

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-12_改6
提出年月日	2021年10月25日

補足-610-12 第3号機海水熱交換器建屋の耐震性についての  
計算書に関する補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」及び添付書類「VI-2-2-30 第3号機海水熱交換器建屋の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 第3号機海水熱交換器建屋に対する平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震等の影響

別紙 1-1 第3号機海水熱交換器建屋の東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価（点検結果）

別紙 1-2 東北地方太平洋沖地震等に対する第3号機海水熱交換器建屋のシミュレーション解析

別紙 2 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 3 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答解析における耐震壁のスケルトンカーブの設定

別紙 4 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答解析における材料物性の不確かさに関する検討

別紙 4-1 材料物性の不確かさを考慮した検討に用いる地震動の選定について

別紙 4-2 材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果

別紙 5 浸水防護施設を支持する部位等の評価についての補足説明資料

別紙 5-1 鉄筋ひずみの平均化について

別紙 5-2 壁に作用する水平方向地震時の慣性力の影響について

別紙 5-3 ペントハウスについての補足説明資料

別紙 6 浸水に対する境界躯体の止水性について

 本日の説明範囲

別紙 5 浸水防護施設を支持する部位等の評価についての  
補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-2-30 第3号機海水熱交換器建屋の耐震性についての計算書 別紙1 浸水防護施設を支持する部位等の評価」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 5-1 鉄筋ひずみの平均化について

別紙 5-2 壁に作用する水平方向地震時の慣性力の影響について

別紙 5-3 ペントハウスについての補足説明資料

 本日の説明範囲

## 別紙 5-1 鉄筋ひずみの平均化について

## 目 次

1. はじめに ..... 別紙 5-1- 1
2. 鉄筋ひずみが目安値を超える部材 ..... 別紙 5-1- 2
3. 鉄筋ひずみの平均化の考え方 ..... 別紙 5-1- 5
4. 鉄筋ひずみの平均化後の結果 ..... 別紙 5-1- 7
5. まとめ ..... 別紙 5-1-10

## 1. はじめに

第3号機海水熱交換器建屋は、浸水防護施設を支持する部位等が必要な構造強度を有していることを確認するため、応力解析により得られたコンクリート及び鉄筋のひずみ並びに面外せん断力に対して評価し、各部材の健全性を確認している。

このうち、鉄筋のひずみに対する断面の評価については、各要素に生じるひずみが「J S M E S N E 1 - 2 0 0 3 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（以下「CCV規格」という。）」に基づくひずみの目安値（ $5000\mu$ ）を下回ることを確認することとしている。また、鉄筋のひずみが目安値を超える場合にあっては、当該断面内のコンクリートに圧縮応力を示す部分があり、かつコンクリートのひずみが目安値（ $3000\mu$ ）を超えないことを確認している。

ここでは、鉄筋ひずみがひずみの目安値を超える部材について、細かい要素分割を行っている部材の一部を部材厚程度の範囲で鉄筋ひずみを平均化した評価を実施する。

2. 鉄筋ひずみが目安値を超える部材

浸水防護施設の支持機能に関する評価において、浸水防護施設を支持する第3号機海水熱交換器建屋に対しては、鉄筋ひずみの目安値として  $5000\mu$  を設定している。基準地震動  $S_s$  時（以下「 $S_s$ 地震時」という。）の地震荷重に対する評価及び津波と余震（弾性設計用地震動  $S_d-D2$ ）の重畳（以下「余震時」という。）に対する評価の結果、一部の要素において、鉄筋ひずみが目安値を超過した。鉄筋ひずみがひずみの目安値を超えた部材のひずみの最大値を表2-1に、コンター図を図2-1及び図2-2に示す。また、モデル全体の要素分割図を図2-3に示す。

表2-1 鉄筋のひずみが目安値を超える部材のひずみの値

荷重状態	評価部位	要素長 a	部材厚さ b	比率 a/b	ひずみ 発生値	ひずみ 目安値	検定比
$S_s$ 地震時	$H_E-H_F$ 通り間壁	100mm	1000mm	0.1	$8253\mu$	$5000\mu$	1.66



