

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-004-05改03
提出年月日	2023年4月7日

VI-2-4-2-4 燃料プール水位・温度（SA）の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-4-2-4 R0

2023年4月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	4
2.3 適用規格・基準等	5
2.4 記号の説明	6
2.5 計算精度と数値の丸め方	8
3. 評価部位	9
4. 固有周期	9
4.1 固有値解析方法	9
4.2 解析モデル及び諸元	10
4.3 固有値解析結果	12
5. 構造強度評価	23
5.1 構造強度評価方法	23
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	23
5.3 設計用地震力	27
5.4 計算方法	29
5.5 計算条件	37
5.6 応力の評価	37
6. 機能維持評価	40
6.1 電氣的機能維持評価方法	40
7. 評価結果	41
7.1 重大事故等対処設備としての評価結果	41

1. 概要

本計算書は、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、燃料プール水位・温度（S A）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有し、電氣的機能を維持できることを説明するものである。

燃料プール水位・温度（S A）は、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価及び電氣的機能維持評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

燃料プール水位・温度（S A）の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画 (1/2)

計画の概要		概略構造図	
基礎・支持構造	主体構造		
<p>検出器は、7個の熱電対で構成されており、熱電対は保護管に内蔵され、圧縮継手により架構に固定する。保護管は、保護管固定金具を介して架構に溶接にて固定する。</p> <p>架構は、基礎ボルトにより床面に設置され、水中サポートブロックを壁面のワークテーブルフックに引掛けて設置する。</p>	<p>熱電対</p>		<p>(単位：mm)</p>

表 2-1 構造計画 (2/2)

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
		<p>The diagram illustrates a vertical structure with the following components labeled from top to bottom:</p> <ul style="list-style-type: none"> 熱電対 (Thermocouple) 圧縮継手 (Compression joint) 保護管固定金具 (Protective pipe fixing bracket) 保護管 (Protective pipe) Two 架構 (角形鋼) (Structural frame, angle steel) components at the top right. One 架構 (角形鋼) (Structural frame, angle steel) component in the middle. One 架構 (水中サポートブロック) (Structural frame, underwater support block) component. One 架構 (角形鋼) (Structural frame, angle steel) component at the bottom. <p>A detailed view on the right shows:</p> <ul style="list-style-type: none"> One 架構 (水中サポートブロック) (Structural frame, underwater support block) component. ワークテーブルフック (Work table hook) attached to the side. Another 架構 (水中サポートブロック) (Structural frame, underwater support block) component at the bottom of the detail. <p>鳥瞰図 (Aerial view) is indicated at the bottom of the main diagram.</p>

2.2 評価方針

燃料プール水位・温度（S A）の応力評価は、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、「2.1 構造計画」にて示す燃料プール水位・温度（S A）の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。また、燃料プール水位・温度（S A）の機能維持評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、機能維持評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを、「6. 機能維持評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

燃料プール水位・温度（S A）の耐震評価フローを図2-1に示す。

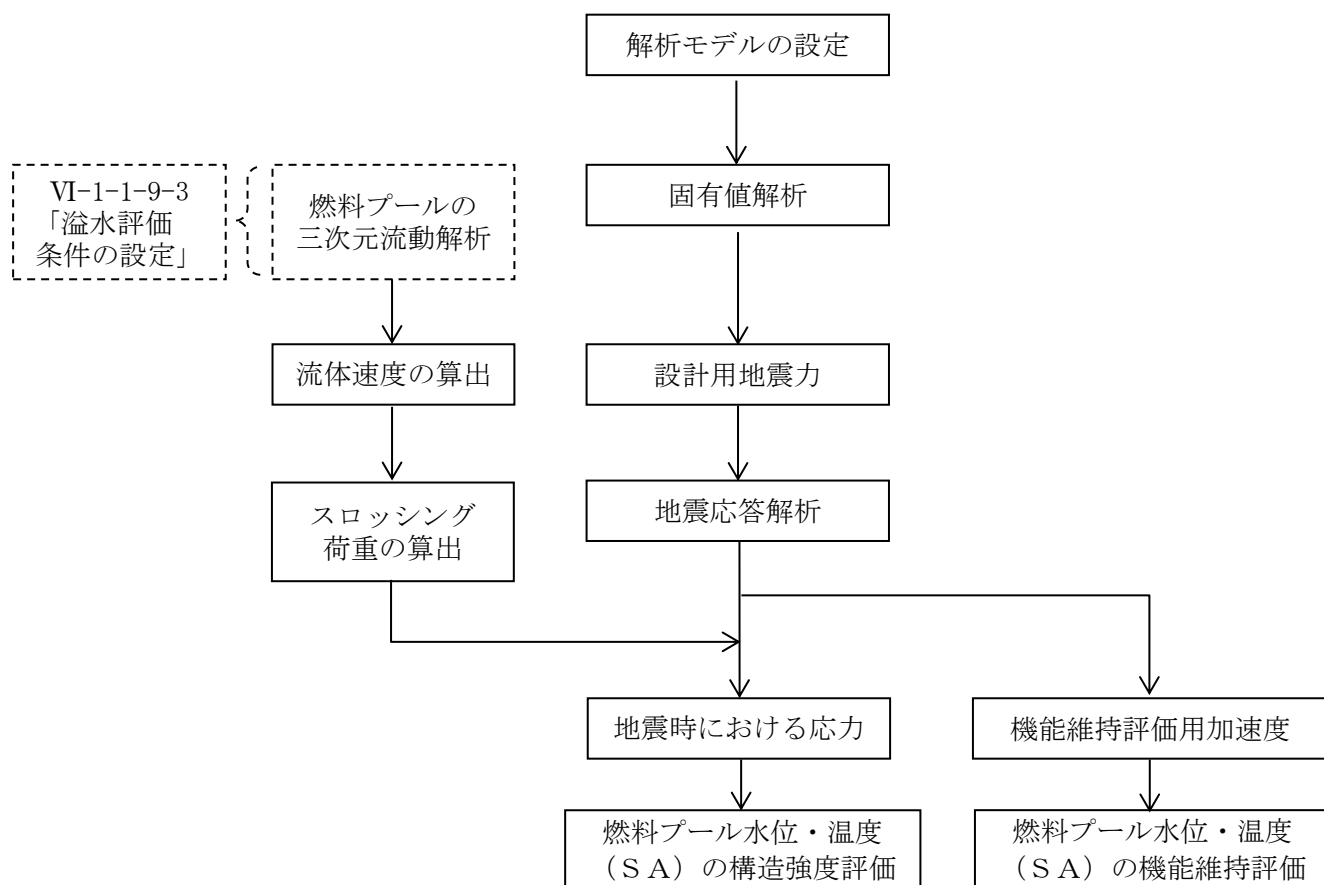


図2-1 燃料プール水位・温度（S A）の耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984
（（社）日本電気協会）
- ・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）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（（社）日本電気協会）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（（社）日本機械学会，2005/2007）（以下「設計・建設規格」という。）

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_m	架構の断面積	mm^2
A_b	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_h	ワークテーブルフック付け根部の断面積	mm^2
$A_{h s i}^*$	ワークテーブルフックのせん断断面積	mm^2
A_s	スロッシングにおける架構の投影面積	mm^2
b	ワークテーブルフックの断面幅	mm
C_d	架構の抗力係数	—
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
d	基礎ボルトの呼び径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1)に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3133に定める値	MPa
F_b	基礎ボルトに作用する引張力	N
F_s	スロッシングにより架構に生じる抗力	N
F_x	ワークテーブルフック部に作用する力 (X方向)	N
F_y	ワークテーブルフック部に作用する力 (Y方向)	N
F_z	ワークテーブルフック部に作用する力 (Z方向)	N
$f_{b m}$	架構の許容曲げ応力	MPa
$f_{c m}$	架構の許容圧縮応力	MPa
$f_{s b}$	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
$f_{s m}$	架構及びワークテーブルフックの許容せん断応力	MPa
$f_{t m}$	架構及びワークテーブルフックの許容引張応力 (許容組合せ応力)	MPa
$f_{t o}$	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
$f_{t s}$	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力 (許容組合せ応力)	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
h_i^*	ワークテーブルフックの断面高さ	mm
I	架構の断面2次モーメント	mm^4
i	座屈軸についての断面2次半径	mm
ℓ_k	圧縮材の座屈長さ	mm
L	材長	mm
L_B	ワークテーブルフック付け根部の応力計算に用いる距離 (F_z に対する)	mm
L_C	ワークテーブルフック付け根部の応力計算に用いる距離 (F_y に対する)	mm

記号	記号の説明	単位
Q_b	基礎ボルトに作用するせん断力 (1本当たり)	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の 40°Cにおける値	MPa
V	スロッシングによる流体速度	m/s
W	検出器の荷重	N
Z_p	架構の断面におけるねじり断面係数	mm ³
Z_x	架構の断面における x 軸方向の断面係数	mm ³
Z_y	架構の断面における y 軸方向の断面係数	mm ³
Z_{hy}	ワークテーブルフック付け根部の断面における y 軸方向の断面 係数	mm ³
Z_{hz}	ワークテーブルフック付け根部の断面における z 軸方向の断面 係数	mm ³
π	円周率	—
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
σ_{bx}	架構に生じる x 方向の曲げ応力	MPa
σ_{by}	架構に生じる y 方向の曲げ応力	MPa
σ_{ht}	ワークテーブルフックに生じる引張応力	MPa
σ_{ha}	ワークテーブルフックに生じる組合せ応力	MPa
$\sigma_{t(c)}$	架構に生じる軸応力	MPa
τ_h	ワークテーブルフックに生じるせん断応力	MPa
τ_x	架構に生じる x 方向のせん断応力	MPa
τ_y	架構に生じる y 方向のせん断応力	MPa
τ_p	架構に生じるねじり応力	MPa
ρ	水の密度	kg/m ³
ρ_b	架構に生じる曲げ応力	MPa
ρ_m	架構に生じる組合せ応力	MPa
ρ_s	架構に生じるせん断応力	MPa
$\rho_{t(c)}$	架構に生じる引張 (圧縮) 応力	MPa
ν	ポアソン比	—
ν_c	圧縮材の座屈安全率	—
Λ	限界細長比	—
λ	圧縮材の細長比	—

注記* : A_{hs_i} 及び h_i の添字 i の意味は、以下の通りとする。

$i = 1$: ワークテーブルフック付け根部

$i = 2$: ワークテーブルフック先端部

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は、表 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
温度	°C	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	有効数字 5 桁目 ^{*3}	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2, *3}
力	N	有効数字 5 桁目 ^{*3}	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2, *3}
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*4}	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第 1 位の場合は、小数点以下第 1 位表示とする。

*2：絶対値が 1000 以上のときは、べき数表示とする。

*3：計算機プログラム固有の桁処理により算出値が有効数字 4 桁以下となる場合は、計算機プログラム保有の最大桁数表示とする。

*4：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の間における引張強さ及び降伏点は比例法により補間した値の小数点以下第 1 位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

燃料プール水位・温度（S A）の耐震評価は、「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる基礎ボルト、架構（保護管含む）及びワークテーブルフックについて実施する。なお、架構（角形鋼）及び保護管の耐震評価を実施し、架構（角形鋼）の方が厳しい結果となるため、架構（角形鋼）について評価結果を記載する。燃料プール水位・温度（S A）の耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 固有周期

