

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-002-21
提出年月日	2023年5月10日

VI-2-2-21 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の
耐震性についての計算書

2023年5月

中国電力株式会社

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
2.1 位置	2
2.2 構造概要	3
2.3 評価方針	6
2.4 適用規格・基準等	9
3. 耐震評価	10
3.1 評価対象断面	10
3.2 使用材料及び材料の物性値	12
3.3 許容限界	13
3.3.1 構造部材の健全性に対する許容限界	13
3.3.2 基礎地盤の支持性能に対する許容限界	14
3.4 評価方法	15
3.4.1 構造部材の健全性評価	15
3.4.2 基礎地盤の支持性能評価	17
4. 耐震評価結果	18
4.1 構造部材の健全性に対する評価結果	18
4.2 基礎地盤の支持性能に対する評価結果	20
4.2.1 基礎地盤	20
4.2.2 MMR	21

別紙 1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）一体化部の耐震性についての計算書

別紙 2 せん断破壊に対する照査への線形被害則適用について

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、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）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及び基礎地盤の支持性能評価により行う。

2. 基本方針

2.1 位置

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の位置図を図2-1に示す。

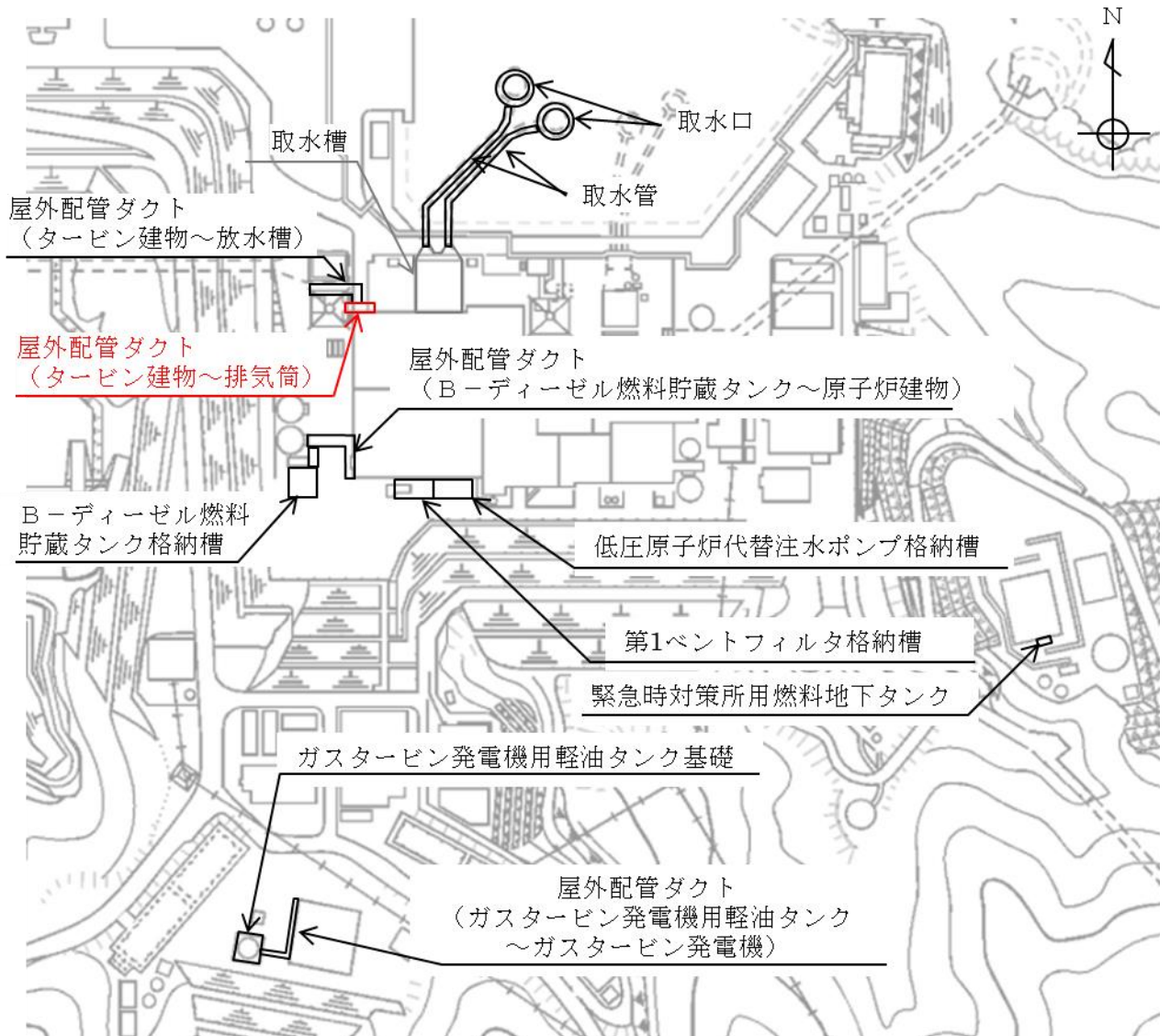


図2-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）位置図

2.2 構造概要

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の平面図を図 2-2 に、断面図を図 2-3～図 2-5 に、概略配筋図を図 2-6 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、非常用ガス処理系配管・弁等を間接支持する鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、延長約 20m、幅 6.7m、高さ 3.1m の 2 連のボックスカルバート構造から構成された延長方向におおむね一様な線状構造物であり、マンメイドロック（以下「MMR」という。）を介して十分な支持機能を有する C_M 級及び C_L 級岩盤に支持される。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の一部は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の一部と一体構造（以下「一体化部」という。）となっており、タービン建物及び排気筒の接合部には構造目地が設置されている。一体化部の耐震評価については、3 次元構造解析モデルにて耐震評価を別途実施しており、別紙に記載する。

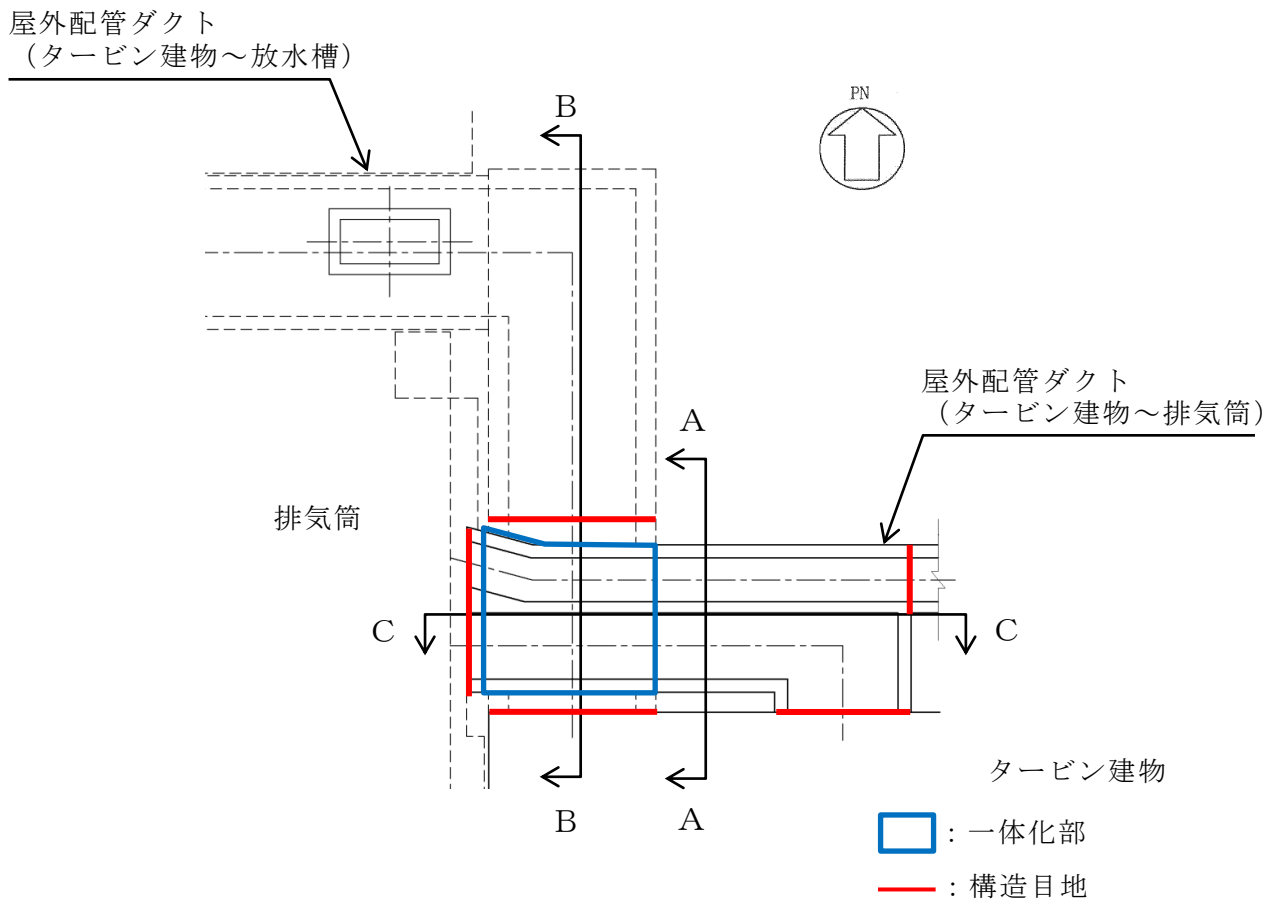


図 2-2 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 平面図

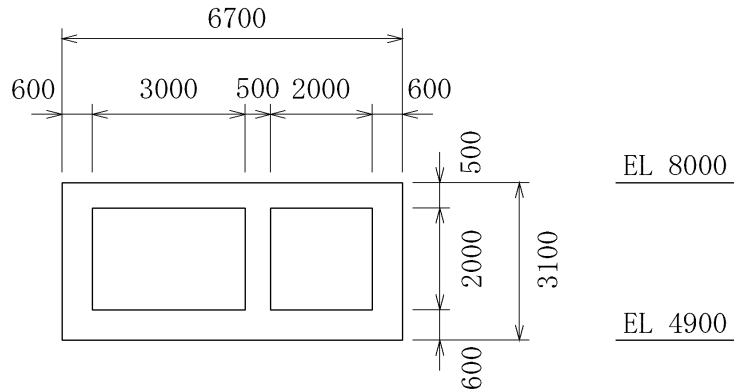


図 2-3 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（A-A断面）

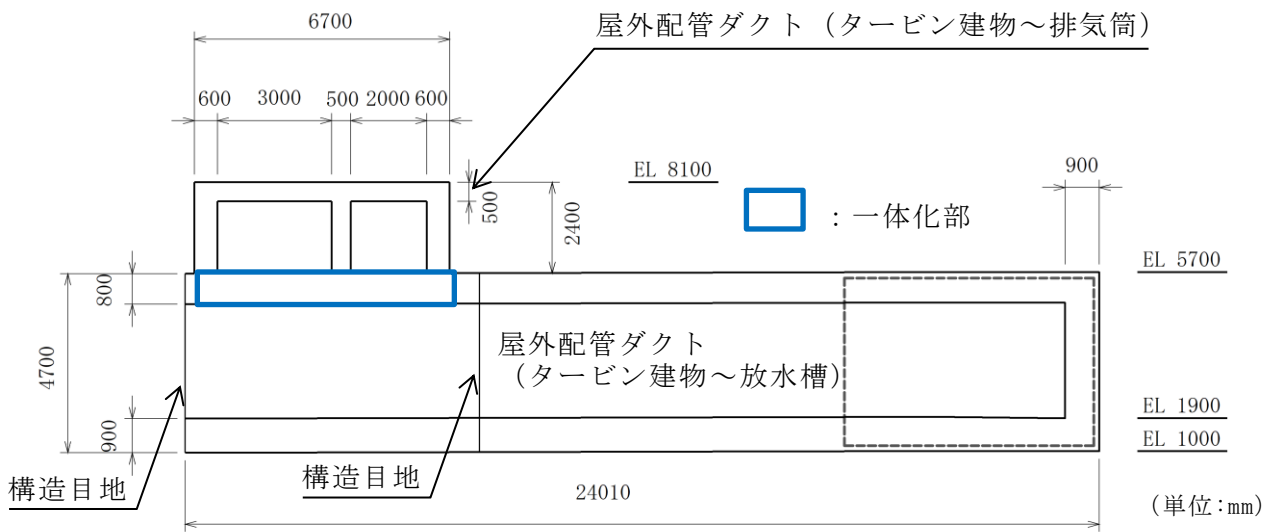


図 2-4 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（B-B断面）

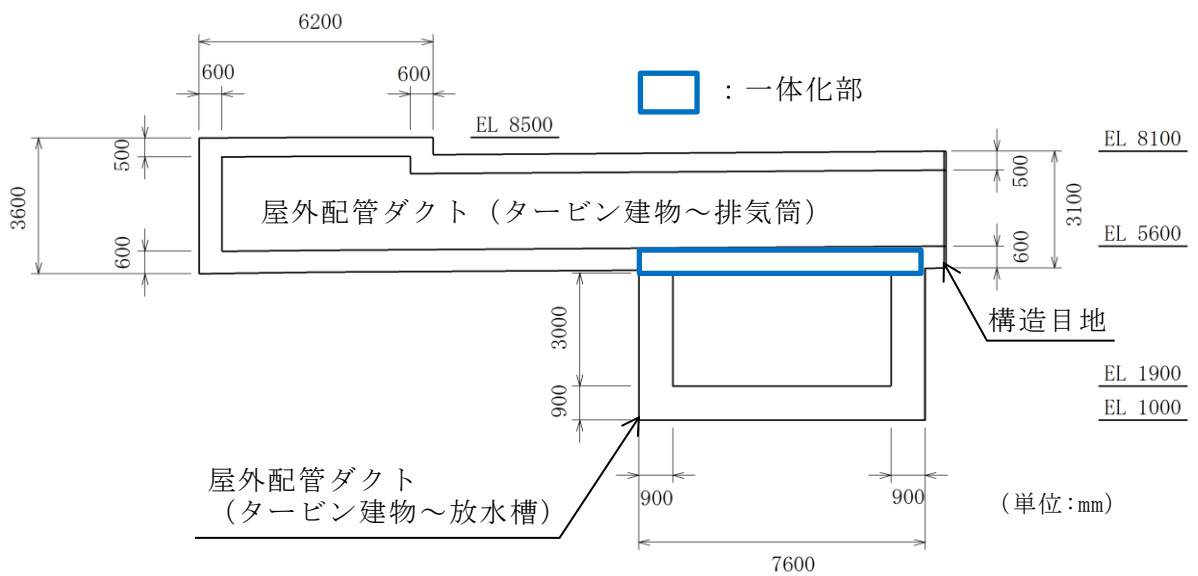


図 2-5 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 断面図（C-C断面）

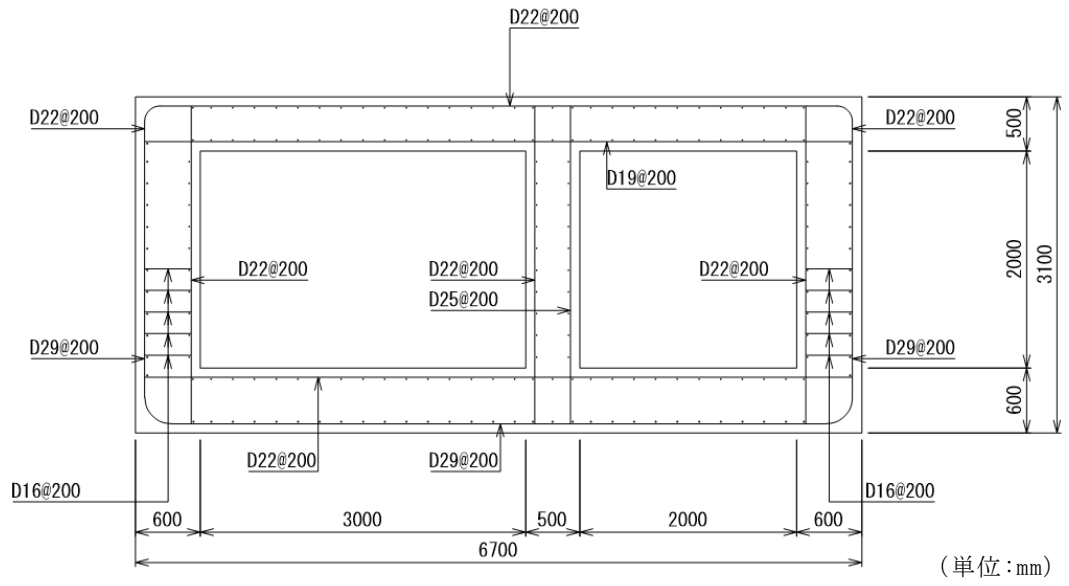


図 2-6 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 概略配筋図

2.3 評価方針

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は，設計基準対象施設においては，Sクラス設備の間接支持構造物である屋外重要土木構造物に，重大事故等対処施設においては，常設重大事故防止設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設に分類される。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価フローを図2-7に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は，VI-2-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき，重大事故等対処施設の評価として，表2-1に示すとおり，構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行う。構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施することで，構造強度を有することを確認し，これによりSクラスの施設及び常設重大事故防止設備（設計基準拡張）を支持する機能を維持することができる。

構造部材の健全性評価については，VI-2-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき，曲げ・軸力系の破壊に対しては構造部材の照査用ひずみが許容限界を下回ることを確認する。せん断破壊に対しては照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認する。

基礎地盤の支持性能評価については，VI-2-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき，基礎地盤の接地圧が許容限界を下回ることを確認する。

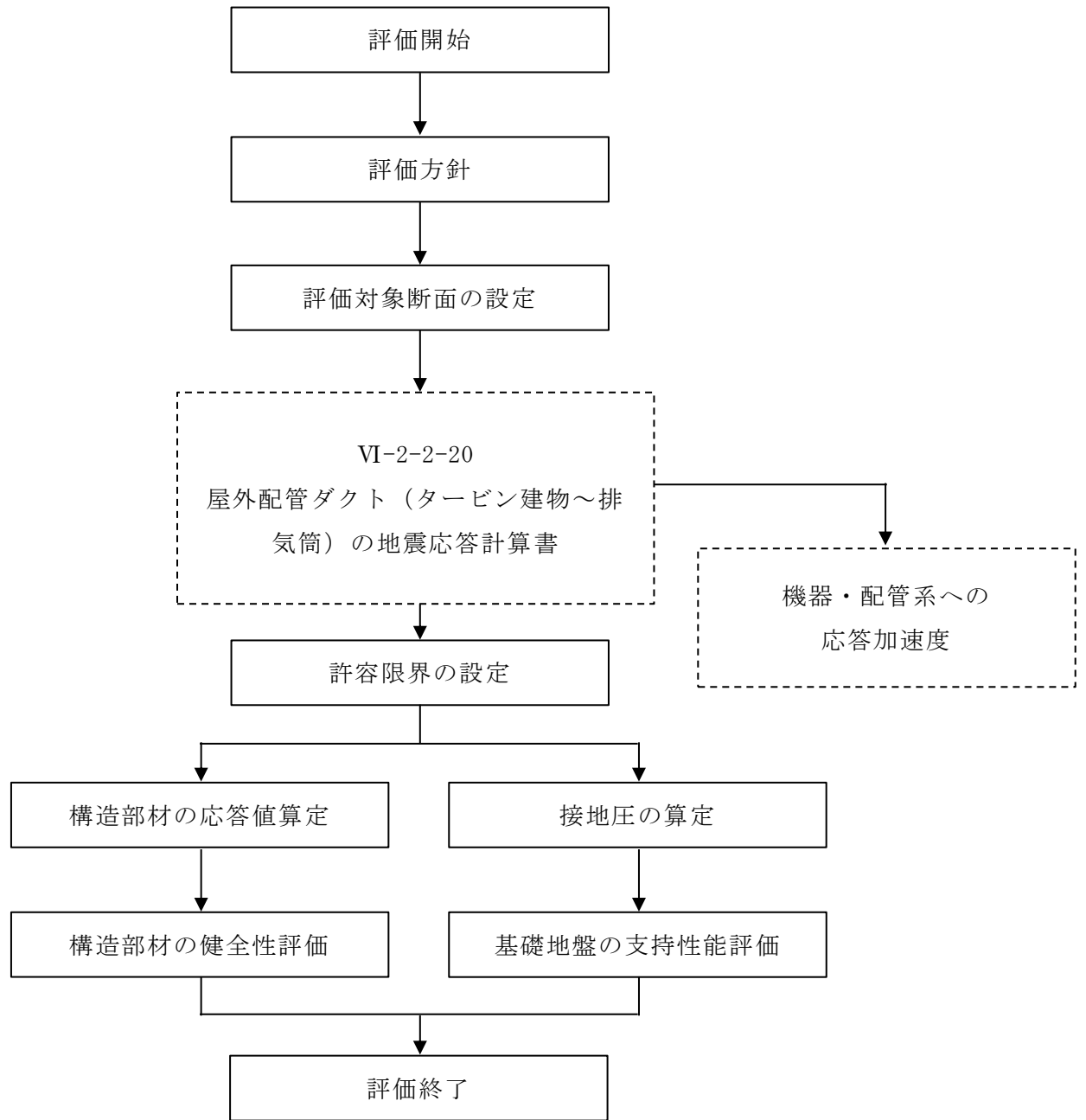


図 2-7 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 耐震評価フロー

表 2-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 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	鉄筋コンクリート部材	照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認	曲げ・軸力	限界ひずみ*
				せん断力	せん断耐力*
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する接地圧が許容限界を下回ることを確認	岩盤の極限支持力*	
		MMR		MMRの支圧強度	