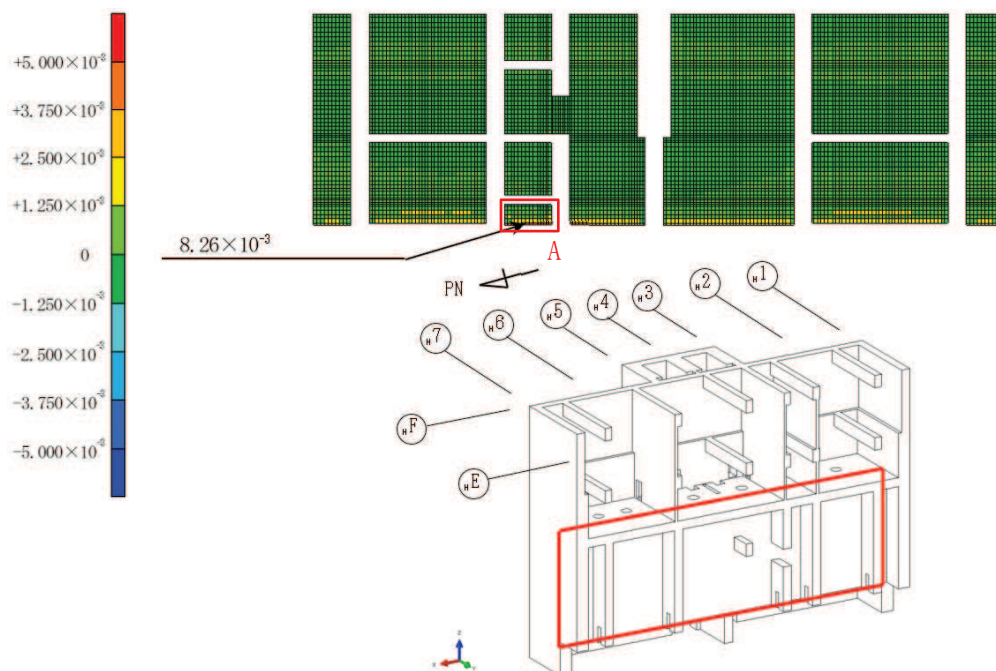
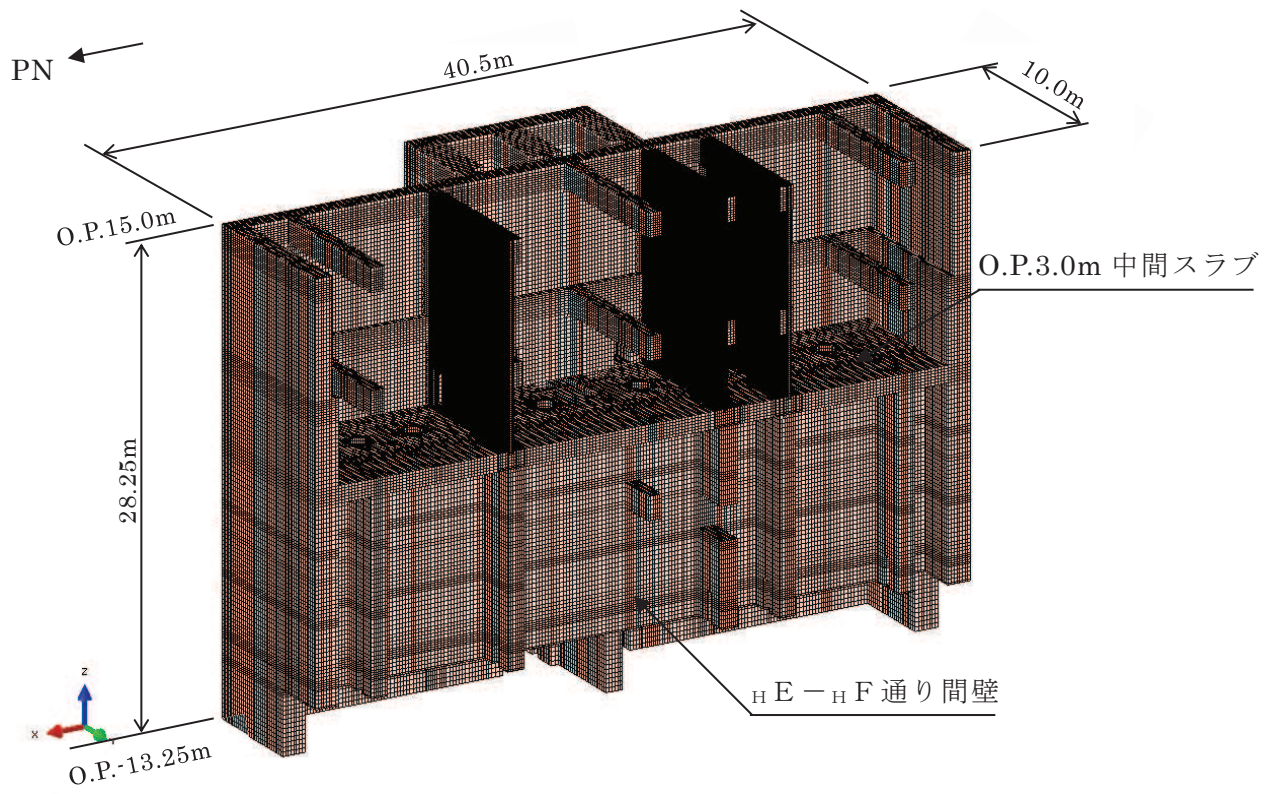


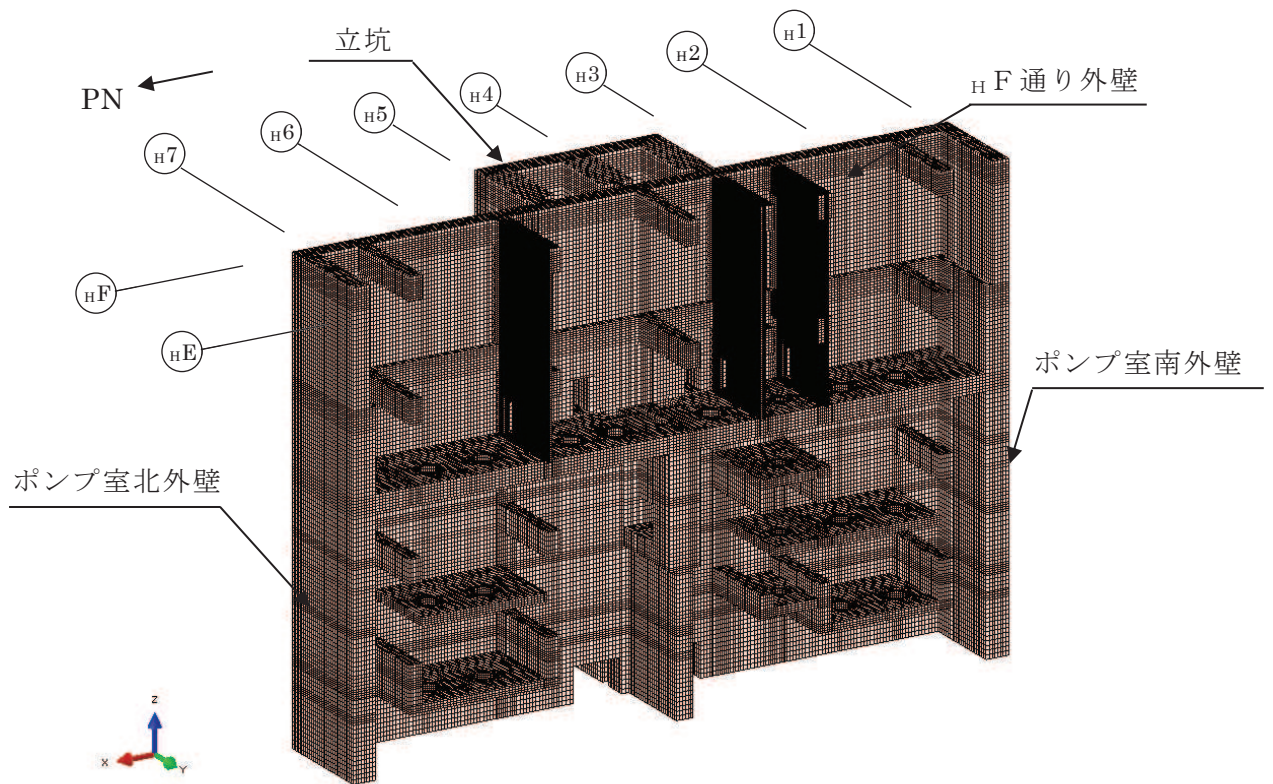
図 2-1 H E - H F 通り間壁の S s 地震時鉄筋ひずみ (縦方向)



