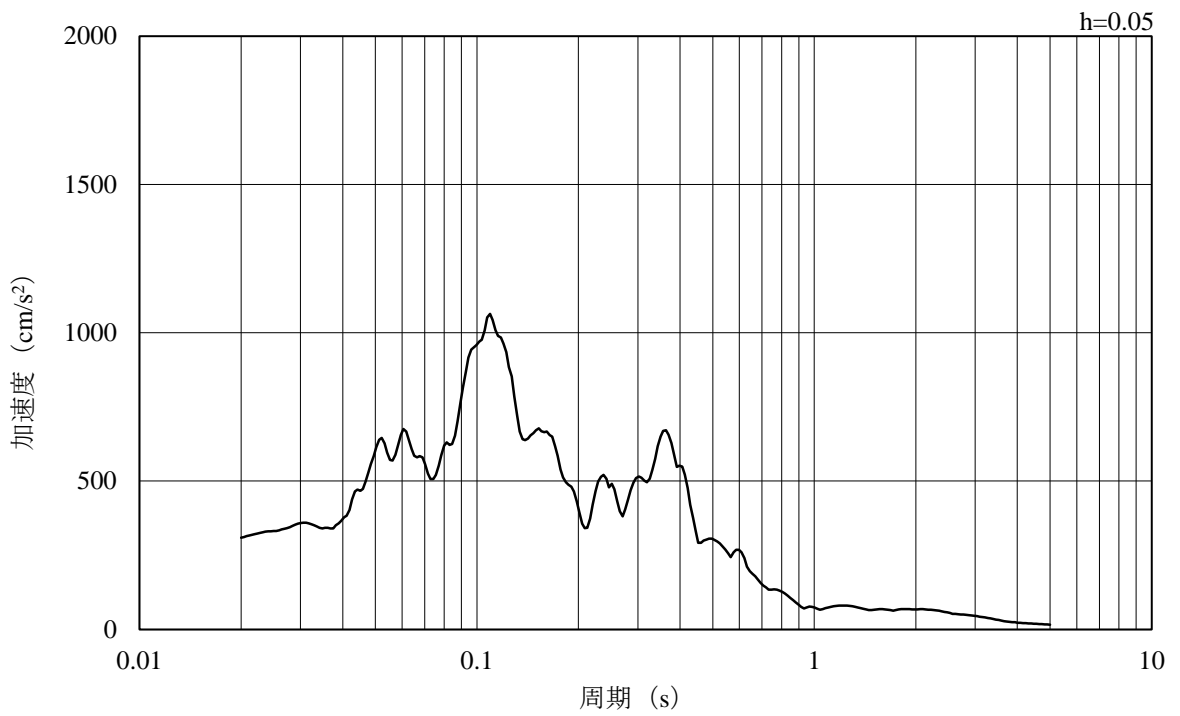


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-10 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
(S s - N 1, 水平方向)

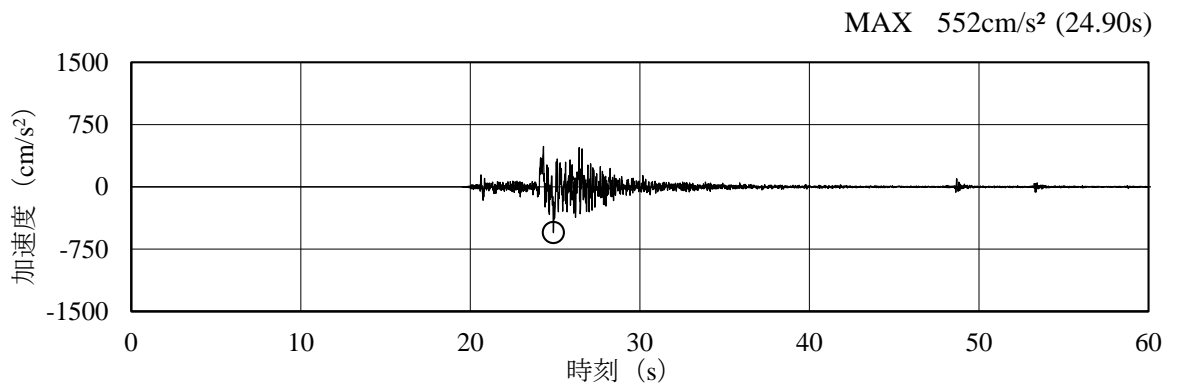


(a) 加速度時刻歴波形

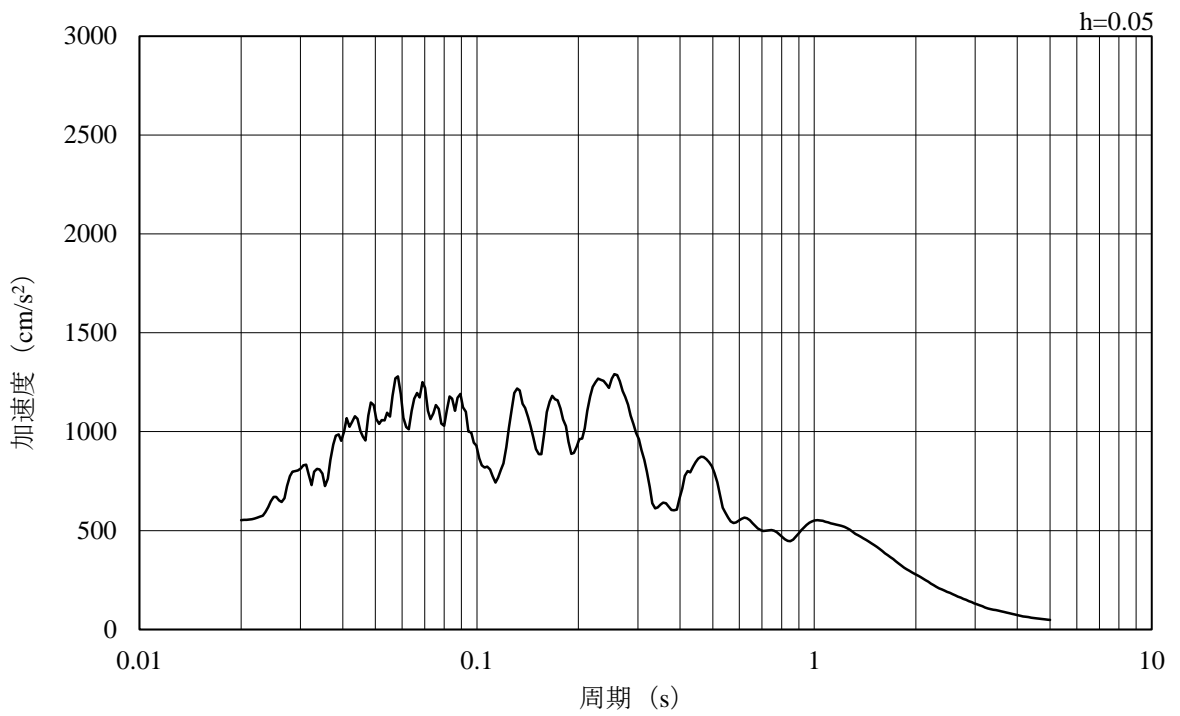


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-11 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
(S s - N 1, 鉛直方向)

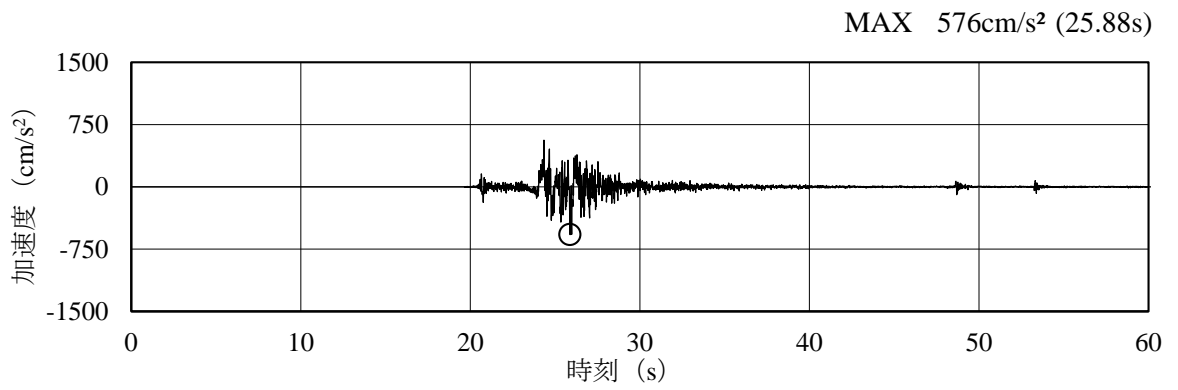


(a) 加速度時刻歴波形

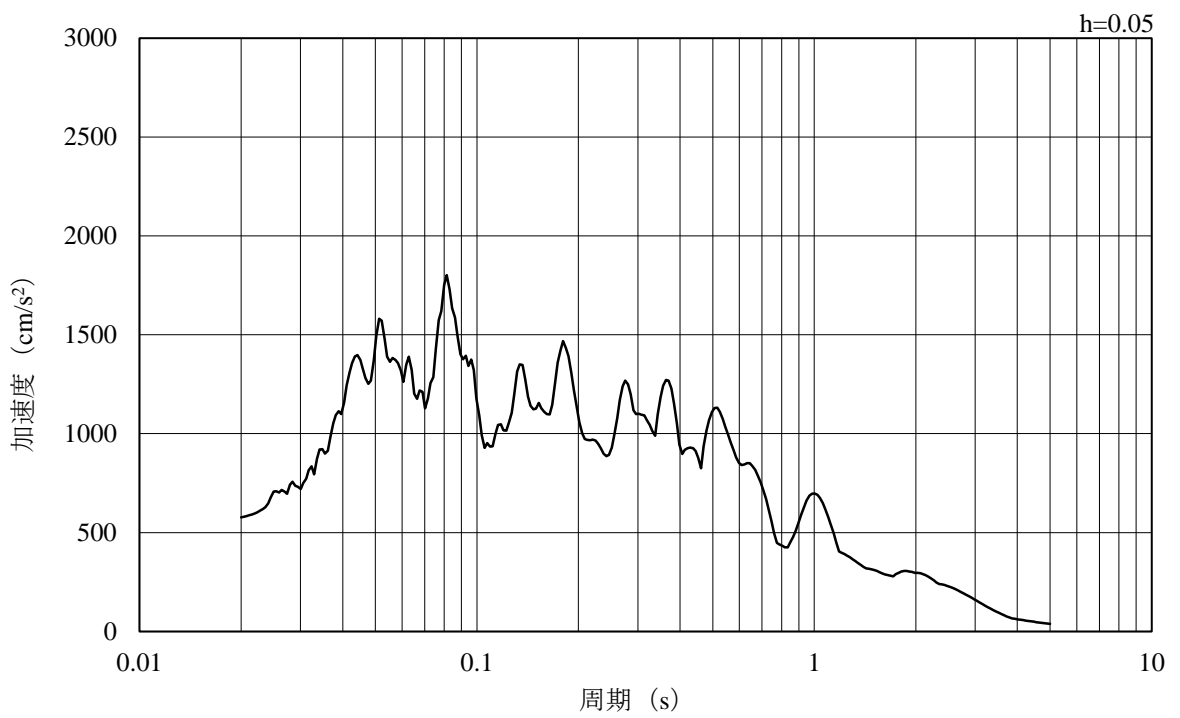


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-12 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
(S s - N 2 (N S), 水平方向)

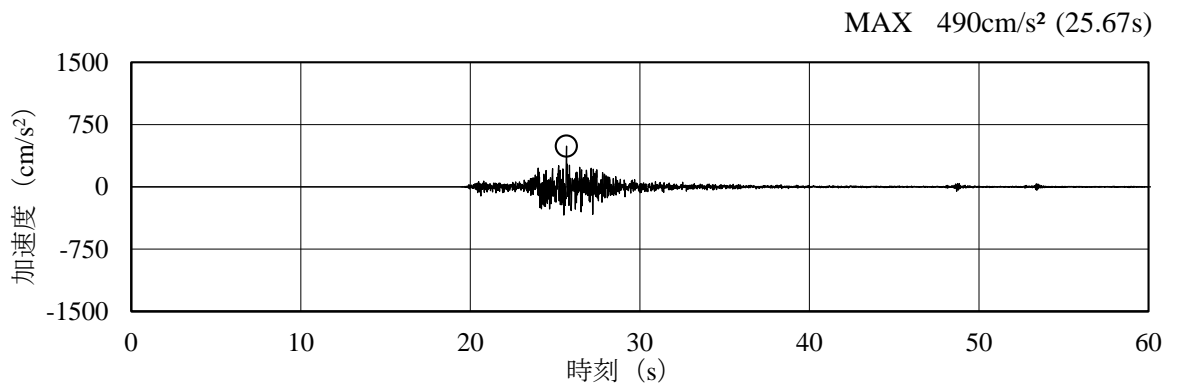


(a) 加速度時刻歴波形

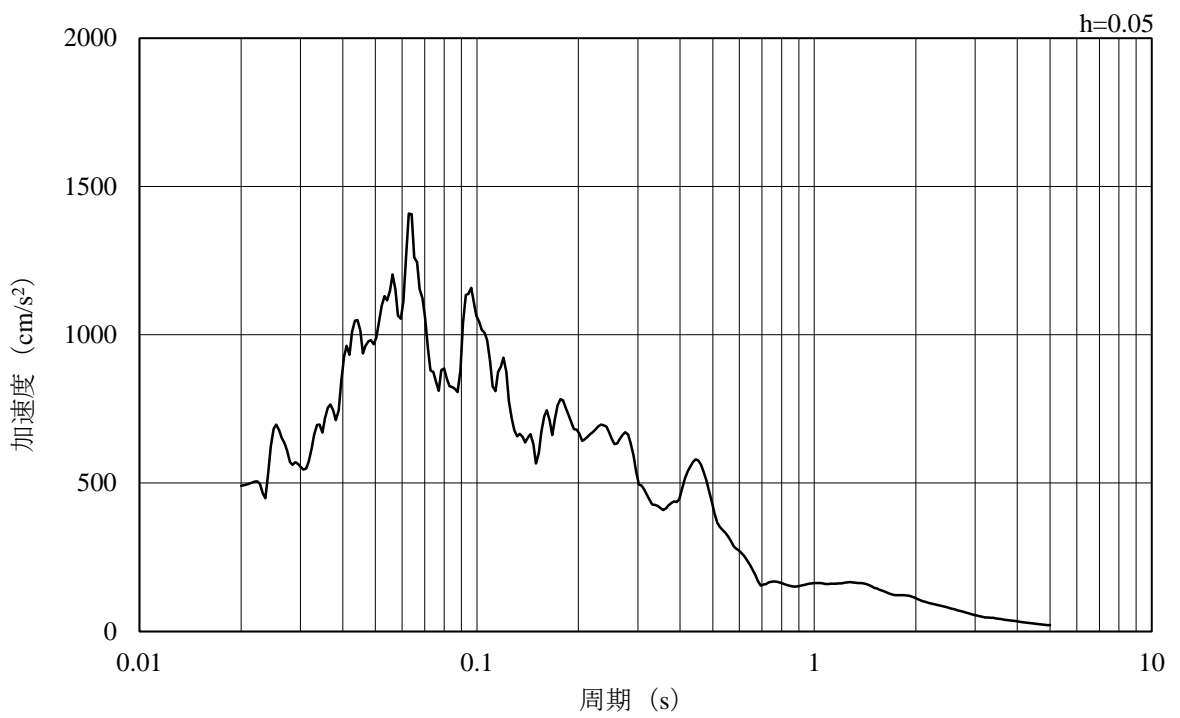


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-13 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
(S s - N 2 (E W), 水平方向)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-14 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
(S s - N 2 (E W), 鉛直方向)