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・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）
- ・コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2007年制定）
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（日本電気協会）
- ・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）

3. 耐震評価

3.1 評価対象断面

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の評価対象断面位置図を図 3-1 に示す。
 評価対象断面は、弱軸方向である図 3-1 の A-A 断面とする。

評価対象地質断面図を図 3-2 に示す。

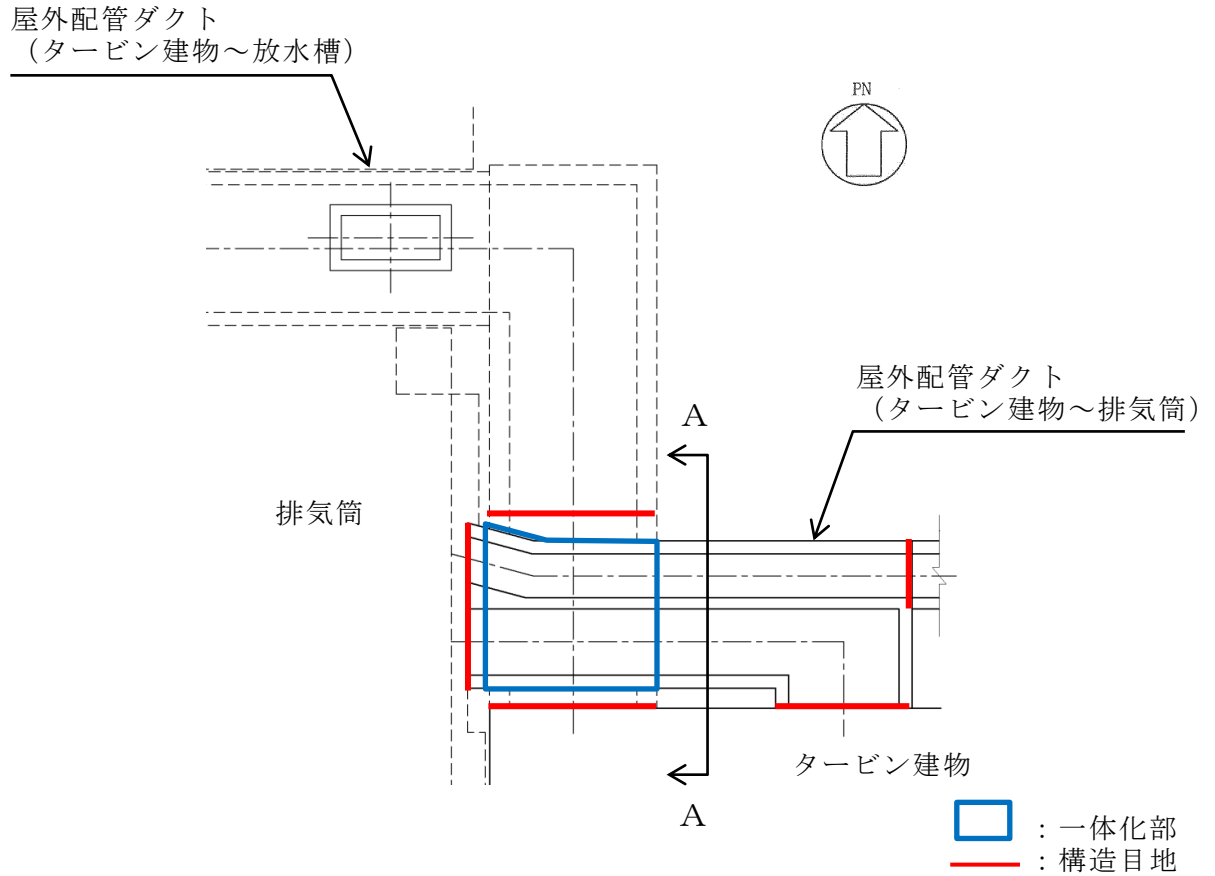


図 3-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）
 評価対象断面位置図

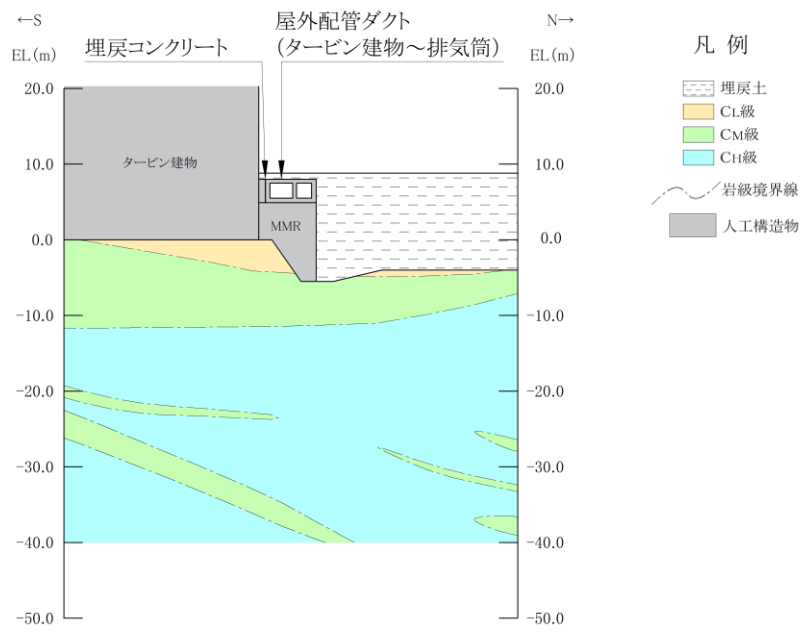


図 3-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

評価対象地質断面図 (A-A断面)

3.2 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 3-1 に、材料の物性値を表 3-2 に示す。

表 3-1 使用材料

材料		仕様
構造物 (鉄筋コンクリート)	コンクリート	設計基準強度 20.6N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 15.6N/mm ²
埋戻コンクリート		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 3-2 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)	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.08×10 ⁴	22.6* ²	
埋戻コンクリート	2.20×10 ⁴		

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。

3.3 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。

3.3.1 構造部材の健全性に対する許容限界

(1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル」という。）に基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ1.0%）とする。

土木学会マニュアルでは、曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされており、圧縮縁コンクリートひずみが1.0%の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。

(2) せん断破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、「土木学会マニュアル」及び「コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2007年制定）」に基づき、棒部材式で求まるせん断耐力とする。

3.3.2 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

(1) 基礎地盤

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 3-3 に示す。

表 3-3 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 _L 級岩盤	3.9

(2) MMR

MMRに発生する接地圧に対する許容限界は、「コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (土木学会, 2002年)」に基づき、コンクリートの支圧強度とする。

MMRの支持性能に対する許容限界を表 3-4 に示す。

表 3-4 MMR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)
支圧強度	コンクリート ($f'_{ck} = 15.6 \text{ N/mm}^2$)	$f'_a = 15.6$

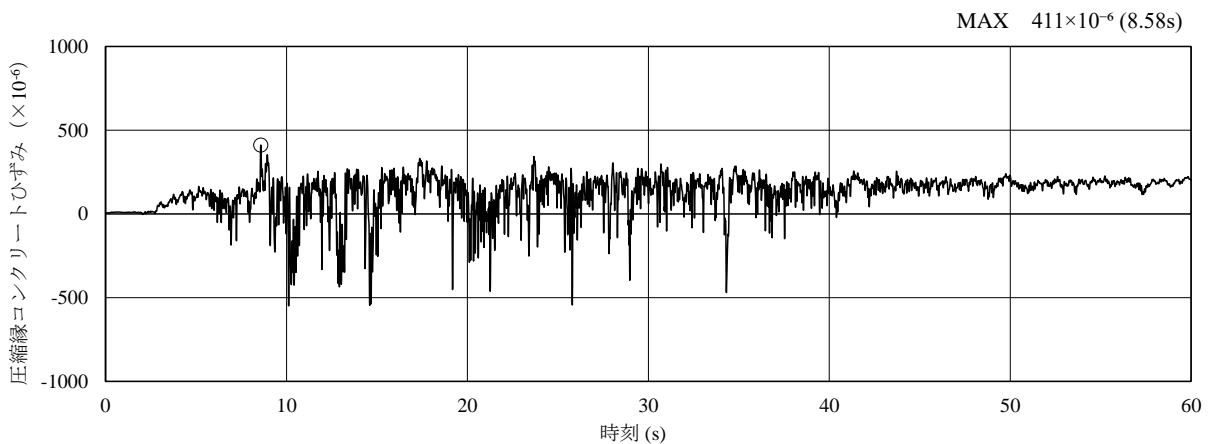
3.4 評価方法

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価は，地震応答解析により算定した照査用応答値が，「3.3 許容限界」に示す許容限界以下であることを確認する。

3.4.1 構造部材の健全性評価

構造部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊に対する照査に対して，地震応答解析により算定した照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認する。

曲げ・軸力系の破壊に対して照査値が最大となる地震動及び解析ケースでのひずみの時刻歴波形及び発生位置を図 3-3 に，せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図を図 3-4 に示す。



(圧縮を正で示す。)

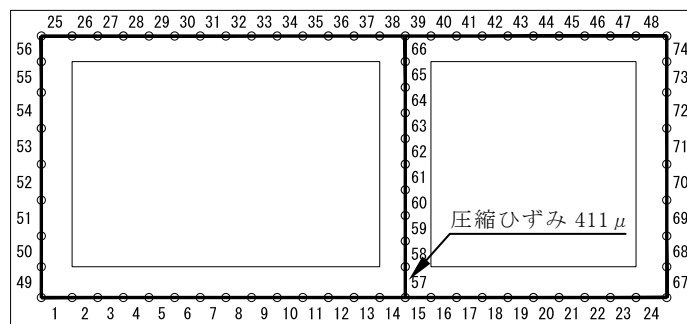
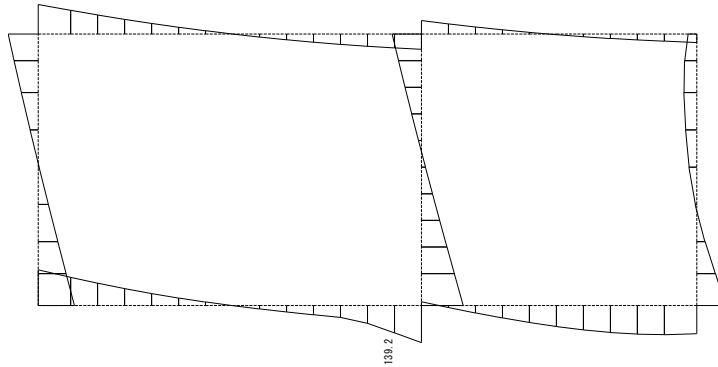


図 3-3 曲げ・軸力系の破壊に対する照査におけるひずみの時刻歴波形及び発生位置
(A-A断面，解析ケース③， $S_s - D (+)$)

曲げモーメント (単位: kN・m)

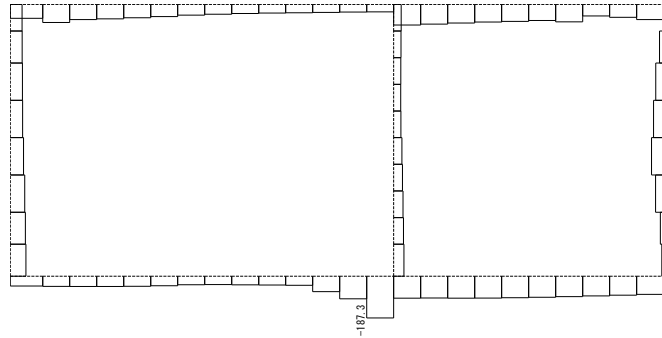
構造スケール 0 0.2 (m)
 応答スケール 0 200.0 (kN・m)



数値: 評価位置における断面力
 (a) 曲げモーメント (kN・m)

軸力 (単位: kN)

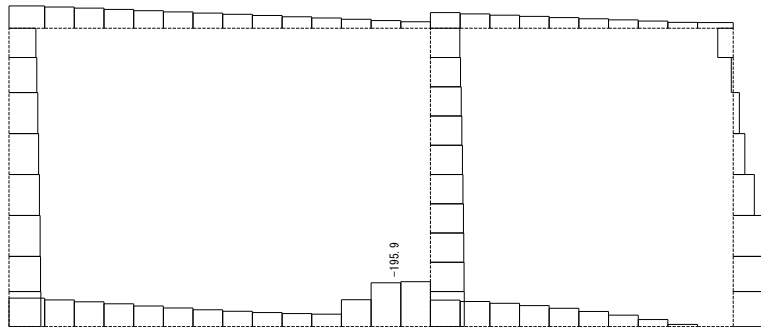
構造スケール 0 0.2 (m)
 応答スケール 0 200.0 (kN)



数値: 評価位置における断面力
 (b) 軸力 (kN) (+: 引張, -: 圧縮)

せん断力 (単位: kN)

構造スケール 0 0.2 (m)
 応答スケール 0 200.0 (kN)



数値: 評価位置における断面力
 (c) せん断力 (kN)

図 3-4 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図
 (A-A断面, 解析ケース①, S_s-D(++) , t=25.04s)

3.4.2 基礎地盤の支持性能評価

基礎地盤の支持性能評価においては基礎地盤及びMMRに発生する接地圧が許容限界以下であることを確認する。

4. 耐震評価結果

4.1 構造部材の健全性に対する評価結果

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 4-1 に、せん断破壊に対する各評価位置での最大照査値を表 4-2 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表 4-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値（A-A断面）

解析 ケース	地震動	照査用ひずみ* ϵ_d	限界ひずみ ϵ_R	照査値 ϵ_d / ϵ_R
③	S s - D (+-)	494 μ	10000 μ	0.05

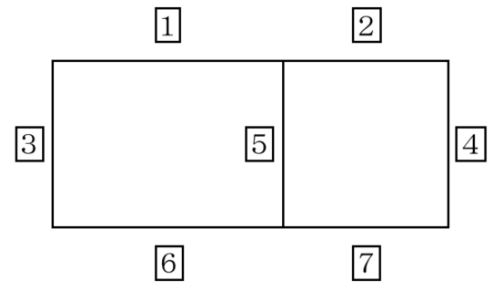
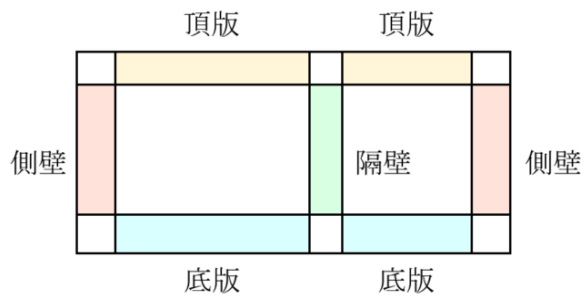
注記*：照査用ひずみ $\epsilon_d =$ 発生ひずみ $\epsilon \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

表 4-2 せん断破壊に対する最大照査値（A-A断面）

評価位置*1		解析 ケース	地震動	照査用 せん断力*2 V_d (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	照査値 V_d / V_{yd}
頂版	1	③	S s - D (+-)	102	169	0.61
側壁	3	③	S s - D (++)	140	181	0.78
隔壁	5	③	S s - D (++)	149	161	0.93
底版	6	①	S s - D (++)	206	216	0.96

注記*1：評価位置は図 4-1 に示す。

*2：照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.05)$



A-A断面

図 4-1 評価位置

4.2 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

4.2.1 基礎地盤

基礎地盤の支持性能に対する照査結果を表 4-3 に示す。また、最大接地圧分布図を図 4-2 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の基礎地盤に発生する最大接地圧が、極限支持力度を下回ることを確認した。

表 4-3 基礎地盤の支持性能に対する照査結果（A-A断面）

解析ケース	地震動	最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
③	S s - D (+-)	2.1	3.9	0.54

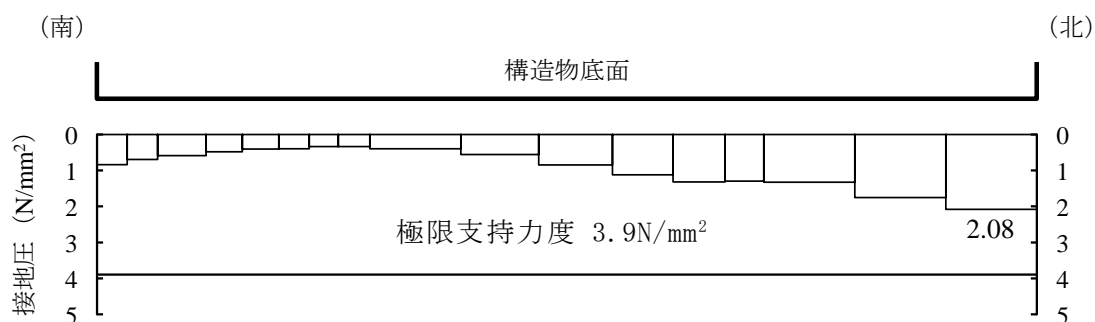


図 4-2 基礎地盤の最大接地圧分布図

(A-A断面, 解析ケース③, S s - D (+-))

4.2.2 MMR

MMRの支持性能に対する照査結果を表4-4に示す。また、最大接地圧分布図を図4-3に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のMMRに発生する最大接地圧が、支圧強度を下回ることを確認した。

表4-4 MMRの支持性能に対する照査結果（A-A断面）

解析ケース	地震動	最大接地圧 R_d (N/mm ²)	支圧強度 f'_a (N/mm ²)	照査値 R_d / f'_a
②	S s - D (++)	1.0	15.6	0.07

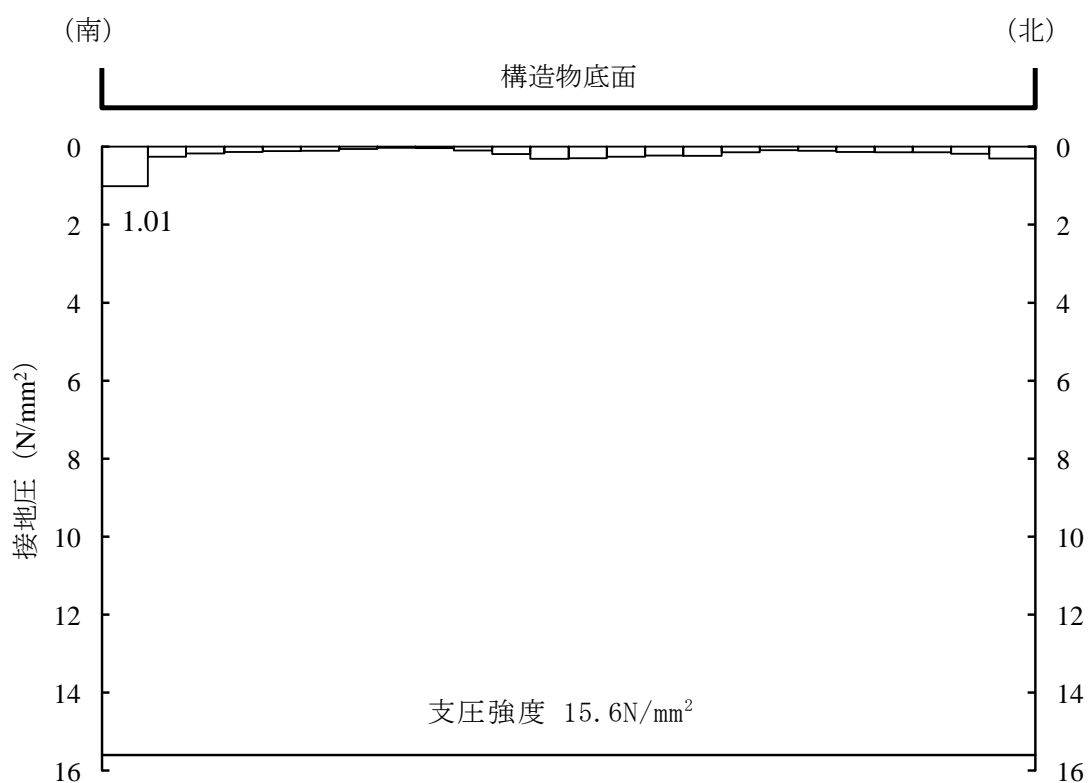


図4-3 MMRの最大接地圧分布図

(A-A断面, 解析ケース②, S s - D (++))