図 2-2 鉄筋ひずみコンター図 (図 2-1 の A 部拡大図)



(a) 全体図



(b) ポンプ室内表示

図 2-3 要素分割図

### 3. 鉄筋ひずみの平均化の考え方

鉄筋ひずみが目安値を超過した原因としては、コンクリートの非線形化による影響を詳細に解析に反映することを目的に断面方向の要素分割を極力細分化したことに伴い、要素の縦横比の関係から面内方向の要素分割も図 2-3 に示すように細かくしているため、壁脚部の曲げモーメントが大きくなる部位において最下要素のひずみが局所的に大きくなったことが挙げられる。

第 3 号機海水熱交換器建屋の 3 次元 FEM モデルの要素の設定方針を以下に示す。

- ・要素は、8 節点の 6 面体非線形ソリッド要素とする。
- ・要素分割は以下を基本方針とする。

板厚 300mm, 500mm 箇所：板厚方向 4 分割

板厚 1000mm 箇所：板厚方向 6 分割

板厚 1400mm 箇所：板厚方向 8 層分割

縦横比 2 以内を基本としてスパン及び高さ方向の分割を決定しているため、スパン及び高さ方向の分割も細かくなっている。

要素分割の寸法について、「土木学会 2005 年 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（以下「土木学会マニュアル」という。）」では、要素分割において以下の記載がある。

- ・曲げ破壊及びせん断破壊した鉄筋コンクリート製ボックスカルバート構造物の試験結果から分かるように、曲げ破壊やせん断破壊の領域が、部材の断面厚さまたは有効高さの約 1.0 倍程度の範囲であることが知られている。
- ・要素分割は、断面厚さまたは有効高さの 1.0 倍程度とするのがよい。
- ・要素長さを部材の断面厚または有効高さの約 2.0 倍よりは大きくしてはならない。
- ・要素分割を細かくせざるを得ない場合は、軸線方向に部材の断面厚さ又は有効高さの 1.0 倍程度の範囲で複数の要素での地震応答解析結果を平均的に評価するとよい。
- ・要素の形状は、著しく扁平にならないように注意し、四角形要素の縦横比は基本的に 1:1 が望ましく、応力の流れがほぼ一様となる場合でも、縦横比で 1:5 を限度とすることが望ましい。

一方、第 3 号機海水熱交換器建屋の耐震評価に用いる三次元構造解析モデルにおける非線形ソリッド要素は、部材厚に対して 4~8 分割に細分化しており、また、3 次元の 8 節点を有する 6 面体要素であり、解析モデルで鉄筋とコンクリートを固着としていることも考え併せて、土木学会マニュアルの考え方を踏まえて、部材厚の 1.0 倍程度で鉄筋ひずみを平均化した場合の評価を行う。



鉄筋ひずみの平均化は、目安値を超えている当該要素に対し、曲げ変形を考慮して鉄筋の軸方向に隣接する要素を対象とする。鉄筋ひずみの平均化の計算は、当該要素の鉄筋ひずみと隣接する要素の鉄筋ひずみをそれぞれの要素の面積に応じた加重平均として算出する。図 3-1 に S s 地震時鉄筋ひずみ（縦方向）を、図 3-2 に平均化の概念図を示す。