4.1 固有値解析方法

燃料プール水位・温度（S A）の固有値解析方法を以下に示す。

- (1) 燃料プール水位・温度（S A）は、「4.2 解析モデル及び諸元」に示す三次元はりモデルにより固有周期を算出する。

4.2 解析モデル及び諸元

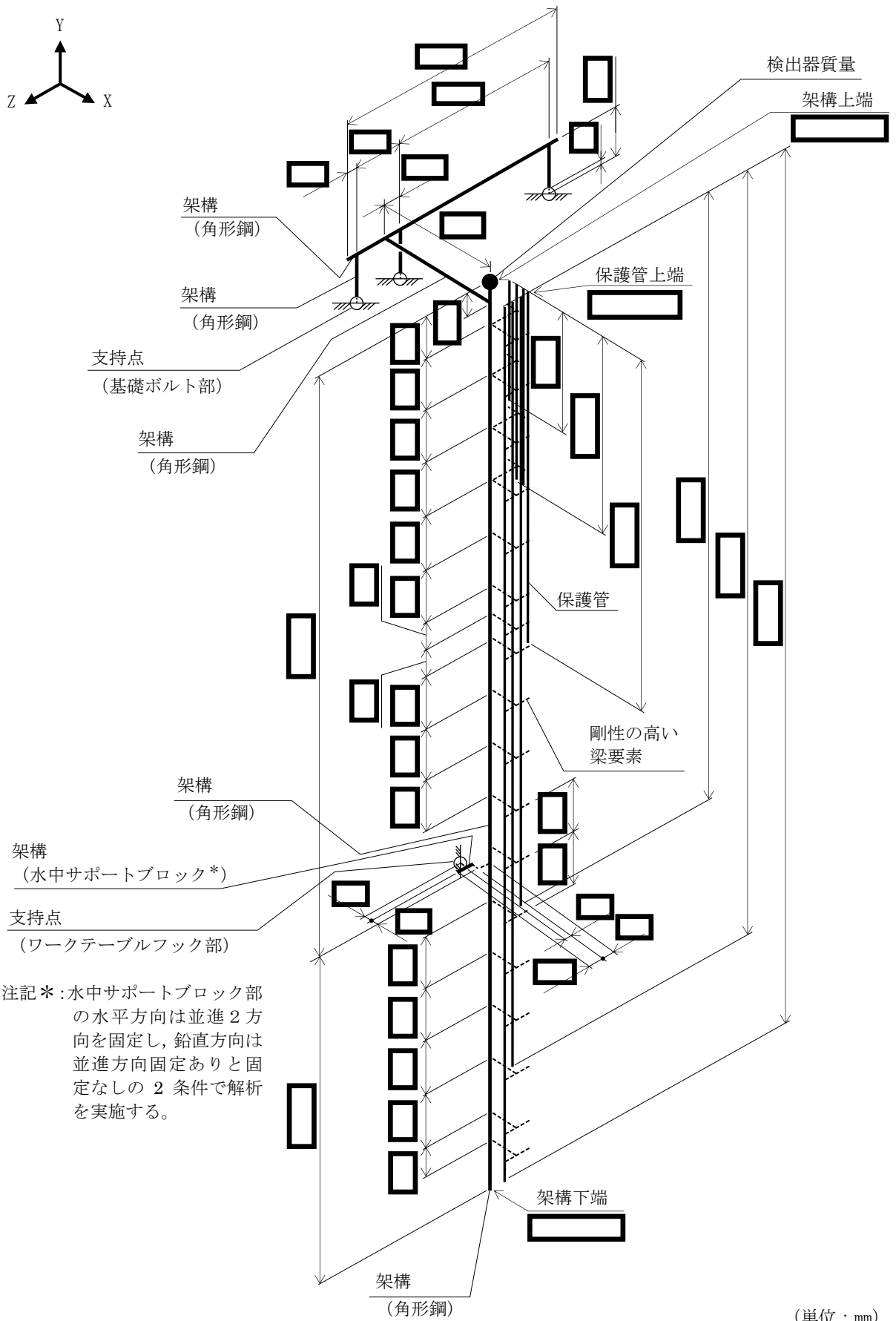
燃料プール水位・温度（S A）の解析モデルを図 4-1 に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を本計算書の【燃料プール水位・温度（S A）（L/TE216-1, 2, 3, 4, 5, 6, TE216-4）の耐震性についての計算結果】のその他の機器要目に示す。

- (1) 燃料プール水位・温度（S A）の架構（角形鋼，水中サポートブロック）及び保護管は梁モデルにてモデル化する。
- (2) 燃料プール水位・温度（S A）の架構（角形鋼）及び保護管の質量は，架構（角形鋼）及び保護管自身の質量のほか，内包水の質量及び水の付加質量^{*1}を考慮する。水の付加質量は水平方向及び鉛直方向に付加する。水平方向に付加する水の付加質量については，軸直角方向の断面形状及び寸法より算出し，を設定する。
- (3) 燃料プール水位・温度（S A）の架構（角形鋼）及び保護管の質量は梁要素に等分布に付加し，内包水の質量及び水の付加質量^{*1}による荷重は，特定長さに区切った区間分の荷重を集中荷重として架構（角形鋼）及び保護管に設定する。
- (4) 燃料プール水位・温度（S A）の検出器の荷重は，架構の検出器固定部に設定する。
- (5) 燃料プール水位・温度（S A）の検出器は，架構の検出器固定部の他，外部サポートにも支持する構造であるが，検出器の荷重は計算条件が厳しくなる架構の検出器固定部に作用させる。
- (6) 燃料プール水位・温度（S A）の架構（水中サポートブロック）の質量は，重心に集中荷重として設定する。
- (7) 拘束条件として，基礎部の並進 3 方向及び回転 3 方向を固定する。また，水中サポートブロック部の水平方向は並進 2 方向を固定し，鉛直方向は並進方向固定ありと固定なしの 2 条件で解析を実施する^{*2}。なお，基礎ボルト部は剛体として評価する。
- (8) 架構（角形鋼）と保護管及び架構（水中サポートブロック）と架構（角形鋼）は，剛性の高い梁要素で接続し，並進 3 方向及び回転 3 方向拘束条件にて結合する。
- (9) 耐震計算に用いる寸法は，公称値を使用する。
- (10) 解析コードは，「N S A F E」を使用し，固有値及び荷重を求める。

なお，評価に用いる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。

注記*1：付加質量とは，機器が流体中で加速度を受けた場合に質量が増加したような効果を模擬した，機器の形状により定まる仮想質量をいう。

*2：解析条件として鉛直方向の並進方向の拘束ありと拘束なしの 2 条件で評価を行うことで実機固定条件（下向き並進方向のみ固定）を模擬する。



注記*：水中サポートブロック部の水平方向は並進2方向を固定し、鉛直方向は並進方向固定ありと固定なしの2条件で解析を実施する。

図4-1 解析モデル

4.3 固有値解析結果

固有値解析の結果を表 4-1, 表 4-2, 振動モード図を図 4-2~図 4-11 に示す。固有周期は, 0.05 秒を超えており, 柔構造であることを確認した。

表 4-1 固有値解析結果 (鉛直方向の並進方向拘束あり)

モード	卓越方向	固有周期 (s)	水平方向刺激係数*		鉛直方向刺激係数*
			X 方向	Z 方向	
1 次	水平		-0.007	0.081	-0.043
2 次	水平		0.136	-0.014	0.017
3 次	水平		0.105	0.525	0.023
4 次	水平		-0.526	0.064	0.005
5 次	鉛直		-0.010	-0.084	0.131

注記* : モード質量を正規化するモードベクトルを用いる。

表 4-2 固有値解析結果 (鉛直方向の並進方向拘束なし)

モード	卓越方向	固有周期 (s)	水平方向刺激係数*		鉛直方向刺激係数*
			X 方向	Z 方向	
1 次	鉛直		-0.038	0.053	0.089
2 次	鉛直		-0.029	-0.062	0.085
3 次	水平		0.442	0.038	0.310
4 次	水平		-0.004	-0.528	0.018
5 次	鉛直		0.340	0.015	-0.512