別紙 1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）一体化部における耐震性についての計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	構造概要	2
2.3	評価方針	7
2.4	適用規格・基準等	10
3.	耐震評価	11
3.1	地震時荷重算出断面	11
3.2	使用材料及び材料の物性値	14
3.3	許容限界	15
3.3.1	構造部材の健全性に対する許容限界	15
3.4	評価方法	16
3.4.1	構造部材の健全性評価	16
4.	構造部材の地震応答	27
5.	耐震評価結果	39
5.1	構造部材の健全性に対する評価結果	39

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、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）において、屋外配管ダクト（タービン建屋～放水槽）の一部と一体構造（以下「一体化部」という。）となっている底版が、本文「4. 耐震評価結果」において照査値が最も厳しい地震動であった基準地震動 $S_s - D(++)$ に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部に要求される機能維持の確認にあたっては、地震応答解析より算定した荷重を3次元構造解析モデルに作用させ、構造部材の健全性評価を行う。

2. 基本方針

2.1 構造概要

評価対象とする一体化部の平面図を図 2-1 に、断面図を図 2-2～図 2-4 に、概略配筋図を図 2-5 に示す。

また、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）におけるタービン建物との取り合い部や排気筒との接合部には構造目地が設置されている。屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部のイメージ図を図 2-6 に示す。

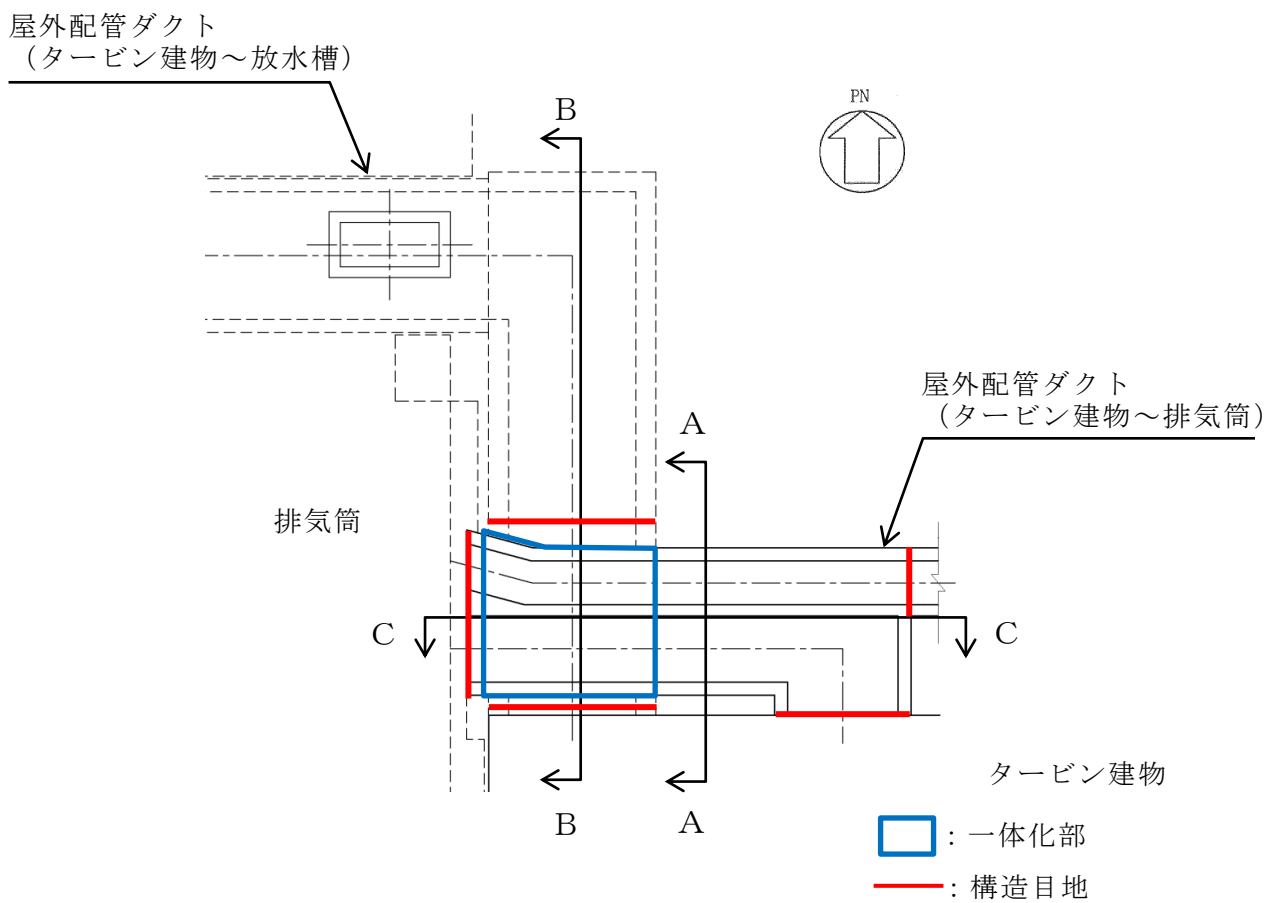


図 2-1 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒） 平面図

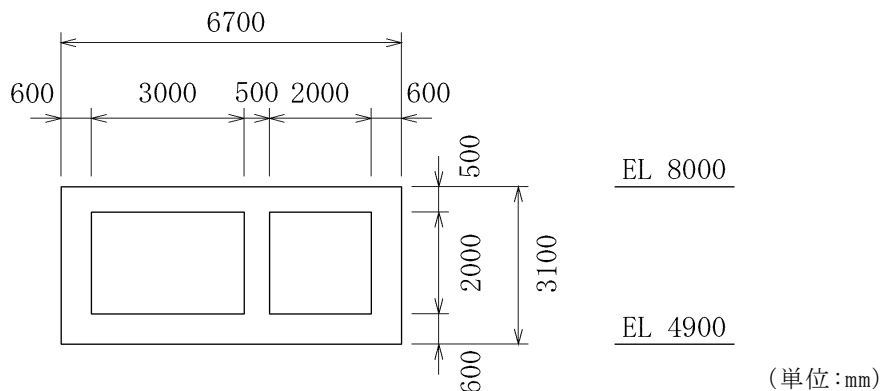


図 2-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (A-A 断面)

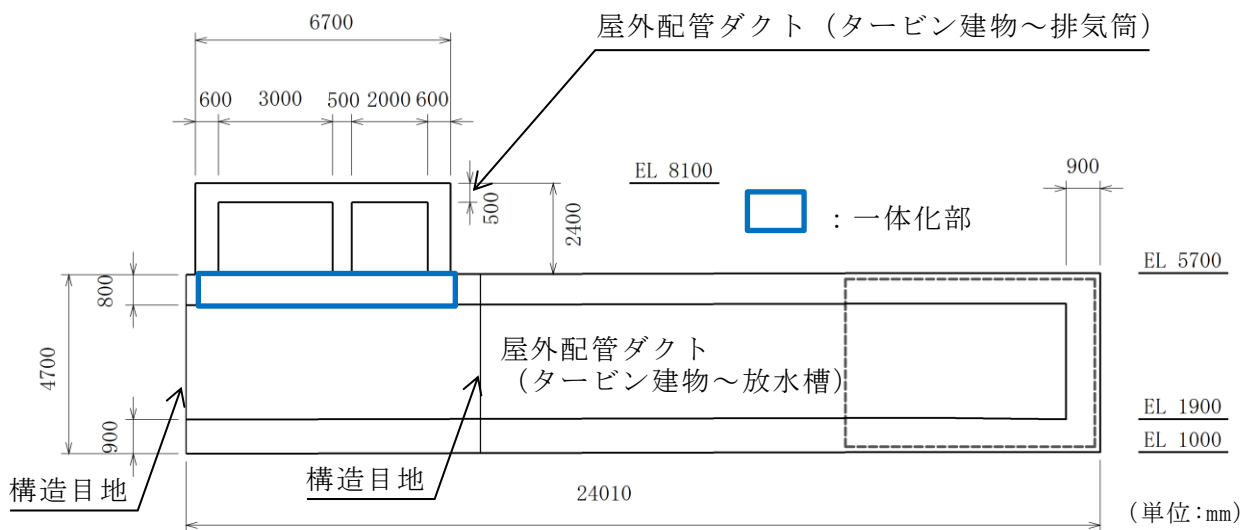


図 2-3 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (B-B 断面)

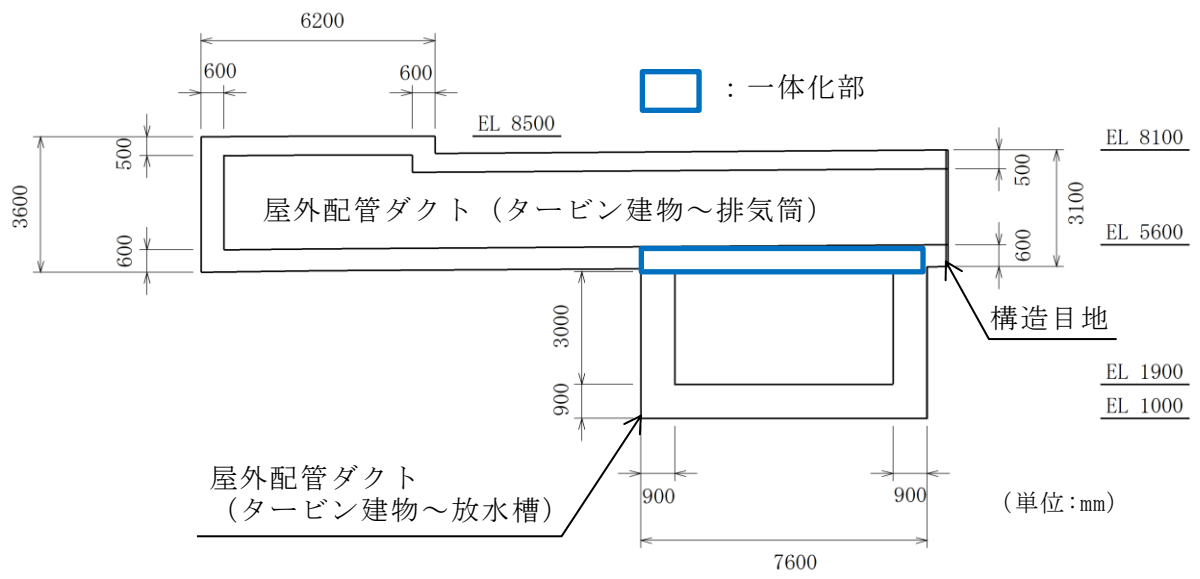


図 2-4 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 断面図 (C-C断面)

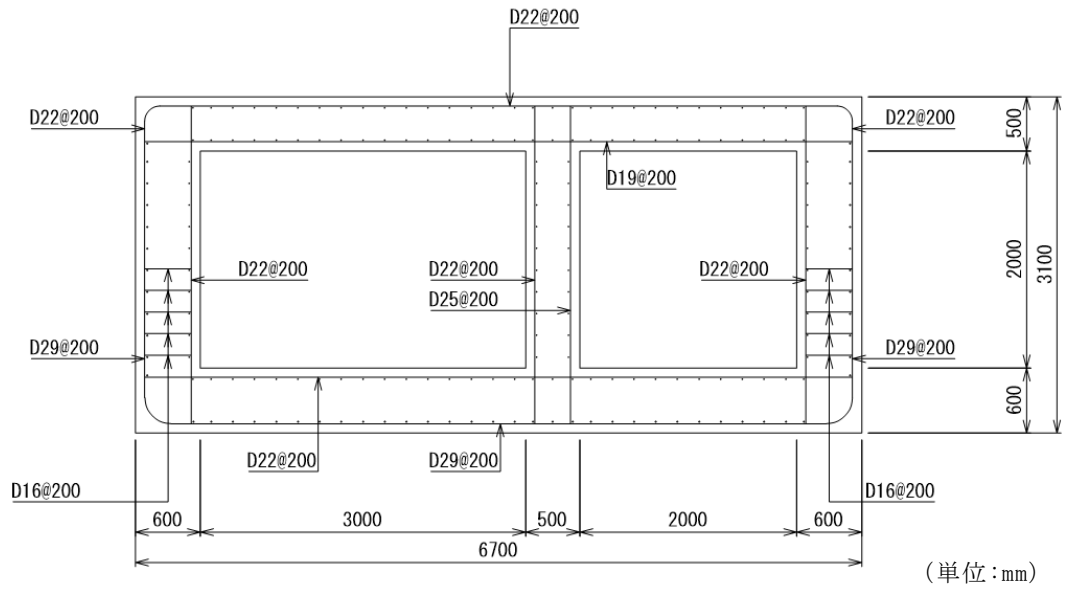


図 2-5 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 概略配筋図

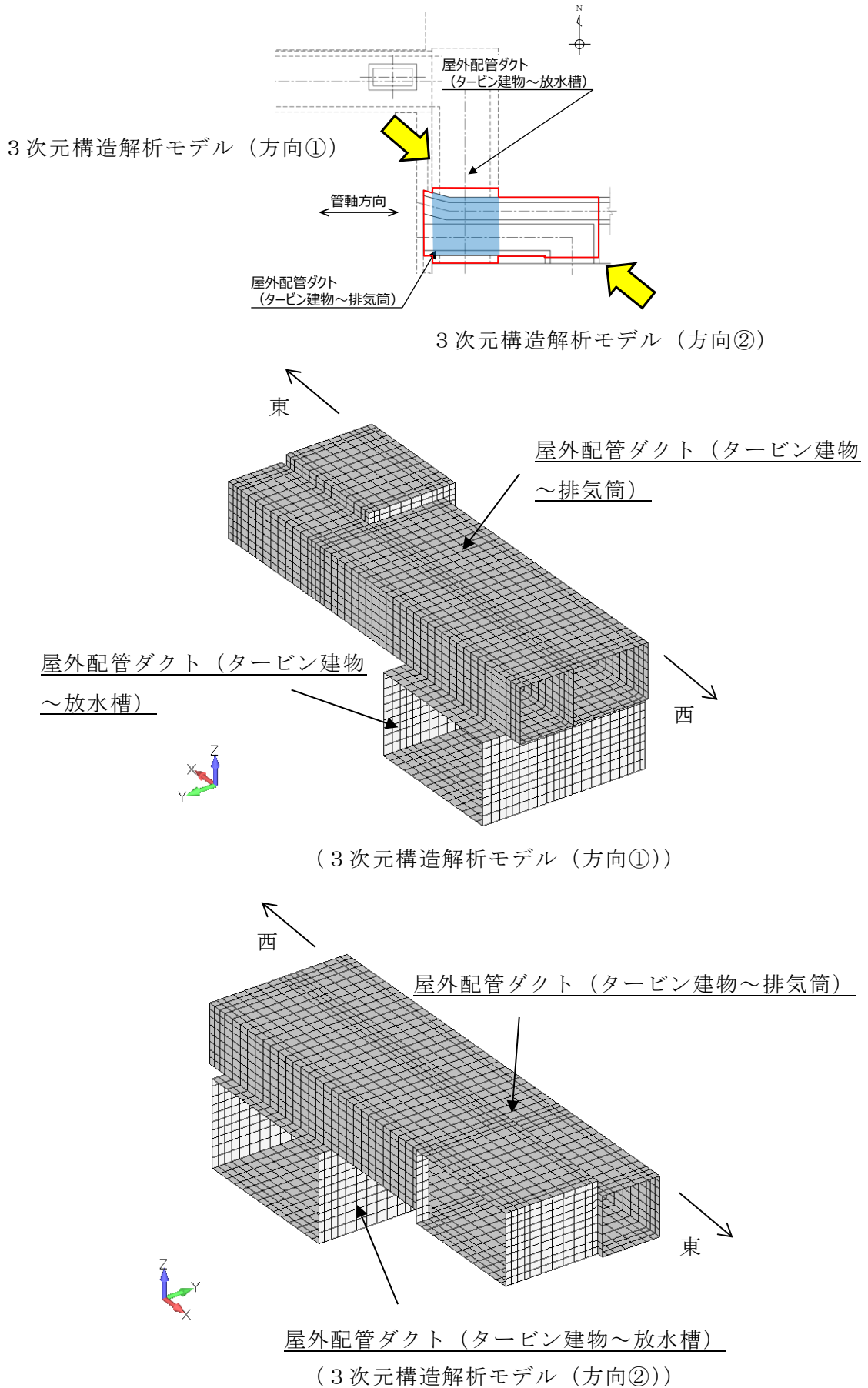


図 2-6 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 一体化部のイメージ図

2.3 評価方針

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の耐震評価フローを図 2-7 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部は、VI-2-2-20「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の地震応答計算書」のうち別紙「屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）一体化部の地震応答計算書」（以下「別紙」という。）より得られた地震応答解析の結果に基づき、表 2-1 に示すとおり、構造部材の健全性評価を行う。構造部材の健全性評価を実施することで、構造強度を有することを確認し、これにより S クラスの施設及び常設重大事故防止設備（設計基準拡張）を支持する機能を維持することを確認する。

構造部材の健全性評価については、別紙より得られた水平方向及び鉛直方向の荷重を用いた 3 次元静的材料非線形解析（以下「3 次元構造解析」という。）より応答値を算定し、曲げ・軸力系の破壊に対しては構造部材の照査用ひずみが許容限界を下回ることを確認する。せん断破壊に対しては照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認する。

ここで、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態における荷重条件は変わらず、評価は設計基準対象施設の評価結果に包括されることから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

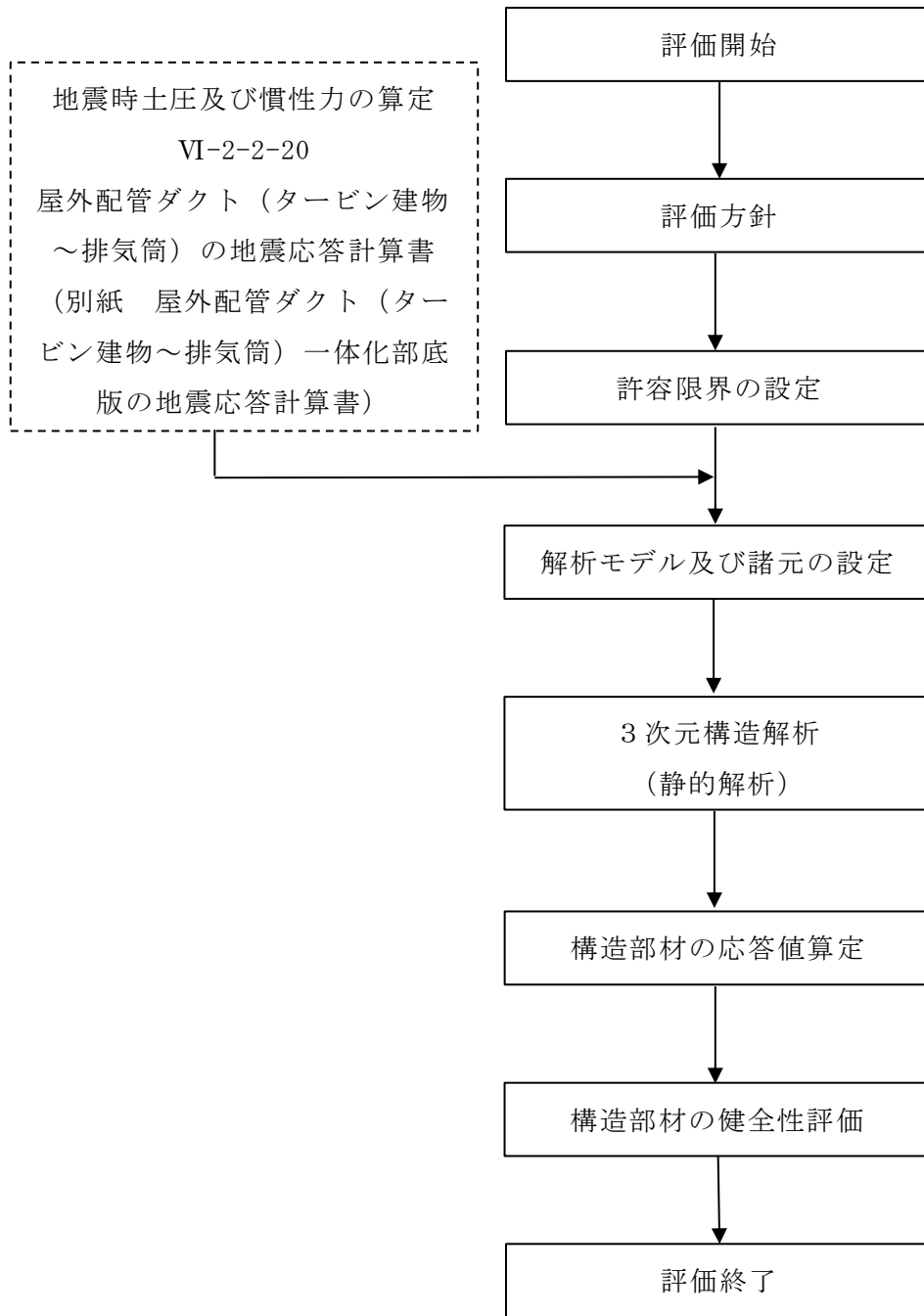


図 2-7 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）耐震評価フロー

表 2-1 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部 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	鉄筋コンクリート部材	照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認	曲げ・軸力	限界ひずみ*
				せん断力	せん断耐力*