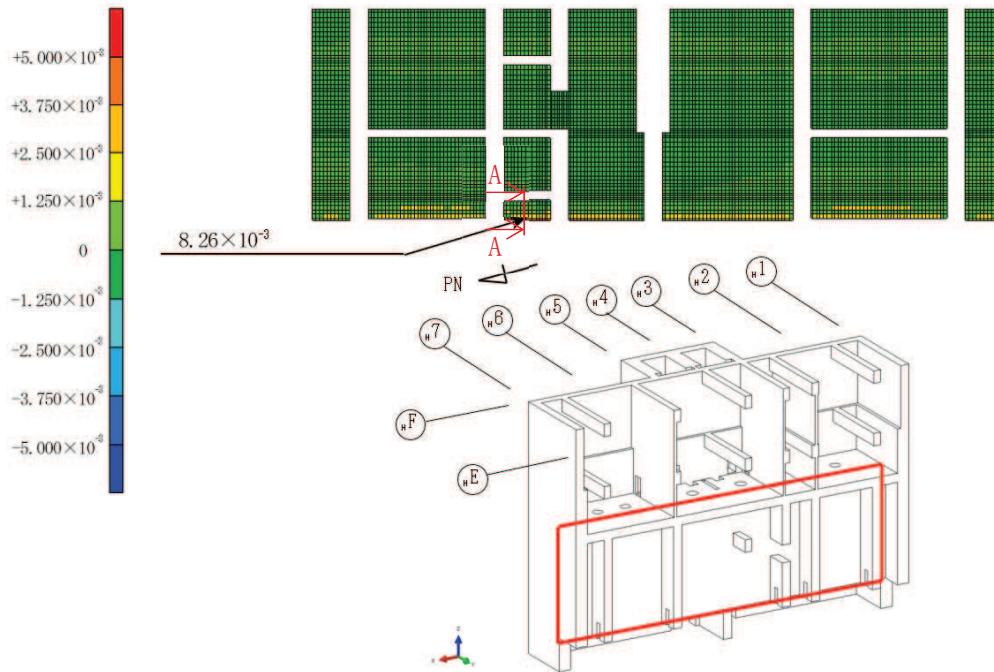


図 3-1 H E - H F 通り間壁の S s 地震時鉄筋ひずみ（縦方向）

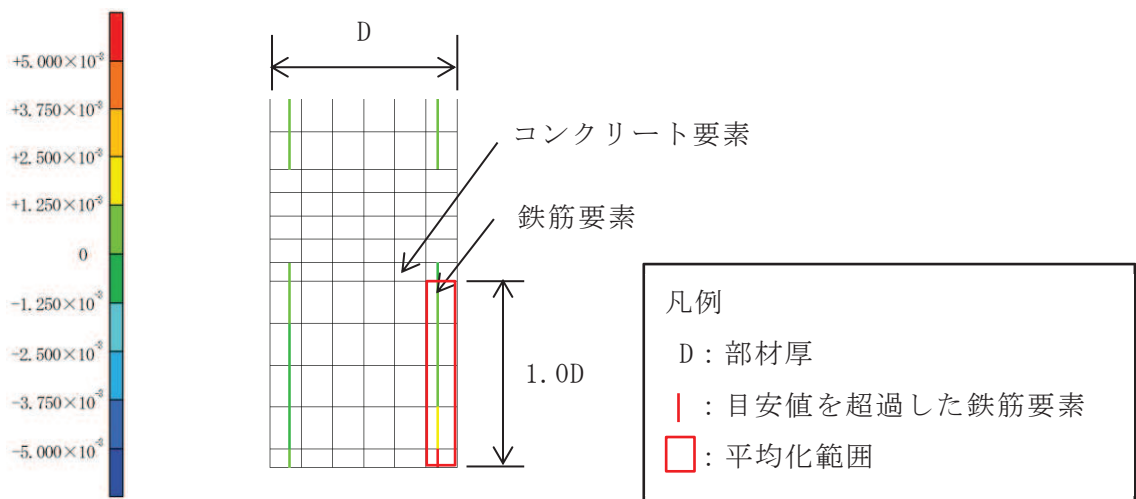


図 3-2 平均化概念図（図 3-1 の A-A 断面）

#### 4. 鉄筋ひずみの平均化後の結果

「3. 鉄筋ひずみの平均化の考え方」に基づき算出した鉄筋ひずみ平均化後の検定比を表 4-1 に示す。また、鉄筋ひずみの平均化を実施した範囲の鉄筋ひずみ分布図を図 4-1 及び図 4-2 に、平均化前後の鉄筋ひずみを表 4-2 に示す。

鉄筋ひずみの平均化後のひずみが目安値を満足することを確認した。

表 4-1 平均化後の評価結果

荷重状態	評価部位	ひずみ発生値 (平均化後)	ひずみ目安値	検定比 (平均化後)
S s 地震時	$H_E - H_F$ 通り間壁	1479 $\mu$	5000 $\mu$	0.30

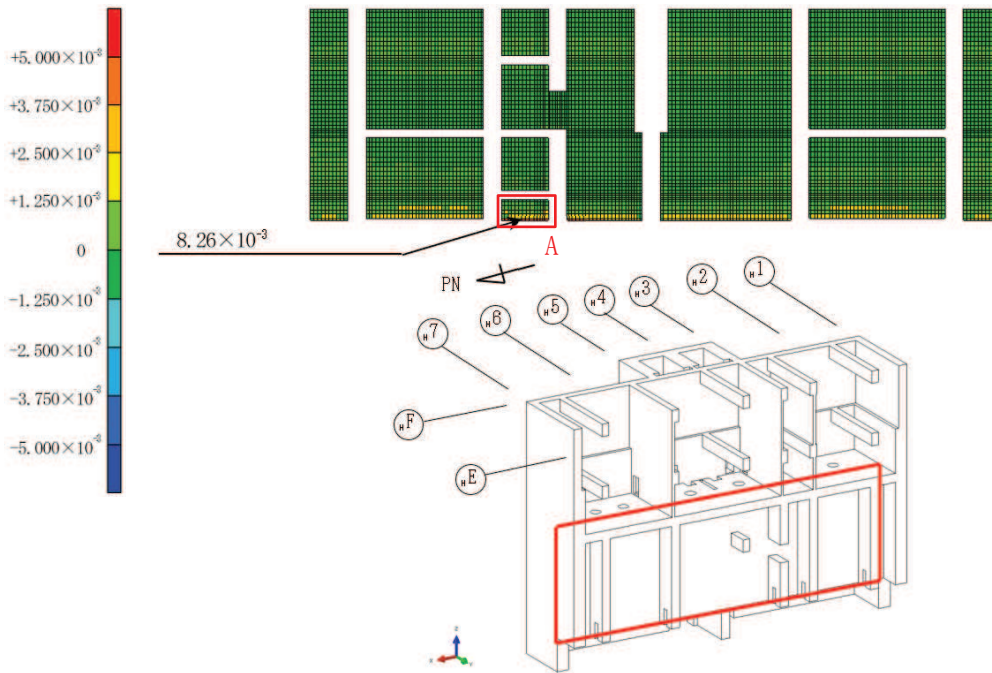


図 4-1 H E - H F 通り間壁の S s 地震時鉄筋ひずみ (縦方向)



図 4-2 鉄筋ひずみコンター図 (図 4-1 の A 部拡大図)

表 4-2 平均化前後の鉄筋ひずみ一覧 (HE-HF 通り間壁)

部材	鉄筋ひずみが 目安値を超過する要素			隣接要素1			隣接要素2			隣接要素3			隣接要素4			平均化後の 鉄筋ひずみ
	要素番号	面積 (cm <sup>2</sup> )	鉄筋ひずみ (μ)	要素番号	面積 (cm <sup>2</sup> )	鉄筋ひずみ (μ)	要素番号	面積 (cm <sup>2</sup> )	鉄筋ひずみ (μ)	要素番号	面積 (cm <sup>2</sup> )	鉄筋ひずみ (μ)	要素番号	面積 (cm <sup>2</sup> )	鉄筋ひずみ (μ)	
HE-HF通り間壁	1215024	194	5666	1214071	438	1125	1215447	438	1310	1215673	438	507	1215903	438	76	1246
	1214875	152	6570	1214828	342	1372	1215324	342	1149	1215550	342	374	1215776	342	97	1331
	1214941	214	7266	1215284	481	1442	1215343	481	1030	1215570	481	401	1215795	481	94	1395
	1215286	212	7716	1215287	477	1435	1215546	477	1104	1215772	477	349	1216008	477	106	1446
	1215279	211	7991	1215288	475	1430	1215310	475	1168	1215498	475	303	1215725	475	77	1469
	1216049	211	8190	1215266	475	1423	1215470	475	1215	1215696	475	235	1215930	475	58	1479
	1215185	212	8253	1215265	477	1433	1215523	477	1239	1215750	477	183	1215986	477	48	1479
	1215016	214	8198	1215285	481	1451	1215337	481	1233	1215564	481	184	1215789	481	23	1471
	1215260	152	8072	1215280	342	1472	1215443	342	1216	1215668	342	214	1215899	342	-16	1457
	1214958	152	7882	1215278	342	1490	1215545	342	1212	1215771	342	247	1216006	342	-43	1443
	1216054	152	7520	1215290	342	1549	1215316	342	1221	1215332	342	296	1215559	342	-73	1426
	1215203	152	7273	1215273	342	1419	1215525	342	1324	1215753	342	370	1215988	342	-85	1409
	1214300	156	6855	1215292	351	1266	1215340	351	1395	1215567	351	537	1215792	351	-63	1391