注記* : モード質量を正規化するモードベクトルを用いる。

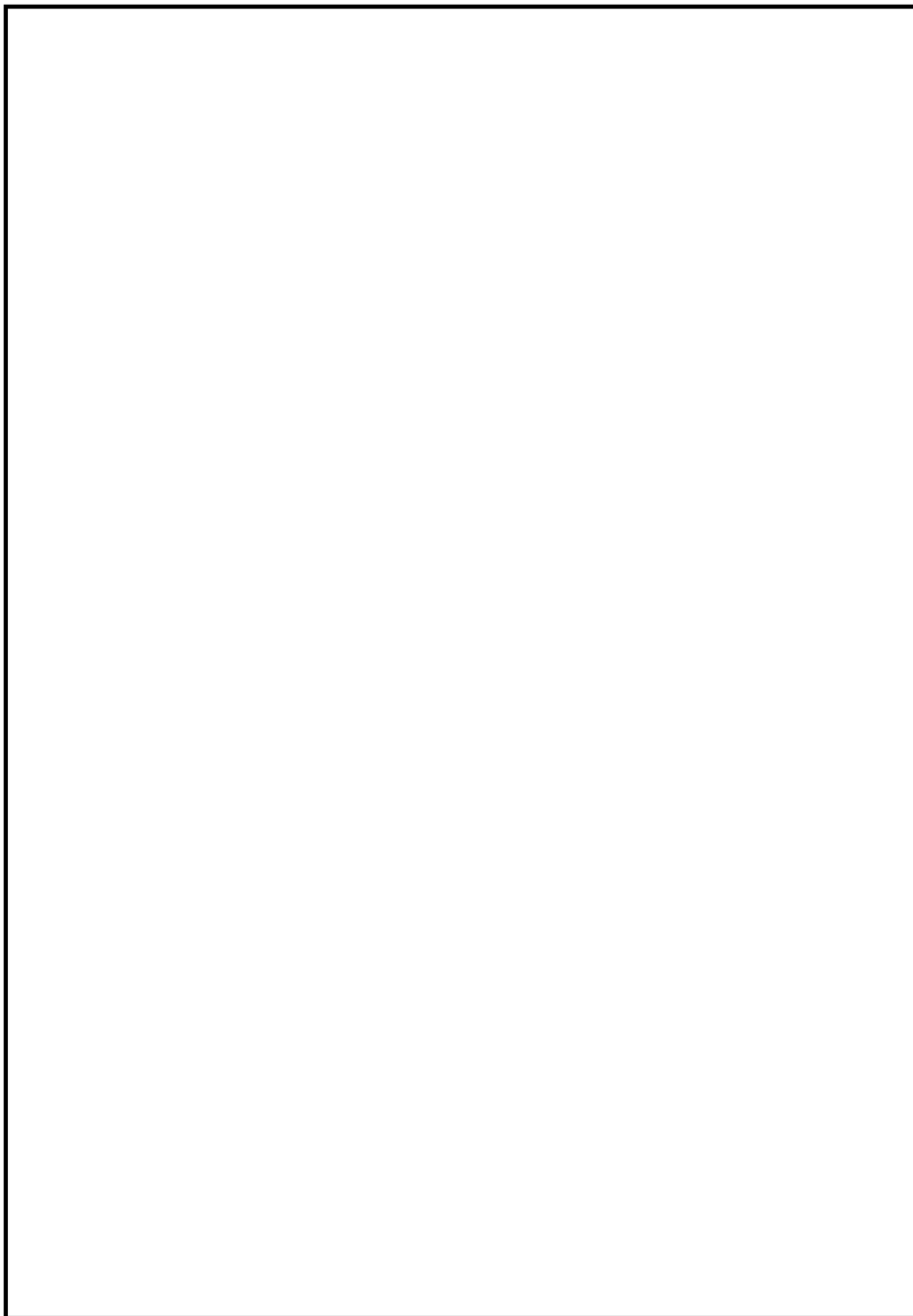


図 4-2 振動モード (1 次モード 水平方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

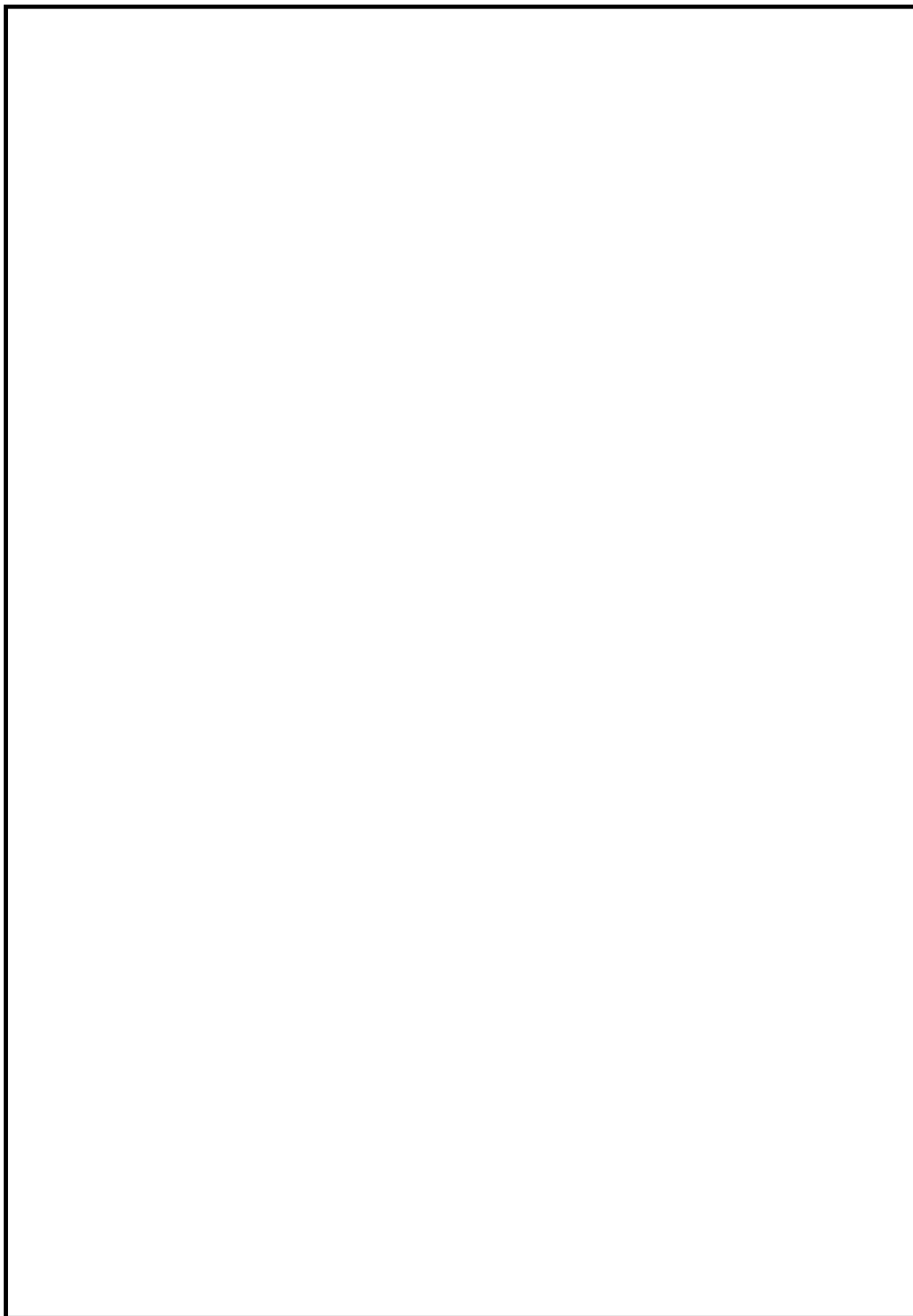


図 4-3 振動モード (2 次モード 水平方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

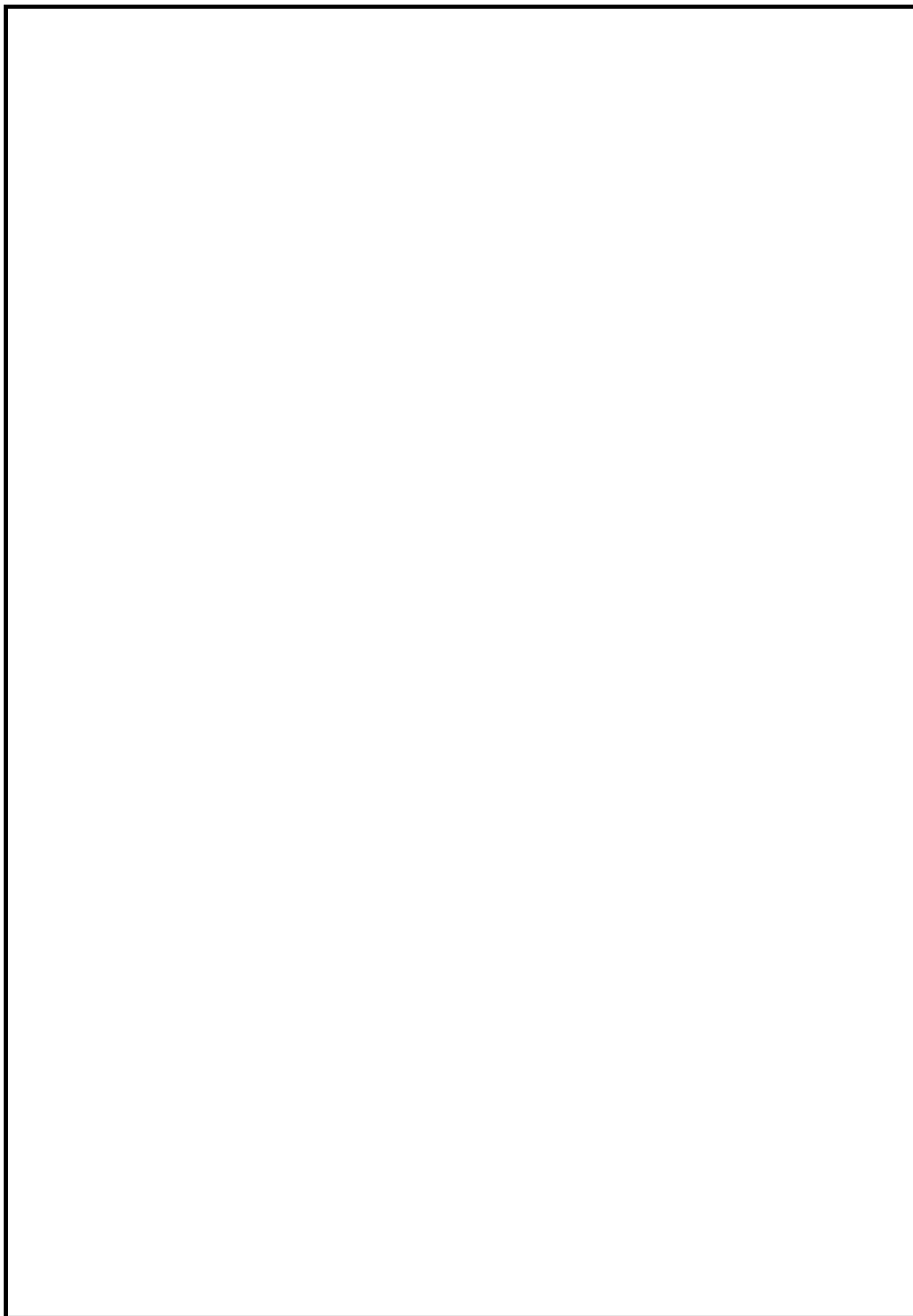


図 4-4 振動モード (3 次モード 水平方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

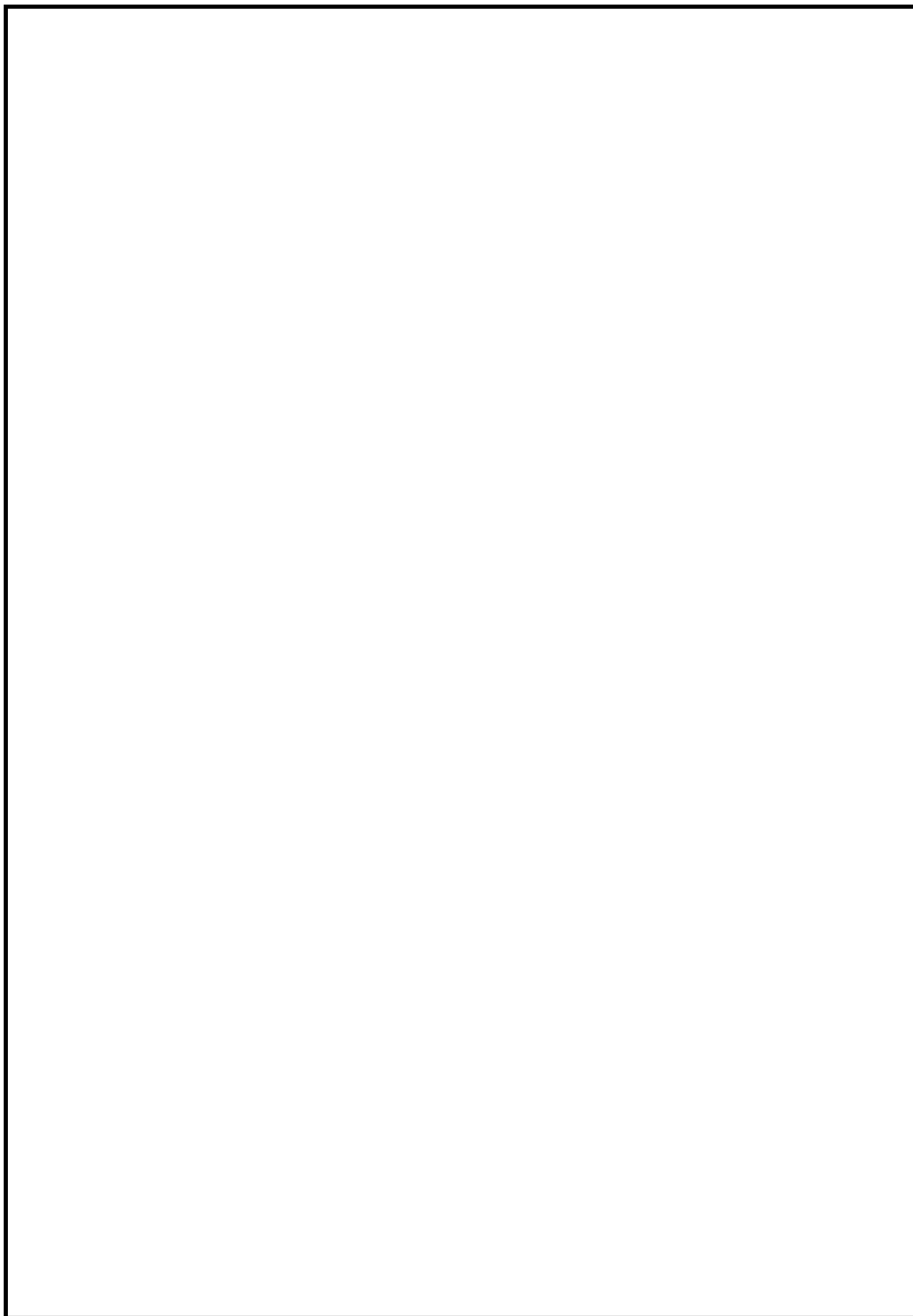