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・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）
- ・コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2007年制定）
- ・コンクリート標準示方書[設計編]（土木学会，2017年制定）
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（日本電気協会）
- ・松江市建築基準法施行細則（平成17年3月31日松江市観測234号）
- ・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，2002年）
- ・道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（日本道路協会，2002年）

3. 耐震評価

3.1 地震時荷重算出断面

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）一体化部の地震時荷重算出断面位置図を図3-1に示す。

構造物の耐震設計における地震時荷重算出断面は、周辺状況の差異を踏まえ、図3-1のA-A断面、B-B断面及びC-C断面とする。A-A断面、B-B断面及びC-C断面に対して、3次元構造解析モデルを用いた耐震評価を実施することとする。

地震時荷重算出用地質断面図を図3-2～図3-4に示す。

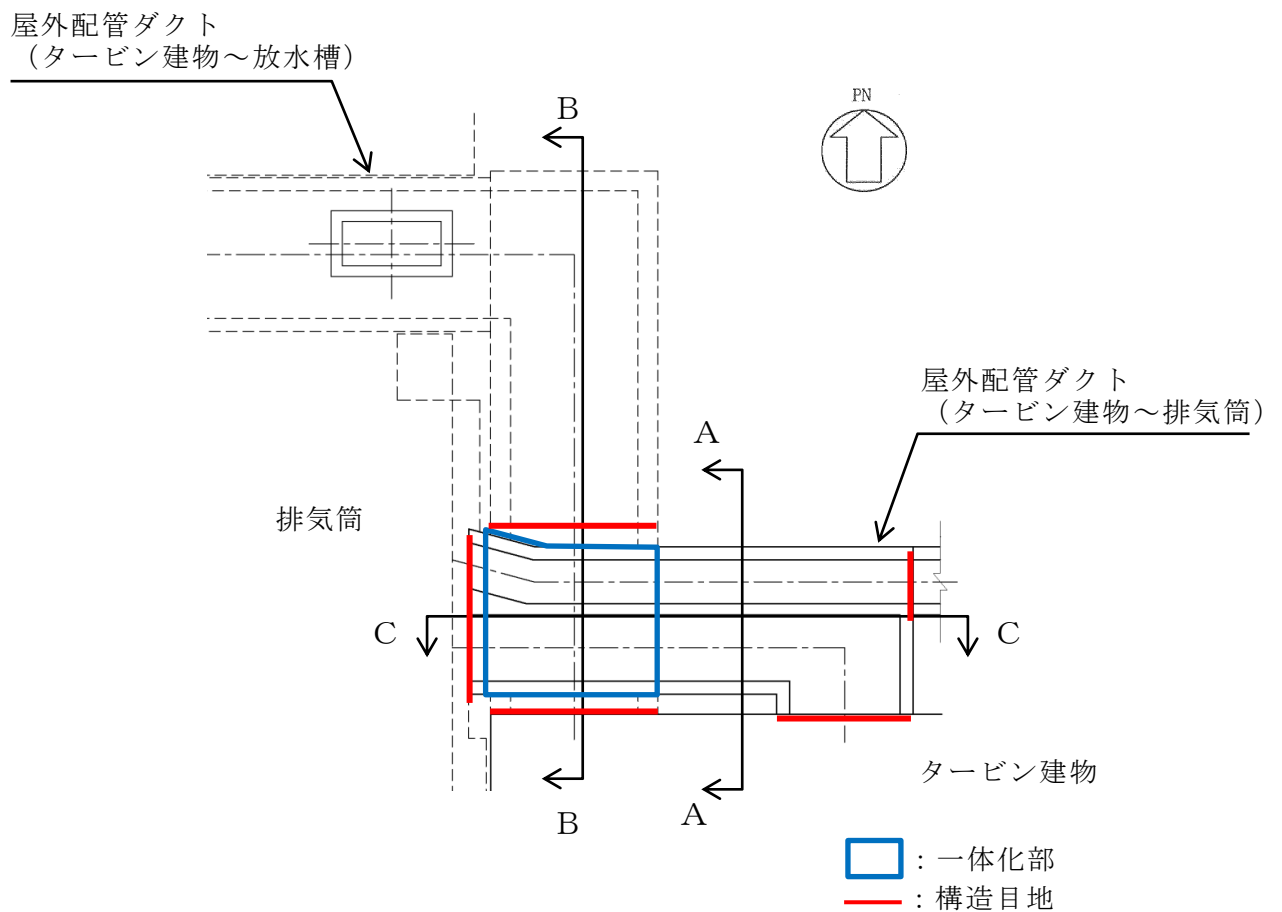


図3-1 屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部
地震時荷重算出断面位置図

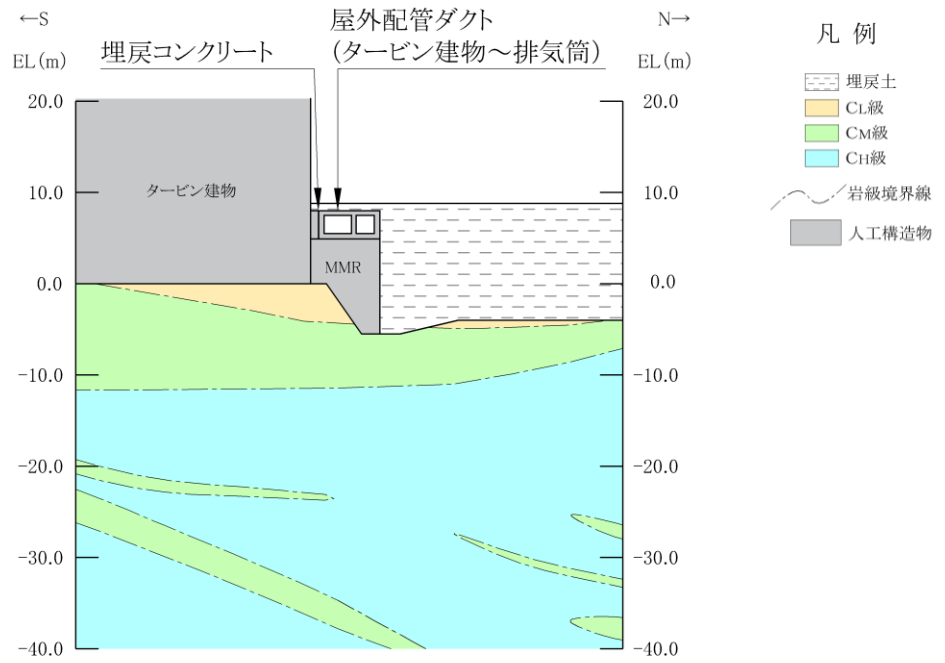


図 3-2 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)
地震時荷重算出用地質断面図 (A-A 断面)

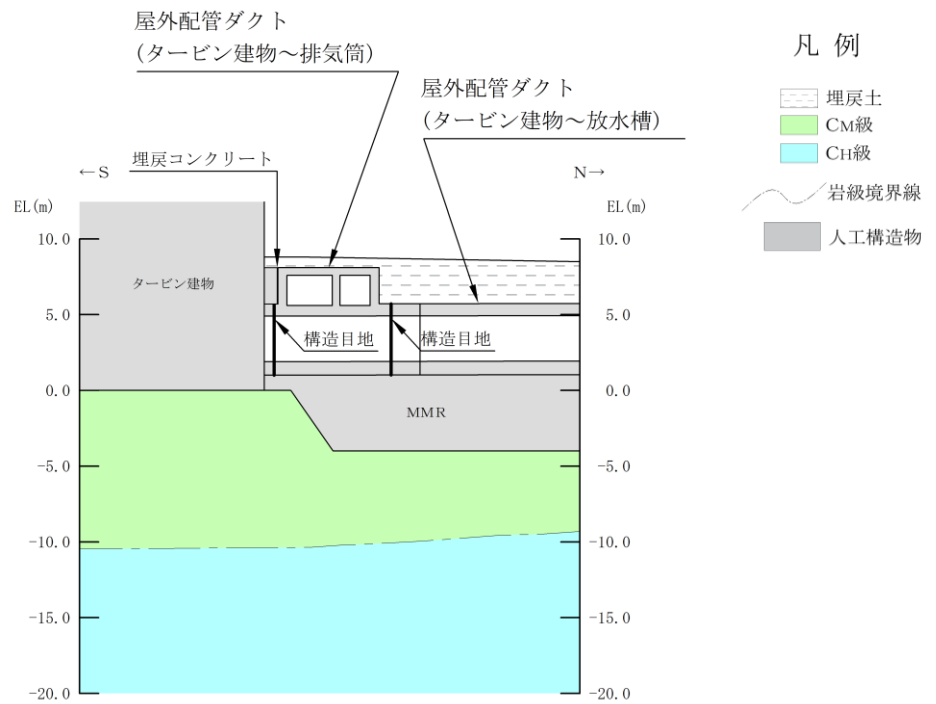


図 3-3 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)
地震時荷重算出用地質断面図 (B-B 断面)

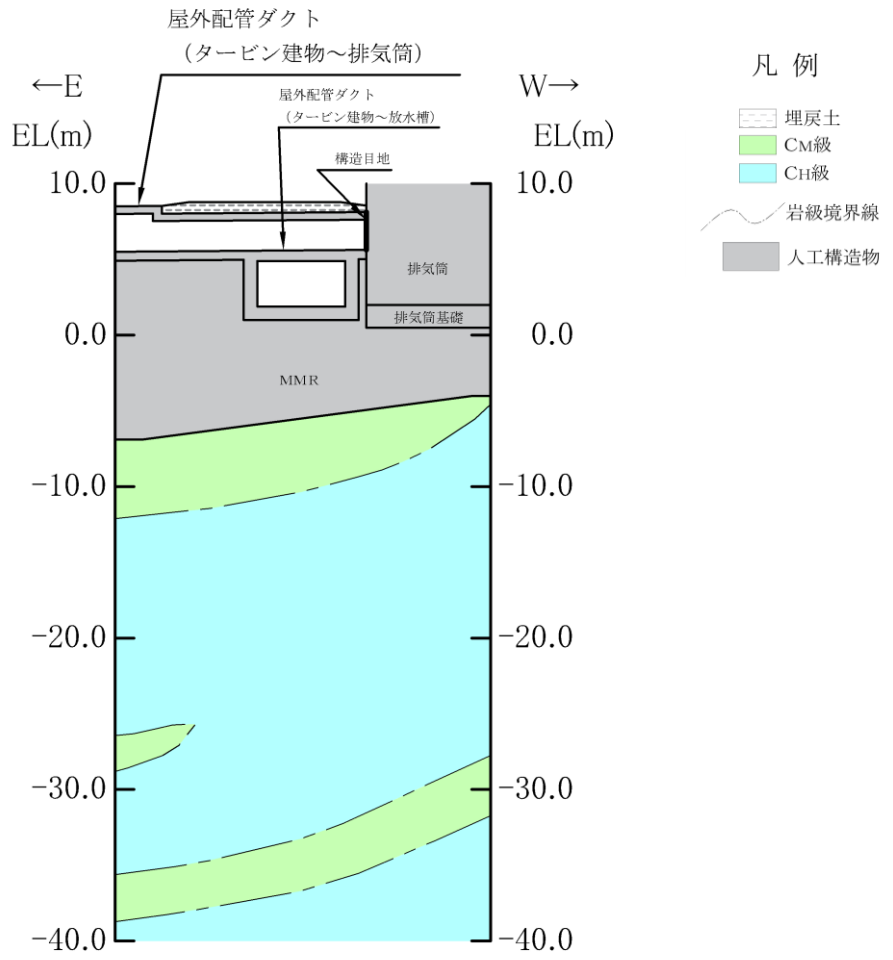


図 3-4 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒)

地震時荷重算出用地質断面図 (C-C 断面)

3.2 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 3-1, 材料の物性値を表 3-2 に示す。

表 3-1 使用材料

材料		仕様
構造物 (鉄筋コンクリート)	コンクリート	設計基準強度 20.6N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 15.6N/mm ²
埋戻コンクリート		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 3-2 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)	2.33×10 ⁴	24.0 ^{*1}	0.2
MMR	2.08×10 ⁴	22.6 ^{*2}	
埋戻コンクリート	2.20×10 ⁴		

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。

3.3 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。

3.3.1 構造部材の健全性に対する許容限界

(1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、本文「3.3.1 構造部材の健全性に対する許容限界」と同様とする。

(2) せん断破壊に対する許容限界

せん断破壊に対する許容限界は、本文「3.3.1 構造部材の健全性に対する許容限界」と同様とする。

また、棒部材式で求まるせん断耐力による照査において照査用せん断力が上記のせん断耐力を上回る場合、線形被害則を用いて部材のせん断耐力を求め許容限界とする。

3.4 評価方法

3.4.1 構造部材の健全性評価

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の健全性に対する評価においては、鉄筋コンクリート部材を非線形シェル要素、地盤を地盤ばねでモデル化し、3次元構造解析により水平2方向及び鉛直方向の荷重に対する評価を行う。3次元構造解析には、解析コード「FINAS/STAR」を用いる。なお、解析コードの妥当性については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3次元構造解析への入力荷重は、別紙の地震応答解析において、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の評価が厳しくなる時刻を複数選定し、当該時刻における地震時応答から設定する。

別紙の地震応答解析により算定した地震時荷重（地震時増分土圧、地震時増分水圧及び慣性力）を用いて、3次元構造解析により算定した照査用応答値が、「3.3 許容限界」に示す許容限界以下であることを確認する。

(1) 解析モデル

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、非線形シェル要素でモデル化する。3次元構造解析モデル図を図3-5に示す。

非線形シェル要素は、部材高さ方向に平面要素を重ね合わせて構成する。図3-6に非線形シェル要素の概念図を示す。主筋の位置が層の中心となるよう上側、下側に鉄筋コンクリートの層を設定し、鉄筋コンクリート層を除く範囲は、無筋コンクリート層としてモデル化する。鉄筋コンクリート層の厚さは、「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005年）」（以下「土木学会マニュアル」という。）に示される一般的な分割方法に従い、かぶり厚さの2倍とする。各要素の鉄筋部分は、鉄筋の軸方向剛性のみを有する鉄筋層としてモデル化する。構造部材（鉄筋コンクリート）の非線形特性を図3-7及び図3-8に示す。

3次元構造解析モデルにおけるモデル化範囲については、屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）及び屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）に存在する各構造目地から妻壁までをモデル化範囲とする。

南北方向において、平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）は、タービン建物との取り合い部に設置された構造目地から、妻壁までを南北方向のモデル化範囲とする。

東西方向において、平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）は、妻壁から西側端部に存在する構造目地までを東西方向のモデル化範囲とする。

N S断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）のモデル化範囲概念図を図3-9に、E W断面において平面応力要素でモデル化する屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のモデル化範囲概念図を図3-10に示す。

構造物の底版及び側面には、地盤ばねを配置する。常時解析において、支持地盤に設定する地盤ばねは基礎地盤に対する静的な載荷状態を想定して定義されている「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，2002年）」に基づき設定する。地震時解析において、支持地盤及び側方地盤に設定する地盤ばねは地盤と構造物間の剥離を考慮できる非線形ばねでモデル化し、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編（日本道路協会，2002年）」に基づき設定する。1方向載荷時には、載荷方向と平行する壁に面直方向の地盤ばねを設定するが、周辺地盤が埋戻土の場合は、埋戻土の剛性は十分に小さく、構造物に与える影響が微小であることから、地盤ばねを設定しない。