3.5 解析モデル及び諸元

3.5.1 解析モデル

取水管の地震応答解析モデルを図3-15に示す。

(1) 解析領域

解析領域は、側方境界及び底面境界が構造物の応答に影響しないよう、構造物と側方境界及び底面境界との距離を十分に大きく設定する。

(2) 境界条件

解析領域の側方及び底面には、エネルギーの逸散効果を考慮するため、粘性境界を設ける。

(3) 構造物のモデル化

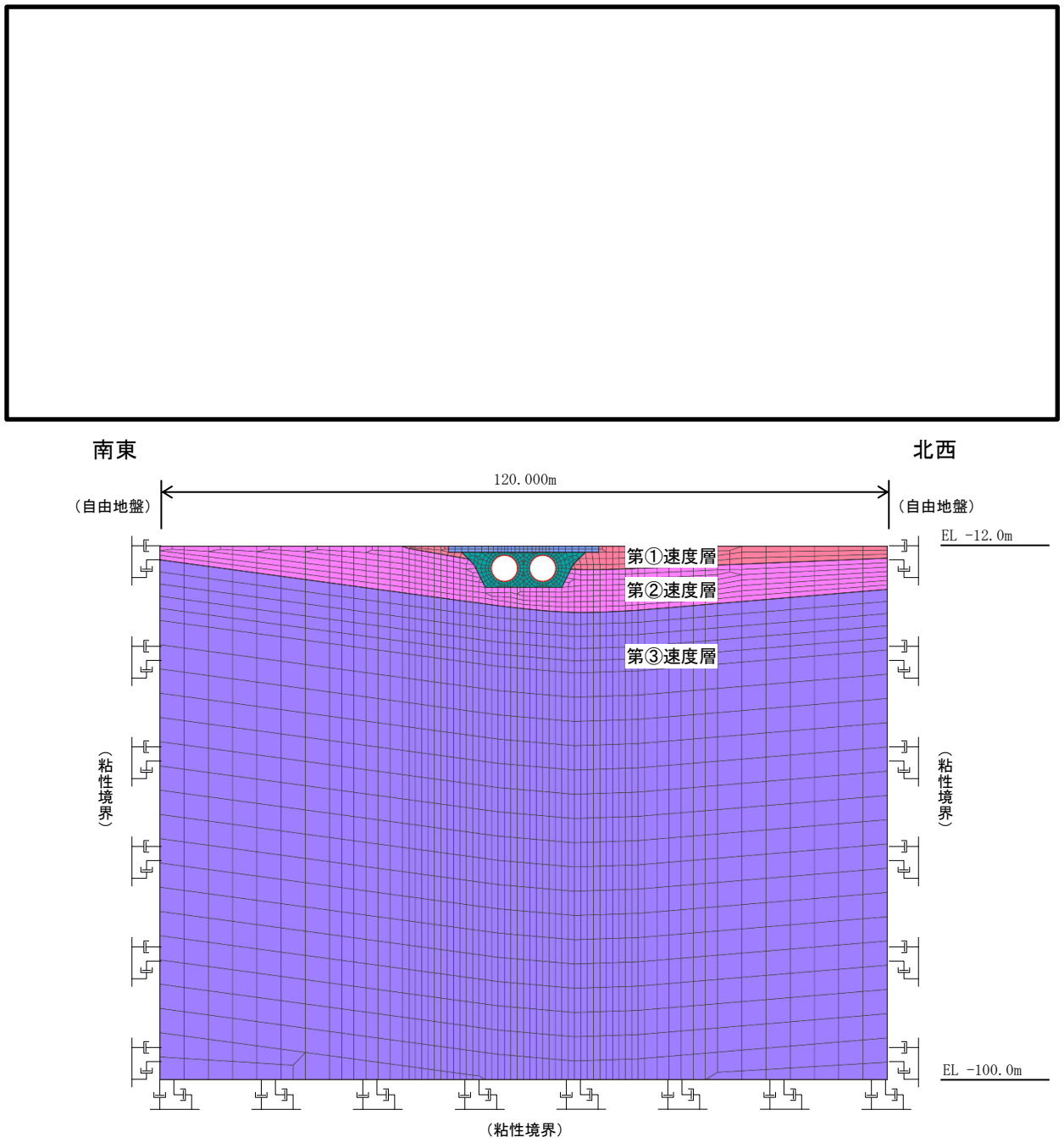
取水管は、はり要素でモデル化する。

(4) 地盤のモデル化

岩盤は線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、砕石は、地盤の非線形性を考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

(5) ジョイント要素の設定

地震時の「地盤と構造物」の接合面における接触、剥離及びすべりを考慮するため、これらの接合面にジョイント要素を設定する。



(取水管まわり拡大)

図 3-15 取水管 地震応答解析モデル図

3.5.2 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 3-5 に、材料の物性値を表 3-6 に示す。

表 3-5 使用材料

材料	仕様
鋼製管	SS400

表 3-6 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 ³)	77.0
	ヤング係数 (N/mm ²)	2.00×10 ⁵
	ポアソン比	0.3

3.5.3 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。

3.6 地震応答解析結果

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 σ_θ 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 3-16 に示す。

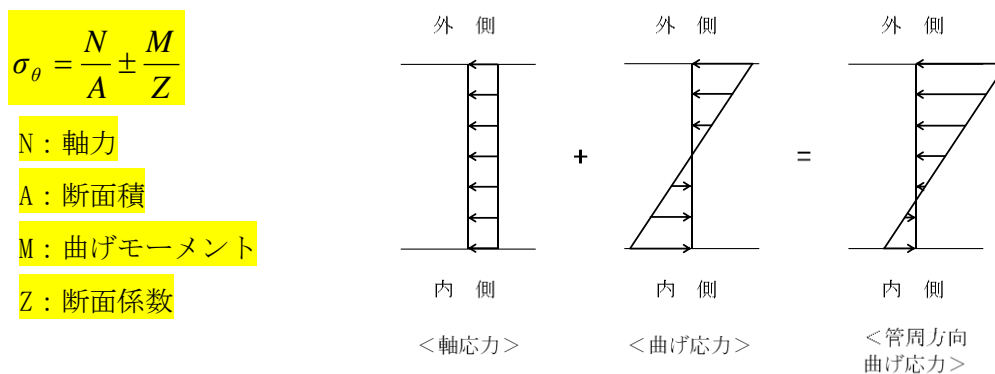
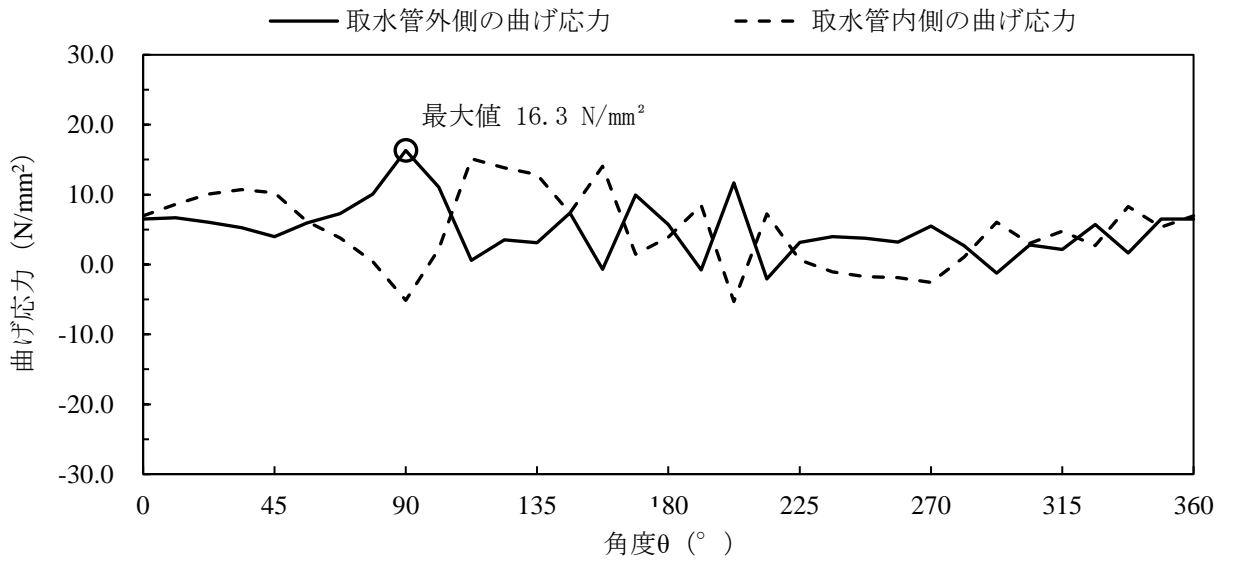
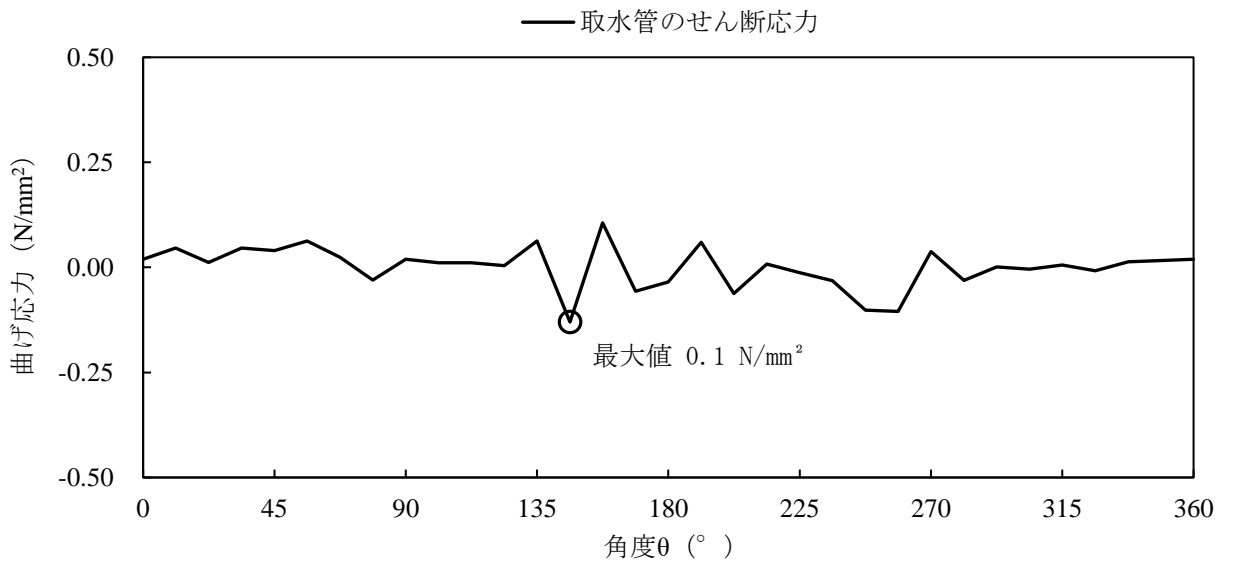


図 3-16 管周方向曲げ応力概念図

耐震評価のために用いる応力分布として、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 に対する応力分布図を図 3-17～図 3-28 に示す。また、解析ケース①において、応答ひずみが最大となる地震動に対しての解析ケース②及び③の応力分布図を図 3-29 及び図 3-30 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。



(曲げ応力分布 t=23.66s)

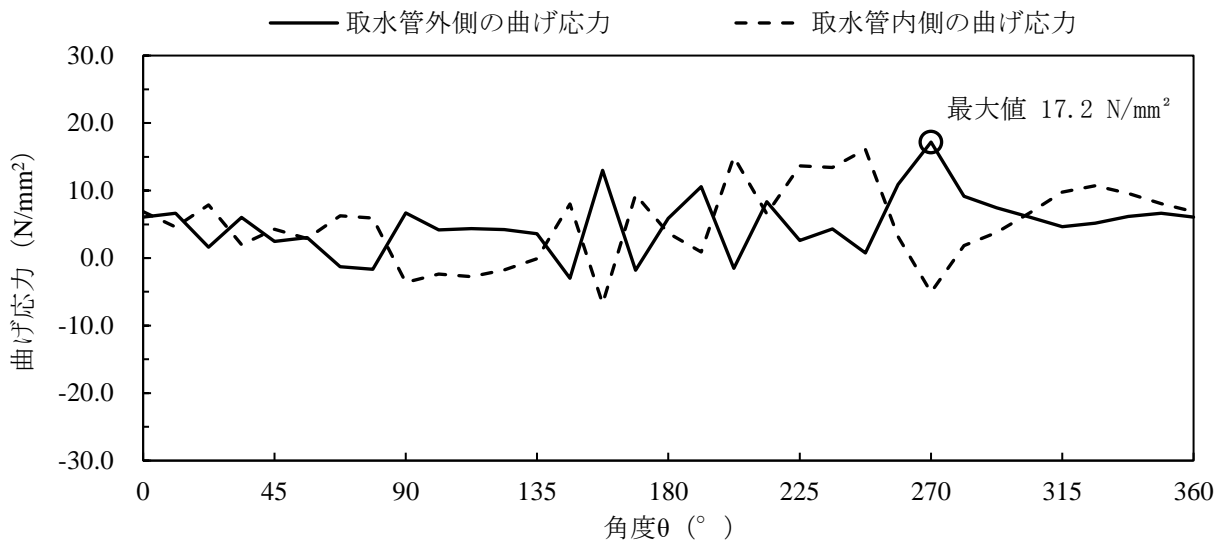


(せん断応力分布 t=23.66s)