図 4-5 振動モード (4 次モード 水平方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

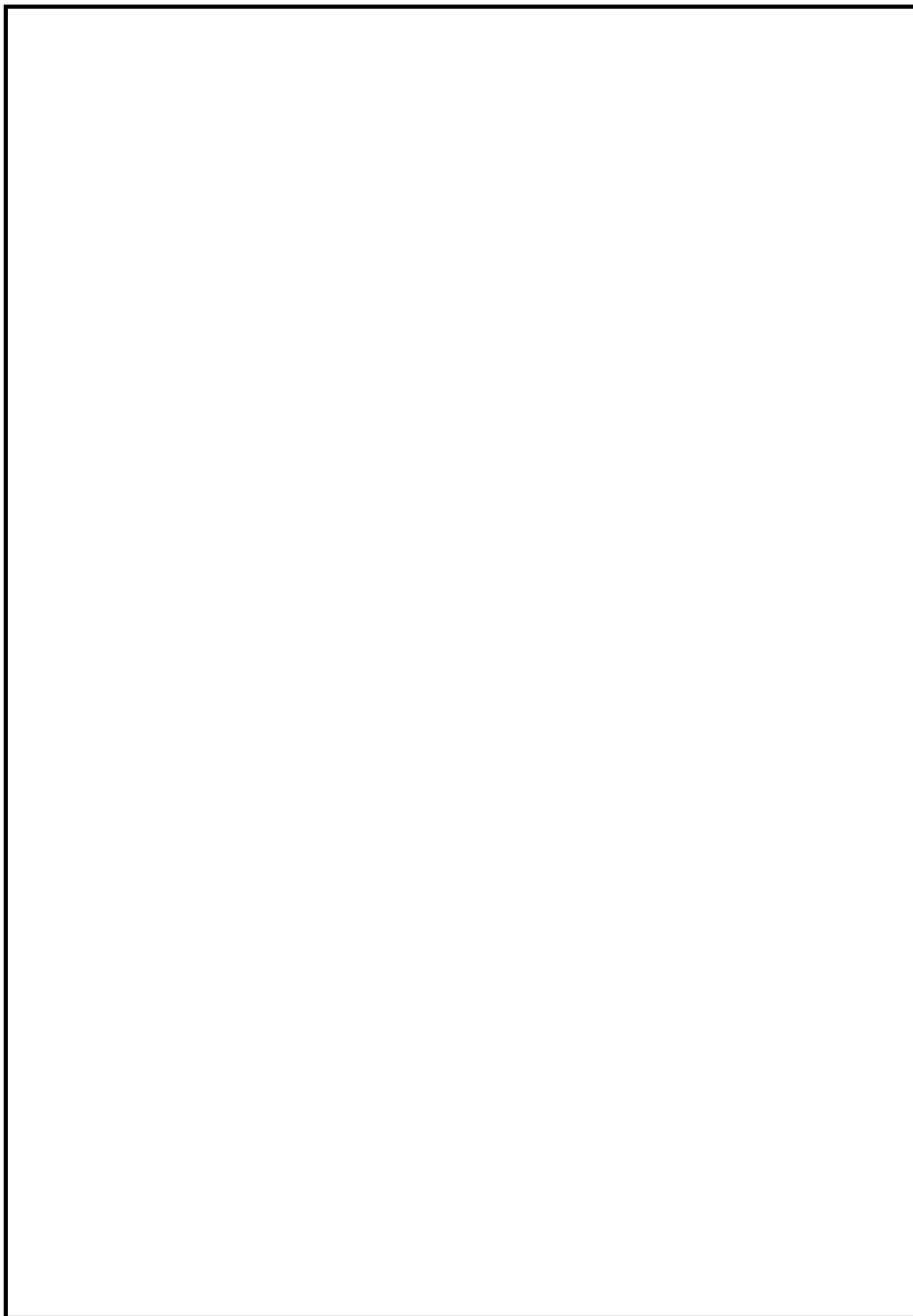


図 4-6 振動モード (5 次モード 鉛直方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

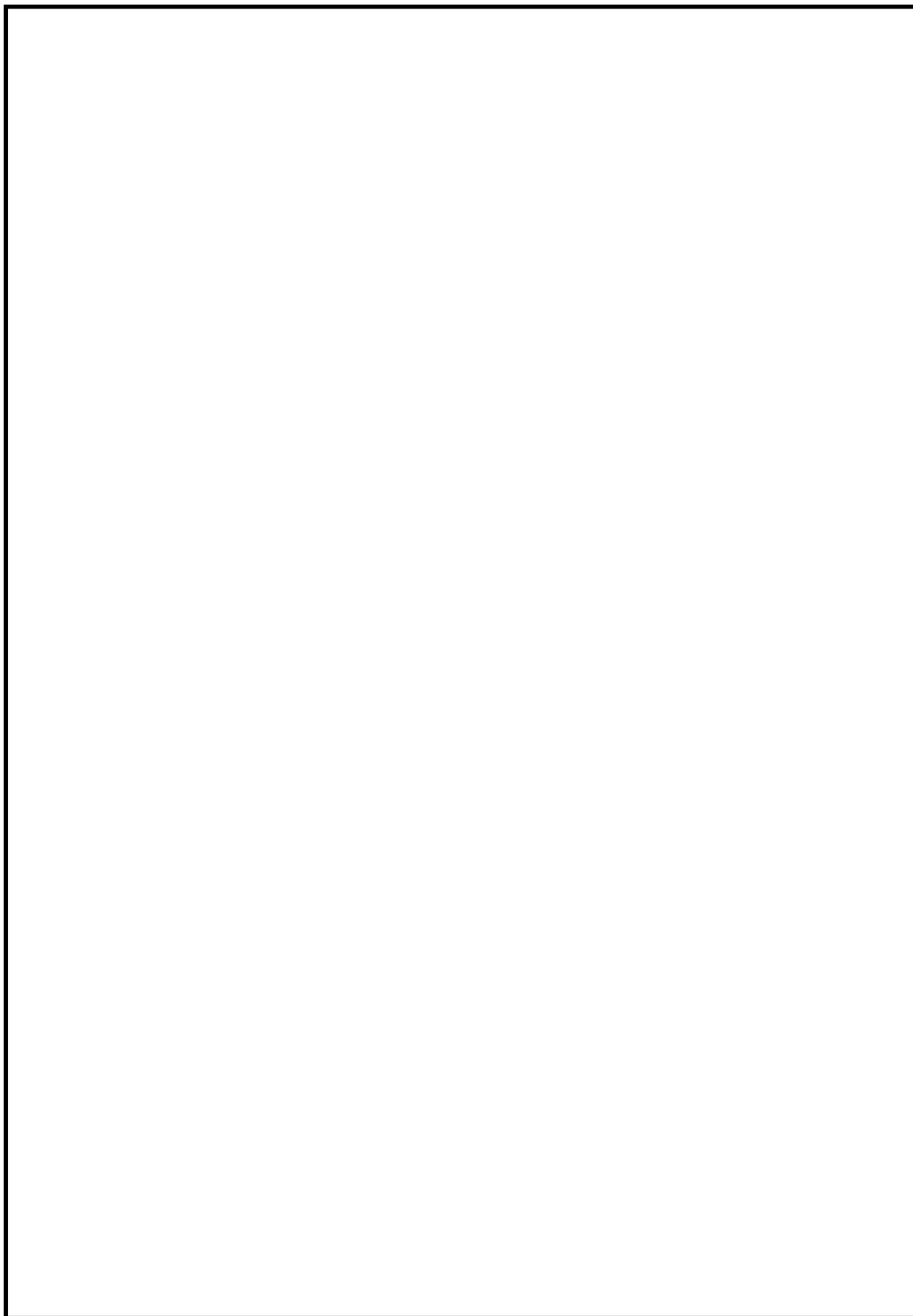


図 4-7 振動モード (1 次モード 鉛直方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束なし)

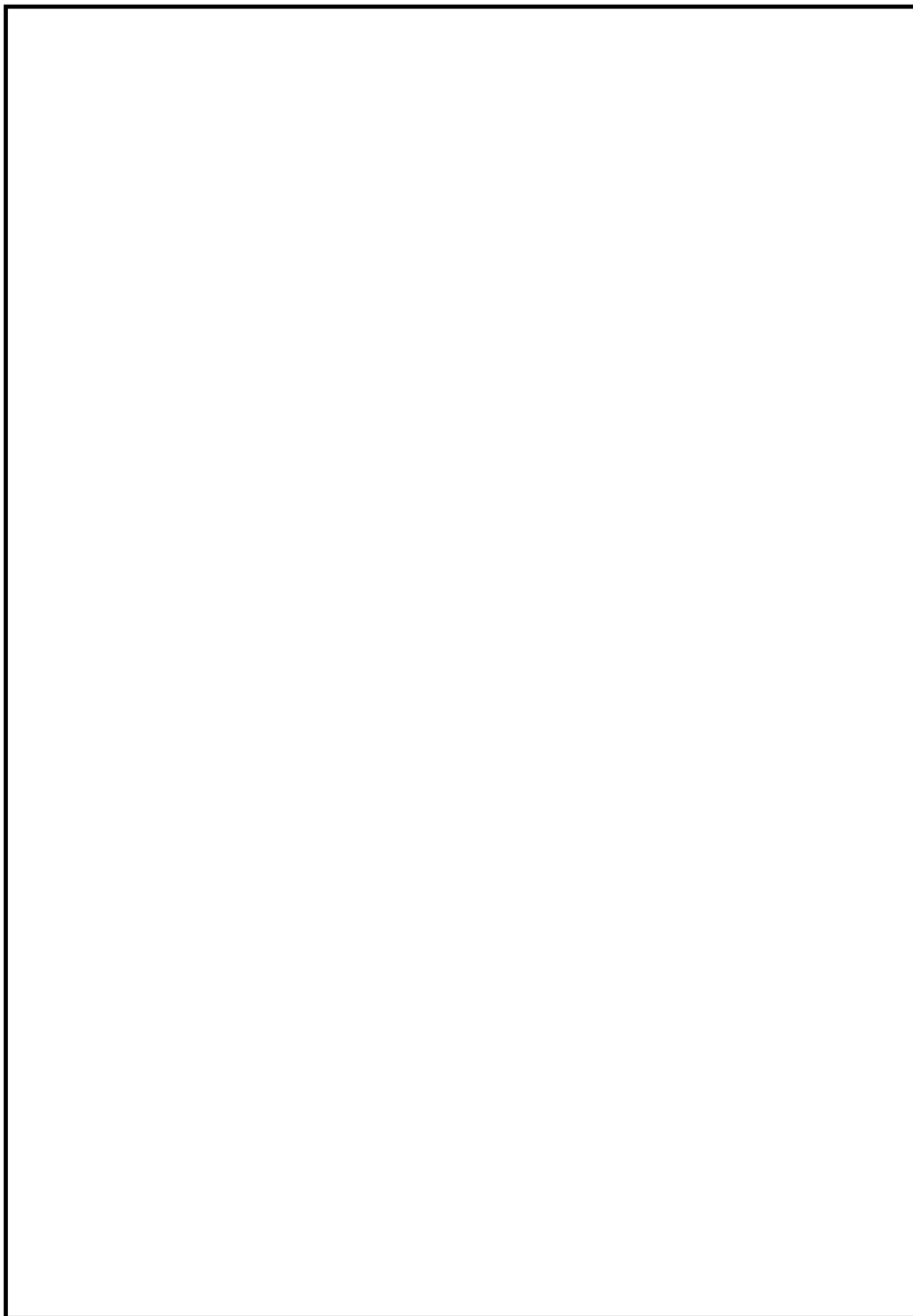


図 4-8 振動モード (2 次モード 鉛直方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束なし)