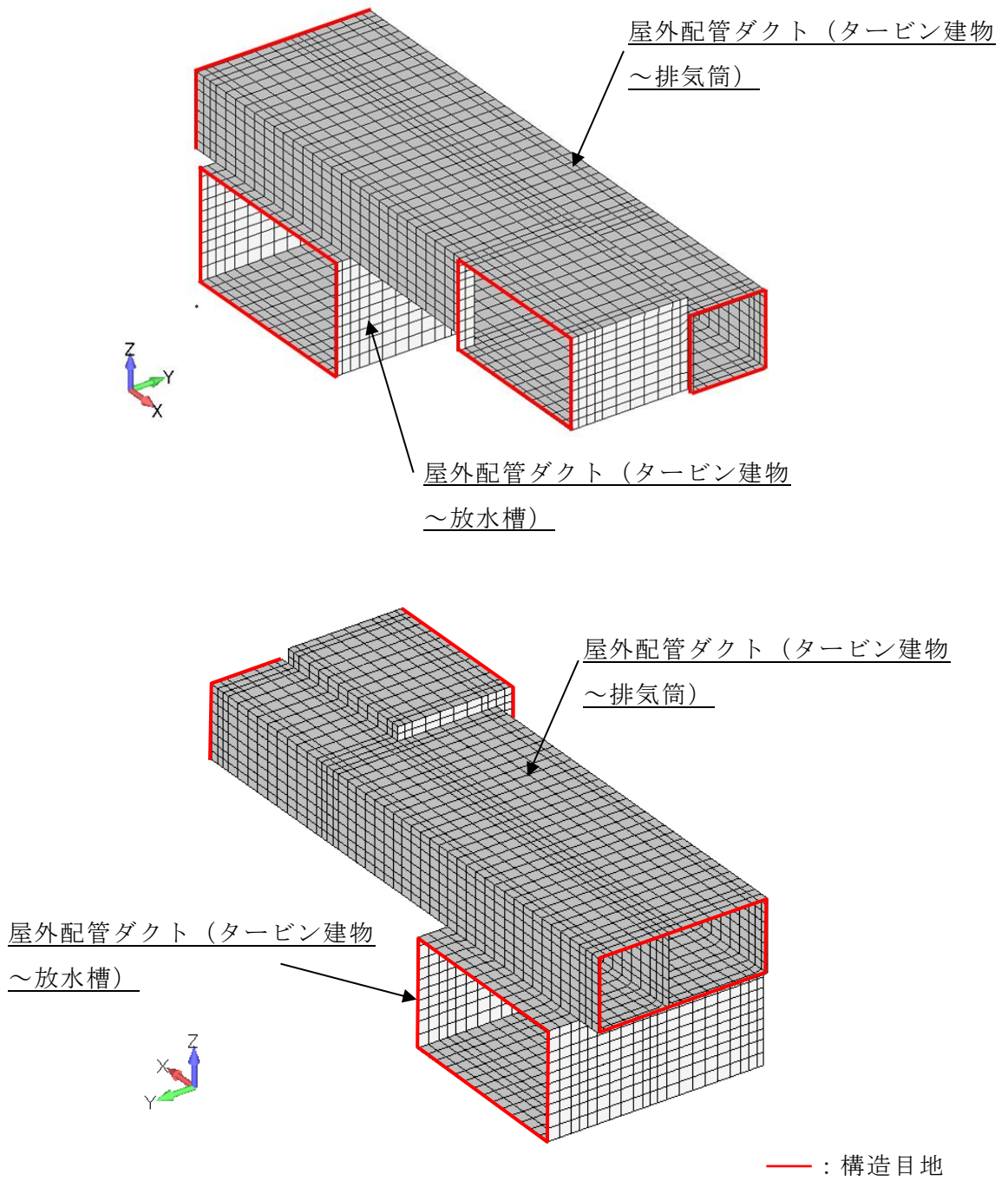


図 3-5 3次元構造解析モデル図

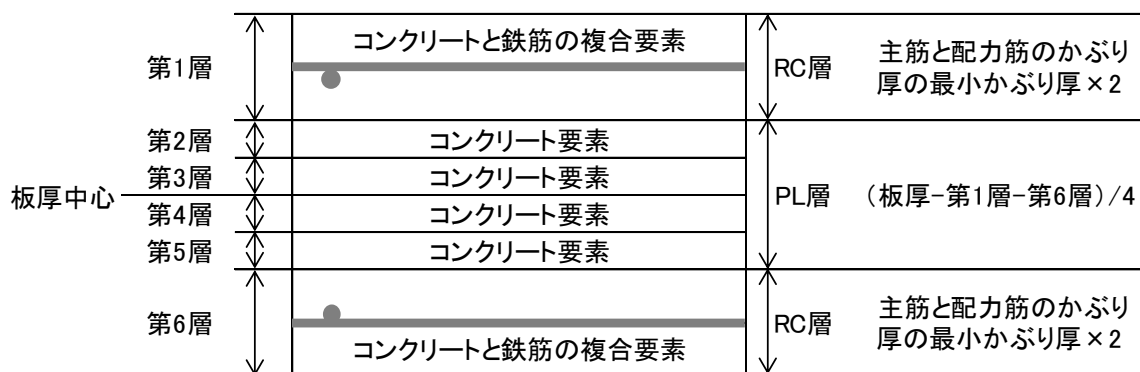


図 3-6 非線形シェル要素の概念図

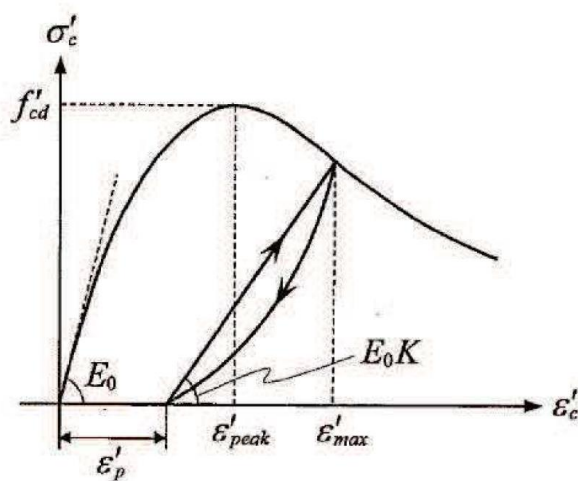


図 3-7 構造部材の非線形特性（コンクリートの応カーひずみ関係）
 （「コンクリート標準示方書 [設計編]」（土木学会，2017 年制定）」より引用）

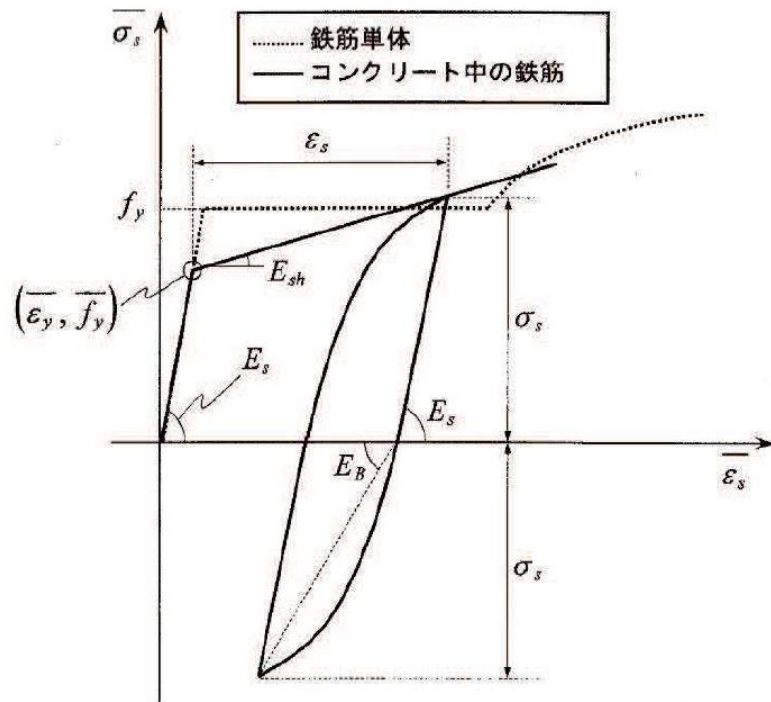
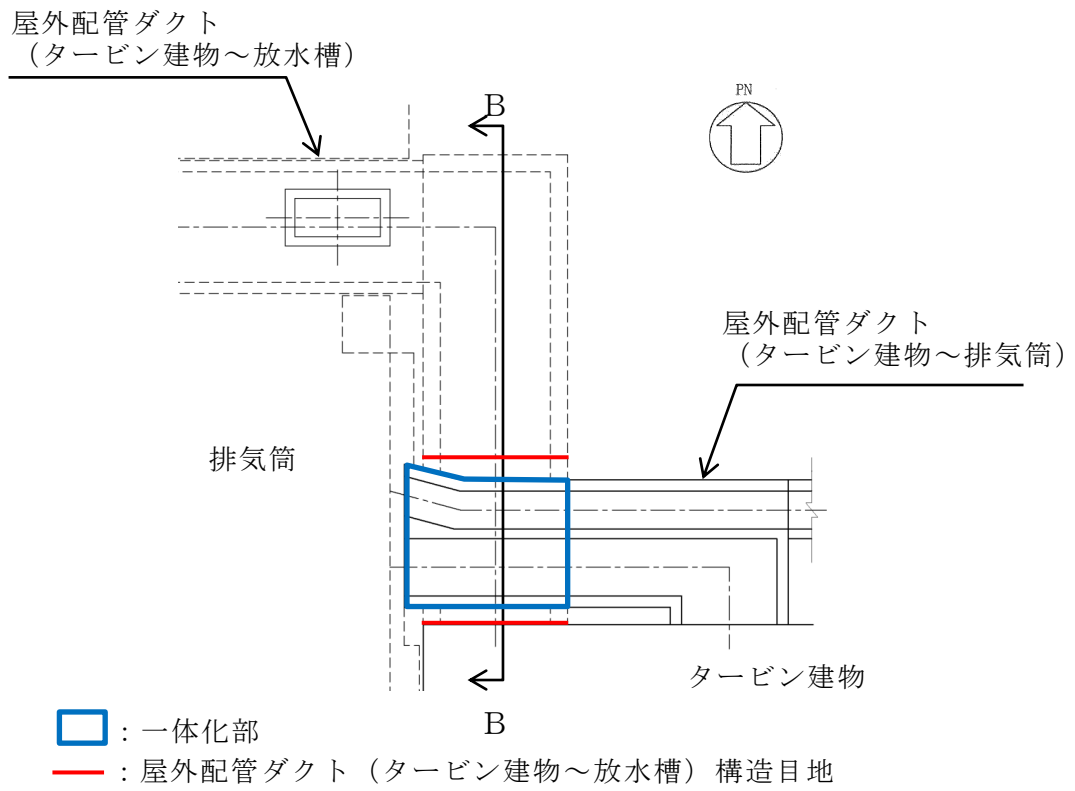
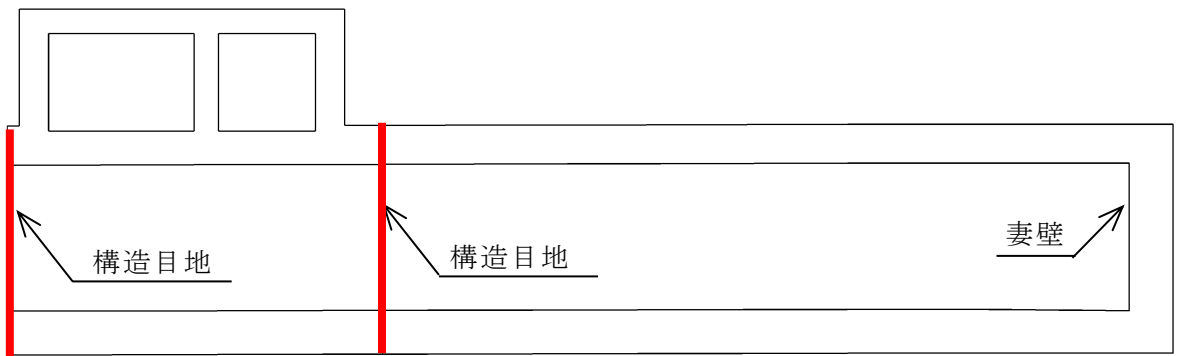


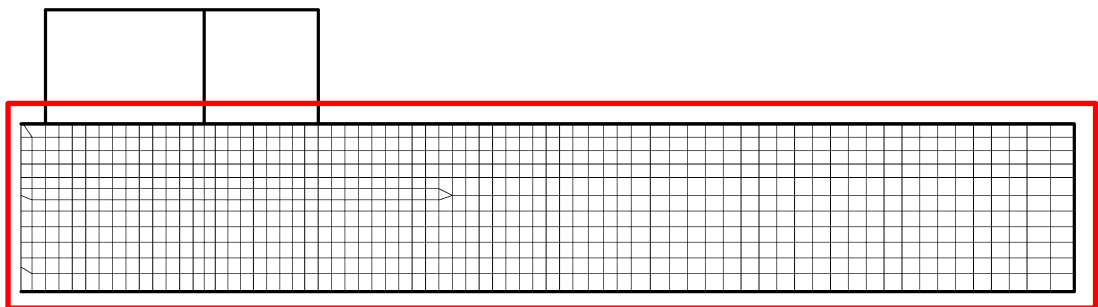
図 3-8 構造部材の非線形特性（鉄筋の応力-ひずみ関係）
 （「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年制定）」より引用）



(B-B断面構造目地位置)



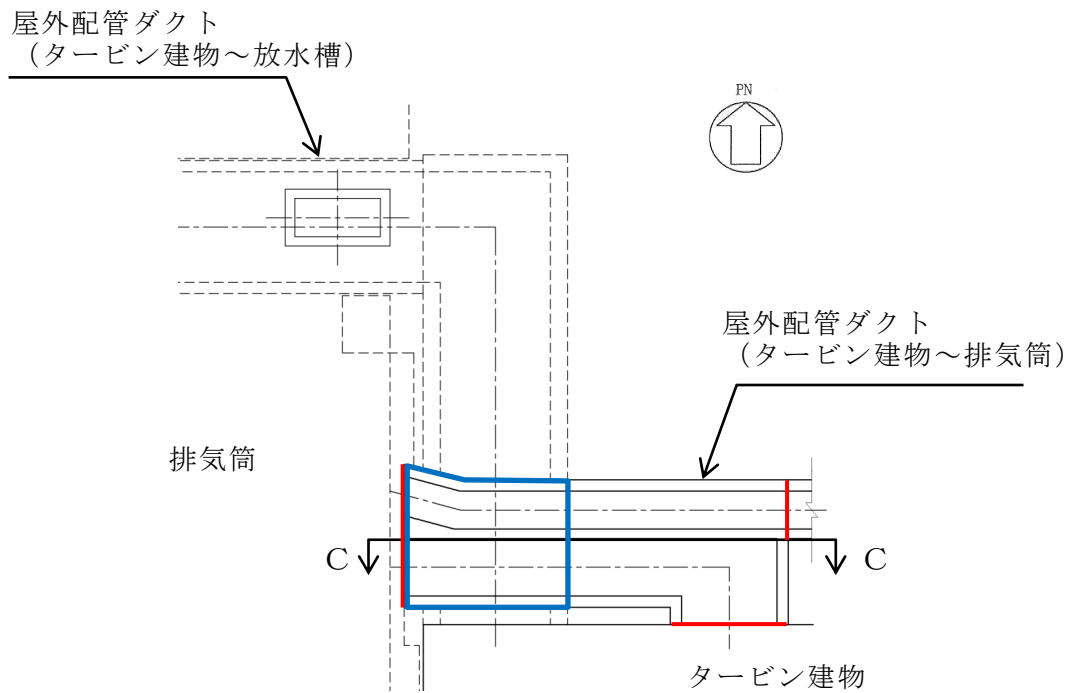
(B-B断面構造概要)



モデル化範囲

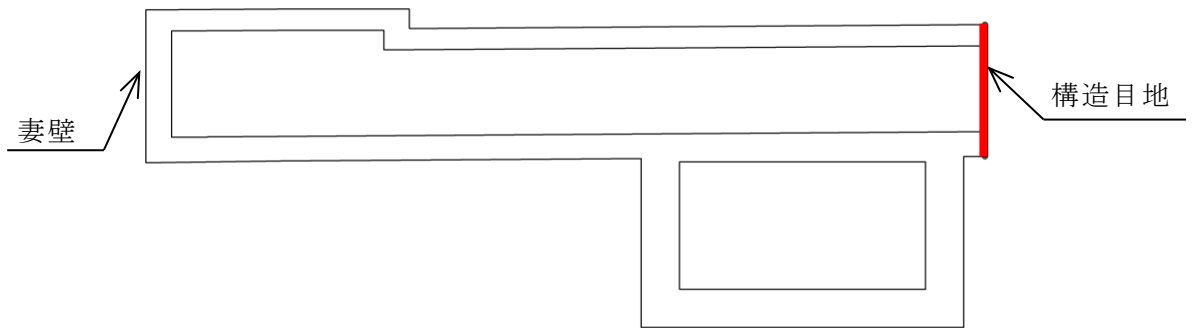
(B-B断面解析モデル概要)

図 3-9 B-B断面モデル化範囲概念図

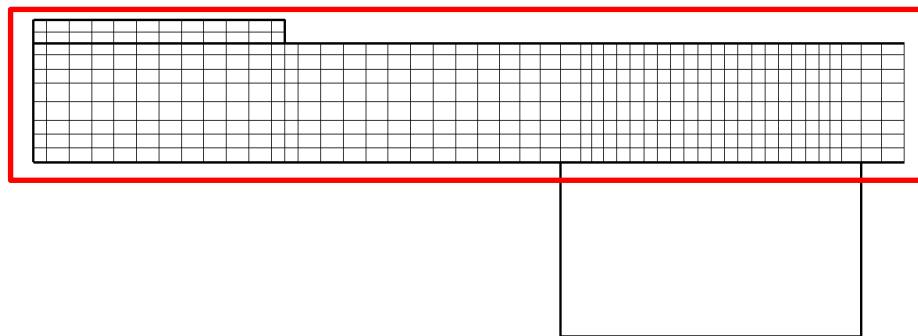


- : 一体化部
- : 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) 構造目地

(C-C断面構造目地位置)



(C-C断面構造概要)



- : 屋外配管ダクト (タービン建物～排気筒) のモデル化範囲

(C-C断面解析モデル概要)

図 3-10 C-C断面モデル化範囲概念図

(2) 照査時刻

構造部材の健全性評価において、照査時刻は構造的特徴を踏まえ、損傷モードごと及び部材ごとに評価が厳しくなる時刻を地震応答解析の結果から複数選定する。表 3-3 に照査時刻の選定の考え方を示す。また、照査時刻における荷重抽出概念図を図 3-12～図 3-14 に示す。

表 3-3 照査時刻の考え方

照査時刻	損傷モード	着目する構造物	変形方向*1	着目部位	荷重抽出時刻	抽出応答値
時刻 1-1	曲げ・軸力系の破壊	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	北側	はり要素壁（面外）	頂底板間の相対変位最大時刻	隅角部節点の応答変位を用いて回転成分を除去した層間変位
時刻 1-2			南側			
時刻 2-1*2	せん断破壊		北側	はり要素壁（面外）	各側壁の水平荷重最大時刻	側面地盤水平土圧と側壁の慣性力の積算値
時刻 2-2*2			南側			
時刻 3-1*3	せん断破壊	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	北側	平面応力要素壁（面内）	頂底板間の相対変位最大時刻	隅角部節点の応答変位を用いて回転成分を除去した層間変位
時刻 3-2*3			南側			

注記*1：構造物の変形方向は、層間変位の符号確認により実施する。

層間変位の算出概念図を図 3-11 に示す。

*2：時刻 2-1 は、南側壁の水平荷重最大時刻とし、時刻 2-2 は、北側壁の水平荷重最大時刻とする。

*3：時刻 3-1 及び時刻 3-2 は、屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）をモデル化する B-B 断面のみが対象

$$\delta_s = \frac{b(\Delta x_1 + \Delta x_2 - \Delta x_3 - \Delta x_4) + h(-\Delta y_1 + \Delta y_2 - \Delta y_3 + \Delta y_4)}{2b}$$

- ここで、 δ_s : せん断変形量
 b : 構造物の幅
 h : 構造物の高さ
 $\Delta X, \Delta Y$: X 方向及び Y 方向の変位

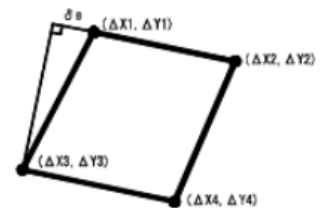
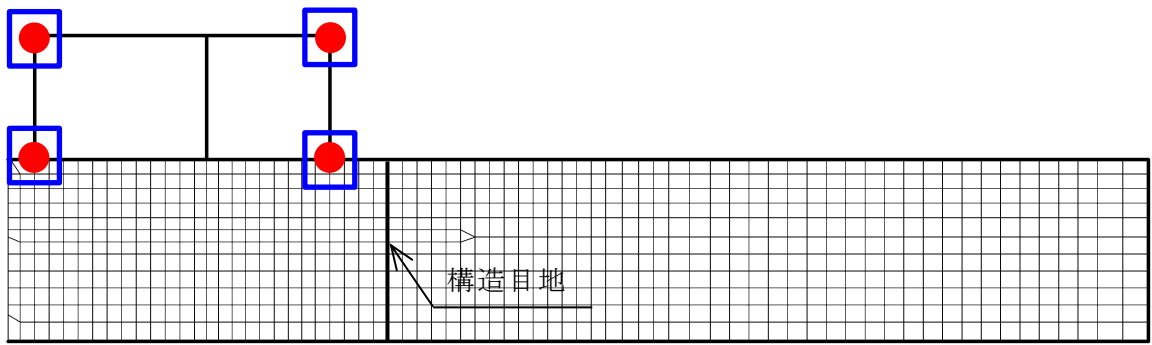


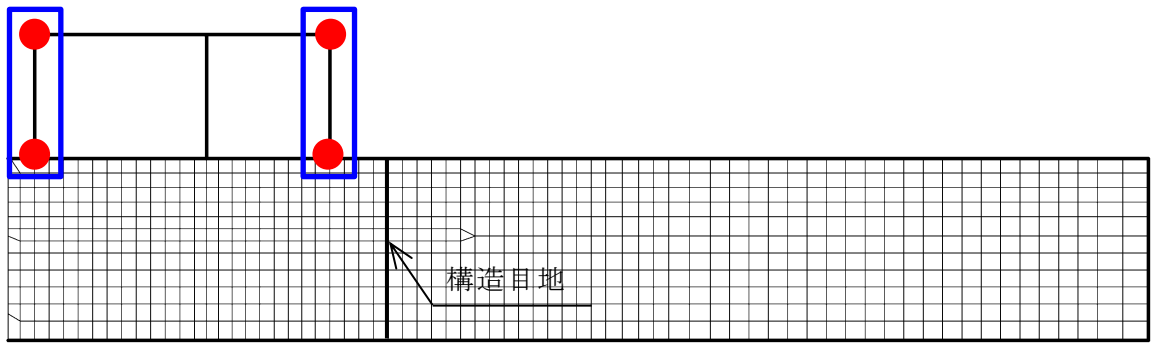
図 3-11 層間変位の算出概念図



● : 層間変位算出のための着目節点

□ : 頂底版間の相対変位算出のための着目節点

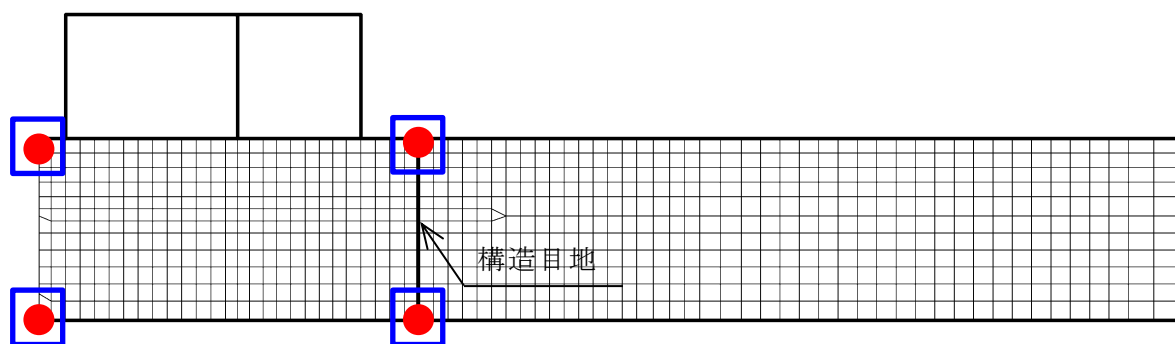
図 3-12 時刻 1-1 及び 1-2 における荷重抽出概念図



● : 層間変位算出のための着目節点

□ : 各側壁の水平荷重算出のための着目要素

図 3-13 時刻 2-1 及び 2-2 における荷重抽出概念図



- : 層間変位算出のための着目節点
- : 頂底板間の相対変位算出のための着目節点

図 3-14 時刻 3-1 及び 3-2 における荷重抽出概念図

(3) 入力荷重

3次元構造解析の入力荷重は、設計値及び別紙における地震応答解析結果から「(2) 照査時刻」で選定した照査時刻より応答値を用いて算定する。入力荷重の一覧を表3-4に示す。

表3-4 屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の耐震評価における入力荷重

入力荷重		地震応答解析から抽出する応答値	載荷位置
慣性力	機器・配管の慣性力	応答加速度	設置位置
	躯体の慣性力	応答加速度	躯体全体
	積載荷重の慣性力	応答加速度	作用位置
地震時増分土圧・地震時増分水圧		土圧・水圧	作用位置
周面せん断力		土圧	作用位置

4. 構造部材の地震応答

3次元構造解析に基づく各構造部材の地震時応答結果を示す。照査対象部材位置図を図4-1に、各部材の要素座標系を図4-2に、シェル要素における各要素の断面力の方向を図4-3に示す。