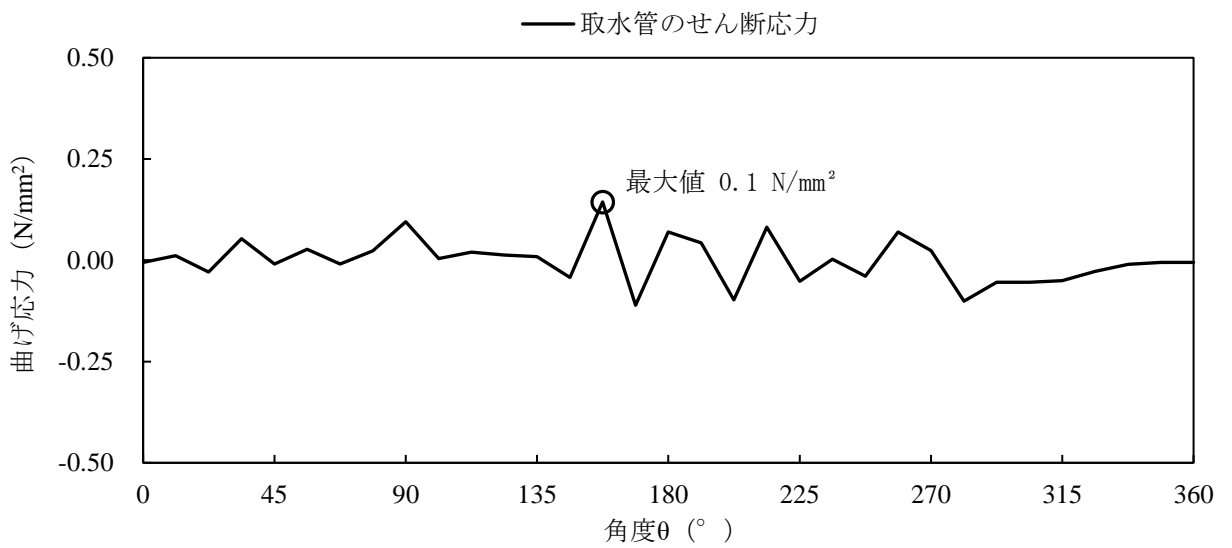
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-17 取水管管周方向の応力分布図 (1/14)

(解析ケース①, S s-D (++))



(曲げ応力分布 t=23.66s)

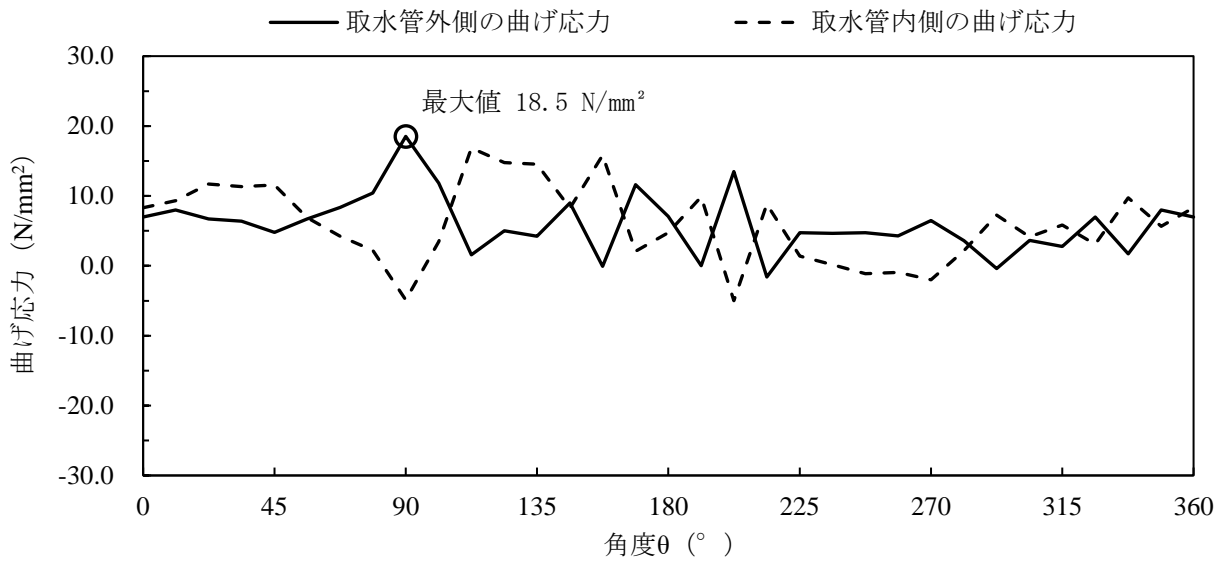


(せん断応力分布 t=23.66s)

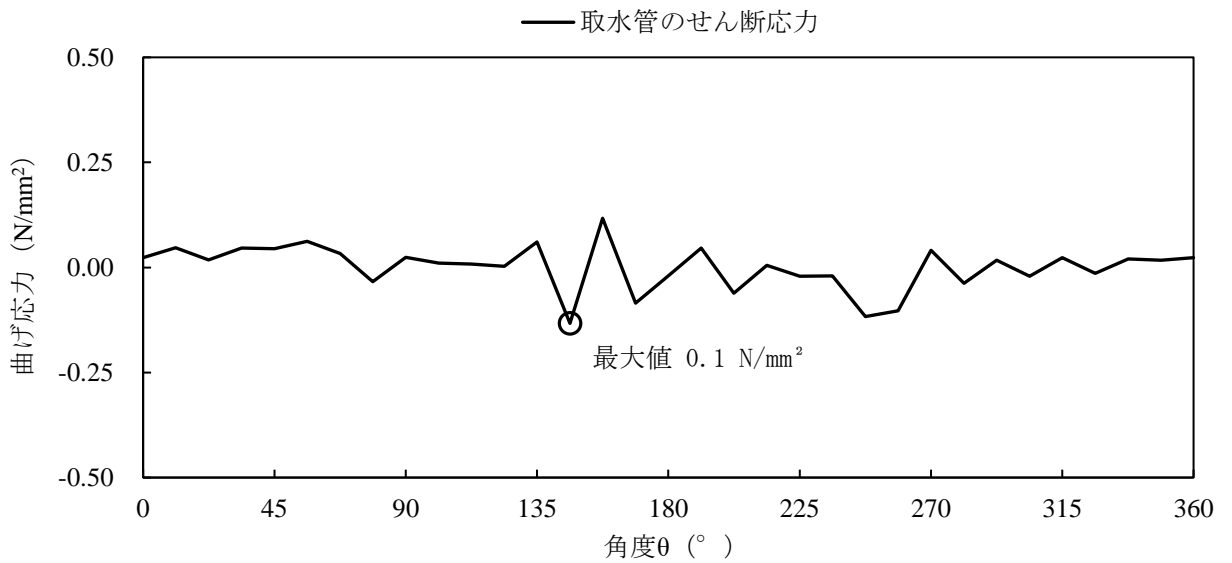
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図3-18 取水管管周方向の応力分布図 (2/14)

(解析ケース①, S_s-D (-+))



(曲げ応力分布 t=23.66s)

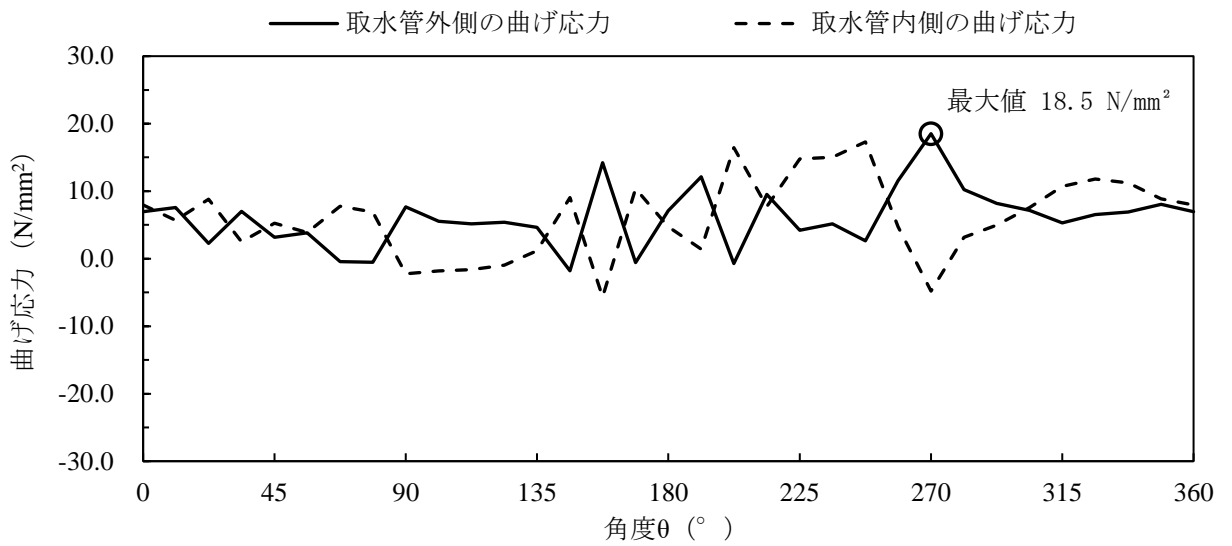


(せん断応力分布 t=23.66s)

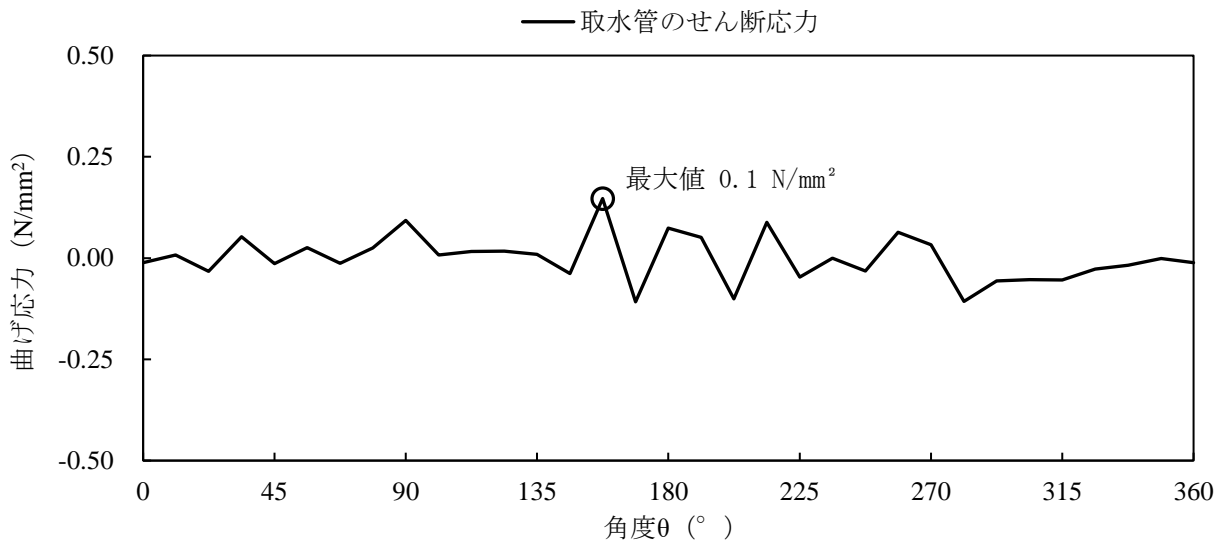
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-19 取水管管周方向の応力分布図 (3/14)

(解析ケース①, S s-D (+-))



(曲げ応力分布 t=23.66s)

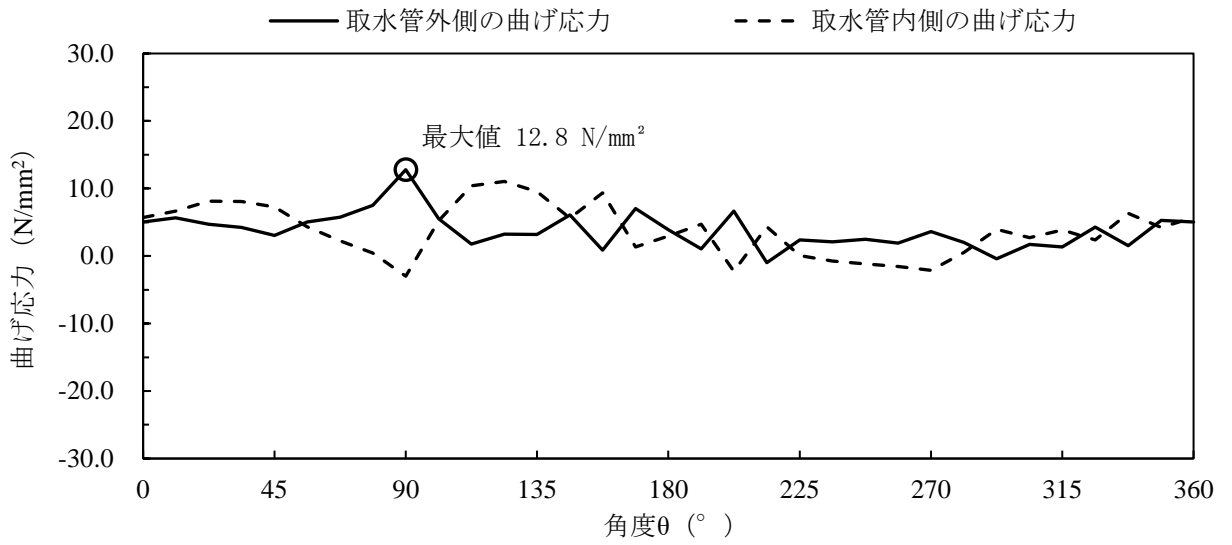


(せん断応力分布 t=23.66s)