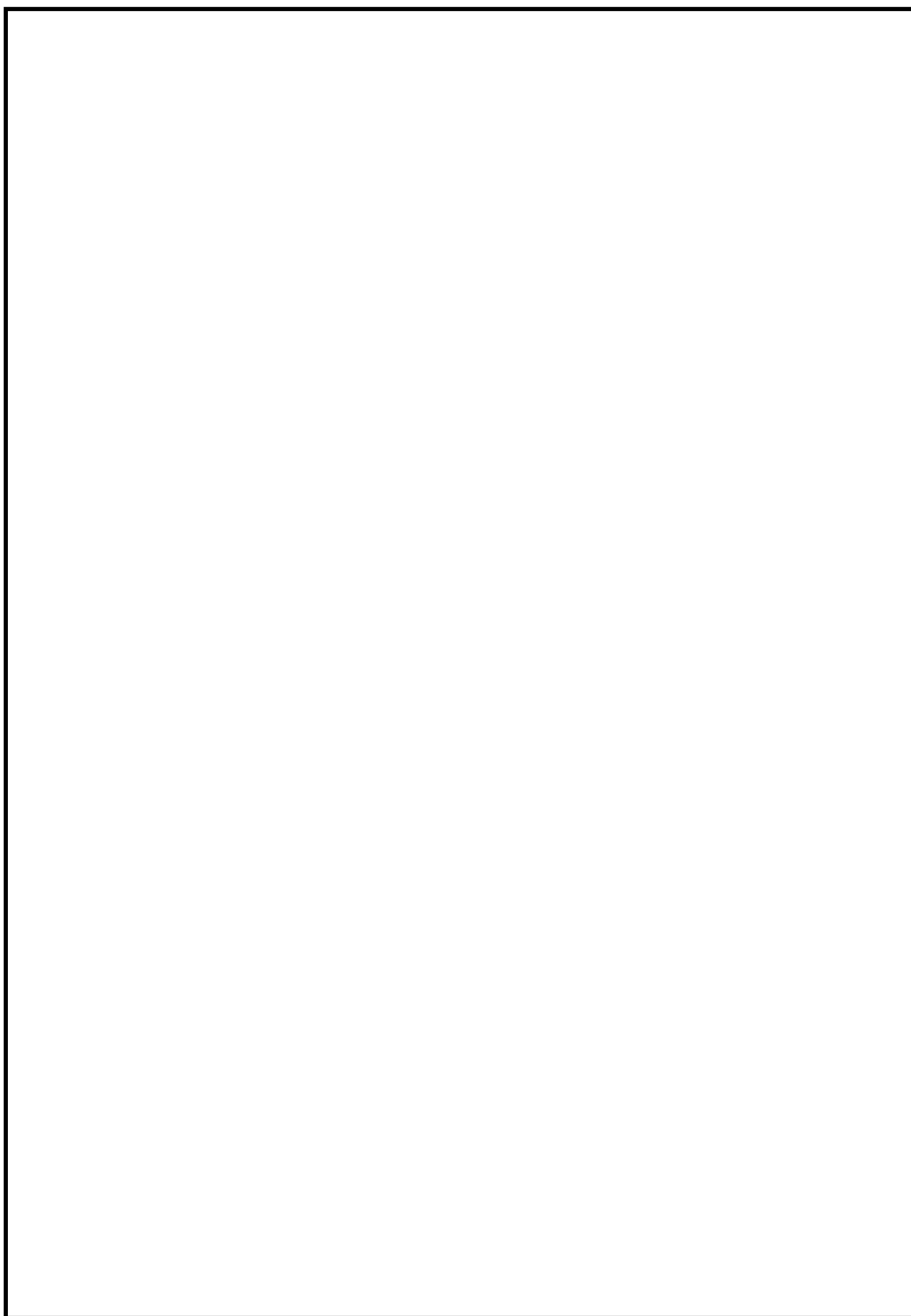


図 4-9 振動モード (3 次モード 水平方向 s) (鉛直方向の並進方向拘束なし)

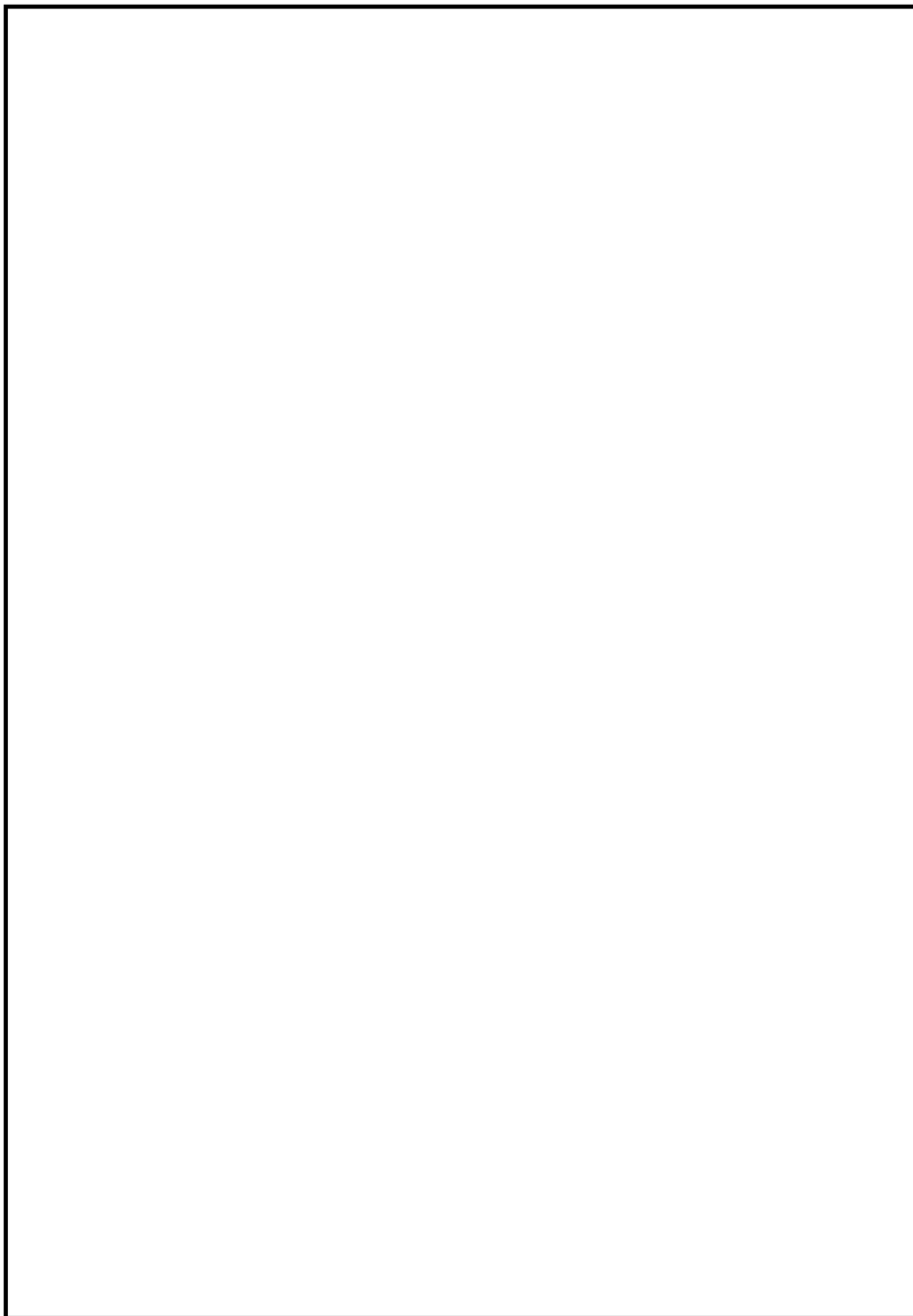


図 4-10 振動モード (4 次モード 水平方向 \square s) (鉛直方向の並進方向拘束なし)

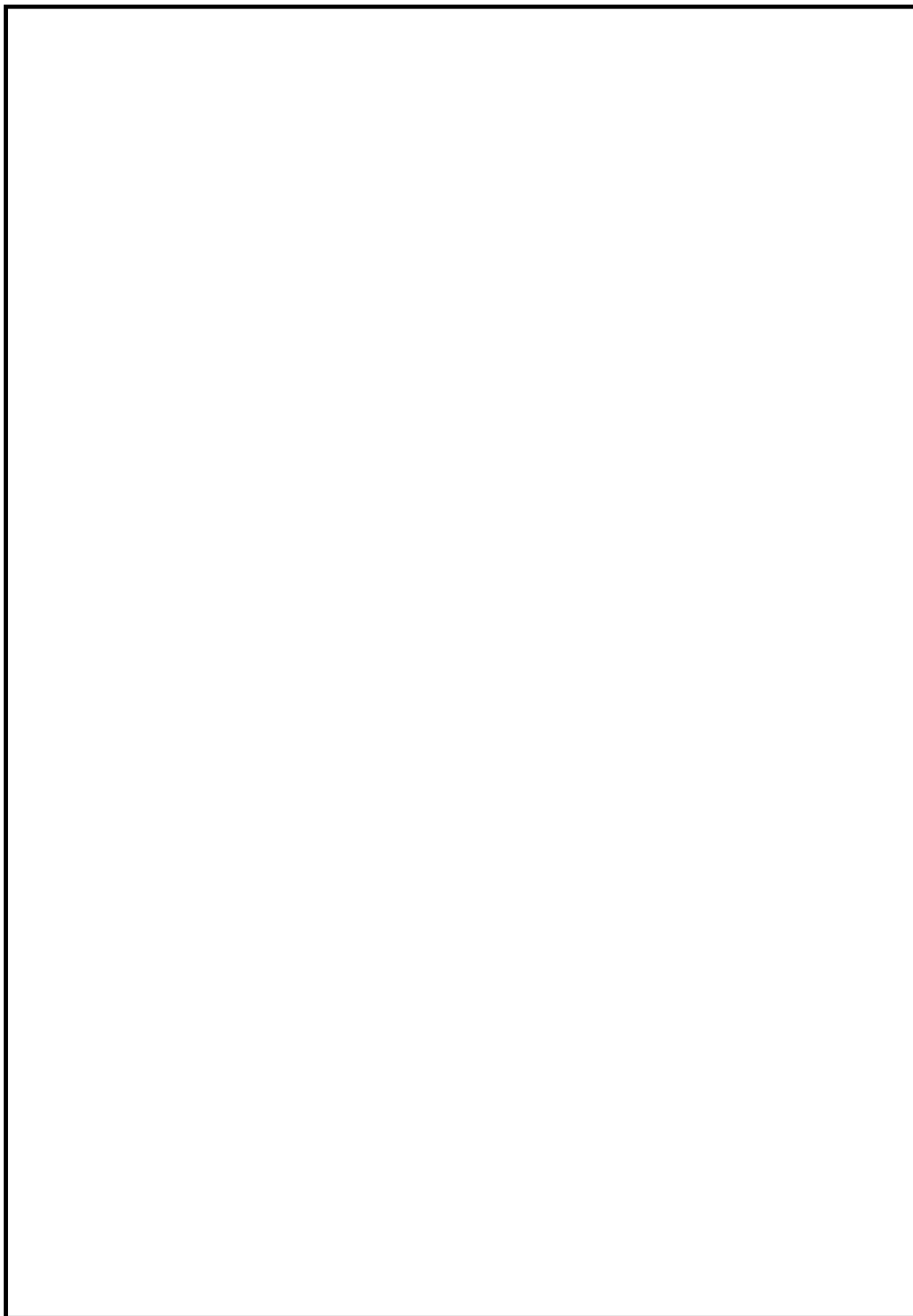


図 4-11 振動モード (5 次モード 鉛直方向 \square s) (鉛直方向の並進方向拘束なし)