注 1 : 表の赤枠は平均化後の鉄筋ひずみの最大値を示す。

注 2 : 鉄筋ひずみの平均化の計算方法以下に示す。

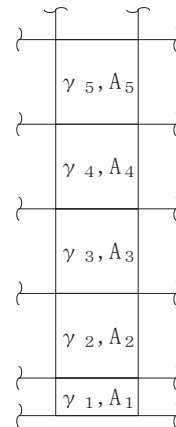
$$\gamma_{AVE} = \frac{\sum_{i=1}^5 (A_i \cdot \gamma_i)}{\sum_{i=1}^5 (A_i)}$$

ここで、

$\gamma_{AVE}$  : 平均化後の鉄筋ひずみ

$A_i$  : 要素 i の面積 (cm<sup>2</sup>)

$\gamma_i$  : 要素 i の鉄筋ひずみ



平均化する要素

## 5. まとめ

第3号機海水熱交換器建屋において、一部部材において局所的な鉄筋ひずみが目安値を上回ることから、規準類を参考に部材厚の1.0倍程度の範囲で要素のひずみを平均化し、平均化後の鉄筋ひずみが目安値を満足することを確認した。



別紙 5-3 ペントハウスについての補足説明資料

## 目 次

1. 概要 ..... 別紙 5-3-1
2. 構造概要 ..... 別紙 5-3-1
3. 解析モデル ..... 別紙 5-3-5
4. 固有周期の算出 ..... 別紙 5-3-7
5. 面内せん断力に対する健全性 ..... 別紙 5-3-8

## 1. 概要

第3号機海水熱交換器建屋1階ペントハウス（以下「ペントハウス」という。）の外壁について、固有周期の確認及び面内せん断力に対する健全性を確認する。

## 2. 構造概要

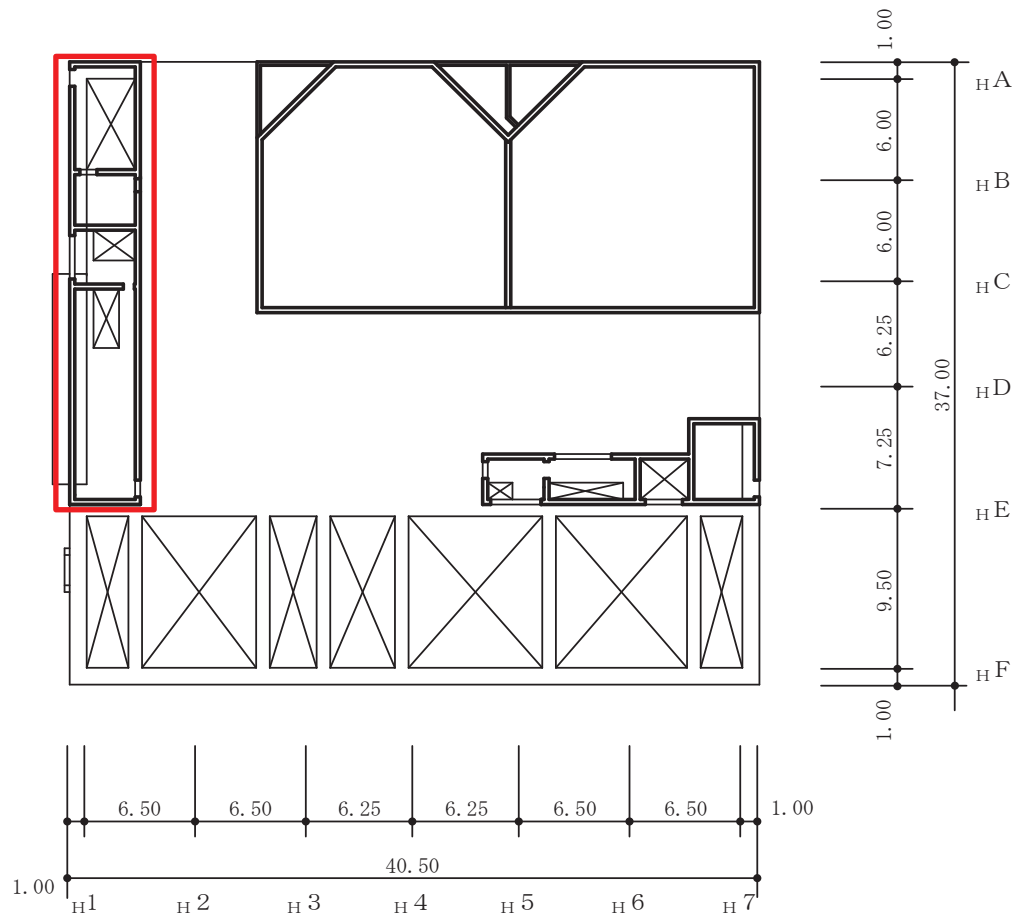
ペントハウスは地上1階建で、平面は4.15m（NS）×26.15m（EW）\*である。

