

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-08 改 35
提出年月日	2023年3月23日

浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料

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。

補足説明資料目次

今回提出範囲：

1. 浸水防護施設の設計における考慮事項
 - 1.1 津波と地震の組合せで考慮する荷重
 - 1.2 自然現象を考慮する浸水防護施設の選定
 - 1.3 津波防護に関する施設の機能設計・構造強度設計に係る許容限界
 - 1.4 津波防護施設の強度計算における津波荷重，余震荷重及び漂流物衝突荷重の組合せ
 - 1.5 浸水防護施設の評価における漂流物衝突荷重，風荷重及び積雪荷重の設定
 - 1.6 津波波圧の算定に用いた規格・基準類の適用性
 - 1.7 浸水防護施設のアンカーボルトの設計
 - 1.8 津波防護施設の設計における評価対象断面の選定
 - 1.9 強度計算における津波時及び重畳時の荷重作用状況
 - 1.10 耐震及び耐津波設計における許容限界
 - 1.11 強度計算に用いた規格・基準類の適用性
 - 1.12 津波に対する止水性能を有する施設の評価

2. 浸水防護施設に関する補足資料
 - 2.1 防波壁に関する補足説明
 - 2.1.9 防波壁の設計・管理に関する補足説明
 - 2.2 防波壁通路防波扉に関する補足説明
 - 2.3 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明
 - 2.3.1 1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書に関する補足説明
 - 2.3.2 1号機取水槽流路縮小工の強度計算書に関する補足説明
 - 2.3.3 1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響
 - 2.4 浸水防止設備に関する補足説明
 - 2.5 津波監視設備に関する補足説明
 - 2.6 漂流防止装置に関する補足説明
 - 2.7 強度評価における鉛直方向荷重の考え方
 - 2.8 津波の流入防止に係る津波バウンダリとなる設備の評価

- 2. 浸水防護施設に関する補足資料
 - 2.1 防波壁に関する補足説明
 - 2.1.9 防波壁の設計・管理に関する補足説明

今回提出範囲：

目次

1. 防波壁の各部位の性能目標と許容限界	1
1.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	1
1.2 防波壁（逆T擁壁）	8
1.3 防波壁（波返重力擁壁）	15
2. 損傷モードの抽出と設計・施工上の配慮	22
2.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	22
2.2 防波壁（逆T擁壁）	25
2.3 防波壁（波返重力擁壁）	28
3. 止水性に係る検討結果	31
4. 防波壁周辺の屋外施設による波及的影響について	33
4.1 2号機放水路及び3号機放水路	34
4.2 1号機取水管	37
4.3 屋外排水路	39
5. 防波壁の保守管理について	42

5. 防波壁の保守管理について

防波壁については、津波防護施設としての機能を維持していくため、定期的な点検又は各種試験等により、部材の劣化及び変状等を把握する。また、防波壁に設置する止水目地においては、防波壁近傍に暴露試験体を設置し、暴露試験体による引張試験により、防波壁に設置する止水目地の残存引張強度を把握する。

防波壁の機能に影響を及ぼす部材の劣化及び変状等が確認される場合は、詳細調査を実施し、適切な補修等を講じる。

防波壁の点検内容及び点検頻度を表 5-1 に示す。なお、詳細は別途定める保全計画に基づくものとして保安規定及びQMS文書に示す。

また、防波壁の基準適合状態維持の観点から、漂流物調査範囲内の人工構造物（漁船を含む）の設置状況を定期的（1回/定期事業者検査）に確認することとしているため、津波防護施設である防波壁及び防波壁通路防波扉における基準適合状態を維持可能な漂流物衝突荷重の規模について、「（参考資料1）基準適合状態維持における漂流物衝突荷重の規模について」に示す。

表 5-1 防波壁の点検内容及び点検頻度

構造物	点検部材	点検内容	点検頻度
防波壁 (全般)	コンクリート	目視点検によるコンクリートの亀裂、劣化、相対変位の状態等の確認	1回/年
	止水目地	目視点検による止水目地及び暴露試験体の劣化、変状等の確認	1回/年
		暴露試験体の引張試験による引張強度の確認	1回/3年*1 (竣工後20年以降)
	防波壁	測量による防波壁の変形や沈下等の確認	1回/年
防波壁 (逆T擁壁)	グラウンドアンカ	アンカー頭部の目視点検による変位、変形、腐食等の確認	1回/年
		全数の5%を対象として、残存引張力の確認*2	1回/3年*2

注記*1：「2.1.7 止水目地の補足説明」において、耐候性試験により、耐用年数38年（平均気温30℃において、初期伸び率の残存率50%を確保）であることを踏まえ、安全側に竣工後20年以降に引張強度試験を実施する。

*2：「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説（（社）地盤工学会、2012年）」に準拠

1. 概要

津波防護施設の強度評価における漂流物衝突荷重は、「NS2-補-018-02 津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料」の「4.5 漂流物による衝突荷重」により、総トン数19トン船舶における衝突解析から算定している。「NS2-補-018-02 津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料」の「4.2 漂流物による影響確認」では、漂流物調査範囲内の人工構造物（漁船を含む）については、基準適合状態維持の観点から、設置状況を定期的（1回/定期事業者検査）に確認することとしているため、津波防護施設である防波壁及び防波壁通路防波扉において、基準適合状態を維持可能な漂流物衝突荷重の規模の検討を行う。

2. 評価方法

2.1 検討対象構造物の選定

本検討では総トン数19トン船舶より大きな船舶を対象とし、防波壁及び防波壁通路防波扉の最大照査値が1.0となる漂流物衝突荷重の規模を確認する。

検討対象構造物として、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）、防波壁（逆T擁壁）及び防波壁（波返重力擁壁）を選定する。また、防波壁通路防波扉（荷揚場南，3号機東側）は漂流物対策工により漁船等の漂流物が直接衝突しない構造であることから、防波壁通路防波扉（荷揚場南，3号機東側）に設置する漂流物対策工を選定する。なお、防波壁通路防波扉（1号機北側，2号機北側）は、防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な箇所を設置するため、船舶は衝突しないことから、本検討の対象外とした。

「2.1 防波壁に関する補足説明」及び「2.2 防波壁通路防波扉に関する補足説明」より、総トン数19トン船舶衝突時における防波壁及び防波壁通路防波扉の最大照査値を表2.1-1～表2.1-4に示す。本検討では、表2.1-1～表2.1-4に示す最も厳しい照査結果となる部位を対象とする。

表 2.1-1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の最大照査値

対象部位	施設						地盤	
	鋼管杭		被覆コンクリート壁			漂流物対策工（鉄筋コンクリート版）	改良地盤	岩盤
評価項目	曲げ	せん断	曲げ	引張	せん断	押抜きせん断	すべり	支持力
評価位置又は評価部位	単管	単管	—	—	—	—	改良地盤⑤	—
評価断面	③-③断面	③-③断面	④-④断面	④-④断面	④-④断面	—	③-③断面	④-④断面
最大照査値*1	0.45	0.10	0.16	0.37	0.67	0.53*2	0.47	0.16

注記*1：赤枠は防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における最大照査値を示す。

*2：漂流物対策工（鉄筋コンクリート版）の端部に漂流物が衝突した場合

表 2.1-2(1) 防波壁（逆T擁壁）の最大照査値

対象部位	施設						グラウンドアンカー
	逆T擁壁						
評価項目	曲げ	引張	せん断	グラウンドアンカーによる支圧	滑動	転倒	発生アンカー力
評価断面	⑤-⑤断面	⑤-⑤断面	⑤-⑤断面	⑤-⑤断面	④-④断面	④-④断面	①-①断面
最大照査値*1	0.23	0.39	0.53	0.65	0.70	0.29	0.83*2

注記*1：赤枠は防波壁（逆T擁壁）における最大照査値を示す。

*2：発生アンカー力は、初期緊張力（設計アンカー力）に津波時の緊張力増分を加えたものである。許容アンカー力に占める初期緊張力の割合が0.8程度となるように設計しており、津波時の緊張力増分は微小と考えられることから、検討対象外とした。

表 2.1-2(2) 防波壁（逆T擁壁）の最大照査値

対象部位	施設				地盤		
	漂流物対策工（鉄筋コンクリート版）	漂流物対策工（鋼材）			改良地盤	改良地盤	岩盤
評価項目	押抜きせん断	曲げ	曲げ	引張	すべり	支持力	支持力
評価位置又は評価部位	—	鋼板	補強鋼材	アンカーボルト	—	—	—
評価断面	—	—	—	—	①-①断面	④-④断面 ⑤-⑤断面	⑤-⑤断面
最大照査値	0.53*	0.57	0.64	0.42	0.13	0.29	0.11

注記*：漂流物対策工（鉄筋コンクリート版）の端部に漂流物が衝突した場合

表 2.1-3(1) 防波壁（波返重力擁壁）の最大照査値

対象部位	施設						
	重力擁壁			ケーソン			
評価項目	曲げ	引張	せん断	曲げ	引張	せん断 (面外)	せん断 (面内)
評価位置又は 評価部位	—	—	—	隔壁	隔壁	底版① 底版②	側壁① 側壁②
評価断面	⑤-⑤ 断面	⑤-⑤ 断面	②-② 断面	③-③ 断面	③-③ 断面	③-③ 断面	③-③ 断面
最大照査値* ¹	0.27	0.47	0.64	0.42	0.62	0.61 (1.76)* ²	0.54

注記*1：赤枠は防波壁（波返重力擁壁）における最大照査値を示す。

*2：括弧内（ ）は応力度平均化前の値を示す。

表 2.1-3(2) 防波壁（波返重力擁壁）の最大照査値

対象部位	施設			地盤			
	H形鋼	漂流物対策工 (鉄筋コンクリート版)	MMR	改良地盤⑥	MMR	改良地盤 ⑥	岩盤
評価項目	せん断	押抜きせん断	すべり	すべり	支持力	支持力	支持力
評価断面	⑤-⑤ 断面	—	④-④ 断面	②-②断面	②-② 断面	②-② 断面	⑤-⑤ 断面
最大照査値	0.55	0.53*	0.02	0.04	0.04	0.08	0.16

注記*：漂流物対策工（鉄筋コンクリート版）の端部に漂流物が衝突した場合

表 2.1-4(1) 防波壁通路防波扉（荷揚場南）に設置する漂流物対策工の最大照査値

対象部位	施設						地盤			
	鋼製扉体 戸当り (コンクリート)*	戸当り（RC支柱）			基礎スラブ			MMR	改良 地盤	岩盤
評価項目	せん断	曲げ	引張	せん断	曲げ	引張	せん断	支持力	支持力	支持力
最大照査値	0.55	0.09	0.17	0.47	0.06	0.17	0.28	0.03	0.17	0.07

注記*：漂流物対策工（鋼製扉体）の中で最も厳しい照査結果の部材を示す。

表 2.1-4(2) 防波壁通路防波扉（3号機東側）に設置する漂流物対策工の最大照査値

対象部位	施設						地盤			
	鋼製扉体 戸当り (コンクリート)* ²	戸当り（RC支柱）			基礎スラブ			MMR	改良 地盤	岩盤
評価項目	せん断	曲げ	引張	せん断	曲げ	引張	せん断	支持力	支持力	支持力
最大照査値* ¹	0.87	0.07	0.12	0.53	0.09	0.24	0.32	0.04	0.21	0.08

注記*1：赤枠は防波壁通路防波扉に設置する漂流物対策工における最大照査値を示す。

*2：漂流物対策工（鋼製扉体）の中で最も厳しい照査結果の部材を示す。

2.2 評価方法

総トン数 19 トン船舶衝突時における防波壁及び防波壁通路防波扉の最大照査値を踏まえ、照査値が 1.0 となる漂流物衝突荷重を算定する。

防波壁及び防波壁通路防波扉の強度評価は、おおむね弾性範囲内に収まっていることから照査結果を線形補間でき、また最大照査値となる評価項目は表 2.1-1～表 2.1-4 のとおり、せん断又は滑動であることから水平荷重が大きく寄与するため、水平荷重のうち主たる遡上津波荷重及び漂流物衝突荷重に着目する。遡上津波荷重は変わらないものとして、「2.1 防波壁における補足説明」及び「2.2 防波壁通路防波扉における補足説明」で用いた水平荷重①（総トン数 19 トン船舶による漂流物衝突荷重＋遡上津波荷重）及び最大照査値より、照査値が 1.0 となる水平荷重②を算定し、遡上津波荷重を減ずることで、照査値が 1.0 となる漂流物衝突荷重（以下「漂流物衝突荷重（限界値）」という。）を算定する。漂流物衝突荷重（限界値）の算定イメージを図 2.2-1 に示す。また、本検討で考慮する漂流物衝突荷重及び遡上津波荷重を図 2.2-2 に示す。

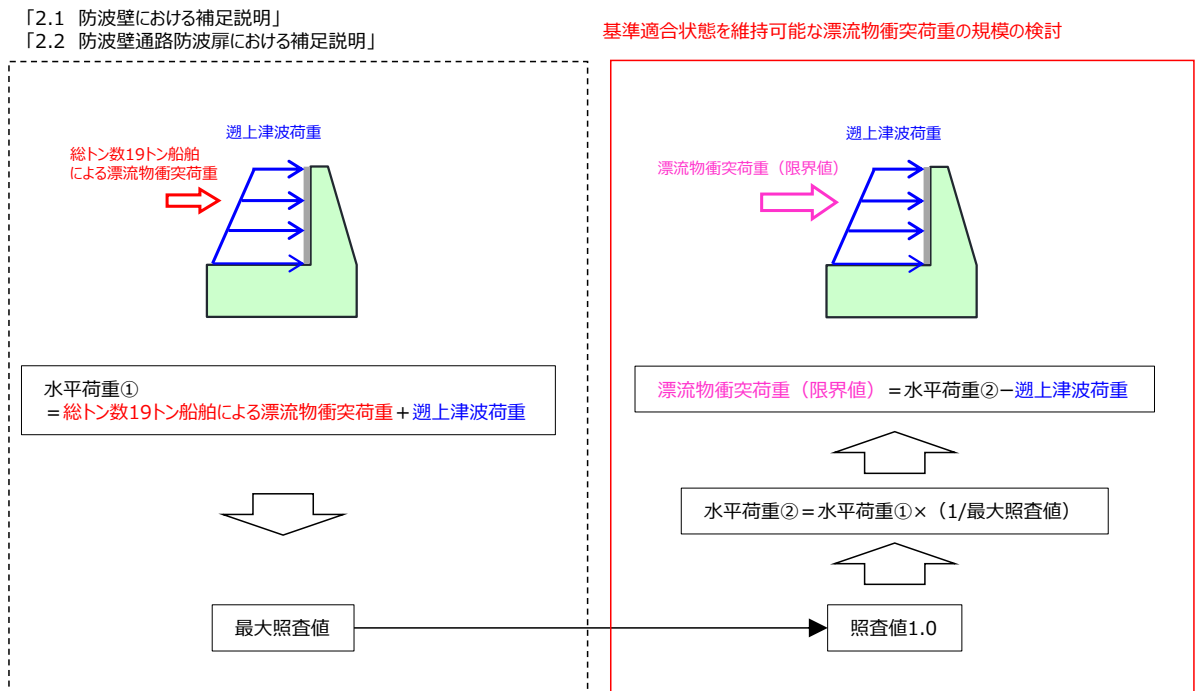
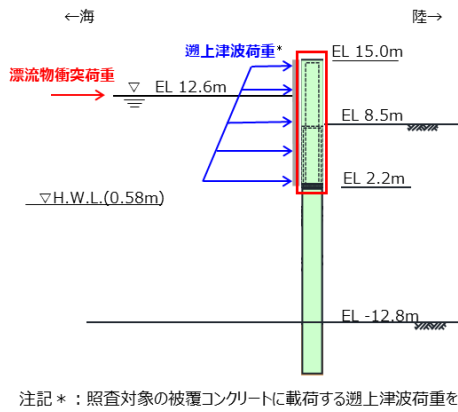
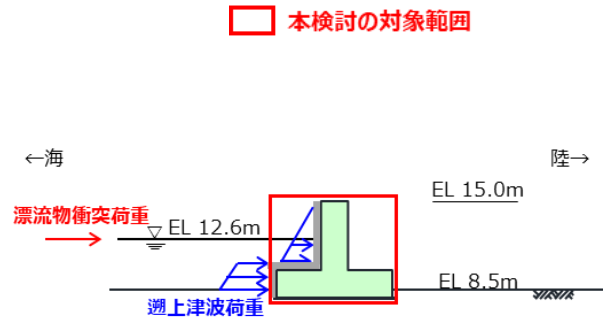


図 2.2-1 漂流物衝突荷重（限界値）の算定イメージ

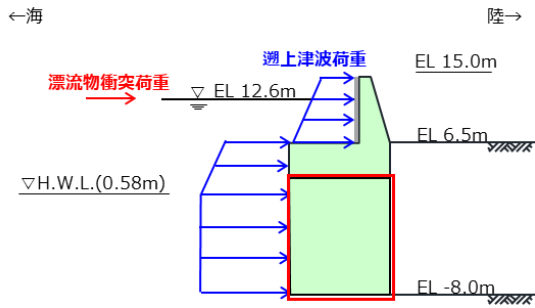


注記*：照査対象の被覆コンクリートに載荷する遡上津波荷重を考慮

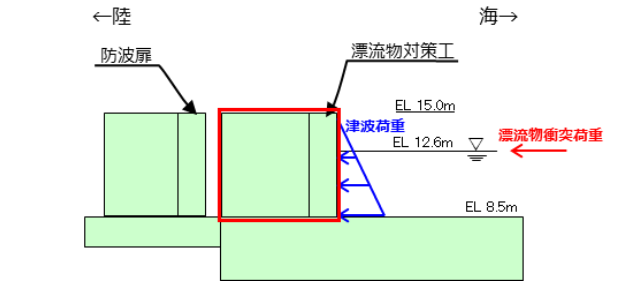
防波壁（多重鋼管杭式擁壁）



防波壁（逆T擁壁）



防波壁（波返重力擁壁）



防波壁通路防波扉に設置する漂流物対策工

図 2.2-2 本検討で考慮する漂流物衝突荷重及び遡上津波荷重

2.3 評価結果

防波壁及び防波壁通路防波扉に作用する水平荷重及び漂流物衝突荷重（限界値）を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 より、漂流物衝突荷重（限界値）は、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）において約 28764kN、防波壁（逆 T 擁壁）において約 10681kN、防波壁（波返重力擁壁）において約 36748kN となることを確認した。また、防波壁通路防波扉に設置される漂流物対策工において約 6581kN となることを確認した。

表 2.3-1 防波壁及び防波壁通路防波扉に作用する荷重及び漂流物衝突荷重（限界値）

防波壁	防波壁（多重鋼管杭式擁壁） （④-④断面）	防波壁（逆 T 擁壁） （④-④断面）	防波壁（波返重力擁壁） （③-③断面）	防波壁通路防波扉に設置する漂流物対策工
ブロック延長(m)	37.782	16.000	17.000	11.100
(1) 総トン数 19 トン船舶の漂流物衝突荷重(kN)	7440	6560	7650	5450
(2) 遡上津波荷重(kN) *1	35855	3056	37863	2120
水平荷重① (1) + (2)	43295	9616	45513	7570
最大照査値	0.67	0.70	0.61	0.87
(3) 水平荷重② *2	64619	13737	74612	8701
(4) 漂流物衝突荷重(限界値) (3) - (2)	28764	10681	36748	6581
比率 (4)/(1)	3.86	1.62	4.80	1.20

注記*1：ブロック延長に作用する遡上津波荷重を算定

*2：水平荷重② = 水平荷重① × (1/最大照査値) より算出

3. まとめ

漂流物衝突荷重について、防波壁及び防波壁通路防波扉がどの程度の規模の漂流物衝突荷重に対して基準適合状態を維持することが可能かを確認した。

その結果、漂流物衝突荷重（限界値）は、防波壁では約 10681kN（総トン数 19 トン船舶の漂流物衝突荷重の約 1.62 倍）、防波壁通路防波扉に設置する漂流物対策工は約 6581kN（総トン数 19 トン船舶の漂流物衝突荷重の約 1.20 倍）となることを確認した。

なお、今後定期事業者検査において、総トン数 19 トン船舶より大きな船舶が確認された場合は、詳細検討により基準適合状態を維持できているか確認する。

2. 浸水防護施設に関する補足資料

2.3 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明

2.3.1 1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書に関する補足説明

目次

1. 概要	1
2. 位置	2
3. 流路縮小工の耐震評価	5
3.1 構造計画	5
3.2 評価方針	7
3.3 適用規格・基準等	9
3.4 記号の説明	10
3.5 評価対象部位	14
3.6 固有値解析	18
3.7 荷重及び荷重の組合せ	19
3.8 許容限界	30
3.9 評価方法及び評価条件	31
3.10 評価結果	55
4. 北側壁の耐震評価	56
4.1 概要	56
4.2 評価条件	56
4.3 地震応答解析	76
4.4 評価内容	106
4.5 評価結果	127

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、津波防護施設のうち1号機取水槽流路縮小工（以下「流路縮小工」という。）及びその間接支持構造物である1号機取水槽北側壁が設計用地震力に対して、主要な構造部材が十分な構造強度を有することを確認するものである。

流路縮小工及び1号機取水槽北側壁に要求される機能維持の確認は、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価により行う。

2. 位置

流路縮小工は、1号機取水槽と1号機取水管の境界部に設置し、1号機取水槽北側壁に間接支持される構造とする。

流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の設置位置図を図2-1に、流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の詳細位置図を図2-2に、流路縮小工の詳細図を図2-3に示す。

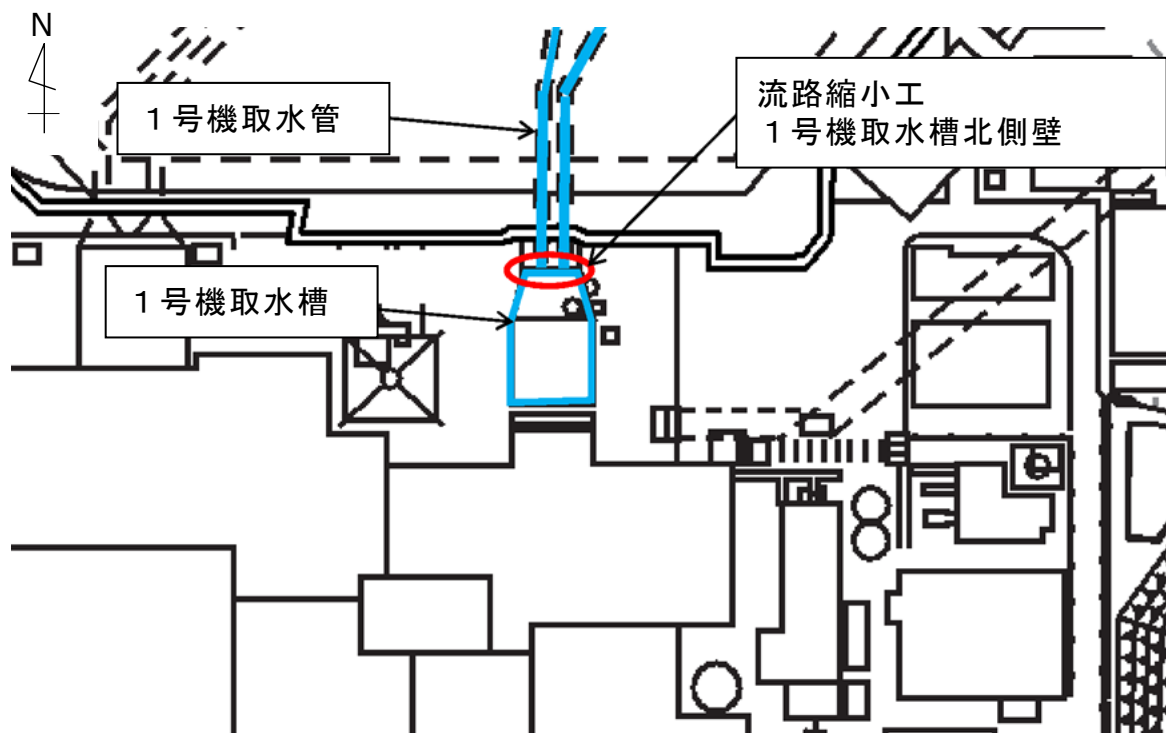
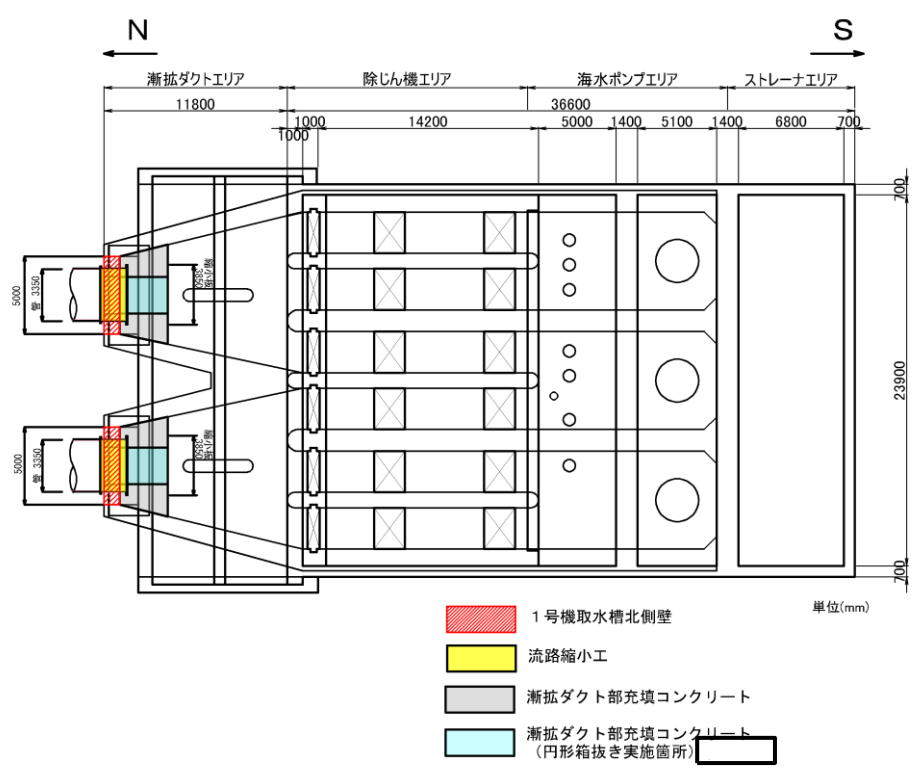
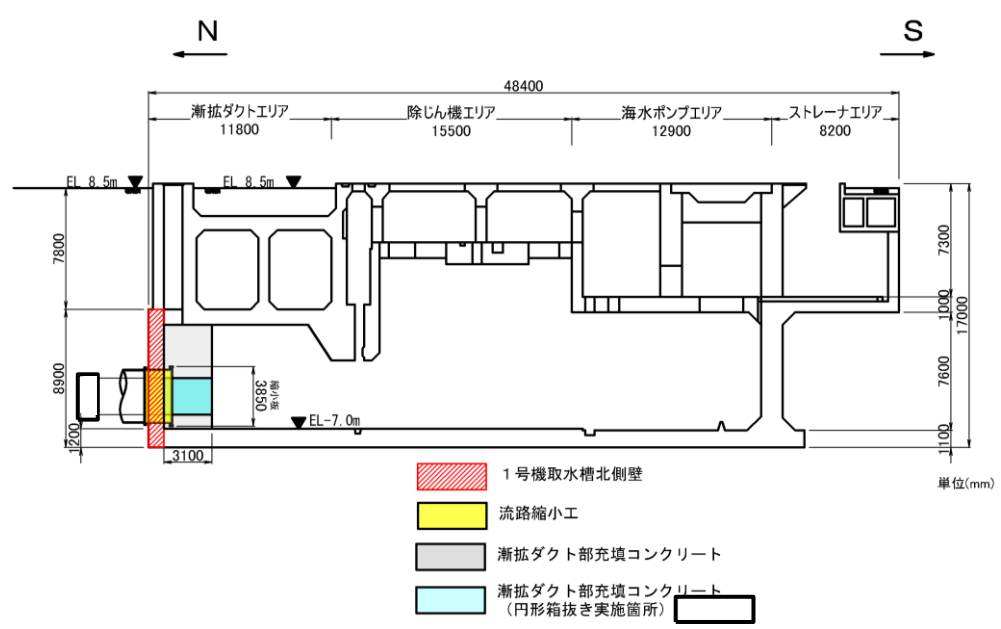


図2-1 流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の設置位置図

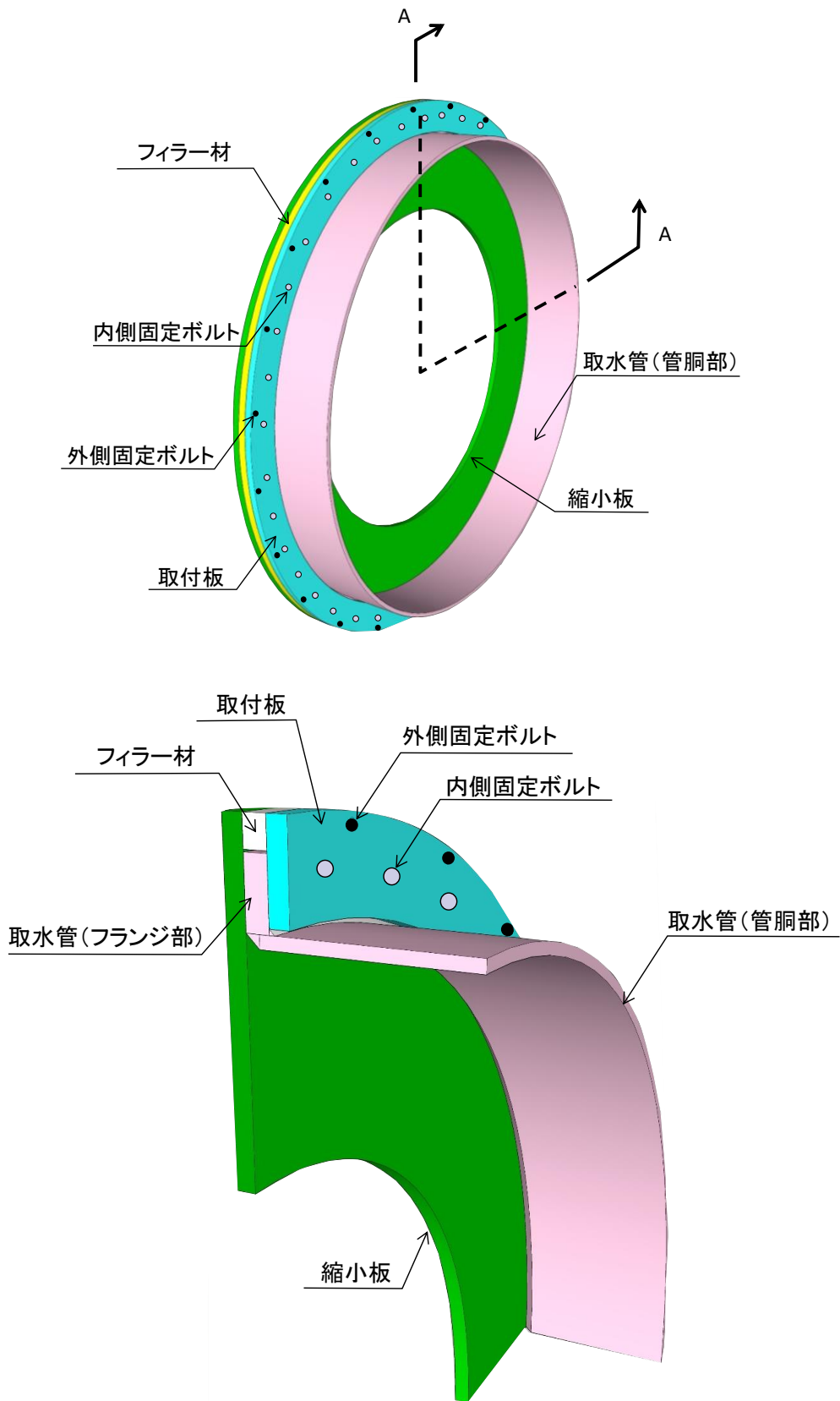


平面図



縦断図

図 2-2 流路縮小工及び 1 号機取水槽北側壁の詳細位置図



(A-A断面)

図 2-3 流路縮小工の詳細図

2.3.1-4

3. 流路縮小工の耐震評価

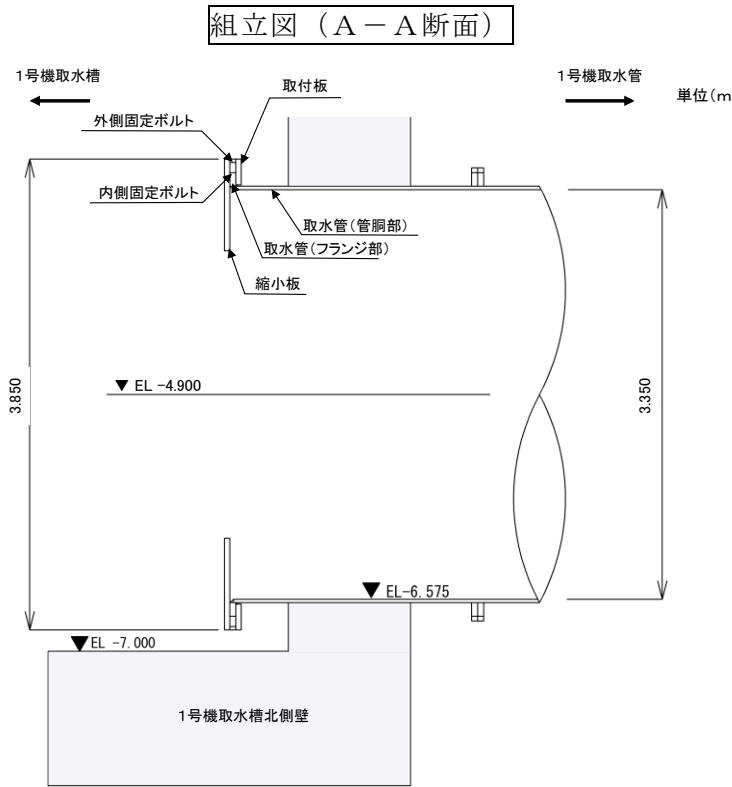
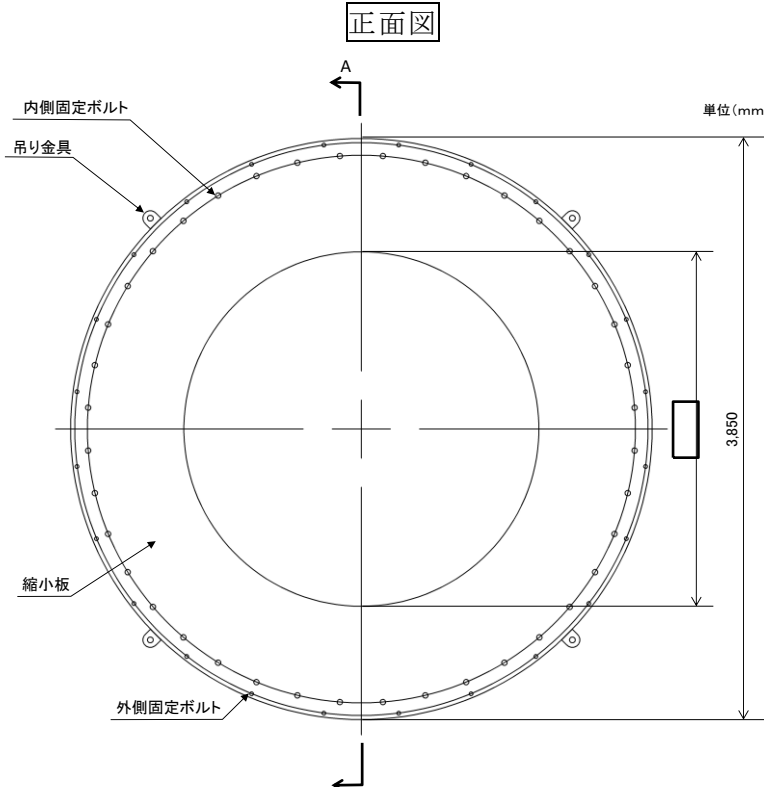
3.1 構造計画

流路縮小工は、1号機取水管からの津波の流入を抑制し、1号機取水槽から津波が溢水することを防止するため、1号機取水管の流路を鋼製の縮小板により縮小するものである。流路縮小工は、1号機取水管の終端部のフランジ（以下「取水管（フランジ部）」という。）に、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する構造とする。よって、流路縮小工は、1号機取水管の管胴部（以下「取水管（管胴部）」という。）、取水管（フランジ部）、縮小板、取付板及び固定ボルトから構成される。なお、1号機の原子炉補機海水ポンプに必要な海水を取水するため、縮小板に直径 m の開口部を設ける。

1号機取水槽は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。これにより、流路縮小工を構成する部材については、縮小板及び取水管（管胴部）を除いてコンクリートに被覆される。縮小板及び取水管（管胴部）については、コンクリートを充填することから、定期的な維持管理が不要となるよう、設計上の配慮として、余裕厚を有する構造とする。

流路縮小工の構造計画を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 流路縮小工の構造計画

計画の概要		構造概略図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>取水管（フランジ部）に、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する。</p>	<p>縮小板，取付板及び固定ボルトにより構成する。</p>	<p>組立図（A-A断面）</p>  <p>正面図</p> 

3.2 評価方針

流路縮小工は、Sクラス施設である津波防護施設に分類される。

1号機取水槽は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。これにより、流路縮小工の大部分はコンクリートに拘束されるため、剛構造であると考えられるが、保守的にコンクリートによる拘束は期待しない方針とする。

流路縮小工の耐震評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3.1 構造計画」に示す流路縮小工の構造を踏まえ、「3.5 評価対象部位」にて設定する評価部位において、「3.6 固有値解析」で算出した固有振動数に基づく設計用地震力により算出した応力度が許容限界内に収まることを、「3.9 評価方法及び評価条件」に示す方法にて確認する。応力評価の確認結果を「3.10 評価結果」にて確認する。

流路縮小工の評価項目を表3.2-1に、耐震評価フローを図3.2-1に、1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図を図3.2-2に示す。

表 3.2-1 流路縮小工の評価項目

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	縮小板	曲げ軸力,せん断力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		固定ボルト	引張力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		取水管(フランジ部)	曲げ軸力,せん断力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		取水管(管胴部)	曲げ軸力,せん断力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度

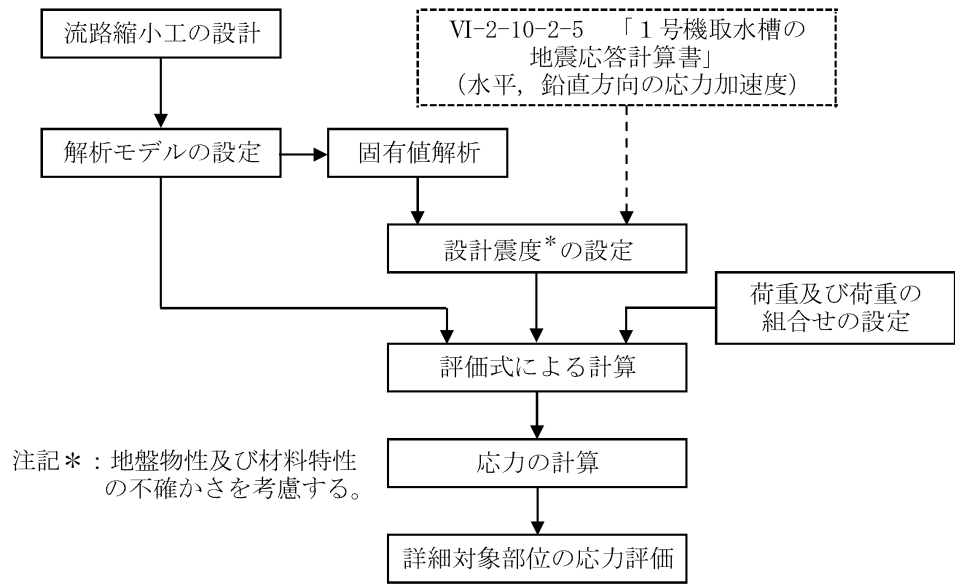
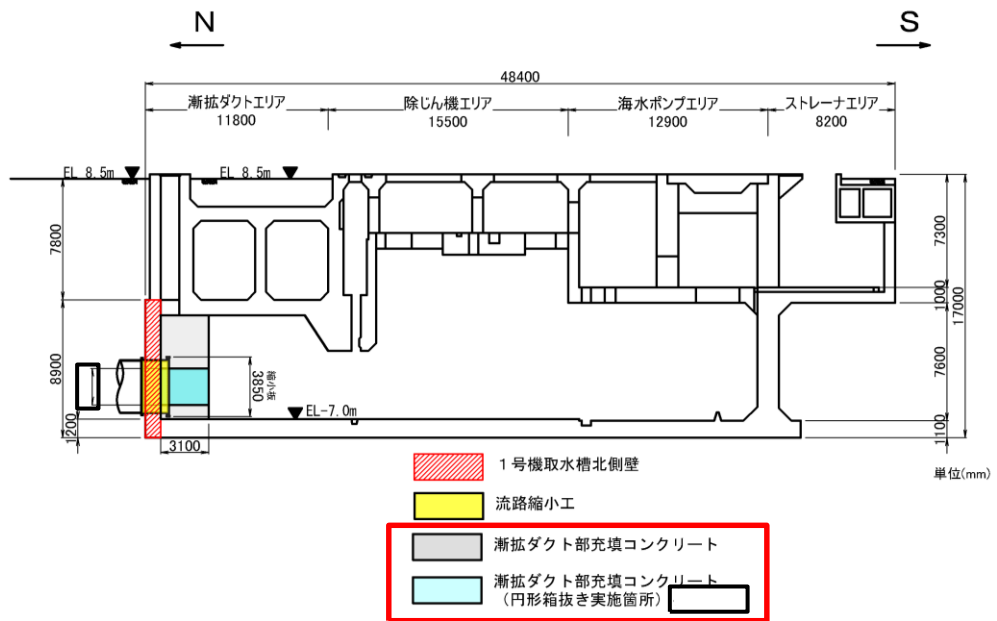


図 3.2-1 耐震評価フロー



流路縮小工は充填コンクリートを期待せずに耐震評価を行う。

図 3.2-2 1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図

3.3 適用規格・基準等

適用する規格・基準類を以下に示す。また、各項目で適用する規格，基準類を表 3.3-1 に示す。

- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）
- ・鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005年改訂）
- ・鋼構造許容応力度設計規準（（社）日本建築学会，2019年制定）
- ・J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質－強度区分を規定したボルト，小ねじ及び植込みボルト－並目ねじ及び細目ねじ
- ・構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）

表 3.3-1 各項目で適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
荷重及び荷重の組合せ	港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）	流路縮小工に作用する荷重のうち抗力の算定
	水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編（（社）水門鉄管協会，2007年）	流路縮小工に作用する荷重のうち摩擦による推力の算定
許容限界	鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005年改訂）	曲げ・軸力照査及びせん断力照査は，発生応力度が短期許容応力度以下であることを確認
	鋼構造許容応力度設計規準（（社）日本建築学会，2019年制定）	
	J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質－強度区分を規定したボルト，小ねじ及び植込みボルト－並目ねじ及び細目ねじ	
評価方法	構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）	流路縮小工に生じる曲げ応力度及びせん断応力度の算定
地震応答解析	原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（（社）日本電気協会）	有限要素法による二次元モデルを用いた時刻歴非線形解析
	原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（（社）土木学会，2005年）	

3.4 記号の説明

流路縮小工の耐震評価に用いる記号を表 3.4-1～5 にそれぞれ示す。

表 3.4-1 流路縮小工の固有振動数の計算に用いる記号

記号	単位	定義
f	Hz	固有振動数
L	mm	はりの長さ
E	N/mm ²	ヤング係数
I	mm ⁴	断面 2 次モーメント
m	kg/mm	質量分布

表 3.4-2 流路縮小工の縮小板の耐震計算に用いる記号

記号	単位	定義
p ₀	kN/mm ²	縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重
P	kN	縮小板に作用する地震時荷重
A ₁₁	mm ²	縮小板の作用面積
a ₁	mm	縮小板の外半径
b ₁	mm	縮小板の内半径
M _{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
M _{θ1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
ν	—	ポアソン比
r ₁	mm	縮小板の中心から半径方向の距離
κ ₁	—	係数(= $\beta_1^2 \{ (1-\nu) \beta_1^2 + (1+\nu) (1+4\beta_1^2 \ln \beta_1) \} / \{ 1-\nu + (1+\nu) \beta_1^2 \}$)
β ₁	—	係数(= b ₁ /a ₁)
ρ ₁	—	係数(= r ₁ /a ₁)
σ ₁	N/mm ²	縮小板に生じる最大曲げ応力度
Z ₁	mm ³	縮小板の断面係数
t ₁	mm	縮小板の板厚
τ ₁	N/mm ²	縮小板に生じる最大せん断応力度
S ₁	kN	縮小板に作用するせん断力
A ₁₂	mm ²	縮小板の有効せん断面積

表 3.4-3 流路縮小工の固定ボルトの耐震計算に用いる記号

記号	単位	定義
T	kN/本	内側固定ボルトに作用する引張力
T_1	kN/本	縮小板に発生する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力
T_2	kN/本	縮小板に発生する曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する引張力
P	kN	内側固定ボルトに作用する地震時荷重
n	本	内側固定ボルトの本数
M	kN・mm/mm	縮小板に生じる曲げモーメント合力
D_1	mm	フランジ外径
l_1	mm	支点間距離
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積
σ_b	N/mm ²	内側固定ボルトに生じる最大応力度

表 3.4-4 流路縮小工の取水管（フランジ部）の耐震計算に用いる記号

記号	単位	定義
P'	kN/mm	取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重
L_f	mm	取水管（フランジ部）の外周長
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径
M_{rf}	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta f}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径
ν	—	ポアソン比
κ_f	—	係数(= $\beta_f^2 \{1+(1+\nu) \ln \beta_f\} / \{1-\nu+(1+\nu) \beta_f^2\}$)
β_f	—	係数(= b_f/a_f)
ρ_f	—	係数(= r_f/a_f)
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離
σ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度
Z_f	mm ³	取水管（フランジ部）の断面係数
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚
τ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度
S_f	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力
A_3	mm ²	取水管（フランジ部）付け根の断面積
D_i	mm	取水管（フランジ部）の管内径
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚
l_f	mm	取水管（フランジ部）付け根の周長

表 3.4-5 流路縮小工の取水管（管胴部）の耐震計算に用いる記号

記号	単位	定義
σ_d	N/mm ²	取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度
σ_{dh}	N/mm ²	取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度
σ_{dv}	N/mm ²	取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度
σ_t	N/mm ²	縮小板に作用する地震時荷重により取水管（管胴部）に生じる最大引張応力度
σ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントにより取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度
M_{dh}	kN・mm/mm	取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント
M_{dv}	kN・mm/mm	取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント
W_1	kN	取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）
P_1	kN	取水管（管胴部）に作用する地震時荷重
L_d	mm	取水管（管胴部）の張り出し長さ
P_2	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重
L_f	N	取水管（フランジ部）の外周長
Z_d	mm ³	取水管（管胴部）の断面係数
a_1	mm	1号機取水管の外径
b_1	mm	1号機取水管の内径
P_3	kN	縮小板に作用する地震時荷重
A	mm ²	取水管（管胴部）の作用面積
τ_d	N/mm ²	取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度
S_{dv}	kN	取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じるせん断力
S_{dh}	kN	取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じるせん断力
	kN	取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）
A_5	mm ²	取水管（管胴部）の有効せん断面積
D_i	mm	取水管（管胴部）の管内径
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚

3.5 評価対象部位

流路縮小工の評価対象部位は、「3.1 構造計画」に設定している構造を踏まえて、地震に伴う荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、縮小板、固定ボルト、取水管（フランジ部）及び取水管（管胴部）とする。

なお、縮小板と取付板は固定ボルトにより強固に固定された一体構造であるとともに、縮小板と取付板は同様の材質及び厚さであることから、荷重が直接作用する縮小板を代表として評価する。

固定ボルトは内側固定ボルト及び外側固定ボルトにより構成され、それぞれの固定ボルトが引張力を負担するが、内側固定ボルトと外側固定ボルトの位置が半径方向で異なることから、内側固定ボルトのみにより引張力を負担するものとして、保守的に耐震評価を実施する。

評価対象部位を図 3.5-1 に示す。

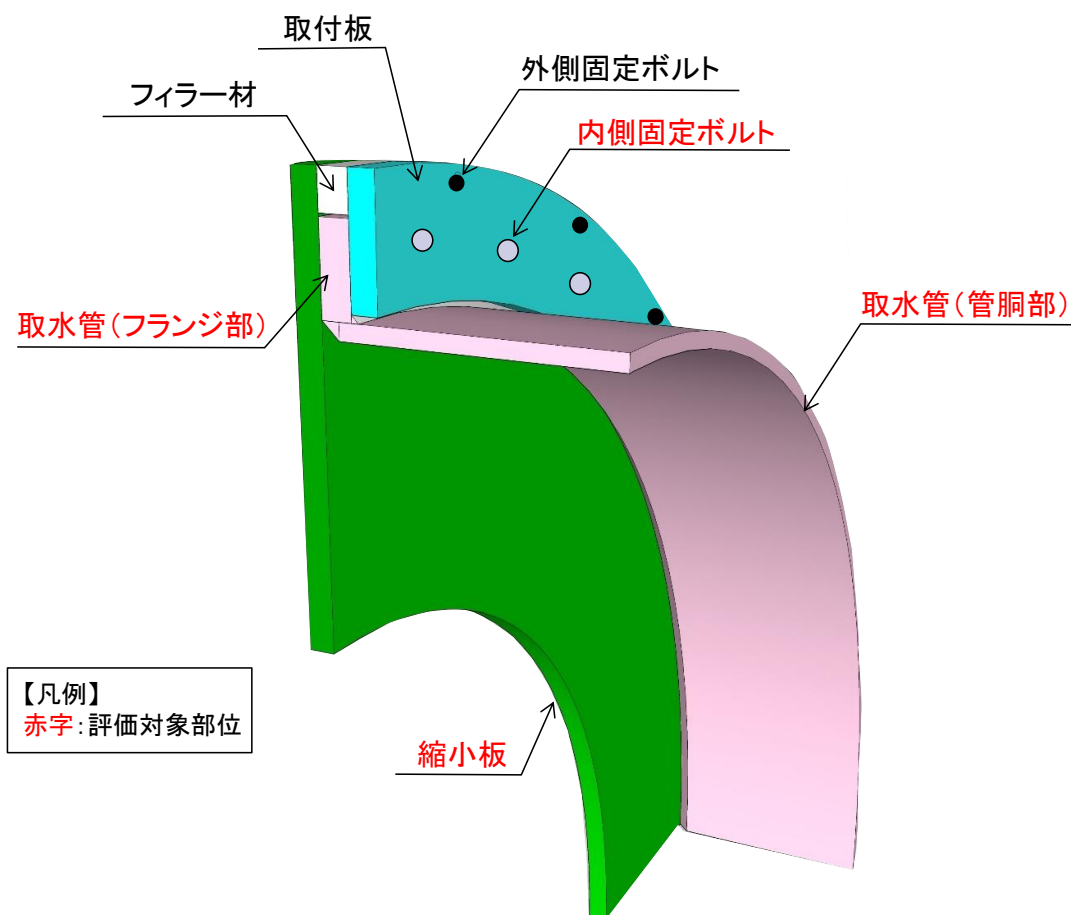


図 3.5-1 評価対象部位

縮小板の内側固定ボルトと外側固定ボルトの縁端距離は 72mm であり、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005 年改訂）」に基づく最小縁端距離（ボルト径 30mm の場合 54mm 以上）を確保していることから，固定ボルトの縁端距離は妥当と判断した。また，固定ボルトにより縮小板は強固に固定されており，固定ボルトのせん断方向の変形は抑制されるため，縁端距離が構造成立性に与える影響は軽微であると考えられる。

固定ボルトの構造概要図を図 3.5-2 に示す。

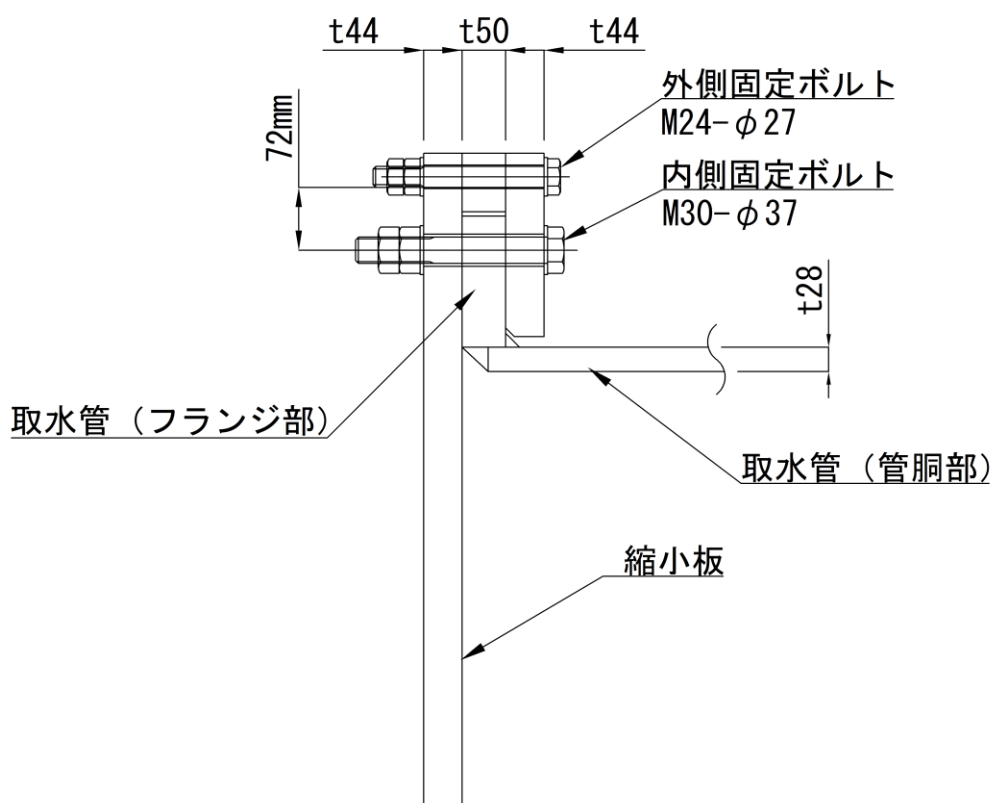


図 3.5-2 固定ボルト構造概要図

1号機取水管は複数の鋼管を継手した構造であり、流路縮小工の近傍の継手部（以下「1号機取水管継手部」という。）は固定ボルトにより固定している。1号機取水管継手部の取水管は、1号機取水槽北側壁に巻き込まれるように施工され、固定されていることから、1号機取水管継手部の固定ボルトに生じる引張力は軽微である。また、縮小板の固定ボルトについては、地震時において、縮小板に作用する動水圧が伝達されるが、1号機取水管継手部は、動水圧が作用しないため、1号機取水管継手部の固定ボルトに作用する荷重と比べて縮小板の固定ボルトに作用する荷重の方が大きくなることから縮小板の固定ボルトを代表として評価する。