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.2 項(1)～(10)のほか、次の条件で計算する。

- (1) 解析はスペクトルモーダル法にて実施し、固有値解析と同じ解析モデルを使用する。
- (2) 燃料プール水位・温度（SA）の質量は、検出器の質量、内包水の質量及び水の付加質量のほか、更に精緻に評価するため、排除水質量（水中に設置される機器が排除する水の質量）の減算を考慮する。
- (3) 地震力は、燃料プール水位・温度（SA）に対して、水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。また、水平方向及び鉛直方向の組合せには、絶対値和を適用する。
- (4) スロッシング荷重は、燃料プール水位・温度（SA）に対して、水平方向から作用させる。
- (5) スロッシング荷重は、特定長さに区切った区間分の荷重を集中荷重として設定する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

燃料プール水位・温度（SA）の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表5-1に示す。

5.2.2 許容応力

燃料プール水位・温度（SA）の許容応力は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表5-2のとおりとする。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

燃料プール水位・温度（SA）の使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表5-3に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*1	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の 取扱施設及び 貯蔵施設	使用済燃料 貯蔵設備	燃料プール水位・温度（SA）	常設／防止 常設／緩和	—*2	$D + P_D + M_D + S_s$ *3, *4	IVAS
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ *4	VAS (VASとして IVASの許容限 界を用いる。)

注記*1：「常設／防止」は常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備，「常設／緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

*4：地震荷重にはプール水のスロッシングによる荷重を含む。

表 5-2 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等以外)				許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等)	
	一次応力				一次応力	
	引張	せん断	圧縮	曲げ	引張	せん断
IVAS	1.5・f _t [*]	1.5・f _s [*]	1.5・f _c [*]	1.5・f _b [*]	1.5・f _t [*]	1.5・f _s [*]
VAS (VASとしてIVASの 許容限界を用いる。)						

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-3 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境温度				
基礎ボルト	SS400 (径≤16mm)	周囲環境温度	100	221	373	-
架構 (角形鋼, 水中サポートブロック)	SUS304TP, SUS304	周囲環境温度	100	171	441	205
ワークテーブルフック	SUS304	周囲環境温度	100	171	441	205

5.3 設計用地震力

耐震評価に用いる設計用地震力を表 5-4, 表 5-5 に示す。

「基準地震動 S s」による地震力は, VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。また, 減衰定数は VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数を用いる。

表 5-4 設計用地震力 (重大事故等対処設備) (鉛直方向の並進方向拘束あり)

据付場所及び 床面高さ (m)		原子炉建物 EL 42.8 ^{*1}					
固有周期 (s)		水平 : ^{*2} 鉛直 : 0.05 以下					
減衰定数 (%)		水平 : 1.0 鉛直 : —					
地震力		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度			基準地震動 S s		
モード ^{*3}	固有周期 (s)	応答水平震度		応答鉛直 震度	応答水平震度 ^{*4}		応答鉛直 震度 ^{*4}
		NS 方向	EW 方向		NS 方向	EW 方向	
1 次		—	—	—	27.69	27.69	—
2 次		—	—	—	13.96	13.96	—
3 次		—	—	—	15.88	15.88	—
4 次		—	—	—	21.61	21.61	—
動的震度 ^{*5, *6}		—	—	—	3.42	3.42	2.46
静的震度 ^{*7}		—	—	—	—	—	—

注記*1 : 基準床レベルを示す。

*2 : 1 次固有周期について記載

*3 : 固有周期が 0.050s 以上のモードを示す。なお, 0.020s 以上 0.050s 未満のモードに対しては, 最大応答加速度又はこれを上回る震度を適用する。

*4 : 設計用床応答スペクトル I (基準地震動 S s) を上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度

*5 : 応答水平震度は設計用震度 II (基準地震動 S s) を上回る設計震度, 応答鉛直震度は設計用震度 II (基準地震動 S s)

*6 : 最大応答加速度を 1.2 倍した震度

*7 : $3.6 \cdot C_i$ 及び $1.2 \cdot C_v$ より定めた震度

表 5-5 設計用地震力（重大事故等対処設備）（鉛直方向の並進方向拘束なし）

据付場所及び 床面高さ (m)		原子炉建物 EL 42.8 ^{*1}					
固有周期 (s)		水平 : <input type="text"/> ^{*2} 鉛直 : <input type="text"/> ^{*3}					
減衰定数 (%)		水平 : 1.0 鉛直 : 1.0					
地震力		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度			基準地震動 S _s		
モード ^{*4}	固有周期 (s)	応答水平震度		応答鉛直 震度	応答水平震度 ^{*5}		応答鉛直 震度 ^{*5}
		NS 方向	EW 方向		NS 方向	EW 方向	
1 次	<input type="text"/>	—	—	—	30.57	30.57	4.21
2 次		—	—	—	26.05	26.05	4.63
3 次		—	—	—	14.93	14.93	19.67
4 次		—	—	—	16.00	16.00	17.57
動的震度 ^{*6, *7}		—	—	—	3.42	3.42	2.46
静的震度 ^{*8}		—	—	—	—	—	—

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：3次固有周期について記載

*3：1次固有周期について記載

*4：固有周期が0.050s以上のモードを示す。なお、0.020s以上0.050s未満のモードに対しては、最大応答加速度又はこれを上回る震度を適用する。

*5：設計用床応答スペクトルⅠ（基準地震動S_s）を上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度

*6：応答水平震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動S_s）を上回る設計震度，応答鉛直震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動S_s）

*7：最大応答加速度を1.2倍した震度

*8：3.6・C_i及び1.2・C_vより定めた震度

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

- (1) 地震力及びスロッシング力に対してそれぞれ三次元はりモデルによる個別解析を実施し、地震力及びスロッシング力による応力を絶対値和することにより、図4-1に示す解析モデルに生じる応力を算出する。
- (2) スロッシングにおける応力の算出においては、VI-1-1-9-3「溢水評価条件の設定」2.3「地震起因による溢水」に示す基準地震動 S_s ($S_s - D$)による燃料プールの三次元流動解析により得られた流体速度時刻歴データを用いる。
- (3) スロッシングにより架構に生じる抗力は、燃料プールの流体速度時刻歴データから架構設置位置における高さレベルごとの水平方向の最大流体速度を用いて算出する。
- (4) 抗力の算出には以下の式を用い、抗力係数 C_d は機械工学便覧 日本機械学会編(2007)より架構が正方形形状であるため2.0とする。なお、抗力の算出においては、流体速度時刻歴データより燃料プール内の架構設置位置における高さレベルごとの流体速度の最大値 V を抽出し、以下の式を用いて抗力 F_s を算出する。流体速度時刻歴データは架構に対し支配的となる水平方向のデータを適用する。

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_s \cdot V^2$$

- (5) 高さレベルごとに算出した抗力により架構に生じる動水圧荷重を付加し、図4-1に示す解析モデルに生じる応力を算出する。

5.4.1.1 基礎ボルトの計算方法

基礎ボルトの応力は、三次元はりモデルによる地震力及びスロッシング力に対する解析から基礎ボルト1本当たりの発生力を求めて、その結果を用いて手計算にて計算する。

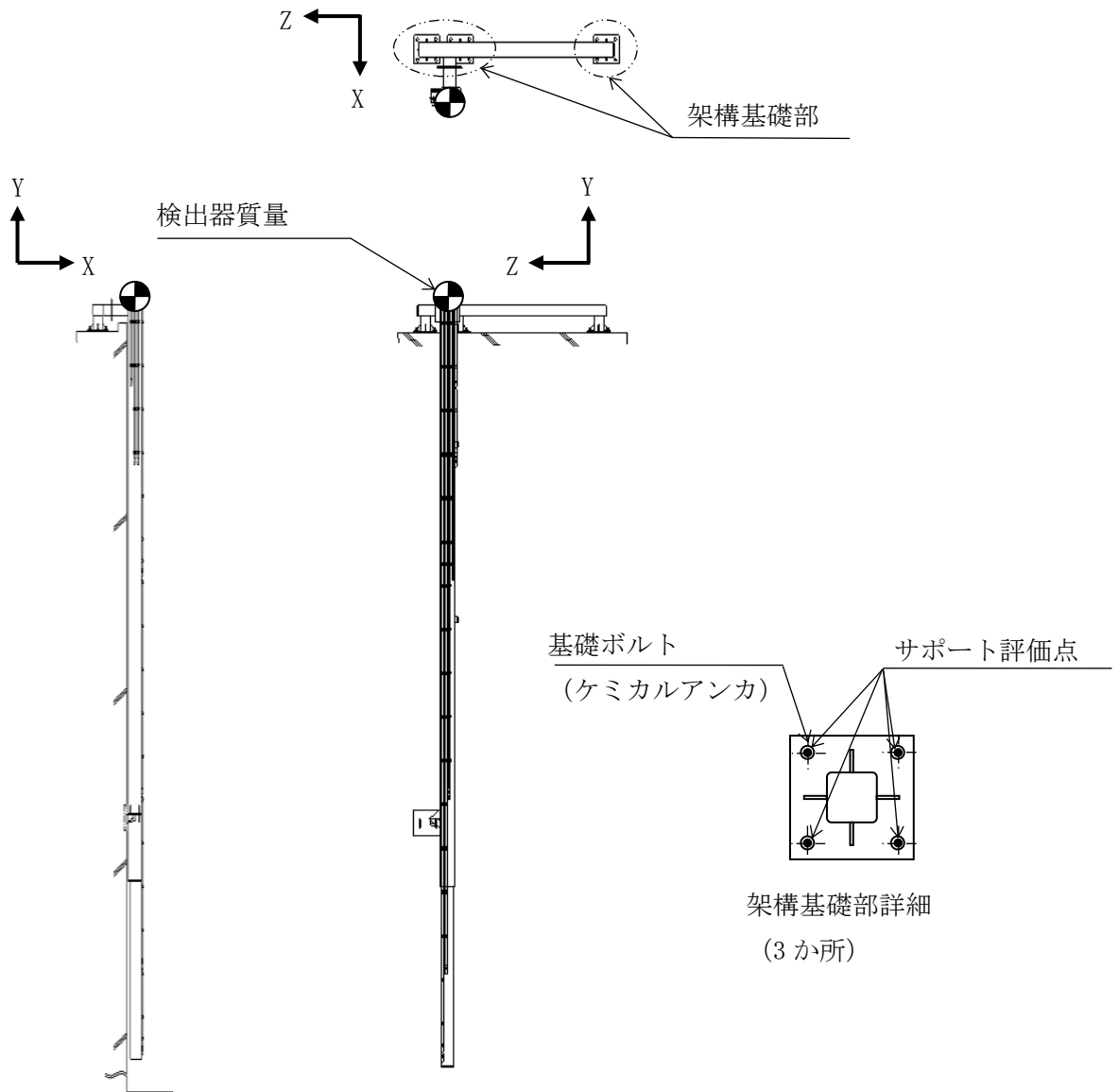


図 5-1 構造概要 (基礎ボルト)