建屋の構造は鉄筋コンクリート造であり、その主たる耐震要素は耐震壁である。

ペントハウスは、第3号機海水熱交換器建屋の1階（O.P.15.0m）の南端に設置されている。

第3号機海水熱交換器建屋のペントハウス部分について、概略平面図及び概略断面図を図2-1及び図2-2に示す。

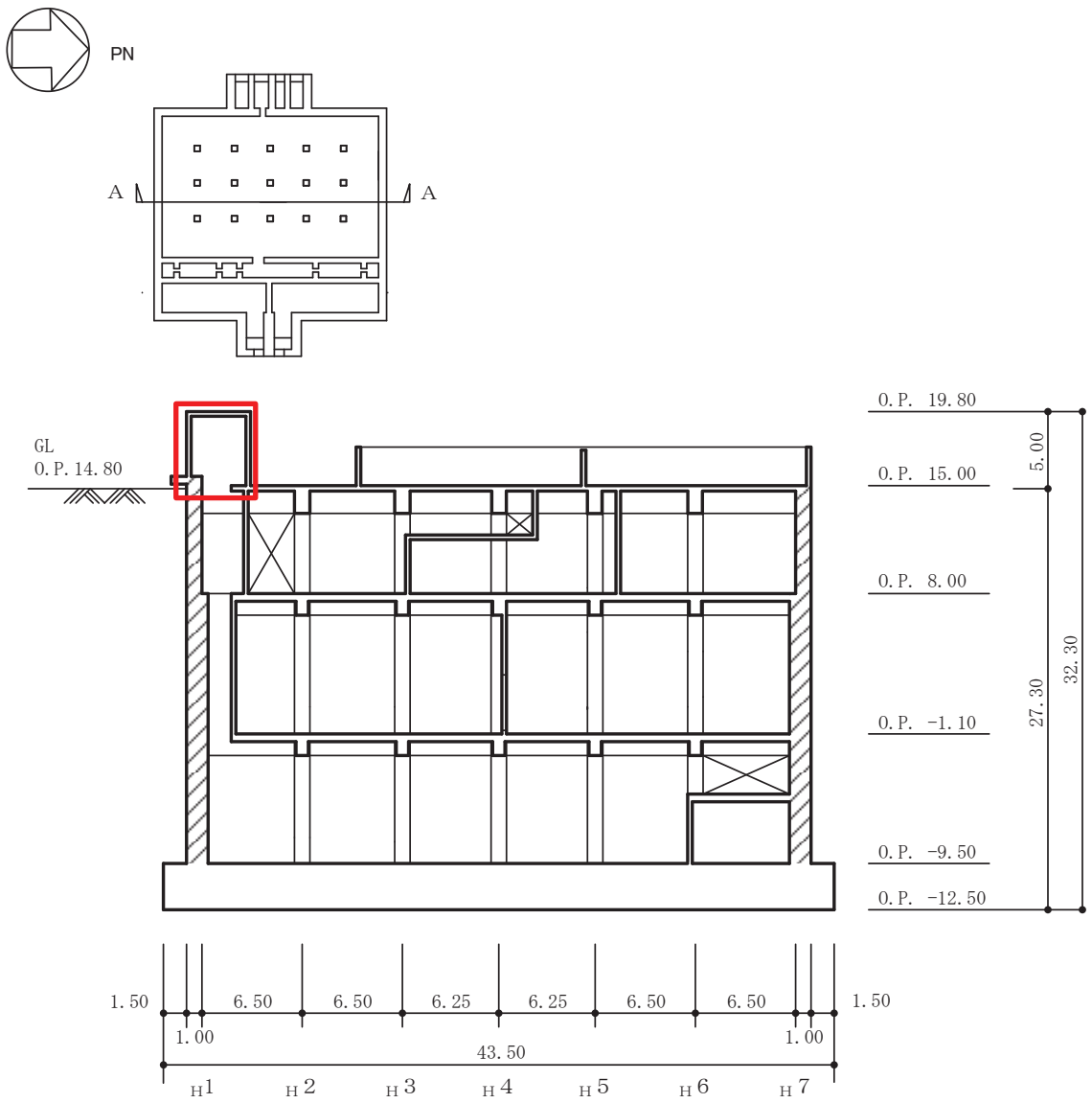
注記\*：建屋寸法は壁外面押えとする。



(単位 : m)

: ペントハウス

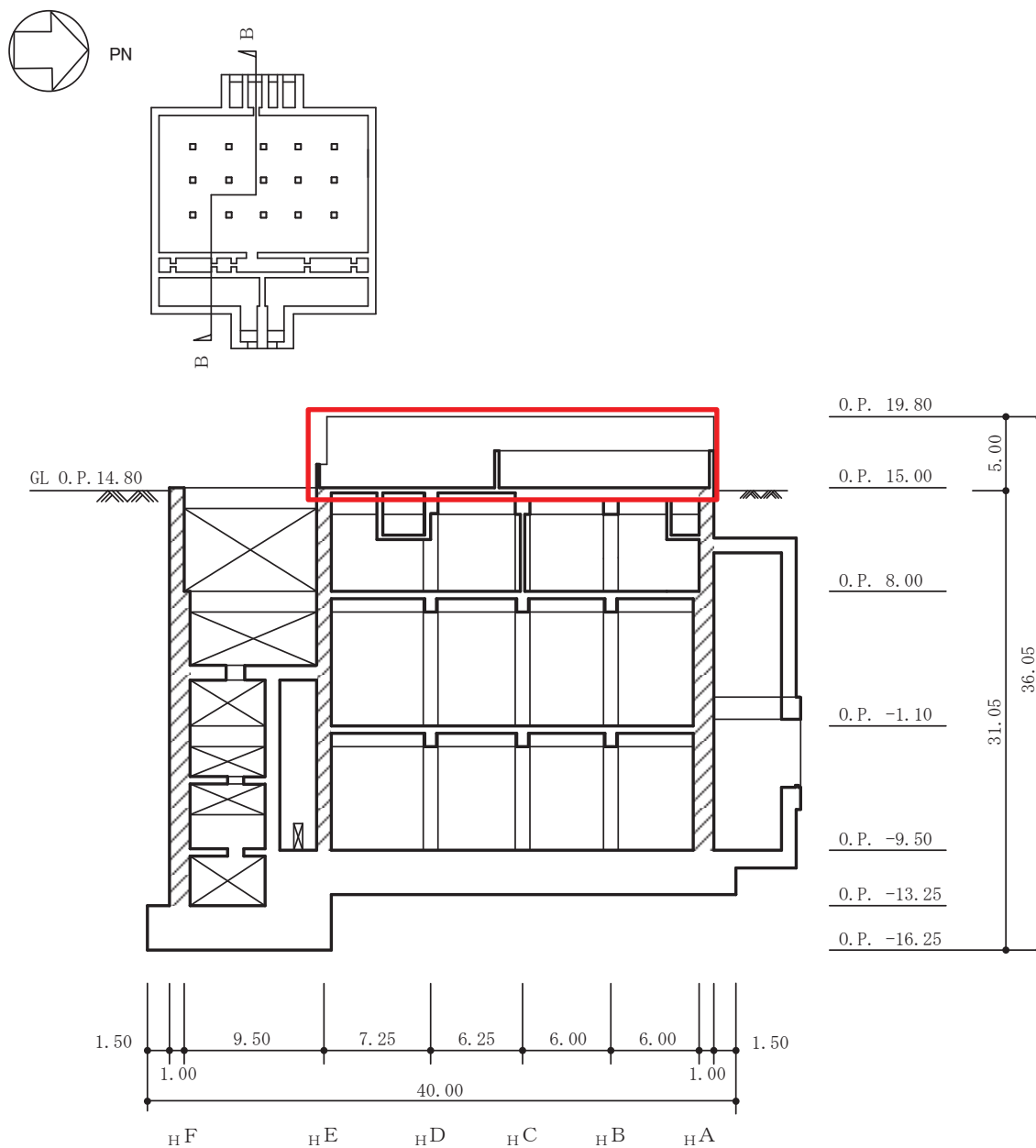
図 2-1 第 3 号機海水熱交換器建屋の概略平面図 (0.P. 15.0m)