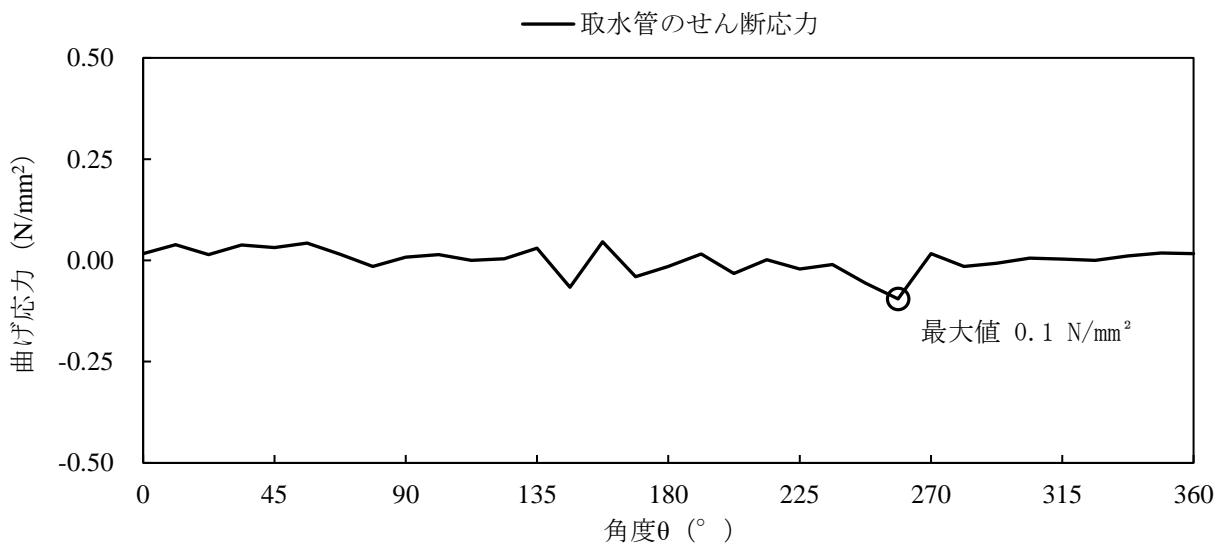
注：横軸の角度 θ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-20 取水管管周方向の応力分布図 (4/14)

(解析ケース①, S s-D (—))



(曲げ応力分布 t=8.67s)

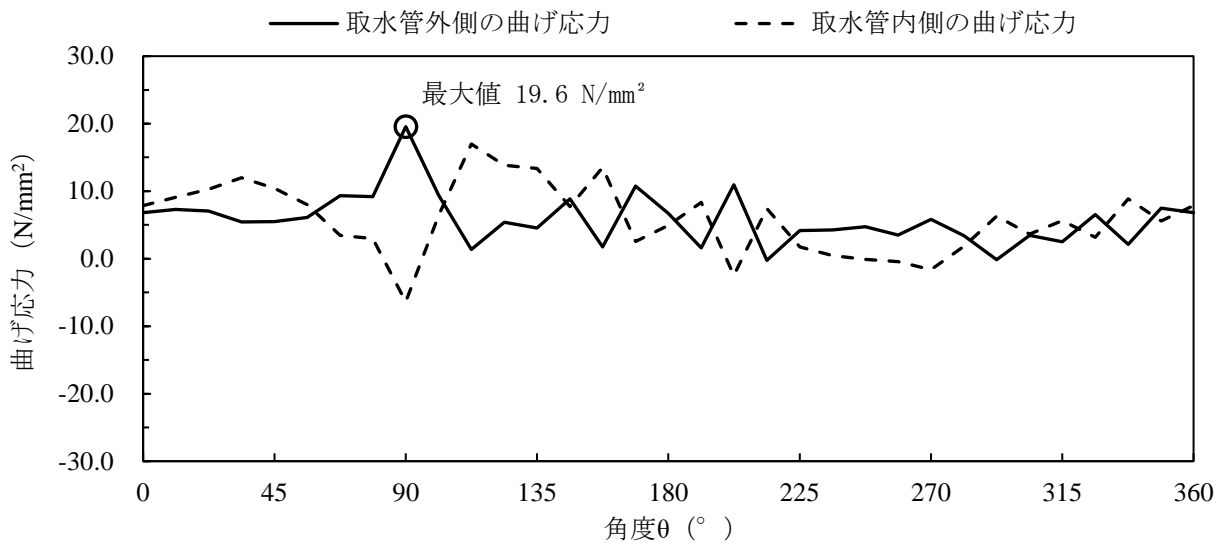


(せん断応力分布 t=8.67s)

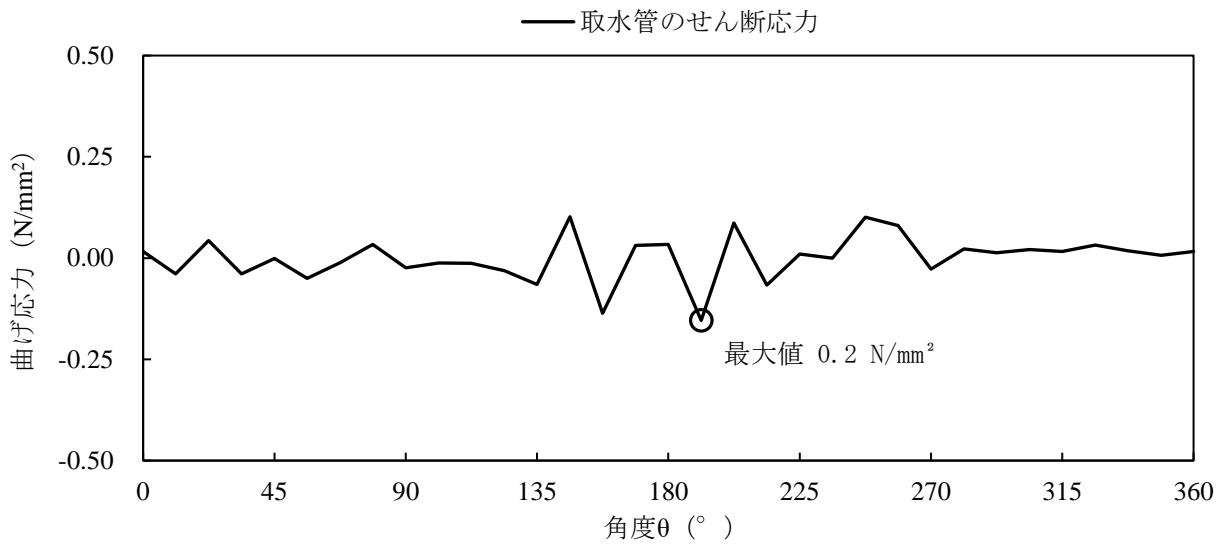
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-21 取水管管周方向の応力分布図 (5/14)

(解析ケース①, S_s-F 1 (++))



(曲げ応力分布 t=15.84s)

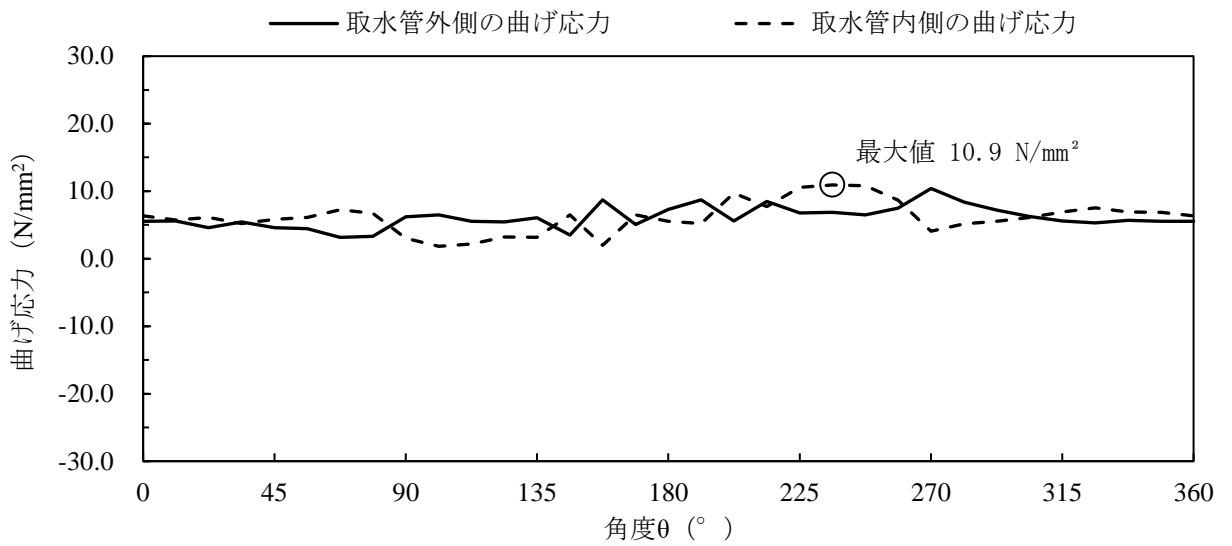


(せん断応力分布 t=15.89s)

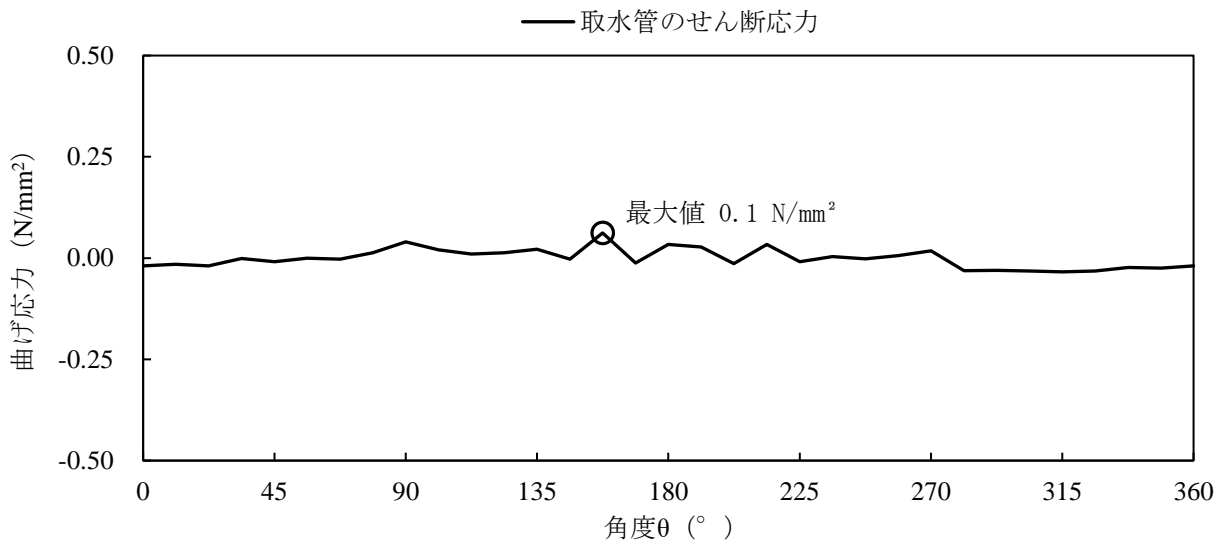
注：横軸の角度 θ は、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-22 取水管管周方向の応力分布図 (6/14)

(解析ケース①, S_s-F₂(++))



(曲げ応力分布 t=7.60s)

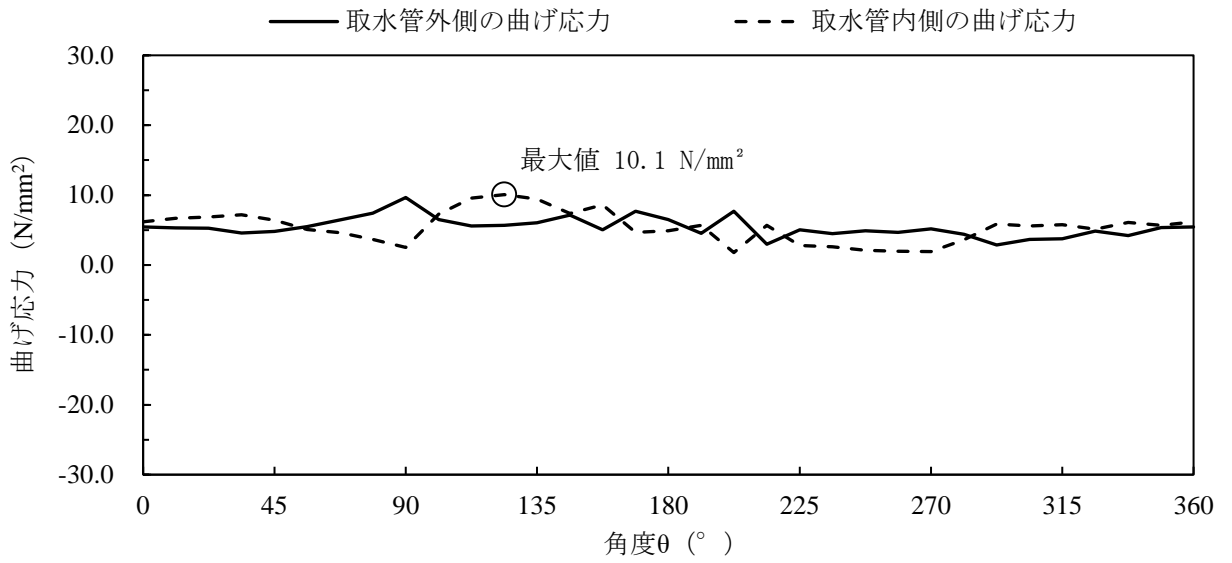


(せん断応力分布 t=7.60s)