個別解析によって得られた基礎ボルト部の評価点の最大発生力を表 5-6 に示す。

表 5-6 基礎ボルト (1 本当たり) 発生反力

対象部位	ケース	反力(N)	
		F _b	Q _b
基礎ボルト	地震力		
	スロッシング		
	地震力+スロッシング		

(1) 引張応力

基礎ボルト (1本当たり) に対する引張応力は、下式により計算する。

引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \dots\dots\dots (5.4.1.1.1)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots\dots\dots (5.4.1.1.2)$$

(2) せん断応力

基礎ボルト (1本当たり) に対するせん断応力は、下式により計算する。

せん断応力

$$\tau_b = \frac{Q_b}{A_b} \dots\dots\dots (5.4.1.1.3)$$

5.4.1.2 架構の応力

架構の応力は、三次元はりモデルによる地震力及びスロッシング力に対する解析から各節点に生じる応力を求めて、その結果を用いて手計算にて計算する。

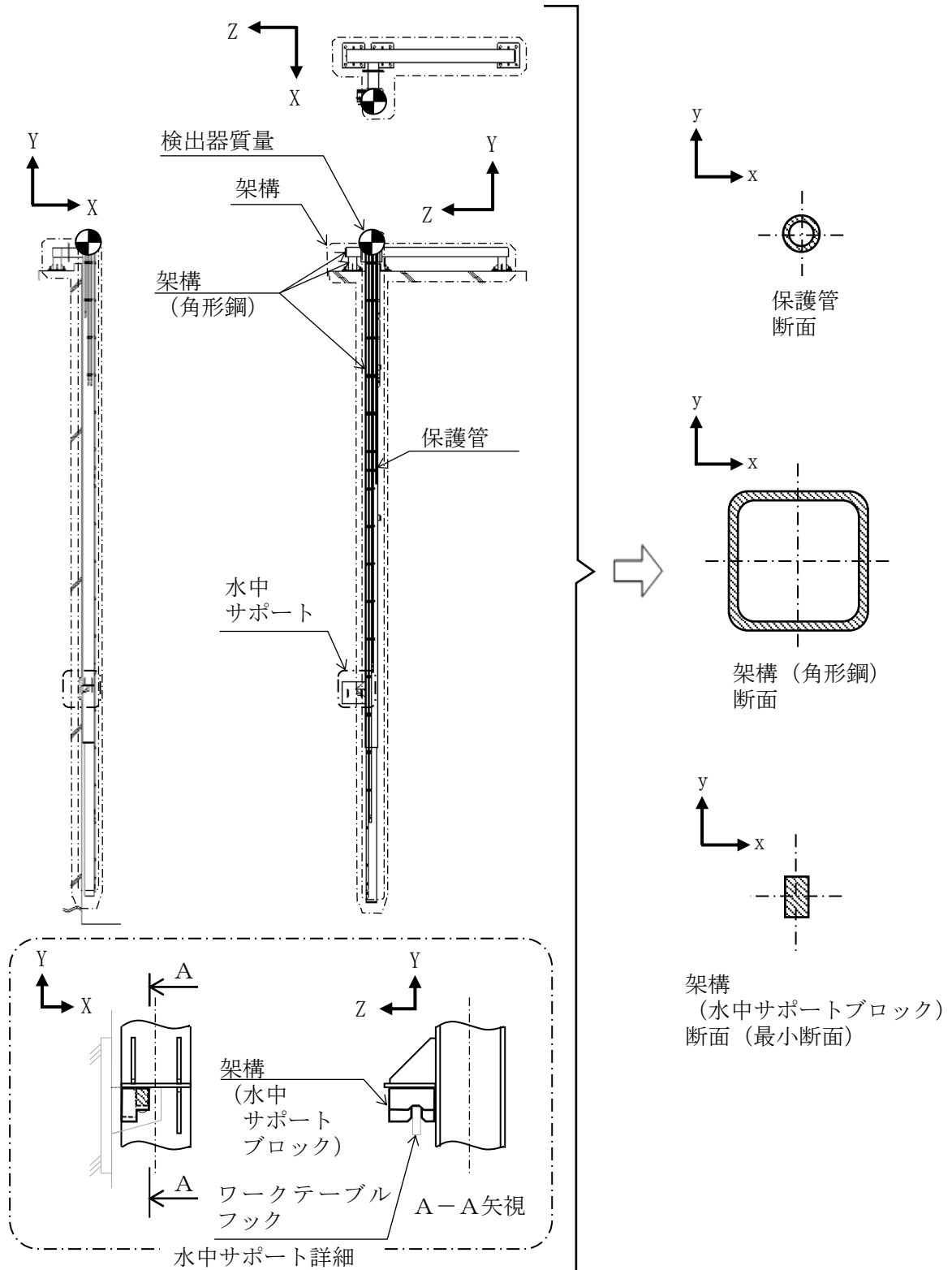


図5-2 構造概要 (架構)

組合せ応力が最大となる架構の評価点の最大発生応力を表 5-7 に示す。

表 5-7 発生応力

(単位：MPa)

対象部位	ケース	引張 (圧縮)	せん断		ねじり	曲げ	
		$\sigma_{t(c)}$	τ_x	τ_y	τ_p	σ_{bx}	σ_{by}
架構 (角形鋼)	地震力						
	スロッシング						
	地震力+スロッシング						
架構 (水中サポー トブロック)	地震力						
	スロッシング						
	地震力+スロッシング						

注記*：負の値は圧縮応力を示す。

(1) 引張 (圧縮) 応力

架構に対する引張 (圧縮) 応力は、下式により計算する。

引張 (圧縮) 応力 ($\rho_{t(c)}$)

$$\rho_{t(c)} = |\sigma_{t(c)}| \dots\dots\dots (5.4.1.2.1)$$

(2) せん断応力

架構に対するせん断応力は、下式により計算する。

せん断応力 (ρ_s)

$$\rho_s = \text{MAX} (\tau_x + \tau_p, \tau_y + \tau_p) \dots\dots\dots (5.4.1.2.2)$$

(3) 曲げ応力

架構に対する曲げ応力は、下式により計算する。

曲げ応力 (ρ_b)

$$\rho_b = \sigma_{bx} + \sigma_{by} \dots\dots\dots (5.4.1.2.3)$$

(4) 組合せ応力

架構に対する組合せ応力は、下式により計算する。

組合せ応力 (ρ_m)

$$\rho_m = \sqrt{(\rho_{t(c)} + \rho_b)^2 + 3\rho_s^2} \dots\dots\dots (5.4.1.2.4)$$

5.4.1.3 ワークテーブルフックの応力

ワークテーブルフックの応力は、三次元はりモデルによる地震力及びスロッシング力に対する架構の解析からワークテーブルフック部に生じる反力を求めて、その結果を用いて手計算にて計算する。

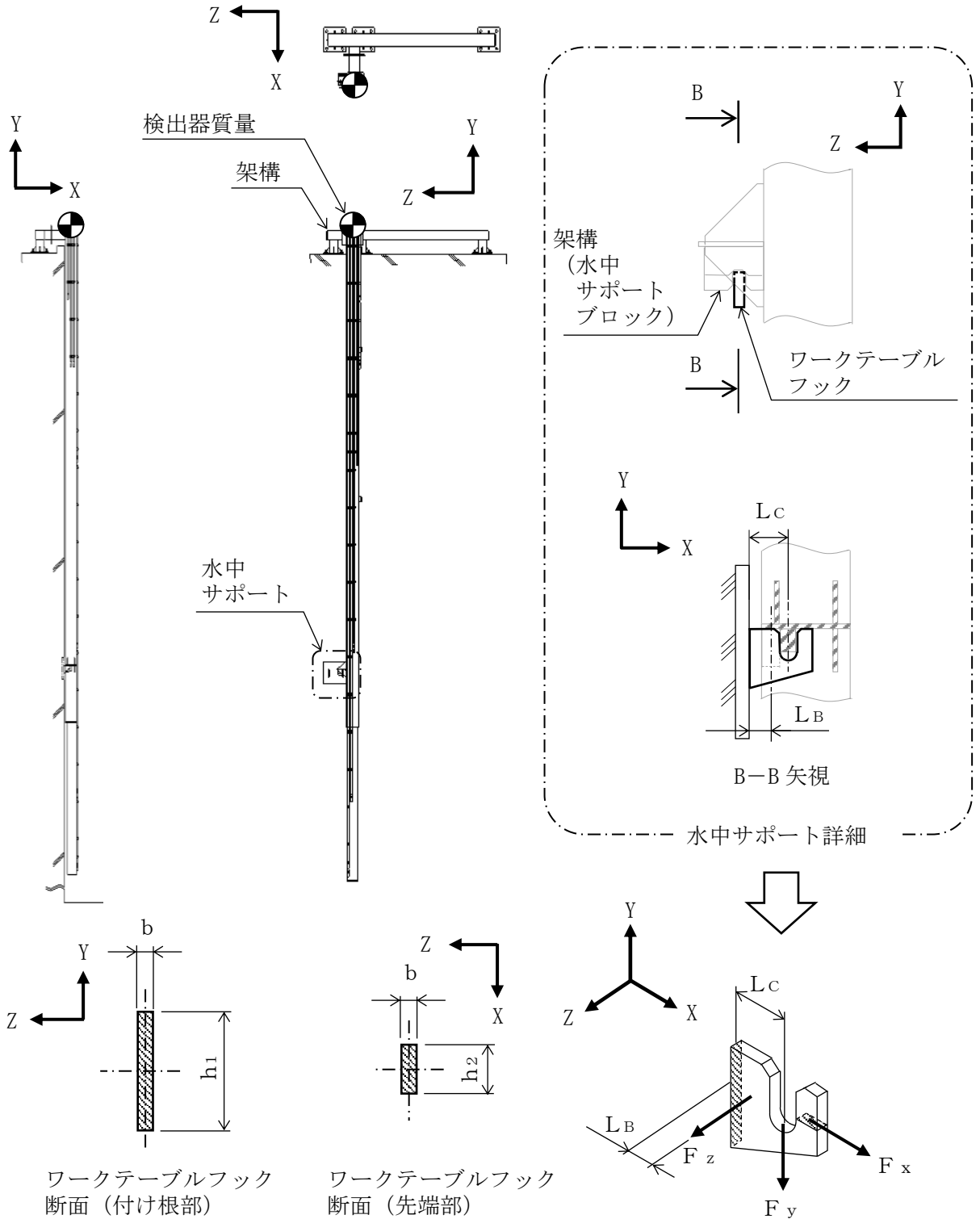


図5-3 構造概要 (ワークテーブルフック)

解析によって得られたワークテーブルフック部の評価点の最大反力を表 5-8, 表 5-9 に示す。

表 5-8 ワークテーブルフック評価点反力 (付け根部評価用)

対象部位	ケース	反力(N)		
		F _x	F _y	F _z
ワークテーブルフック	地震力 +スロッシング			

表 5-9 ワークテーブルフック評価点反力 (先端部評価用)

対象部位	ケース	反力(N)		
		F _x	F _y	F _z
ワークテーブルフック	地震力 +スロッシング			

(1) 引張応力

ワークテーブルフックに対する引張応力は、下式により計算する。

引張応力 (σ_{ht}) (付け根部)

$$\sigma_{ht} = \frac{F_x}{A_h} + \frac{F_z \cdot L_B}{Z_{hy}} + \frac{F_y \cdot L_C}{Z_{hz}} \dots\dots\dots (5.4.1.3.1)$$