(単位 : m)

: ペントハウス

図 2-2(1) 第 3 号機海水熱交換器建屋の概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)



(単位：m)

: ペントハウス

図 2-2(2) 第 3 号機海水熱交換器建屋の概略断面図 (B-B 断面 EW 方向)

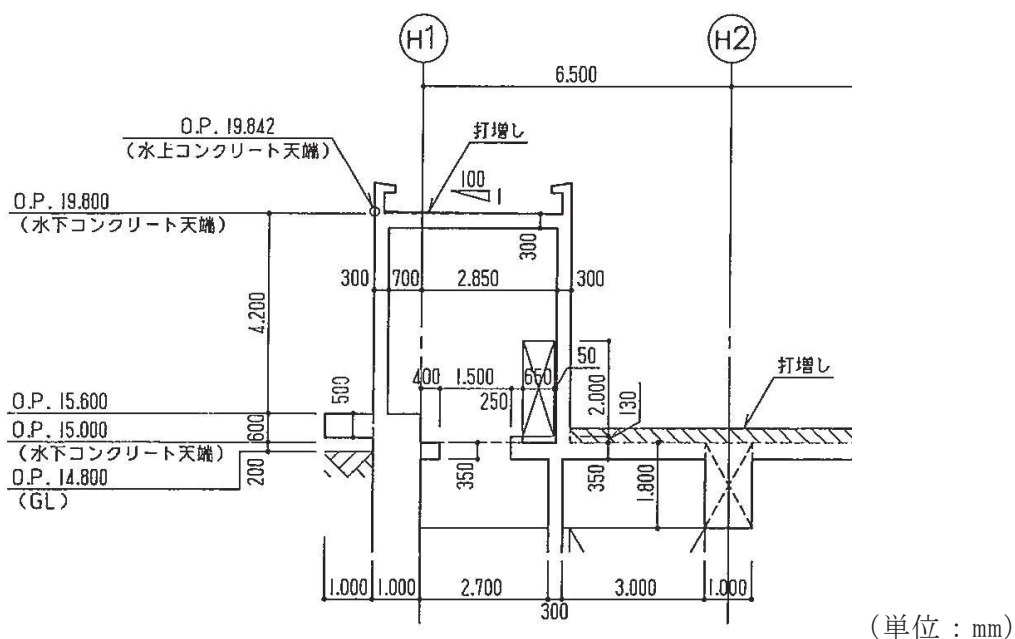


図 2-2(3) 第 3 号機海水熱交換器建屋の概略断面図 (ペントハウス NS 方向詳細図)

### 3. 解析モデル

ペントハウスは地上 1 階建てであることから、ペントハウスの評価に当たっては、屋根スラブには集中質量を、剛性としてはせん断剛性を持つ、せん断 1 質点系としてモデル化を行う。

ペントハウスの解析モデルを図 3-1 に、使用材料の物性値を表 3-1 に示す。なお、第 3 号機海水熱交換器建屋の地震応答解析モデルと同様に、耐震壁の初期剛性の低下を考慮する。耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数を表 3-2 に示す。

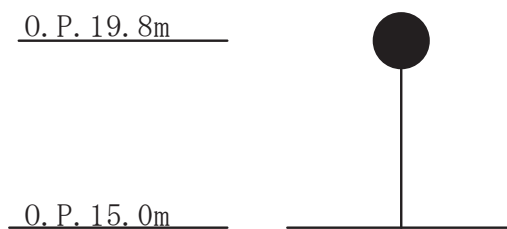


図 3-1 ペントハウスの解析モデル

表 3-1(1) 使用材料の物性値 (コンクリート)

使用材料	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
コンクリート : F <sub>c</sub> = 330kgf/cm <sup>2</sup>	2.65×10 <sup>4</sup>	1.14×10 <sup>4</sup>	5

表 3-1(2) 使用材料の物性値 (鉄筋)

使用材料	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋 : SD345	345

表 3-2 耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数

部位	方向	補正係数
ペントハウス	NS	0.80
	EW	0.80



#### 4. 固有周期の算出

図 3-1 に示す解析モデルを用いて固有周期 T を算出した。

$$T = 2\pi \cdot (m/k)^{1/2}$$

ここで、

m : 質量 (kg)

k : せん断剛性 (N/m)

$$k = (G \cdot A_s) / L$$

G : せん断弾性係数 (N/m<sup>2</sup>)

A<sub>s</sub> : せん断断面積 (m<sup>2</sup>)

L : 階高 (m)

固有周期の算出に用いたペントハウスのせん断断面積の評価範囲を図 4-1 に、質点重量の評価範囲を図 4-2 に示す。また、固有周期の算出結果を表 4-1 に示す。