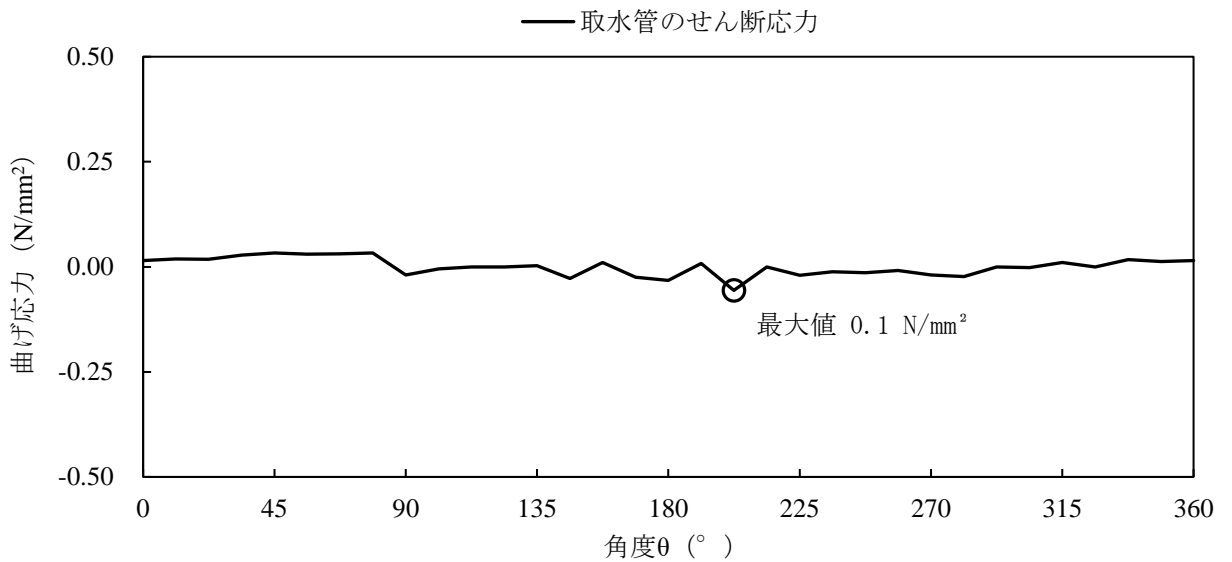
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-23 取水管管周方向の応力分布図 (7/14)

(解析ケース①, S s - N 1 (++))



(曲げ応力分布 t=7.60s)

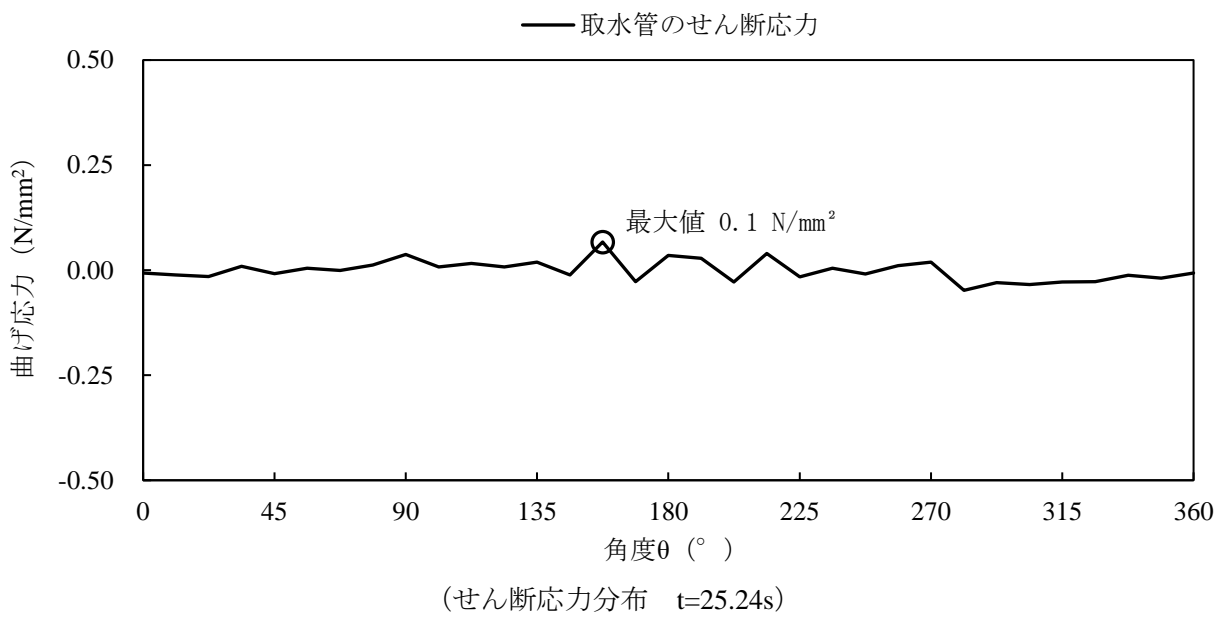
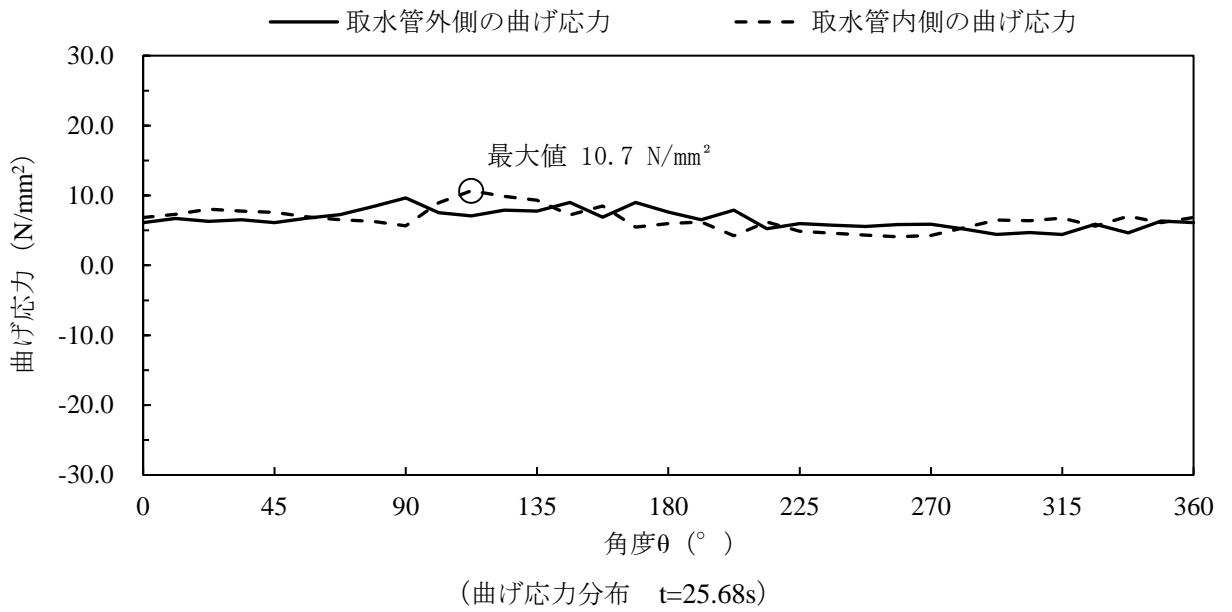


(せん断応力分布 t=7.60s)

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。

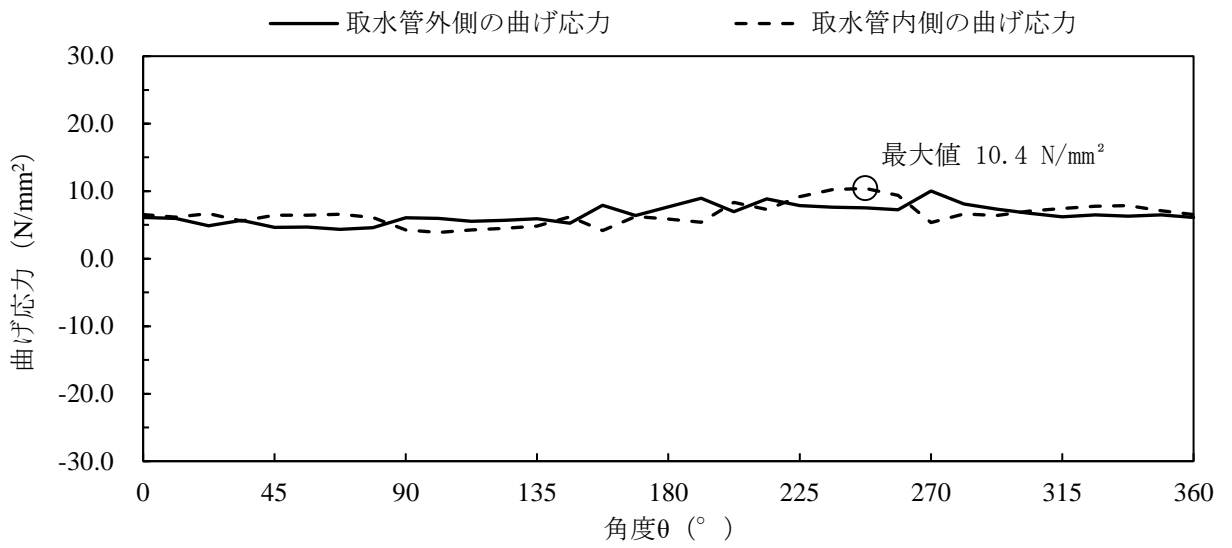
図 3-24 取水管管周方向の応力分布図 (8/14)

(解析ケース①, S s - N 1 (-+))

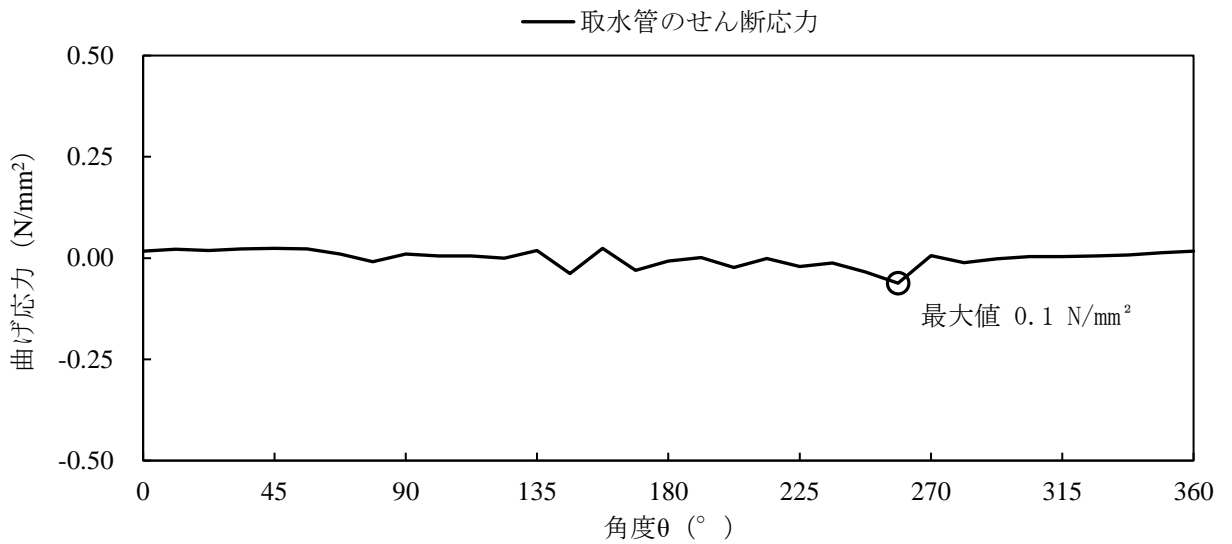


注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-25 取水管管周方向の応力分布図 (9/14)
 (解析ケース①, S_s-N₂ (NS) (++))



(曲げ応力分布 t=25.68s)

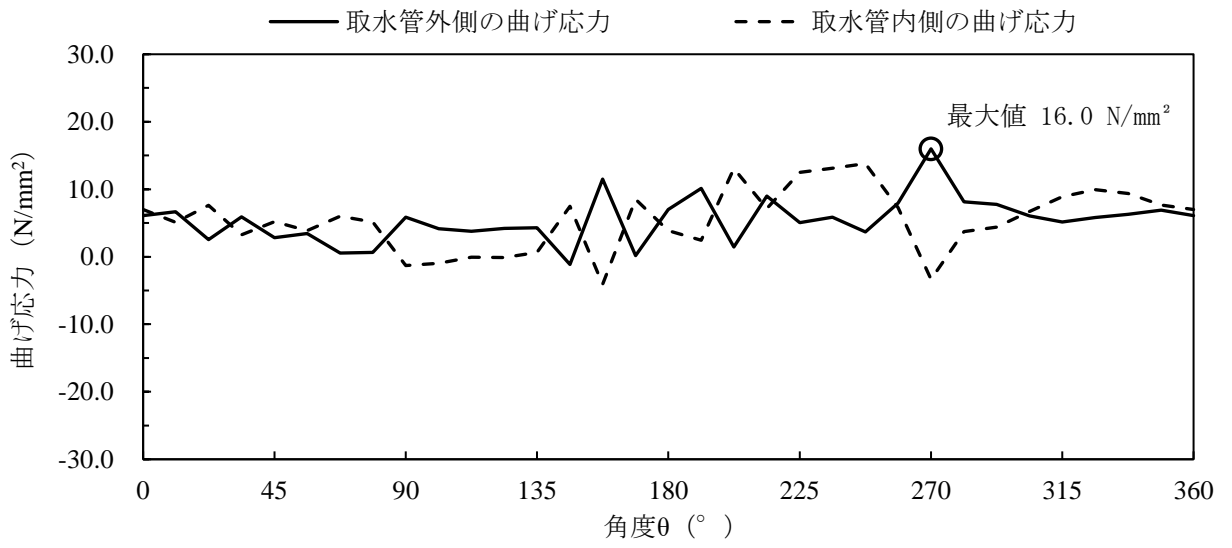


(せん断応力分布 t=24.70s)