ここで、A_hはワークテーブルフック付け根部の断面積、Z_{hy}、Z_{hz}はワークテーブルフック付け根部の断面係数を示す。

(2) せん断応力

ワークテーブルフックに対するせん断応力は、下式により計算する。

せん断応力 (τ_h) (付け根部)

$$\tau_h = \sqrt{\left(\frac{F_y}{A_{hs1}}\right)^2 + \left(\frac{F_z}{A_{hs1}}\right)^2} \dots\dots\dots (5.4.1.3.2)$$

せん断応力 (τ_h) (先端部)

$$\tau_h = \frac{F_x}{A_{hs2}} \dots\dots\dots (5.4.1.3.3)$$

ここで、A_{hs1}はワークテーブルフック付け根部のせん断断面積、A_{hs2}はワークテーブルフック先端部のせん断断面積を示す。

(3) 組合せ応力

ワークテーブルフックの組合せ応力は、下式により計算する。

組合せ応力 (σ_{ha}) (付け根部)

$$\sigma_{ha} = \sqrt{\sigma_{ht}^2 + 3 \cdot \tau_h^2} \dots\dots\dots (5.4.1.3.4)$$

5.5 計算条件

5.5.1 基礎ボルト， 架構及びワークテーブルフックの応力計算条件

応力計算に用いる計算条件は，本計算書の【燃料プール水位・温度（S A）（L/TE216-1，2，3，4，5，6，TE216-4）の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.6 応力の評価

5.6.1 基礎ボルトの応力評価

5.4.1.1項で求めたボルトの引張応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f_{ts} 以下であること。ただし， f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.6.1.1)$$

せん断応力 τ_b は，せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし， f_{sb} は下表による。

f_{to}	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合 $\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5.6.2 架構の応力評価

5.4.1.2項で求めた架構の引張（圧縮）応力 $\rho_t(c)$ 、せん断応力 ρ_s 、曲げ応力 ρ_b 及び組合せ応力 ρ_m は、架構の許容引張応力 f_{tm} 、許容圧縮応力 f_{cm} 、許容せん断応力 f_{sm} 、許容曲げ応力 f_{bm} 及び許容組合せ応力 f_{tm} 以下であること。ただし、 f_{tm} 、 f_{cm} 、 f_{sm} 及び f_{bm} は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{tm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容圧縮応力 f_{cm}	$\left(1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2\right) \frac{F^*}{\nu_c} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sm}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$
許容曲げ応力 f_{bm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容組合せ応力 f_{tm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

ただし、 ℓ_k 、 Λ 、 λ 、 ν_c 、 i は次式より求める。

$$\nu_c = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 \dots\dots\dots (5.6.2.1)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{0.6 \cdot F^*}} \dots\dots\dots (5.6.2.2)$$

$$\lambda = \frac{\ell_k}{i} \dots\dots\dots (5.6.2.3)$$

$$\ell_k = 2.1 \cdot L \dots\dots\dots (5.6.2.4)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A_m}} \dots\dots\dots (5.6.2.5)$$

5.6.3 ワークテーブルフックの応力評価

5.4.1.3 項で求めたワークテーブルフックの引張応力 σ_{ht} ，せん断応力 τ_h ，組合せ応力 σ_{ha} は，ワークテーブルフックの許容引張応力 f_{tm} ，許容せん断応力 f_{sm} ，許容組合せ応力 f_{tm} 以下であること。ただし， f_{tm} ， f_{sm} は下表による。

	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{tm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sm}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$
許容組合せ応力 f_{tm}	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

6. 機能維持評価

6.1 電氣的機能維持評価方法

燃料プール水位・温度（S A）の電氣的機能維持評価について以下に示す。

なお、機能維持評価用加速度はVI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき、基準地震動 S_s により定まる加速度又は地震応答解析で評価した検出器に生じる最大の応答加速度のいずれか大きい値とする。

燃料プール水位・温度（S A）の機能確認済加速度は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、同形式の検出器単体の正弦波加振試験において、電氣的機能の健全性を確認した評価部位の最大加速度を適用する。

機能確認済加速度を表 6-1 に示す。

表 6-1 機能確認済加速度 (×9.8m/s²)

機器名称	方向	機能確認済加速度
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-1)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-2)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-3)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-4)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-5)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-6)	水平	
	鉛直	
燃料プール水位・温度（S A） (TE216-4)	水平	
	鉛直	

7. 評価結果

7.1 重大事故等対処設備としての評価結果

燃料プール水位・温度（S A）の重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有し，電氣的機能を維持できることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

(2) 機能維持評価結果

電氣的機能維持評価の結果を次頁以降の表に示す。

S2 補 VI-2-4-2-4 R0

【燃料プール水位・温度（S A）（L/TE216-1, 2, 3, 4, 5, 6, TE216-4）の耐震性についての計算結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 設計条件（鉛直方向の並進方向拘束あり）

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s		周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-1, 2, 3, 4, 5, 6, TE216-4)	常設／防止 常設／緩和	原子炉建物 EL 42.8* ¹	□	0.05 以下	—	—	C _H =3.42* ² 又は*3	C _V =2.46* ² 又は*3	100

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：応答水平震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）を上回る設計震度，応答鉛直震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）

*3：設計用床応答スペクトルⅠ（基準地震動 S s）を上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度

1.2 設計条件（鉛直方向の並進方向拘束なし）

機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s		周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	
燃料プール水位・温度（S A） (L/TE216-1, 2, 3, 4, 5, 6, TE216-4)	常設／防止 常設／緩和	原子炉建物 EL 42.8* ¹	□	□	—	—	C _H =3.42* ² 又は*3	C _V =2.46* ² 又は*3	100

注記*1：基準床レベルを示す。

*2：応答水平震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）を上回る設計震度，応答鉛直震度は設計用震度Ⅱ（基準地震動 S s）

*3：設計用床応答スペクトルⅠ（基準地震動 S s）を上回る設計用床応答スペクトルにより得られる震度

1.3 機器要目

部材	W (N)	d (mm)	A _b (mm ²)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
基礎ボルト				221 (径≤16mm)	373 (径≤16mm)	—	261

部材	A _m (mm ²)	I (mm ⁴)	L (mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
架構 (角形鋼)				171	441	205	—	205
架構 (水中サポート ブロック)	1.120×10 ³	1.493×10 ⁵	100	171	441	205	—	205

部材	A _h (mm ²)	A _{h s 1} (mm ²)	A _{h s 2} (mm ²)	b (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	Z _{h z} (mm ³)	Z _{h y} (mm ³)	L _B (mm)	L _C (mm)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
ワークテーブル フック	1.200×10 ³	800	200	12	100	25	2.000×10 ⁴	2.400×10 ³	36.5	66	171	441	205	—	205

1.4 計算数値

1.4.1 基礎ボルトに作用する力

(単位：N)

部材	F _b		Q _b	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
基礎ボルト	—		—	

1.4.2 架構の発生応力

(単位：MPa)

部材	引張 (圧縮)	せん断		ねじり	曲げ	
	$\sigma_{t(c)}$	τ_x	τ_y	τ_p	σ_{bx}	σ_{by}
架構 (角形鋼)						
架構 (水中サポート ブロック)						

注記*：負の値は圧縮応力を示す。

1.4.3 ワークテーブルフックに作用する力 (付け根部評価用)

(単位：N)

部材	F _x		F _y		F _z	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
ワークテーブル フック	—		—		—	

1.4.4 ワークテーブルフックに作用する力 (先端部評価用)

(単位：N)

部材	F _x		F _y		F _z	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
ワークテーブル フック	—		—	—	—	—

S2 補 VI-2-4-2-4 R0

1.5 結論

1.5.1 基礎ボルトの応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト	SS400	引張	—	—	$\sigma_b = 12$	$f_{ts} = 156^*$
		せん断	—	—	$\tau_b = 7$	$f_{sb} = 120$

すべて許容応力以下である。

注記*： $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

1.5.2 架構の応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度		基準地震動 S s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
架構 (角形鋼)	SUS304TP	引張 (圧縮)	—	—	$\rho_{t(c)} = 11^*$	$f_{cm} = 120$
		せん断	—	—	$\rho_s = 22$	$f_{sm} = 118$
		曲げ	—	—	$\rho_b = 120$	$f_{bm} = 205$
		組合せ	—	—	$\rho_m = 135$	$f_{tm} = 205$
架構 (水中サポートブロック)	SUS304	引張 (圧縮)	—	—	$\rho_{t(c)} = 2^*$	$f_{cm} = 201$
		せん断	—	—	$\rho_s = 22$	$f_{sm} = 118$
		曲げ	—	—	$\rho_b = 154$	$f_{bm} = 205$
		組合せ	—	—	$\rho_m = 160$	$f_{tm} = 205$

すべて許容応力以下である。

注記*：発生応力は圧縮応力を示す。

S2 補 VI-2-4-2-4 R0

1.5.3 ワークテーブルフック（付け根部）の応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
ワークテーブルフック （付け根部）	SUS304	引張	—	—	$\sigma_{ht}=129$	$f_{tm}=205$
		せん断	—	—	$\tau_h=10$	$f_{sm}=118$
		組合せ	—	—	$\sigma_{ha}=130$	$f_{tm}=205$

すべて許容応力以下である。

1.5.4 ワークテーブルフック（先端部）の応力

（単位：MPa）

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
ワークテーブルフック （先端部）	SUS304	せん断	—	—	$\tau_h=83$	$f_{sm}=118$

すべて許容応力以下である。

1.5.6 電氣的機能維持の評価結果

(×9.8m/s²)

		機能維持評価用加速度*	機能確認済加速度
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-1)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-2)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-3)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-4)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-5)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (L/TE216-6)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	
燃料プール水位・温度 (S A) (TE216-4)	水平方向	7.25	
	鉛直方向	3.07	

注記*：設計用震度 I（基準地震動 S_s）により定まる評価部位における応答加速度であり、全ての検出器取付位置のうち最大となる位置の応答加速度の値を各々の検出器の評価に対して共通で適用する。

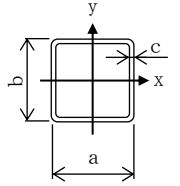
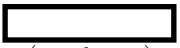
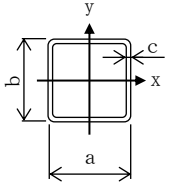

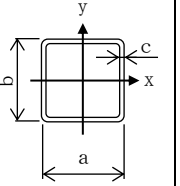
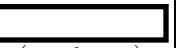
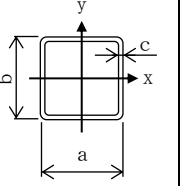

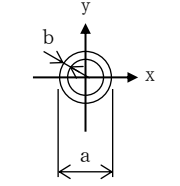
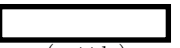
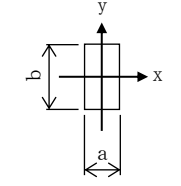

機能維持評価用加速度はすべて機能確認済加速度以下である。

1.6 その他の機器要目

(1) 材料物性値

項目	記号	単位	入力値
質量	m	kg	<input type="text"/>
温度条件 (雰囲気温度)	T	℃	100
縦弾性係数	E	MPa	190000
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	<input type="text"/>
節点数	—	個	<input type="text"/>

(2) 断面性状

部材	サポート鋼材				保護管	水中サポートブロック
要素	①	②	③	④	⑤	⑥
材質	SUS304TP	SUS304TP	SUS304TP	SUS304TP	SUS304TP	SUS304
A_m (mm ²)						
Z_x (mm ³)						
Z_y (mm ³)						
Z_p (mm ³)						
断面形状 (mm)	  $(a \times b \times c)$	  $(a \times b \times c)$	  $(a \times b \times c)$	  $(a \times b \times c)$	  $(a \times b)$	  $(a \times b)$