1号機取水管継手部の位置図を図 3.5-3 に示す。

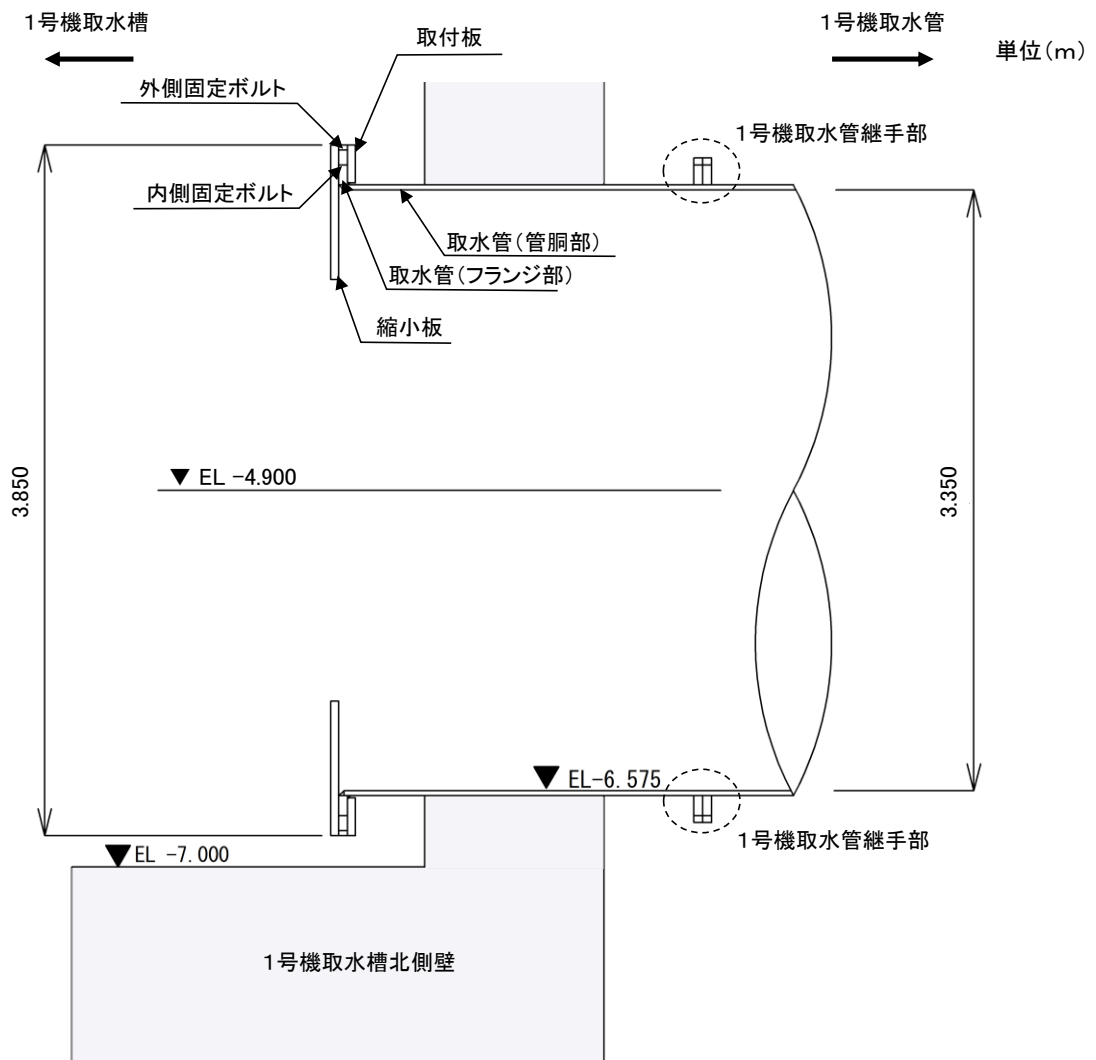


図 3.5-3 1号機取水管継手部の位置図

縮小板を設置する1号機取水管終端部は、1号機取水管継手部を介して、隣接する1号機取水管に継手している。1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工の周囲にコンクリートを充填することにより、1号機取水管終端部の大部分は剛構造であることから、隣接する1号機取水管の管径方向の変形（土圧による内空側への変形）及び管軸方向の変形（地震動による水平及び鉛直方向の変形）が縮小板の健全性に及ぼす影響は軽微である。

1号機取水管の拘束状況図を図3.5-4に示す

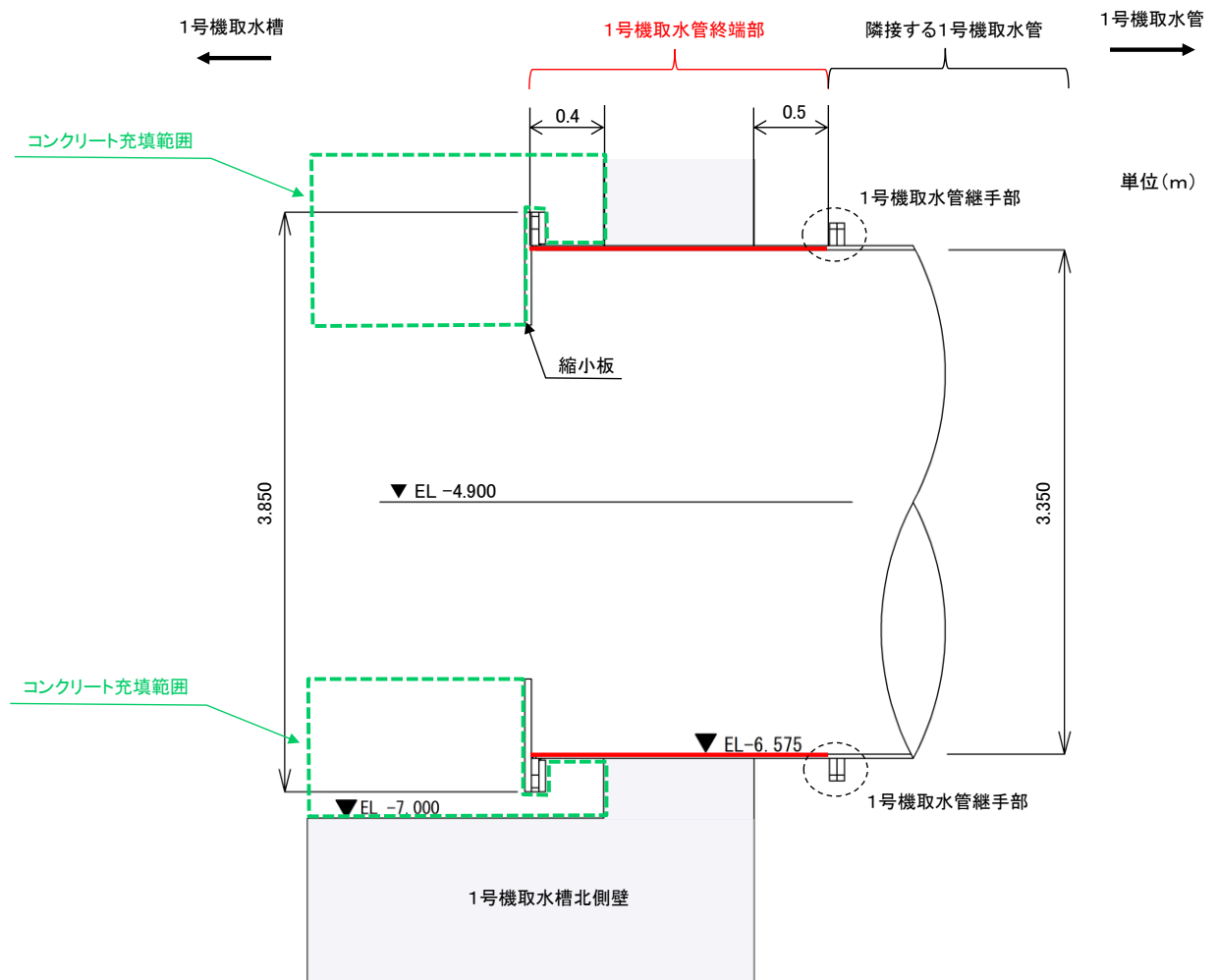


図3.5-4 1号機取水管の拘束状況図

3.6 固有値解析

3.6.1 固有振動数の計算方法

(1) 解析モデルの設定

流路縮小工は、取水管（フランジ部）に、鋼製の縮小板を固定ボルトにより固定する構造であることから、片持ち梁に単純化したモデルとする。図 3.6.1-1 に解析モデルを示す。

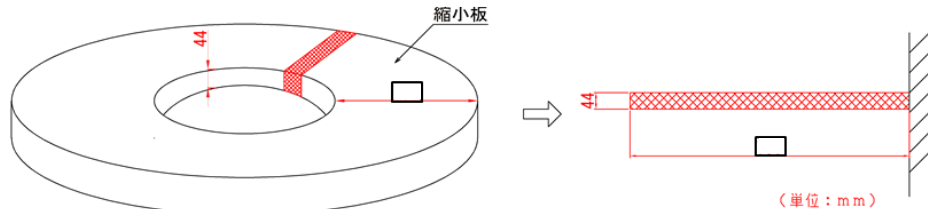


図 3.6.1-1 流路縮小工の固有値解析モデル

(2) 固有振動数の算出方法

固有振動数について、「構造力学公式集（土木学会，1986年）」に基づき以下の式より算出する。

$$f = \frac{1.8751^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \cdot 10^3$$

ここで、 f : 固有振動数 (Hz)

L : はりの長さ (mm)

E : ヤング係数 (N/mm²)

I : 断面 2 次モーメント (mm⁴)

m : 質量分布 (kg/mm)

(3) 固有振動数の計算条件

固有振動数の計算条件を表 3.6.1-1 に示す。

表 3.6.1-1 固有振動数の計算条件

はりの長さ L (mm)	ヤング係数 E (N/mm ²)	断面 2 次モーメント I (mm ⁴)	質量分布 m (kg/mm)
□	2.0×10^5	7099	3.4569×10^{-4}

(4) 固有振動数の計算結果

固有振動数の計算結果を表 3.6.1-2 に示す。固有振動数は 20Hz 以上であることから、流路縮小工は剛構造である。

表 3.6.1-2 固有振動数の計算結果

固有振動数 (Hz)	150.35
------------	--------

3.7 荷重及び荷重の組合せ

3.7.1 荷重の組合せ

流路縮小工の評価に用いる荷重の組合せを以下に示す。荷重の組合せを表 3.7.1-1 に、地震時の荷重作用図を図 3.7.1-1 に示す。

流路縮小工は水中に設置する構造物であるため

$G + S_s$

ここで、 G : 固定荷重 (kN)

S_s : 地震荷重 (kN)

表 3.7.1-1 荷重の組合せ

種別	荷重	記号	算定方法
固定荷重	躯体自重	G	設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
	静水圧		管路解析より 1 号機取水口と 1 号機取水槽との水位差による静水圧を考慮する。
地震荷重	水平地震動	S _s	基準地震動 S _s による躯体の慣性力を考慮する。
	鉛直地震動		縮小板, 固定ボルト, 及び取水管 (フランジ部) は、主たる荷重が水平方向荷重のため考慮しない。取水管 (管胴部) は基準地震動 S _s による躯体の慣性力を考慮する。
	動水圧		管路解析より 1 号機取水槽の水位が最大となる水位での動水圧を考慮する。

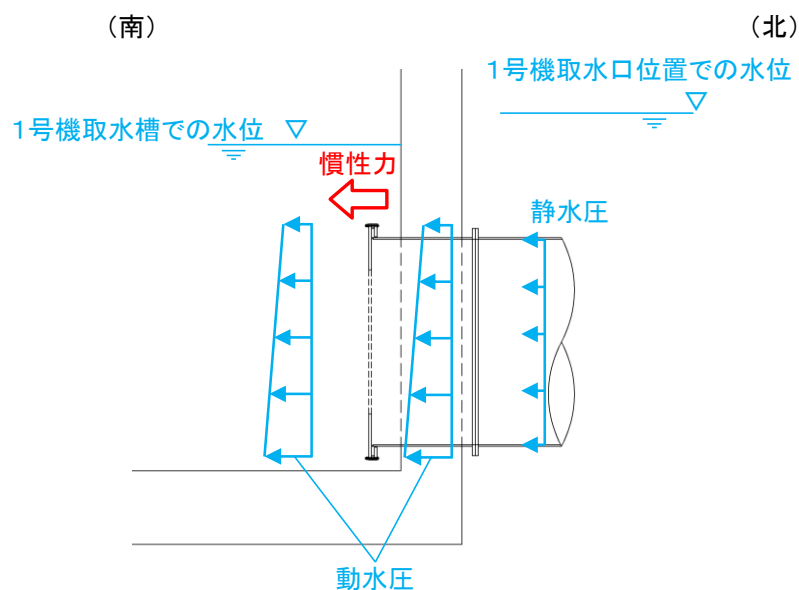


図 3.7.1-1 地震時の荷重作用図

3.7.2 荷重の設定

耐震評価に用いる荷重は以下のとおりとする。なお、荷重の設定に用いる水位及び流速の詳細については、「2.3.3 1号機流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響 参考資料1 1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速」に示す。

(1) 固定荷重(G)

固定荷重として、流路縮小工を構成する部材の自重を考慮する。

また、流路縮小工の上下流の水位差を考慮した静水圧を考慮することとし、以下の式により算定する。上下流の水位差は、2条ある1号機取水管ごとに1号機取水口と1号機取水槽の水位差を算定し、そのうち水位差が大きい値を設定する。

表 3.7.2-1 に静水圧による荷重の算定における計算条件を、図 3.7.2-1 に静水圧の荷重作用図を示す。

$$F_h = \gamma_w \times \Delta h \times A$$

ここで、

F_h : 静水圧 (kN)

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Δh : 取水口と取水槽の水位差 (m)

A : 縮小板の面積 (m²)

表 3.7.2-1 静水圧による荷重

項目		単位	地震時
1号機取水槽水位	—	m	EL 0.00
1号機取水口水位	—	m	EL 0.58
1号機取水口と1号機取水槽の水位差	Δh	m	0.58
縮小板の面積	A	m ²	7.304
静水圧による荷重	F_h	kN	43

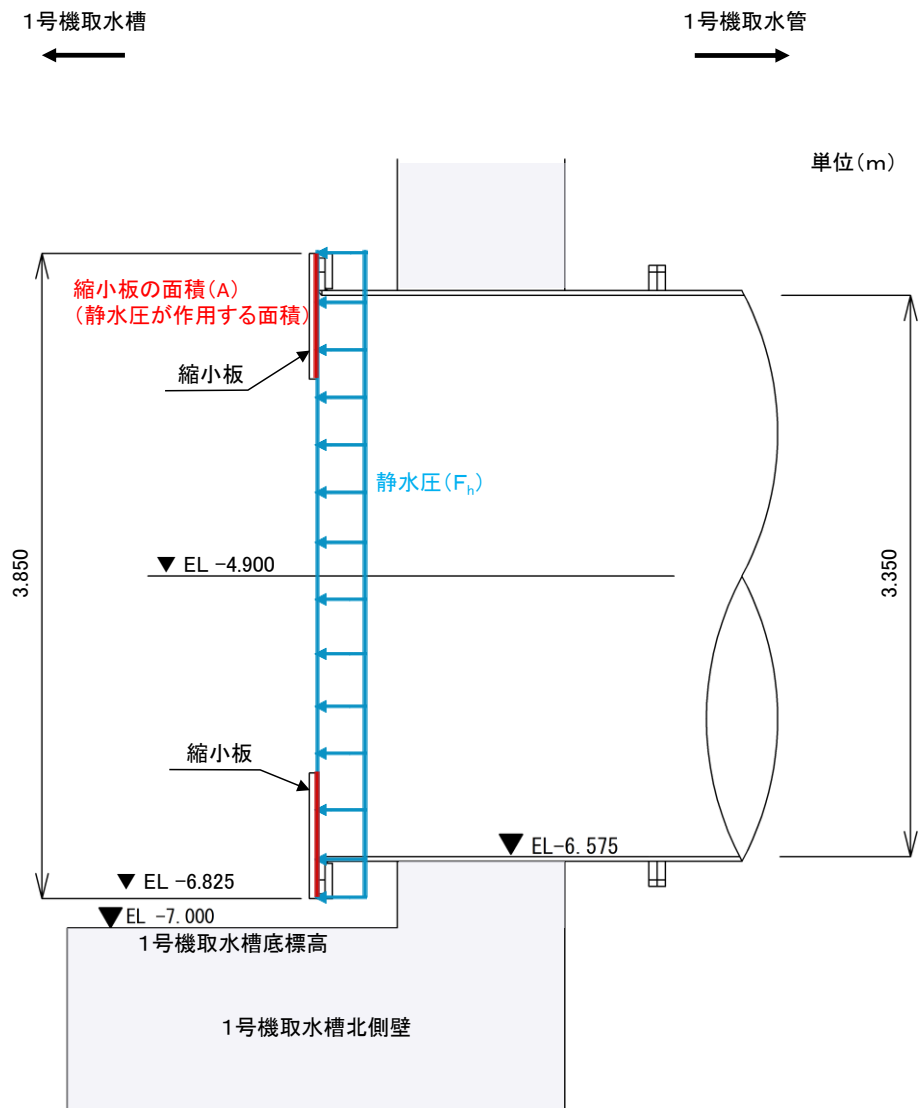


図 3.7.2-1 静水圧の荷重作用図

(3) 地震荷重 (S_s)

地震荷重として、基準地震動 S_s に伴う慣性力及び動水圧荷重を考慮する。

流路縮小工の地震時の評価に用いる設計震度は、「3.6 固有値解析」から流路縮小工を剛構造として考慮した VI-2-10-2-5 「1号機取水槽の地震応答計算書」の地震応答解析結果より、流路縮小工が設置される位置から抽出した加速度に、地盤物性のばらつきによる影響を考慮して、裕度をもった設計震度を設定する。

基準地震動 S_s による最大加速度分布図及び加速度抽出位置を図 3.7.2-2 に、最大加速度及び設計震度を表 3.7.2-2 に示す。

追而

(水平方向)

追而

(鉛直方向)

図 3.7.2-2 基準地震動 S_s による最大加速度分布図及び加速度抽出位置

表 3.7.2-2 基準地震動 S_s による最大加速度及び設計震度

方向	地震動	位相	解析ケース	最大加速度 (cm/s ²)	設計震度
水平			追而		1.5
鉛直					

a. 慣性力

慣性力は、流路縮小工の重量に設計水平震度を乗じた次式により算出する。

なお、鉛直慣性力は取水管（管胴部）のみ考慮する。

縮小板、固定ボルト、取水管（フランジ部）及び取水管（管胴部）に作用する慣性力による荷重の算定における計算条件を表 3.7.2-3 に、慣性力の算定に用いる重量の算定範囲を図 3.7.2-3 に示す。

$$P_h = W \times K_h$$

$$P_v = W \times K_v$$

ここで、

P_h : 水平慣性力 (kN)

P_v : 鉛直慣性力 (kN)

W : 重量 (kN)

K_h : 基準地震動 S_s による設計水平震度

K_v : 基準地震動 S_s による設計鉛直震度

表 3.7.2-3(1) 慣性力による荷重の算定における計算条件（縮小板、固定ボルト）

項目		単位	地震時
重量	W	kN	25
設計水平震度	K_h	—	1.5
水平慣性力	P_h	kN	38

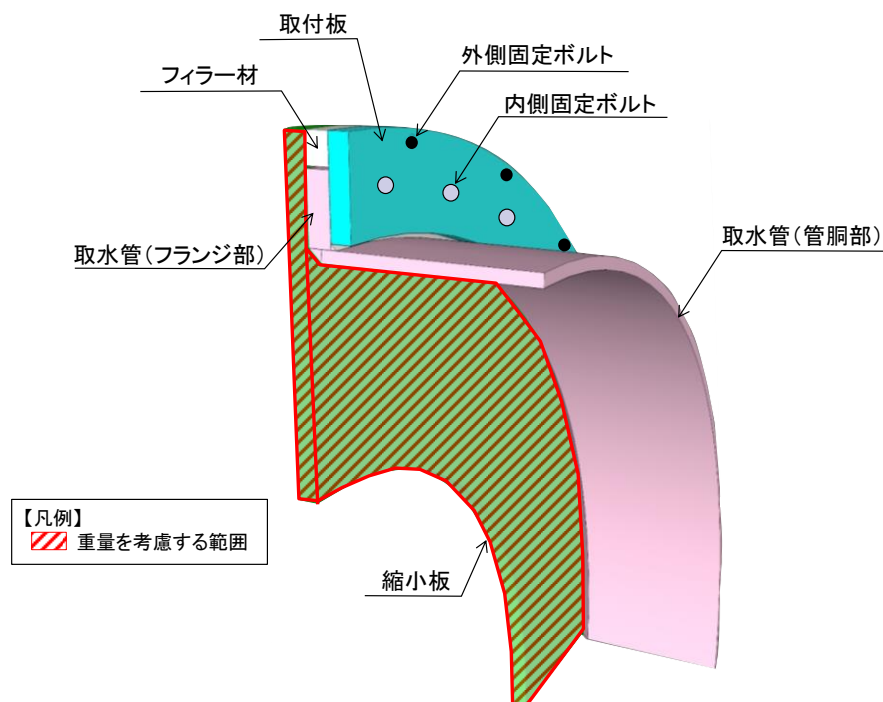


図 3.7.2-3(1) 慣性力の算定に用いる重量の算定範囲（縮小板、固定ボルト）

表 3.7.2-3(2) 慣性力による荷重の算定における計算条件
(取水管(フランジ部))

項目		単位	地震時
重量	W	kN	46.7
設計水平震度	K_h	—	1.5
水平慣性力	P_h	kN	70

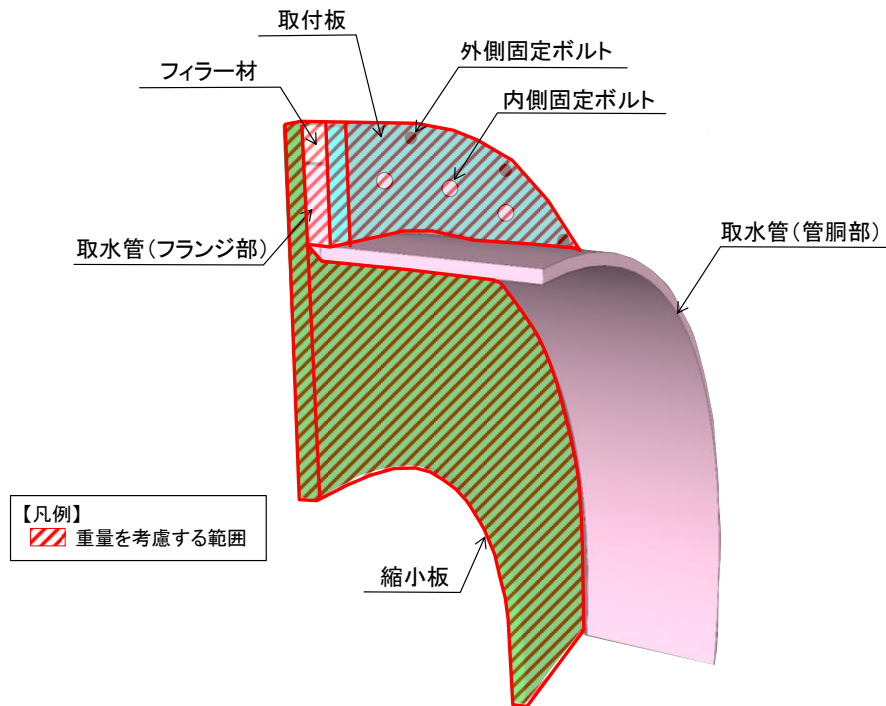


図 3.7.2-3(2) 慣性力の算定に用いる重量の算定範囲 (取水管(フランジ部))

表 3.7.2-3(3) 慣性力による荷重の算定における計算条件
(取水管(管胴部))

項目		単位	地震時
水平 方向	重量	W	kN
	設計水平震度	K_h	—
	慣性力	P_h	kN
鉛直 方向	重量	W	kN
	設計鉛直震度	K_v	—
	慣性力	P_v	kN

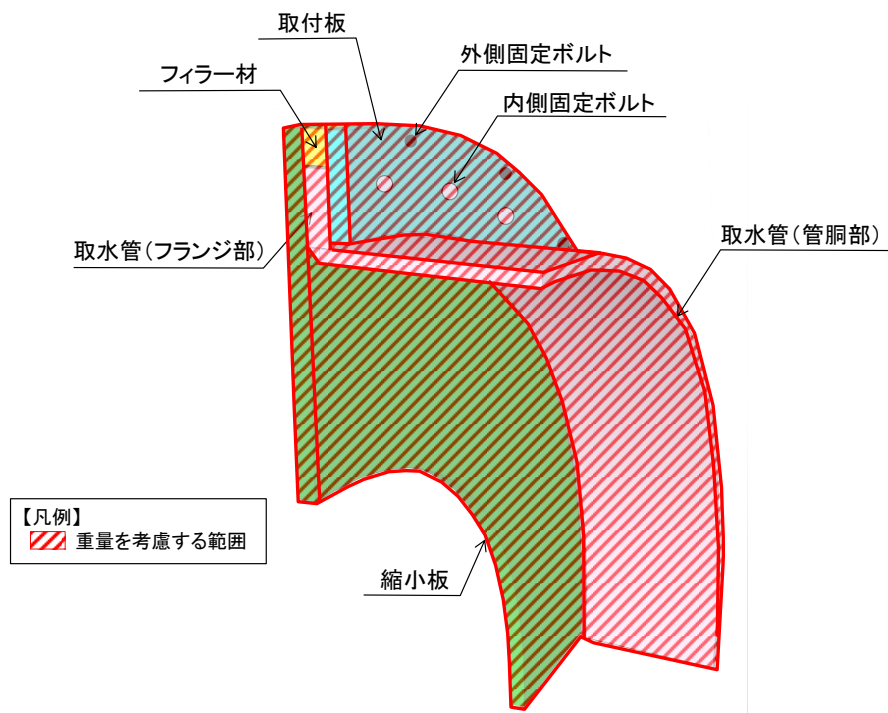


図 3.7.2-3(3) 慣性力の算定に用いる重量の算定範囲 (取水管(管胴部))

b. 動水圧 (P_{dw})

動水圧は、以下の Westergaard の式により算定する。

表 3.7.2-4 に動水圧による荷重の算定における計算条件を、図 3.7.2-4 に動水圧の荷重作用図を示す。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} \times C \times K_h \times \gamma_w \times \sqrt{Z_{dw} \times z_{dw}}$$

ここで、

P_{dw} : 動水圧 (kN/m²)

C : 補助係数 (= 1.0)

K_h : 基準地震動 S_s による水平方向の設計震度

γ_w : 海水の単位体積重量 (= 10.1 kN/m³)

Z_{dw} : 水深 (m)

z_{dw} : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

表 3.7.2-4(1) 動水圧による荷重の算定における計算条件
(縮小板, 固定ボルト及び取水管 (フランジ部))

項目		単位	地震時
設計水平震度	K_h	—	1.5
1号機取水槽水位	—	m	EL 0.000
1号機取水槽底標高	—	m	EL-7.000
縮小板下端標高	—	m	EL-6.825
水深	Z_{dw}	m	7.000
縮小板下端水深	z_{dw}	m	6.825
動水圧	p_{dw}	kN/m^2	183.3
縮小板の面積	A	m^2	7.304
動水圧による荷重	P_{dw}	kN	1339

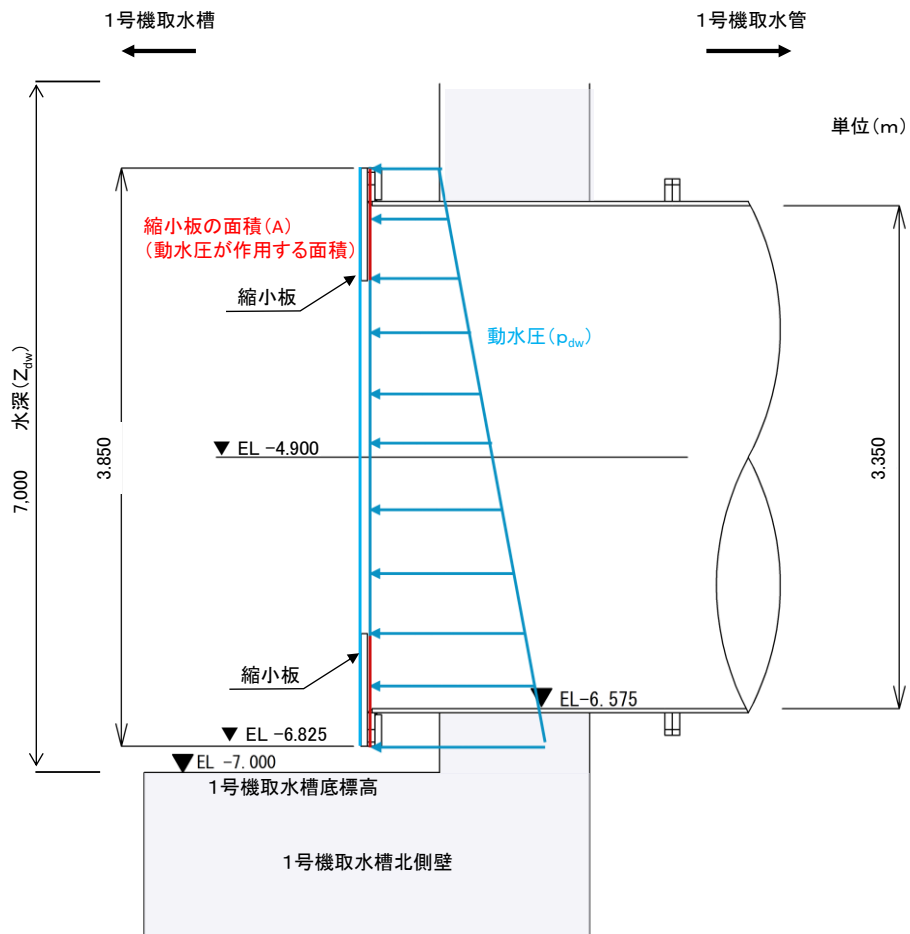


図 3.7.2-4(1) 動水圧の荷重作用図
(縮小板, 固定ボルト及び取水管 (フランジ部))

表 3.7.2-4(2) 動水圧による荷重の算定における計算条件
(取水管 (管胴部))

項目		単位	地震時
設計水平震度	K_h	—	1.5
設計鉛直震度	K_v	—	1.5
1号機取水槽水位	—	m	EL 0.000
1号機取水管底標高	—	m	EL-6.603
取水管 (管胴部) 下端標高	—	m	EL-6.603
水深	Z_{dw}	m	7.000
取水管 (管胴部) 下端水深	z_{dw}	m	6.603
動水圧	p_{dw}	kN/m^2	276
取水管 (管胴部) の面積	A	m^2	1,533
動水圧による鉛直及び水平荷重	P_{dw}	kN	276

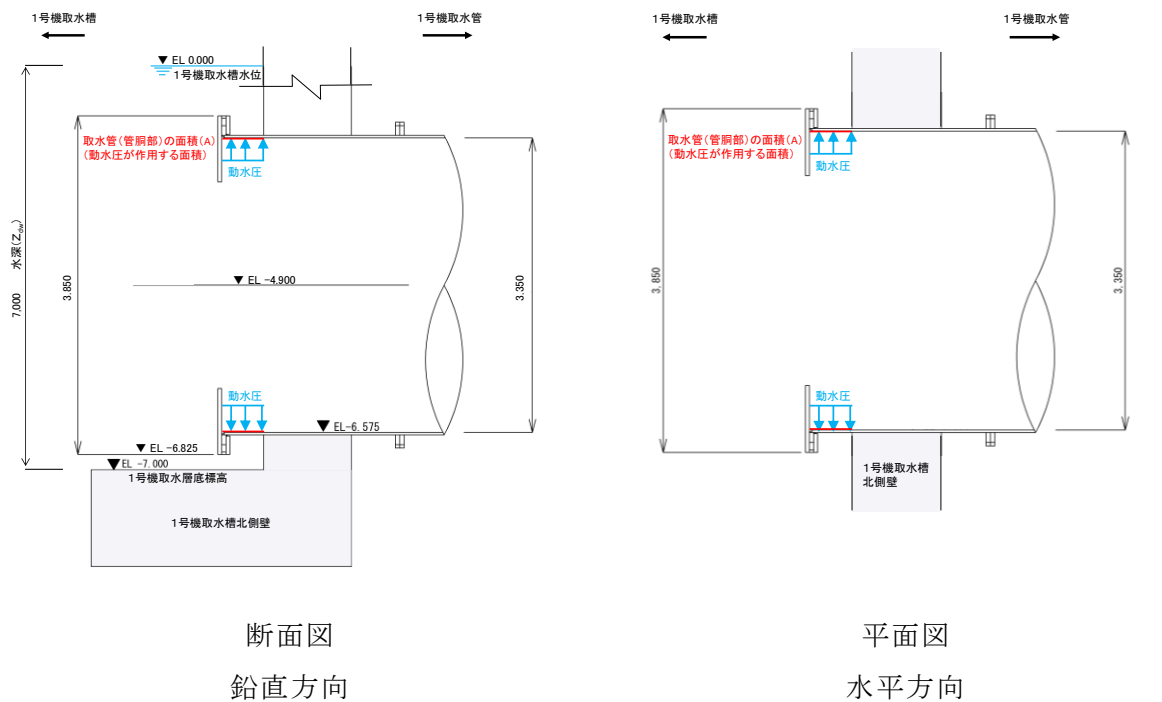


図 3.7.2-4(2) 動水圧の荷重作用図 (取水管 (管胴部))

3.7.3 荷重の選定

各構造部材における地震時の作用荷重を表 3.7.3-1 に示す。

表 3.7.3-1 地震時の作用荷重
(縮小板, 固定ボルトの作用荷重)

項 目		単位	地震時
慣性力	P_h	kN	38
動水圧	P_{dw}	kN	1339
静水圧	F_h	kN	43
合計値	P	kN	1420

(取水管(フランジ部))

項 目		単位	地震時
慣性力	P_h	kN	70
動水圧	P_{dw}	kN	1339
静水圧	F_h	kN	43
合計値	P	kN	1452

(取水管(管胴部))

項 目		単位	地震時	
水平 方向	慣性力	P_h	kN	76
	動水圧	P_{dw}	kN	276
	合計値	P	kN	352
鉛直 方向	慣性力	P_h	kN	76
	動水圧	P_{dw}	kN	276
	合計値	P	kN	352

3.8 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

3.8.1 使用材料

流路縮小工を構成する各部材の使用材料を表 3.8.1-1 に示す。

表 3.8.1-1 使用材料

評価対象部位	材質	仕様
縮小板	SS400	t = 40 (mm) *
固定ボルト	SCM435	M30
取水管 (フランジ部)	SS400	t = 46 (mm) *
取水管 (管胴部)	SS400	t = 24 (mm) *

注記* : 「2.3.3 1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響」参考資料2「1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象」に示すエロージョン摩耗に対する設計・施工上の配慮として、縮小板の余裕厚を4mmとして考慮し、板厚を44-4=40(mm)と設定する。また、取水管(フランジ部)及び取水管(管胴部)についても、余裕厚を4mmとして考慮し、取水管(フランジ部)の板厚を50-4=46(mm)、取水管(管胴部)の板厚を28-4=24(mm)と設定する。

3.8.2 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。

流路縮小工を構成する各部材の許容応力度のうち、縮小板、取水管(フランジ部)及び取水管(管胴部)は「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—(社)日本建築学会、2005年改訂」に基づき、固定ボルトは、「鋼構造許容応力設計規準(社)日本建築学会、2019年制定)」及び「JIS B 1051 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト、小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ」に基づき表 3.8.2-1 の値とする。

表 3.8.2-1 流路縮小工を構成する各部材の許容限界

評価対象部位	材質	短期許容応力度 (N/mm ²)		
		曲げ	せん断	引張
縮小板	SS400	235	135	—
固定ボルト	SCM435	—	—	560
取水管 (フランジ部)	SS400	215	124	—
取水管 (管胴部)	SS400	235	135	—

3.9 評価方法及び評価条件

流路縮小工を構成する各部材に発生する応力を用いて算定する応力度が、許容限界以下であることを確認する。流路縮小工の耐震評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、「3.5 評価対象部位」にて設定する評価対象部位に作用する応力等が「3.8 許容限界」にて示す許容限界以下であることを確認する。

3.9.1 縮小板

縮小板の管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。外径を固定とする有孔円板に等分布荷重が作用するものとして検討する。

評価対象位置図を図 3.9.1-1 に、縮小板のモデル図を図 3.9.1-2 に示す。

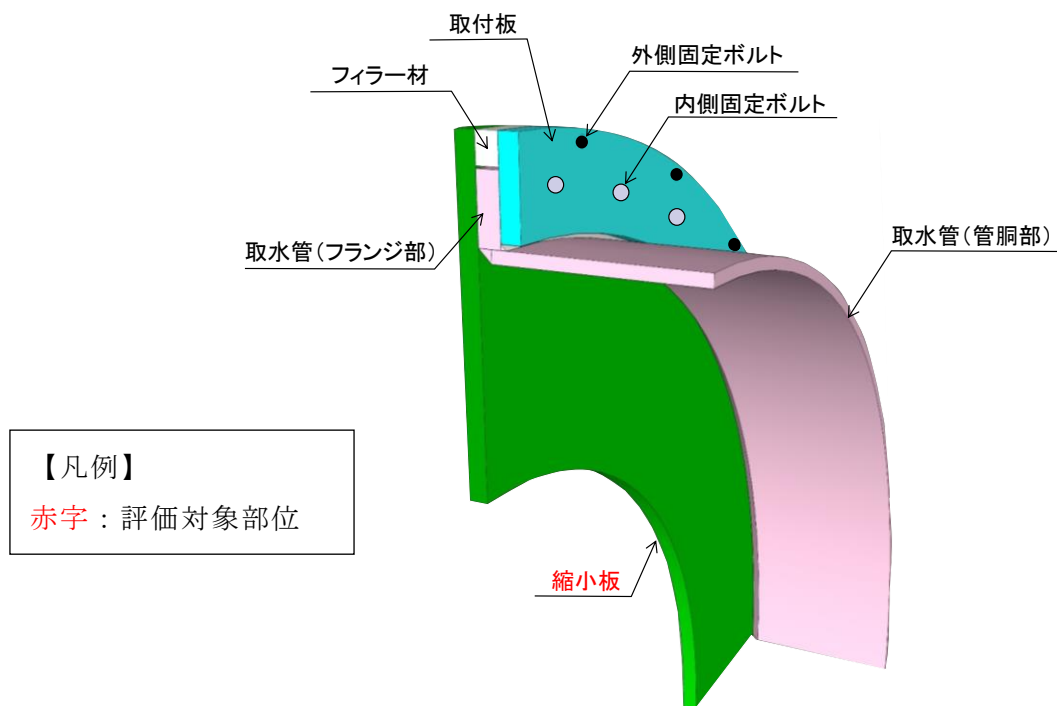


図 3.9.1-1 評価対象位置図（縮小板）

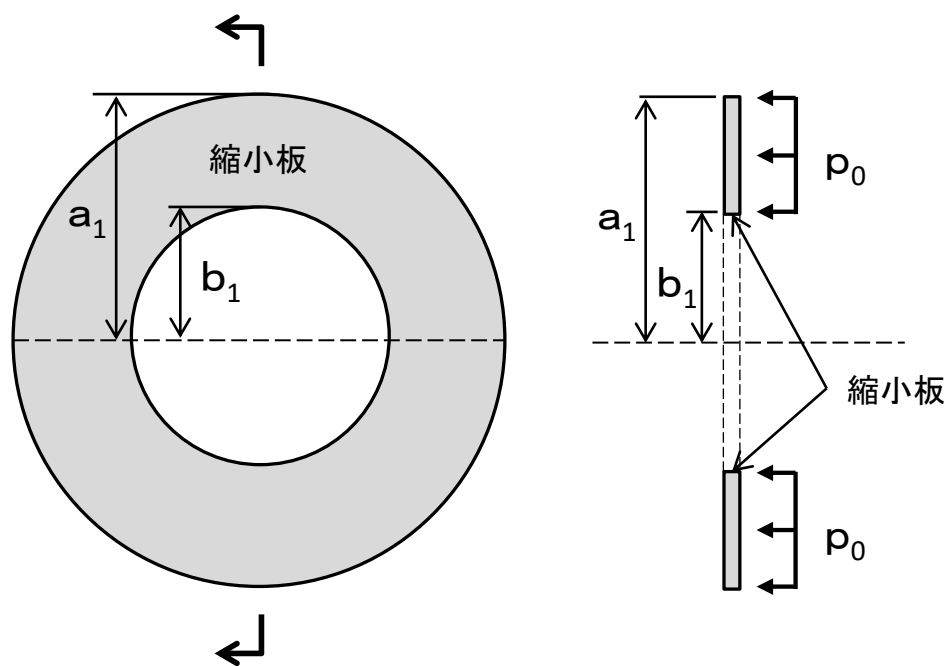


図 3.9.1-2 縮小板のモデル図
2.3.1-32

(1) 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重

縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重について、以下の式より算出する。
また、縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重の計算に用いる入力値を表 3.9.1-1 に示す。

$$p_0 = \frac{P}{A_{11}}$$

$$A_{11} = (a_1^2 - b_1^2) \times \pi$$

ここで、

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

P : 縮小板に作用する地震時荷重 (kN)

A_{11} : 縮小板の作用面積 (mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

表 3.9.1-1 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	縮小板に作用する地震時荷重	1420
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
b_1	mm	縮小板の内半径	<input type="text"/>

上記の評価式に、表 3.9.1-1 の入力値を代入すると縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} A_{11} &= (a_1^2 - b_1^2) \times \pi \\ &= (1925^2 - \text{□}) \times 3.1416 \\ &= 7304220 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{P}{A_{11}} \\ &= 1420 / 7304220 \\ &= 0.0001944 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

(2) 縮小板に生じる曲げモーメント

縮小板に生じる曲げモーメントについて、「構造力学公式集(土木学会, 1986年)」に基づき、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値を表 3.9.1-2 に示す。

$$M_{r1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\beta_1^2 - (3+\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu)\ln\rho_1 \right]$$

$$M_{\theta 1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\nu\beta_1^2 - (1+3\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu)\ln\rho_1 \right]$$

$$\kappa_1 = \beta_1^2 \frac{(1-\nu)\beta_1^2 + (1+\nu)(1+4\beta_1^2 \ln\beta_1)}{1-\nu+(1+\nu)\beta_1^2}$$

$$\beta_1 = \frac{b_1}{a_1}$$

$$\rho_1 = \frac{r_1}{a_1}$$

ここで、

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$: 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

ν : ポアソン比

r_1 : 縮小板の中心から半径方向の距離 (mm)

$\kappa_1, \beta_1, \rho_1$: 係数

表 3.9.1-2 縮小板に作用する曲げモーメントの計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
p_0	kN/mm ²	縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重	1.944×10 ⁻⁴
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
b_1	mm	縮小板の内半径	<input type="text"/>
ν	—	ポアソン比	0.3
r_1	mm	縮小板の中心から半径方向の距離	1925

上記の評価式に，表 3.9.1-2 の入力値を代入すると縮小板に生じる曲げモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{b_1}{a_1} \\ &= \boxed{}/1925 \\ &= 0.61039\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{r_1}{a_1} \\ &= 1925/1925 \\ &= 1.0000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= \beta_1^2 \frac{(1-\nu)\beta_1^2 + (1+\nu)(1+4\beta_1^2 \ln \beta_1)}{1-\nu + (1+\nu)\beta_1^2} \\ &= 0.61039^2 \frac{(1-0.3) \times 0.61039^2 + (1+0.3)(1+4 \times 0.61039^2 \ln 0.61039)}{1-0.3 + (1+0.3) \times 0.61039^2} \\ &= 0.19013\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{r1} &= \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\beta_1^2 - (3+\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu) \ln \rho_1 \right] \\ &= \frac{1.944 \times 10^{-4} \times 1,925^2}{16} \left[(1+0.3)(1-0.19013) + 4 \times 0.61039^2 - (3+0.3) \times 1.0000^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1-0.3) \times 0.19013}{1.0000^2} + 4 \times 0.61039^2 \times (1+0.3) \ln 1.0000 \right] \\ &= -40.07 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\theta 1} &= \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\nu\beta_1^2 - (1+3\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu) \ln \rho_1 \right] \\ &= \frac{1.944 \times 10^{-4} \times 1,925^2}{16} \left[(1+0.3)(1-0.19013) + 4 \times 0.3 \times 0.61039^2 \right. \\ &\quad \left. - (1+3 \times 0.3) \times 1.0000^2 + \frac{(1-0.3) \times 0.19013}{1.0000^2} + 4 \times 0.61039^2 \times (1+0.3) \ln 1.0000 \right] \\ &= -12.02 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

(3) 縮小板に生じる最大曲げ応力度

縮小板に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集(土木学会, 1986年)」に基づき、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.1-3 に示す。

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}}{Z_1}$$

$$Z_1 = \frac{t_1^2}{6}$$

ここで、

σ_1 : 縮小板に生じる最大曲げ応力度 (kN/mm²)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$: 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

Z_1 : 縮小板の断面係数 (mm³/mm)

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

表 3.9.1-3 縮小板に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
t_1	mm	縮小板の板厚	40
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント	40.07
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント	12.02

上記の評価式に、表 3.9.1-3 の入力値を代入すると縮小板に生じる最大曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{t_1^2}{6} \\ &= \frac{40^2}{6} \\ &= 266.67 \text{ mm}^3/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}}{Z_1} \\ &= \frac{\sqrt{(40.07)^2 + (12.02)^2}}{266.67} \\ &= 0.1569 \text{ kN/mm}^2 \\ &\approx 157 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(4) 縮小板に生じる最大せん断応力度

縮小板に生じる最大せん断応力度について、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.1-4 に示す。

$$\tau_1 = \frac{S_1}{A_{12}}$$

$$A_{12} = 2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot t_1$$

ここで、

τ_1 : 縮小板に生じる最大せん断応力度 (kN/mm²)

S_1 : 縮小板に作用するせん断力 (=P) (kN)

P : 縮小板に作用する地震時荷重 (kN)

A_{12} : 縮小板の有効せん断面積 (mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

表 3.9.1-4 縮小板に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
S_1	kN	縮小板に作用するせん断力	1420
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
t_1	mm	縮小板の板厚	40

上記の評価式に、表 3.9.1-4 の入力値を代入すると縮小板に生じる最大せん断応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} A_{12} &= 2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot t_1 \\ &= 2 \times 3.1416 \times 1925 \times 40 \\ &= 483806 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{S_1}{A_{12}} \\ &= \frac{1420}{483806} \\ &= 0.00293 \text{ kN/mm}^2 \\ &\approx 3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

3.9.2 固定ボルト

固定ボルトについては、管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。固定ボルトには、縮小板に作用する水平力により生じる固定ボルトの引張力に加え、縮小板外縁に作用する曲げモーメントに伴い生じる固定ボルトの引張力を有効断面積で除することで求めた応力度が許容応力度以下であることを確認する。

評価対象位置図を図 3.9.2-1 に、固定ボルトのモデル図を図 3.9.2-2 に示す。

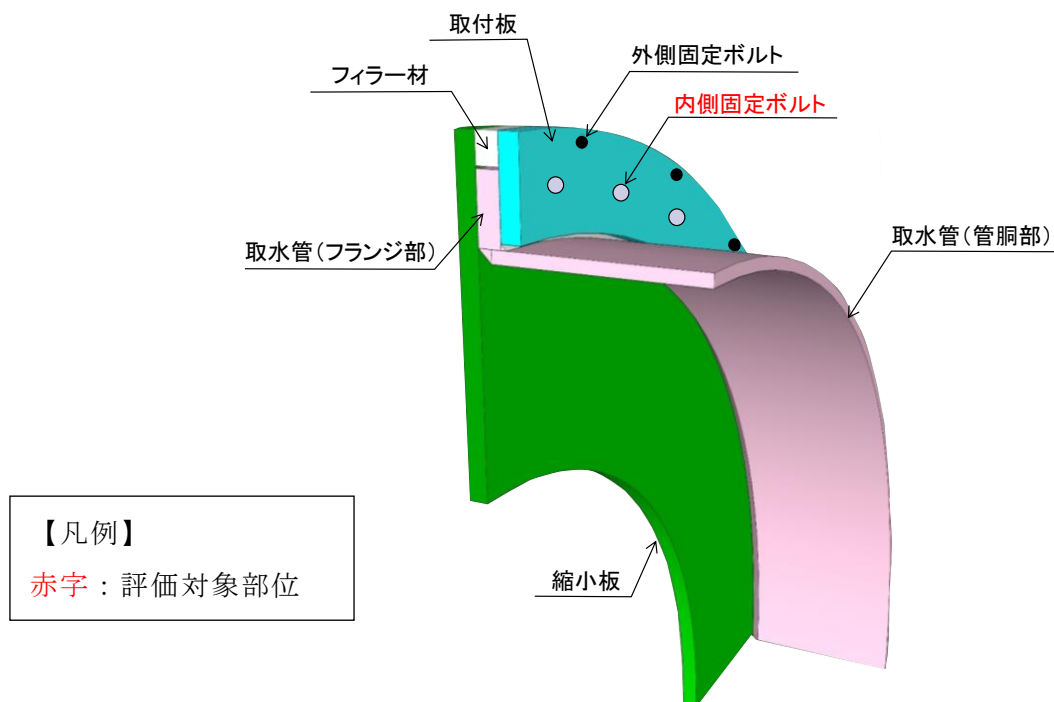


図 3.9.2-1 評価対象部位（固定ボルト）

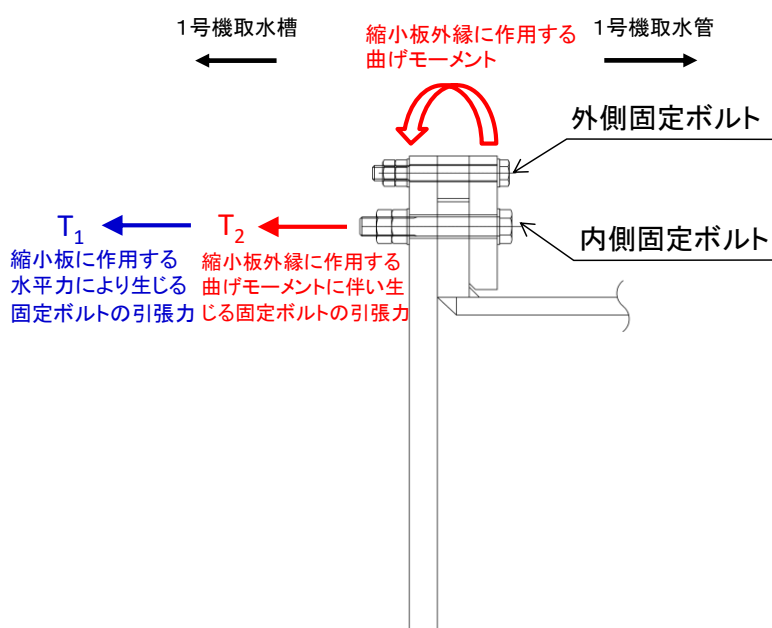


図 3.9.2-2 取水管（固定ボルト）のモデル図

2.3.1-38

(1) 固定ボルトに生じる最大応力度

固定ボルトに生じる最大応力度は、以下の式より算出する。また、固定ボルトに生じる最大応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.2-1 に示す。

なお、縮小板に生じる曲げモーメントは半径方向及び周方向の曲げモーメントの合力とした。

$$T = T_1 + T_2$$

$$T_1 = \frac{P}{n}$$

$$T_2 = M \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{1}{n \cdot l_1}$$

$$M = \sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}$$

$$\sigma_b = \frac{T}{A}$$

ここで、

T : 内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T₁ : 縮小板に発生する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T₂ : 縮小板に発生する曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

P : 内側固定ボルトに作用する地震時荷重 (kN)

n : 内側固定ボルトの本数 (本)

M : 縮小板に生じる曲げモーメント合力 (kN・mm/mm)

D₁ : フランジ外径 (mm)

l₁ : 支点間距離 (mm)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

M_{θ1} : 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

A : 内側固定ボルト 1 本の有効断面積 (mm²)

σ_b : 内側固定ボルトに生じる最大応力度 (kN/mm²)

表 3.9.2-1 固定ボルトに生じる最大応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
D_1	mm	フランジ外径	3850
l_1	mm	支点間距離	111
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント	40.07
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント	12.02
P	kN	内側固定ボルトに作用する地震時荷重	1420
n	本	内側固定ボルトの本数	40
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積	561

上記の評価式に、表 3.9.2-1 の入力値を代入すると固定ボルトに生じる最大応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{P}{n} \\
 &= \frac{1420}{40} \\
 &= 35.5 \text{ kN/本}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M &= \sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2} \\
 &= \sqrt{40.07^2 + 12.02^2} \\
 &= 41.83 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_2 &= M \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{1}{n \cdot l_1} \\
 &= 41.83 \times 3.1416 \times 3850 \times \frac{1}{40 \times 111} \\
 &= 113.95 \text{ kN/本}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= \frac{T}{A} \\
 &= \frac{35.5 + 113.95}{561} \\
 &= 0.2663 \text{ kN/mm}^2 \\
 &= 266 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

3.9.3 取水管（フランジ部）

取水管（フランジ部）の管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。取水管（フランジ部）は内側固定ボルトを介して荷重が作用するものとして、内径を固定とする有孔円板として検討する。

評価対象位置図を図 3.9.3-1 に、取水管（フランジ部）のモデル図を図 3.9.3-2 に示す。

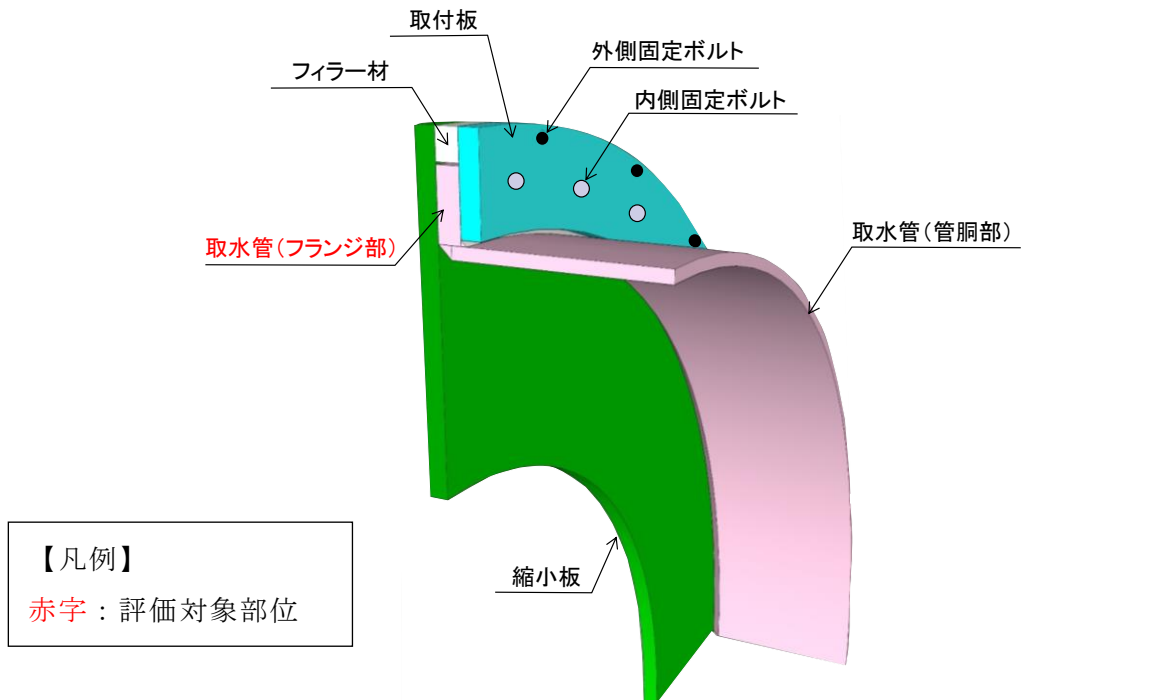


図 3.9.3-1 評価対象位置図（取水管（フランジ部））

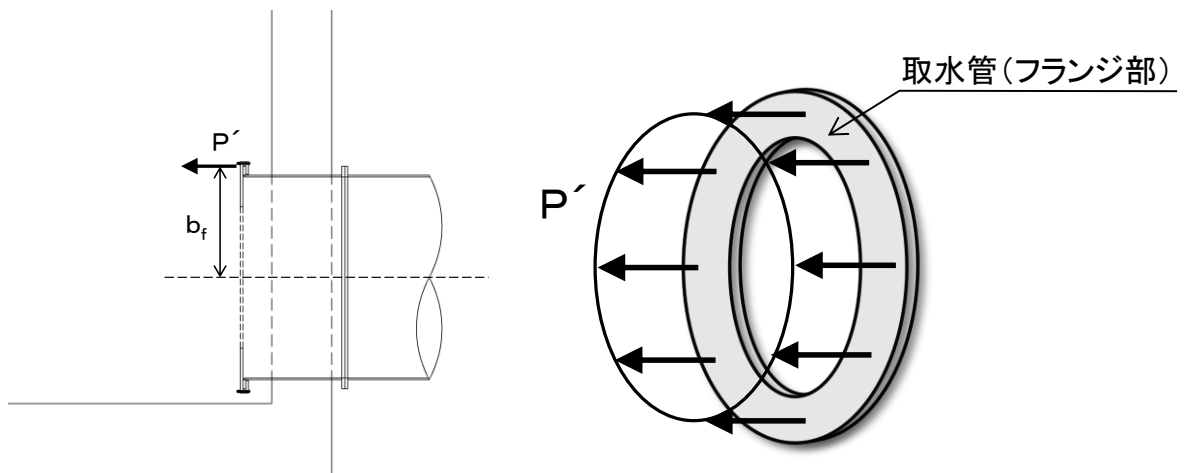


図 3.9.3-2 取水管（フランジ部）のモデル図

(1) 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重

取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重は、以下の式より算出する。また、取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重の計算に用いる入力値を表 3.9.3-1 に示す。

$$P' = \frac{P}{L_f}$$

$$L_f = 2 \cdot \pi \cdot b_f$$

ここで、

P' : 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重（kN/mm）

P : 取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重（kN）

L_f : 取水管（フランジ部）の外周長（mm）

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

表 3.9.3-1 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重	1452
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1814

