

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-19-0610-11_改4
提出年月日	2021年10月4日

補足-610-11 緊急時対策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-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」及び添付書類「VI-2-2-24 緊急時対策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 1-1 緊急時対策建屋の地震応答解析における解析モデル及び手法

別紙 1-1-1 SRモデルを適用することの妥当性について

別紙 1-1-2 側面回転地盤ばねを考慮した解析結果について

別紙 1-1-3 緊急時対策建屋の鉄骨部の構造詳細

別紙 1-2 緊急時対策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 1-3 緊急時対策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 1-3-1 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 1-3-2 材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果

別紙 1-4 建屋減衰を3%とした場合の影響検討

別紙 1-5 建屋剛性を実強度に基づく剛性とした場合の影響検討

別紙 1-6 影響検討ケースによる機器・配管系の耐震性への影響

別紙 2-1 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 2-2 地震荷重の入力方法

別紙 2-3 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 3-1 緊急時対策所遮蔽についての補足説明資料

別紙 3-1-1 緊急時対策所遮蔽のスラブの固有値解析結果

本日の説明範囲

別紙 1-1-3 緊急時対策建屋の鉄骨部の構造詳細

目 次

1. 緊急時対策建屋の鉄骨部の構造詳細…………… 別紙 1-1-3-1

1. 緊急時対策建屋の鉄骨部の構造詳細

本資料は、緊急時対策建屋の地上2階鉄骨部の構造詳細について、部材断面を説明するものである。緊急時対策建屋の概略断面図を図1-1に、鉄骨柱・鉄骨大げり・鉄骨ブレースの配置概要図を図1-2に、部材リストを図1-3及び図1-4に示す。

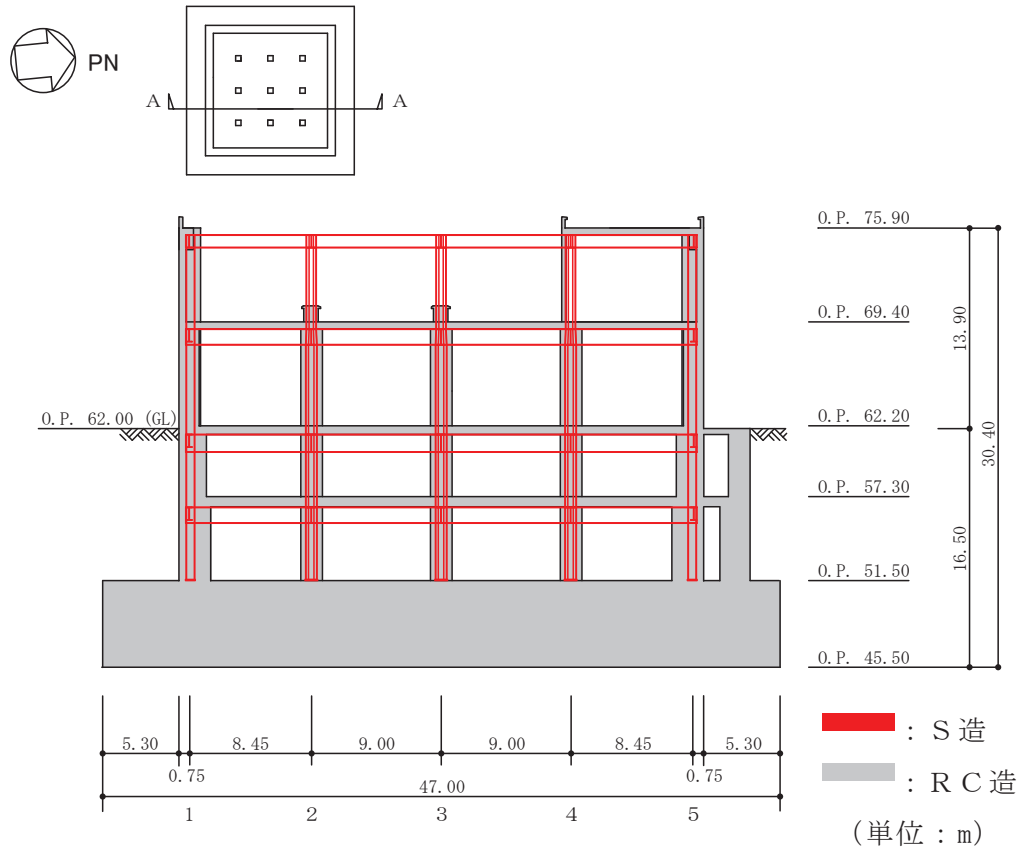


図 1-1 緊急時対策建屋の概略断面図 (A-A 断面)