曲げ・軸力照査における最大照査値でのひずみ分布を図4-4に、せん断力照査における最大照査値での断面力分布を図4-5～図4-10に示す。

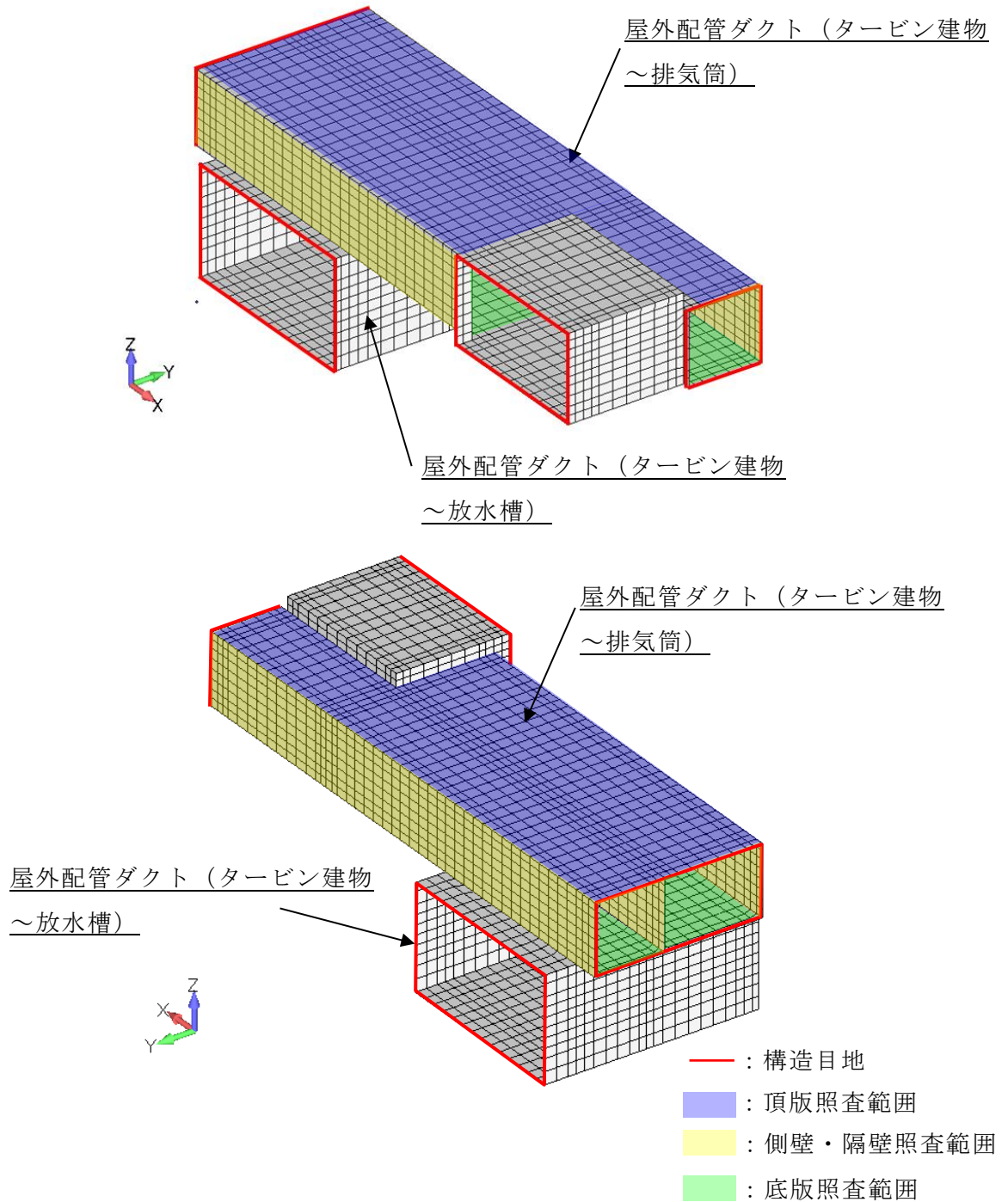


図4-1 照査対象部材位置図

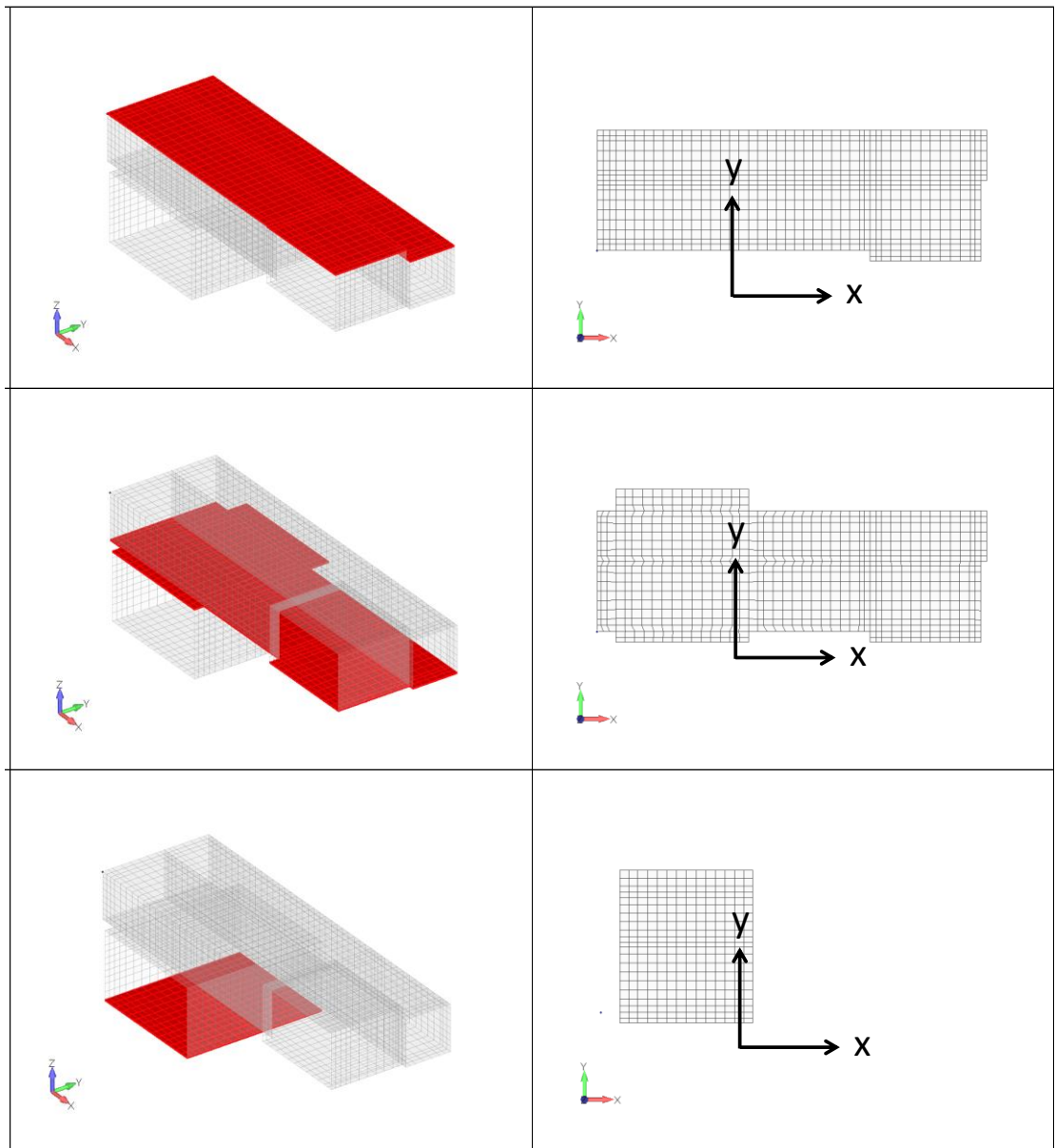


図 4-2 (1) 頂版・底版の要素座標系

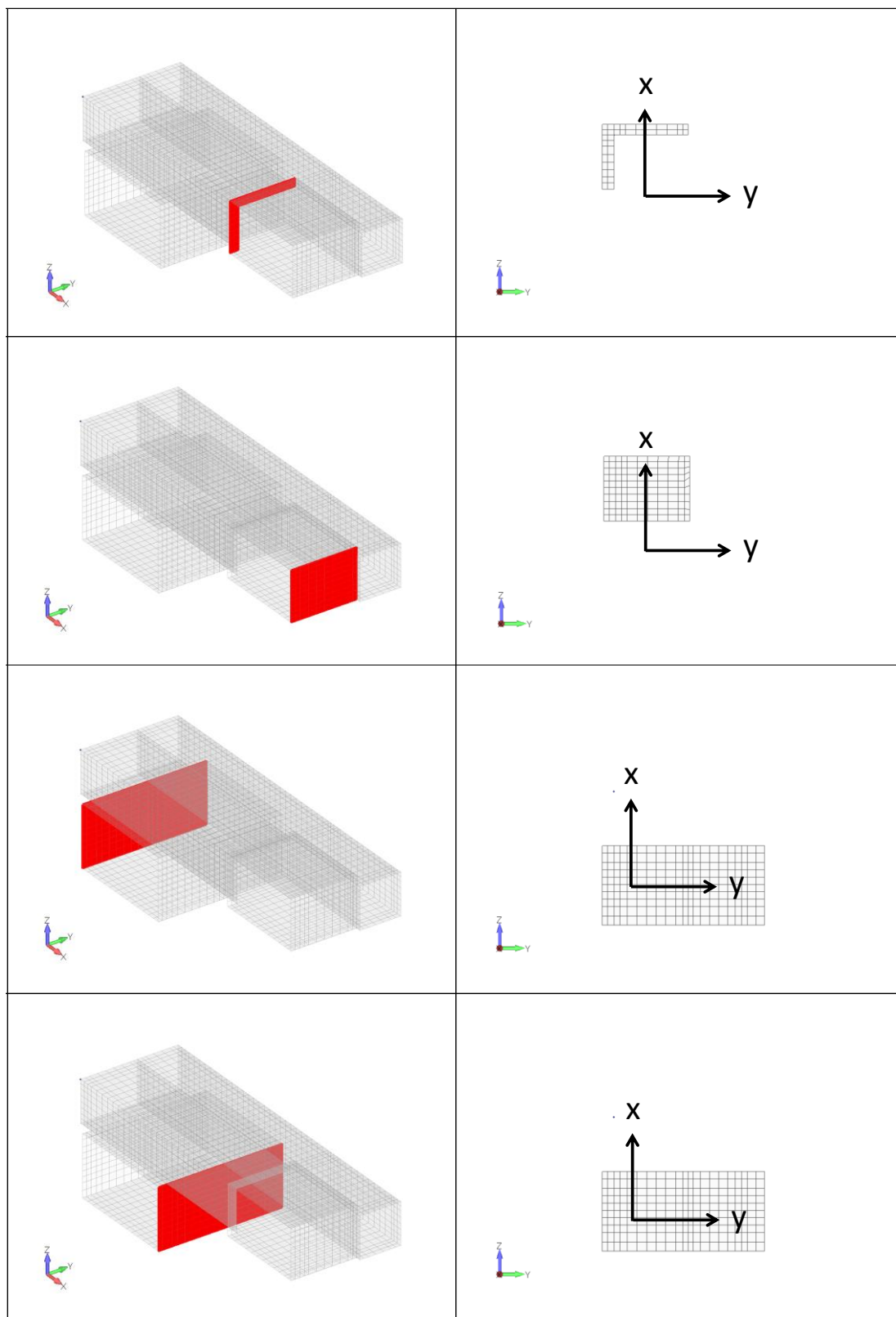


図 4-2 (2) 側壁の要素座標系

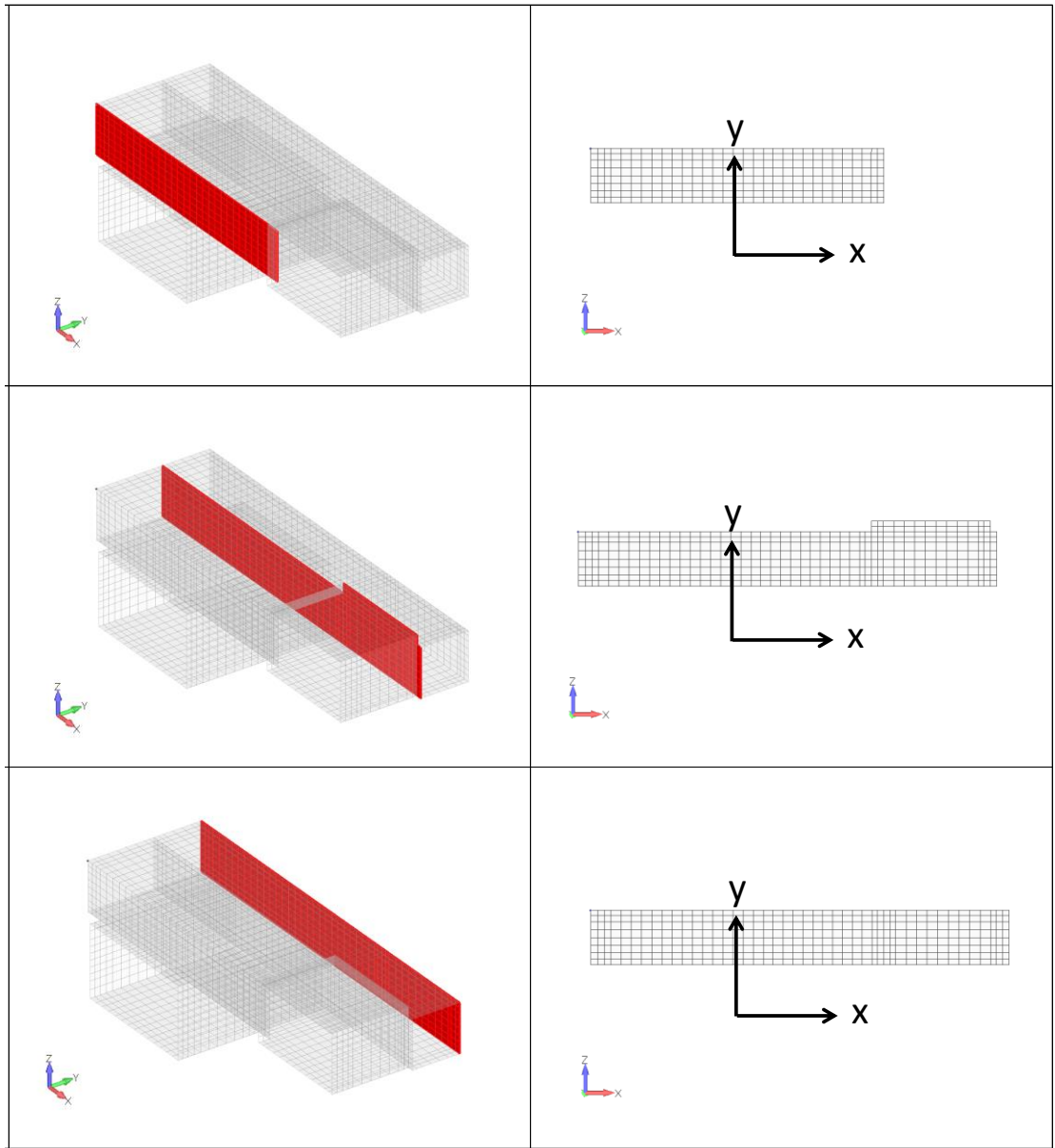
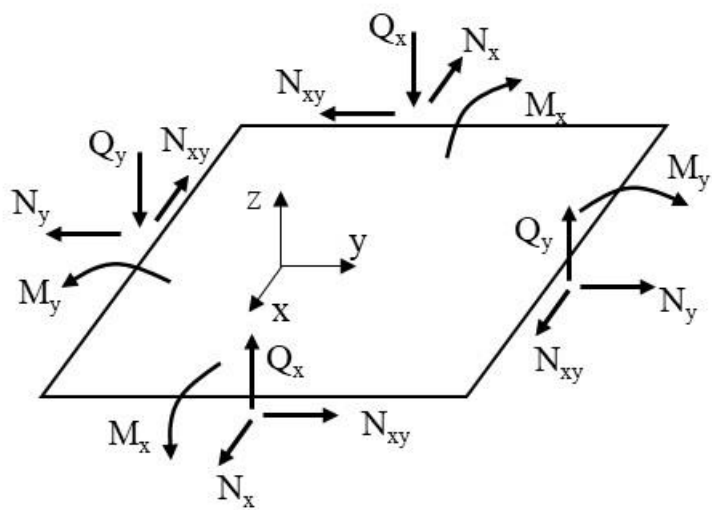


図 4-2 (3) 側壁及び隔壁の要素座標系



M_x, M_y : 曲げモーメント
 Q_x, Q_y : せん断力
 N_x, N_y : 軸力
 N_{xy} : 面内せん断力

図 4-3 シェル要素における断面力の方向

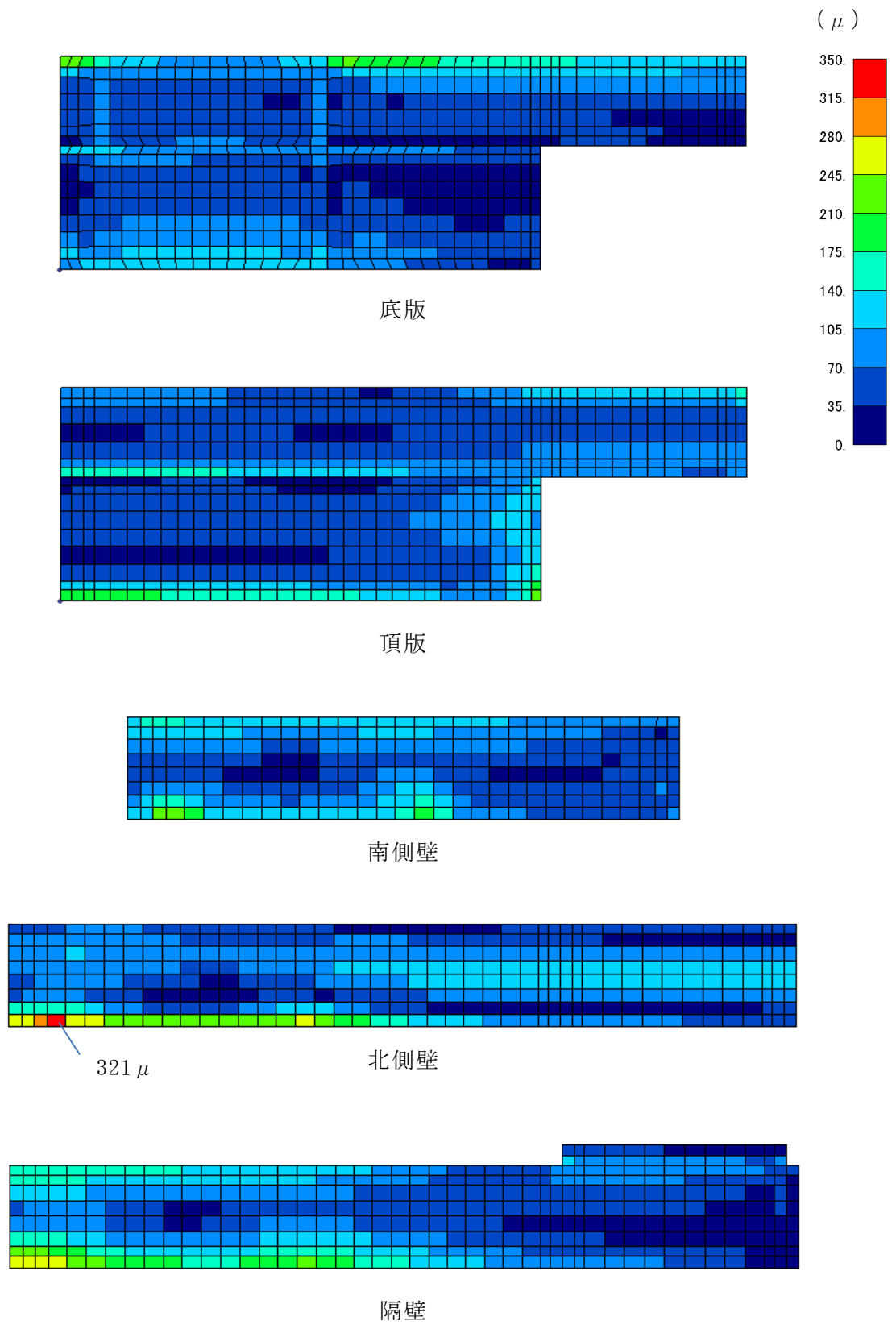


図 4-4 曲げ・軸力系の破壊に対する照査値最大時のひずみ分布図
(北側壁, 解析ケース②, $S_s - D (+ +)$)