上記の評価式に、表 3.9.3-1 の入力値を代入すると、取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} L_f &= 2 \times \pi \times b_f \\ &= 2 \times 3.1416 \times 1814 \\ &= 11398 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P' &= \frac{P}{L_f} \\ &= \frac{1452}{11398} \\ &= 0.127 \text{ kN/mm} \end{aligned}$$

(2) 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメント

取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントについて、「構造力学公式集（土木学会，1986年）」に基づき，以下の式より算出する。また，取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値を表 3.9.3-2 に示す。

$$M_{rf} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-1 + (1+\nu) \kappa_f + (1-\nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1+\nu) \ln \rho_f \right]$$

$$M_{\theta f} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-\nu + (1+\nu) \kappa_f - (1-\nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1+\nu) \ln \rho_f \right]$$

$$\kappa_f = \beta_f^2 \frac{1 + (1+\nu) \ln \beta_f}{1 - \nu + (1+\nu) \beta_f^2}$$

$$\beta_f = \frac{b_f}{a_f}$$

$$\rho_f = \frac{r_f}{a_f}$$

ここで，

M_{rf} : 取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

$M_{\theta f}$: 取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

P' : 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重（kN/mm）

ν : ポアソン比

$\kappa_f, \beta_f, \rho_f$: 係数

a_f : 取水管（フランジ部）の内半径（mm）

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

r_f : 取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離（mm）

表 3.9.3-2 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P'	kN/mm	取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重	0.125
ν	—	ポアソン比	0.3
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径	1675
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1814
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離	1675

上記の評価式に，表 3.9.3-2 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}\beta_f &= \frac{b_f}{a_f} \\ &= \frac{1814}{1675} \\ &= 1.0830\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_f &= \frac{r_f}{a_f} \\ &= \frac{1675}{1675} \\ &= 1.0000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\kappa_f &= \beta_f^2 \frac{1 + (1 + \nu) \ln \beta_f}{1 - \nu + (1 + \nu) \beta_f^2} \\ &= 1.1063^2 \frac{1 + (1 + 0.3) \ln 1.0830}{1 - 0.3 + (1 + 0.3) \times 1.0830^2} \\ &= 0.58184\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{rf} &= \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-1 + (1 + \nu) \kappa_f + (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right] \\ &= \frac{0.125 \times 1675 \times 1.0830}{2} \left[-1 + (1 + 0.3) \times 0.60433 + (1 - 0.3) \frac{0.60433}{1^2} - (1 + 0.3) \ln 1 \right] \\ &= 18.85 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\theta f} &= \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-\nu + (1 + \nu) \kappa_f - (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right] \\ &= \frac{0.125 \times 1675 \times 1.1063}{2} \left[-0.3 + (1 + 0.3) \times 0.60433 - (1 - 0.3) \frac{0.60433}{1^2} - (1 + 0.3) \ln 1 \right] \\ &= 5.66 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

(3) 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集（土木学会，1986年）」に基づき以下の式より算出する。また，取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.3-3 に示す。

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{M_{rf}^2 + M_{\theta f}^2}}{Z_f}$$

$$Z_f = \frac{t_f^2}{6}$$

ここで，

σ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度（kN/mm²）

M_{rf} : 取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

$M_{\theta f}$: 取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

Z_f : 取水管（フランジ部）の断面係数（mm³/mm）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

表 3.9.3-3 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
M_{rf}	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント	18.85
$M_{\theta f}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント	5.66
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46

上記の評価式に，表 3.9.3-3 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{46^2}{6} \\ &= 352.7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \frac{\sqrt{M_{rf}^2 + M_{\theta f}^2}}{Z_f} \\ &= \frac{\sqrt{18.85^2 + 5.66^2}}{352.7} \\ &= 0.0558 \text{ kN/mm}^2 \\ &\doteq 56 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(4) 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度は，以下の式より算出する。また，取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.3-4 に示す。

$$\tau_f = \frac{S_f}{A_3}$$

$$A_3 = t_f \cdot l_f$$

$$l_f = \pi \cdot (D_i + 2t_p)$$

ここで，

τ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度（kN/mm²）

S_f : 取水管（フランジ部）に作用するせん断力（= P）（kN）

P : 取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重（kN）

A_3 : 取水管（フランジ部）付け根の断面積（mm²）

D_i : 取水管（フランジ部）の管内径（mm）

t_p : 取水管（管胴部）の管厚（mm）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

l_f : 取水管（フランジ部）付け根の周長（mm）

表 3.9.3-4 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
S_f	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力	1452
D_i	mm	取水管（フランジ部）の管内径	3350
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚	24
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46

上記の評価式に，表 3.9.3-4 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} l_f &= \pi (D_i + 2t_p) \\ &= 3.1416 \times (3350 + 2 \times 24) \\ &= 10675 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 &= t_f \cdot l_f \\ &= 46 \times 10675 \\ &= 491050 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_f &= \frac{S_f}{A_3} \\ &= \frac{1452}{491050} \\ &= 0.00296 \text{ kN/mm}^2 \\ &\doteq 3 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

3.9.4 取水管（管胴部）

取水管（管胴部）には，取水管（管胴部）に生じる曲げモーメントに加え，取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントを考慮する。取水管（管胴部）の検討では，1号機取水槽北側壁を固定端とした片持ち梁として，管軸方向（水平方向）及び管軸直交方向（鉛直方向）に対する耐震評価を実施する。

評価対象位置図を図 3.9.4-1 に，取水管（管胴部）のモデル図を図 3.9.4-2 に示す。

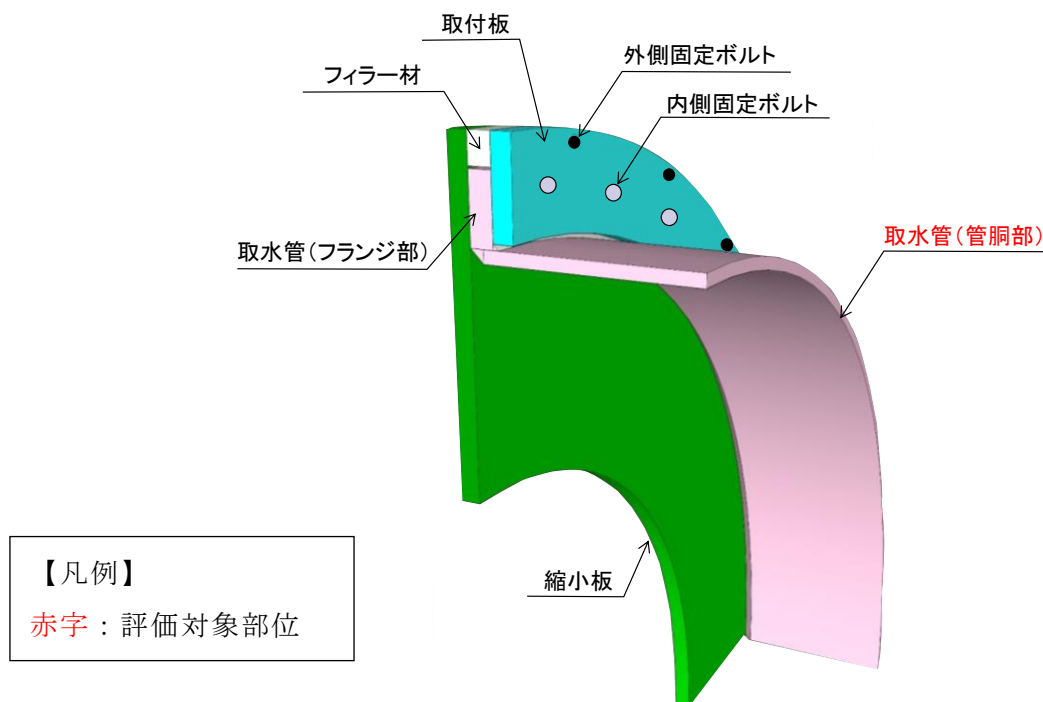


図 3.9.4-1 評価対象位置図（取水管（管胴部））

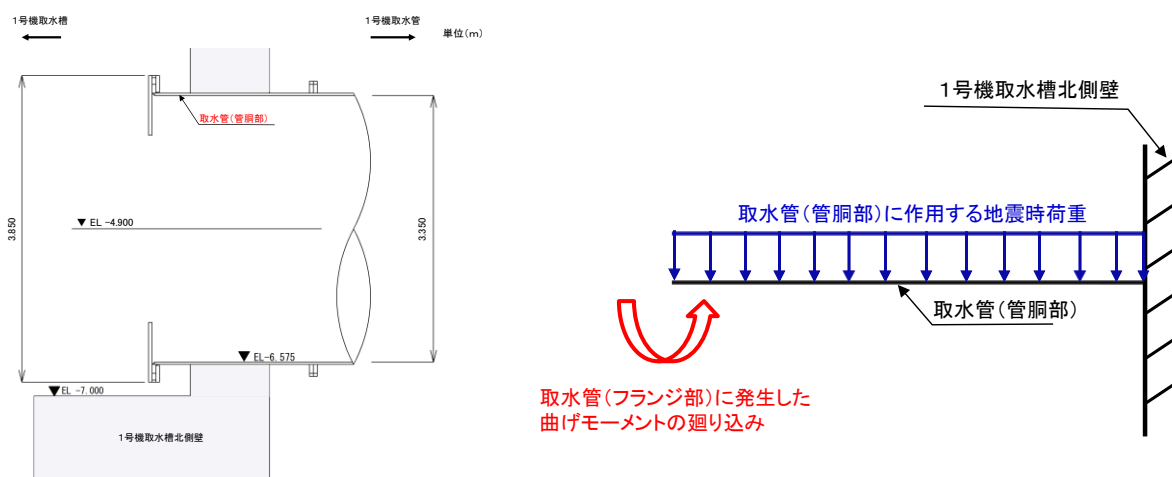


図 3.9.4-2 取水管（管胴部）のモデル図

(1) 取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度

取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度は、以下の式より算出する。また、取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.4-1 に示す。

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{dh}^2 + \sigma_{dv}^2} + \sigma_t + \sigma_f$$

$$\sigma_{dv} = \frac{M_{dv}}{Z_d}$$

$$\sigma_{dh} = \frac{M_{dh}}{Z_d}$$

$$M_{dv} = \frac{(W_1 + P_1) \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right)$$

$$M_{dh} = \frac{P_1 \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right)$$

$$Z_d = \frac{\pi}{32 \cdot a_1} \cdot (a_1^4 - b_1^4)$$

$$\sigma_t = \frac{P_3}{A}$$

$$A = (a_1^2 - b_1^2) \times \frac{\pi}{4}$$

ここで、

σ_d : 取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度 (N/mm²)

σ_{dh} : 取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度 (N/mm²)

σ_{dv} : 取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度 (N/mm²)

σ_t : 縮小板に作用する地震時荷重により取水管（管胴部）に生じる最大引張応力度 (N/mm²)

σ_f : 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントにより取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度 (N/mm²)

M_{dh} : 取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント (kN・mm/mm)

M_{dv} : 取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント (kN・mm/mm)

W_1 : 取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む） (kN)

- P_1 : 取水管（管胴部）に作用する地震時荷重（kN）
 L_d : 取水管（管胴部）の張り出し長さ（mm）
 P_2 : 取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重（kN）
 L_f : 取水管（フランジ部）の外周長（mm）
 Z_d : 取水管（管胴部）の断面係数（mm³）
 a_1 : 1号機取水管の外径（mm）
 b_1 : 1号機取水管の内径（mm）
 P_3 : 縮小板に作用する地震時荷重（kN）
 A : 取水管（管胴部）の作用面積（mm²）

表 3.9.4-1 取水管（管胴部）に生じる曲げ応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
σ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントにより取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度	205
W_1	kN	取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）	9
P_1	kN	取水管（管胴部）に作用する地震時荷重	352
L_d	mm	取水管（管胴部）の張り出し長さ	450
P_2	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重	70
P_3	kN	縮小板に作用する地震時荷重（kN）	1420
a_1	mm	1号機取水管の外径	3398
b_1	mm	1号機取水管の内径	3350

上記の評価式に、表 3.9.4-1 の入力値を代入すると取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 Z_d &= \frac{\pi}{32 \cdot a_1} \cdot (a_1^4 - b_1^4) \\
 &= \frac{3.1416}{32 \times 3398} \times (3398^4 - 3350^4) \\
 &= 213076705.2 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{dv} &= \frac{(W_1 + P_1) \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right) \\
&= \frac{(9 + 352) \times 450}{2} + 70 \times \left(450 + \frac{50}{2}\right) \\
&= 114475 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{dh} &= \frac{P_1 \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right) \\
&= \frac{352 \times 450}{2} + 70 \times \left(450 + \frac{50}{2}\right) \\
&= 112450 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A &= (a_1^2 - b_1^2) \times \frac{\pi}{4} \\
A &= (3398^2 - 3350^2) \times \frac{3.1416}{4} \\
&= 254394.2 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_t &= \frac{P_3}{A} \\
&= \frac{1420}{254394.2} \\
&= 0.00582 \text{ kN/mm}^2 \\
&= 6 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{dv} &= \frac{M_{dv}}{Z_d} \\
&= \frac{114,475}{213076705.2} \\
&= 0.000537 \text{ kN/mm}^2 \\
&= 0.537 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{dh} &= \frac{M_{dh}}{Z_d} \\
&= \frac{112450}{213076206.9} \\
&= 0.000528 \text{ kN/mm}^2 \\
&= 0.528 \text{ kN/mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_d &= \sqrt{\sigma_{dh}^2 + \sigma_{dv}^2} + \sigma_t + \sigma_f \\
&= \sqrt{0.537^2 + 0.528^2} + 6 + 205 \\
&= 211.75 \text{ N/mm}^2 \\
&\approx 212 \text{ N/mm}^2
\end{aligned}$$

(2) 取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度

取水管（管胴部）に生じるせん断応力度は，以下の式より算出する。また，取水管（管胴部）に生じるせん断応力度の計算に用いる入力値を表 3.9.4-2 に示す。

$$\tau_d = \sqrt{\tau_{dv}^2 + \tau_{dh}^2}$$

$$\tau_{dv} = \frac{S_{dv} + W_1}{A_5}$$

$$\tau_{dh} = \frac{S_{dh}}{A_5}$$

$$S_{dv} = S_{dh} = P$$

$$A_5 = \frac{\left\{ \left(\frac{D_i}{2} + t_p \right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\}}{2}$$

ここで，

τ_d : 取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度（N/mm²）

S_{dv} : 取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じるせん断力（kN）

S_{dh} : 取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じるせん断力（kN）

W_1 : 取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）（kN）

A_5 : 取水管（管胴部）の有効せん断面積（mm²）

D_i : 取水管（管胴部）の管内径（mm）

t_p : 取水管（管胴部）の管厚（mm）

表 3.9.4-2 取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
S_{dv}, S_{dh}	kN	取水管（管胴部）に作用する地震時荷重	421
D_i	mm	取水管（管胴部）の管内径	3350
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚	24

上記の評価式に，表 3.9.4-2 の入力値を代入すると取水管（管胴部）に生じる曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 A_5 &= \frac{\left\{ \left(\frac{D_i}{2} + t_p \right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\}}{2} \\
 &= \frac{\left\{ \left(\frac{3350}{2} + 24 \right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{3350}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\}}{2} \\
 &= 127,132.3 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{dv} &= \frac{S_{dv} + W_1}{A_5} \\
 &= \frac{421 + 9}{127132.3} \\
 &= 0.00338 \text{ kN/mm}^2 \\
 &\cong 3.4 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{dv} &= \frac{S_{dv}}{A_5} \\
 &= \frac{421}{127132.3} \\
 &= 0.00331 \text{ kN/mm}^2 \\
 &\cong 3.3 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_d &= \sqrt{\tau_{dv}^2 + \tau_{dh}^2} \\
 &= \sqrt{3.4^2 + 3.3^2} \\
 &= 4.74 \text{ N/mm}^2 \\
 &\cong 5 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

3.10 評価結果

流路縮小工の耐震評価結果を表 3.10-1 に示す。各部材の断面照査を行った結果、すべての部材において応力度が許容限界以下であることを確認した。

表 3.10-1 流路縮小工の耐震評価結果

評価対象部位		発生値 (応力度)		許容応力度		照査値
縮小板	曲げ	157	N/mm ²	235	N/mm ²	0.67
	せん断	3	N/mm ²	135	N/mm ²	0.03
固定ボルト	引張	266	N/mm ²	560	N/mm ²	0.48
取水管 (フランジ部)	曲げ	56	N/mm ²	215	N/mm ²	0.26
	せん断	3	N/mm ²	124	N/mm ²	0.03
取水管 (管胴部)	曲げ	212	N/mm ²	235	N/mm ²	0.90
	せん断	5	N/mm ²	135	N/mm ²	0.04

4. 北側壁の耐震評価

4.1 概要

1号機取水槽において、Sクラス施設である津波防護施設に分類される流路縮小工の間接支持構造物である1号機取水槽北側壁が設計用地震力に対して、構造強度を有することを確認する。

4.2 評価条件

4.2.1 適用規格

1号機取水槽の耐震評価にあたっては、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 JEAG 4601-1987（社団法人 日本電気協会 電気技術基準調査委員会）（以下「JEAG 4601-1987」という。）を適用するが、鉄筋コンクリート部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊の許容限界の一部については、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（2005年6月 土木学会 原子力土木委員会）（以下「土木学会マニュアル2005」という。）及び「コンクリート標準示方書2002」を適用する。充填コンクリートの健全性評価については「コンクリート標準示方書2002」及びコンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕（土木学会 2013年制定）（以下「コンクリート標準示方書2013」という。）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。表4.2.1-1に適用する規格、基準類を示す。

表 4.2.1-1 適用する規格, 基準類

項目	適用する規格, 基準値	備考
使用材料及び材料定数	コンクリート標準示方書 2002	鉄筋コンクリートの材料諸元 (γ , E , ν)
荷重及び荷重の組合せ	コンクリート標準示方書 2002	永久荷重, 偶発荷重等の適切な組み合わせを検討
許容限界	土木学会マニュアル 2005	降伏曲げモーメントを設定し, 発生曲げモーメントが降伏曲げモーメントを下回ることを確認 せん断破壊に対する照査は, 発生せん断力がせん断耐力を下回ることを確認
	コンクリート標準示方書 2002	充填コンクリートの健全性評価のうち引張強度における局所安全係数が 1.0 を超えることを確認
	コンクリート標準示方書 2013	充填コンクリートの健全性評価のうちせん断強度における局所安全係数が 1.0 を超えることを確認
	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)	基礎地盤の支持性能に対する照査は, 基礎地盤に発生する応力が極限支持力度を下回ることを確認
地震応答解析	J E A G 4 6 0 1 - 1987	有限要素法による二次元モデルを用いた時刻歴非線形解析

4.2.2 1号機取水槽構造概要及び補強の概要

(1) 1号機取水槽構造概要

1号機取水槽の平面図を図4.2.2-1に、断面図を図4.2.2-2及び図4.2.2-3に示す。A-A断面及びB-B断面の地質断面図を図4.2.2-4及び図4.2.2-5に示す。

1号機取水槽は、地下2階構造となっており、上部は除じん機エリア、海水ポンプエリア、ストレーナエリアの3エリアに分かれている。下部は水路となっており、除じん機エリアの下部は6連のボックスカルバート構造、海水ポンプエリアの下部は3連のボックスカルバート構造となっている。

1号機取水槽の北側壁は、流路縮小工の間接支持構造物である。北側壁及び流路縮小工の位置図を図4.2.2-6に示す。

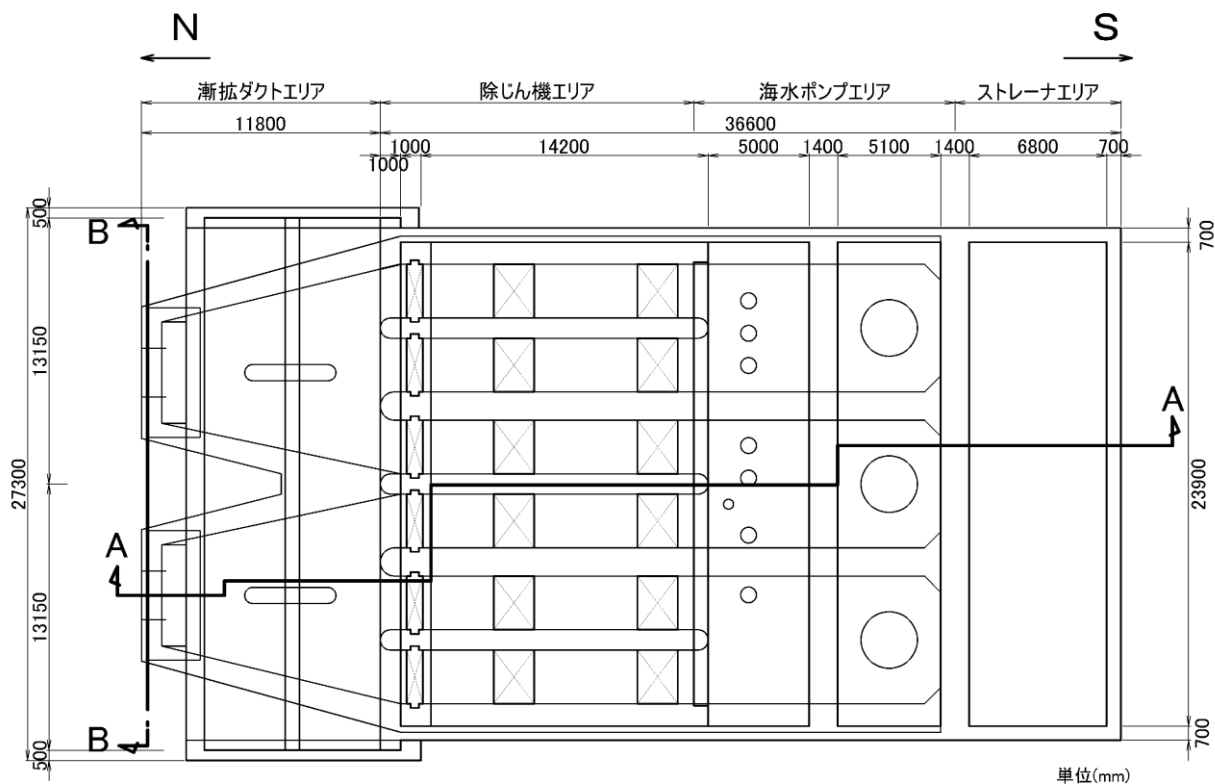


図4.2.2-1 1号機取水槽 平面図

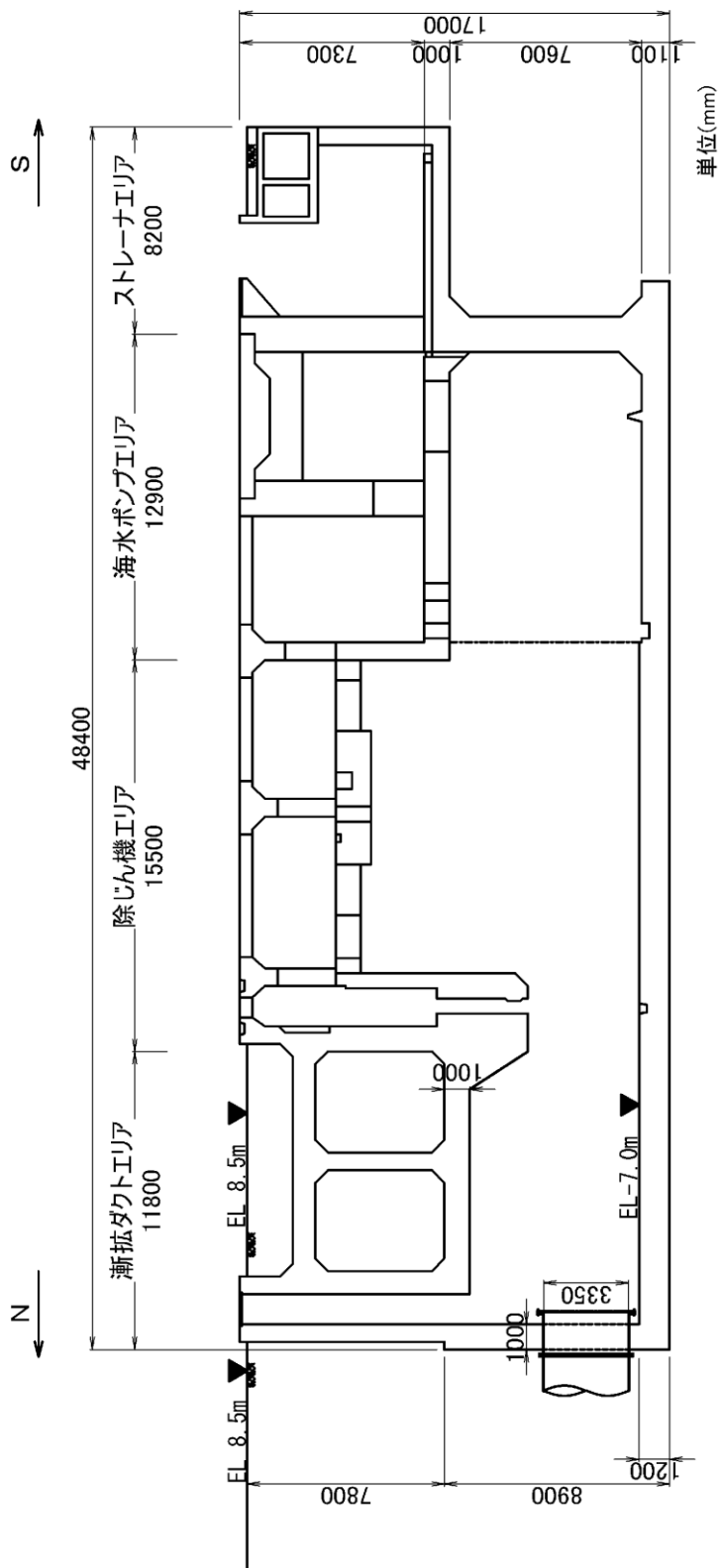


図 4. 2. 2-2 1号機取水槽 断面図(A-A断面)

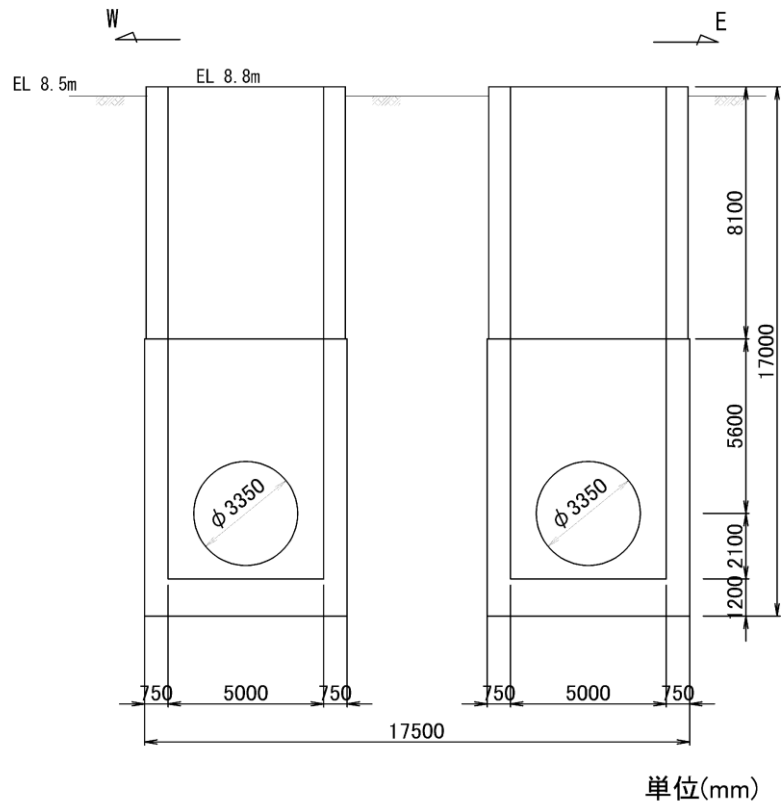
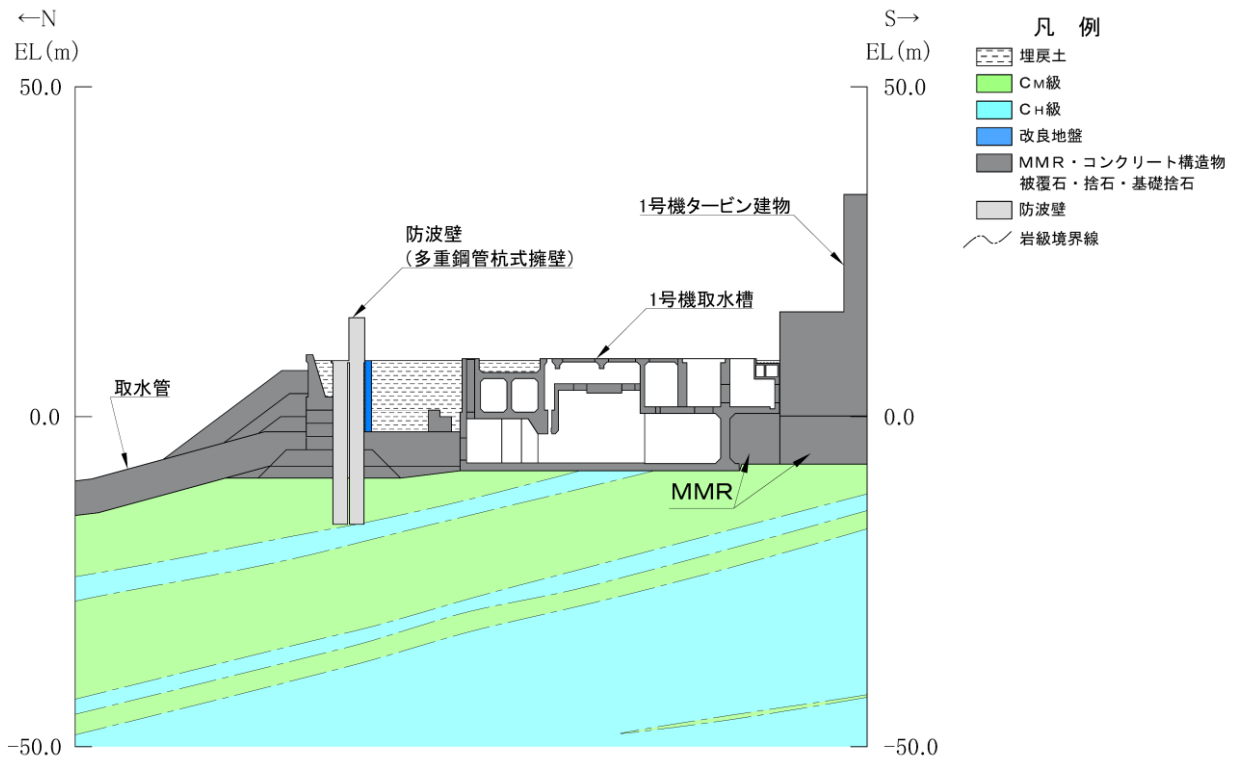
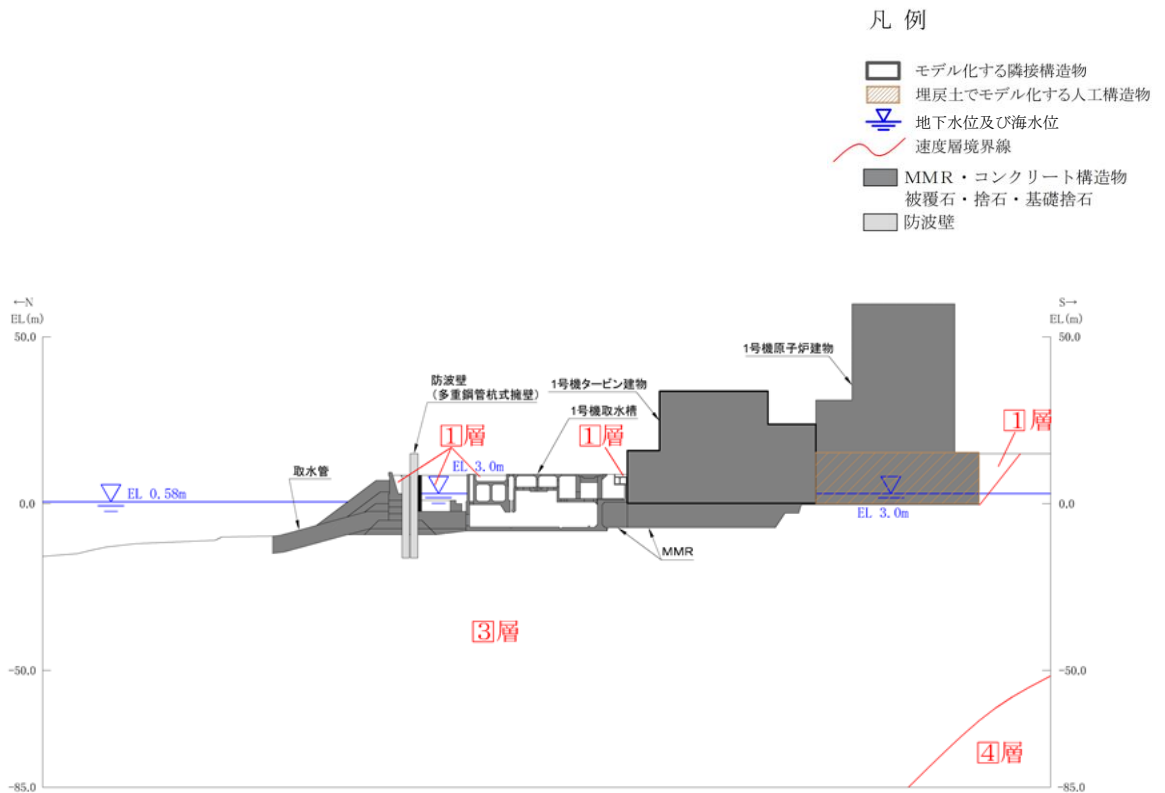


图 4.2.2-3 1号機取水槽 断面图(B-B断面)



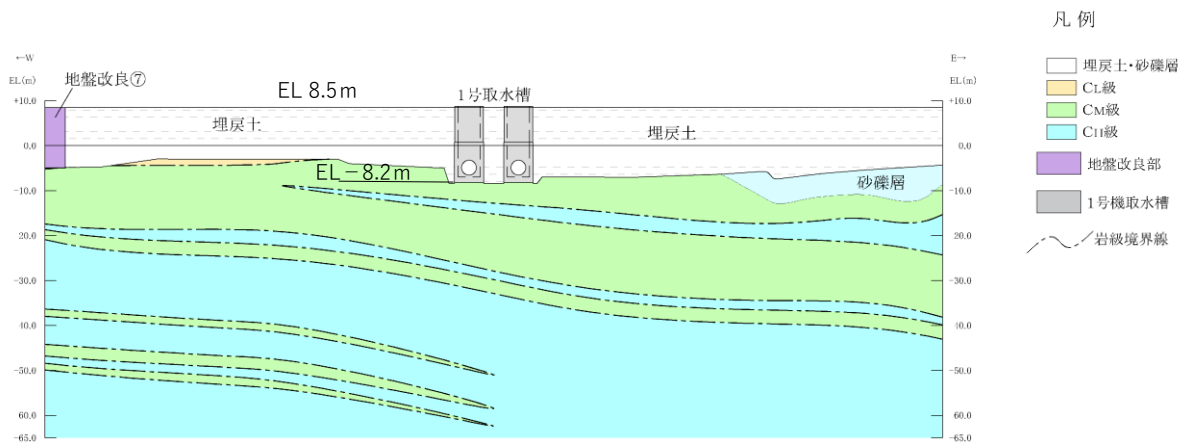
(岩級図)



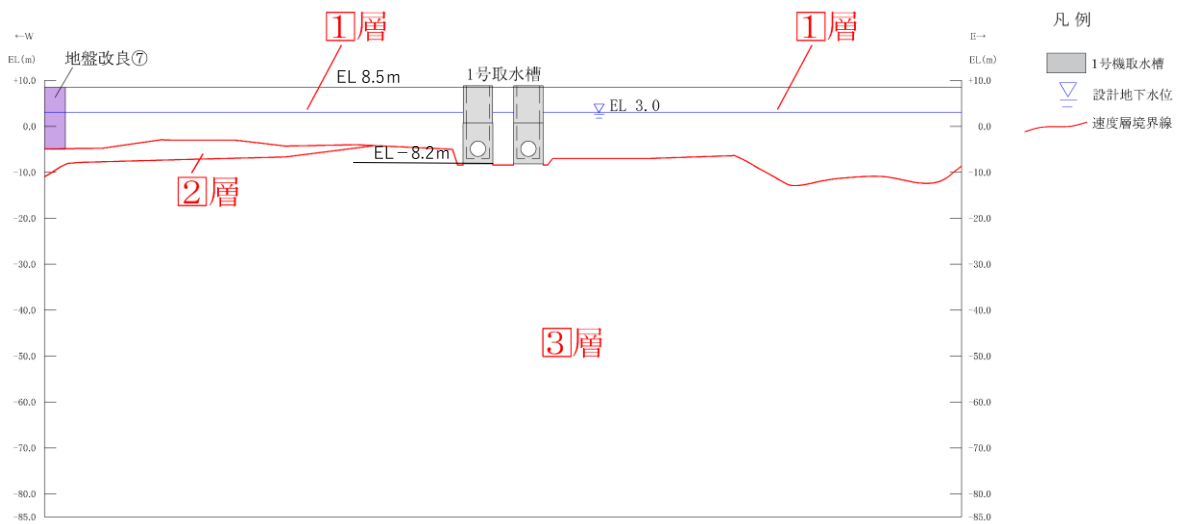
(速度層図)

注：□層については解析モデルでは埋戻土の物性を使用

図 4.2.2-4 1号機取水槽 地質断面図(A-A断面)



(岩級図)



(速度層図)

注：□層については解析モデルでは埋戻土の物性を使用

図 4.2.2-5 1号機取水槽 地質断面図(B-B断面)

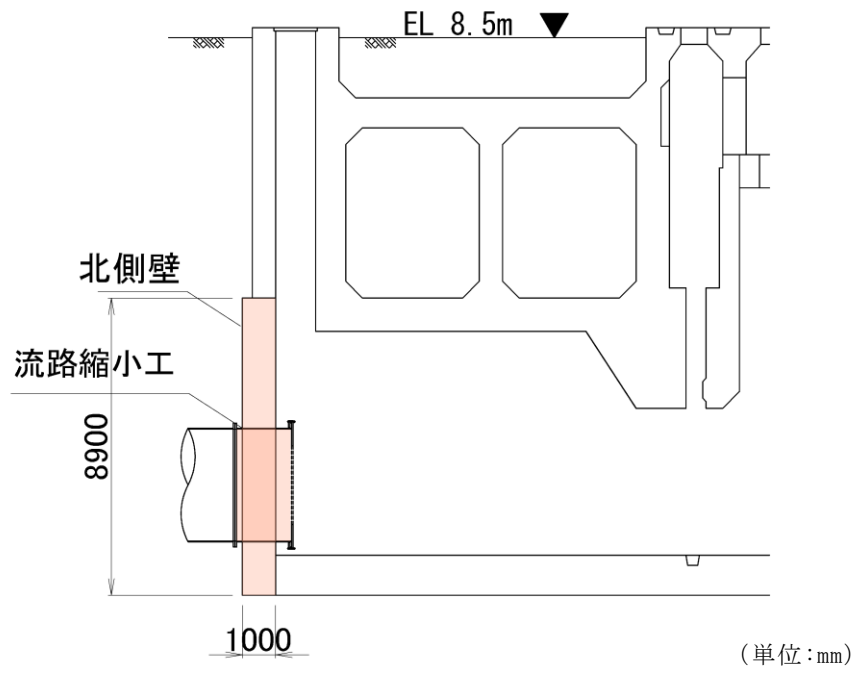


図 4.2.2-6 1号機取水槽流路縮小工及び北側壁の範囲

(2) 1号機取水槽補強概要

1号機取水槽の北側壁は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、取水槽の耐震性を確保するため、後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法、以下「PHb工法」という。）によるせん断補強を実施する。

また、1号機取水槽北側壁と接続する部材の補強として漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。漸拡ダクト部充填コンクリートには流路縮小工の内径と同じ開口を設け、取水機能を確保する。ここで、漸拡ダクト部充填コンクリートの南北方向の幅については、導流壁との干渉を避けたうえで、流路縮小工の内径以上なるように決定した。また、漸拡ダクト部充填コンクリートについては引張強度の照査結果によっては開口補強筋を設置する。

なお、1号機取水槽ピット部については下部に閉塞版を設置したのちに、コンクリートを充填し、閉塞する。

補強工事の一覧表を表4.2.2-1に示す。また、補強工事の詳細図面を図4.2.2-8～図4.2.2-11にPHb配筋図を図4.2.2-12に示す。

表 4.2.2-1 補強工事一覧

部材名	部材位置* ¹	補強工事概要
北側壁	①	PHb* ²
漸拡ダクト部	②	充填コンクリート打設* ³
ピット部	③	充填コンクリート打設
ピット部（閉塞版）	④	ピット部閉塞版コンクリート打設

注記*1：部材位置図については図4.2.2-7に示す。

*2：PHb配筋図については図4.2.2-12に示す。

*3：充填コンクリート内部には流路縮小工と同等の大きさの箱抜きを実施

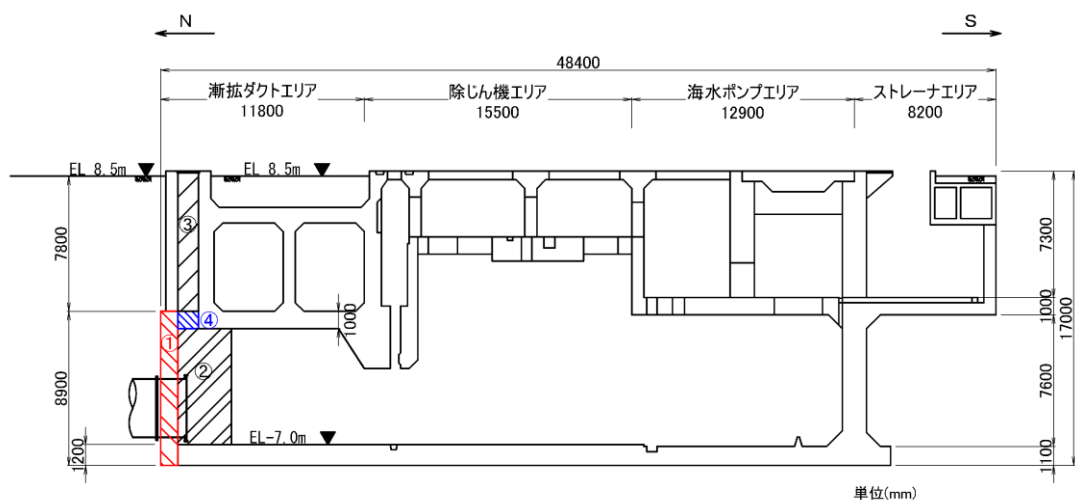


図 4.2.2-7 補強工事实施部材位置

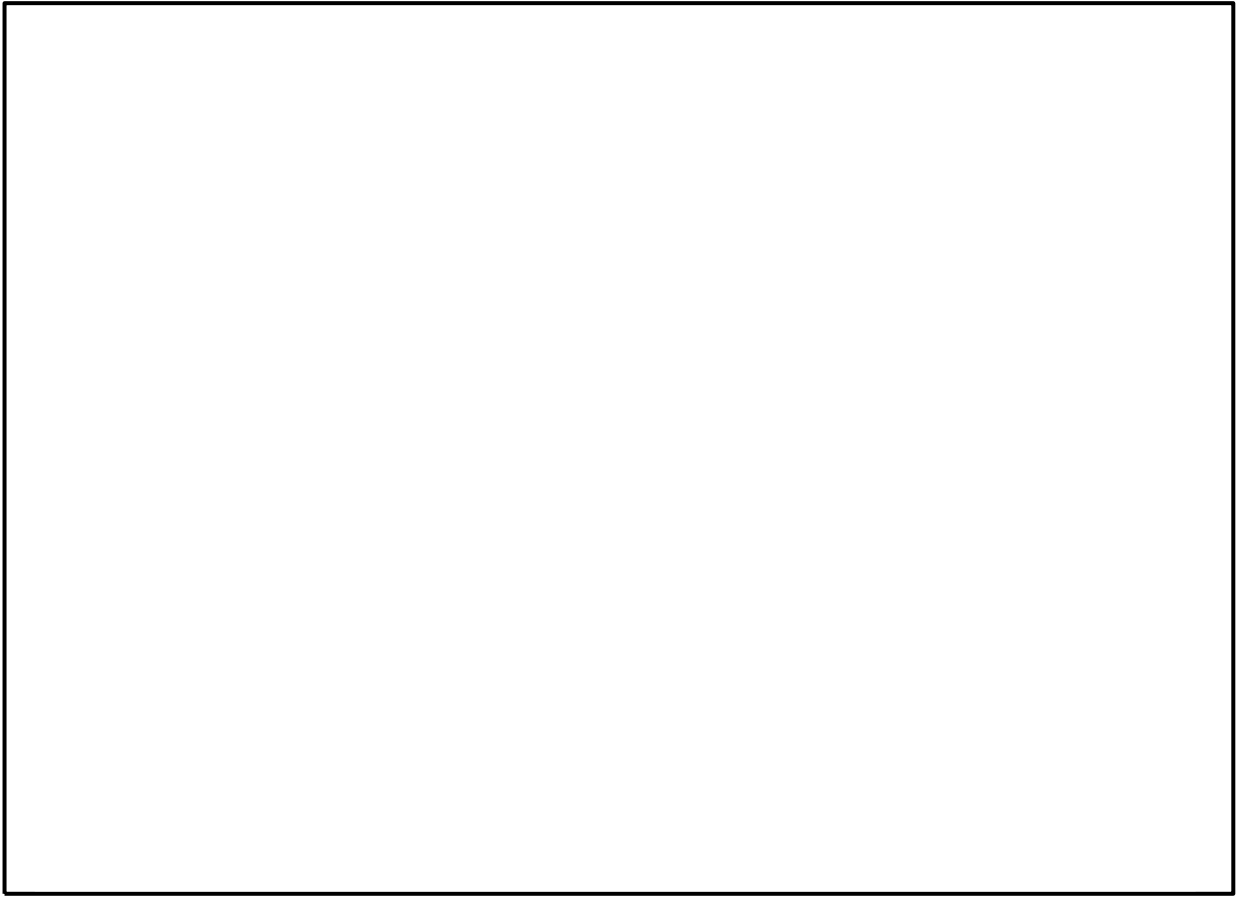


图 4.2.2-8 補強工事实施後平面図

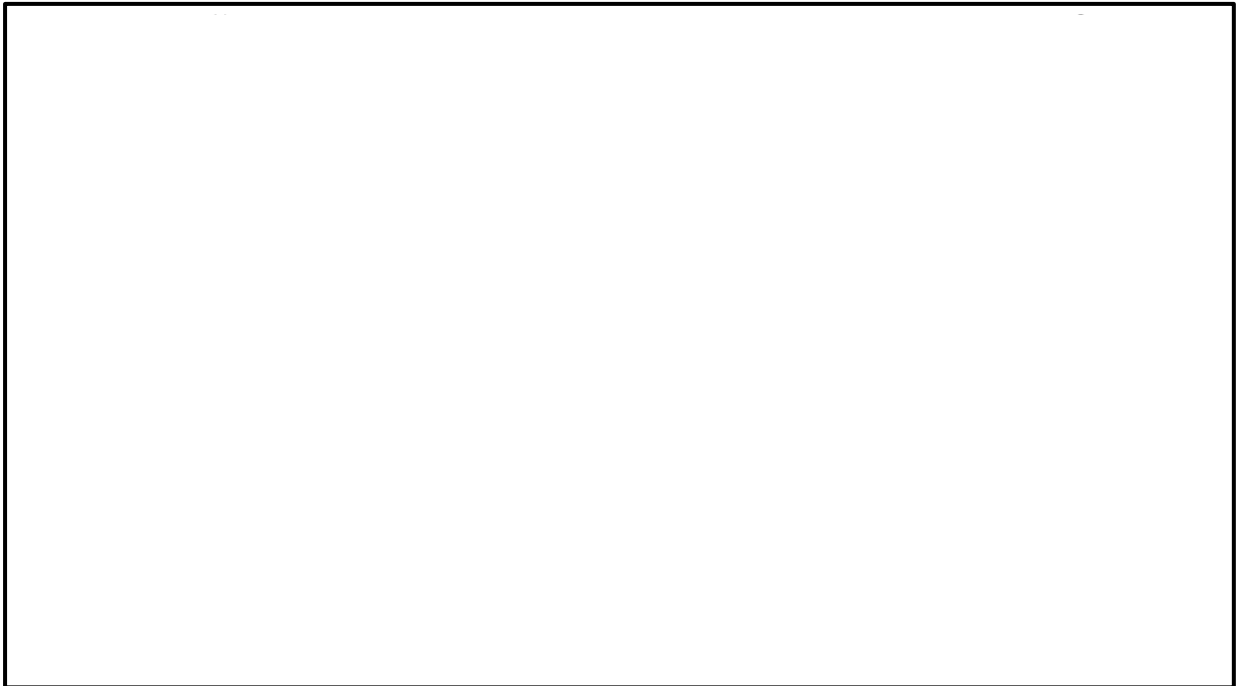


图 4.2.2-9 補強工事实施図 (A - A 断面)

2.3.1-65

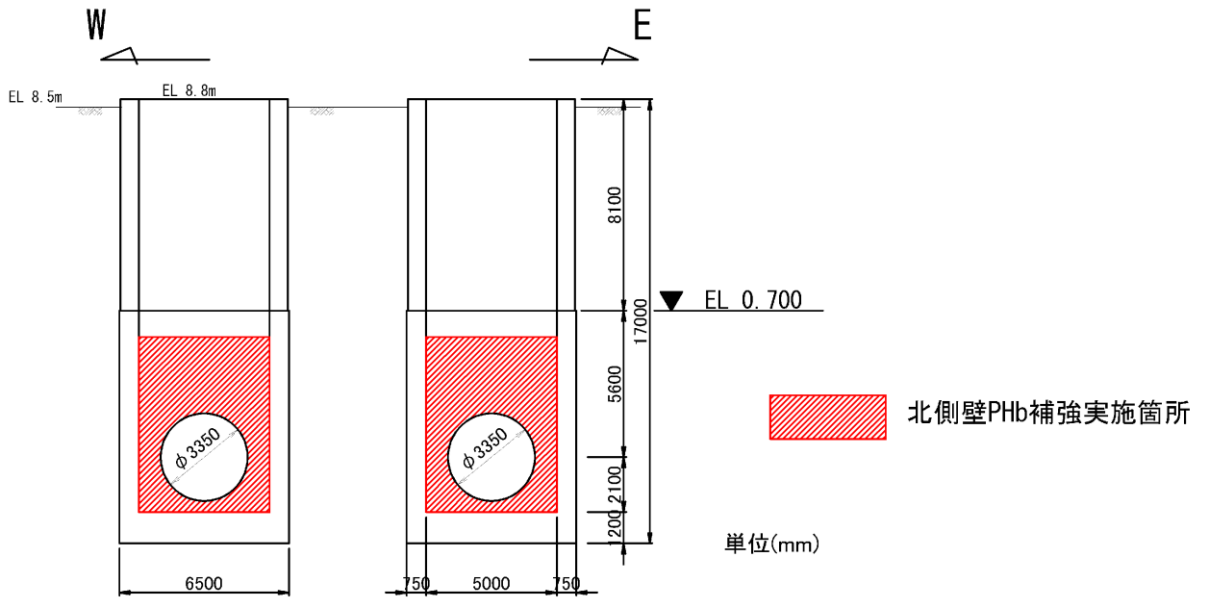


图 4.2.2-10 補強工事実施図 (B-B断面)

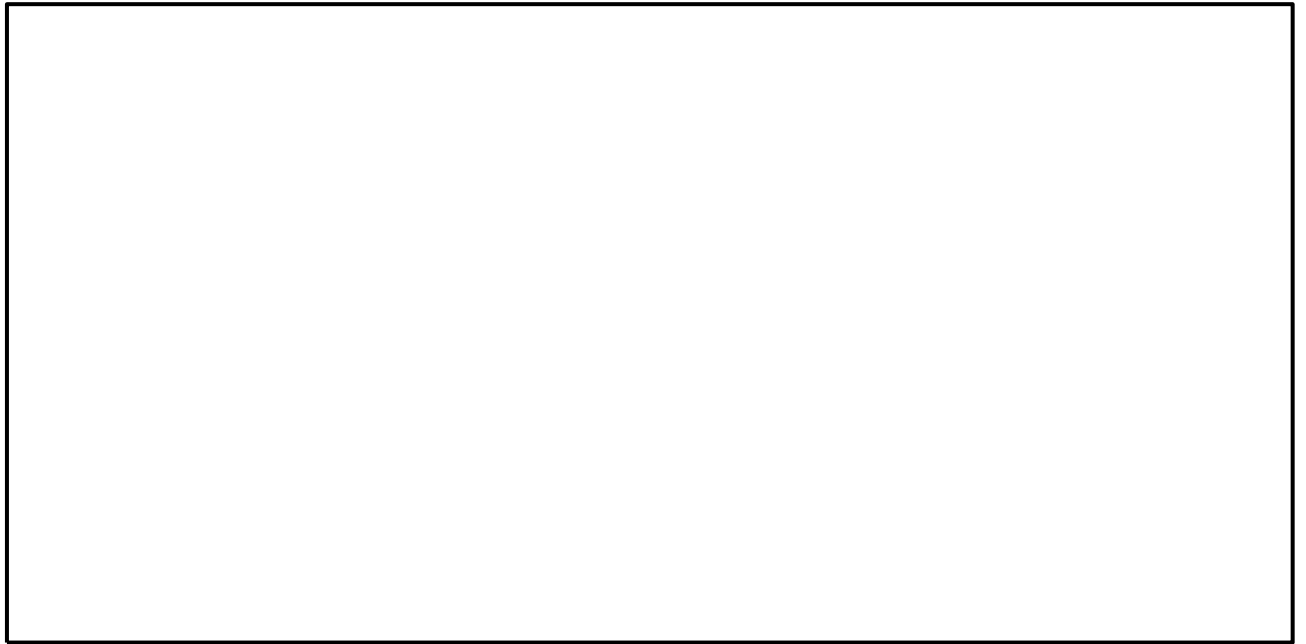
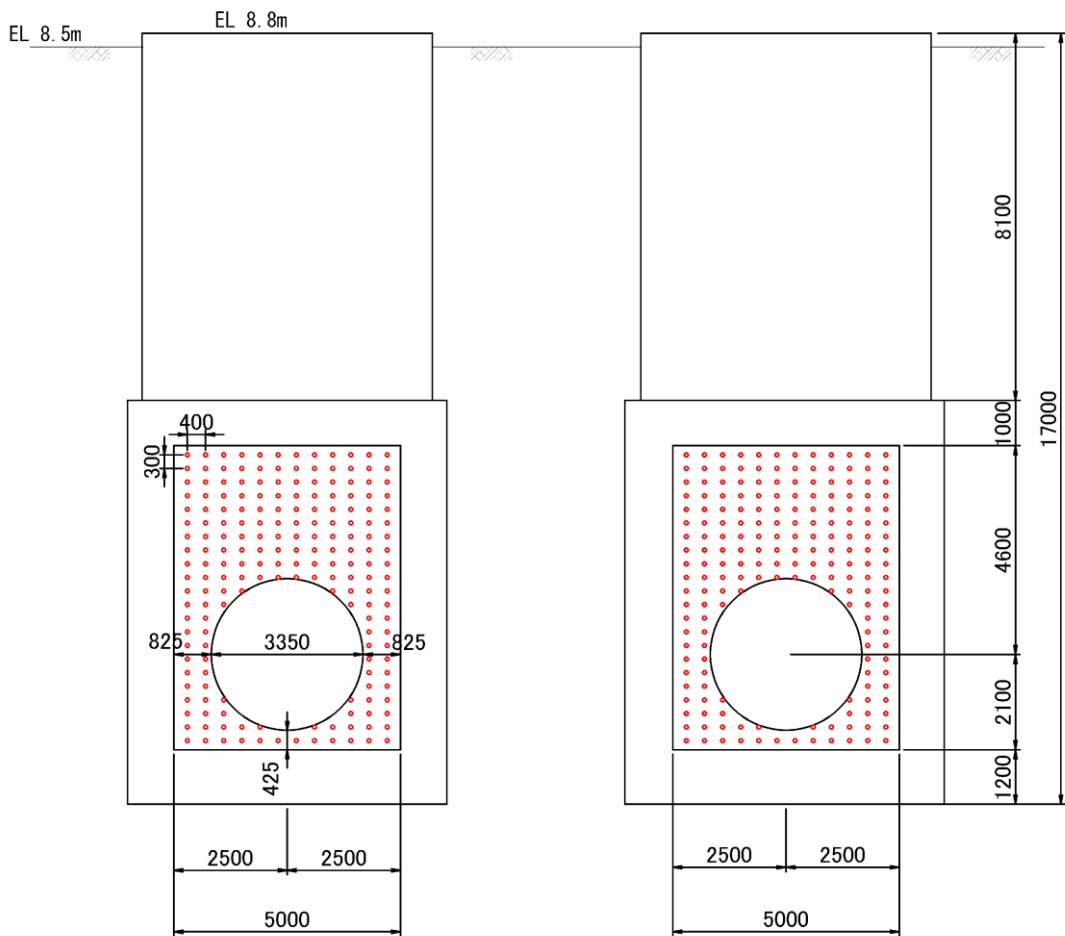
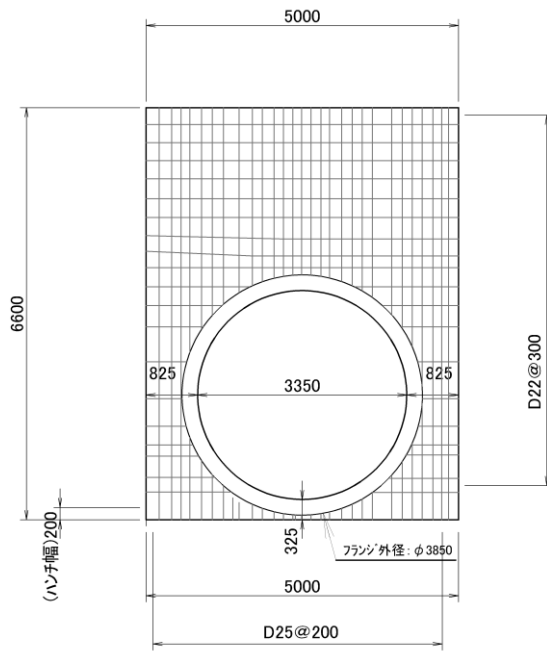