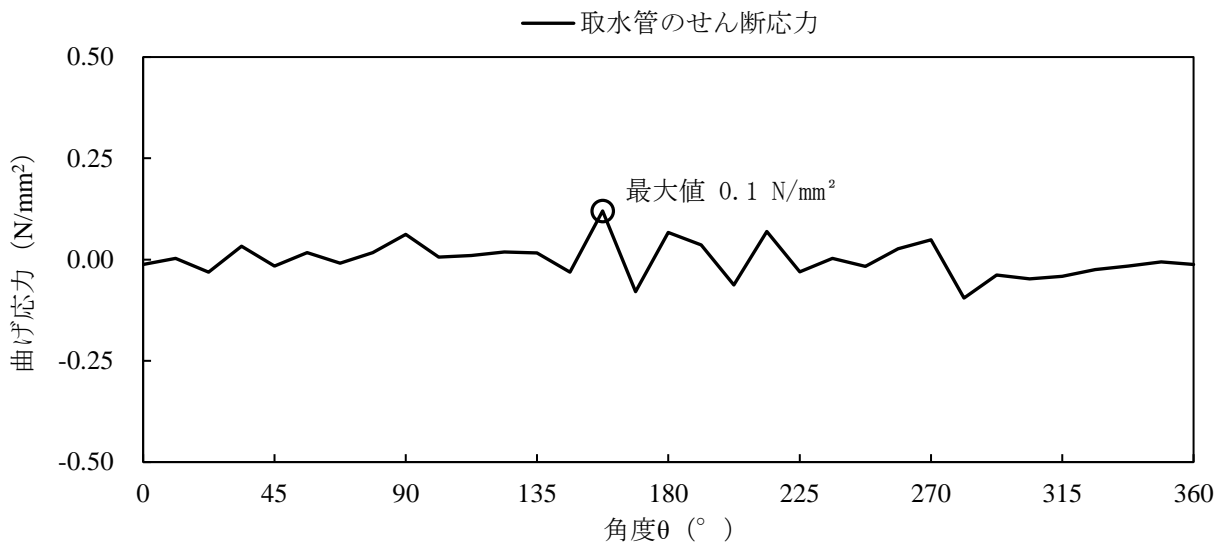
注：横軸の角度θは，管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-26 取水管管周方向の応力分布図 (10/14)

(解析ケース①, S s - N 2 (NS) (-+))



(曲げ応力分布 t=24.84s)

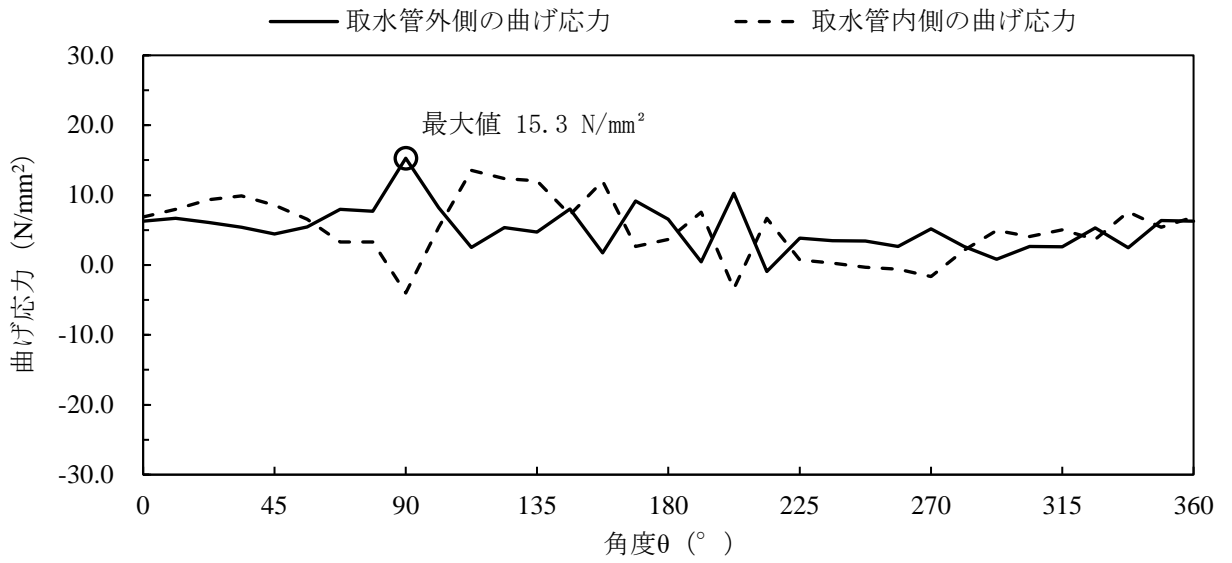


(せん断応力分布 t=24.84s)

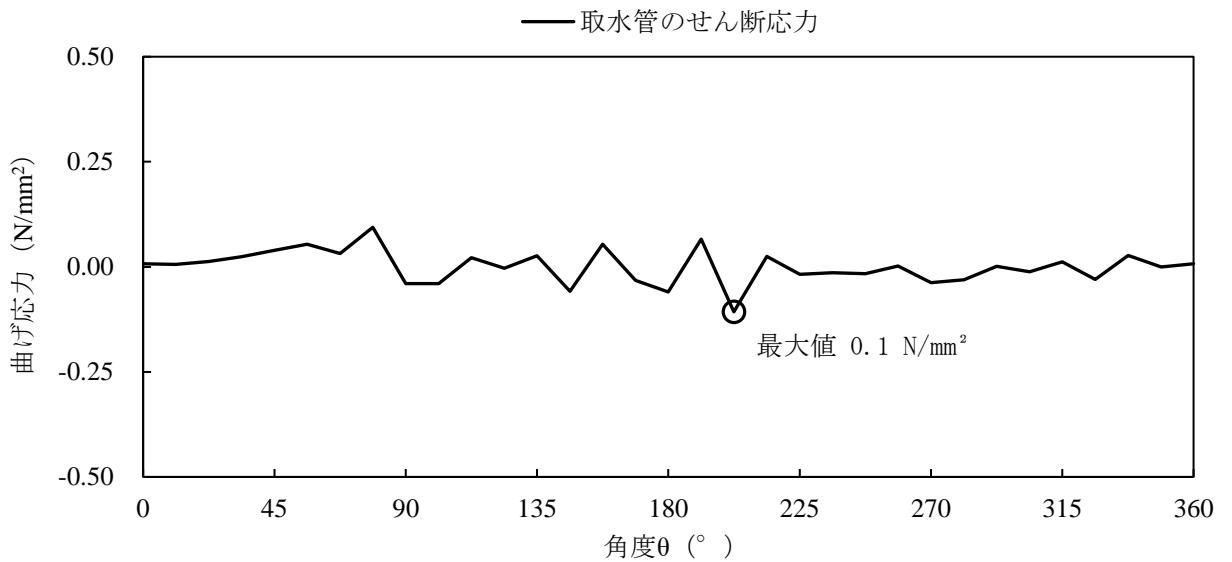
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-27 取水管管周方向の応力分布図 (11/14)

(解析ケース①, S s-N 2 (EW) (++))



(曲げ応力分布 t=24.84s)

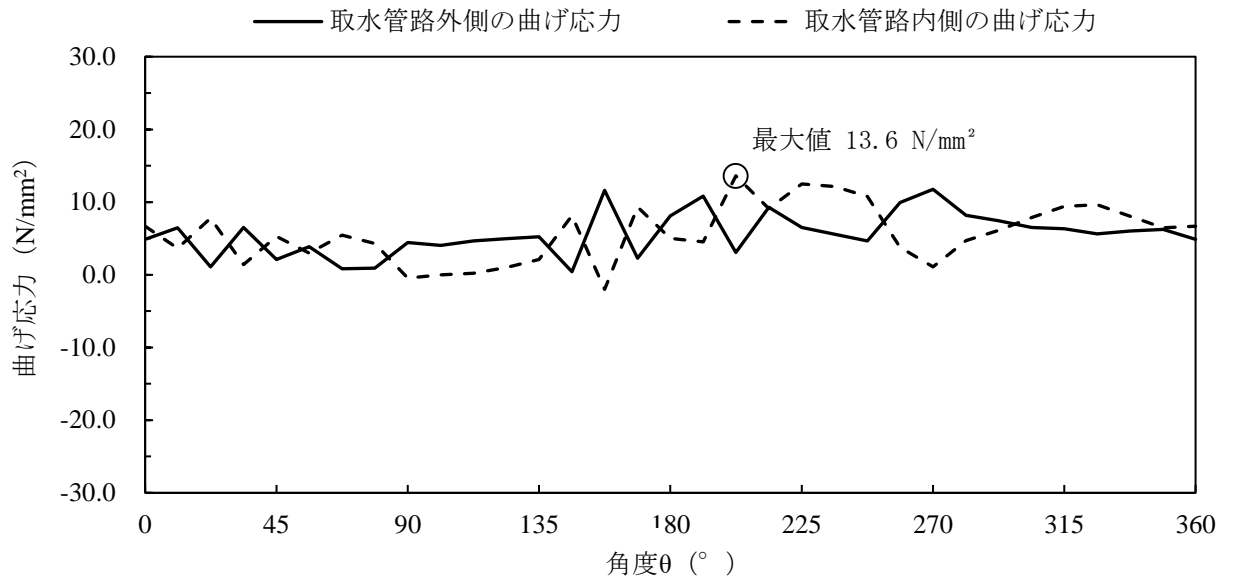


(せん断応力分布 t=24.84s)

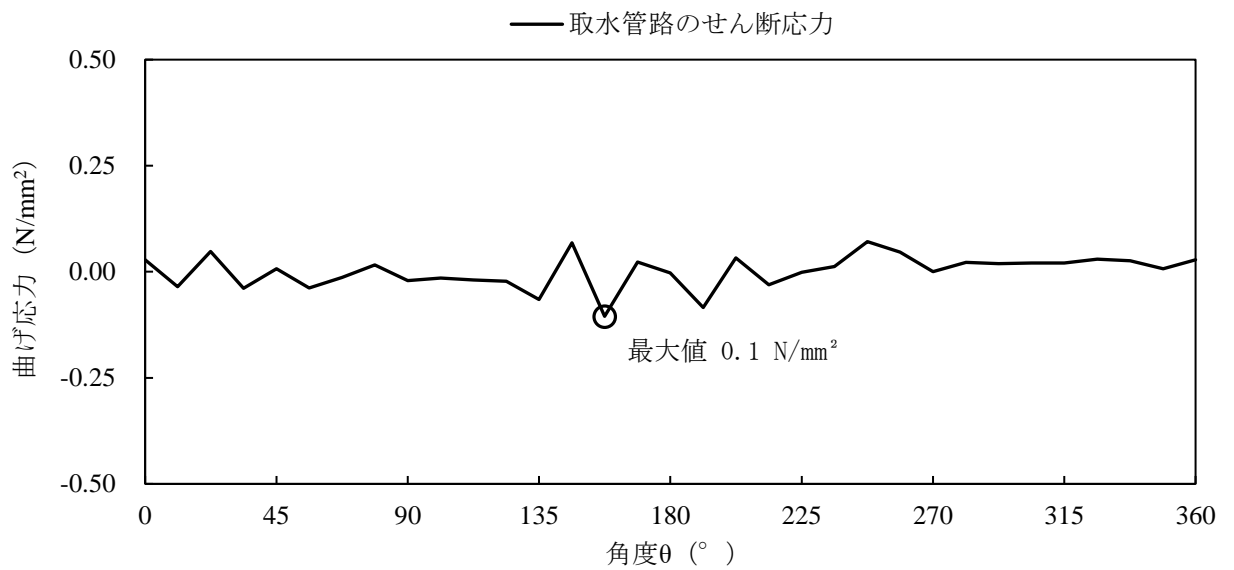
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-28 取水管管周方向の応力分布図 (12/14)

(解析ケース①, S s—N 2 (EW) (-+))



(曲げ応力分布 t=15.87s)

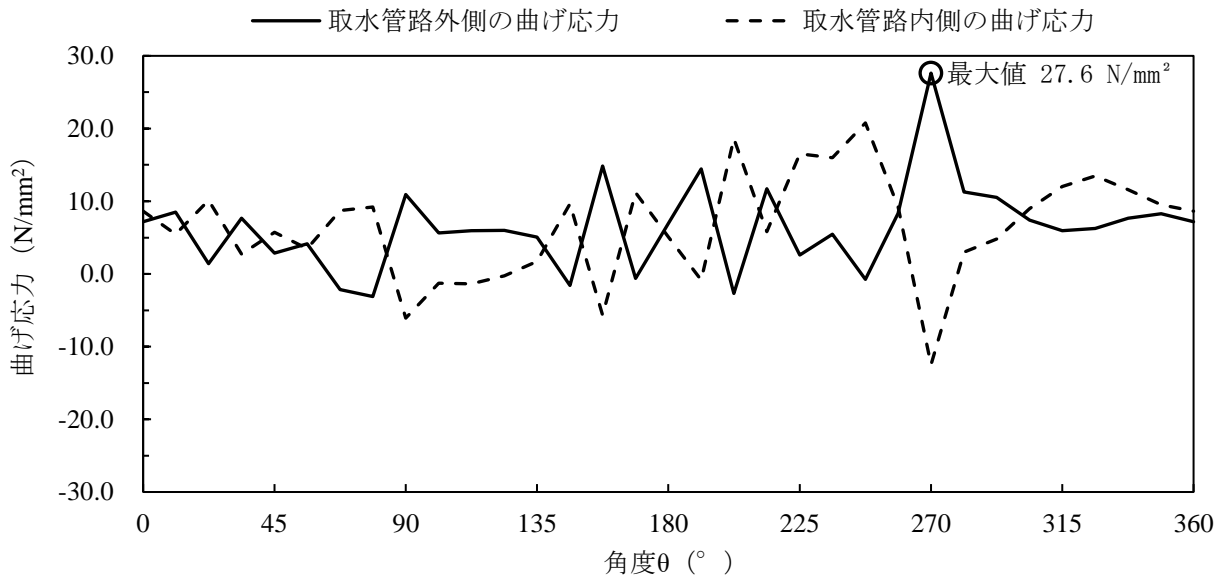


(せん断応力分布 t=15.87s)