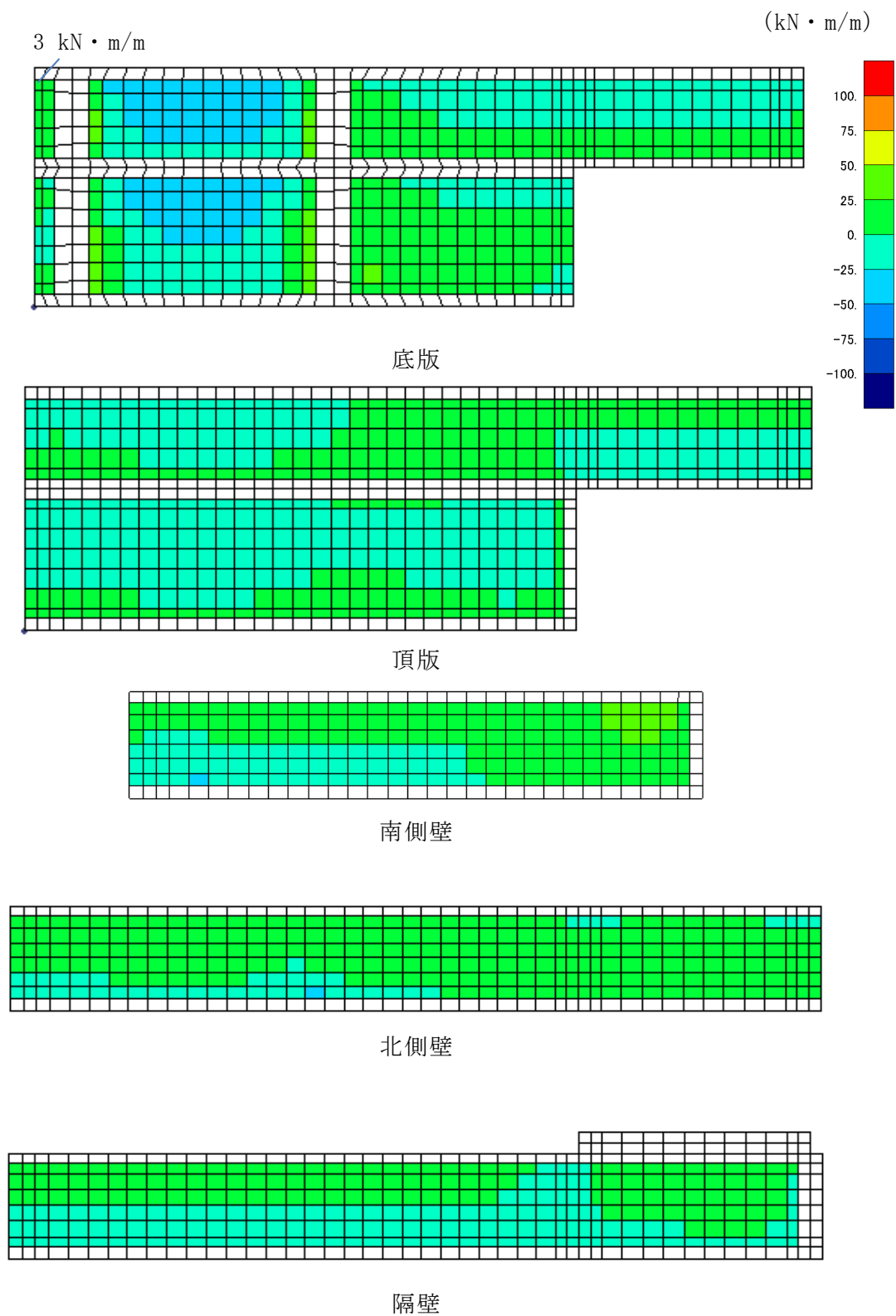


図 4-5 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図

(曲げモーメント (kN · m/m) : X方向)

(底版, 解析ケース②, S s - D (++))

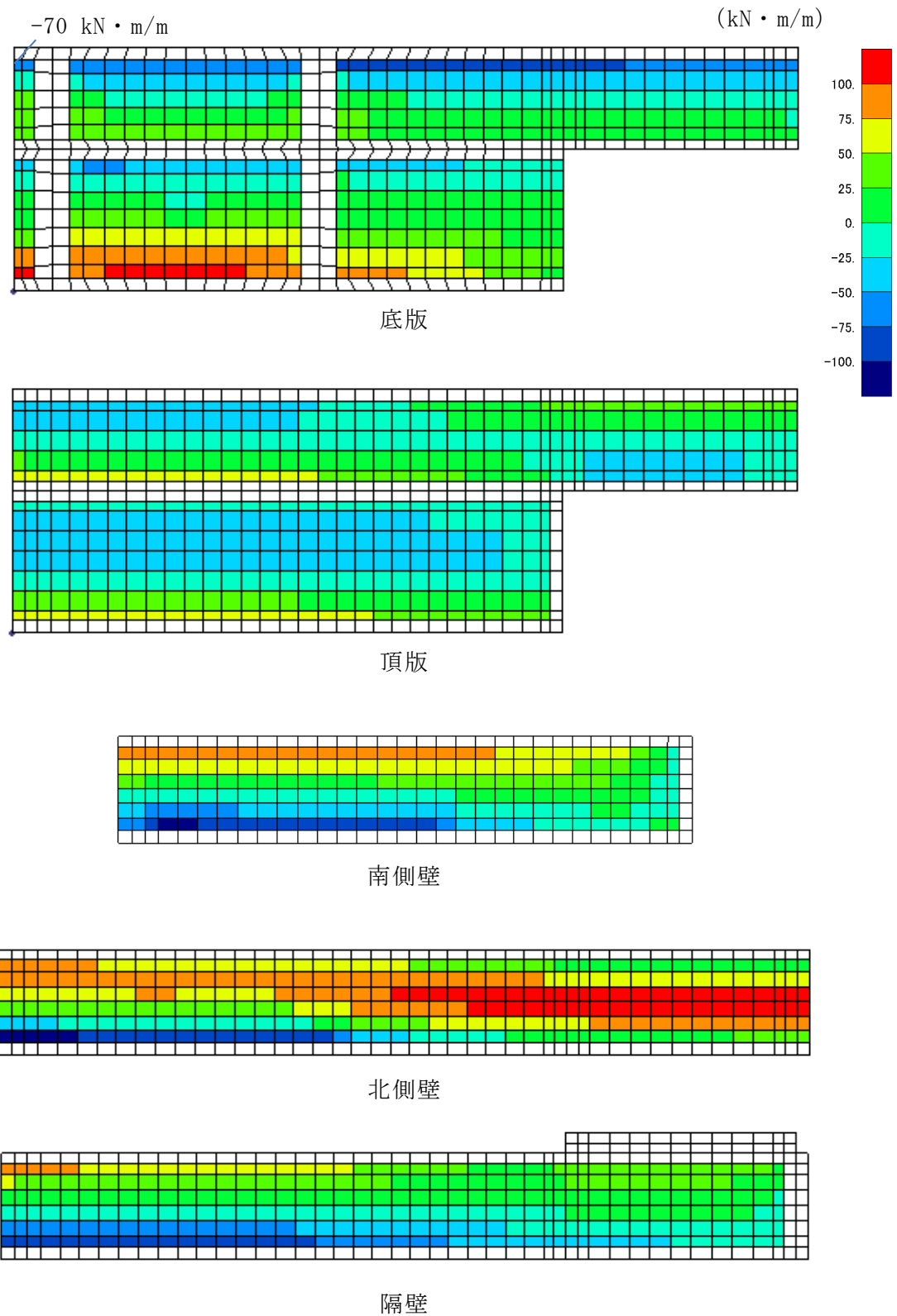


図 4-6 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図
 (曲げモーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}$) : Y方向)
 (底版, 解析ケース②, $S_s - D (+ +)$)

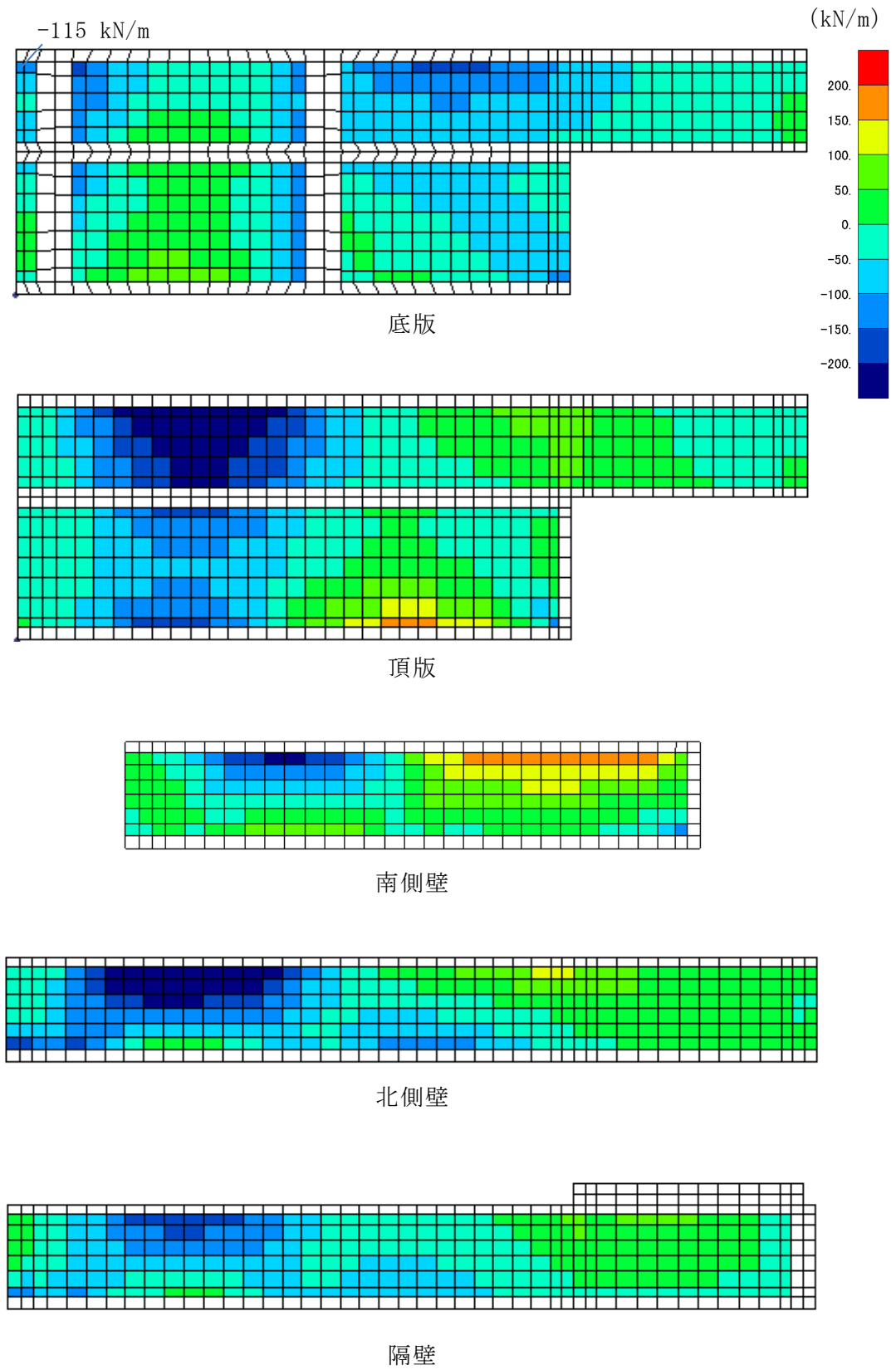


図 4-7 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図

(軸力 (kN/m) : X 方向)

(底板, 解析ケース②, $S_s - D$ (++))

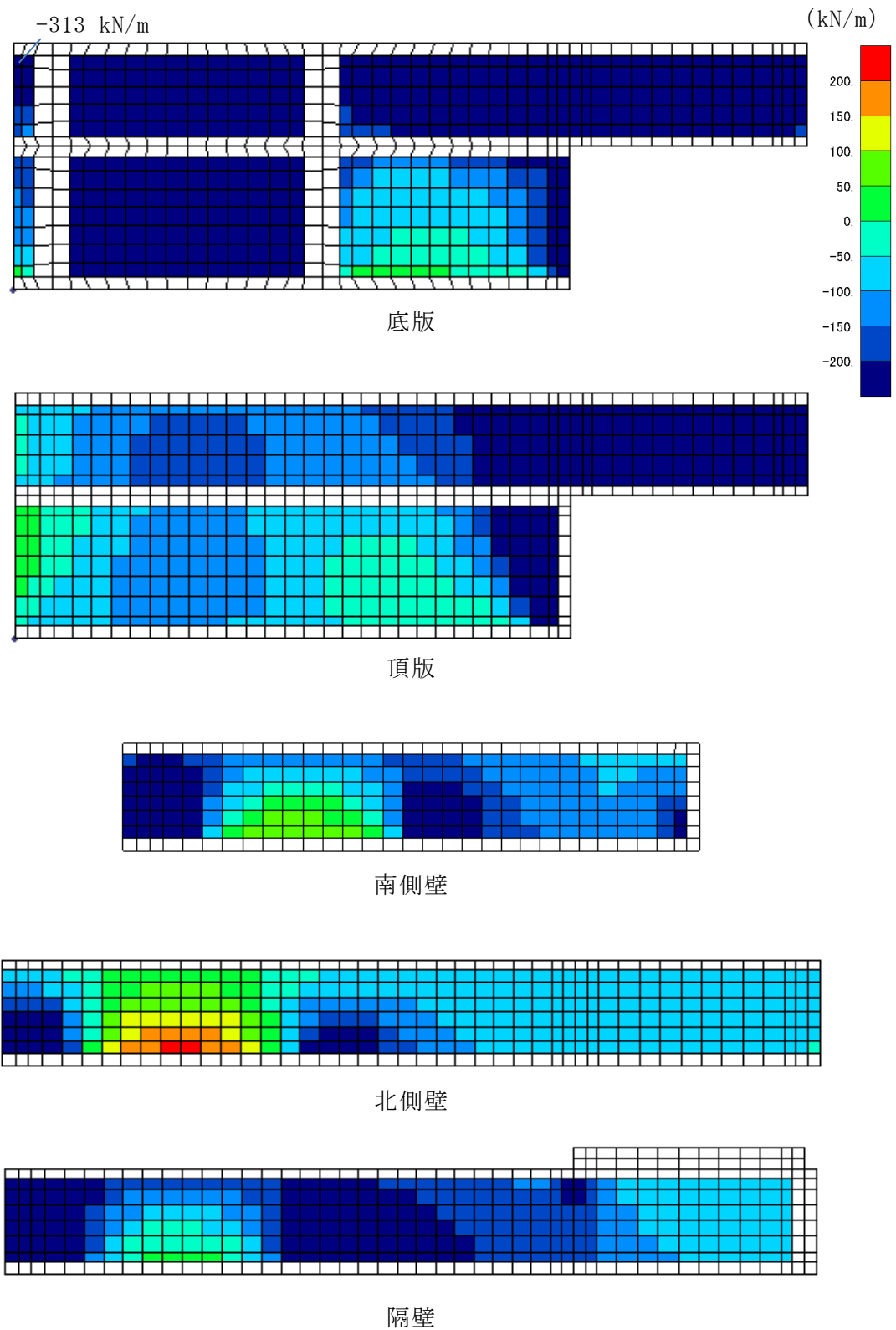


図 4-8 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図

(軸力 (kN/m) : Y 方向)

(底版, 解析ケース②, $S_s - D (+ +)$)

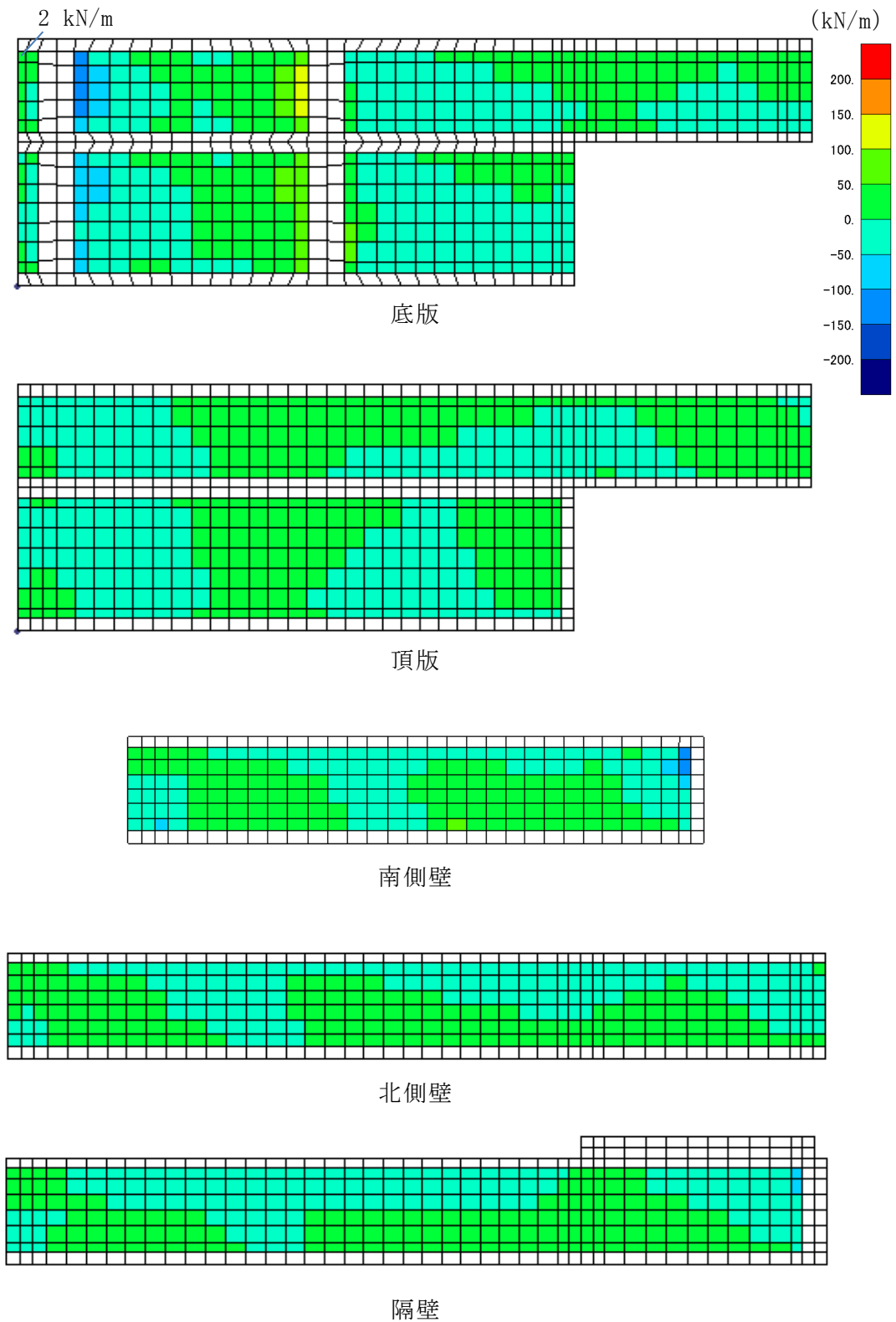


図 4-9 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図

(せん断力 (kN/m) : X 方向)

(底版, 解析ケース②, $S_s - D (+ +)$)