图 4.2.2-11 補強工事実施図 (C-C断面)



○ : PHb 工法 : D19@400×300, SD345

(単位:mm)

図 4.2.2-12 1号機取水槽北側壁後施工せん断補強筋配筋図
2.3.1-67

4.2.3 評価対象部材の選定

1号機取水槽の耐震評価については、Sクラス施設である津波防護施設に分類される流路縮小工の間接支持構造物である北側壁が設計用地震力に対して、構造強度を有することを確認する。また、1号機取水槽北側壁の健全性評価の前提として、北側壁の南側に設置した充填コンクリートの健全性についても確認を行う。

図4.2.3-1及び図4.2.3-2に評価対象部材を示す。

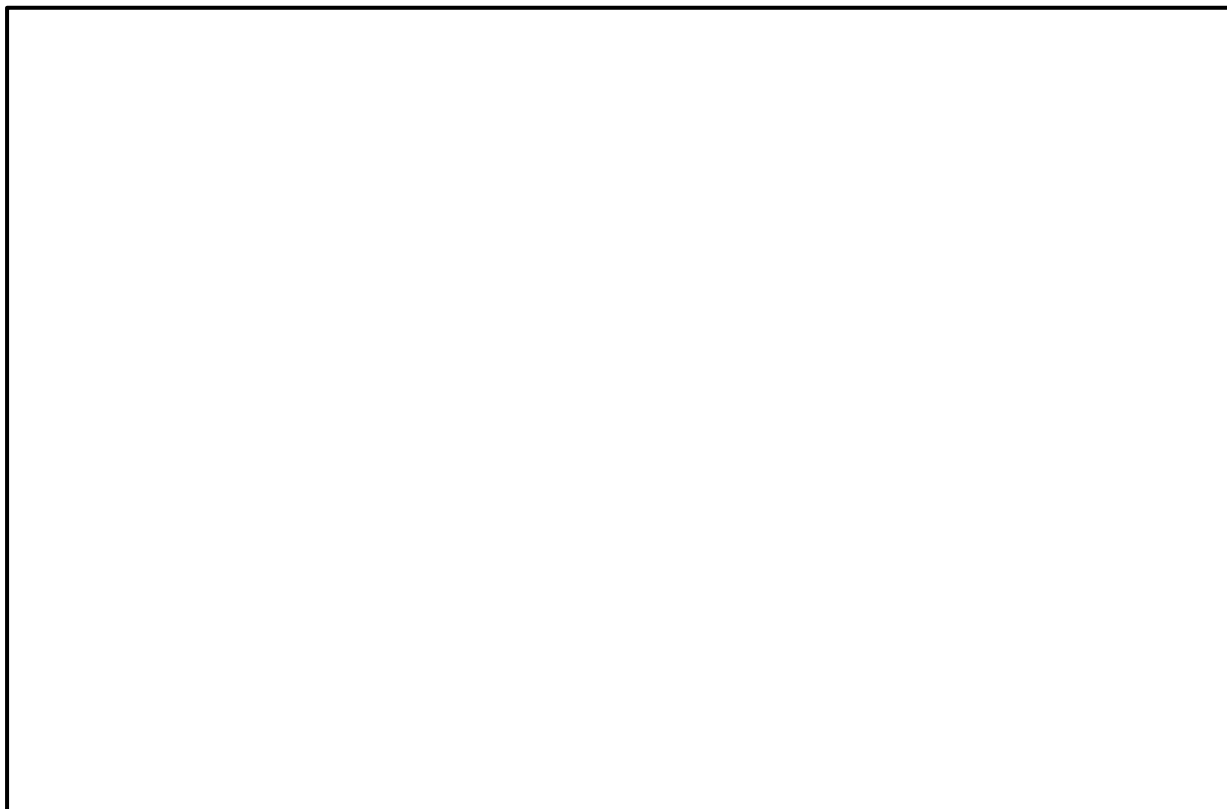


图 4.2.3-1 1 号機取水槽評価対象部材平面図



图 4.2.3-2 1 号機取水槽評価対象部材断面図 (A - A 断面)

4.2.4 評価対象断面の選定

1号機取水槽北側壁に対して、弱軸断面となる南北方向断面を評価対象断面として選定する。

4.2.5 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 4.2.5-1 に、材料の物性値を表 4.2.5-2 に示す。ここで、ピット部及び漸拡ダクト部の充填コンクリートのヤング係数については、構造物と同様な値を設定する。また、ピット部及び漸拡ダクト部の充填コンクリートの単位体積重量については、開口補強筋を設置する可能性もあることから保守的に鉄筋コンクリートの単位体積重量を使用する。

表 4.2.5-1 使用材料

材料		仕様
構造物	コンクリート	設計基準強度 20.6N/mm ²
	充填コンクリート	設計基準強度 21.0N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 4.2.5-2 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物 (鉄筋コンクリート 構造物)	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
構造物 (ピット部及び漸拡 ダクト部充填コンク リート) * ³	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	
MMR	2.20×10 ⁴	22.6* ²	

注記*1：鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*2：無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*3：保守的にヤング係数については鉄筋コンクリート構造物と同様の値を設定し
単位体積重量については開口補強筋を設置する可能性もあることから鉄筋コ
ンクリートの重量と同様の値を設定する。

4.2.6 地盤物性値

地盤については，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。地盤の物性値を表 4.2.6-1 及び表 4.2.6-2 に示す。

表 4.2.6-1 地盤の解析用物性値（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 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	動せん断弾性係数 G_d (× 10 ⁵ kN/m ²)	減衰定数 h (%)
□層	1600	3600	24.5	0.377	64.0	3
□層	1950	4000	24.5	0.344	95.1	3
□層*	2000	4050	26.0	0.339	105.9	3
□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 4.2.6-2 地盤の有効応力解析における解析用物性値（埋戻土）

		解析用物性値	
物理特性	密度 ρ^{*1} (g/cm ³)	2.11 【2.00】	
	間隙率 n	0.45	
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma}^{*2} (kN/m ²)	163,600	
	基準平均有効拘束圧 $\rho_{ma}'^{*2}$ (kN/m ²)	98.0	
	ポアソン比 ν	0.33	
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.24	
強度特性	粘着力 c' (N/mm ²)	0.00	
	内部摩擦角 ϕ' (°)	39.75	
液状化特性	変相角 ϕ_p (°)	28.0	
	液状化パラメータ ^{*2}	S_1	0.005
		w_1	7.153
		P_1	0.500
		P_2	0.887
		C_1	3.494

注記*1：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を表す。

*2：動せん断弾性係数，基準平均有効拘束圧及び液状化パラメータは代表的数値を示す。

4.2.7 地下水位

設計地下水位は，VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。設計地下水位の一覧を表 4.2.7 に示す。

表 4.2.7 設計地下水位の一覧

施設名称	解析断面	設計地下水位 (EL m)
1号機取水槽	A-A断面	3.0

4.2.8 耐震評価フロー

1号機取水槽の耐震評価フローを図4.2.8-1に示す。

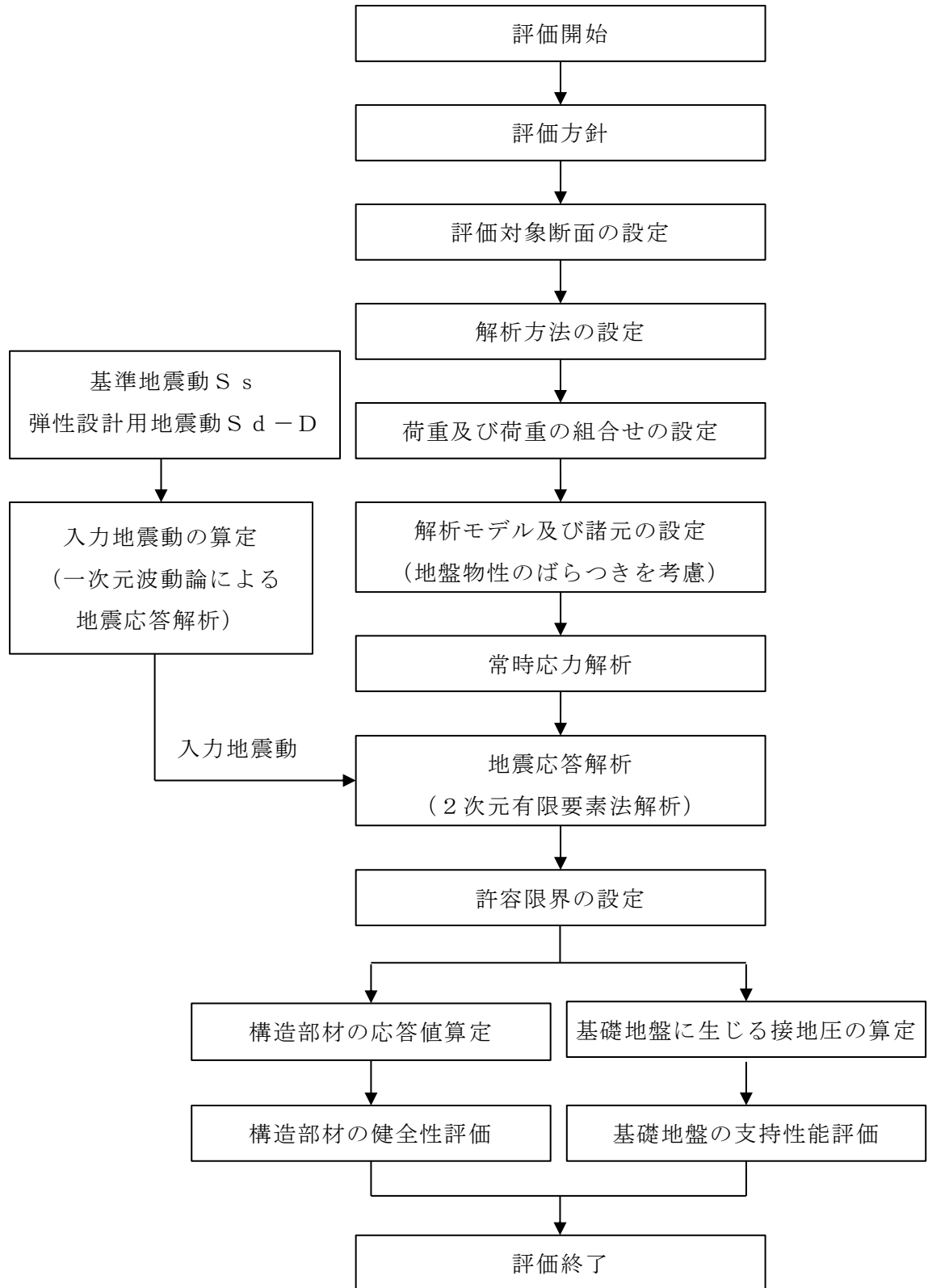


図 4.2.8-1 1号機取水槽北側壁の耐震評価フロー

4.3 地震応答解析

4.3.1 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二次元有限要素法により、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こととし、解析手法については、図 4.3.1-1 に示す解析手法の選定フローに基づき選定する。

A-A 断面は、設計地下水位以深の液状化対象層が施設と接するため解析手法のフローに基づき「⑤有効応力解析」を選定する。なお、有効応力解析に加え、液状化しない場合の影響を確認するため、全応力解析も実施する。

構造部材の非線形特性については、鉄筋コンクリートの $M-\phi$ 関係を適切にモデル化する。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、このうち岩盤及びMMRについては、線形でモデル化する。埋戻土については、地盤の剛性及び減衰のひずみ依存性を適切に考慮できるマルチスプリング要素でモデル化することとし、ばね特性は双曲線モデルを用いて非線形性を考慮する。

地震応答解析の解析コードについては、有効応力解析及び全応力解析で「FLIP」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 4.3.1-2 に示す。

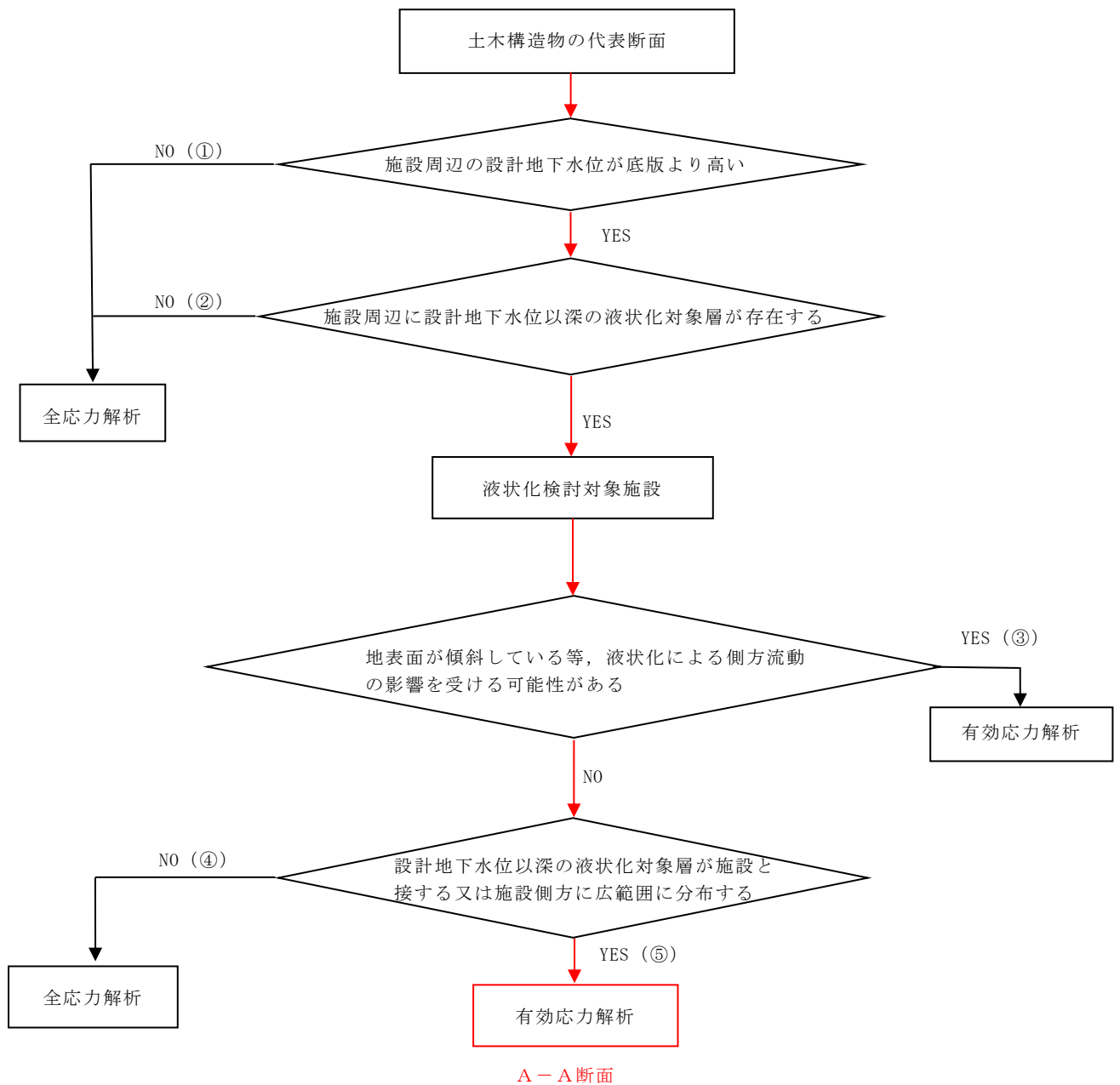


図 4.3.1-1 解析手法の選定フロー

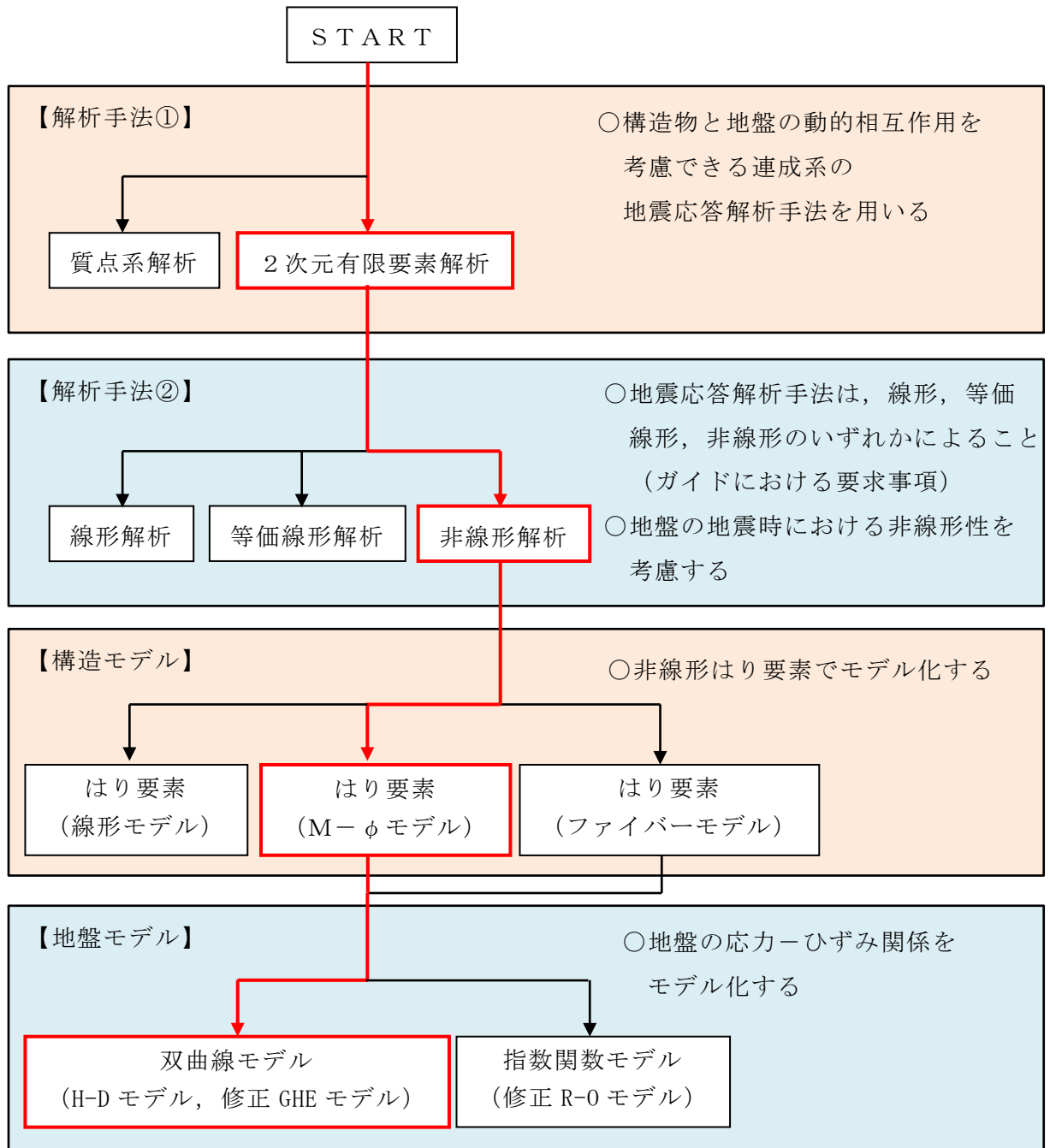


図 4.3.1-2 地震応答解析手法の選定フロー

4.3.2 地震応答解析モデルの設定

(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4.3.2-1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。

1号機取水槽の解析モデル領域については、南側に1号機タービン建物及び1号機原子炉建物が隣接しているため、上記の考え方に加えて、隣接構造物外側の地盤応答を適切に表現できる範囲までモデル化領域を拡大して設定する。

なお、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、土木学会マニュアルに従い、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。

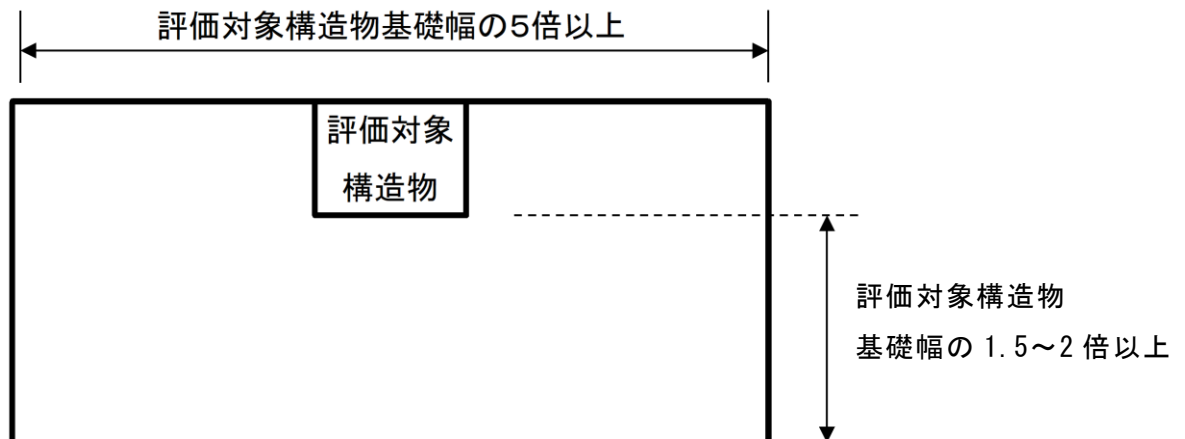


図 4.3.2-1 モデル化範囲の考え方

有効応力解析において，二次元地震応答解析モデルは，検討対象構造物とその周辺地盤をモデル化した不整形地盤に加え，この不整形地盤の左右に広がる地盤をモデル化した自由地盤で構成される。この自由地盤は，不整形地盤の左右端と同じ地質構成を有する一次元地盤モデルである。二次元地震応答解析における自由地盤の常時応力解析から不整形地盤の地震応答解析までのフローを図 4.3.2-2 に示す。

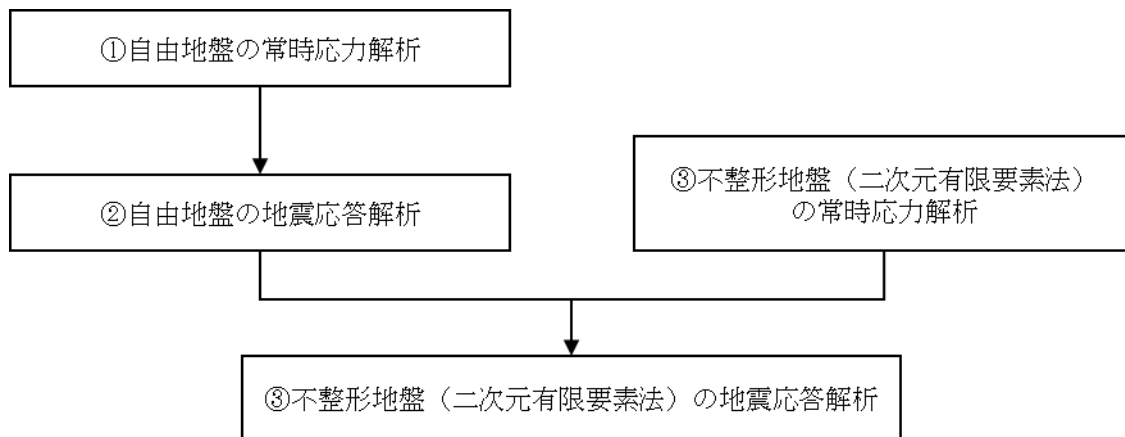


図 4.3.2-2 自由地盤の常時応力解析から不整形地盤（二次元有限要素法）の地震応答解析までのフロー（有効応力解析）

(2) 境界条件

a. 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 4.3.2-3 に示す。

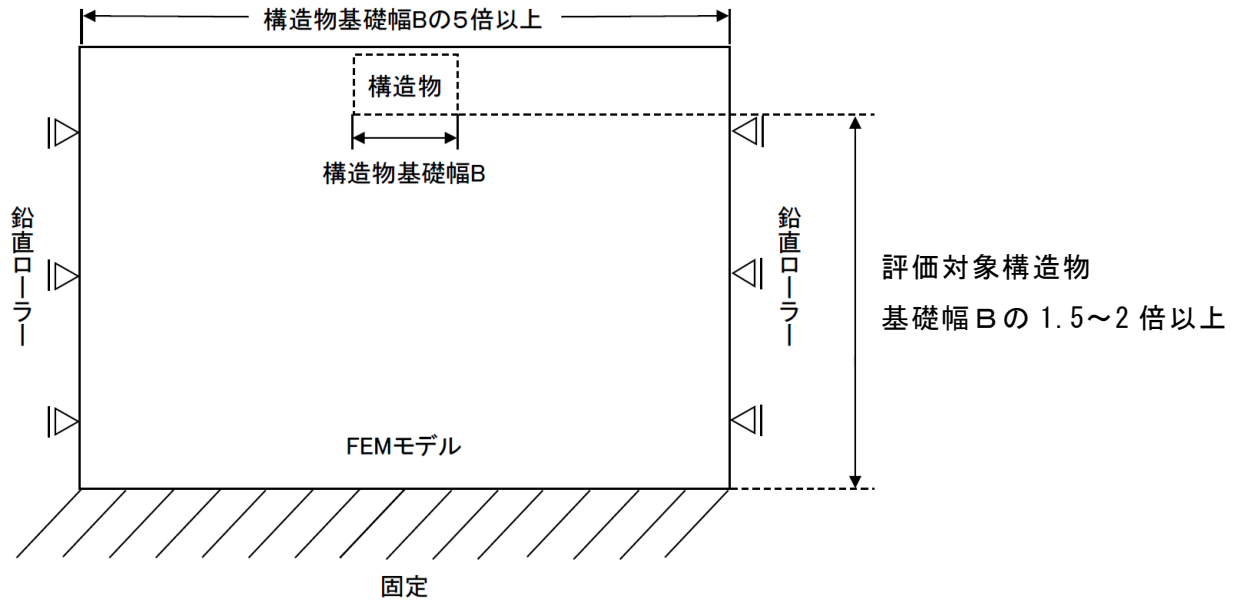


図 4.3.2-3 常時応力解析における境界条件の概念図

b. 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。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。

境界条件の概念図を図 4.3.2-4 に示す。

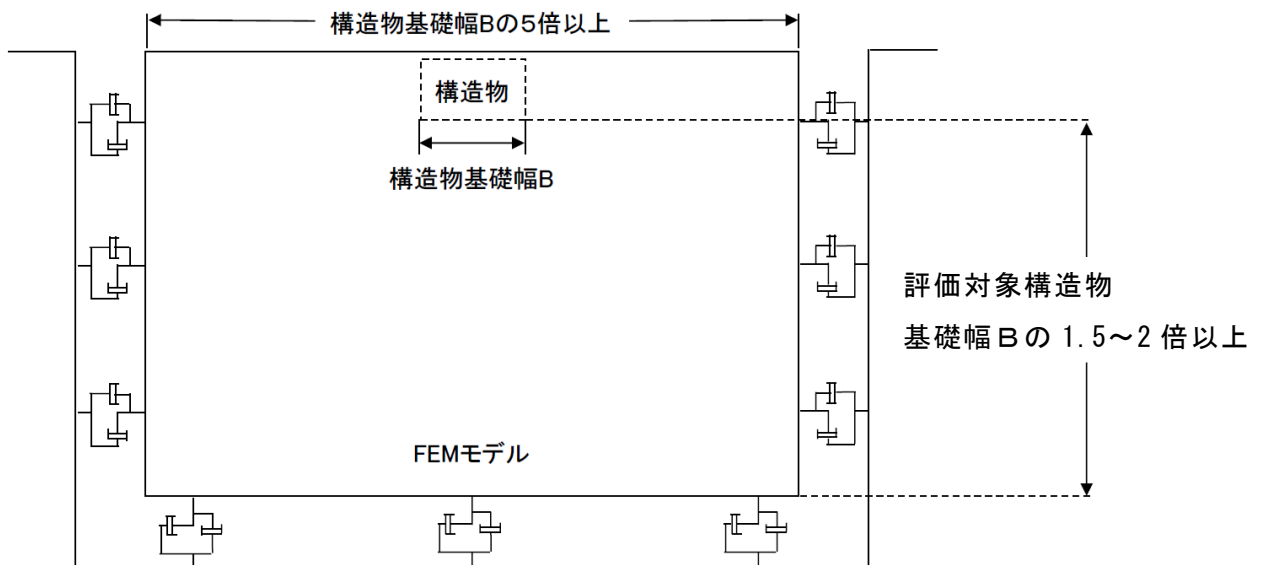


図 4.3.2-4 地震応答解析における境界条件の概念図

(3) 構造物のモデル化

1号機取水槽北側壁等の鉄筋コンクリート部材は非線形はり要素及び線形はり要素でモデル化する。また、漸拡ダクト部充填コンクリート及びピット部充填コンクリートは平面ひずみ要素でモデル化する。

なお、1号機取水槽の全体的な剛性を反映するため、妻壁を平面ひずみ要素でモデル化するが、漸拡ダクトエリアの妻壁については、評価対象部材に近接していることから保守的にモデル化しない。

(4) 隣接構造物のモデル化

A-A断面において、1号機タービン建物及び防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は取水槽の隣接構造物に該当するため、1号機タービン建物及び防波壁（多重鋼管杭式擁壁）をモデル化する。

以下に、それぞれの構造物のモデル化方針を示す。

a. 1号機タービン建物

A-A断面の解析モデル範囲において隣接構造物となる1号機タービン建物は、等価剛性として線形の平面ひずみ要素でモデル化する。

1号機タービン建物は「VI-2-11-2-1-2 1号機タービン建物の耐震性についての計算書」における多質点系モデル（多軸床柔多質点系モデル（水平））を基に図4.3.2-5に示す手順で有限要素モデルを作成する。まず、多質点系モデルのフロア毎に重量を、層毎に剛性を集約し、多質点系モデルと振動的に等価な単軸モデル（水平、鉛直）を作成し、1次モードの固有周期が同等となるよう単軸モデルのせん断断面積及び断面2次モーメントを補正する。その後、図4.3.2-6に示す関係式を用いて、単軸モデルの水平剛性 K_H 、鉛直剛性 K_V 及び曲げ剛性 K_ϕ を有限要素モデルのせん断剛性 G 、ポアソン比 ν 及びばね定数 k_s に変換し、単軸モデルと有限要素モデルが振動的に等価となるよう一致させる。なお、重量については、各節点の分担長に応じて層毎に設定する。

1号機タービン建物の有限要素モデルを図4.3.2-7に、有限要素モデルの平面ひずみ要素の物性値を表4.3.2-1に、1次モードの固有周期の調整結果を表4.3.2-2に示す。

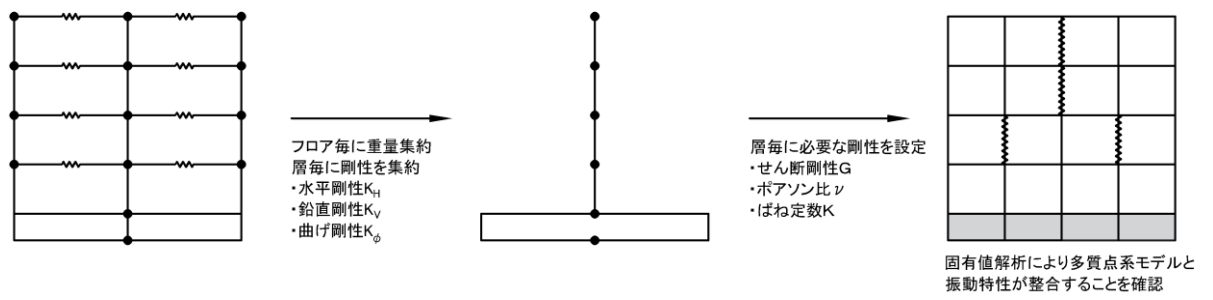
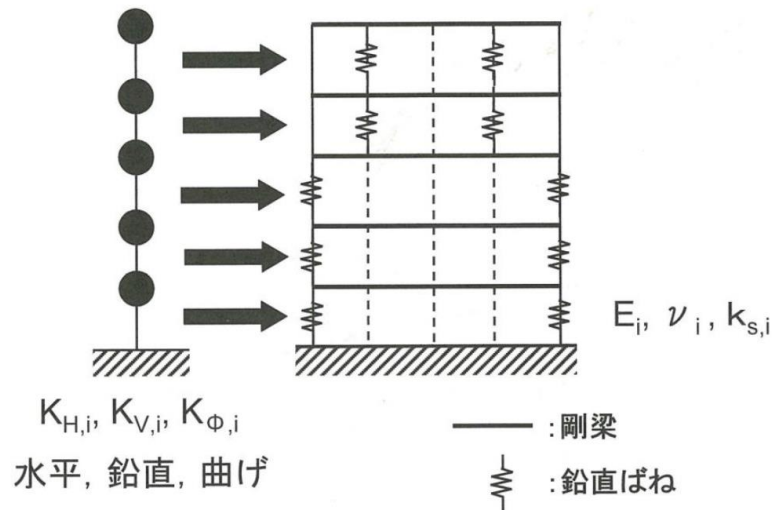


図 4.3.2-5 1号機タービン建物の有限要素モデル作成の考え方



$$K_{H,i} = \frac{G_i A_{H,i}}{\ell_i} \dots\dots\dots (4.3.1)$$

$$K_{V,i} = \frac{E_i A_{V,i}}{\ell_i} \dots\dots\dots (4.3.2)$$

$$K_{\phi,i} = E_i I_i \dots\dots\dots (4.3.3)$$

$$\tilde{G}_i = \left(\frac{A_{H,i}}{a_i} \right) G_i \dots\dots\dots (4.3.4)$$

$$K_{V,i} = \frac{2a_i \tilde{G}_i (1 - \tilde{\nu}_i)}{b_i (1 - 2\tilde{\nu}_i)} + 2k_{sp,i} \dots\dots\dots (4.3.5)$$

$$K_{\phi,i} = \frac{a_i^3 \tilde{G}_i (1 - \tilde{\nu}_i)}{6 (1 - 2\tilde{\nu}_i)} + \frac{b_i d_i^2}{2} k_{sp,i} \dots\dots\dots (4.3.6)$$

$$\tilde{\nu}_i = \frac{1}{2} \frac{12K_{\phi,i} - 3b_i \cdot d_i^2 K_{V,i} - 2(a_i^3 - 3a_i \cdot d_i^2) \tilde{G}_i}{12K_{\phi,i} - 3b_i \cdot d_i^2 K_{V,i} - (a_i^3 - 3a_i \cdot d_i^2) \tilde{G}_i} \dots\dots\dots (4.3.7)$$

$$k_{sp,i} = \frac{1}{2} \frac{K_{V,i} \cdot a_i^2 \cdot b_i - 12K_{\phi,i}}{(a_i^2 - 3d_i^2) b_i} \dots\dots\dots (4.3.8)$$

図 4.3.2-6 質点系モデルから有限要素モデルへのモデル化概要
 (原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>
 (土木学会, 原子力土木委員会, 2009年2月)より抜粋)

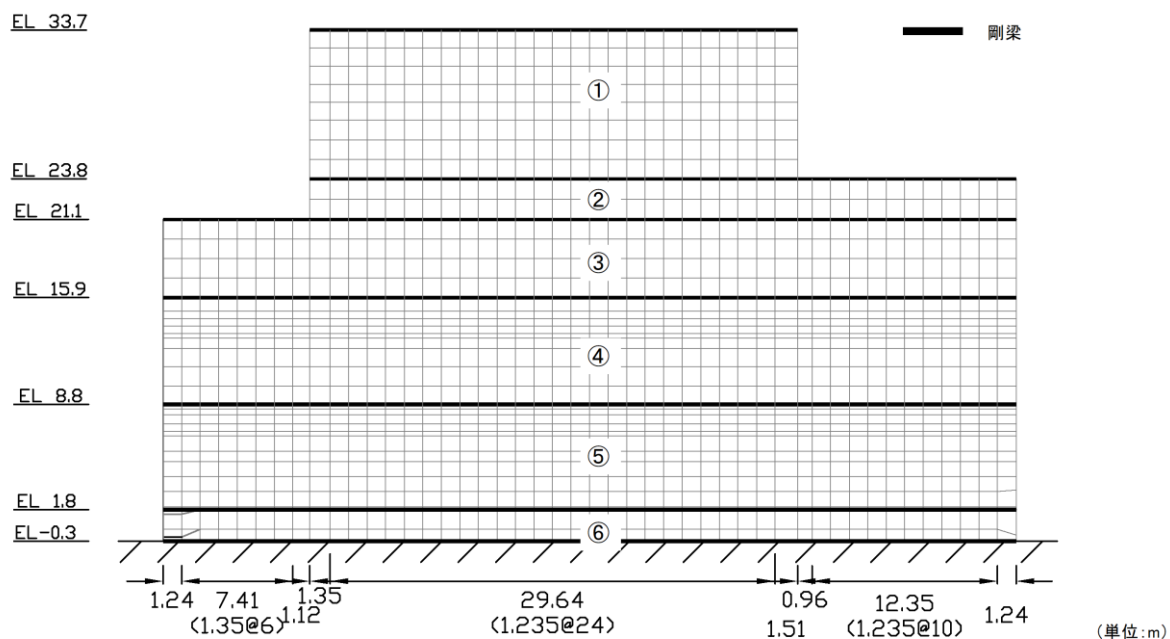


図 4.3.2-7 1号機タービン建物 有限要素モデル図

表 4.3.2-1 原子炉建物（平面ひずみ要素）の物性値

物性 番号	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	ヤング係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
①	7.870×10^4	2.359×10^5	0.49873
②	1.477×10^5	4.405×10^5	0.49120
③	1.436×10^5	3.367×10^6	0.17235
④	5.036×10^5	1.469×10^6	0.45850
⑤	5.398×10^5	1.571×10^6	0.45517
⑥	8.758×10^6	1.795×10^7	0.02478

表 4.3.2-2 固有周期（1次モード）の調整結果

	有限要素モデル	多質点系モデル (地盤ばねなし)
水平方向	0.1135	0.1135
鉛直方向	0.0416	0.0416

b. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）







防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は、VI-2-10-2-3-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の耐震性についての計算書」に基づき、線形はり要素でモデル化する。

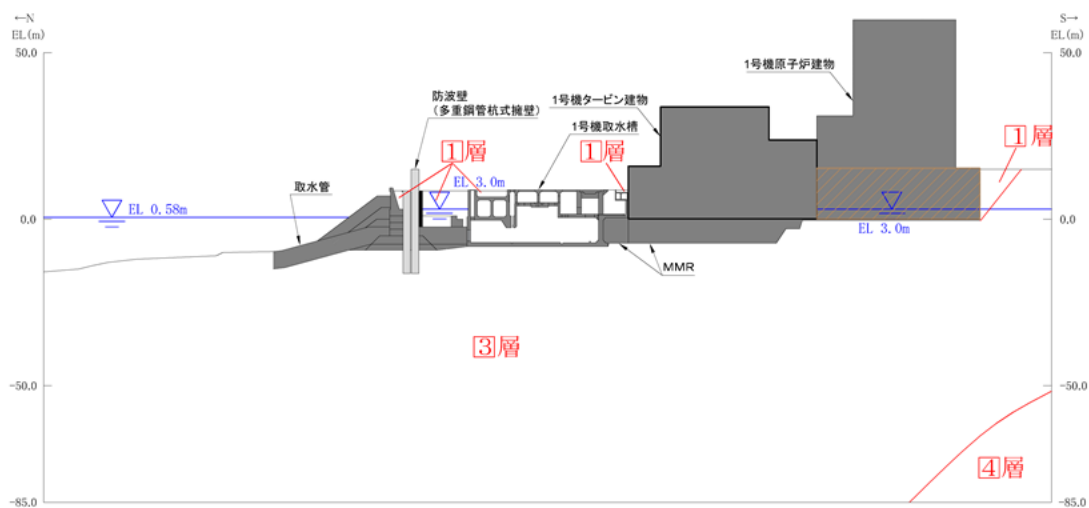
(5) 地盤及びMMRのモデル化

地盤及びMMRは線形の平面ひずみ要素でモデル化する。埋戻土は、地盤の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。また、改良地盤については評価対象構造物から離れていること、分布が局所的であることから埋戻土としてモデル化を行う。

地盤のモデル化に用いる、地質断面図を図 4.3.2-8 に示す。

凡例

-  モデル化する隣接構造物
-  埋戻土でモデル化する人工構造物
-  地下水位及び海水位
-  速度層境界線
-  MMR・コンクリート構造物
被覆石・捨石・基礎捨石
-  防波壁



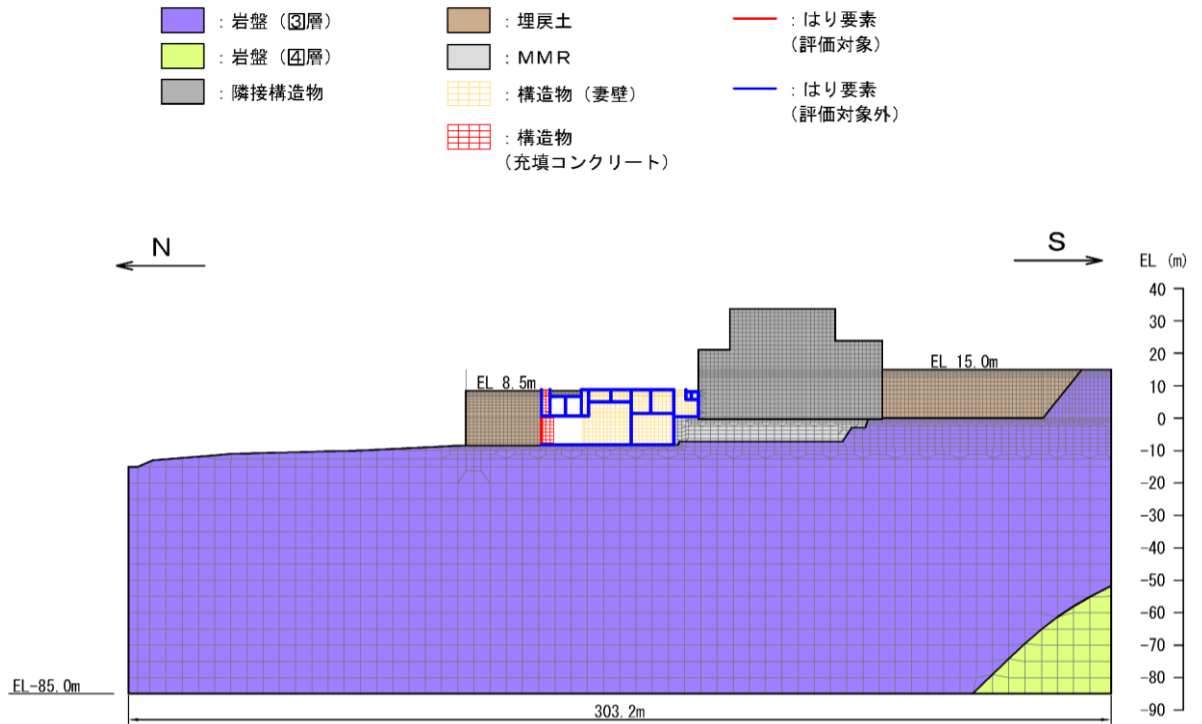
(速度層図)

注：□層については解析モデルでは埋戻土の物性を使用

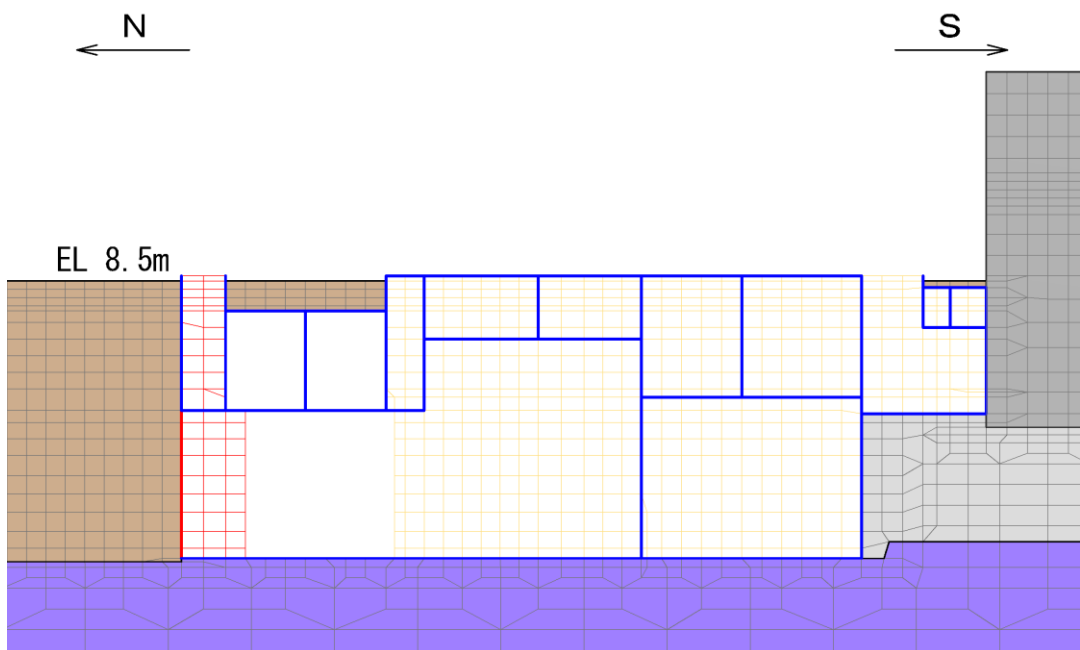
図 4.3.2-8 評価対象地質断面図

(6) 地震応答解析モデル

評価対象地質断面図を踏まえて設定した地震応答解析モデル図を図 4.3.2-9 に示す。



(全体図)



(拡大図)

図 4.3.2-9 地震応答解析モデル図 (A-A 断面)

(7) 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 τ_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 ϕ は周辺地盤の c 、 ϕ とし、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき表 4.3.2-3 のとおりとする。また、要素間の粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ は表 4.3.2-4 のとおり設定する。

なお、漸拡ダクト部及びピット部の充填コンクリートについては、充填コンクリートが周囲 6 方向のうち、5 方向が拘束されていることから既設部材と一体化されたものとして耐震評価を行うため、ジョイント要素の設定は行わない。

なお、漸拡ダクト部及びピット部の充填コンクリートについては、周囲を側壁、底版等に囲まれており、側壁、底版等に目荒らしを行ったうえで、打設するため一体で挙動することから、ジョイント要素は設定しない。

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

ここに、 τ_f : せん断強度

c : 粘着力 (= 初期せん断強度 τ_0)

ϕ : 内部摩擦角

表 4.3.2-3 周辺地盤との境界に用いる強度特性

地盤	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
埋戻土	0.22	22
岩盤 (C _M 級)	1.23	52
MMR ($f'_{ck} = 18.0\text{N/mm}^2$)	3.58	40

表 4.3.2-4 要素間の粘着力と内部摩擦角

接合条件		粘着力 c (N/mm^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
材料 1	材料 2		
構造物	無筋コンクリート*1	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	埋戻土	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
	岩盤	材料 2 の c	材料 2 の ϕ
無筋コンクリート*1	岩盤	—*2	—*2

注記*1：MMR，置換コンクリート及び埋戻コンクリートの総称

*2：表面を露出させて打継処理が可能である箇所については，ジョイント要素を設定しない。

ジョイント要素のばね定数は，土木学会マニュアル 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 4.3.2-5 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 4.3.2-10 に，ジョイント要素の配置を図 4.3.2-11 に示す。

表 4.3.2-5 ジョイント要素のばね定数

圧縮剛性 k_n (kN/m^3)	せん断剛性 k_s (kN/m^3)
1.0×10^7	1.0×10^7

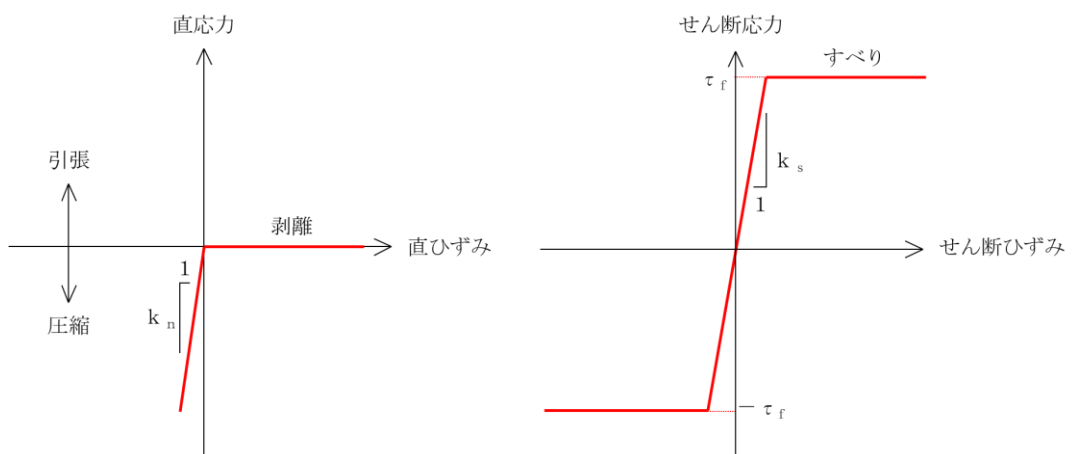










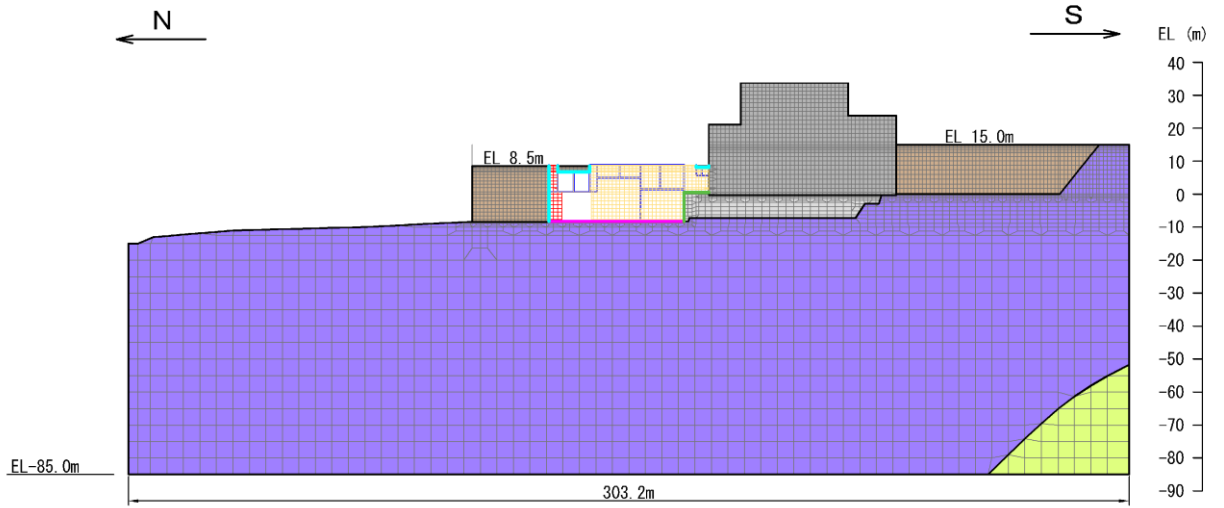
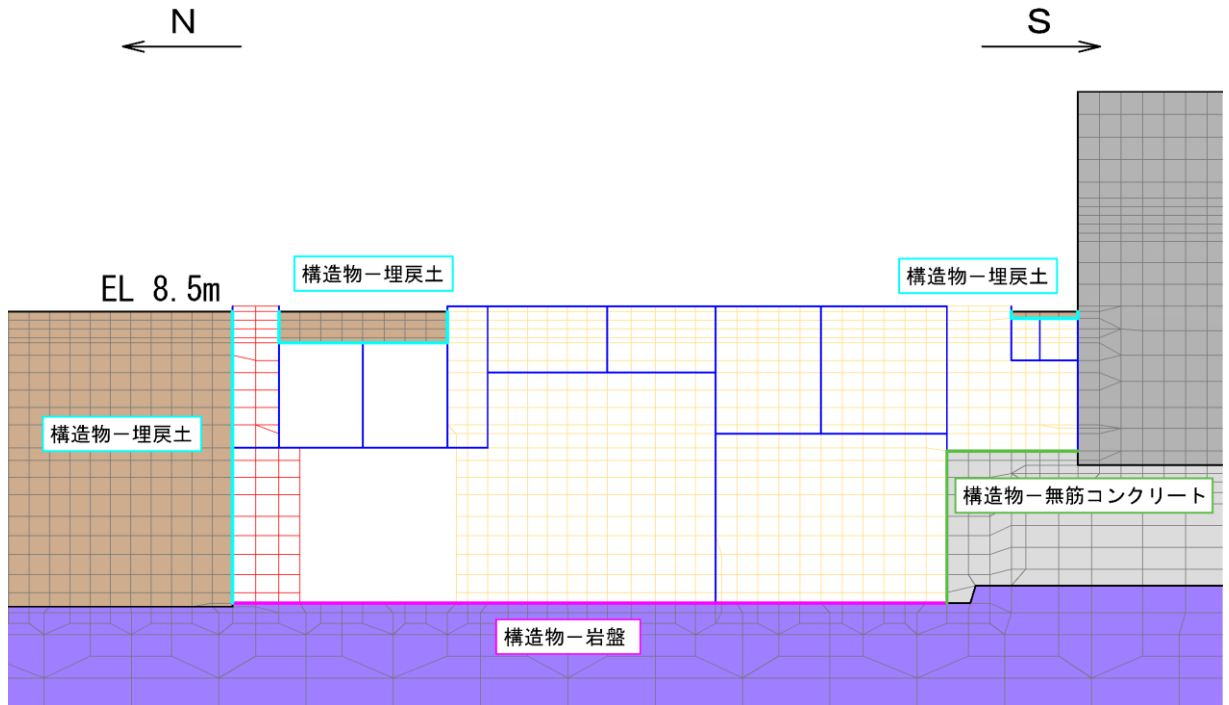