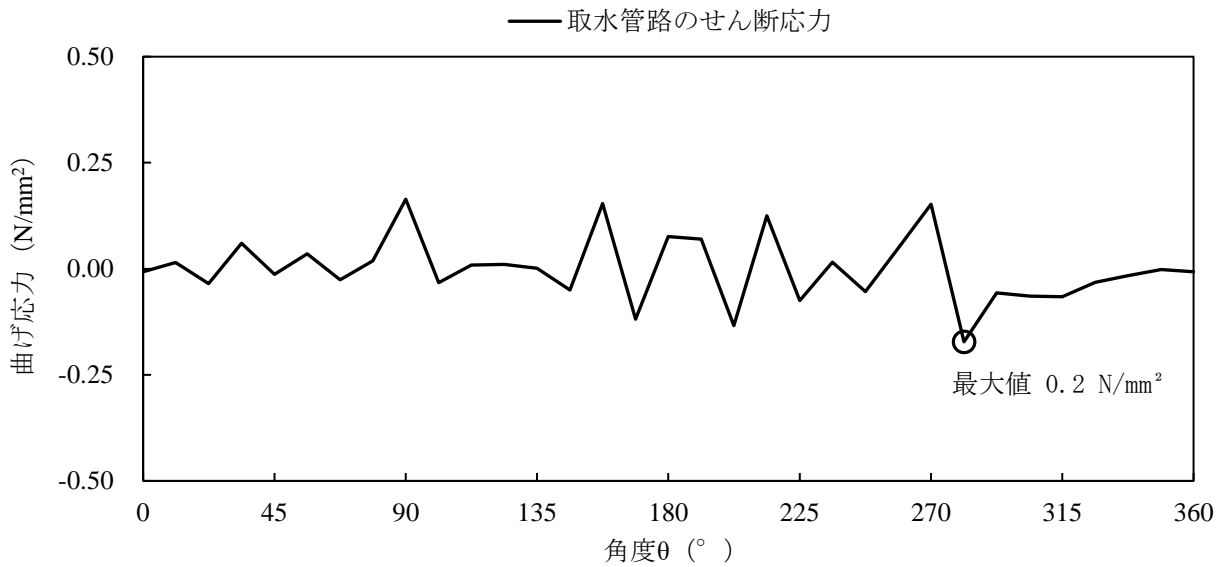
注：横軸の角度θは、管頂から反時計回りの位置を示す。最大値は絶対値で記入する。

図 3-29 取水管管周方向の応力分布図 (13/14)

(解析ケース②, S_s-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 3-30 取水管管周方向の応力分布図 (14/14)

(解析ケース③, S s - F 2 (++))

4. 管軸方向の地震応答解析

4.1 評価対象箇所

評価対象箇所は、砕石埋戻し区間とする。本地震応答解析にて求まる砕石のひずみを考慮した応力解析を、「5. 管軸方向の応力解析」にて実施する。

4.2 解析方法

取水管の地震応答解析は、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」に示す解析方法及び解析モデルを踏まえて実施する。

地震応答解析は、管軸直交方向加振及び管軸方向加振が可能な2次元動的有限要素法を用いた周波数応答解析に基づき行う。

地震応答解析については、解析コード「SuperFLUSH/2D」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。

4.2.1 地盤

取水管周辺の砕石については、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。岩盤は線形材料とする。

4.2.2 減衰定数

地盤の減衰定数は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している値を用いる。

4.3 入力地震動

入力地震動は、「3.4 入力地震動」で示した水平方向の地震動を用いる。

4.4 解析モデル及び諸元

4.4.1 解析モデル

取水管管軸方向の地震応答解析モデルを図4-1に示す。取水管管軸方向については、軸直方向及び管軸方向の地盤ひずみを評価するため、解析モデルの面内方向(管軸直交方向)及び面外方向(管軸方向)について地震応答解析を行う。

(1) 解析領域

解析領域は、側面境界及び底面境界が、砕石の応答に影響しないよう、砕石と側面境界及び底面境界との距離を十分に広く設定する。

(2) 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。

(3) 地盤のモデル化

岩盤は線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、砕石は、地盤の非線形性を考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

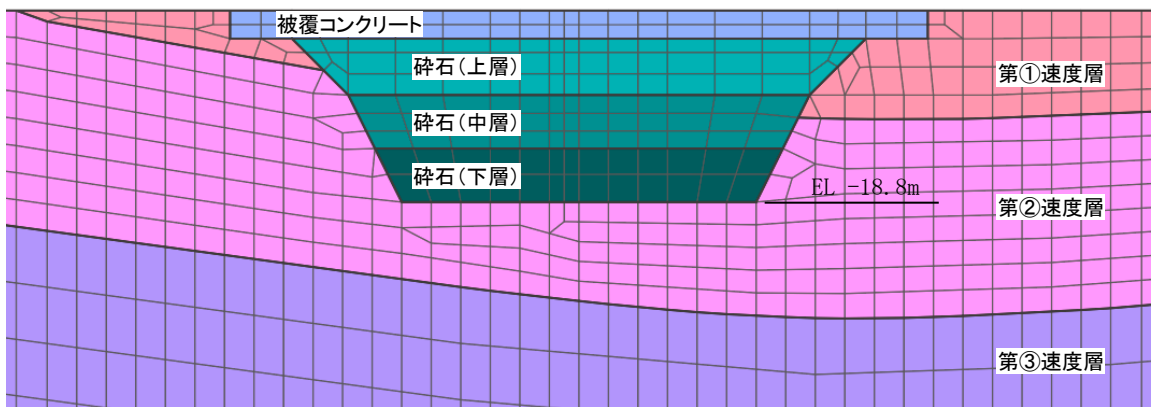
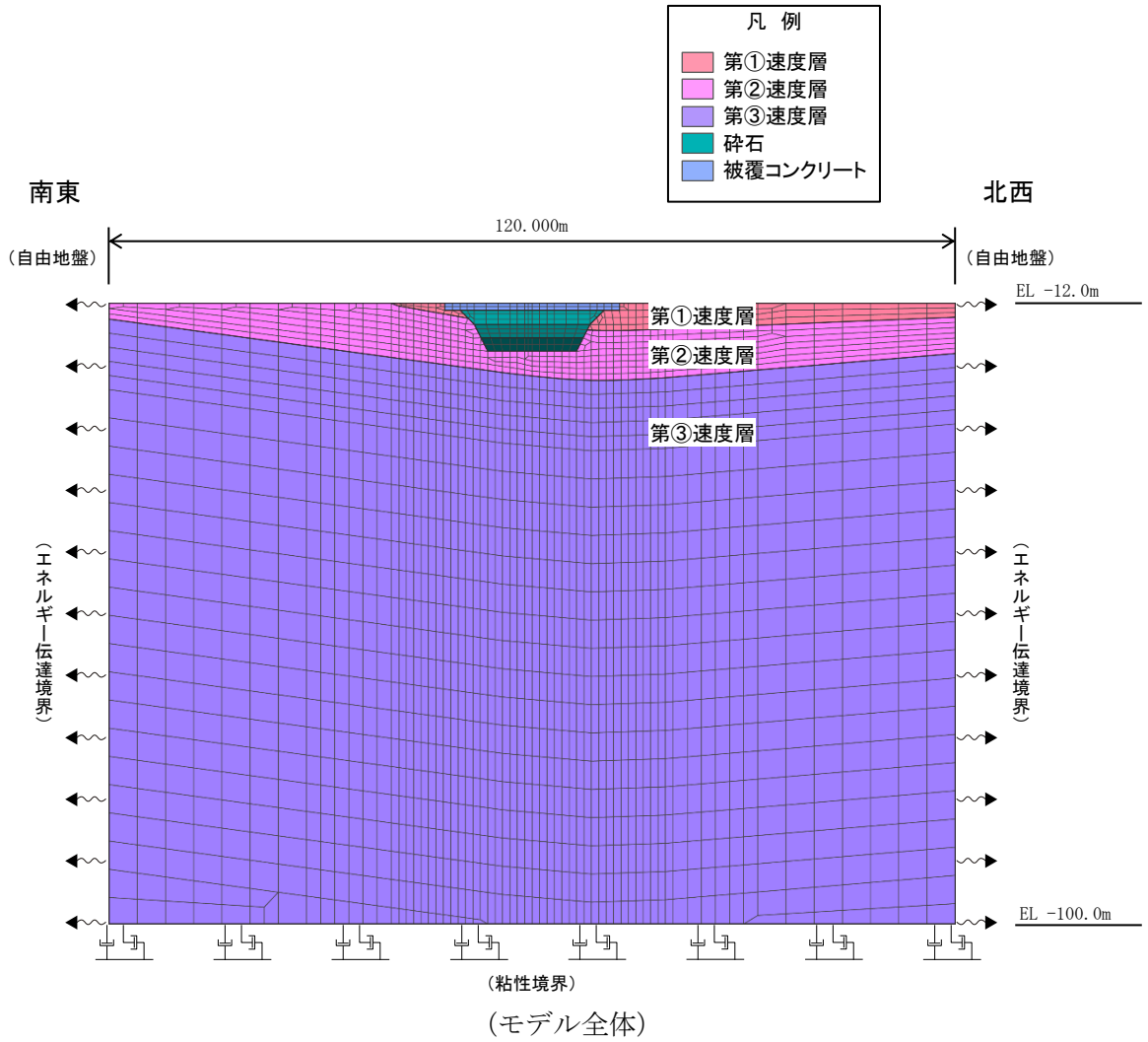


図 4-1 取水管管軸方向の地震応答解析モデル

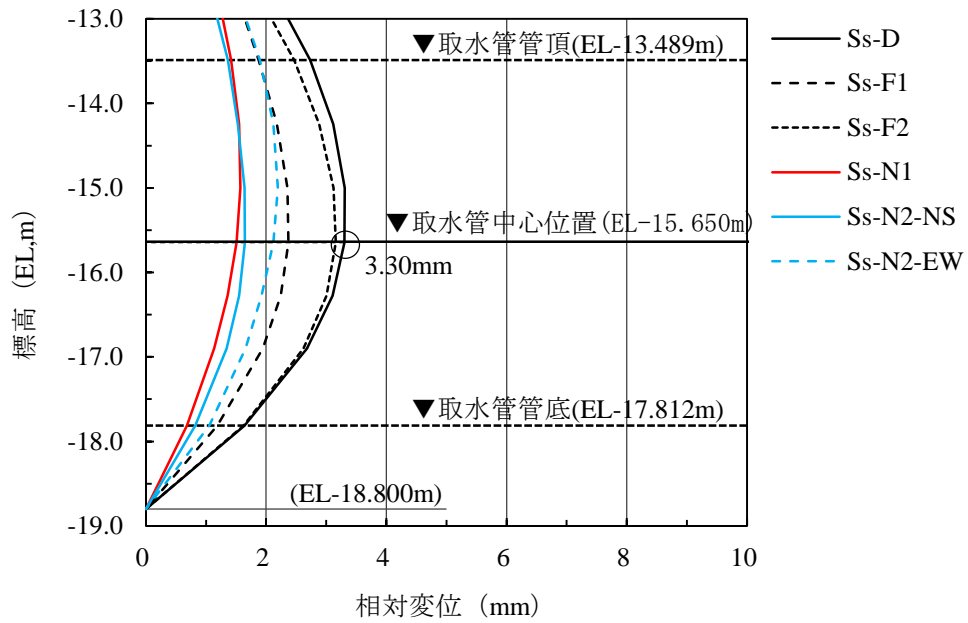
4.4.2 地盤及び砕石の物性値

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。

4.5 地震応答解析結果

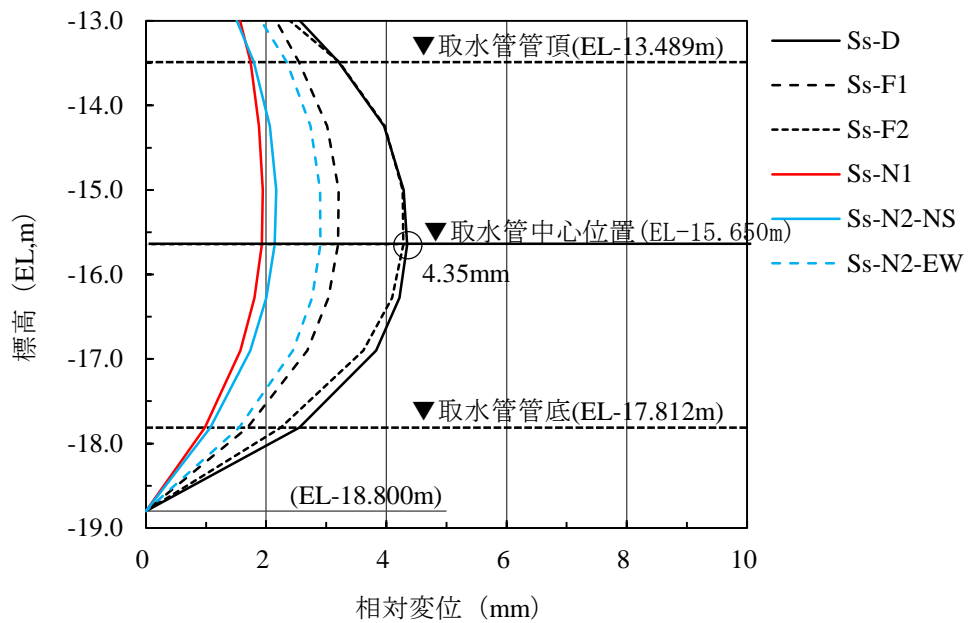
耐震評価のために用いる砕石の水平方向の最大応答変位分布図として、解析ケース①（基本ケース）について、すべての基準地震動 S_s に対する全時刻における最大応答変位分布図を図 4-2 及び図 4-3 に示す。また、解析ケース①において、応答ひずみが最大となる地震動に対しての解析ケース②及び③の最大応答変位分布図を図 4-4 及び図 4-5 に示す。