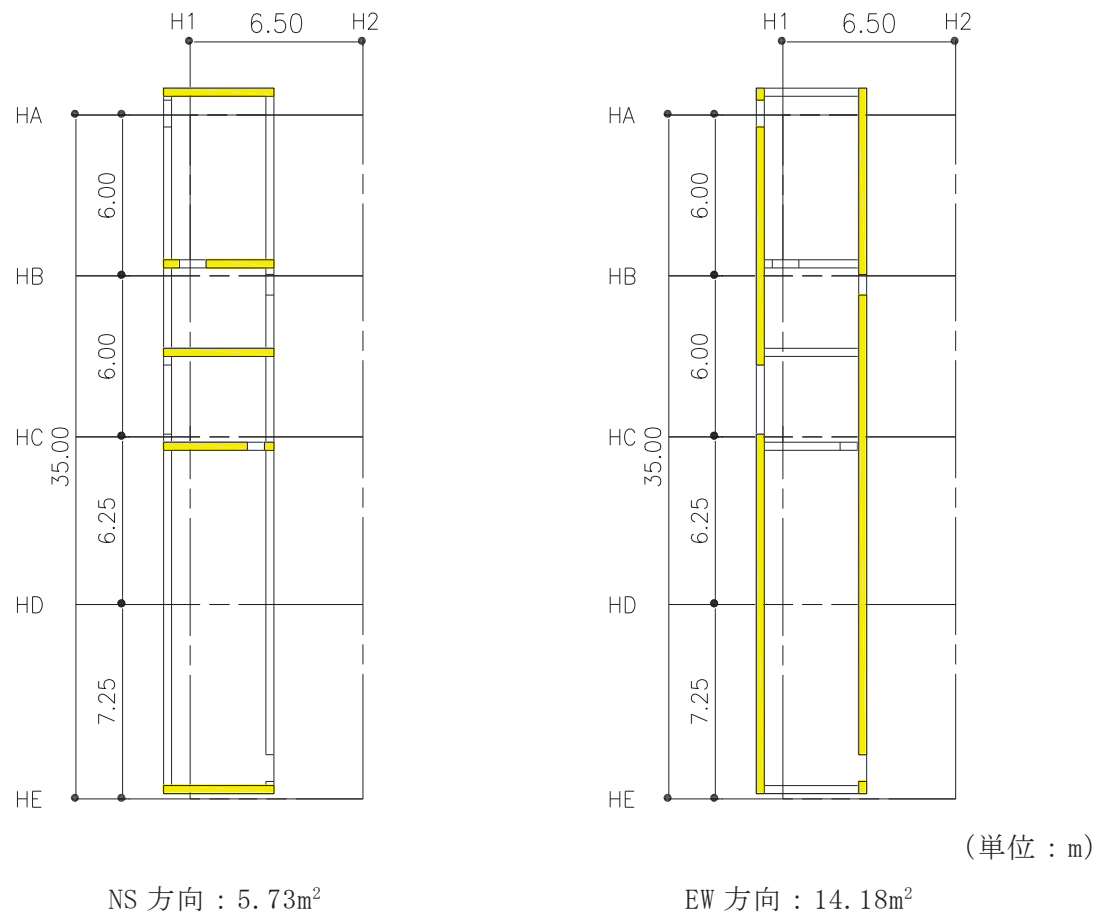
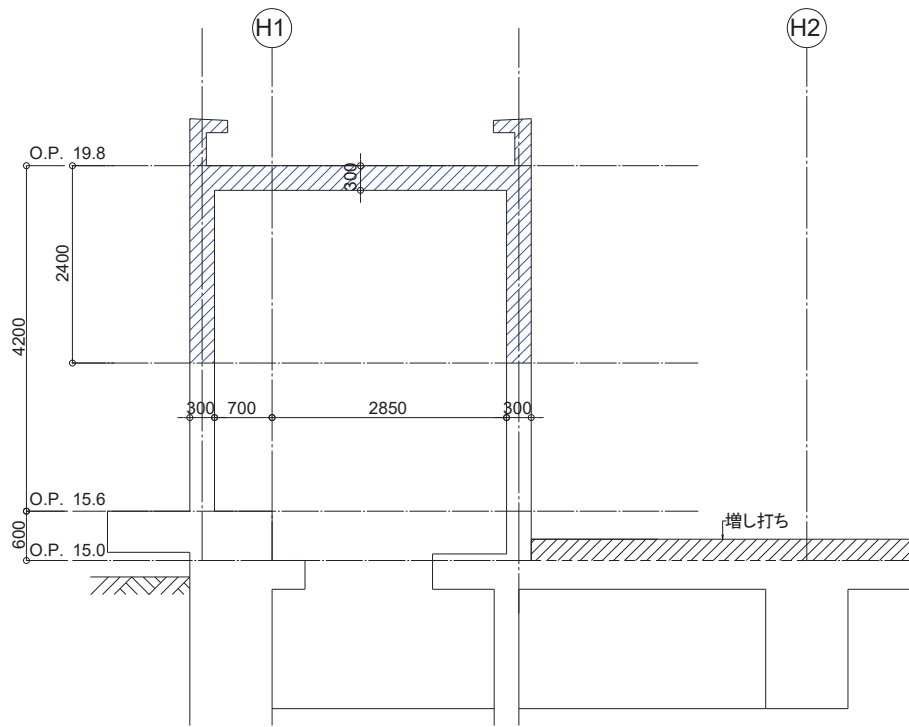


図 4-1 ペントハウスのせん断断面積の評価範囲



(単位：m)

図 4-2 ペントハウスの質点重量の評価範囲

表 4-1 に示すとおり，ペントハウスの固有周期は NS 方向及び EW 方向とも 0.05 秒 (20Hz) を下回ることから，剛構造物であることを確認した。

表 4-1 固有周期の算出結果

方向	重量 m (kg)			せん断 弾性係数 G ( $\times 10^{10} \text{N/m}^2$ )	せん断 断面積 $A_s$ ( $\text{m}^2$ )	階高 L (m)	固有周期 T (s)
	ペント ハウス	鉄骨 架構*	合計				
NS	233,000	6,000	239,000	0.912	5.73	4.8	0.029
EW	233,000	6,000	239,000	0.912	14.18	4.8	0.019

注記\*：浸水防止蓋を固定する鉄骨架構の重量 12,000kg のうち半分を考慮した。

5. 面内せん断力に対する健全性

ペントハウスの外壁の面内せん断力に対する健全性の確認として、基準地震動  $S_s$ （以下「 $S_s$ 地震時」という。）による地震荷重に対する評価を行う。評価は、添付書類「VI-2-2-29 第3号機海水熱交換器建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとし、 $S_s$ 地震時のせん断応力度が、せん断スケルトンカーブ上の第1折れ点を下回ることを確認する。なお、「4. 固有周期の算出」のとおりペントハウスは剛構造物であることから、水平震度の増幅は考慮しない。

評価結果を表5-1に示す。表5-1より、 $S_s$ 地震時におけるせん断応力度がせん断スケルトンカーブ上の第1折れ点を下回ることから、ペントハウスの外壁は $S_s$ 地震時の面内せん断力に対して十分な耐力を有することを確認した。

表5-1 ペントハウスの外壁の面内せん断力に対する評価結果

方向	重量 W (kN)	水平 震度	せん断力 Q (kN)	せん断 断面積 A <sub>s</sub> (m <sup>2</sup> )	せん断 応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリートの 第1折点における せん断応力度 $\tau_1^*$ (N/mm <sup>2</sup> )	検定比	判定
NS	2245	2.46	5679	5.73	1.01	1.84	0.55	可
EW	2245	2.07	4854	14.18	0.35	1.84	0.20	可

注記\*：長期荷重による軸応力を考慮して算出。なお、鉄骨架構の常時荷重については脚部で負担することから、軸応力として考慮しない。