図 4.3.2-10 ジョイント要素の力学特性

- | | | |
|---|---|---|
|  : 岩盤 (Ⅲ層) |  : 埋戻土 |  : はり要素
(評価対象) |
|  : 岩盤 (Ⅳ層) |  : MMR |  : はり要素
(評価対象外) |
|  : 隣接構造物 |  : 構造物 (妻壁) |  : ジョイント要素 |
| |  : 構造物
(充填コンクリート) | |



(全体図)



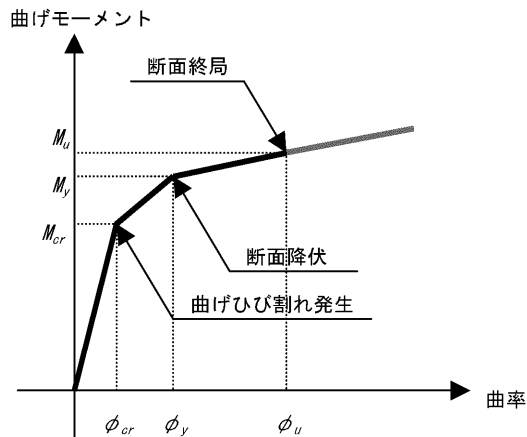
(拡大図)

図 4.3.2-11 ジョイント要素の配置 (A-A断面)

(8) 材料特性の設定

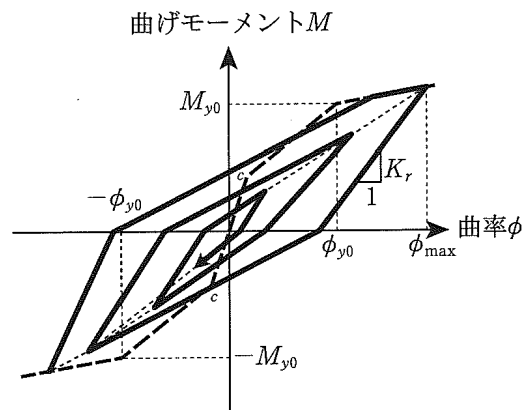
有効応力解析における鉄筋コンクリート部材は、非線形はり要素でモデル化することとし、図 4.3.2-12 に示す $M-\phi$ 関係のトリリニアモデルとする。履歴特性は、図 4.3.2-13 に示すとおり修正武田モデルを適用し、図 4.3.2-14 に示すコンクリートの応力-ひずみ関係を考慮する。

また、図 4.3.2-15 に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。



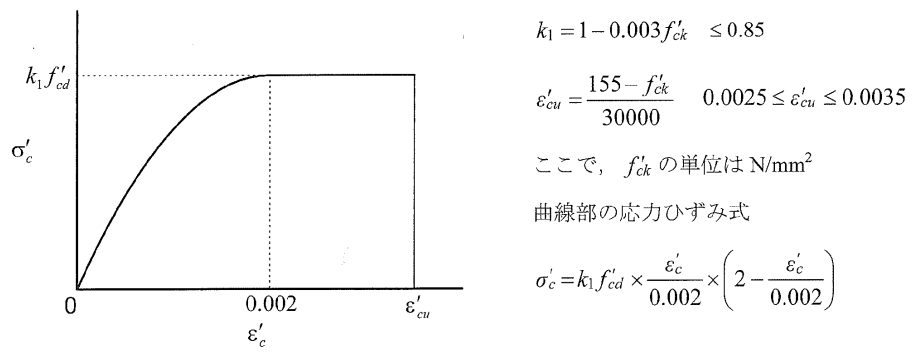
(土木学会マニュアル 2005 より引用)

図 4.3.2-12 鉄筋コンクリート部材の $M-\phi$ 関係



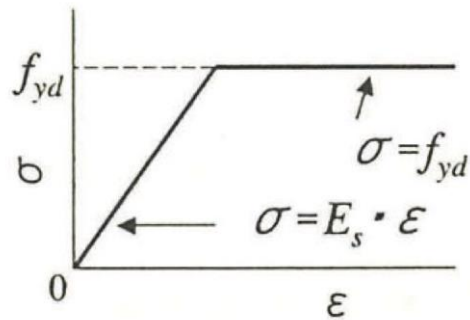
(道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (日本道路協会, 2002 年) より引用)

図 4.3.2-13 鉄筋コンクリート部材の履歴特性 (修正武田モデル)



(コンクリート標準示方書 2002 より引用)

図 4.3.2-14 構造部材の非線形特性 (コンクリートの応力-ひずみ関係)



(コンクリート標準示方書 2002 より引用)

図 4.3.2-15 構造部材の非線形特性 (鉄筋の応力-ひずみ関係)

4.3.3 減衰定数

有効応力解析及び全応力解析における Rayleigh 減衰は，地震力による時系列での地盤剛性の軟化に伴う 1 次固有振動数の低振動数側へのシフトに応じて，地盤応答の保守的な評価が行われるよう係数 α を 0 として設定し，低振動数帯で減衰 α [m] の影響がない剛性比例型減衰としている。また，係数 β は，「FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ [理論編]」に基づき $\beta=0.002$ と設定する。

4.3.4 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で設定する。地震荷重には、地震時土圧及び機器・配管系からの反力による荷重が含まれるものとする。

地震時に1号機取水槽に作用する機器・配管系からの反力については、機器・配管系を解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

荷重の組合せを表4.3.4-1に示す。

表 4.3.4-1 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、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
		機器・配管荷重	○	機器・配管系の重量に基づいて設定する。
	積載 荷重	静止土圧	○	常時応力解析により設定する。
		外水圧	○	地下水位に応じた静水圧として考慮する。 地下水の密度を考慮する。
		内水圧	○	内水位に応じた静水圧として考慮する。 海水の密度を考慮する。
		積雪荷重	○	地表面及び構造物天端に考慮する。
		土被り荷重	○	常時応力解析により設定する。
永久上載荷重	—	地表面に恒常的に置かれる設備等はないことから考慮しない。		
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	○	水位条件及び密度は、永久荷重のうち内水圧と同様とする。 地震時動水圧を付加質量により考慮する。	

(1) 機器・配管荷重

地震時に1号機取水槽に作用する機器・配管系の荷重図を図4.3.4-1に荷重一覧表を表4.3.4-2及び表4.3.4-3に示す。機器・配管荷重は、常時・地震時ともに付加質量としてモデル化する。

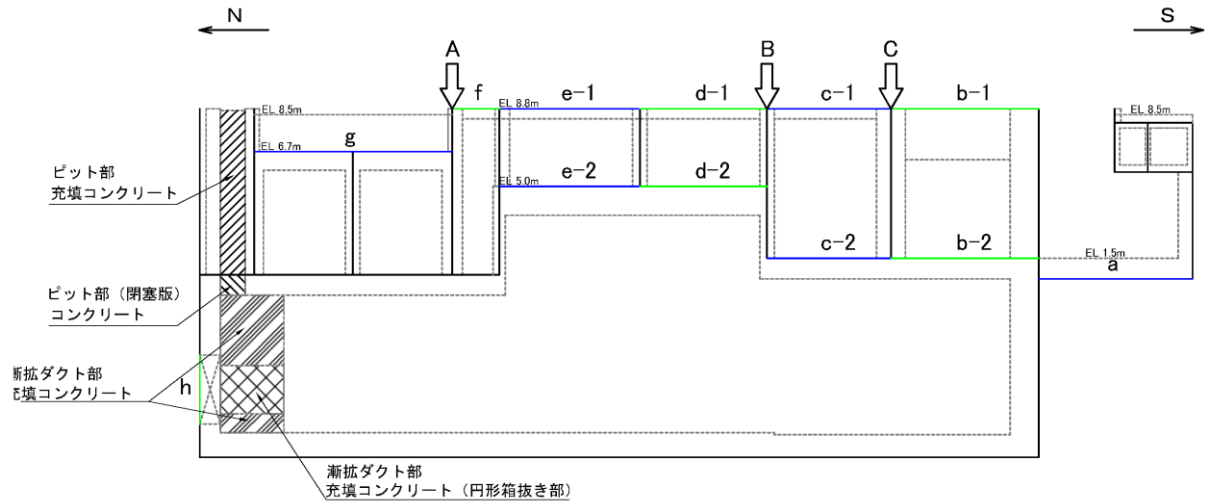


図 4.3.4-1 解析用機器・配管荷重図

表 4.3.4-2 機器配管荷重一覧 (分布荷重)

範囲	位置	機器荷重	配管荷重	浸水防止壁	流路縮小工	合計 (kN/m ²)
a	EL 1.500	1.29	8.90	—	—	10.19
b-1	EL 8.800	6.71	—	—	—	6.71
b-2	EL 1.500	3.71	1.50	—	—	5.21
c-1	EL 8.800	—	—	0.23	—	0.23
c-2	EL 1.500	2.79	4.50	—	—	7.29
d-1	EL 8.800	—	—	0.25	—	0.25
d-2	EL 5.000	5.49	—	—	—	5.49
e-1	EL 8.800	—	—	0.25	—	0.25
e-2	EL 5.000	5.56	—	—	—	5.56
f	EL 8.800	—	—	0.29	—	0.29
g	EL 6.700	1.59	—	—	—	1.59
h	開口部	—	—	—	5.71	5.71

表 4.3.4-3 機器配管荷重一覽 (集中荷重)

範圍	合計 (kN/m)
A	4.59
B	2.19
C	2.19

(2) 外水圧

外水圧は、地下水位に応じた静水圧を設定する。地下水位については、「2.8 地下水位」のとおりとし、地下水の密度として $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

(3) 内水圧

取水槽の内部には、EL 0.58m を内水位として設定する。設定の際は、海水の密度として、 $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

内水圧図を図 4.3.4-2 に示す。

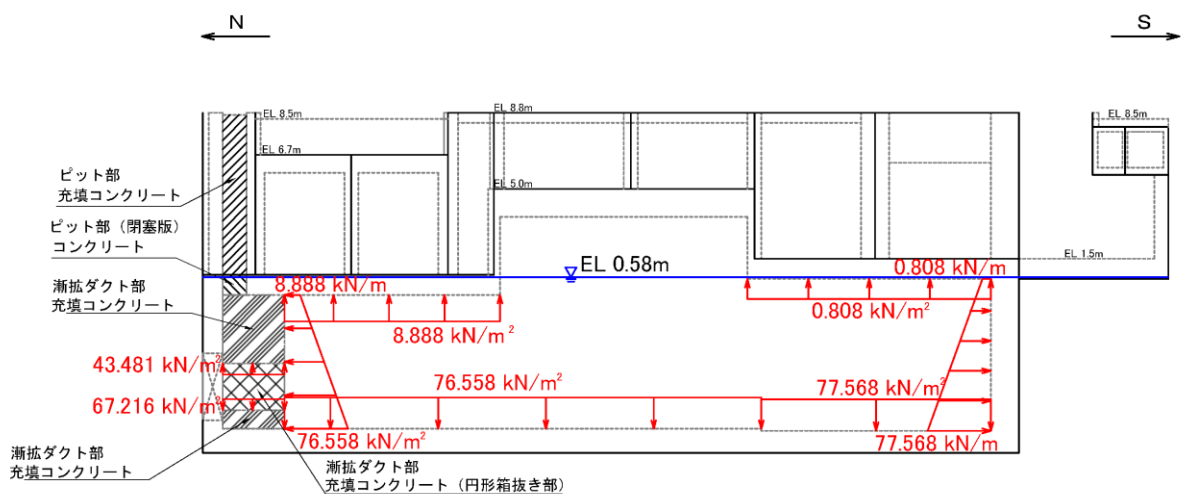


図 4.3.4-2 内水圧図

(4) 積雪荷重

積雪荷重は、VI-1-1-3-1-1「発電用原子炉施設に対する自然現象等における損傷の防止に関する基本方針」に基づき、発電所敷地に最も近い気象官署である松江地方気象台で観測された観測史上1位の月最深積雪100cmに平均的な積雪荷重を与えるための係数0.35を考慮し35.0cmとする。積雪荷重については、松江市建築基準法施行細則により、積雪量1cmごとに $20\text{N}/\text{m}^2$ の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

(5) 動水圧

動水圧は Westergaard 式から算定する。動水圧の設定箇所概要図を図 4.3.4-3 に示す。ここで、漸拡ダクト部充填コンクリートの水路開口部にかかる動水圧のみ、自由液面がない状態として算定する。その他については、自由液面のある状態として算定する。

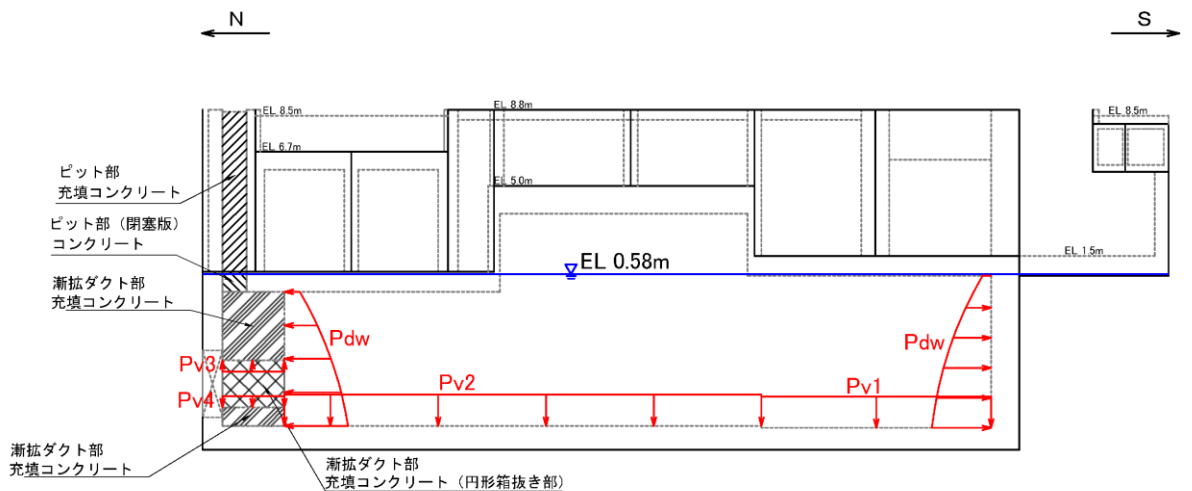


図 4.3.4-3 動水圧図

a. 水平方向の動水圧

取水槽内部の海水を固定水として扱い、次式で算定する。水平方向動水圧の分布図を図 4.3.4-4 に示す。

$$p_w = \frac{7}{8} \times c \times \gamma_w \times \sqrt{(h \times y)} \times k_H$$

p_w : 動水圧

c : 補正係数

$$L / h < 1.5 \text{ の場合, } c = L / (1.5 h)$$

$$L / h \geq 1.5 \text{ の場合, } c = 1.0$$

L : 水路幅

h : 水深

γ_w : 海水の単位体積重量

y : 水面から動水圧を求める点までの深さ

k_H : 水平震度

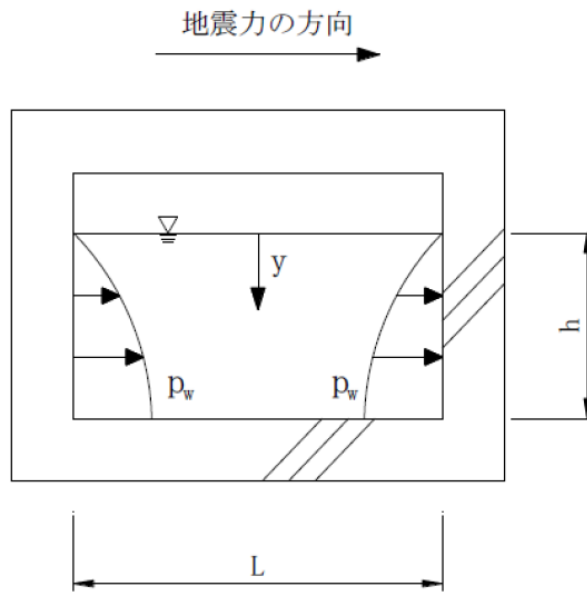


図 4.3.4-4 水平方向の動水圧分布図

b. 鉛直方向の動水圧

取水槽内部の海水を固定水として扱い、次式で算定する。鉛直方向動水圧の分布図を図 4.3.4-5 に示す。

$$p_w = k_v \times \gamma_w \times h$$

p_w : 動水圧

k_v : 鉛直震度

γ_w : 海水の単位体積重量

h : 水深

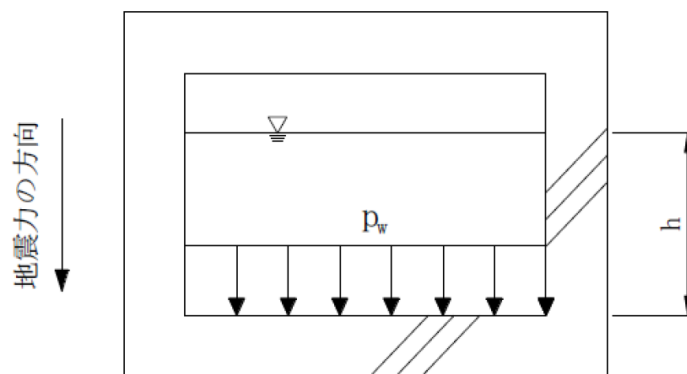


図 4.3.4-5 鉛直方向の動水圧分布図

c. 漸拡ダクト部充填コンクリート水路開口部の動水圧

漸拡ダクト部充填コンクリート水路開口部の海水を自由液面のないものとして扱い、次式で算定する。

$$p_w = k_v \times \gamma_w \times H/2$$

p_w : 動水圧

k_v : 鉛直震度

γ_w : 海水の単位体積重量

H : 水路開口部の高さ

4.3.5 地震応答解析の解析ケース

(1) 耐震評価における解析ケース

a. 地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース

A-A断面の周辺には主に埋戻土が分布していることから、埋戻土の初期せん断弾性係数のばらつきを考慮する。

解析ケースについては、非液状化の条件を仮定した解析ケース（表 4.3.5-1 に示すケース④及び⑤）を実施することにより、地盤物性のばらつきの影響を網羅的に考慮する。

地盤のばらつきの設定方法の詳細は、「補足-023-01 地盤の支持性能について」に示す。

表 4.3.5-1 解析ケース

解析ケース	解析手法	地盤物性	
		埋戻土 (G_0 : 初期せん断 弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断 弾性係数)
ケース① (基本ケース)	有効応力解析	平均値	平均値
ケース②	有効応力解析	平均値 + 1 σ	平均値
ケース③	有効応力解析	平均値 - 1 σ	平均値
ケース④	全応力解析	平均値	平均値
ケース⑤	全応力解析	平均値 + 1 σ	平均値

b. 耐震評価における解析ケースの組合せ

耐震評価における解析ケースを表 4.3.5-2 に示す。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（表 4.3.5-2 に示すケース①）を実施する。基本ケースにおいて、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び地盤の支持力照査の照査項目ごとに照査値が 0.5 を超える照査項目に対して、最も厳しい地震動を用いて、表 4.3.5-2 に示す解析ケース②～⑤を実施する。すべての照査項目の照査値がいずれも 0.5 以下の場合には、照査値が最も厳しくなる地震動を用いて、解析ケースを実施する。また、追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図 4.3.5-1 に示す。

表 4.3.5-2 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	ケース④	ケース⑤
	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	非液状化の条件を仮 定した解析ケース	地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮し て非液状化の条件を 仮定した解析ケース
地盤物性	平均値	平均値+1σ	平均値-1σ	平均値	平均値+1σ
地震動 (位相)	++*	○			
	-+*	○			
	+ -*	○			
	- -*	○			
	++*	○			
	-+*	○			
	++*	○			
	-+*	○			
	++*	○			
	-+*	○			
	++*	○			
	-+*	○			

基準地震動 Ss (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、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊
 及び基礎地盤の支持力照査の各照査項目ごとに照査値が 0.5 を超える照査項目
 に対して、最も厳しい (許容限界に対する裕度が最も小さい) 地震動を用いて
 ケース②～⑤を実施する。
 すべての照査項目の照査値がいずれも 0.5 以下の場合は、照査値が最も厳しく
 なる地震動を用いてケース②～⑤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。

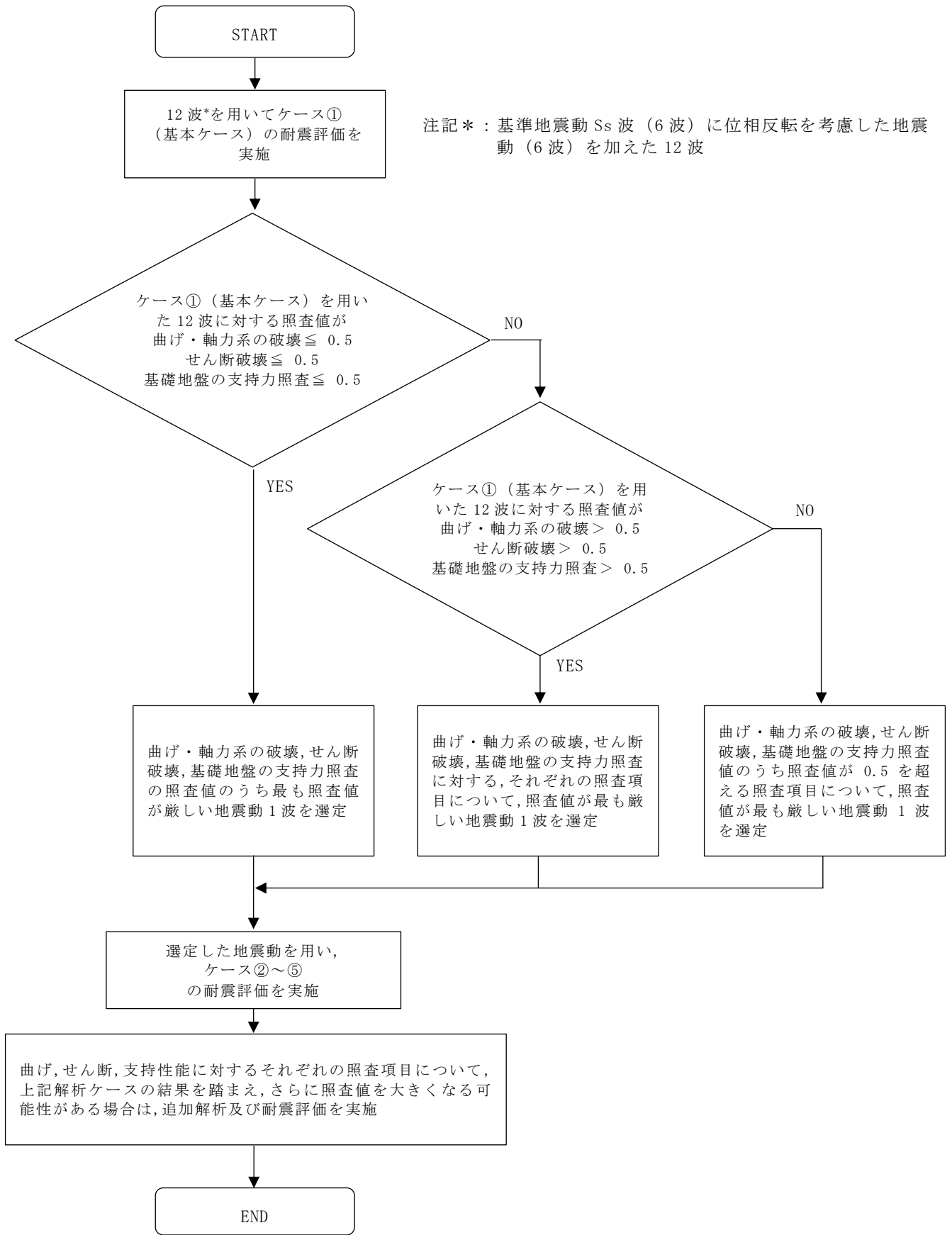


図 4.3.5-1 追加解析を実施する地震動の選定フロー

4.4 評価内容

4.4.1 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 4.4.1-1 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。

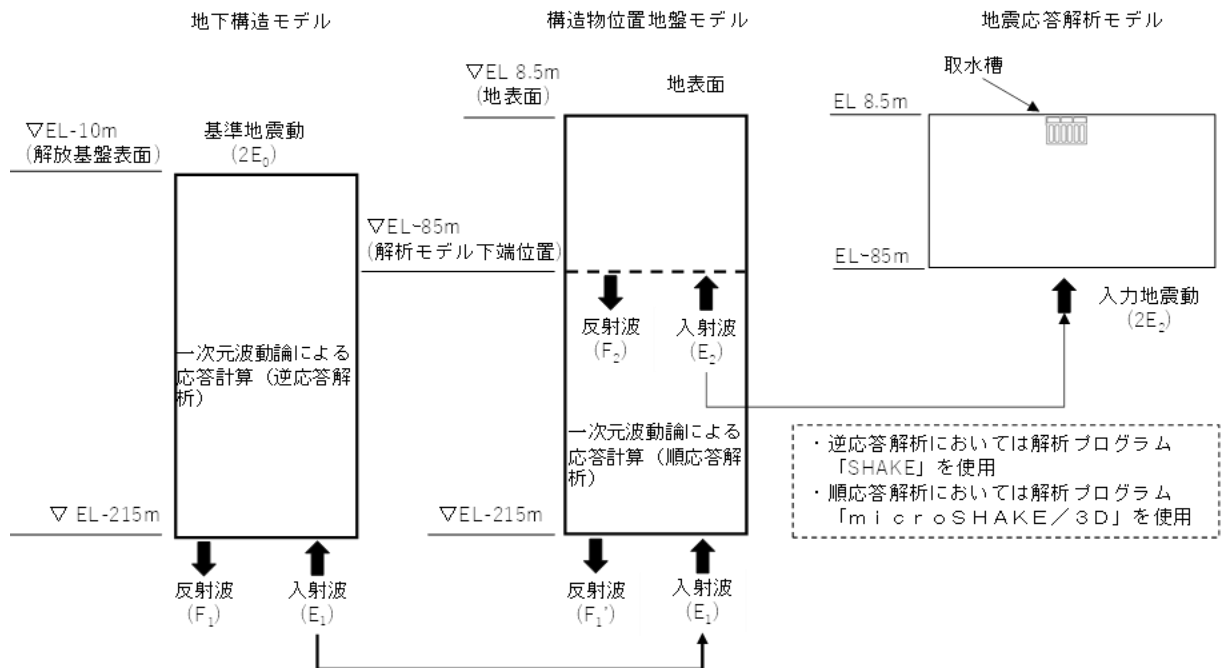
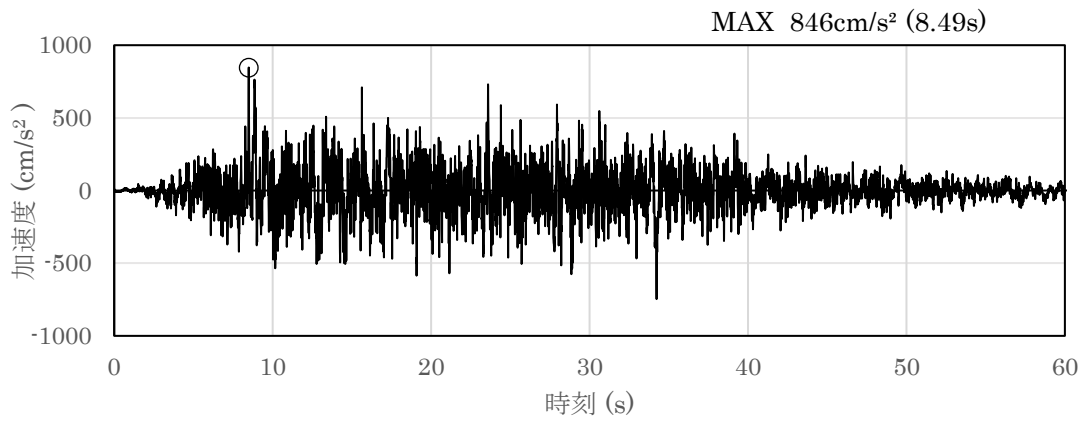
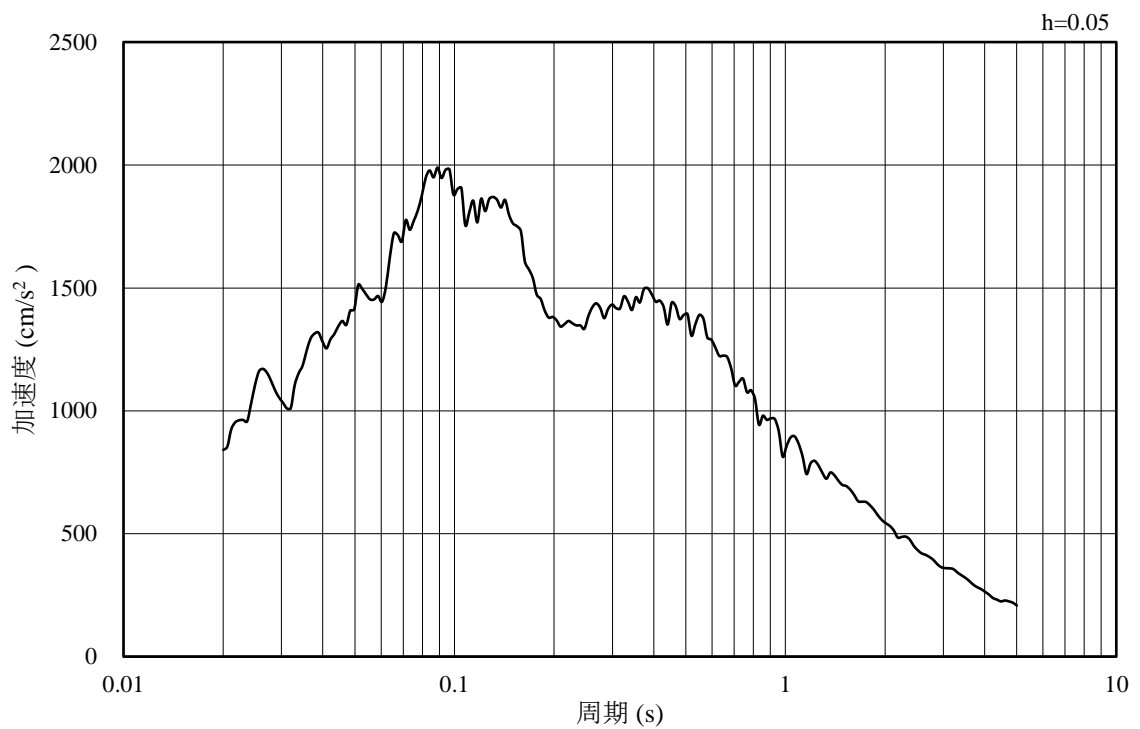


図 4.4.1-1 入力地震動算定の概念図

図 4.4.1-2～図 4.4.1-15 に A-A 断面の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。

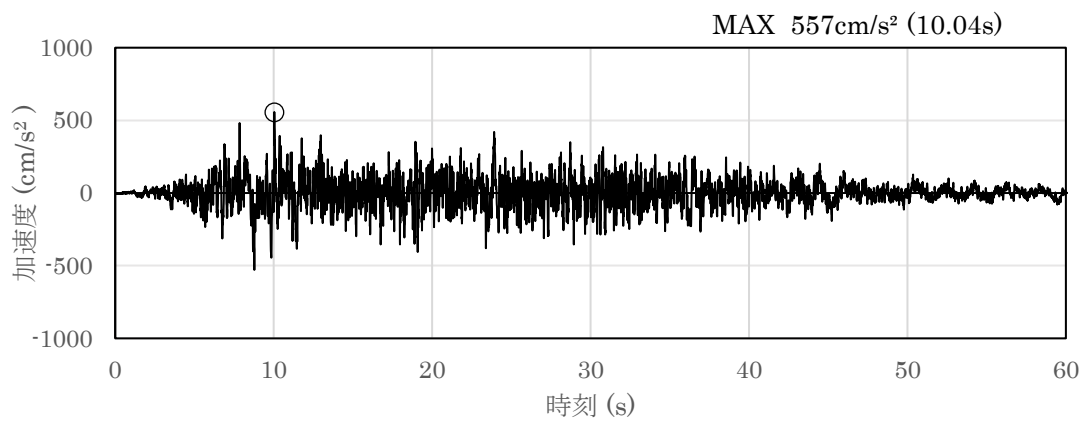


(a) 加速度時刻歴波形

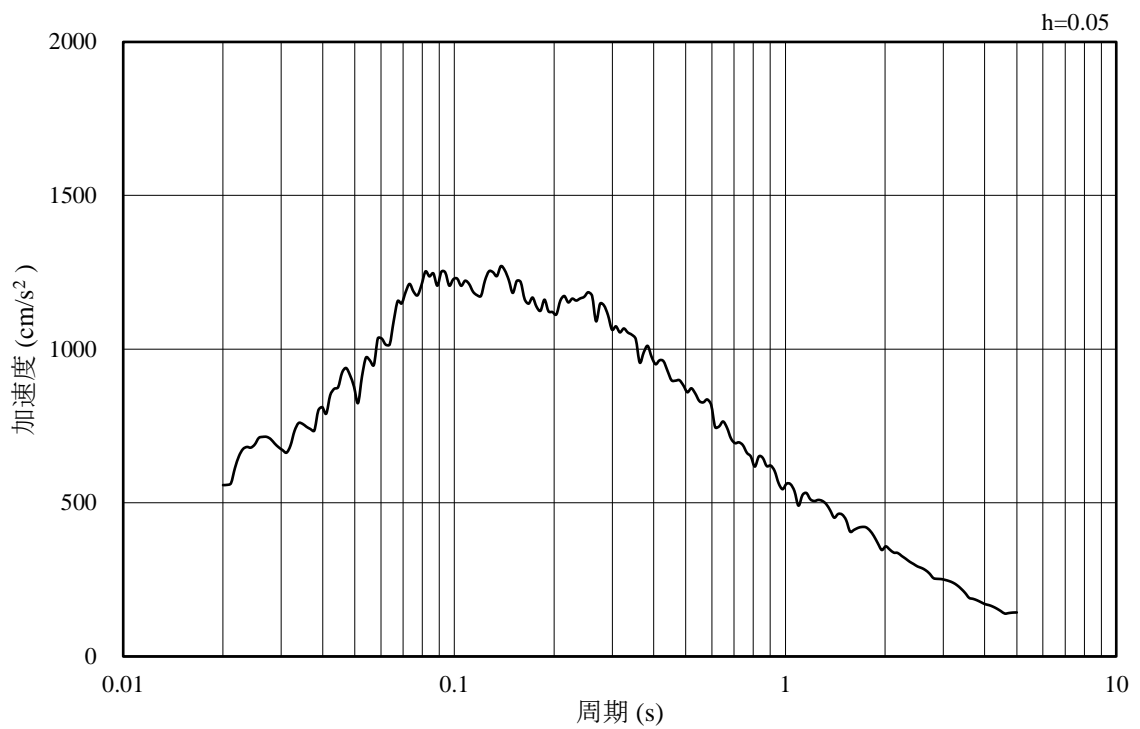


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-2 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)

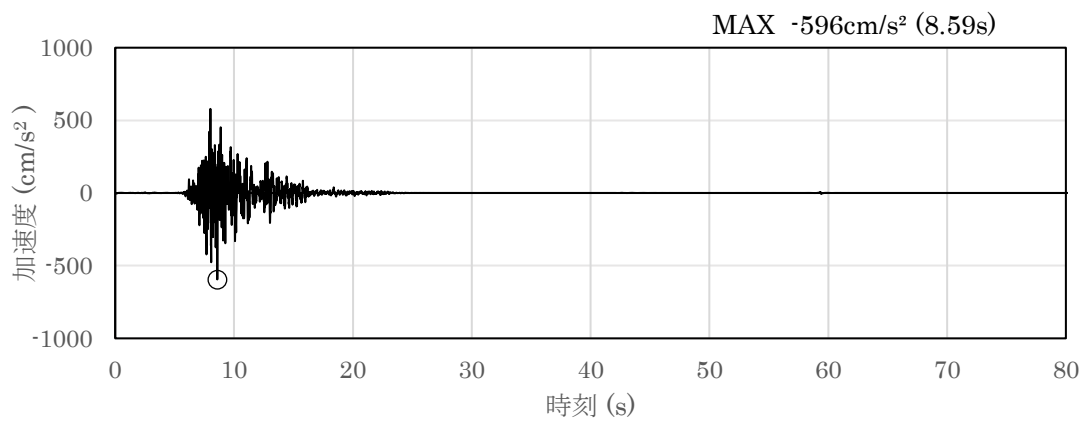


(a) 加速度時刻歴波形

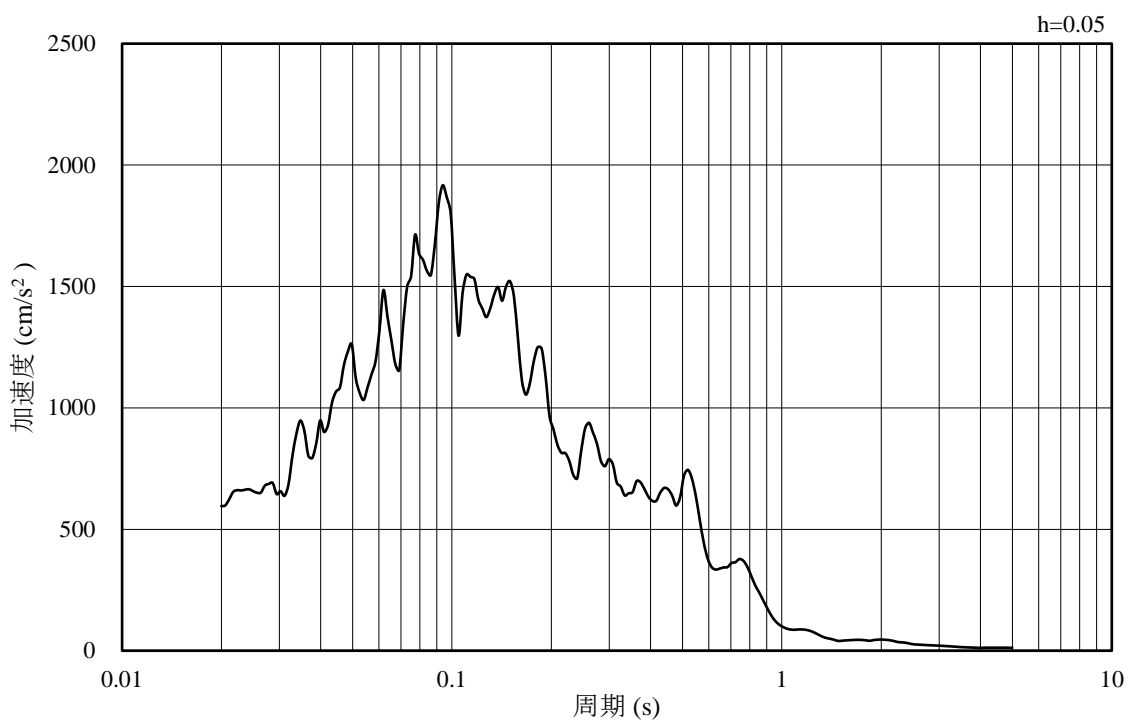


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-3 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)

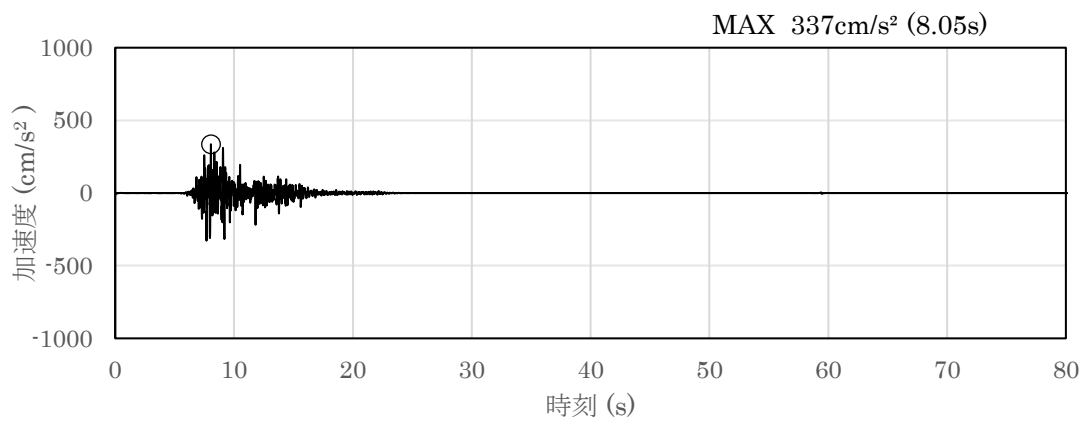


(a) 加速度時刻歴波形

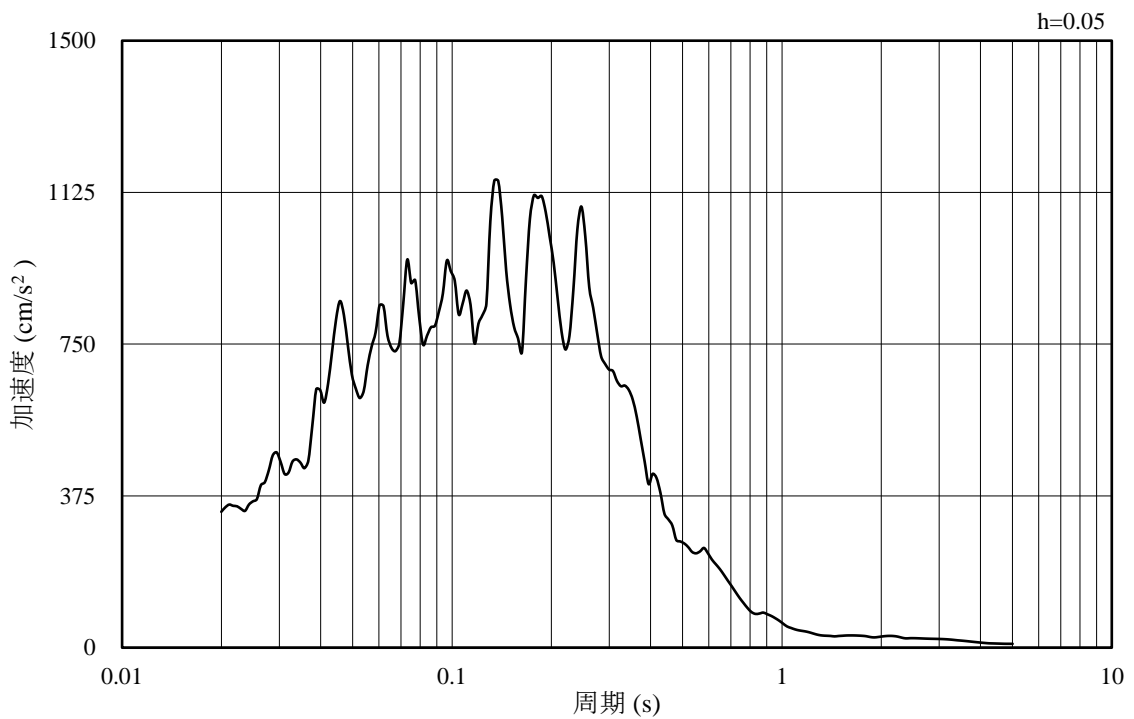


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-4 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
(水平成分 : S s - F 1)

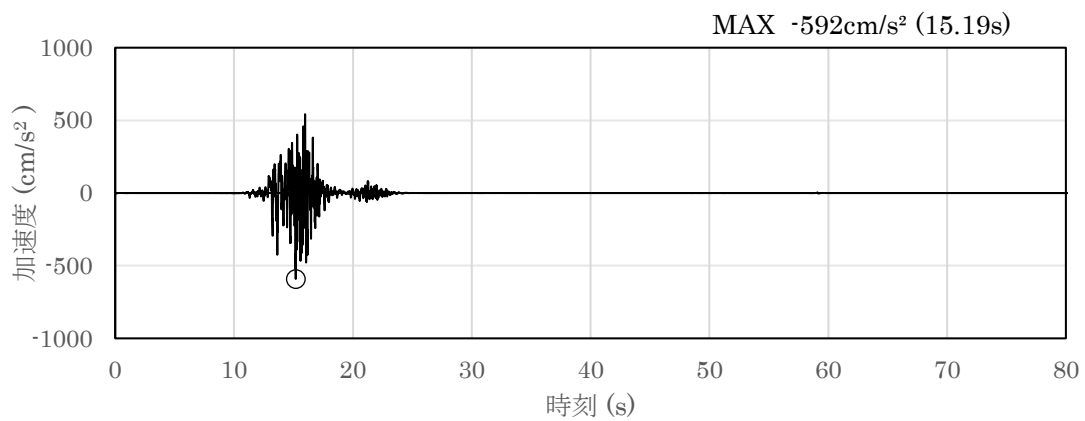


(a) 加速度時刻歴波形

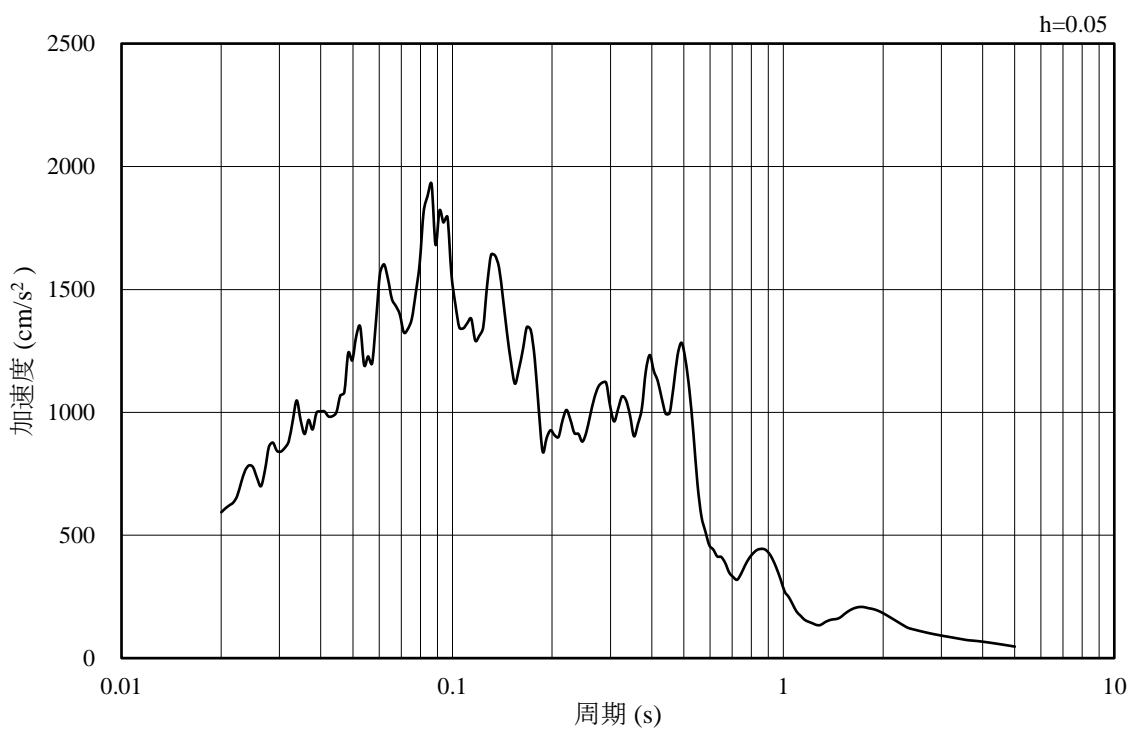


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-5 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
(鉛直成分：S s - F 1)

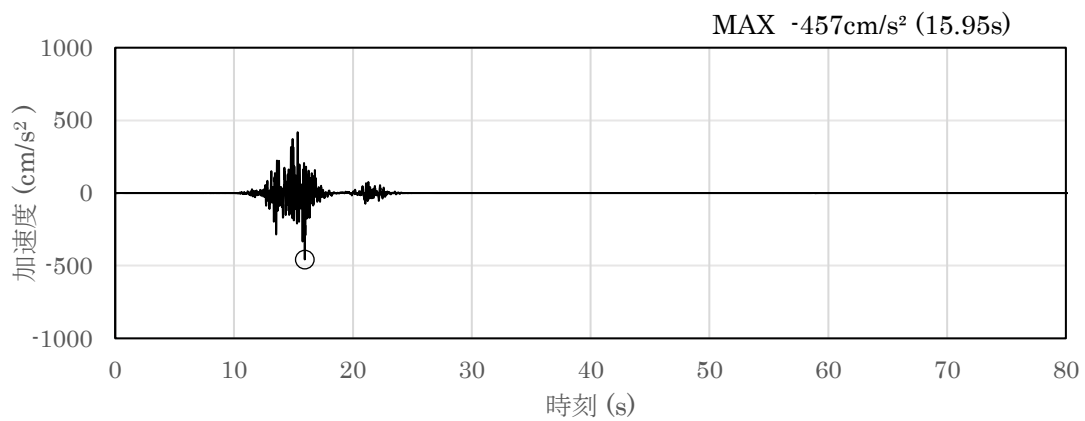


(a) 加速度時刻歴波形

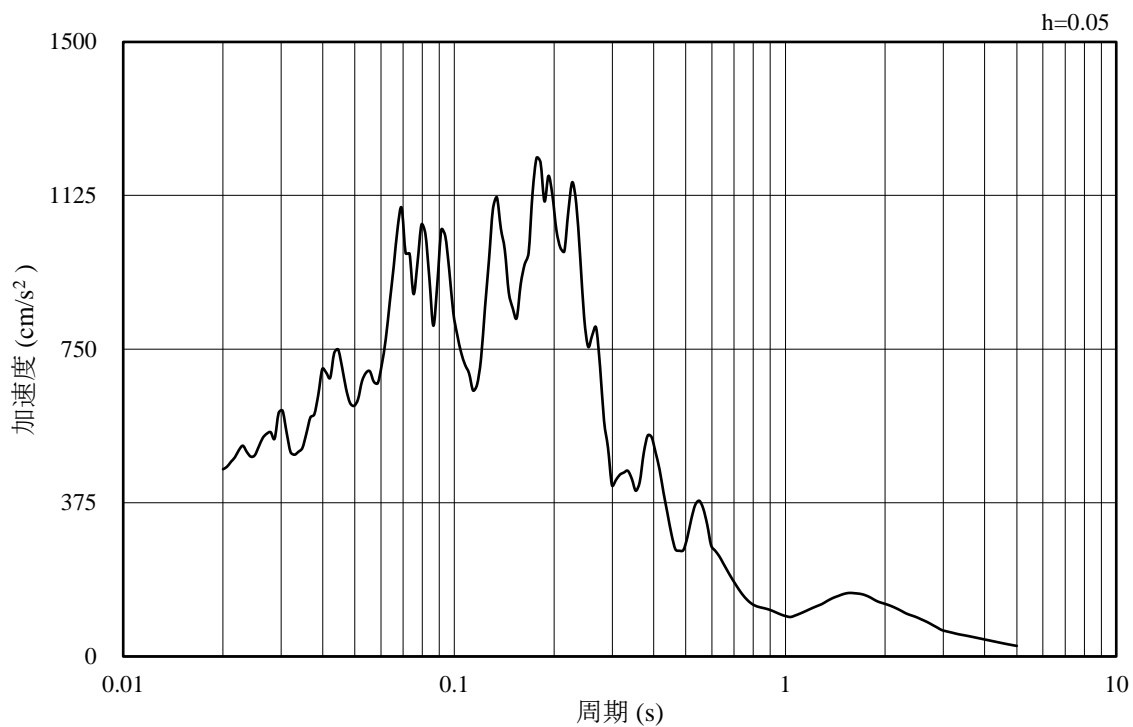


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-6 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
(水平成分 : S s - F 2)

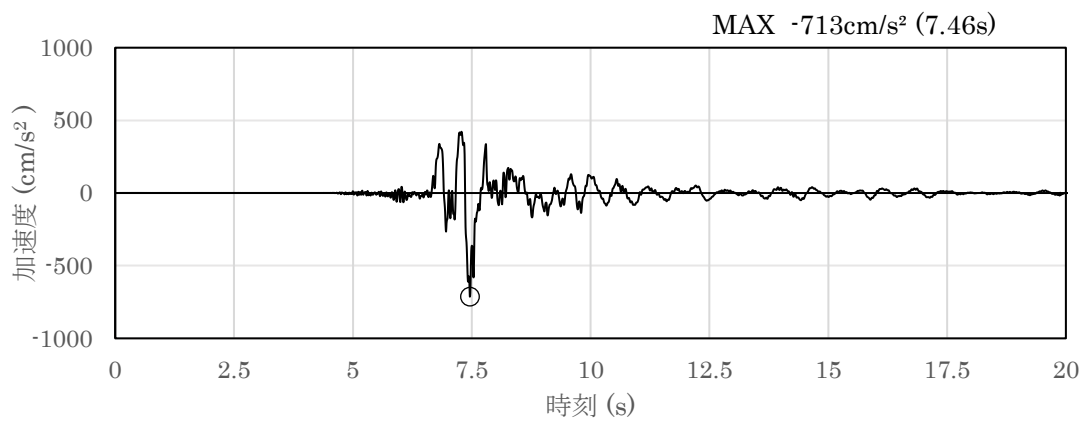


(a) 加速度時刻歴波形

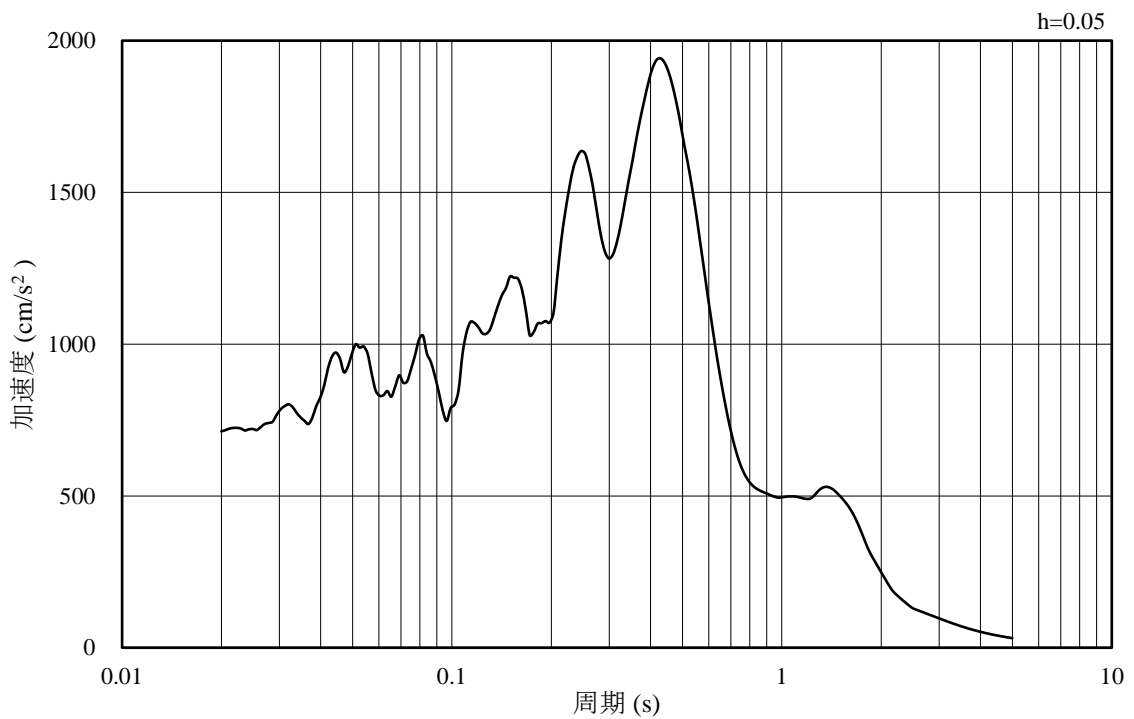


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-7 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
(鉛直成分：S s - F 2)