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、解析ケース①を表 4-1 に、解析ケース②，③を表 4-2 に示す。



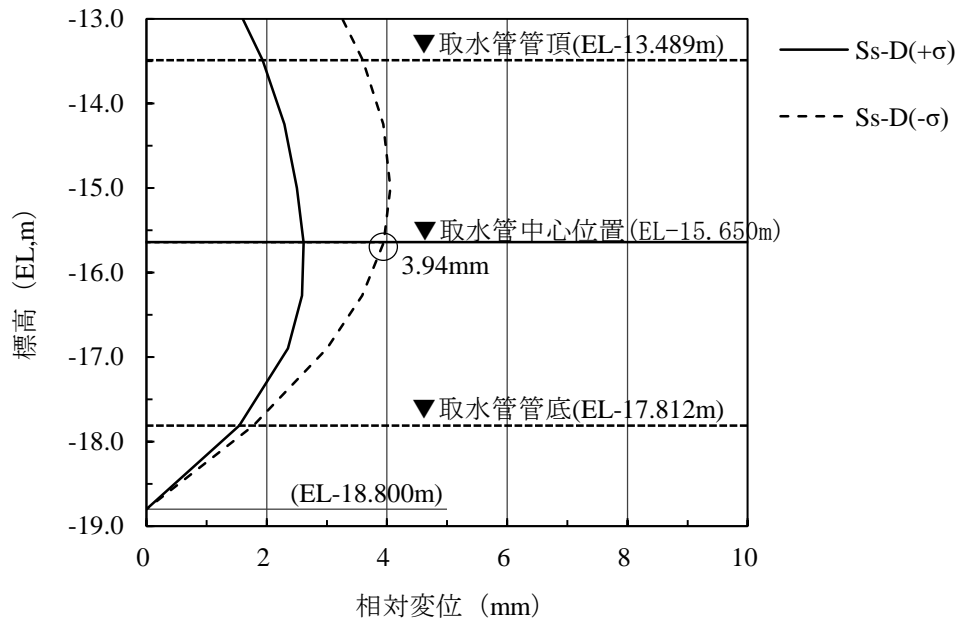
注：横軸は，砕石下端を基準とした相対変位を示す。

図 4-2 砕石の最大応答変位分布図（管軸直交方向加振）（1/4）（解析ケース①）



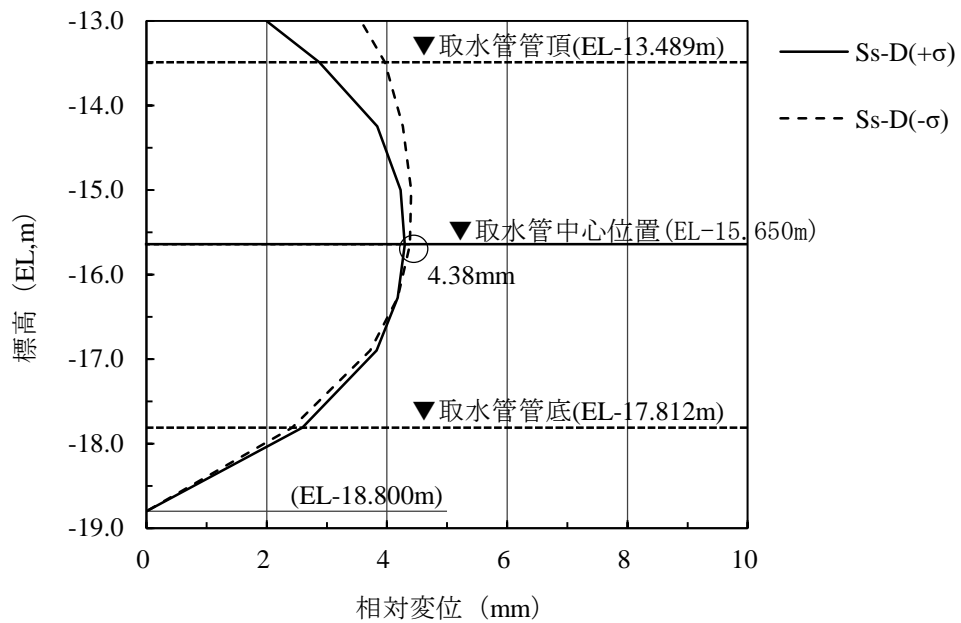
注：横軸は，砕石下端を基準とした相対変位を示す。

図 4-3 砕石の最大応答変位分布図（管軸方向加振）（2/4）（解析ケース①）



注：横軸は，砕石下端を基準とした相対変位を示す。

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



注：横軸は，砕石下端を基準とした相対変位を示す。

図 4-5 砕石の最大応答変位分布図（管軸方向加振）（4/4）（解析ケース②，③）

表 4-1 地盤の最大ひずみ (1/2) (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_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
	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_0 は、取水管中心座標高位置における変位

表 4-2 地盤の最大ひずみ (2/2) (解析ケース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最大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 評価対象箇所

評価対象箇所は、延長が長く、管軸方向の応力が大きくなる取水管Ⅱとする。

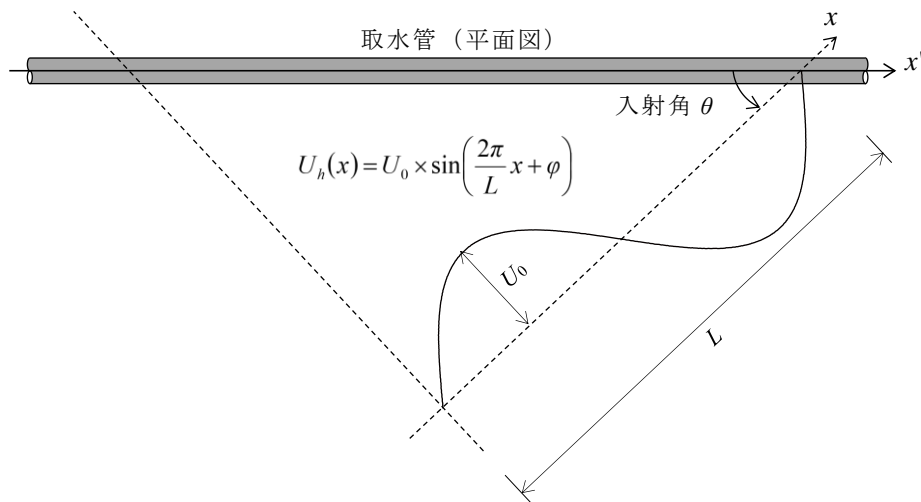
5.2 解析方法

管軸方向の応力については，砕石に生じる地盤ひずみを考慮し，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を図 5-1 に示す。

管軸方向の応力解析は，解析ケース③（S s - D）によ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)

φ : 地震動の位相 (°)

θ : 入射角 (°)

図 5-1 管軸方向の応力解析の概念図

5.2.1 地震動の入射角

地震動の入射角は、管軸方向の曲げ応力が最大となる 0° 及び軸応力が最大となる 45° を考慮する。

5.2.2 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変位を基に以下の式で求める。

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

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)
- φ : 地震動の位相 ($^\circ$) で 15° ピッチで与える

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用いる。

5.2.3 管軸方向応力の合成

管軸方向合成応力は、管軸方向の曲げ応力及び軸応力から、以下の式で求める。

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

ここで、

- σ_L : 管軸方向合成応力
- $\sigma_{A,45}$: 入射角 45° の場合の管軸方向応力 (軸応力)
- $\sigma_{B,0}$: 入射角 0° の場合の管軸方向応力 (曲げ応力)

5.3 解析モデル及び諸元

5.3.1 解析モデル

図 5-2 に、管軸方向の応力解析モデルを示す。

取水管は、線形のはり要素でモデル化し、軸方向と軸直方向に地盤ばねを設ける。

モデル端部については、取水管が取水口及び巻き立てコンクリートにて拘束されることから、固定端とし、伸縮継手が設置される箇所は、自由端とする。

地盤ばねは、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 次元有限要素法モデルにおいて、強制変位を与えた場合の地盤反力から求める。

表 5-1 に、設定した地盤ばね定数を示す。

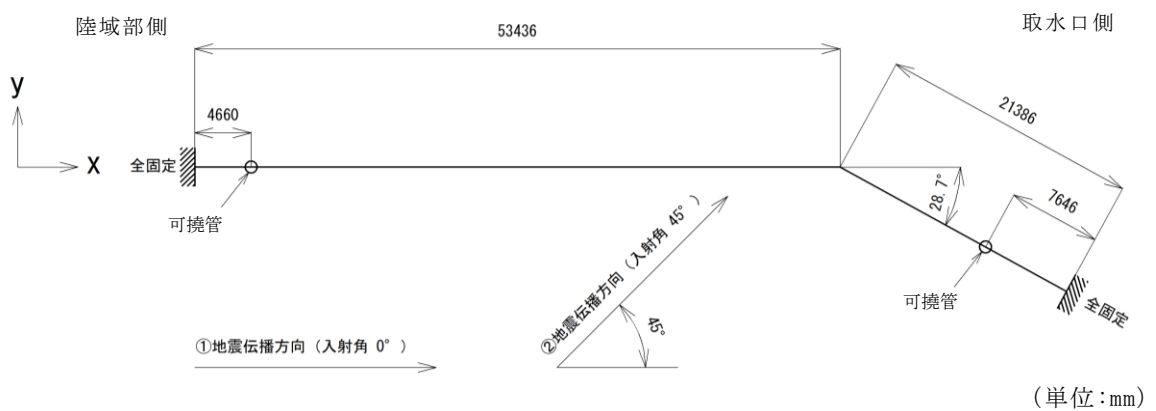


図 5-2 管軸方向の応力解析モデル

表 5-1 地盤ばね定数

地震動	地盤ばね定数(kN/m ²)	
	管軸直方向	管軸方向
S s - D	7.663×10^5	2.370×10^5

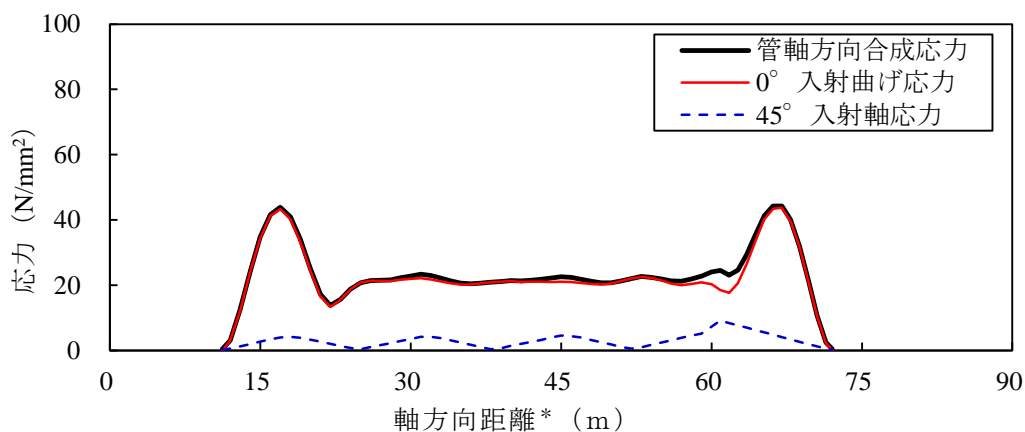
5.3.2 仕様材料及び材料定数

使用材料は、「3.5.2 使用材料及び材料の物性値」に示したものと同様とする。

5.4 応力解析結果

管軸方向の応力解析結果を図 5-3 に示す。

本図は、地震動の位相を 15° ピッチで与えた結果のうち、各要素に生じた最大応力を示している。



(0° 入射と 45° 入射の軸方向応力の合成)

注記* : 横軸は、取水口との接続部からの軸方向距離を示す。

図 5-3 管軸方向の応力解析結果 (解析ケース③, S s - D)

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^黄準-許容応力度法-（日本建築学会，2005）」に基づき，許容限界とする。

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 ²)
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，岩盤及び碎石の極限支持力とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表 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 ²)
C _M 級岩盤	9.8
碎石	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。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、

σ : 合成応力 (N/mm²)

σ_L : 管軸方向合成応力 (N/mm²)

σ_C : 管周方向曲げ応力 (N/mm²)

τ_S : 管軸方向せん断応力 (N/mm²)

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碎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 σ (N/mm ²)	許容曲げ応力度 σ_a (N/mm ²)	照査値 σ / σ_a
ケース③	S s - 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 τ (N/mm ²)	許容せん断応力度 τ_a (N/mm ²)	照査値 τ / τ_a
ケース③	S s - F 2 (++)	0.2	135	0.01

7.1.2 合成応力度による評価結果

合成応力度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度は、許容限界以下であることを確認した。

表 7-3 取水管の合成応力度による評価結果

管周方向	解析 ケース	地震動	曲げ応力度 σ_c (N/mm ²)		合成応力度*2 σ (N/mm ²)	許容応力度 σ_a (N/mm ²)	照査値 σ / σ_a
	ケース ③	S s - F 2 (++)	27.6				
管軸方向	解析 ケース	地震動	合成応力度*1 σ_L (N/mm ²)	せん断応力度 τ_s (N/mm ²)	87.8	235	0.38
	ケース ③	S s - D	44.3	35.4			

注記*1：管軸方向の検討で得られた曲げ応力と軸応力を合成した合成応力度

*2：管周方向曲げ応力 σ_c と管軸方向合成応力 σ_L と管軸方向せん断応力 τ_s を合成した合成応力度

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。

取水管の基礎地盤に作用する最大接地圧は、極限支持力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 R_d (N/mm ²)	極限支持力 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
ケース①	S s - D (--)	0.2	9.8	0.03

表 7-5 基礎地盤の支持性能評価結果（碎石）

解析 ケース	地震動	最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
ケース③	S s - F 2 (++)	0.2	0.56	0.30