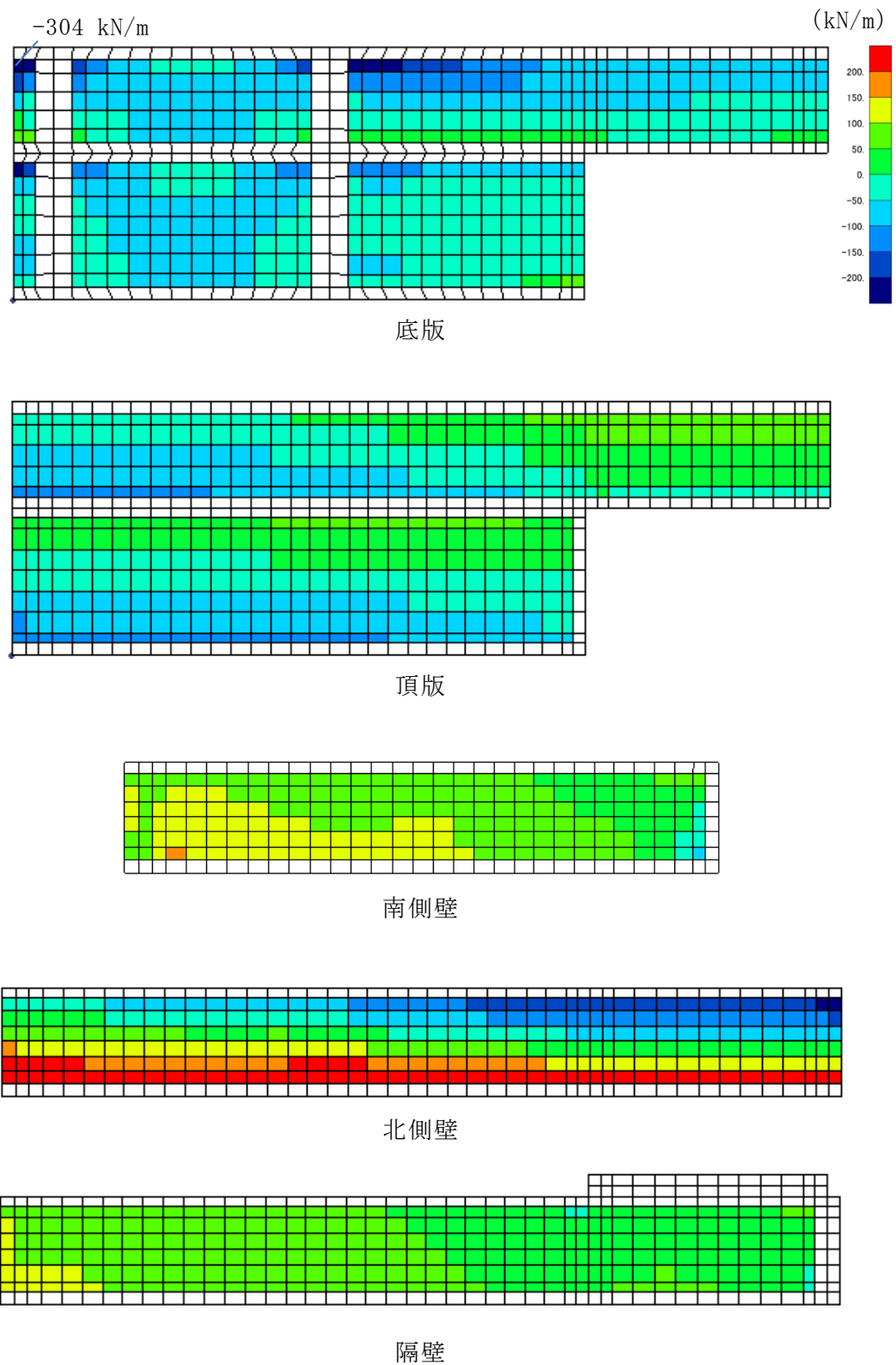


図 4-10 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力分布図

(せん断力 (kN/m) : Y方向)

(底版, 解析ケース②, $S_s - D (+ +)$)

5. 耐震評価結果

5.1 構造部材の健全性に対する評価結果

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 5-1 に、せん断破壊に対する各評価位置での最大照査値を表 5-2 に示す。

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）との一体化部の照査用ひずみ及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表 5-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値

評価位置*1		解析 ケース	地震動	照査用 ひずみ*2 ϵ_d	限界 ひずみ ϵ_R	照査値 ϵ_d / ϵ_R
頂版	9	②	S s - D (++)	299 μ	10000 μ	0.03
側壁	7	②	S s - D (++)	385 μ	10000 μ	0.04
隔壁	8	②	S s - D (++)	328 μ	10000 μ	0.04
底版	4	②	S s - D (++)	285 μ	10000 μ	0.03

注記*1：評価位置図は図 5-1 に示す。

*2：照査用ひずみ $\epsilon_d =$ 発生ひずみ $\epsilon \times$ 構造解析係数 γ_a (1.2)

表 5-2 せん断破壊に対する最大照査値

評価位置*1		解析 ケース	地震動	照査用 せん断力*2 V_d (kN/m)	せん断 耐力 $V_{y d}$ (kN/m)	照査値 $V_d / V_{y d}$
頂版	9	②	S s - D (++)	124	163	0.77
側壁	6	②	S s - D (++)	[-] *3	[-] *3	[0.34] *3
隔壁	8	②	S s - D (++)	75	106	0.71
底版	4	②	S s - D (++)	[-] *3	[-] *3	[0.56] *3

注記*1：評価位置図は図 5-1 に示す。

*2：照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 γ_a (1.05)

*3：線形被害則による照査結果であり，詳細については別紙 2 に示す。

【頂版，底版】

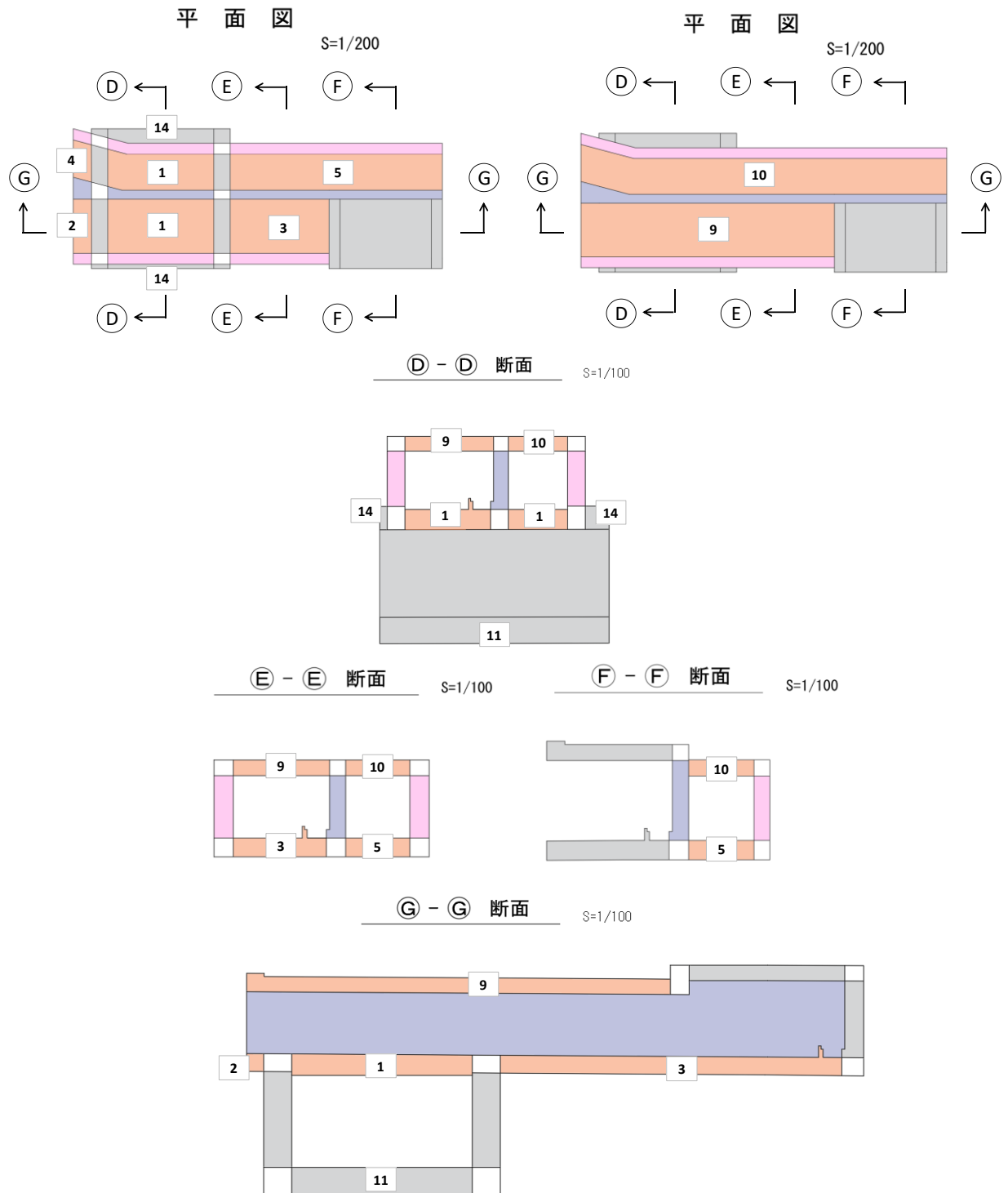


図 5-1 (1) 評価位置図 (頂版，底版)

(曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊)

【側壁，隔壁】

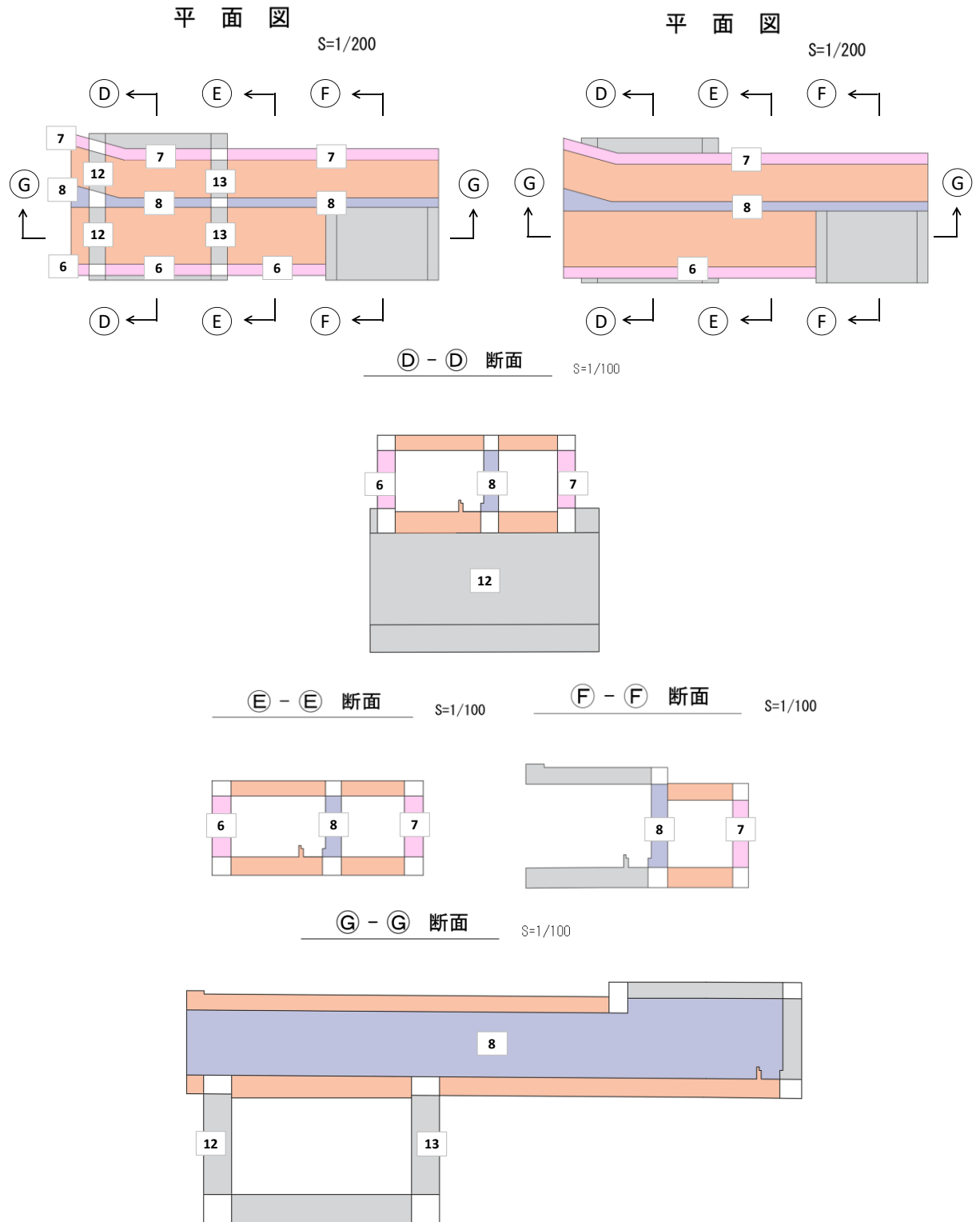


図 5-1 (2) 評価位置図 (側壁，隔壁)
 (曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊)

別紙2 せん断破壊に対する照査への線形被害則適用について

1. はじめに

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）のせん断破壊に対する照査については，照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認することとしている。せん断照査の結果，照査用せん断力がせん断耐力を超える部材については，線形被害則を適用し，再照査を実施したことから，線形被害則適用による照査結果について示す。

2. 線形被害則による照査結果

線形被害則による再照査を実施した側壁のせん断力分布図を図 2-1 に，せん断耐力照査結果及び断面力分布を図 2-2 に示す。

また，線形被害則による再照査を実施した各部材について，線形被害則による照査結果を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

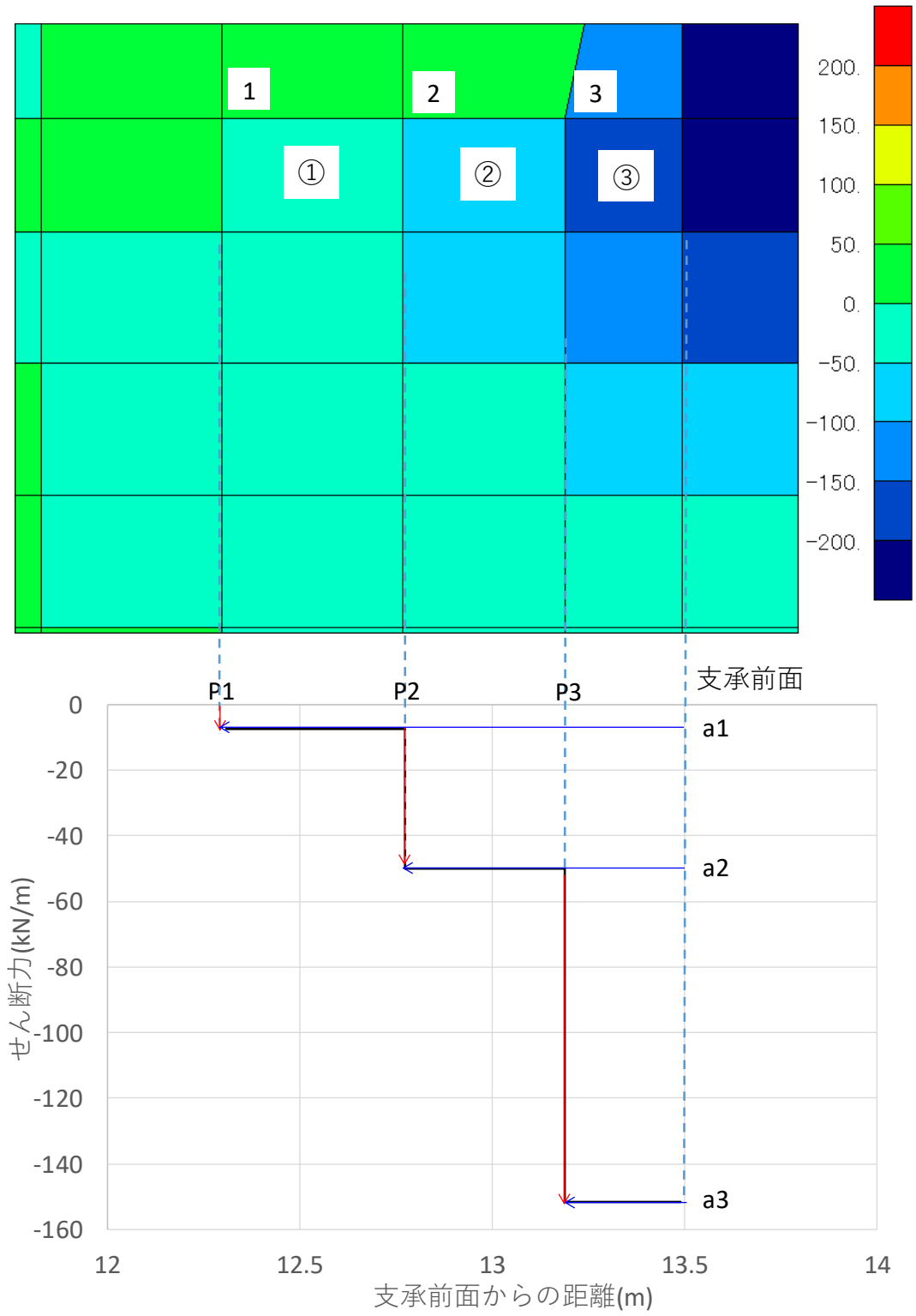


図 2-1 せん断力分布図 (側壁)

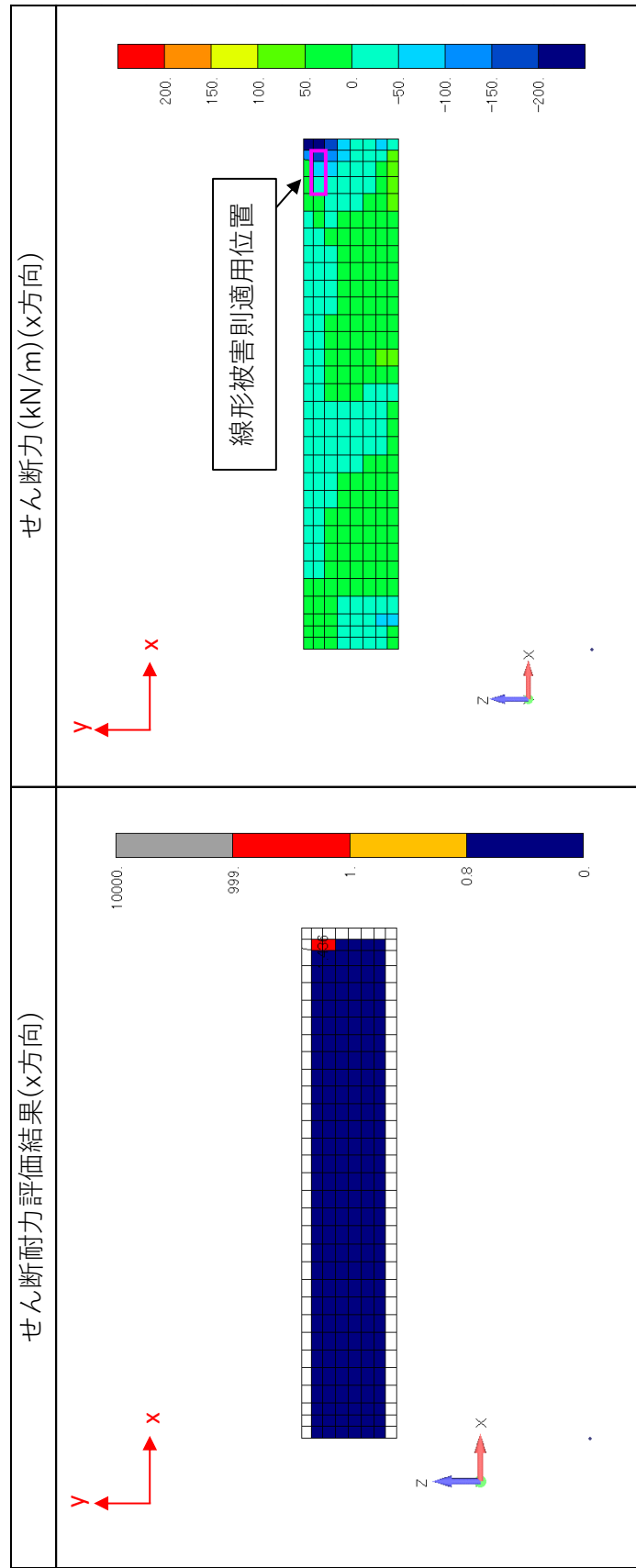


図 2-2 せん断耐力照査結果及び断面力分布図 (側壁)

表 2-1 線形被害則による照査結果（側壁）

要素 番号	節点 番号	照査用 荷重 P_j (kN)	せん断 スパン比 a/d	せん断耐力 V_{yd} (kN)		せん断照査	
				棒部材式	ディープビーム 式	V_{yd} (kN) *	P_j/V_j
2375	363	107	0.6091	339	731	731	0.15
2371	359	45	1.4535	190	322	322	0.14
2368	355	8	2.3993	148	148	148	0.05
$\gamma_i \Sigma P_j/V_j$							0.34

注記* : $a/d \leq 2$ の場合はディープビーム式, $a/d \geq 3.5$ の場合は棒部材式によるせん断耐力を採用し, $2 < a/d < 3.5$ の場合は棒部材式とディープビーム式のうちせん断耐力が大きい値を採用する。

表 2-2 線形被害則による照査結果（底版）

要素 番号	節点 番号	照査用 荷重 P_j (kN)	せん断 スパン比 a/d	せん断耐力 V_{yd} (kN)		せん断照査	
				棒部材式	ディープビーム 式	V_{yd} (kN) *	P_j/V_j
1806	2642	154	0.5825	712	1128	1128	0.14
1775	2517	104	1.4887	382	470	469	0.22
1743	2390	60	2.3948	301	301	301	0.20
$\gamma_i \Sigma P_j/V_j$							0.56

注記* : $a/d \leq 2$ の場合はディープビーム式, $a/d \geq 3.5$ の場合は棒部材式によるせん断耐力を採用し, $2 < a/d < 3.5$ の場合は棒部材式とディープビーム式のうちせん断耐力が大きい値を採用する。