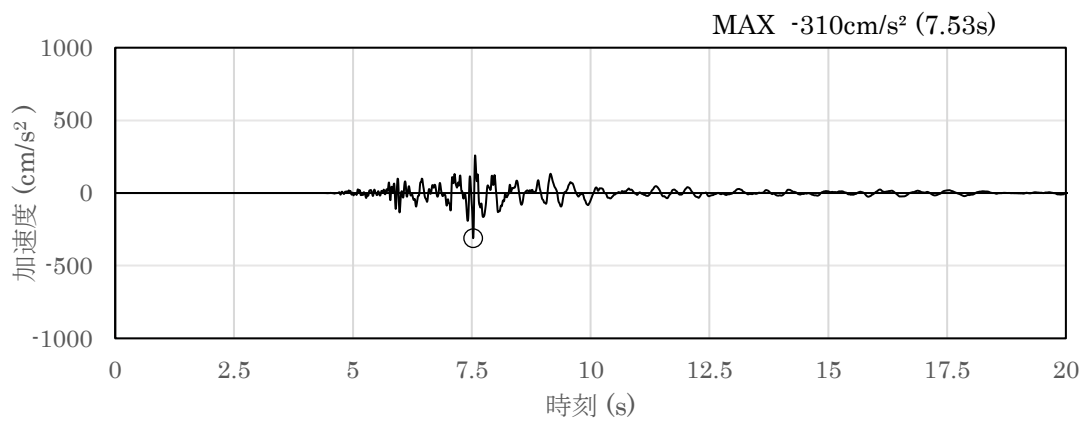


(a) 加速度時刻歴波形

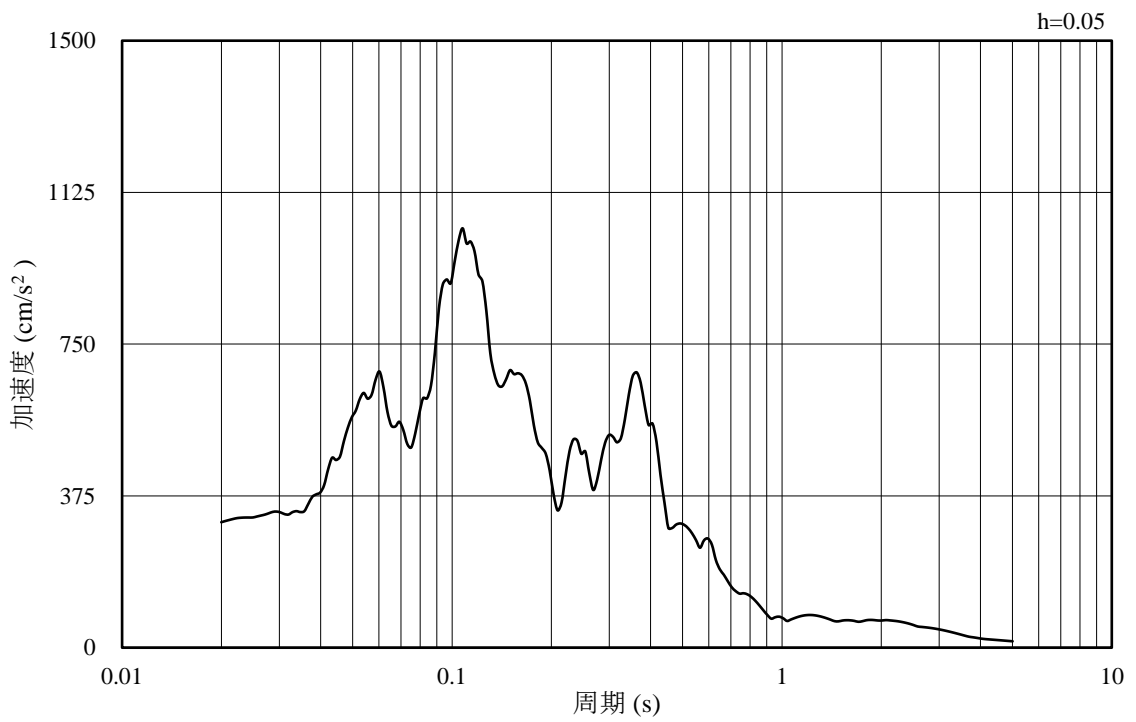


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-8 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
(水平成分：S s - N 1)

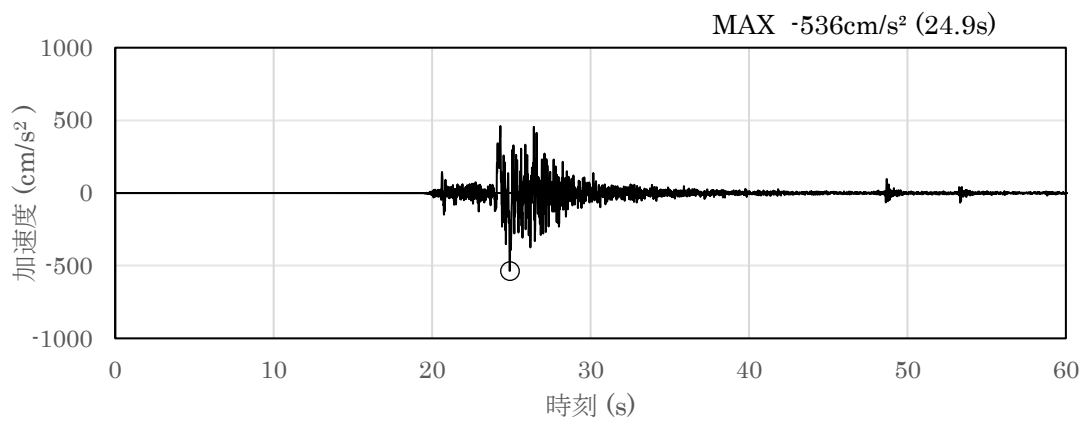


(a) 加速度時刻歴波形

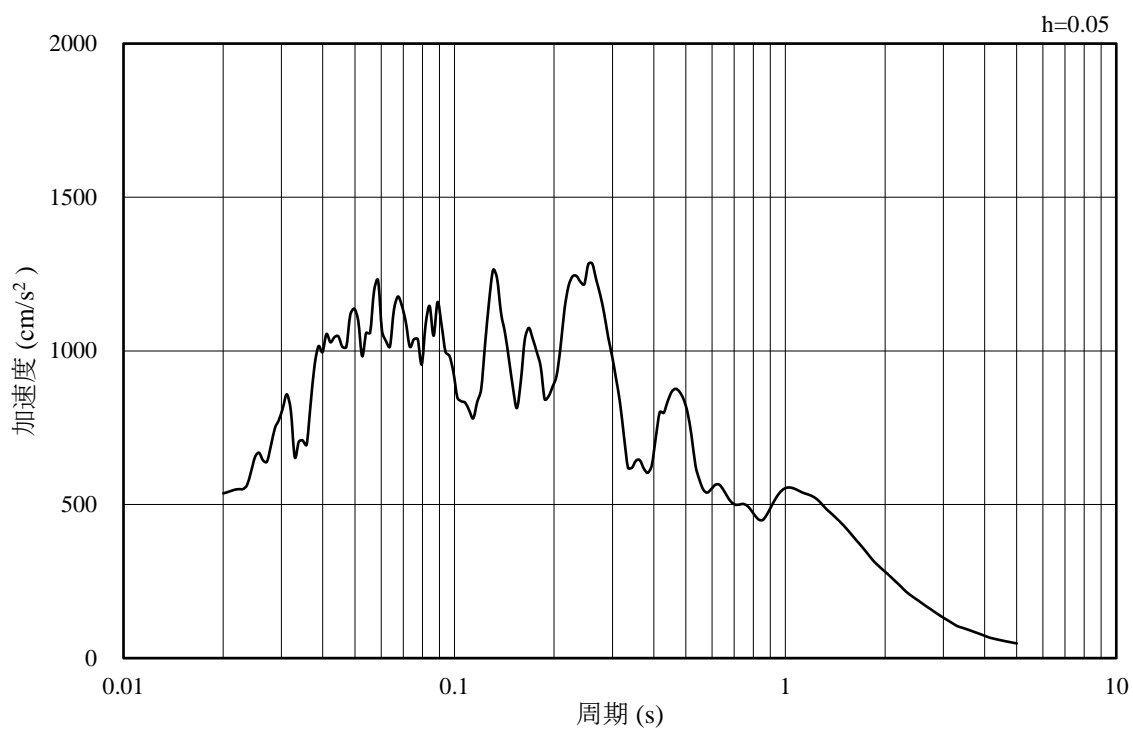


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-9 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
(鉛直成分：S s - N 1)

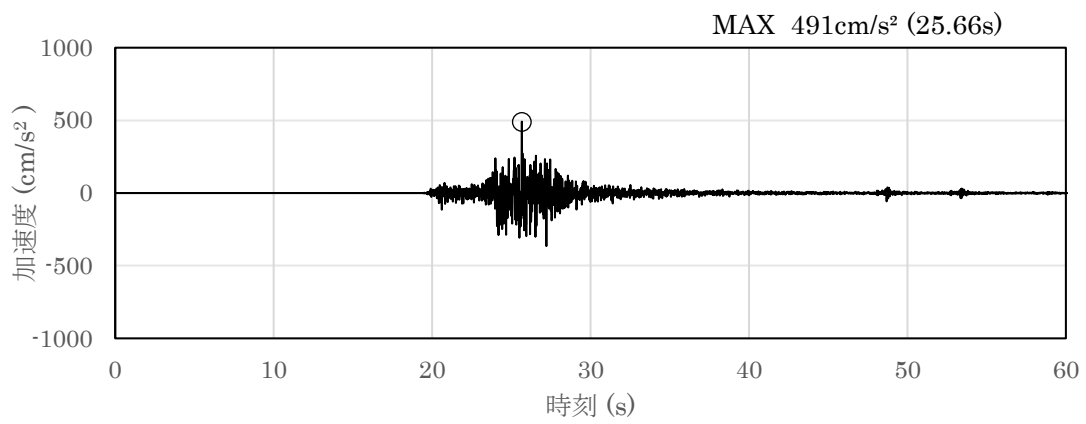


(a) 加速度時刻歴波形

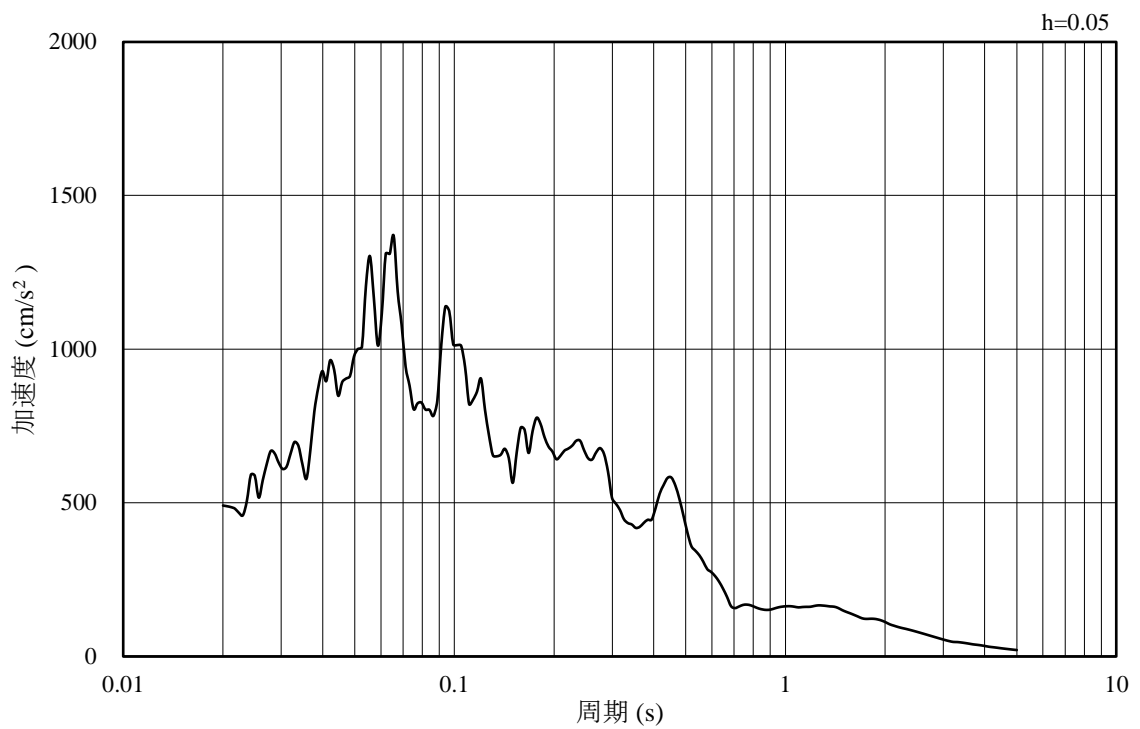


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-10 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
(水平成分：S s - N 2 (N S))

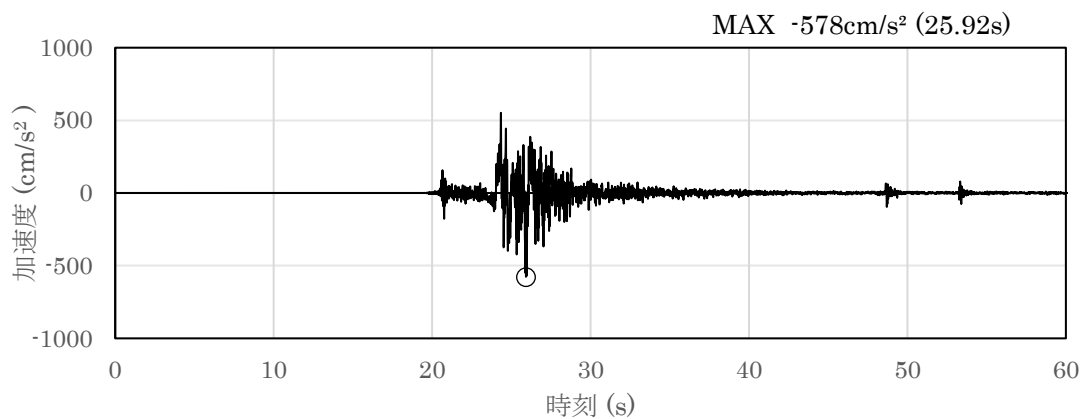


(a) 加速度時刻歴波形

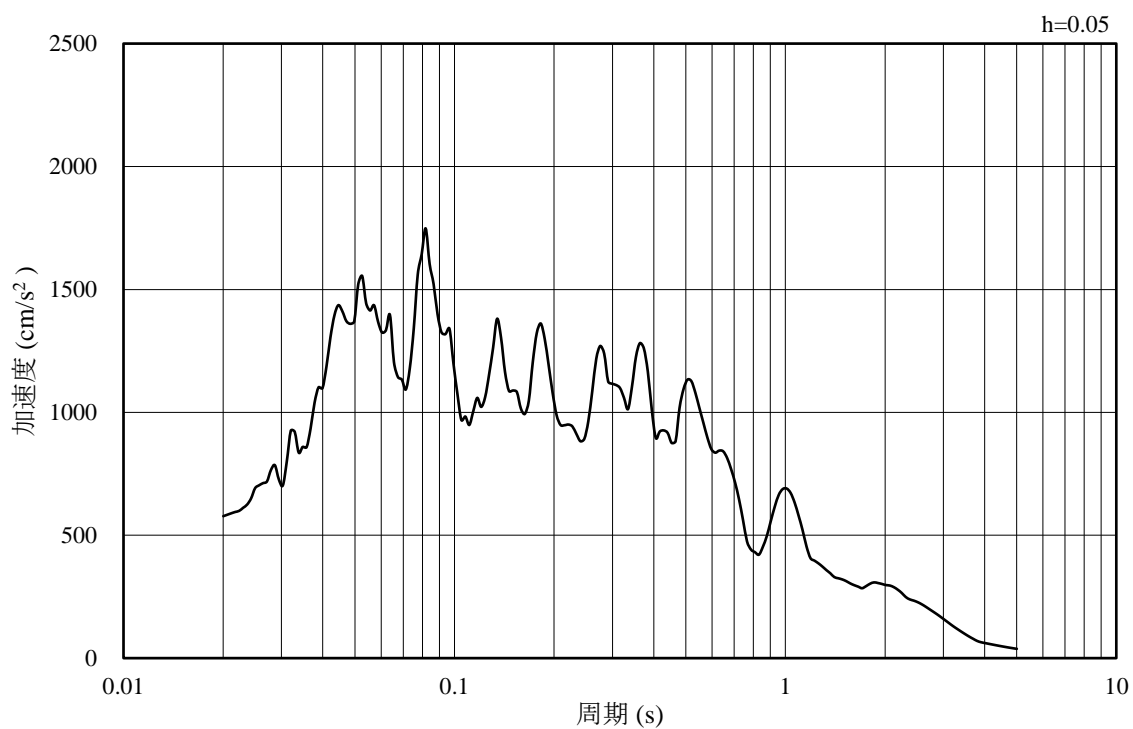


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-11 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
(鉛直成分：S s - N 2 (N S))

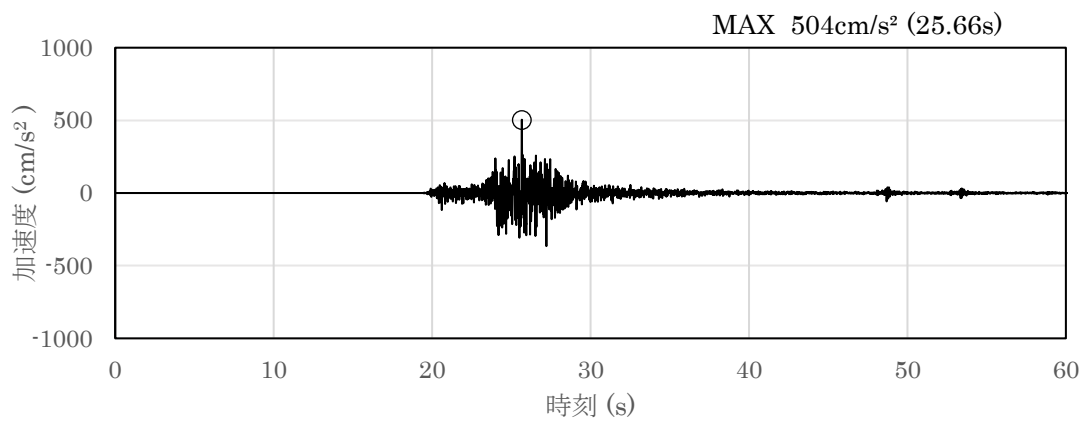


(a) 加速度時刻歴波形

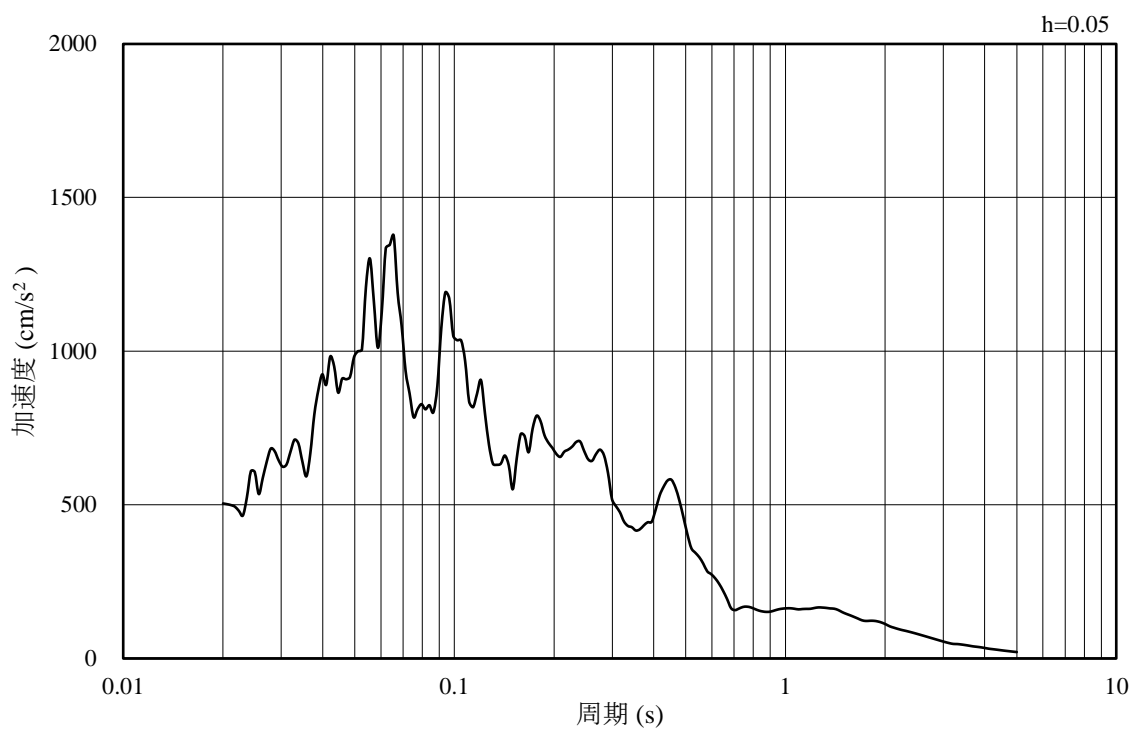


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-12 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
(水平成分：S s - N 2 (E W))

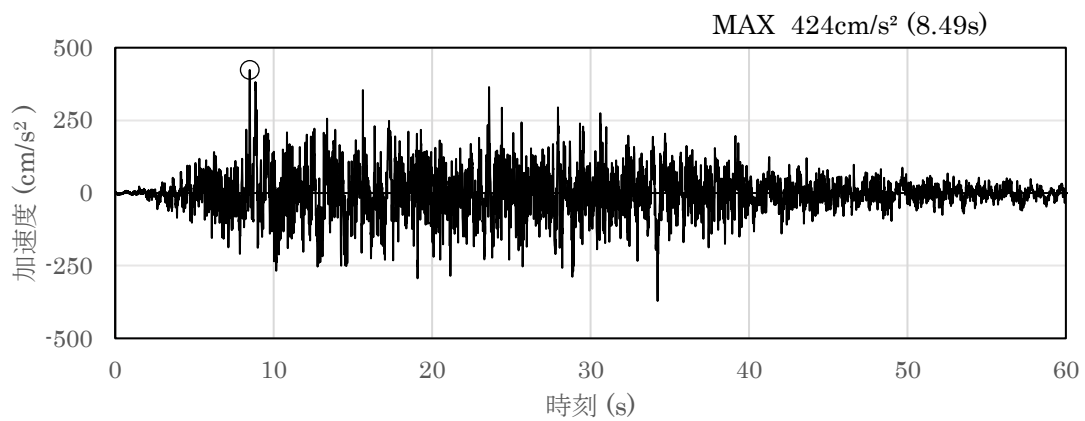


(a) 加速度時刻歴波形

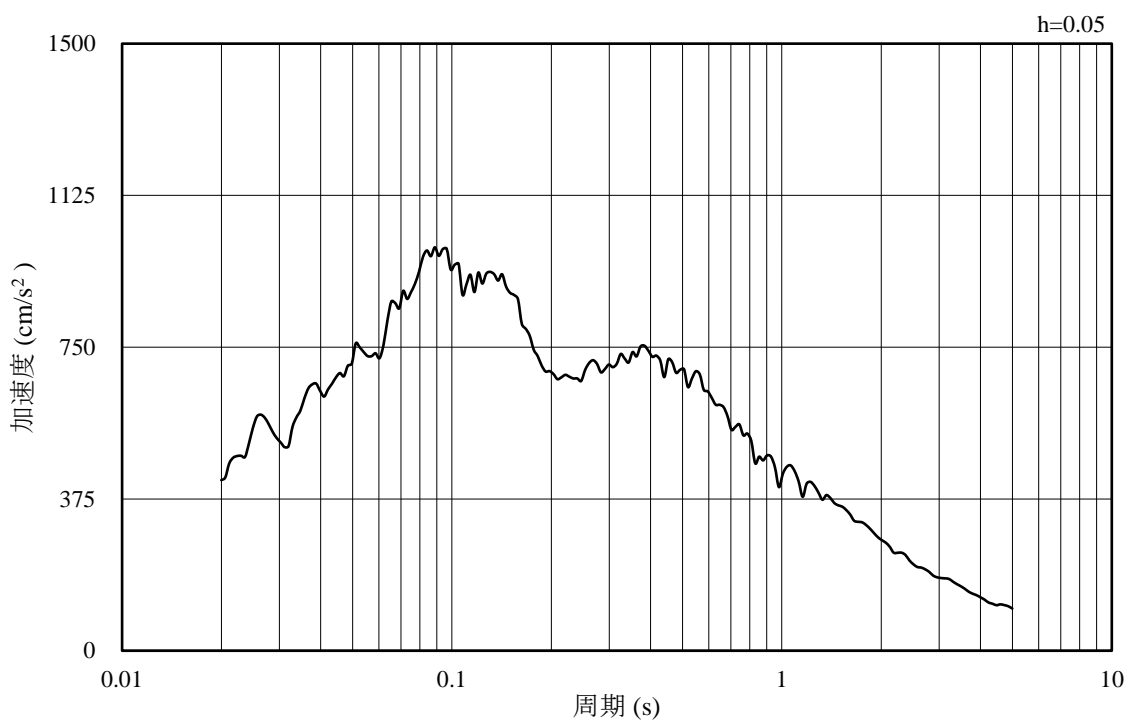


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-13 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
(鉛直成分：S s - N 2 (E W))

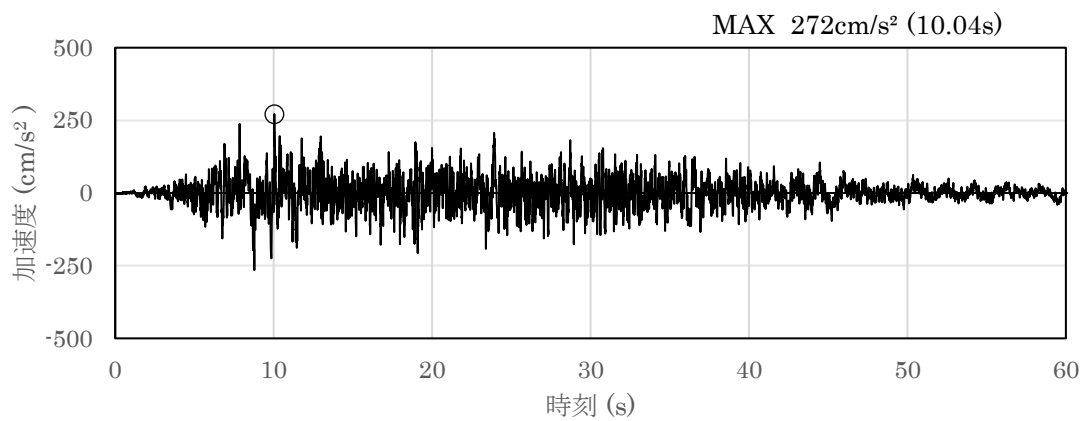


(a) 加速度時刻歴波形

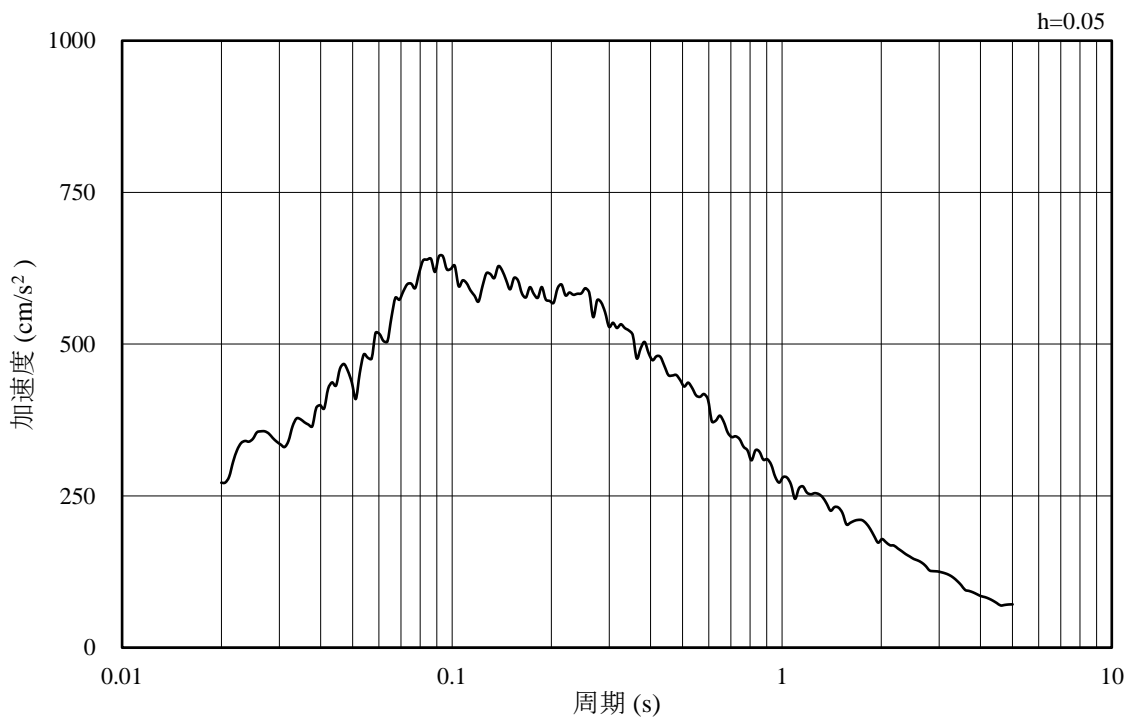


(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-14 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
(水平成分 : S d - D)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4.4.1-15 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 d - D)

4.4.2 許容限界の設定

1号機取水槽北側壁及び漸拡ダクト部充填コンクリートの耐震安全性評価は、以下に示すように許容限界を設定し照査を行う。

耐震安全性評価は、限界状態設計法を用いることとし、限界状態設計法については以下に詳述する。

(1) 1号機取水槽北側壁の照査

a. 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

照査対象となる北側壁は、PHb工法を適用する部材であるため、おおむね弾性範囲となる状況下で使用することから、構造部材に発生する曲げモーメントが鉄筋降伏に相当する降伏モーメントを下回ることを確認する。鉄筋コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表4.4.2-1に示す。

曲げ・軸力系の破壊に対する断面力による照査の際にも安全係数を見込むこととし、考慮する安全係数の一覧を表4.4.2-2に示す。

表 4.4.2-1 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

確認項目	許容限界	
構造強度を有すること	曲げモーメント	降伏モーメント*1

$$*1: \gamma_i \frac{M_d}{M_y} < 1.0$$

ここで、

γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

M_y : 鉄筋降伏に相当する曲げモーメント

M_d : 照査用曲げモーメント ($M_d = \gamma_a \cdot M$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.0$)

M : 発生曲げモーメント

表 4.4.2-2 曲げ・軸力系の破壊に対する照査（断面力）において考慮する安全係数

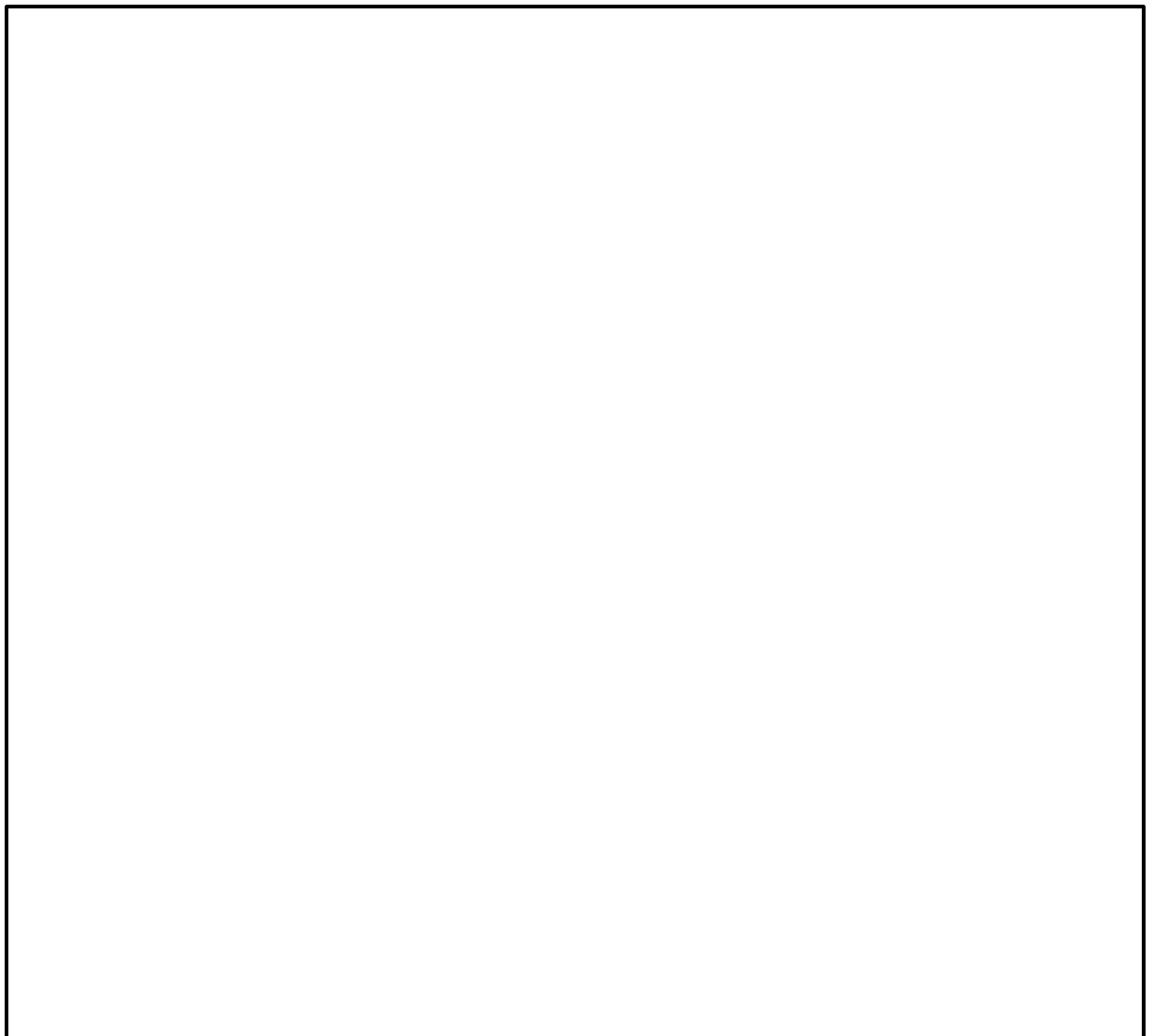
安全係数			曲げ・軸力系の破壊に対する照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数		γ_b	—	1.15	曲げ耐力（断面終局に相当する曲げモーメント）を低減

b. せん断破壊に対する許容限界

1号機取水槽北側壁については、PHb工法を適用していることから「(a) PHbによりせん断補強された部材のせん断耐力式」を用いる。

(a) PHbによりせん断補強された部材のせん断耐力式

後施工せん断補強（ポストヘッドバー（PHb））を配置した構造部材のせん断耐力については、「建設技術審査証明報告書 技術名称 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」、一般財団法人土木研究センター」（以下「建設技術証明書」という。）に示されている以下の設計式により求める。



PHb が負担するせん断耐力は，先端型定着体の定着長が $3.5D \sim 5.5D$ であることから，通常のせん断鉄筋に比べ補強効率が低下する。PHb が負担するせん断耐力は同定着長と補強対象部材の主鉄筋間隔から算出される有効率 β_{aw} を通常のせん断補強鉄筋の負担分に乗じることにより考慮されている。図 4.4.2-1 に有効率算定における概念図を示す。



図 4.4.2-1 ポストヘッドバー (PHb) の有効率算定の概念図

なお，設計上の保守的な配慮として，ポストヘッドバー (PHb) によるせん断補強を配置する場合は，対象とする構造部材の主鉄筋の降伏以下の場合に適用することとし，せん断破壊に対する照査値は 0.80 程度とする。

また，土木学会マニュアル 2005 におけるせん断耐力式による評価においては，表 4.4.2-3 に示すとおり，複数の安全係数が見込まれていることから，せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施することが可能である。

表 4.4.2-3 セン断耐力式による評価において考慮している安全係数

安全係数			せん断照査		内容
			応答値算定	限界値算定	
材料係数	コンクリート	$\gamma_{m c}$	1.0	1.3	コンクリートの特性値を低減
	鉄筋	$\gamma_{m s}$	1.0	1.0	—
部材係数*	コンクリート	$\gamma_{b c}$	—	1.3	せん断耐力（コンクリート負担分）を低減
	鉄筋	$\gamma_{b s}$	—	1.1	せん断耐力（鉄筋負担分）を低減
構造解析係数		γ_a	1.05	—	応答値（断面力）の割り増し

注記*：土木学会マニュアルでは，部材係数 $\gamma_b = \gamma_{b 1} \cdot \gamma_{b 2}$ とされている。

$$\gamma_{b 1} = \begin{cases} 1.3 & (\text{コンクリート}) \\ 1.1 & (\text{鉄筋}) \end{cases}$$

$$\gamma_{b 2} = \begin{cases} 1.0 & (R \leq 0.01) \\ \frac{100R + 2}{3} & (0.01 < R \leq 0.025) \\ 1.5 & (R > 0.025) \end{cases}$$

ここで，R：層間変形角

$\gamma_{b 2}$ は層間変形角の値によらず，部材が降伏していない状態であれば， $\gamma_{b 2} = 1.0$ としてよいとされている。

(2) 漸拡ダクト部充填コンクリートの健全性に対する許容限界

漸拡ダクト部充填コンクリートの健全性評価としては、局所安全係数に対する照査を実施する。局所安全係数に対する照査は各要素において、全時刻で実施する。

$$f_s = R / S$$

ここに、 f_s : 局所安全係数

R : 表 4.4.2-4 に示すせん断強度又は引張強度

S : 発生せん断応力又は発生引張応力

表 4.4.2-4 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

	評価項目	算定式	許容限界
充填コンクリート $f'_{ck} = 20.6 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	せん断強度 (N/mm ²)	$1/5 f'_{ck}$	4.12
	引張強度 (N/mm ²)	$0.23 f'_{ck}^{2/3}$	1.72

(3) 基礎地盤の支持機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、岩盤の極限支持力度とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表 4.4.2-5 に示す。

表 4.4.2-5 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
極限支持力度	C _M 級又はC _H 級岩盤	9.8

4.5 評価結果

追而

2. 浸水防護施設に関する補足資料

2.3 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明

2.3.2 1号機取水槽流路縮小工の強度計算書に関する補足説明

目次

1.	概要	1
2.	位置	2
3.	流路縮小工の強度評価	5
3.1	構造計画	5
3.2	評価方針	7
3.3	適用規格・基準等	9
3.4	記号の説明	10
3.5	評価対象部位	13
3.6	荷重及び荷重の組合せ	17
3.6.1	荷重の組合せ	17
3.6.2	荷重の設定	19
3.6.3	荷重の選定	29
3.7	許容限界	30
3.7.1	使用材料	30
3.7.2	許容限界	30
3.8	評価方法及び評価条件	31
3.9	評価結果	49

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、1号機取水槽流路縮小工（以下「流路縮小工」という。）が地震後の繰返しの来襲を想定した経路からの津波の流入に伴う津波荷重及び余震による荷重に対し、主要な構造部材が十分な構造強度を有することを確認するものである。

2. 位置

流路縮小工は、1号機取水槽と1号機取水管の境界部に設置し、1号機取水槽北側壁に間接支持される構造とする。

流路縮小工の設置位置図を図2-1に、流路縮小工の詳細位置図を図2-2に、流路縮小工の詳細図を図2-3に示す。

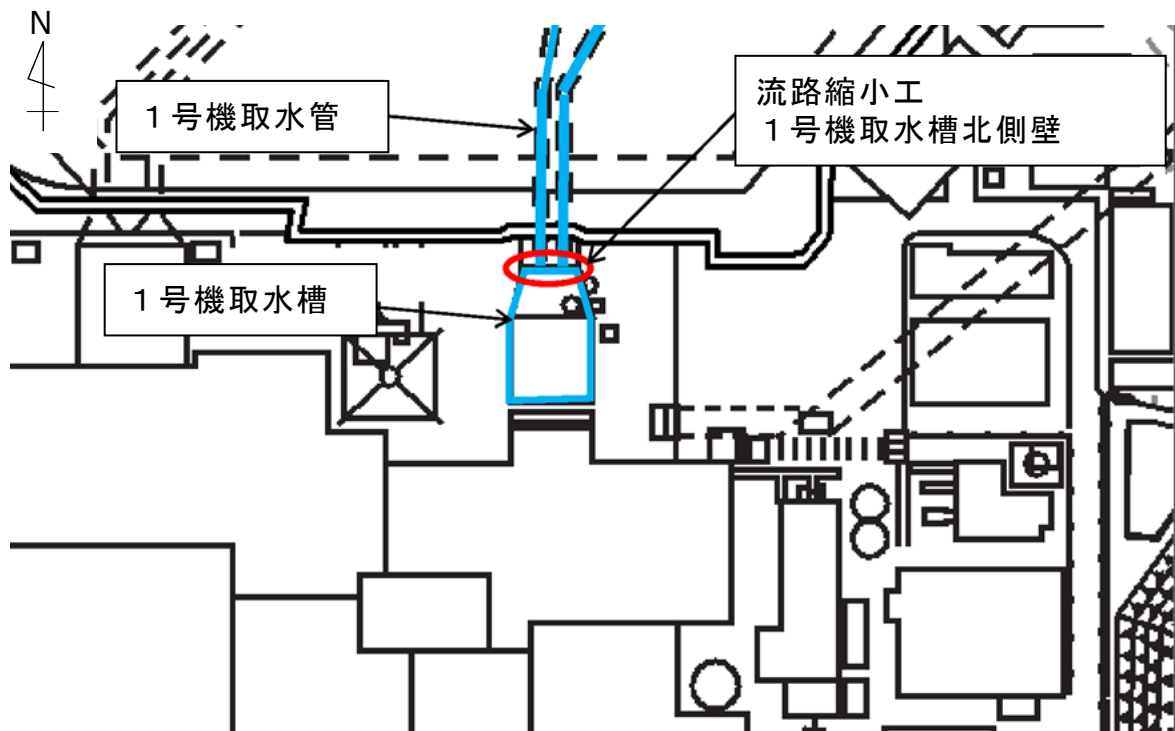
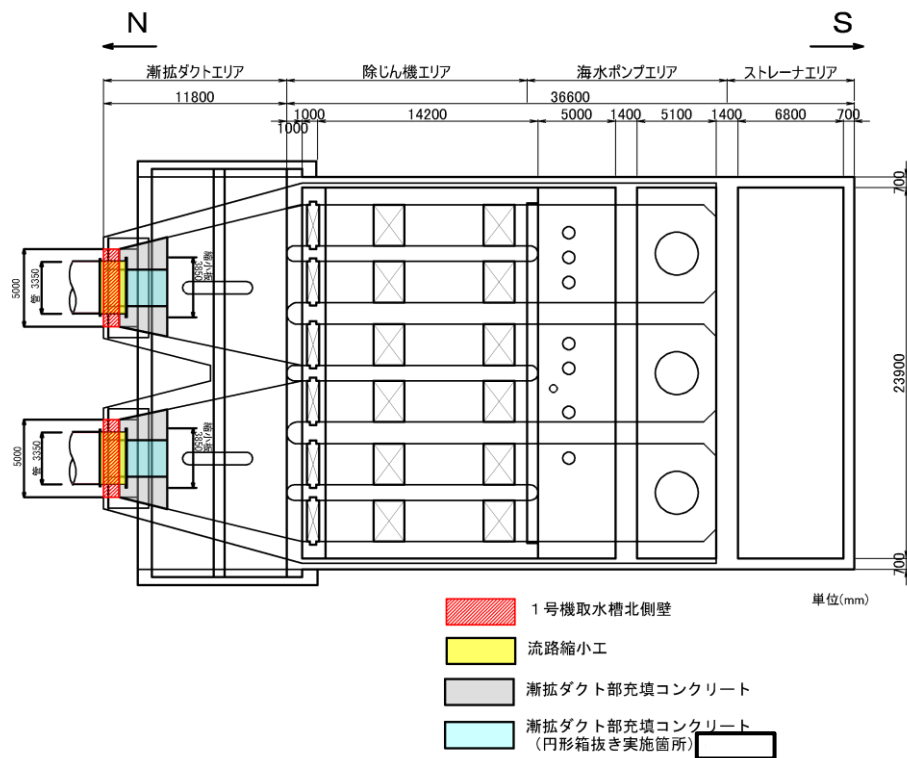
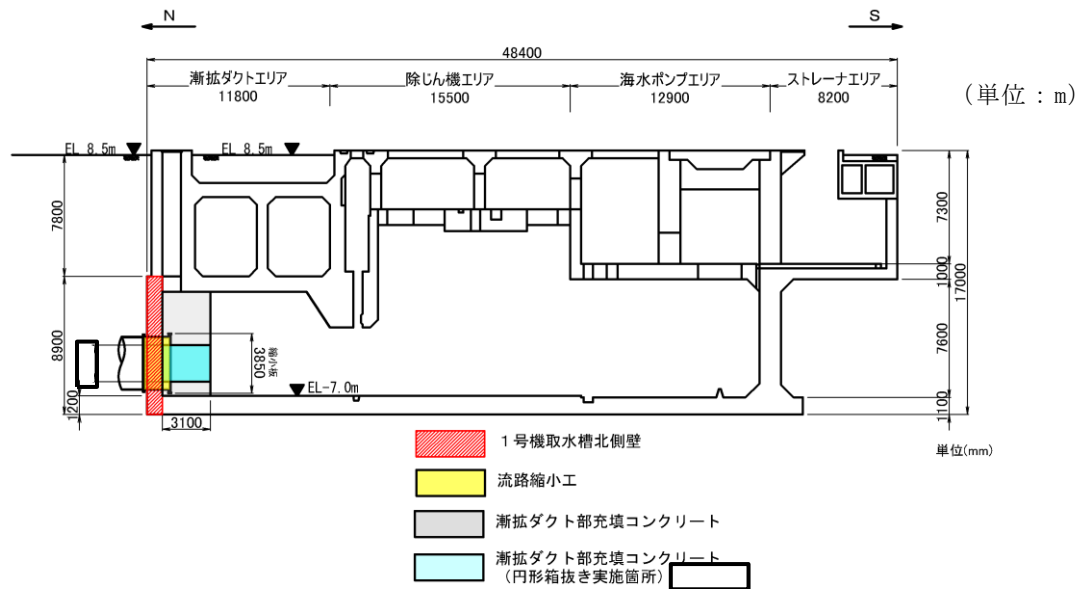


図2-1 流路縮小工の設置位置図



平面図



縦断図

図 2-2 流路縮小工の詳細位置図

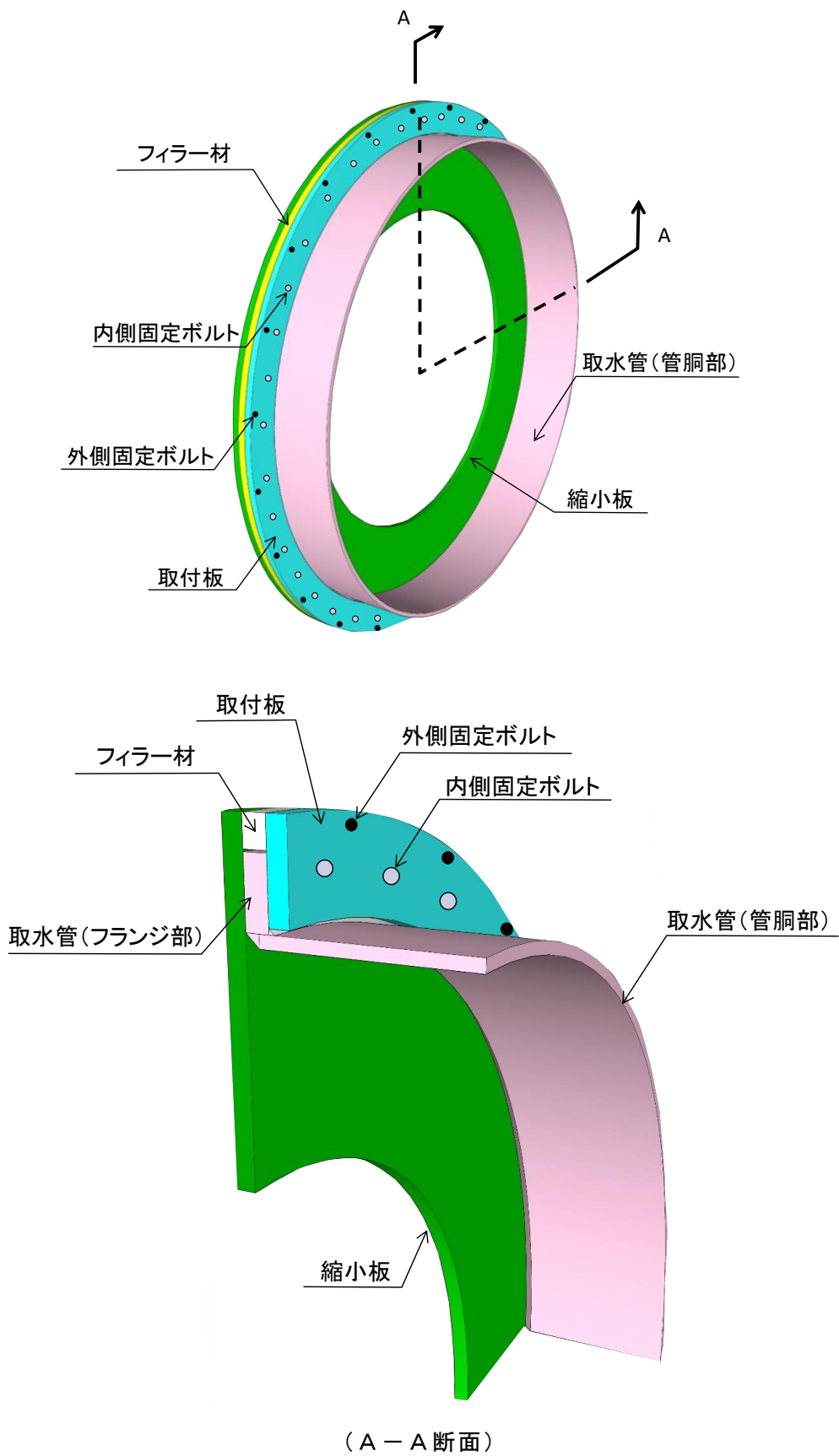


図 2-3 流路縮小工の詳細図

2.3.2-4

3. 流路縮小工の強度評価

3.1 構造計画

流路縮小工は、1号機取水管からの津波の流入を抑制し、1号機取水槽から津波が溢水することを防止するため、1号機取水管の流路を鋼製の縮小板により縮小するものである。流路縮小工は、1号機取水管の終端部のフランジ（以下「取水管（フランジ部）」という。）に、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する構造とする。よって、流路縮小工は、既設の1号機取水管の管胴部（以下「取水管（管胴部）」という。）、取水管（フランジ部）縮小板、取付板及び固定ボルトから構成される。なお、1号機の原子炉補機海水ポンプに必要な海水を取水するため、縮小板に直径 m の開口部を設ける。

1号機取水槽は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。これにより、流路縮小工を構成する部材については、縮小板及び取水管（管胴部）を除いてコンクリートに被覆される。縮小板及び取水管（管胴部）については、コンクリートを充填することから、定期的な維持管理が不要となるよう、設計上の配慮として、余裕厚を有する構造とする。

流路縮小工の構造計画を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 流路縮小工の構造計画

計画の概要		構造概略図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>取水管（フランジ部）に、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する。</p>	<p>縮小板，取付板及び固定ボルトにより構成する。</p>	<p>組立図（A-A断面）</p> <p>単位 (m)</p>
		<p>正面図</p> <p>単位 (mm)</p>

3.2 評価方針

流路縮小工は、Sクラス施設である津波防護施設に分類される。

1号機取水槽は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。これにより、流路縮小工の大部分はコンクリートに拘束されるため、剛構造であると考えられるが、保守的にコンクリートによる拘束は期待しない方針とする。

流路縮小工の強度評価は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3.1 構造計画」に示す流路縮小工の構造を踏まえ、「3.5 評価対象部位」にて設定する評価部位において、「3.8 評価方法及び評価条件」で算出した応力度が許容限界内に収まることを確認する。応力評価の確認結果を「3.9 評価結果」にて確認する。

流路縮小工の評価項目を表 3.2-1 に、強度評価フローを図 3.2-1 に、1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図を図 3.2-2 示す。

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、地震後の繰返しの来襲を想定した経路からの津波に伴う荷重作用時（以下「津波時」という。）及び津波に伴う荷重と余震に伴う荷重作用時（以下「重畳時」という。）を考慮し、評価される最大荷重を設定する。

津波時における津波荷重は、日本海東縁部を波源とした津波による浸水津波荷重とし、重畳時における津波荷重は、海域活断層を波源とした津波による浸水津波荷重とする。

重畳時における余震荷重は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示す津波荷重との重畳を考慮する弾性設計用地震動 S_d-D による地震力とする。余震荷重の設定にあたっては、弾性設計用地震動 S_d-D を入力して得られた1号機取水槽北側壁の応答加速度を考慮して設定した設計震度を用いる。

表 3.2-1 流路縮小工の評価項目

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	縮小板	曲げ軸力、せん断力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		固定ボルト	引張力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		取水管 (フランジ部)	曲げ軸力、せん断力に対する発生応力度が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度

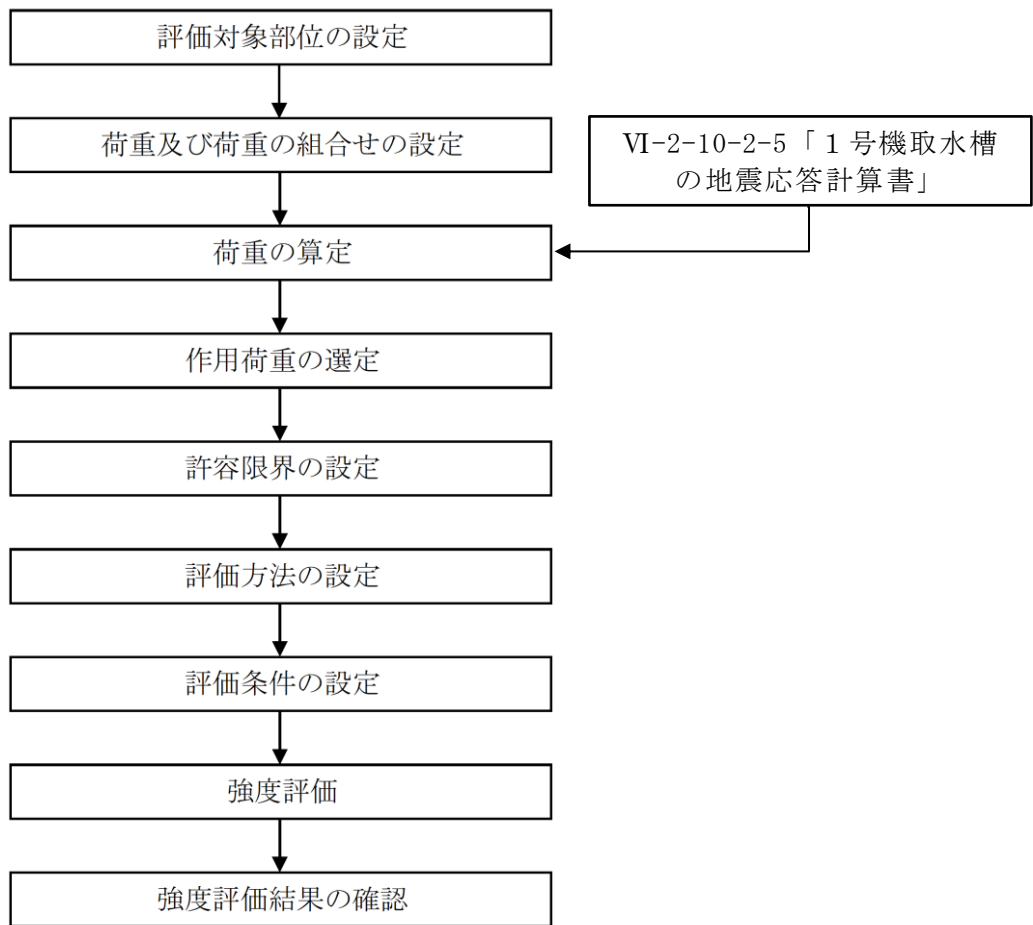
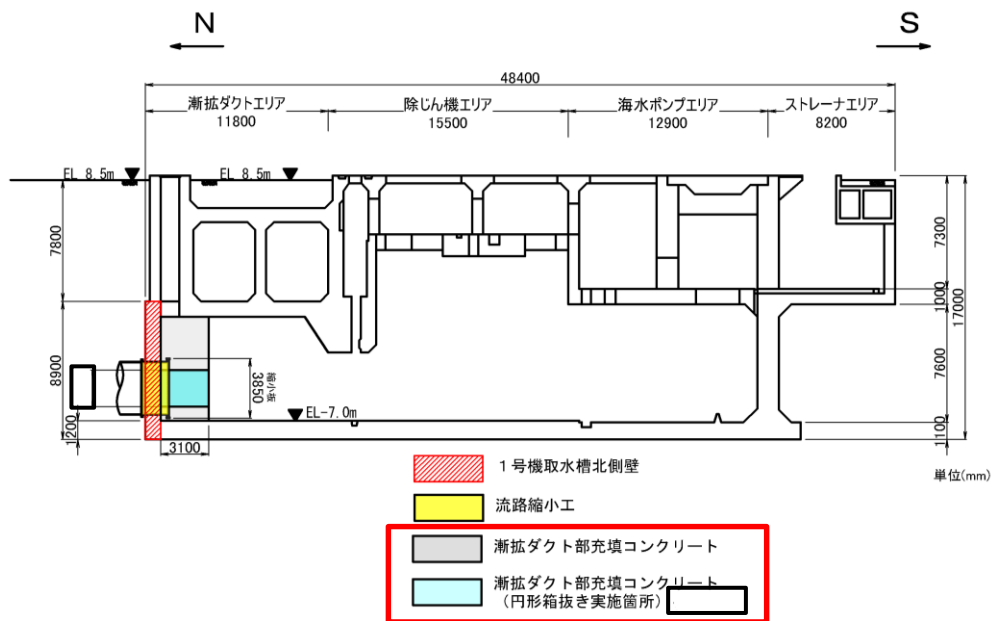


図 3.2-1 強度評価フロー



流路縮小工は充填コンクリートを期待せずに強度評価を行う。

図 3.2-2 1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図

2.3.2-8

3.3 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。また、各項目で適用する規格，基準類を表 3.3-1 に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル ((社) 土木学会, 2005 年)
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 年版)
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 2005 年改訂)
- ・鋼構造許容応力度設計規準 ((社) 日本建築学会, 2019 年制定)
- ・J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト, 小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ
- ・構造力学公式集 ((社) 土木学会, 1986 年)
- ・水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編 ((社) 水門鉄管協会, 2007 年)

表 3.3-1 各項目で適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
荷重及び荷重の組合せ	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 年版)	流路縮小工に作用する荷重のうち抗力の算定
	水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編 ((社) 水門鉄管協会, 2007 年)	流路縮小工に作用する荷重のうち摩擦による推力の算定
許容限界	鋼構造設計規準—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 2005 年改訂)	曲げ・軸力照査及びせん断力照査は, 発生応力度が短期許容応力度以下であることを確認
	鋼構造許容応力度設計規準 ((社) 日本建築学会, 2019 年制定)	
	J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト, 小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ	
評価方法	構造力学公式集 ((社) 土木学会, 1986 年)	流路縮小工に生じる曲げ応力度及びせん断応力度の算定
地震応答解析	原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)	有限要素法による二次元モデルを用いた時刻歴非線形解析
	原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル ((社) 土木学会, 2005 年)	

3.4 記号の説明

流路縮小工の強度評価に用いる記号を表 3.4-1～表 3.4-3 にそれぞれ示す。

表 3.4-1 流路縮小工の縮小板の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
p_0	kN/mm^2	縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重
P	kN	縮小板に作用する津波時荷重
A_{11}	mm^2	縮小板の作用面積
a_1	mm	縮小板の外半径
b_1	mm	縮小板の内半径
M_{r1}	$\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{mm}$	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta 1}$	$\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{mm}$	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
ν	—	ポアソン比
r_1	mm	縮小板の中心から半径方向の距離
κ_1	—	係数(= $\beta_1^2 \{ (1-\nu) \beta_1^2 + (1+\nu) (1+4\beta_1^2 \ln \beta_1) \} / \{ 1-\nu + (1+\nu) \beta_1^2 \}$)
β_1	—	係数(= b_1/a_1)
ρ_1	—	係数(= r_1/a_1)
σ_1	N/mm^2	縮小板に生じる最大曲げ応力度
Z_1	mm^3	縮小板の断面係数
t_1	mm	縮小板の板厚
τ_1	N/mm^2	縮小板に生じる最大せん断応力度
S_1	kN	縮小板に作用するせん断力
A_{12}	mm^2	縮小板の有効せん断面積

表 3.4-2 流路縮小工の固定ボルトの強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
T	kN/本	内側固定ボルトに作用する引張力
T_1	kN/本	縮小板に発生する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力
T_2	kN/本	縮小板に発生する曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する引張力
P	kN	内側固定ボルトに作用する津波時荷重
n	本	内側固定ボルトの本数
M	kN・mm/mm	縮小板に生じる曲げモーメント合力
D_1	mm	フランジ外径
l_1	mm	支点間距離
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積
σ_b	N/mm ²	内側固定ボルトに生じる最大応力度

表 3.4-3 流路縮小工の取水管（フランジ部）の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
P'	kN/mm	取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重
L_f	mm	取水管（フランジ部）の外周長
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径
M_{rf}	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta f}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径
ν	—	ポアソン比
κ_f	—	係数(= $\beta_f^2 \{1+(1+\nu) \ln \beta_f\} / \{1-\nu+(1+\nu) \beta_f^2\}$)
β_f	—	係数(= b_f/a_f)
ρ_f	—	係数(= r_f/a_f)
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離
σ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度
Z_f	mm ³	取水管（フランジ部）の断面係数
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚
τ_f	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度
S_f	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力
A_3	mm ²	取水管（フランジ部）付け根の断面積
D_i	mm	取水管（フランジ部）の管内径
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚
l_f	mm	取水管（フランジ部）付け根の周長

3.5 評価対象部位

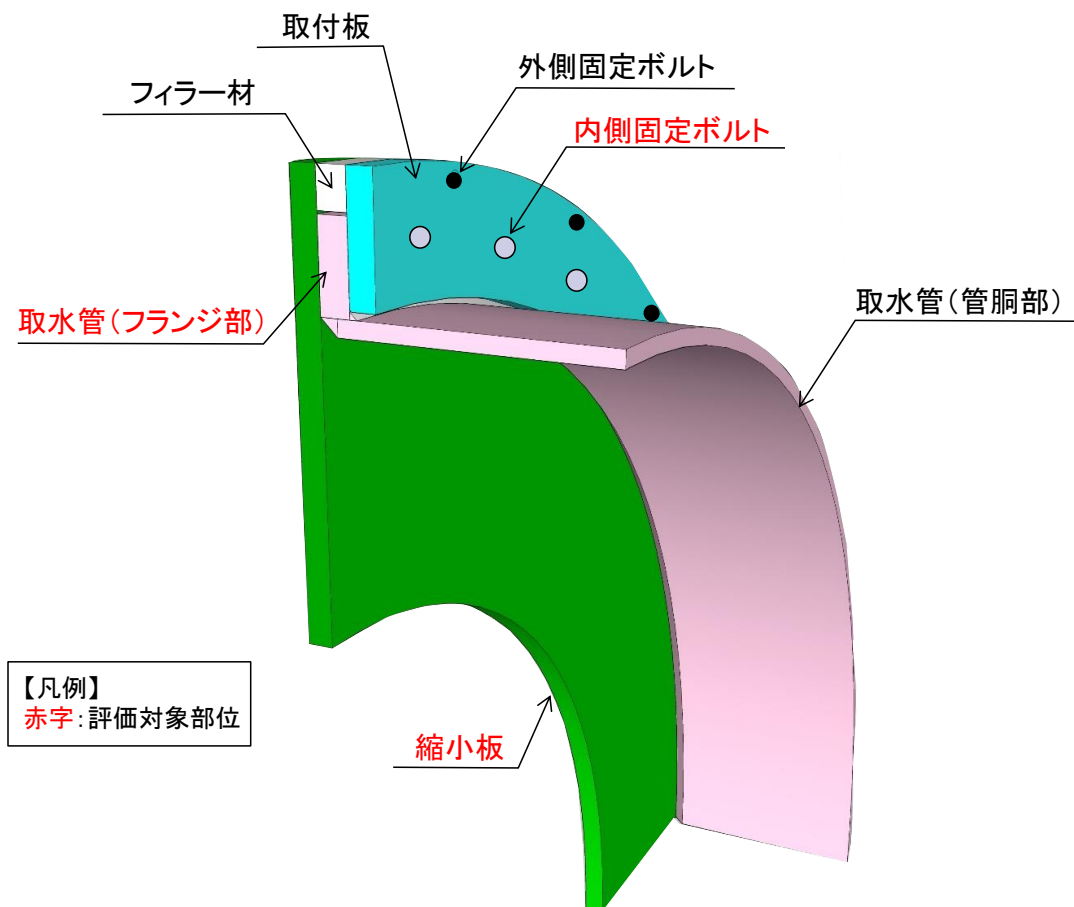
流路縮小工の評価対象部位は、「3.1 構造計画」に設定している構造を踏まえて、津波時荷重又は重畳時荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、縮小板、固定ボルト、取水管（フランジ部）とする。

なお、縮小板と取付板は固定ボルトにより強固に固定された一体構造であるとともに、縮小板と取付板は同様の材質及び厚さであることから、荷重が直接作用する縮小板を代表として評価する。

取水管（管胴部）は、重畳時において、弾性設計用地震動 S_d-D による慣性力が作用するが、地震時における基準地震動 S_s による慣性力が大きいことから、「2.3.1 1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書に関する補足説明」にて説明する。

固定ボルトは内側固定ボルト及び外側固定ボルトにより構成され、それぞれの固定ボルトが引張力を負担するが、内側固定ボルトと外側固定ボルトの位置が半径方向で異なることから、内側固定ボルトのみにより引張力を負担するものとして、保守的に強度計算を実施する。

評価対象部位を図 3.5-1 に示す。



縮小板の内側固定ボルトと外側固定ボルトの縁端距離は 72mm であり、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005 年改訂）」に基づく最小縁端距離（ボルト径 30mm の場合 54mm 以上）を確保していることから固定ボルトの縁端距離は妥当と判断した。また，固定ボルトにより縮小板は強固に固定されており，固定ボルトのせん断方向の変形は抑制されるため，縁端距離が構造成立性に与える影響は軽微であると考えられる。

固定ボルト構造概要図を図 3.5-2 に示す。

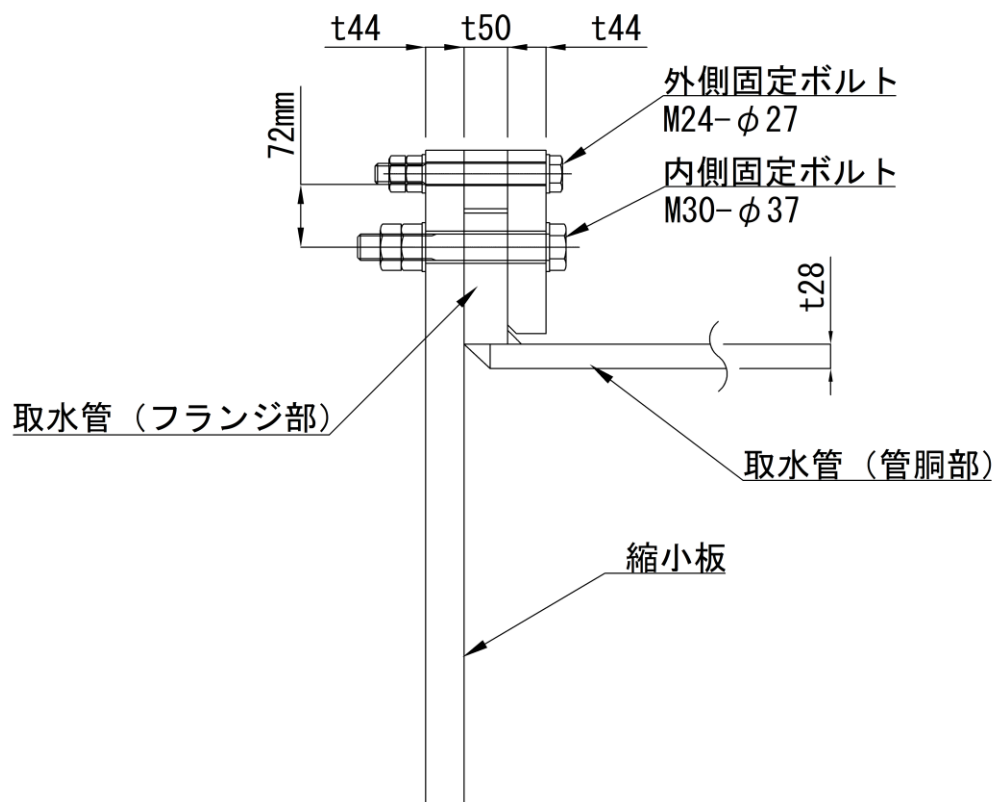


図 3.5-2 固定ボルト構造概要図

1号機取水管は複数の鋼管を継手した構造であり、流路縮小工の近傍の継手部（以下「1号機取水管継手部」という。）は固定ボルトにより固定している。1号機取水管継手部の取水管は、1号機取水槽北側壁に巻き込まれるように施工され、固定されていることから、1号機取水管継手部の固定ボルトに生じる引張力は軽微である。また、縮小板の固定ボルトについては、余震時において、縮小板に作用する動水圧が伝達されるが、1号機取水管継手部は、動水圧が作用しないため、1号機取水管継手部の固定ボルトに作用する荷重と比べて縮小板の固定ボルトに作用する荷重の方が大きくなることから縮小板の固定ボルトを代表として評価する。

1号機取水管継手部の位置図を図 3.5-3 に示す。

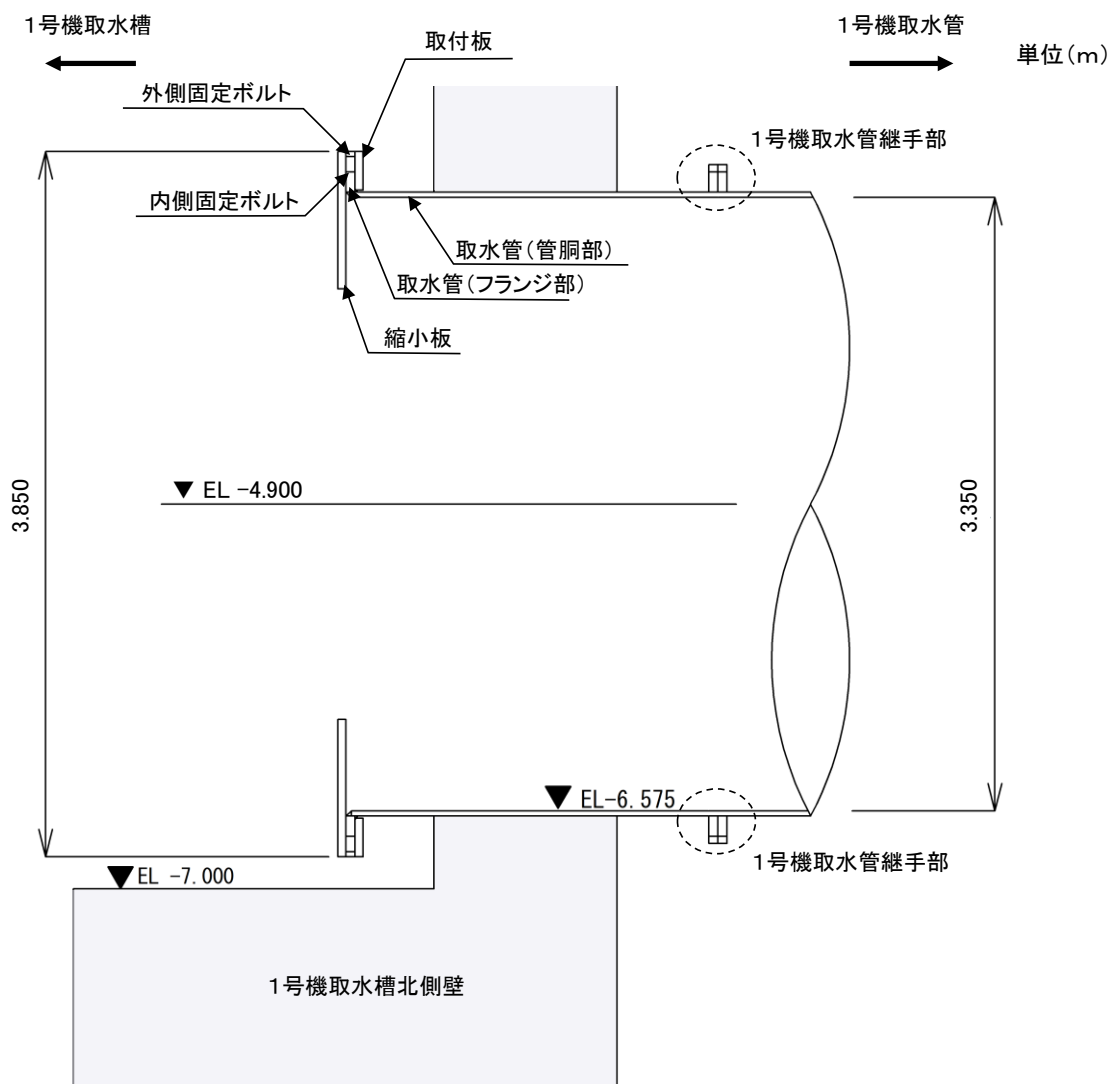


図 3.5-3 1号機取水管継手部の位置図

縮小板を設置する1号機取水管終端部は、1号機取水管継手部を介して、隣接する1号機取水管に継手している。1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工の周囲にコンクリートを充填することにより、1号機取水管終端部の大部分は剛構造であることから、隣接する1号機取水管の管径方向の変形（土圧による内空側への変形）及び管軸方向の変形（地震動による水平及び鉛直方向の変形）が縮小板の健全性に及ぼす影響は軽微である。

1号機取水管の拘束状況図を図3.5-4に示す

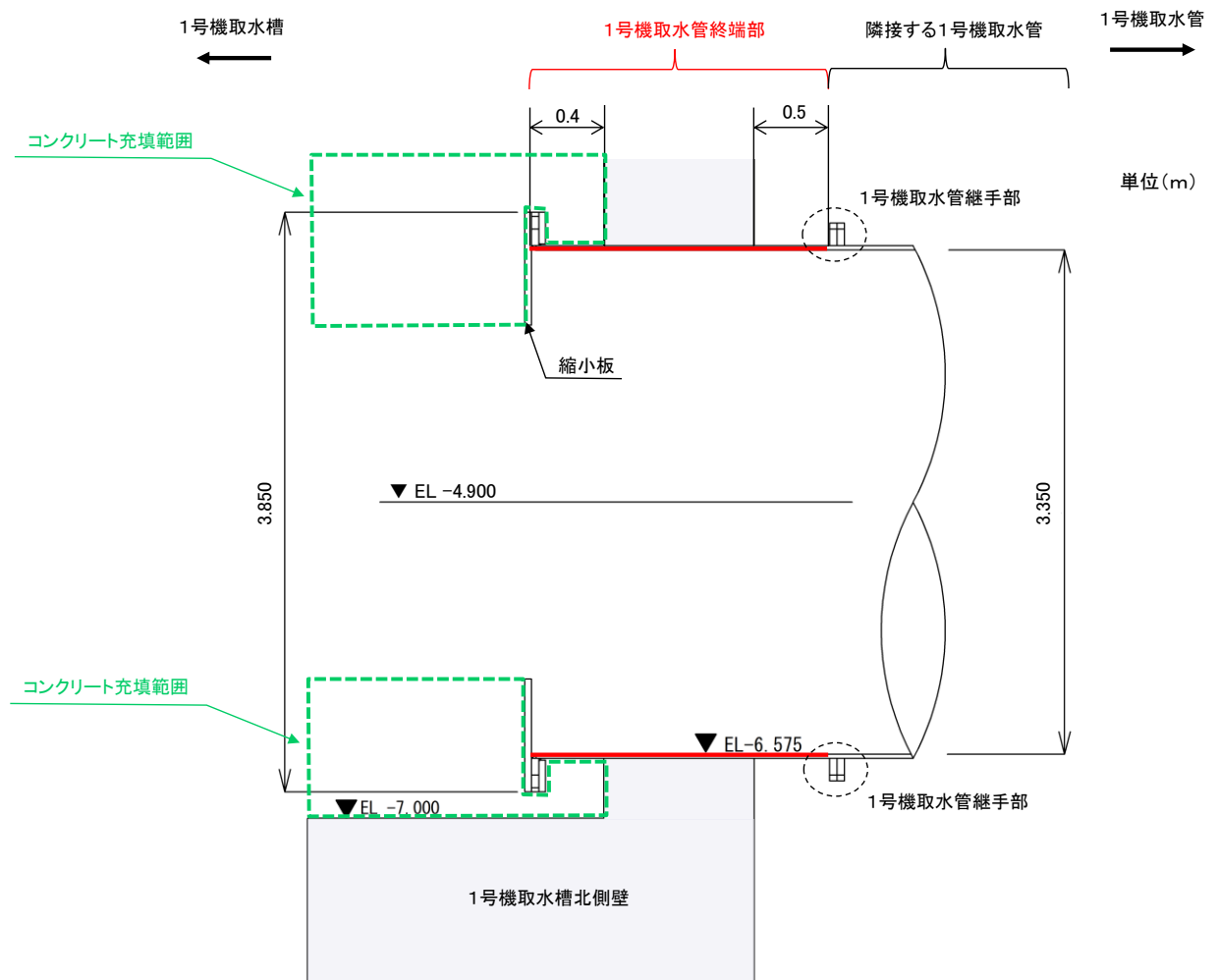


図3.5-4 1号機取水管の拘束状況

3.6 荷重及び荷重の組合せ

3.6.1 荷重の組合せ

流路縮小工の評価に用いる荷重の組合せを以下に示す。荷重の組合せを表 3.6.1-1 に、荷重の作用図を図 3.6.1-1 に示す。

(1) 津波時

$$G + P_h$$

ここで、 G : 固定荷重 (kN)

P_h : 静水圧荷重 (kN)

(2) 重畳時

$$G + P_h + K S_d$$

ここで、 G : 固定荷重 (kN)

P_h : 静水圧荷重 (kN)

$K S_d$: 余震荷重 (kN)

表 3.6.1-1 荷重の組合せ

種別	荷重	記号	算定方法
固定荷重	躯体自重	G	設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
静水圧荷重	静水圧	P h	管路解析より 1 号機取水口と 1 号機取水槽との水位差による静水圧を考慮する。
	抗力		津波流速により縮小板に作用する荷重を考慮する。
	推力		津波流速により縮小板に作用する荷重を考慮する。
余震荷重	水平地震動	K S d	弾性設計用地震動 S d - D による躯体の慣性力を考慮する。
	動水圧		管路解析より 1 号機取水槽の水位が最大となる水位での動水圧を考慮する。

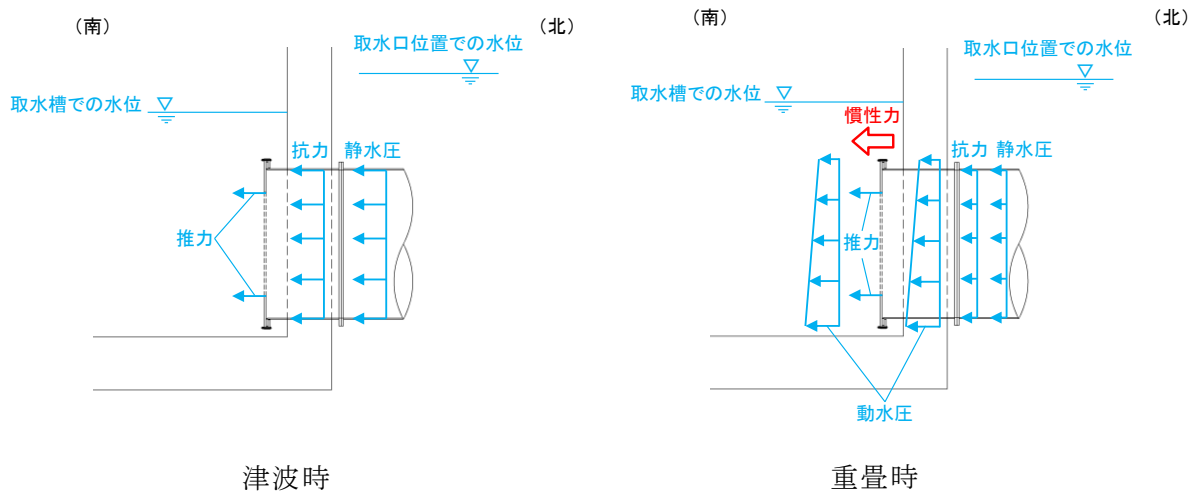


図 3.6.1-1 流路縮小工の荷重作用図

3.6.2 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下のとおりとする。なお、荷重の設定に用いる水位及び流速の詳細については、「2.3.3 1号機流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響 参考資料1 1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速」に示す。

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、流路縮小工を構成する部材の自重を考慮する。

(2) 静水圧荷重 (P_h)

静水圧荷重はVI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、静水圧、抗力及び推力を考慮する。

a. 静水圧 (F_h)

流路縮小工の上下流の水位差を考慮した静水圧を考慮することとし、以下の式により算定する。上下流の水位差は、2条ある1号機取水管ごとに1号機取水口と1号機取水槽の水位差を算定し、そのうち水位差が大きい値を設定する。

表 3.6.1-1 に静水圧による荷重の算定における計算条件を、図 3.6.1-1 に静水圧の荷重作用図を示す。なお、津波時及び重畳時における静水圧は取水口から取水槽の方向に作用するものとする。

$$F_h = \gamma_w \times \Delta h \times A$$

ここで、

F_h : 静水圧 (kN)

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Δh : 取水口と取水槽の水位差 (m)

A : 縮小板の面積 (m²)

表 3.6.2-1 静水圧による荷重

項目		単位	津波時	重畳時
1号機取水槽水位	—	m	EL-0.21	EL-2.34
1号機取水口水位	—	m	EL 8.15	EL-0.02
上下流の水位差	Δh	m	8.36	2.32
縮小板の面積	A	m ²	7.304	7.304
静水圧による荷重	F_h	kN	617	171

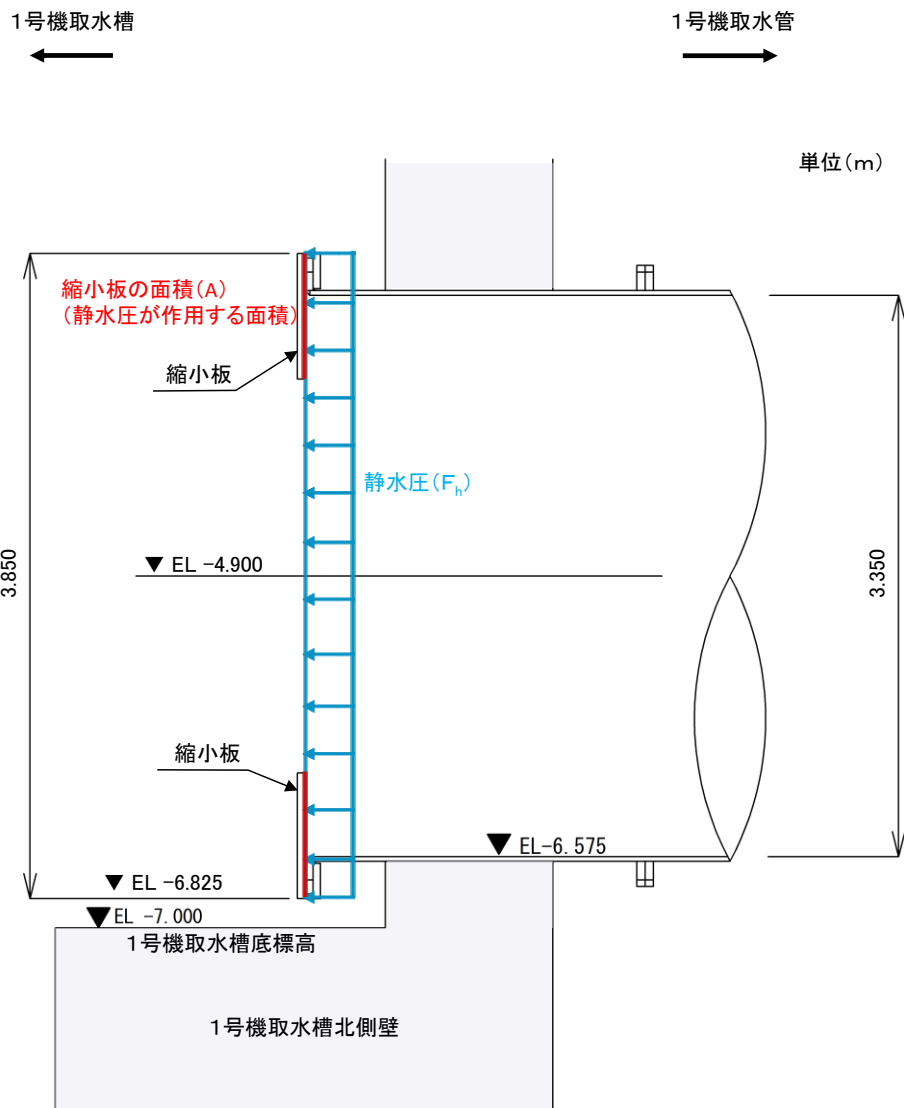


図 3.6.2-1 静水圧の荷重作用図

b. 抗力 (F_d)

抗力は「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」に基づき，以下の式により算定する。

抗力係数C_Dについては，「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」に記載される表3.6.2-2に示すとおり，物体の形状に応じて設定するものであるが，開口を有する物体の抗力係数C_Dは記載されておらず，流路縮小工に対して，表3.6.2-2から適切な抗力係数C_Dを設定することはできない。そのため，「NS2-補-018-02 津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 1.7 入力津波の流路縮小工による水位低減効果の考慮について」において水理模型実験を実施しており，実験結果より，流路縮小工における抗力係数C_Dは0.51であることを確認している。流路縮小工の強度評価においては，安全側に評価する観点から表3.6.2-2のうち，最大値である2.01を採用する。

表3.6.2-3に抗力による荷重の算定における計算条件を示す。

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho_0 \times C_D \times A \times v^2$$

ここで，

F_d : 抗力 (kN)

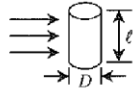
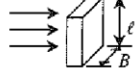

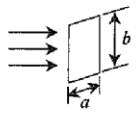
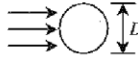
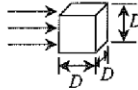
ρ₀ : 密度 (=1.03t/m³)

C_D : 抗力係数 (=2.01)

A : 縮小板の面積 (m²)

v : 流速 (m/s)

表 3.6.2-2 抗力係数

物体の形状	基準面積	抗力係数
円柱 (粗面) 	Dl	1.0 ($l > D$)
角柱 	Bl	2.0 ($l > B$)
円板 	$\frac{\pi}{4}D^2$	1.2
平板 	ab	$a/b=1$ の場合 1.12 " 2 " 1.15 " 4 " 1.19 " 10 " 1.29 " 18 " 1.40 " ∞ " 2.01
球 	$\frac{\pi}{4}D^2$	0.5~0.2
立方体 	D^2	1.3~1.6

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」P269より引用，一部加筆

表 3.6.2-3 抗力による荷重

項目		単位	津波時	重畳時
縮小板の面積	A	m ²	7.304	7.304
流速	v	m/s	10.0	6.0
抗力による荷重	F _d	kN	756	272

c. 摩擦による推力 (P_{ht})

摩擦による推力は「水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編（(社)水門鉄管協会，2007年）」に基づき，以下の式により算定する。

$$P_{ht} = \frac{2 f Q^2}{g \pi D^3} \times L$$

ここで，

P_{ht} : 摩擦による推力 (kN)

f : 流水の摩擦抵抗係数 ($=0.2 \cdot D^{-1/3}$)

D : 貫通部直径 (m)

L : 貫通部長さ (m)

Q : 流量 ($=v \times A'$) (m^3/s)

A' : 貫通部内空断面積 ($=\pi \times D^2/4$) (m^2)

v : 流速 (m/s)

g : 重力加速度 ($=9.80665m/s^2$)

表 3.6.2-4 に摩擦による推力による荷重の算定における計算条件を示す。なお，摩擦による推力 P_{ht} は，静水圧及び抗力と比較して十分に小さいことから考慮しない。

表 3.6.2-4 摩擦による推力

項 目		単 位	津波時	重畳時
流速	v	m/s	10.0	6.0
流量	Q	m^3/s	43.37	26.02
摩擦による推力	P_{ht}	kN	0.07*	0.03*

注記* : 十分に小さい値となるため考慮しない。

(3) 余震荷重 (K S d)

余震荷重として、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、弾性設計用地震動 S d - D に伴う慣性力及び動水圧荷重を考慮する。

流路縮小工の重畳時の評価に用いる設計震度は、VI-2-10-2-6「1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書」の固有振動数の計算結果から流路縮小工を剛構造として考慮したVI-2-10-2-5「1号機取水槽の地震応答計算書」の地震応答解析結果より、流路縮小工が設置される位置から抽出した加速度に、地盤物性のばらつきによる影響を考慮して、裕度をもった設計震度を設定する。

弾性設計用地震動 S d - D による最大加速度分布図及び加速度抽出位置を図 3.7.2-2 に、最大加速度及び設計水平震度を表 3.6.2-5 に示す。

追而

図 3.6.2-1 弾性設計用地震動 S d - D による水平方向の最大加速度分布図及び加速度抽出位置

表 3.6.2-5 弾性設計用地震動 S d - D による水平方向の最大加速度及び設計水平震度

地震動	位相	解析ケース	最大加速度 (cm/s ²)	設計水平震度 (K _h)
S d - D			追而	0.7

a. 慣性力

慣性力は、流路縮小工の重量に設計水平震度を乗じた次式により算出する。
縮小板、固定ボルト、取水管（フランジ部）に作用する慣性力による荷重の算定における計算条件を表 3.6.2-6 に、慣性力の算定に用いる重量の算定範囲を図 3.6.2-2 に示す。

$$P_h = W \times K_h$$

ここで、

P_h : 水平慣性力 (kN)

W : 重量 (kN)

K_h : 弾性設計用地震動 S d - D による設計水平震度

表 3.6.2-6(1) 慣性力による荷重の算定における計算条件（縮小板、固定ボルト）

項目		単位	重畳時
重量	W	kN	25
設計水平震度	K_h	—	0.7
水平慣性力	P_h	kN	18

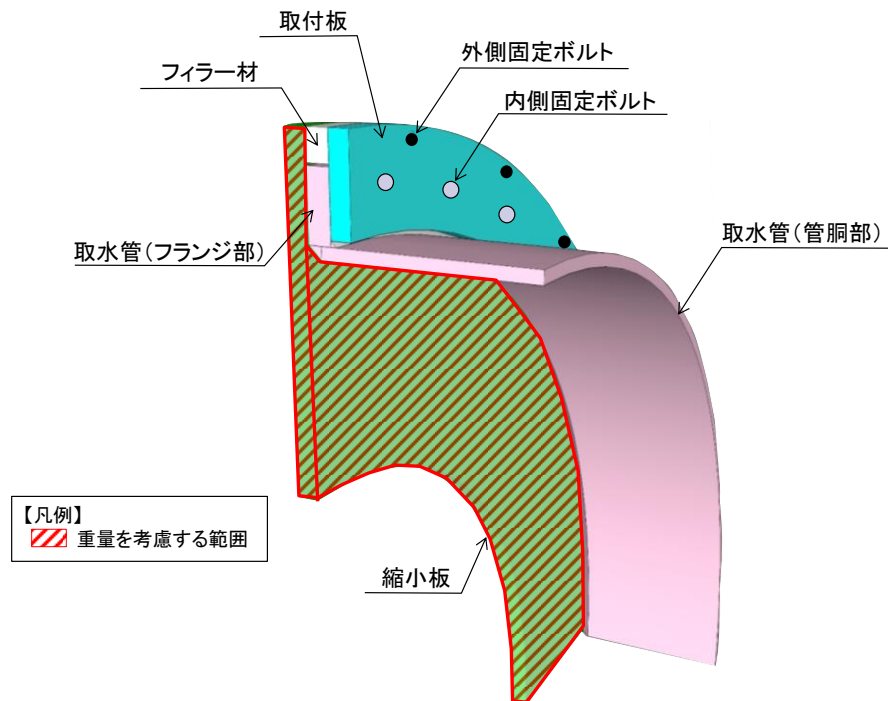


図 3.6.2-2(1) 慣性力の算定に用いる重量の算定範囲（縮小板、固定ボルト）

表 3.6.2-6(2) 慣性力による荷重の算定における計算条件
(取水管(フランジ部))

項目		単位	重畳時
重量	W	kN	46
設計水平震度	K_h	—	0.7
水平慣性力	P_h	kN	32

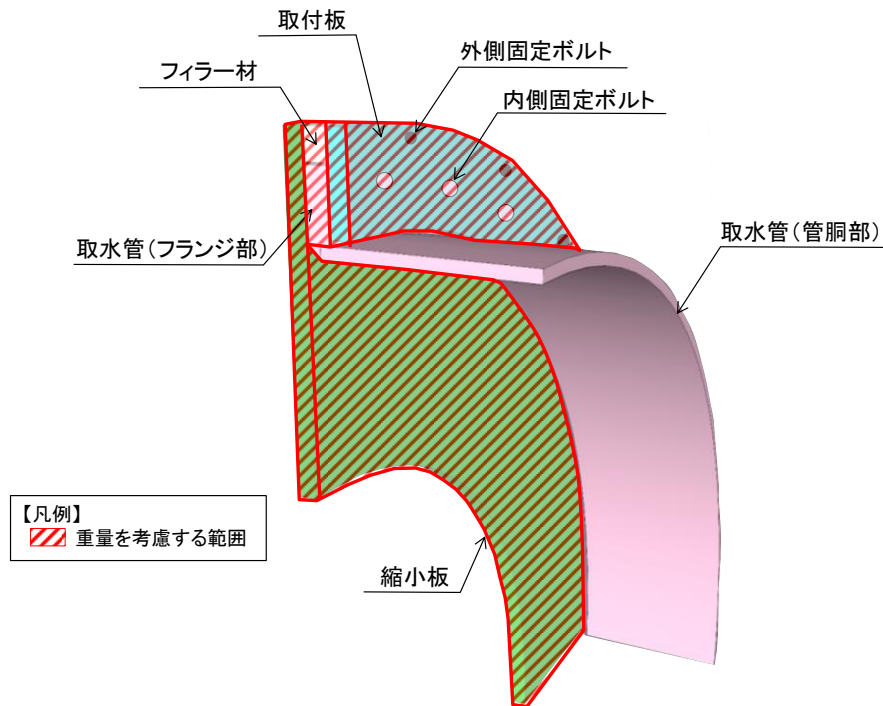


図 3.6.2-2(2) 慣性力の算定に用いる重量の算定範囲 (取水管(フランジ部))

b. 動水圧 (P_{dw})

動水圧は、以下の Westergaard の式により算定する。

表 3.6.2-7 に動水圧による荷重の算定における計算条件を、図 3.6.2-3 に動水圧の荷重作用図を示す。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} \times C \times K_h \times \gamma_w \times \sqrt{Z_{dw} \times z_{dw}}$$

ここで、

P_{dw} : 動水圧 (kN/m²)

C : 補助係数 (=1.0)

K_h : 弾性設計用地震動 S d - D による水平方向の設計震度

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Z_{dw} : 水深 (m)

z_{dw} : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

表 3.6.2-7 動水圧による荷重

項目		単位	重畳時
水平設計震度	K_h	—	0.7
取水槽水位	—	m	EL 2.97
取水槽底標高	—	m	EL-7.000
縮小板下端標高	—	m	EL-6.825
水深	Z_{dw}	m	9.970
縮小板下端水深	z_{dw}	m	9.795
動水圧	p_{dw}	kN/m ²	122.3
縮小板の面積	A	m ²	7.304
動水圧による荷重	P_{dw}	kN	893

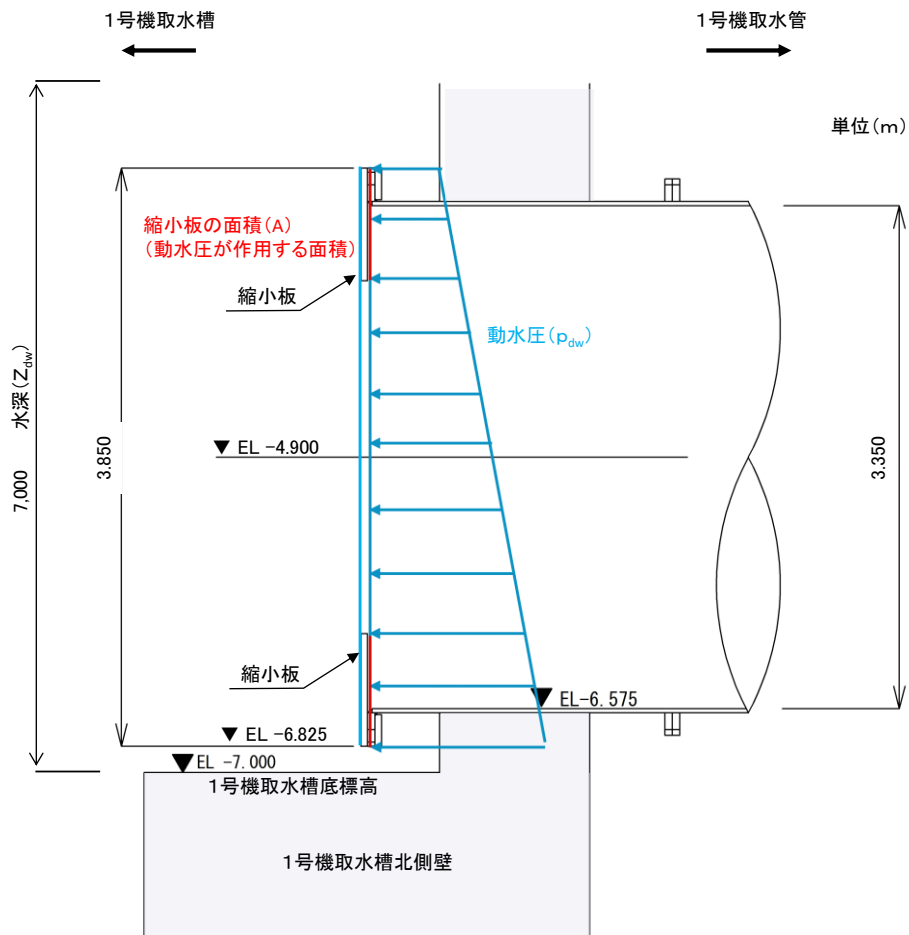


図 3.6.2-3(1) 動水圧の荷重作用図

(縮小板, 固定ボルト及び取水管 (フランジ部))

3.6.3 荷重の選定

津波時及び重畳時の作用荷重を表 3.6.3-1 に示す。表 3.6.3-1 より、津波時荷重が重畳時荷重よりも大きくなることから、強度評価に用いる荷重の組合せは、津波時を対象とする。

表 3.6.3-1(1) 縮小板及び固定ボルトの作用荷重

項目		単位	津波時	重畳時
慣性力	P_h	kN	—	18
動水圧	P_{dw}	kN	—	893
抗力	F_d	kN	756	272
静水圧	F_h	kN	617	171
摩擦による推力	P_{ht}	kN	0	0
合計値	P	kN	1373	1354

表 3.6.3-1(2) 取水管(フランジ部)の作用荷重

項目		単位	津波時	重畳時
慣性力	P_h	kN	—	32
動水圧	P_{dw}	kN	—	893
抗力	F_d	kN	756	272
静水圧	F_h	kN	617	171
摩擦による推力	P_{ht}	kN	0	0
合計値	P	kN	1373	1368

3.7 許容限界

流路縮小工の許容限界は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の基本方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

3.7.1 使用材料

流路縮小工を構成する各部材の使用材料を表 3.7.1-1 に示す。

表 3.7.1-1 使用材料

評価対象部位	材質	仕様
縮小板	SS400	t = 40 (mm) *
固定ボルト	SCM435	M30
取水管 (フランジ部)	SS400	t = 46 (mm) *

注記*：「2.3.3 1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響 参考資料2 1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象」に示すエロージョン摩耗に対する設計・施工上の配慮として、縮小板の余裕厚を 4mm とし、板厚を 44-4=40(mm)と設定する。また、取水管 (フランジ部) についても、余裕厚を 4mm とし、取水管 (フランジ部) の板厚を 50-4=46(mm)と設定する。

3.7.2 許容限界

許容限界は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の基本方針」に基づき設定する。

流路縮小工を構成する各部材の許容応力度のうち、縮小板、取水管 (フランジ部) は「鋼構造設計規準—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 2005 年改訂) 」に基づき、固定ボルトは、「鋼構造許容応力度設計規準 ((社) 日本建築学会, 2019 年制定) 」及び「J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト、小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ」に基づき表 3.7.2-1 の値とする。

表 3.7.2-1 流路縮小工を構成する各部材の許容限界

評価対象部位	材質	短期許容応力度 (N/mm ²)		
		曲げ	せん断	引張
縮小板	SS400	235	135	—
固定ボルト	SS400	—	—	560
取水管 (フランジ部)	SS400	215	124	—

3.8 評価方法及び評価条件

流路縮小工を構成する各部材に発生する応力を用いて算定する応力度が、許容限界以下であることを確認する。流路縮小工の強度評価は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の基本方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、「3.5 評価対象部位」にて設定する評価対象部位に作用する応力度が「3.7 許容限界」にて示す許容限界以下であることを確認する。

3.8.1 縮小板

縮小板の管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。外径を固定とする有孔円板に等分布荷重が作用するものとして検討する。

評価対象位置図を図 3.8.1-1 に、縮小板のモデル図を図 3.8.1-2 に示す。

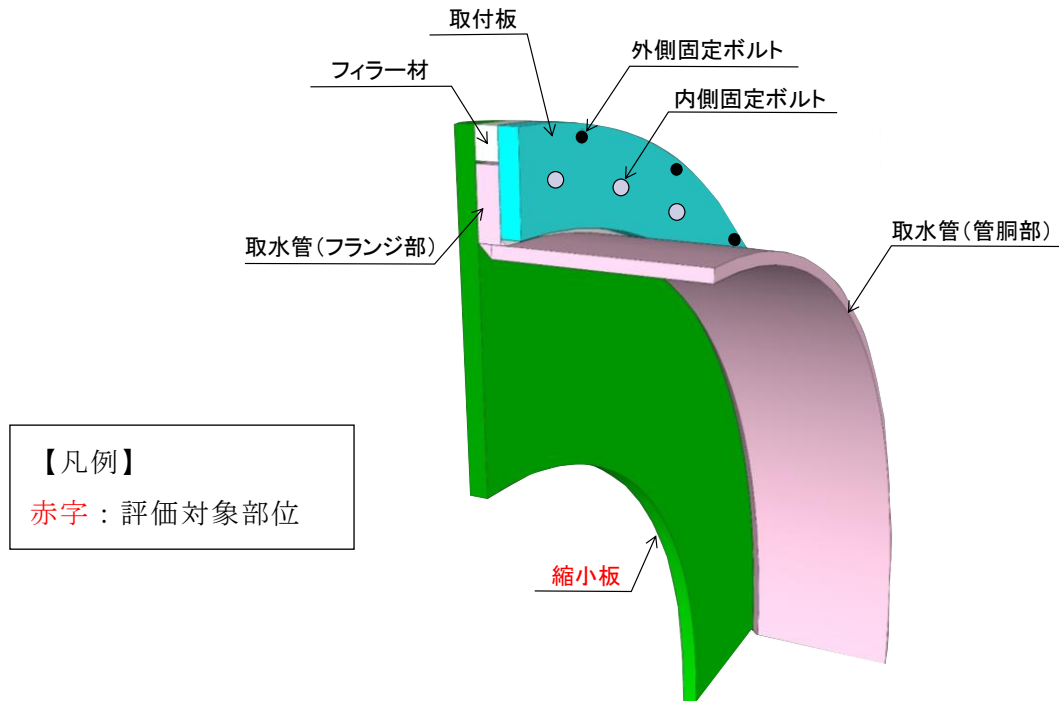


図 3.8.1-1 評価対象位置図（縮小板）

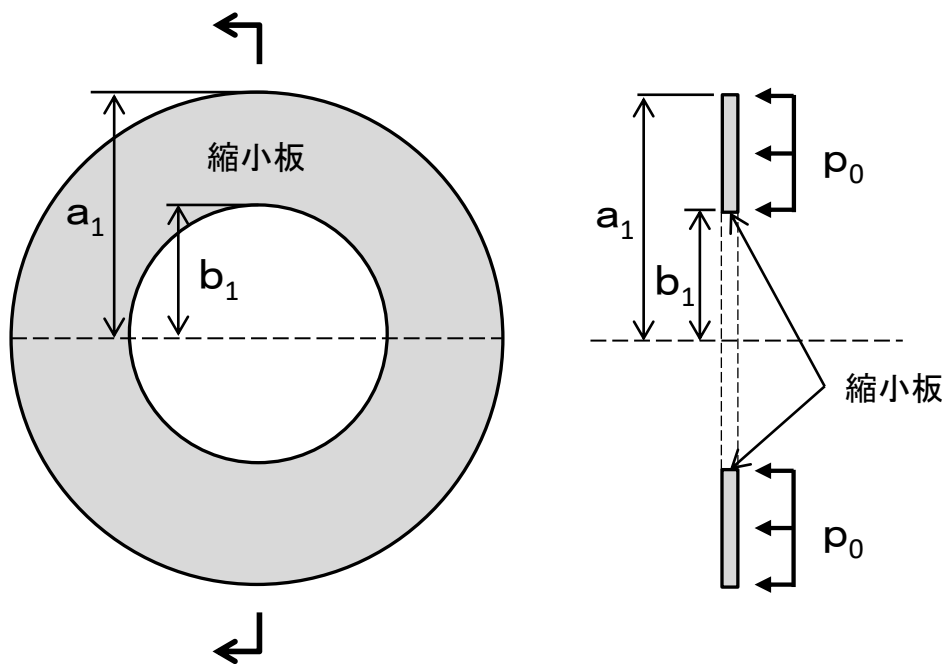


図 3.8.1-2 縮小板のモデル図
2.3.2-32

(1) 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重

縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重について、以下の式より算出する。
また、縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重の計算に用いる入力値を表 3.8.1-1 に示す。

$$p_0 = \frac{P}{A_{11}}$$

$$A_{11} = (a_1^2 - b_1^2) \times \pi$$

ここで、

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

P : 縮小板に作用する津波時荷重 (kN)

A_{11} : 縮小板の作用面積 (mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

表 3.8.1-1 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	縮小板に作用する津波時荷重	1373
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
b_1	mm	縮小板の内半径	<input type="text"/>

上記の評価式に、表 3.8.1-1 の入力値を代入すると縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} A_{11} &= (a_1^2 - b_1^2) \times \pi \\ &= (1925^2 - \text{□}) \times 3.1416 \\ &= 7304220 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{P}{A_{11}} \\ &= 1373 / 7304220 \\ &= 0.0001880 \text{ kN/mm}^2 \\ &= 1.880 \times 10^{-4} \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

(2) 縮小板に生じる曲げモーメント

縮小板に生じる曲げモーメントについて、「構造力学公式集(土木学会, 1986年)」に基づき、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値を表 3.8.1-2 に示す。

$$M_{r1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\beta_1^2 - (3+\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu)\ln\rho_1 \right]$$

$$M_{\theta 1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\nu\beta_1^2 - (1+3\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu)\ln\rho_1 \right]$$

$$\kappa_1 = \beta_1^2 \frac{(1-\nu)\beta_1^2 + (1+\nu)(1+4\beta_1^2 \ln\beta_1)}{1-\nu+(1+\nu)\beta_1^2}$$

$$\beta_1 = \frac{b_1}{a_1}$$

$$\rho_1 = \frac{r_1}{a_1}$$

ここで、

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$: 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

ν : ポアソン比

r_1 : 縮小板の中心から半径方向の距離 (mm)

$\kappa_1, \beta_1, \rho_1$: 係数

表 3.8.1-2 縮小板に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
p_0	kN/mm ²	縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重	1.880×10^{-4}
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
b_1	mm	縮小板の内半径	<input type="text"/>
ν	—	ポアソン比	0.3
r_1	mm	縮小板の中心から半径方向の距離	1925

上記の評価式に、表 3.8.1-2 の入力値を代入すると縮小板に生じる曲げモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{b_1}{a_1} \\ &= \boxed{}/1925 \\ &= 0.61039\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{r_1}{a_1} \\ &= 1925/1925 \\ &= 1.0000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= \beta_1^2 \frac{(1-\nu)\beta_1^2 + (1+\nu)(1+4\beta_1^2 \ln \beta_1)}{1-\nu + (1+\nu)\beta_1^2} \\ &= 0.61039^2 \frac{(1-0.3) \times 0.61039^2 + (1+0.3)(1+4 \times 0.61039^2 \ln 0.61039)}{1-0.3 + (1+0.3) \times 0.61039^2} \\ &= 0.19013\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{r1} &= \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\beta_1^2 - (3+\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu) \ln \rho_1 \right] \\ &= \frac{1.880 \times 10^{-4} \times 1925^2}{16} \left[(1+0.3)(1-0.19013) + 4 \times 0.61039^2 - (3+0.3) \times 1.0000^2 \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1-0.3) \times 0.19013}{1.0000^2} + 4 \times 0.61039^2 \times (1+0.3) \ln 1.0000 \right] \\ &= \boxed{-38.75} \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\theta 1} &= \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[(1+\nu)(1-\kappa_1) + 4\nu\beta_1^2 - (1+3\nu)\rho_1^2 - \frac{(1-\nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1+\nu) \ln \rho_1 \right] \\ &= \frac{1.880 \times 10^{-4} \times 1925^2}{16} \left[(1+0.3)(1-0.19013) + 4 \times 0.3 \times 0.61039^2 \right. \\ &\quad \left. - (1+3 \times 0.3) \times 1.0000^2 + \frac{(1-0.3) \times 0.19013}{1.0000^2} + 4 \times 0.61039^2 \times (1+0.3) \ln 1.0000 \right] \\ &= \boxed{-11.62} \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

(3) 縮小板に生じる最大曲げ応力度

縮小板に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集(土木学会, 1986年)」に基づき、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値を表 3.8.1-3 に示す。

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}}{Z_1}$$

$$Z_1 = \frac{t_1^2}{6}$$

ここで、

σ_1 : 縮小板に生じる最大曲げ応力度 (kN/mm²)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$: 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

Z_1 : 縮小板の断面係数 (mm³/mm)

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

表 3.8.1-3 縮小板に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
t_1	mm	縮小板の板厚	40
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント	38.75
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント	11.62

上記の評価式に、表 3.8.1-3 の入力値を代入すると縮小板に生じる最大曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{t_1^2}{6} \\ &= \frac{40^2}{6} \\ &= 266.67 \text{ mm}^3/\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}}{Z_1} \\ &= \frac{\sqrt{(38.75)^2 + (11.62)^2}}{266.67} \\ &= 0.1517 \text{ kN/mm}^2 \\ &\approx 152 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(4) 縮小板に生じる最大せん断応力度

縮小板に生じる最大せん断応力度について、以下の式より算出する。また、縮小板に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値を表 3.8.1-4 に示す。

$$\tau_1 = \frac{S_1}{A_{12}}$$

$$A_{12} = 2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot t_1$$

ここで、

τ_1 : 縮小板に生じる最大せん断応力度 (kN/mm²)

S_1 : 縮小板に作用するせん断力 (=P) (kN)

P : 縮小板に作用する津波時荷重 (kN)

A_{12} : 縮小板の有効せん断面積 (mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

表 3.8.1-4 縮小板に作用する最大せん断応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
S_1	kN	縮小板に作用するせん断力	1373
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
t_1	mm	縮小板の板厚	40

上記の評価式に、表 3.9.1-4 の入力値を代入すると縮小板に生じる最大せん断応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} A_{12} &= 2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot t_1 \\ &= 2 \times 3.1416 \times 1925 \times 40 \\ &= 483,806 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{S_1}{A_{12}} \\ &= \frac{1373}{483806} \\ &= 0.00284 \text{ kN/mm}^2 \\ &\approx 3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

3.8.2 固定ボルト

固定ボルトについては、管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。固定ボルトには、縮小板に作用する水平力により生じる固定ボルトの引張力に加え、縮小板外縁に作用する曲げモーメントに伴い生じる固定ボルトの引張力を有効断面積で除することで求めた応力度が許容応力度以下であることを確認する。

評価対象位置図を図 3.8.2-1 に、固定ボルトのモデル図を図 3.8.2-2 に示す。

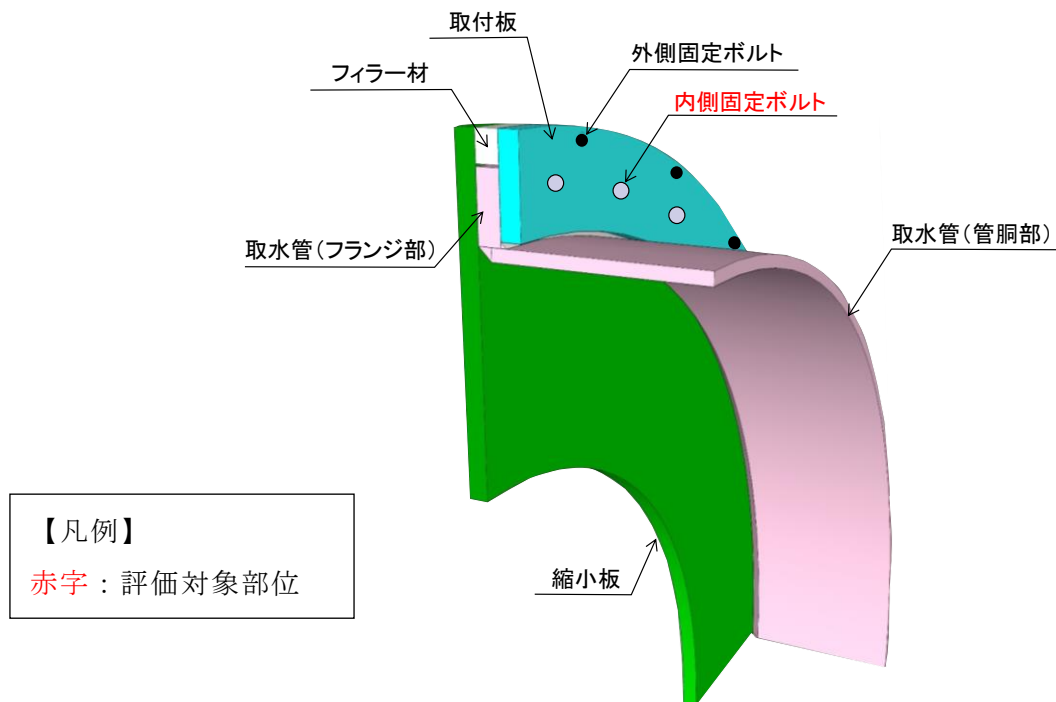


図 3.8.2-1 評価対象部位（固定ボルト）

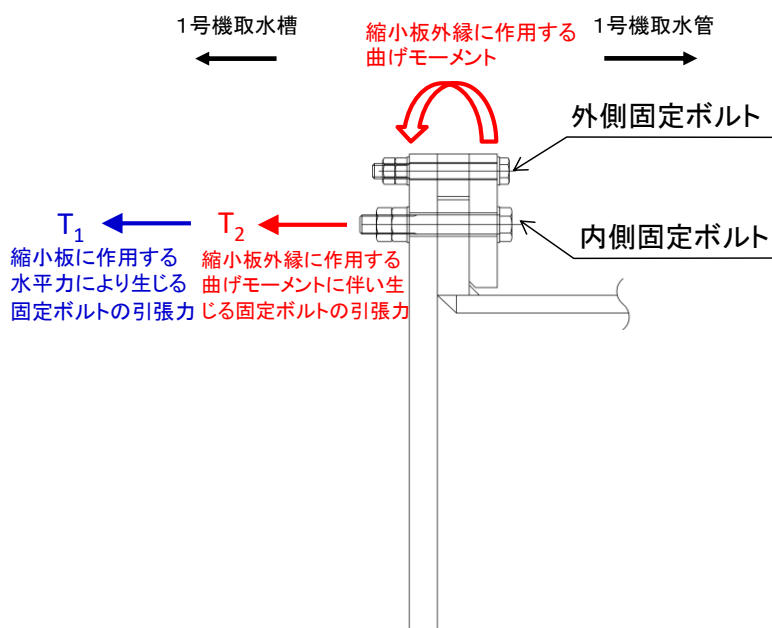


図 3.8.2-2 取水管（固定ボルト）のモデル図

2.3.2-38

(1) 固定ボルトに生じる最大応力度

固定ボルトに作用する最大応力度は、以下の式より算出する。また、固定ボルトに生じる最大応力度の計算に用いる入力値を表 3.8.2-1 に示す。

なお、縮小板に生じる曲げモーメントは半径方向及び周方向の曲げモーメントの合力とした。

$$T = T_1 + T_2$$

$$T_1 = \frac{P}{n}$$

$$T_2 = M \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{1}{n \cdot l_1}$$

$$M = \sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}$$

$$\sigma_b = \frac{T}{A}$$

ここで、

T : 内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T_1 : 縮小板に発生する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T_2 : 縮小板に発生する曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

P : 内側固定ボルトに作用する津波時荷重 (kN)

n : 内側固定ボルトの本数 (本)

M : 縮小板に生じる曲げモーメント合力 (kN・mm/mm)

D_1 : フランジ外径 (mm)

l_1 : 支点間距離 (mm)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$: 縮小板に生じる周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

A : 内側固定ボルト 1 本の有効断面積 (mm²)

σ_b : 内側固定ボルトに生じる最大応力度 (kN/mm²)

表 3.8.2-1 固定ボルトに生じる最大応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
D_1	mm	フランジ外径	3850
l_1	mm	支点間距離	111
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント	38.75
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント	11.62
P	kN	内側固定ボルトに作用する津波時荷重	1373
n	本	内側固定ボルトの本数	40
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積	561

上記の評価式に、表 3.8.2-1 の入力値を代入すると固定ボルトに生じる最大応力度は以下のとおりとなる。

$$T_1 = \frac{P}{n}$$

$$= \frac{1373}{40}$$

$$= 34.3 \text{ kN/本}$$

$$M = \sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}$$

$$= \sqrt{(38.75)^2 + (11.62)^2}$$

$$= 40.45 \text{ kN・mm/mm}$$

$$T_2 = M \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{1}{n \cdot l_1}$$

$$= 40.45 \times 3.1416 \times 3850 \times \frac{1}{40 \times 111}$$

$$= 110.2 \text{ kN/本}$$

$$\sigma_b = \frac{T}{A_{21}}$$

$$= \frac{34.3 + 110.2}{561}$$

$$= 0.2575 \text{ kN/mm}^2$$

$$= 258 \text{ N/mm}^2$$

3.8.3 取水管（フランジ部）

取水管（フランジ部）の管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。取水管（フランジ部）は内側固定ボルトを介して荷重が作用するものとして、内径を固定とする有孔円板として検討する。

評価対象位置図を図 3.8.3-1 に、取水管（フランジ部）のモデル図を図 3.8.3-2 に示す。

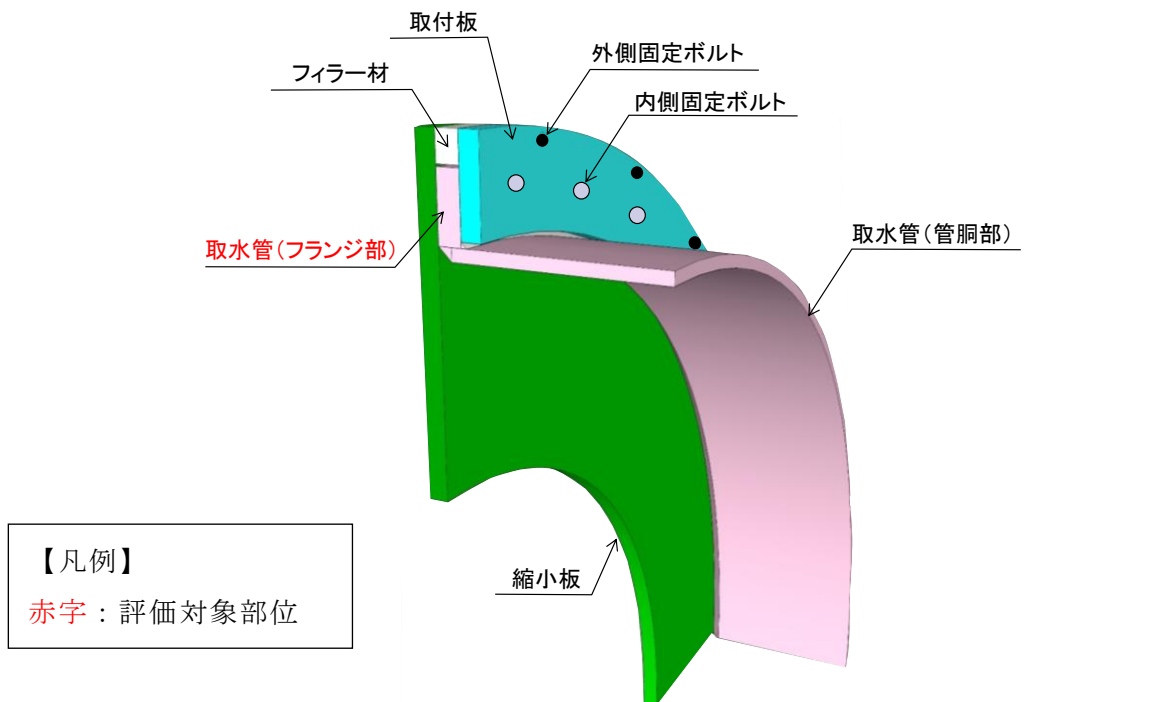


図 3.8.3-1 評価対象位置図（取水管（フランジ部））

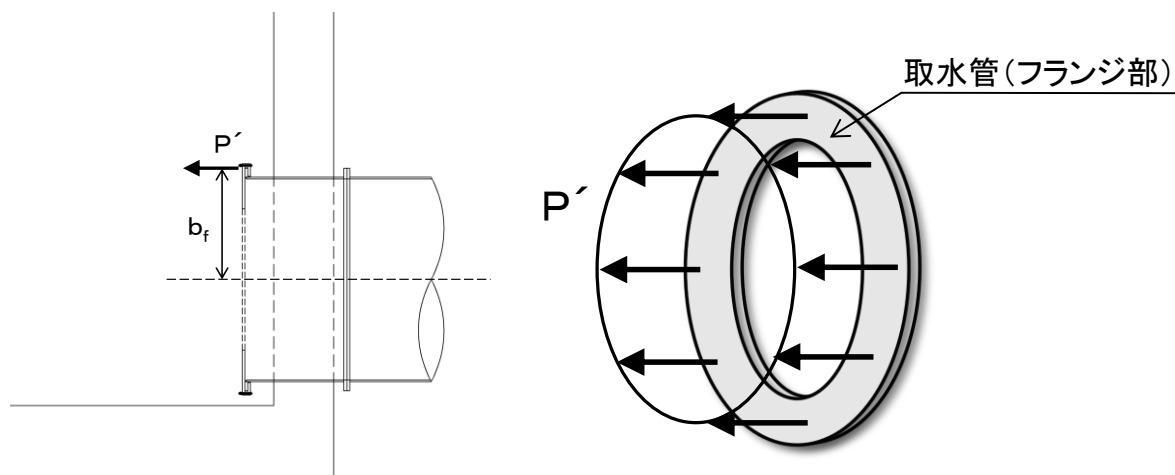


図 3.8.3-2 取水管（フランジ部）のモデル図

(1) 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重

取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重は、以下の式より算出する。また、取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重の計算に用いる入力値を表 3.8.3-1 に示す。

$$P' = \frac{P}{L_f}$$

$$L_f = 2 \cdot \pi \cdot b_f$$

ここで、

P' : 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重（kN/mm）

P : 取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重（kN）

L_f : 取水管（フランジ部）の外周長（mm）

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

表 3.8.3-1 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重	1373
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1814

上記の評価式に、表 3.8.3-1 の入力値を代入すると、取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} L_f &= 2 \times \pi \times b_f \\ &= 2 \times 3.1416 \times 1814 \\ &= 11398 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P' &= \frac{P}{L_f} \\ &= \frac{1373}{11398} \\ &= 0.120 \text{ kN/mm} \end{aligned}$$

(2) 取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメント

取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメントについて、「構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）」に基づき，以下の式より算出する。また，取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメントの計算に用いる入力値を表 3.8.3-2 に示す。

$$M_{rf} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-1 + (1+\nu) \kappa_f + (1-\nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1+\nu) \ln \rho_f \right]$$

$$M_{\theta f} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-\nu + (1+\nu) \kappa_f - (1-\nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1+\nu) \ln \rho_f \right]$$

$$\kappa_f = \beta_f^2 \frac{1 + (1+\nu) \ln \beta_f}{1 - \nu + (1+\nu) \beta_f^2}$$

$$\beta_f = \frac{b_f}{a_f}$$

$$\rho_f = \frac{r_f}{a_f}$$

ここで，

M_{rf} : 取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

$M_{\theta f}$: 取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

P' : 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重（kN/mm）

ν : ポアソン比

$\kappa_f, \beta_f, \rho_f$: 係数

a_f : 取水管（フランジ部）の内半径（mm）

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

r_f : 取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離（mm）

表 3.8.3-2 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントの計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P'	kN/mm	取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重	0.120
ν	—	ポアソン比	0.3
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径	1675
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1814
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離	1675

上記の評価式に，表 3.8.3-2 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}\beta_f &= \frac{b_f}{a_f} \\ &= \frac{1814}{1675} \\ &= 1.0830\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_f &= \frac{r_f}{a_f} \\ &= \frac{1675}{1675} \\ &= 1.0000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\kappa_f &= \beta_f^2 \frac{1 + (1 + \nu) \ln \beta_f}{1 - \nu + (1 + \nu) \beta_f^2} \\ &= 1.0830^2 \frac{1 + (1 + 0.3) \ln 1.0830}{1 - 0.3 + (1 + 0.3) \times 1.0830^2} \\ &= 0.58184\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{rf} &= \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-1 + (1 + \nu) \kappa_f + (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right] \\ &= \frac{0.120 \times 1675 \times 1.0830}{2} \left[-1 + (1 + 0.3) \times 0.58184 + (1 - 0.3) \frac{0.58184}{1^2} - (1 + 0.3) \ln 1 \right] \\ &= 17.82 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{\theta f} &= \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[-\nu + (1 + \nu) \kappa_f - (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right] \\ &= \frac{0.120 \times 1675 \times 1.0830}{2} \left[-0.3 + (1 + 0.3) \times 0.58184 - (1 - 0.3) \frac{0.58184}{1^2} - (1 + 0.3) \ln 1 \right] \\ &= 5.35 \text{ kN} \cdot \text{mm/mm}\end{aligned}$$

(3) 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集（土木学会，1986年）」に基づき以下の式より算出する。また，取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値を表 3.8.3-3 に示す。

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{M_{rf}^2 + M_{\theta f}^2}}{Z_f}$$

$$Z_f = \frac{t_f^2}{6}$$

ここで，

σ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度（kN/mm²）

M_{rf} : 取水管（フランジ部）の半径方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

$M_{\theta f}$: 取水管（フランジ部）の周方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

Z_f : 取水管（フランジ部）の断面係数（mm³/mm）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

表 3.8.3-3 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
M_{rf}	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる半径方向の曲げモーメント	17.82
$M_{\theta f}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に生じる周方向の曲げモーメント	5.35
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46

上記の評価式に，表 3.8.3-3 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} Z_f &= \frac{46^2}{6} \\ &= 352.7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \frac{\sqrt{M_{rf}^2 + M_{\theta f}^2}}{Z_f} \\ &= \frac{\sqrt{17.82^2 + 5.35^2}}{352.7} \\ &= 0.0528 \text{ kN/mm}^2 \\ &\approx 53 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

(4) 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度は、以下の式より算出する。また、取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値を表 3.8.3-4 に示す。

$$\tau_f = \frac{S_f}{A_3}$$

$$A_3 = t_f \cdot l_f$$

$$l_f = \pi \cdot (D_i + 2t_p)$$

ここで、

τ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度（kN/mm²）

S_f : 取水管（フランジ部）に生じるせん断力（= P）（kN）

P : 取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重（kN）

A_3 : 取水管（フランジ部）付け根の断面積（mm²）

D_i : 取水管（フランジ部）の管内径（mm）

t_p : 取水管（管胴部）の管厚（mm）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

l_f : 取水管（フランジ部）付け根の周長（mm）

表 3.8.3-4 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
S_f	kN	取水管（フランジ部）に生じるせん断力	1373
D_i	mm	取水管（フランジ部）の管内径	3350
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚	24
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46

上記の評価式に、表 3.8.3-4 の入力値を代入すると取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} l_f &= \pi (D_i + 2t_p) \\ &= 3.1416 \times (3350 + 2 \times 24) \\ &= 10675 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_3 &= t_f \cdot l_f \\ &= 46 \times 10675 \\ &= 491050 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_f &= \frac{S_f}{A_3} \\ &= \frac{1373}{491050} \\ &= 0.00280 \text{ kN/mm}^2 \\ &\doteq 3 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

3.9 評価結果

流路縮小工の強度評価結果を表 3.9-1 に示す。各部材の断面照査を行った結果、すべての部材において応力度が許容限界以下であることを確認した。

表 3.9-1 流路縮小工の強度評価結果（津波時）

評価対象部位		発生値（応力度）		許容荷重		照査値
縮小板	曲げ	152	N/mm ²	235	N/mm ²	0.65
	せん断	3	N/mm ²	135	N/mm ²	0.03
固定ボルト	引張	258	N/mm ²	560	N/mm ²	0.46
取水管 (フランジ部)	曲げ	53	N/mm ²	215	N/mm ²	0.25
	せん断	3	N/mm ²	124	N/mm ²	0.03

2. 浸水防護施設に関する補足資料

2.3 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明

2.3.3 1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響

目次

1.	1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響	1
(参考資料1)	1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速	
(参考資料2)	1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象	
(参考資料3)	1号機取水槽流路縮小工の閉塞した場合の検知性	

1. 1号機取水槽流路縮小工の設置による津波防護機能及び取水機能への影響

1号機取水槽流路縮小工は、1号機取水管のフランジに、鋼製の縮小板を取り付けた構造であり、1号機取水槽からの敷地への津波の流入を防止する設計としている。

1号機取水槽流路縮小工の設計にあたっては、図1に示すとおり、開口率の変化に伴う入力津波高さの低減効果について影響検討を実施しており、開口率を7割程度以下とすることで溢水防止対策の成立性見通しを確認したことから、保守的に開口率を5割に設定する方針としたことを踏まえ、取水管の直径3.35m(断面積8.81m²)に対し、縮小板開口部の直径□m(断面積4.34m²)を設定した。

1号機取水槽流路縮小工の設置を考慮した入力津波評価結果は、「NS2-補-018-02 津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 1.7 入力津波の流路縮小工による水位低減効果の考慮について」において、1号機取水槽における入力津波高さは、EL 7.0mと評価しており、天端高さEL 8.8mを上回らないことから、外郭浸水防護として敷地への津波の流入を防止できることを確認している。

また、1号機取水槽流路縮小工を設置する影響について、1号機の廃止措置中の通常時及び外部電源喪失時における1号機原子炉補機海水ポンプ運転時においても、取水機能への影響がないことを、第24回実用発電用原子炉施設の廃止措置計画に係る審査会合(2021年11月11日)にて説明済みである(図2)。

1号炉取水槽流路縮小工設置の概要とその効果 (1/2)

コメントNo.81の回答

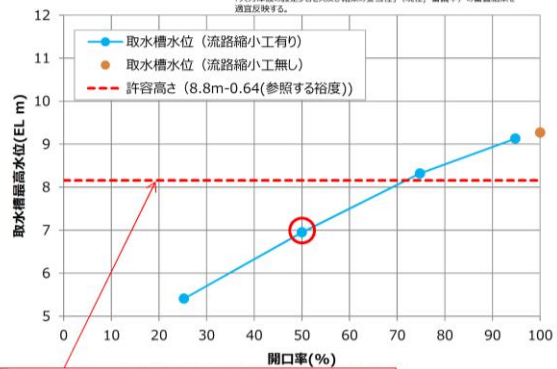
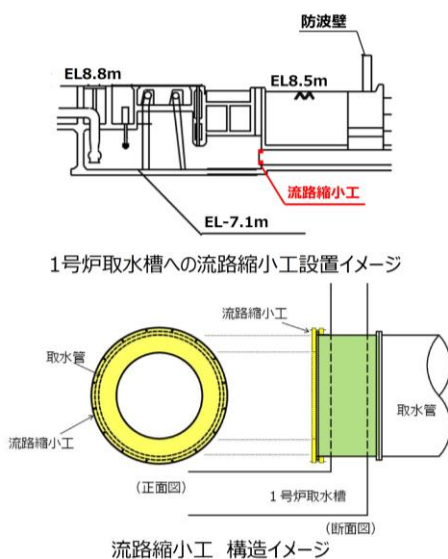
21

- 1号炉取水管端部への流路縮小工設置による入力津波高さ低減効果の成立性を以下の通り確認した。
 - 影響検討の結果、開口率を7割程度以下とすることで溢水防止対策の成立性見通しを確認したことから、保守的に開口率を5割に設定する。
 - 流路縮小工を設置することから、循環水ポンプの運転は行わない。

計算条件

波源	基準津波1
地形変化	防波堤無し (防波堤の損傷状態を考慮)
潮位変動	+0.72m (潮位のぼろつきを含む)
地殻変動	無し
貝付着	無し
循環水ポンプ状態	停止

※ 潮位については、「高橋原子力発電所2号炉 津波による設備の損傷防止 論点7 「入力津波の高さ及び取水口の閉塞」(現在、審査中)の審査結果を適宜反映する。



開口率変化に伴う入力津波高さ低減効果

図1 1号機取水槽流路縮小工の開口率の変化に関する影響検討結果

(2020年7月14日 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(資料2-1-1)再掲)

3. 流路縮小工設置による1号炉取水機能への影響について

5

(2) 原子炉補機海水ポンプの取水性評価

- 取水管への流路縮小工設置により増加する損失水頭は無視できるレベル(0.0018m)であり、流路縮小工設置後の取水槽水位は、原子炉補機海水ポンプの取水可能水位から十分余裕があることから、取水機能への影響はない。
- なお、津波を想定した場合、引き波時に原子炉補機海水ポンプの取水可能水位以下まで水位が下がる可能性があるため、原子炉補機海水ポンプを停止する手順としているが、原子炉補機海水ポンプが停止しても、燃料プールの水温が施設運用上の基準に到達するまでの期間は約10日であり、基準津波(日本海東縁部に想定される地震による津波)の継続時間約360分(安全側の想定として、入力津波の解析時間を設定)に対し、十分余裕があることから、津波が収束し、安全を確認した後に原子炉補機海水ポンプを運転させることにより、施設運用上の基準に到達することなく取水機能を回復できることを確認している。

流路縮小工設置による1号炉取水機能への影響

流路縮小工	流量 (m ³ /s)	水路断面面積 (m ²)	流速 (m/s)	取水口位置における海面水位	取水槽水位(カッコ内は端数処理前の値)	原子炉補機海水ポンプの取水可能水位
設置前	2.0 ^{※1}	16.59 ^{※2}	0.12	EL.-0.02m ^{※3}	EL.-0.03m (-0.0222m)	EL.-2.37m
設置後		8.81	0.23		EL.-0.03m (-0.0240m) ^{※4}	

- ※1 運転状況や系統切替を考慮し、流量が安全側となるよう、原子炉補機海水ポンプ(4台)運転時の流量(876m³/h×4台)、タービン補機海水ポンプ(3台)運転時の流量(1,000m³/h×3台)、除じんポンプ(2台)運転時の流量(300m³/h×2台)を設定
- ※2 貝付着代5cmを考慮
- ※3 朔望平均干潮位
- ※4 取水管の流路縮小工における局所損失(急拡、急縮)を考慮

図2(1) 1号機の取水機能への影響確認結果

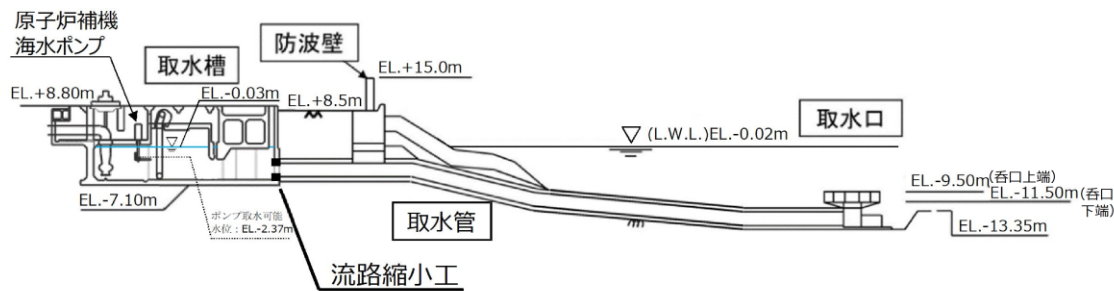
(2021年11月11日 第24回実用発電用原子炉施設の廃止措置計画に係る審査会合(資料2-2)再掲)

3. 流路縮小工設置による1号炉取水機能への影響について

6

(3) 海水中に含まれる砂による取水機能への影響

- 島根1号炉の取水口は、海底面から取水口呑口の下端までの高さが約2mあるため、海底面の砂が取水口に到達しにくく、流路縮小工貫通部が砂で閉塞することは考えにくいことから、海水の流れに伴う砂の移動・堆積による取水機能への影響はない。
- なお、津波による浮遊砂に対する原子炉補機海水ポンプ運転への影響について、原子炉補機海水ポンプ軸受には異物逃がし溝があり、浮遊砂の影響を考慮した設計上の配慮がなされているため、運転に影響がないことを確認している。



1号炉 取水施設の断面図

図2(2) 1号機の取水機能への影響確認結果

(2021年11月11日 第24回実用発電用原子炉施設の廃止措置計画に係る審査会合(資料2-2)再掲)

(参考資料 1) 1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速

1. 概要

1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる荷重の算定における水位及び流速については、図 1-1～図 1-3 に示す 1号機取水施設の管路解析モデルにより算定された管路解析結果より設定する。なお、1号機取水施設の管路解析モデルについては、設計の進捗により、図 1-4 に示すとおり 1号機取水槽ピット部の閉塞及び 1号機取水槽の耐震性を確保するため、1号機取水槽流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部に充填したコンクリート考慮する。

1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる荷重のうち静水圧 F_h 及び動水圧 P_{dw} については、管路解析結果より 1号機取水槽の水位等を用いて算定する。また、抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} については、管路解析結果より 1号機取水槽流路縮小工の設置位置における流速を用いて算定する。

本資料では、1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速の設定について説明する。

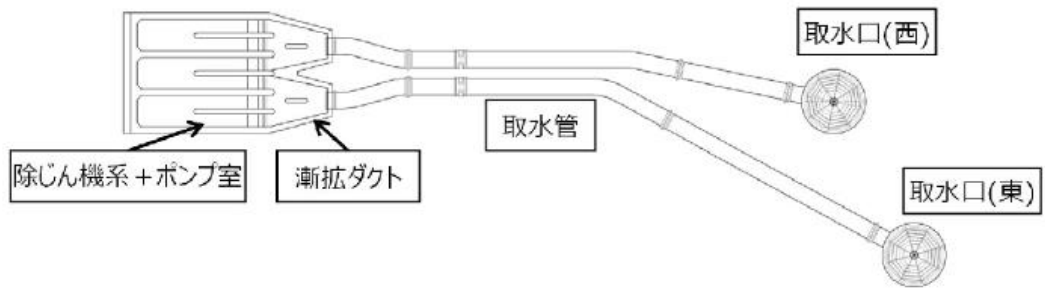


図 1-1 1号機取水施設平面図

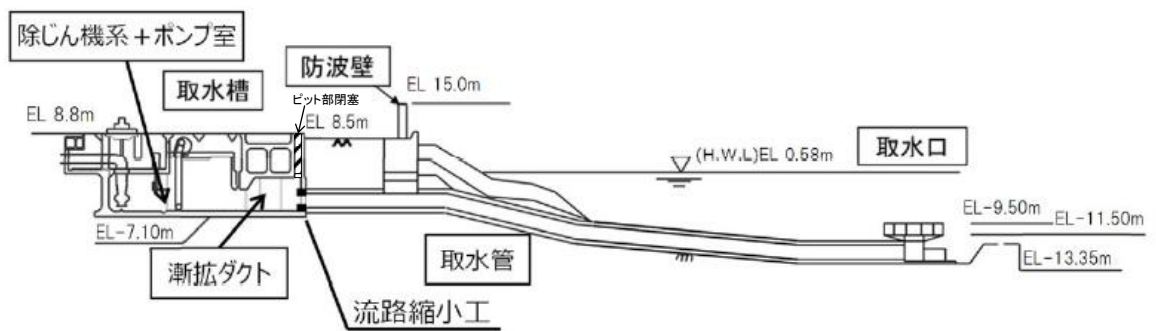


図 1-2 1号機取水施設断面図

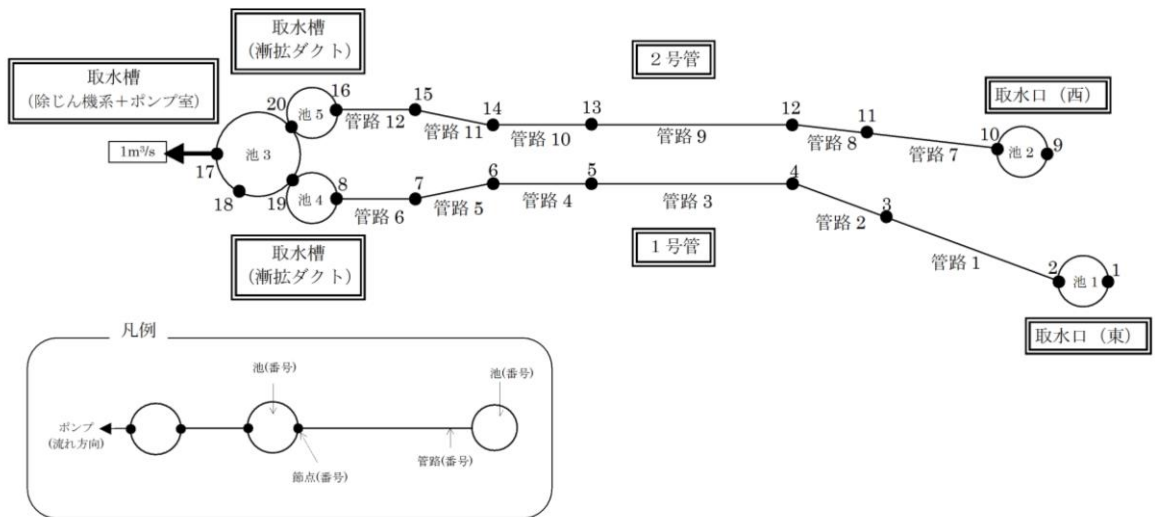
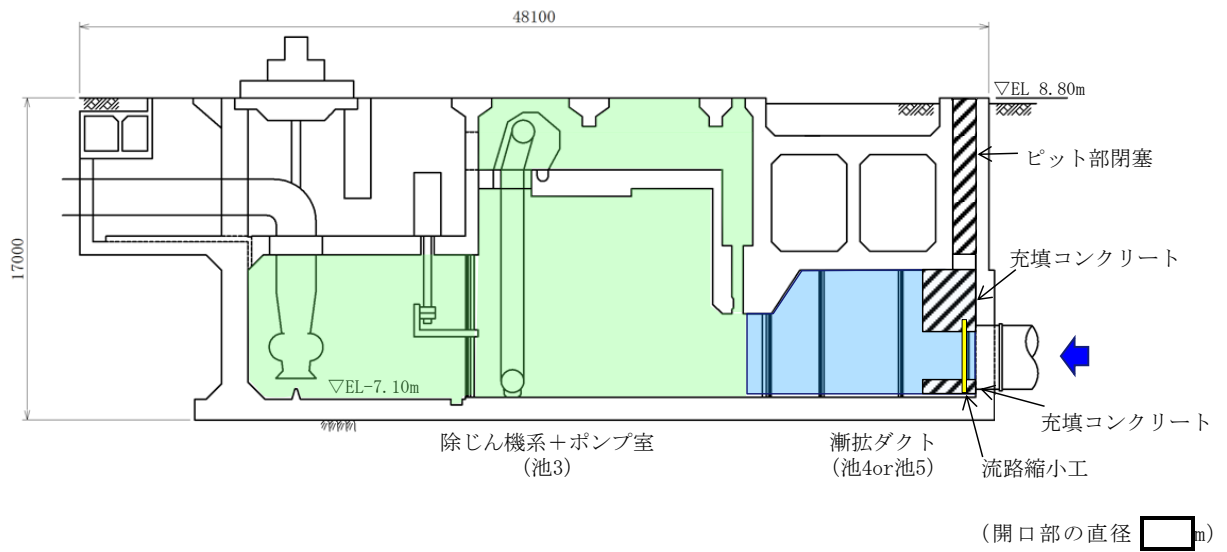


図 1-3 1号機取水施設の管路解析モデル図

(参考) 1-2



注：1号機取水槽ピット部の閉塞及び1号機取水槽の耐震性を確保するため、1号機取水槽流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部に充填したコンクリートの反映による入力津波の設定への影響はないことを確認している。

図 1-4 1号機取水槽モデル化の概念図

2. 1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速

2.1 静水圧 F_h

静水圧 F_h の算定に用いる水位は、1号機取水槽流路縮小工に作用する静水圧 F_h が最大となるよう、管路解析モデルにおいて上流である池1又は池2と下流である池4又は池5の水位差が最大となる時刻における水位を選定する。静水圧 F_h の算定に用いる水位の抽出位置を図2.1-1に示す。なお、1号機取水槽流路縮小工を安全側に評価する観点から、流速を用いて算定する抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} と荷重の向きが同じとなるよう、上流から下流に静水圧 F_h が作用するよう、下流より上流の水位が高い時刻を選定する。

$$F_h = \gamma_w \times \Delta h \times A$$

ここで、 F_h : 静水圧 (kN)

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Δh : 取水口と取水槽の水位差 (m)

A : 作用面積 (m²)

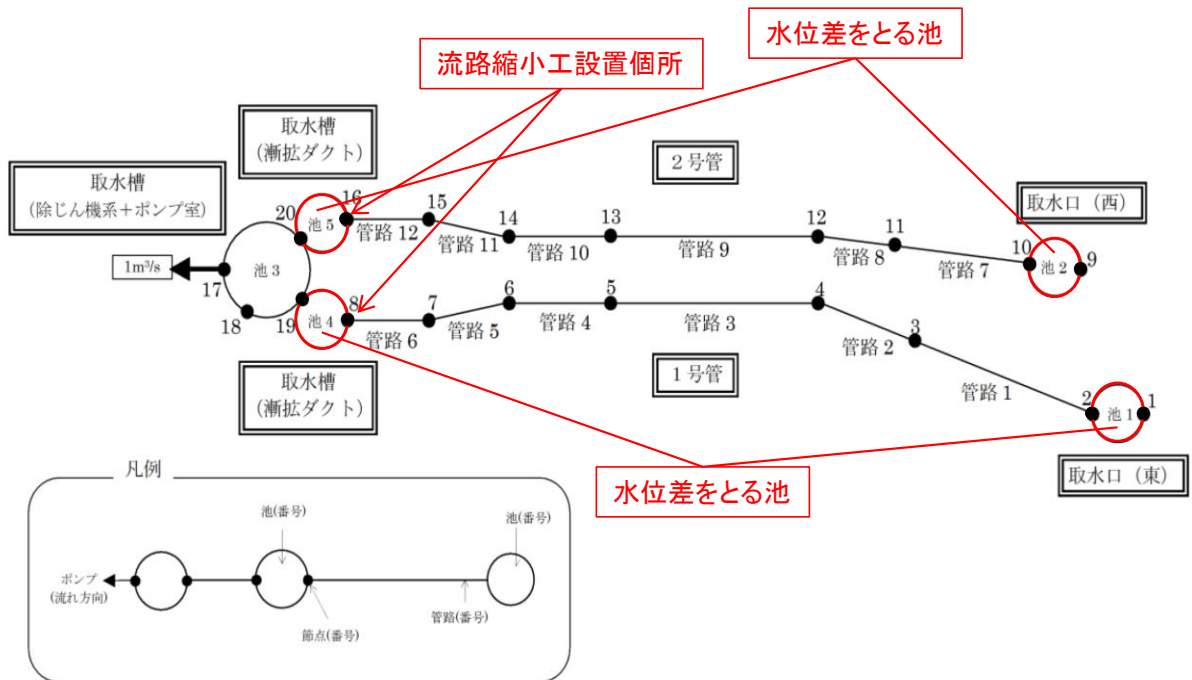


図 2.1-1 静水圧 F_h の算定に用いる水位の抽出位置

(参考) 1-4

(1) 津波時

津波時（日本海東縁部を波源とした津波）における管路解析結果を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 より、ケース 1（基準津波 1，防波堤有り，貝付着有り，ポンプ停止）において算定される最大水位差 $\Delta h = 8.36\text{m}$ を，津波時の静水圧 F_h の算定に用いる。

表 2.1-1 津波時（日本海東縁部を波源とした津波）における管路解析結果

波源	ケース	津波	防波堤	貝付着	ポンプ状態	池 1 の水位	池 4 の水位	水位差 Δh	池 2 の水位	池 5 の水位	水位差 Δh
日本海東縁部	1	基準津波 1	有り	有り	停止	8.15	-0.21	8.36	7.29	0.03	7.26
	2			無し		8.15	0.01	8.14	7.29	0.28	7.00
	3		無し	有り		5.17	-2.15	7.31	5.90	-1.52	7.43
	4			無し		5.17	-2.03	7.20	5.90	-1.32	7.23
	5	基準津波 2	有り	有り		3.69	-2.04	5.73	4.56	-1.36	5.92
	6			無し		3.69	-2.01	5.70	3.93	-1.88	5.81
	7	基準津波 5	無し	有り		4.61	-0.84	5.45	4.53	-1.05	5.58
	8			無し		4.61	-0.57	5.18	4.53	-0.81	5.34

(2) 重畳時

重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果を表 2.1-2 に示す。

表 2.1-2 より、ケース 11（基準津波 4，防波堤無し，貝付着有り，ポンプ停止）において算定される最大水位差 $\Delta h = 2.32\text{m}$ を，重畳時の静水圧 F_h の算定に用いる。

表 2.1-2 重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果

波源	ケース	津波	防波堤	貝付着	ポンプ状態	池 1 の水位	池 4 の水位	水位差 Δh	池 2 の水位	池 5 の水位	水位差 Δh
日本海東縁部	9	基準津波 4	有り	有り	停止	-1.95	-0.11	1.84	-1.93	-0.11	1.82
	10			無し		-1.88	-0.15	1.73	-1.78	-0.07	1.71
	11		無し	有り		-2.34	-0.02	2.32	-2.31	-0.02	2.29
	12			無し		-2.34	-0.13	2.21	-2.31	-0.13	2.18
	13	活断層	有り	有り		-1.40	0.06	1.46	-1.26	0.19	1.45
	14			無し		-0.46	-1.94	1.48	-0.52	-2.01	1.49
	15	上昇側	無し	有り		0.69	-1.16	1.85	0.51	-1.34	1.85
	16			無し		-0.09	-1.97	1.89	-0.29	-2.18	1.88

(単位：m)

2.2 動水圧 P_{dw}

動水圧 P_{dw} の算定に用いる水位は、1号機取水槽流路縮小工にかかる動水圧 P_{dw} が最大となるよう、管路解析モデルにおいて1号機取水槽流路縮小工が設置される池4又は池5の水位が最大となる時刻における水位を選定する。動水圧 P_{dw} の算定に用いる水位の抽出位置を図2.2-1に示す。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} \times C \times K_h \times \gamma_w \times \sqrt{Z_{dw} \times z_{dw}}$$

ここで、

P_{dw} : 動水圧 (kN)

C : 補助係数 (=1.0)

K_h : 弾性設計用地震動 S_d-D による水平方向の余震震度

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Z_{dw} : 水深 (m)

z_{dw} : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

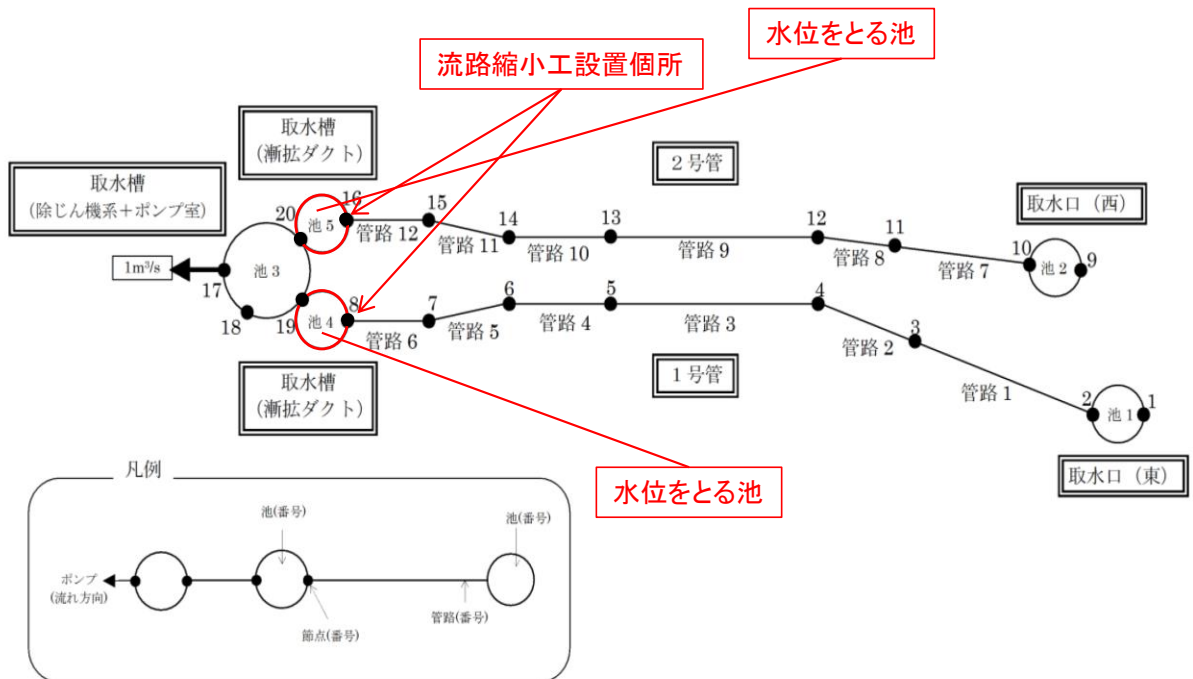


図 2.2-1 動水圧 P_{dw} の算定に用いる水位の抽出位置

(参考) 1-6

(1) 重畳時

重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 より，ケース 12（基準津波 4，防波堤無し，貝付着無し，ポンプ停止）において算定される最大水位 $h=2.97\text{m}$ を，重畳時の動水圧 P_{dw} の算定に用いる。

表 2.2-1 重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果

波源	ケース	津波	防波堤	貝付着	ポンプ状態	池 4 の水位	池 5 の水位
海域活断層	9	基準津波 4	有り	有り	停止	2.89	2.89
	10			無し		2.95	2.95
	11		無し	有り		2.76	2.76
	12			無し		2.97	2.97
	13	活断層 上昇側	有り	有り		2.76	2.76
	14			無し		2.79	2.79
	15		無し	有り		2.79	2.79
	16			無し		2.95	2.95

(単位：m)

2.3 抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht}

抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} の算定に用いる流速は、1号機取水槽流路縮小工に作用する抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} が最大となるよう、管路解析モデルにおいて1号機取水槽流路縮小工が設置される節点8又は節点16の流速が最大となる時刻における流速を選定する。抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} の算定に用いる流速の抽出位置を図2.3-1に示す。

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho_0 \times C_D \times A \times v^2$$

ここで、 F_d : 抗力 (kN)

ρ_0 : 密度 (=1.03t/m³)

C_D : 抗力係数 (=2.01 保守的に最大値とする)

A : 縮小板の面積 (m²)

v : 流速 (m/s)

$$P_{ht} = \frac{2 f Q^2}{g \pi D^3} \times L$$

ここで、 P_{ht} : 摩擦による推力 (kN)

f : 流水の摩擦抵抗係数 (=0.2 · D^{-1/3})

D : 貫通部直径 (m)

L : 貫通部長さ (m)

Q : 流量 (=v × A') (m³/s)

A' : 貫通部内空断面積 (=π × D²/4) (m²)

v : 流速 (m/s)

g : 重力加速度 (=9.80665m/s²)

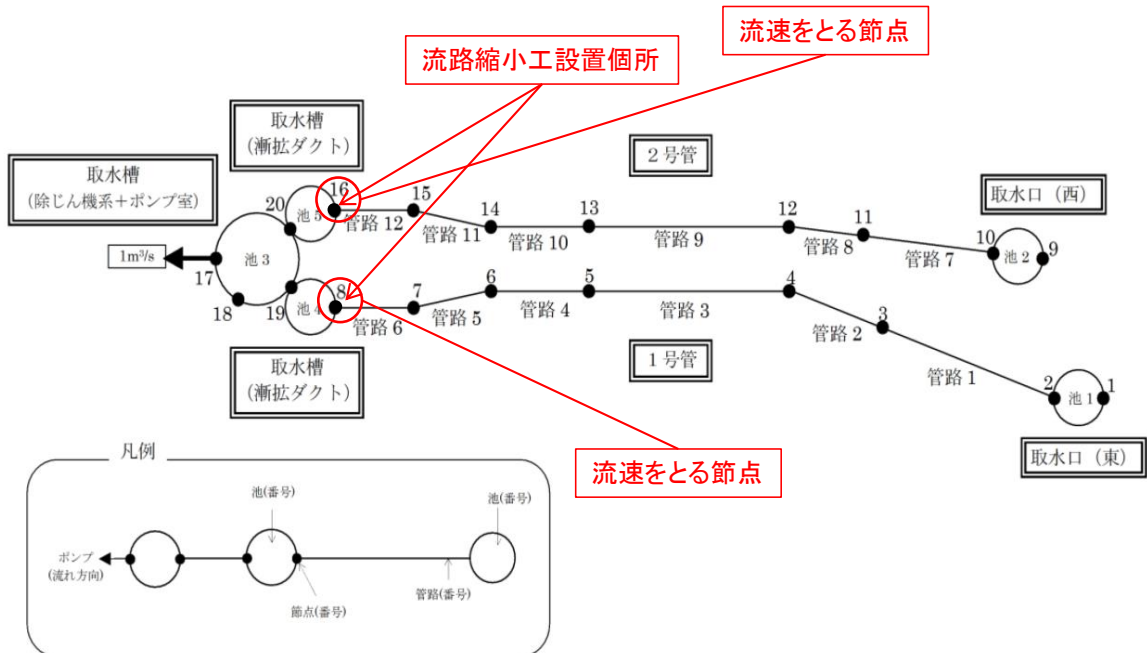


図 2.3-1 抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} の算定に用いる流速の抽出位置

(参考) 1-8

(1) 津波時

津波時（日本海東縁部を波源とした津波）における管路解析結果を表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 より、ケース 4（基準津波 1，防波堤無し，貝付着無し，ポンプ停止）において算定される最大流速 9.470m/s を切り上げた流速 10m/s を，津波時の抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} の算定に用いる。

表 2.3-1 津波時（日本海東縁部を波源とした津波）における管路解析結果

波源	ケース	津波	防波堤	貝付着	ポンプ状態	節点 8 の流速	節点 16 の流速
日本海東縁部	1	基準津波 1	有り	有り	停止	7.958	8.321
	2			無し		8.849	9.181
	3		無し	有り		8.236	8.470
	4			無し		9.210	9.470
	5	基準津波 2	有り	有り		7.325	7.611
	6			無し		8.254	8.543
	7	基準津波 5	無し	有り		7.047	7.210
	8			無し		7.789	7.947

(単位：m/s)

(2) 重畳時

重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果を表 2.3-2 に示す。

表 2.3-2 より，ケース 12（基準津波 4，防波堤無し，貝付着無し，ポンプ停止）において算定される最大流速 5.658m/s を切り上げた流速 6m/s を，重畳時の抗力 F_d 及び摩擦による推力 P_{ht} の算定に用いる。

表 2.3-2 重畳時（海域活断層を波源とした津波）における管路解析結果

波源	ケース	津波	防波堤	貝付着	ポンプ 状態	節点 8 の 流速	節点 16 の 流速
海域 活断層	9	基準津波 4	有り	有り	停止	4.458	4.647
	10			無し		4.871	5.069
	11		無し	有り		4.892	5.153
	12			無し		5.384	5.658
	13	活断層 上昇側	有り	有り		3.920	4.110
	14			無し		4.263	4.472
	15		無し	有り		4.291	4.573
	16			無し		4.702	5.010

(単位：m/s)

(参考資料 2) 1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象

1. 1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象について

1号機取水槽流路縮小工の各部位が損傷により要求機能を喪失しうる事象を抽出し、これに対する設計・施工上の配慮の整理結果を表1～表3に示す。

表1 要求機能を喪失しうる事象及びこれに対する設計・施工上の配慮
(縮小板, 固定ボルト及び取付板)

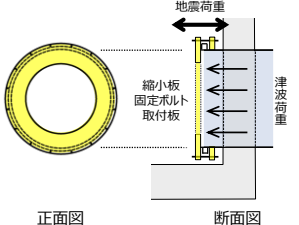
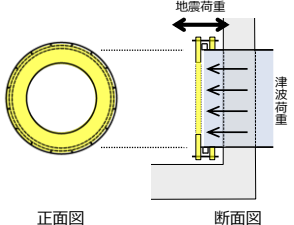
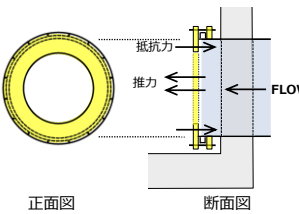
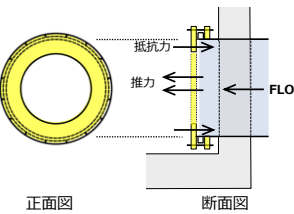
部位の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	評価対象
縮小板 固定ボルト 取付板	<ul style="list-style-type: none"> 地震荷重や津波荷重により、縮小板が曲げ破壊又はせん断破壊することで津波防護機能を喪失する。 縮小板から伝達する荷重により、取付板及び固定ボルトが破断し、津波防護機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 縮小板, 取付板及び固定ボルトに生じる断面力による応力度が, 許容限界以下であることを確認する。 	○
	<ul style="list-style-type: none"> 開口部における流水の摩擦により推力が生じ、縮小板が曲げ破壊又はせん断破壊することで津波防護機能を喪失する。 縮小板から伝達する荷重により、取付板及び固定ボルトが破断し、津波防護機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 津波時及び重畳時の津波荷重として、流水の摩擦による推力を考慮する。 	○

表2 要求機能を喪失しうる事象及びこれに対する設計・施工上の配慮
(取水管 (管胴部及びフランジ部))

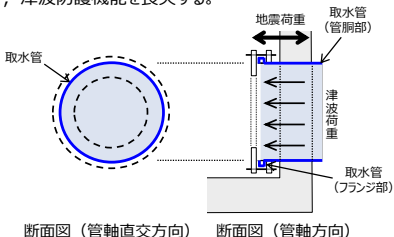
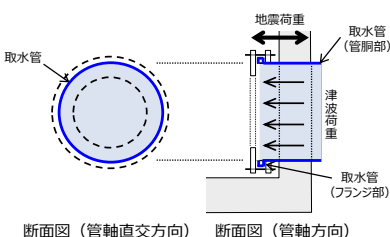
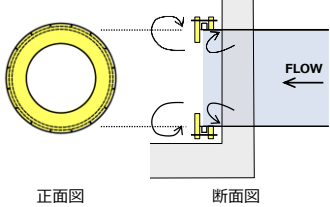
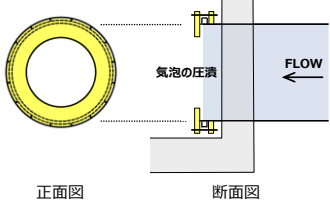
部位の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	評価対象
取水管 (管胴部) (フランジ部)	<ul style="list-style-type: none"> 地震荷重や新設の鋼製部材から伝達する津波荷重により、取水管 (管胴部) が曲げ破壊, せん断破壊又は引張破壊することで、津波防護機能を喪失する。 地震荷重や新設の鋼製部材から伝達する津波荷重により、取水管 (フランジ部) が曲げ破壊又はせん断破壊することで、津波防護機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 取水管 (管胴部, フランジ部) に生じる断面力による応力度が, 許容限界以下であることを確認する。 	○

表3 要求機能を喪失しうる事象及びこれに対する設計・施工上の配慮

(1号機取水槽流路縮小工全体)

設備の名称	要求機能を喪失しうる事象	設計・施工上の配慮	照査
1号機取水槽 流路縮小工 全体	<p>・急縮部・急拡部で発生する砂や貝を含んだ渦や流水による摩耗(エロージョン摩耗※1)によって形状に変化が生じ、津波防護機能を喪失する。</p>  <p>正面図 断面図</p>	<p>・「建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編[I]」によれば、渦や流水による摩耗は経年劣化による損傷である。常時の流路縮小工による開口部の流速が0.11m/sと遅いことから、摩耗による流路縮小工の健全性への影響は小さいと判断する。</p> <p>・津波は短期的な事象であるが、安全側に以下の配慮を行う。「水門鉄管技術基準(水圧鉄管・鉄鋼構造物編)平成29年版(社)水門鉄管協会」によれば、管の摩耗による板厚の減少に対して余裕厚を確保する方法が用いられていることから、1号機流路縮小工を構成する部材のうち、鋼製部材に対して適切な余裕厚を詳細設計段階で設定する。</p>	<p>- (鋼製部材に対して余裕厚を考慮する)</p>
1号機取水槽 流路縮小工 全体	<p>・急縮部に高速な津波が流れ込むことによる局所的な圧力低下によって、その下流は負圧となって空洞を生じ(キャビテーション)、圧力が高まる急拡部付近に移動すると、水蒸気の気泡は急激に圧潰され、壁面に損傷を与えることにより、形状に変化が生じ、流路縮小性能を喪失する(ピッチング損傷)。</p>  <p>正面図 断面図</p>	<p>・「ダム・堰施設技術基準(案)平成23年版(社)ダム・堰施設技術協会」によれば、円形断面で出口面積が3~4m²未満の放流管を「小容量放流管」とし、小断面で管内流速が10m/sを超える場合は圧力降下を生じる可能性があるとしている。一方で、流路縮小工は円形断面で出口面積が4.33m²を確保し、管路解析の結果から津波時の流速が最大でも9.47m/sであることから、圧力降下が生じる可能性は小さく、キャビテーションによる流路縮小工の健全性への影響は小さいと判断する。</p>	<p>-</p>

注記* : エロージョン摩耗とは、液体粒子・固体粒子あるいは液体の流れが角度をなして物体表面に衝突することで生じる摩耗である。

(参考資料 3) 1号機取水槽流路縮小工の閉塞した場合の検知性

1. 1号機取水槽流路縮小工の閉塞した場合の検知性について

1号機取水槽流路縮小工の開口部は直径 m であり、既往の取水設備の点検結果から、海生生物の付着代は最大で約 5cm 程度である。このため、海生生物の付着による閉塞の可能性はなく、定期的な点検と清掃を実施することから、1号機取水槽流路縮小工の閉塞の可能性はないと判断している。

仮に1号機取水槽流路縮小工の閉塞を仮定した場合においても、1号機取水槽の水位が低下傾向を示すため、「取水槽水位低」の警報が中央制御室において発報することにより検知可能であり、保安規定に紐づくQMS文書「設備別運転要領書 別冊 警報発生時の措置」に基づき対応が可能である。