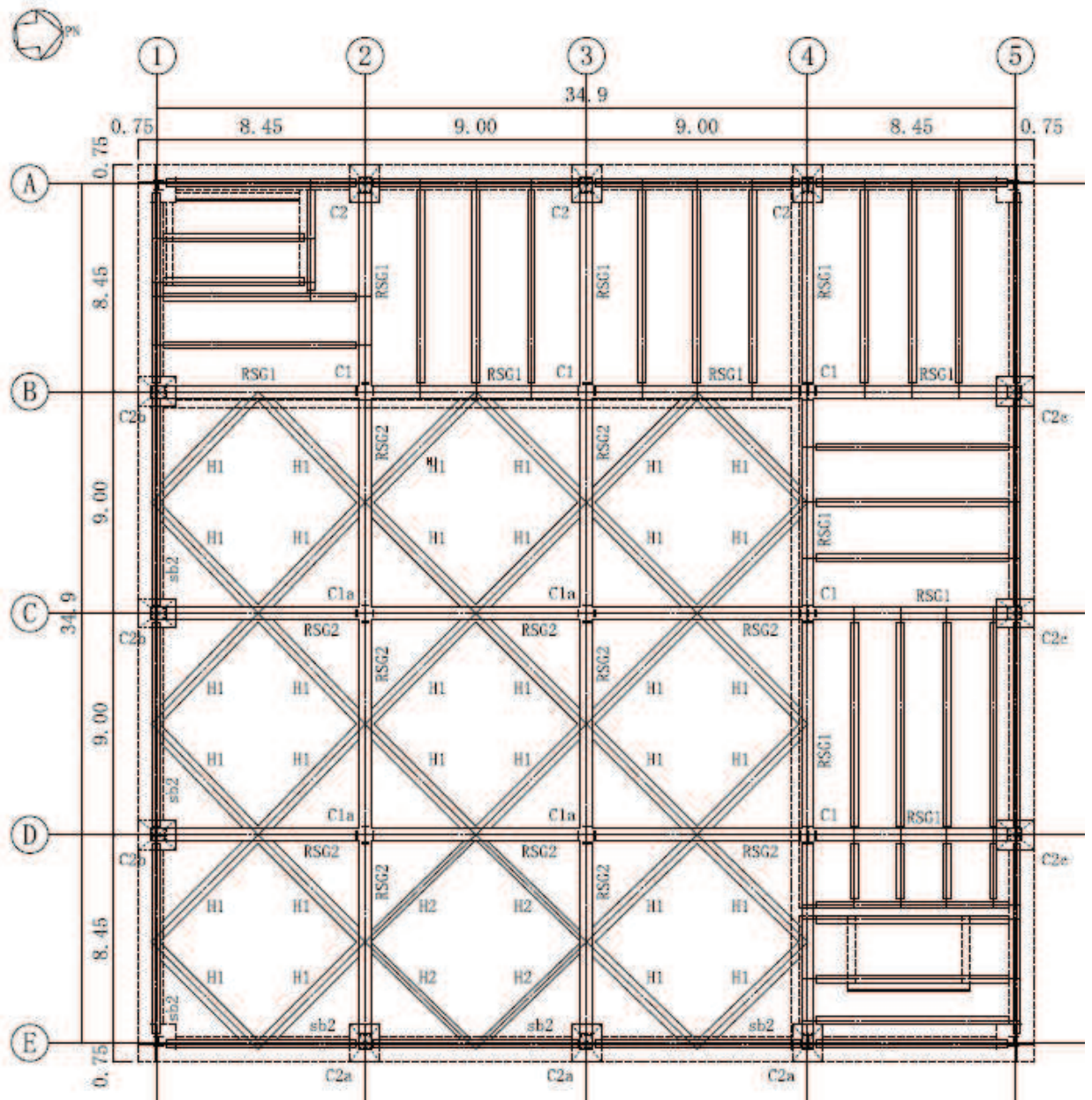


図 1-2 耐震壁及び鉄骨柱・鉄骨大ぶり・鉄骨ブレースの配置概要図 (O.P. 75.90m)

注：O.P. 69.40m には添付書類「VI-2-6-7-7 統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書」において評価している「衛星アンテナ」が設置されており、電波の伝搬に支障のないように O.P. 75.90m の 2-3 通り・D-E 通り間における部材断面を決定している。

柱の断面	階	符 号	C1・C1a	C2	C2a
	断 面				
		主 材	X方向	BH-700×300×22×36	—
	Y方向	BH-700×300×22×36	BH-600×500×28×40	BH-600×500×28×40	
	主 筋	—	I2-D35	I2-D35	
	HOOP	—	D19@100	D19@100	
	備 考	—	形状補助筋 3-D25	形状補助筋 3-D25	
	2階	符 号	C2b	C2c	
	断 面				
		主 材	X方向	BH-600×500×28×40	BH-600×500×28×40
Y方向	—	—	—		
主 筋	I2-D35	I2-D35	I2-D35		
HOOP	D19@100	D19@100	D19@100		
備 考	形状補助筋 3-D25	形状補助筋 3-D25	形状補助筋 3-D25		

図 1-3 部材リスト (柱)

大ぶり・ブレースの断面	階	符 号	RSG1・RSG2	sb2
	断 面			
		主 材	BH-900×500×22×36	BH-700×300×19×36
	2階	符 号	H1	H2
	断 面			
		主 材	BH-700×500×19×32	BH-700×300×32×36

図 1-4 部材リスト (大ぶり・ブレース)

別紙 2-1 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の
考え方

目 次

1. 概要 別紙 2-1-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 別紙 2-1-2

1. 概要

本資料は、緊急時対策建屋基礎版の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

緊急時対策建屋基礎版の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面及び側面の地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。なお，地震時の評価を行うことから，各荷重に共通で動的な地盤物性に基づく地盤ばねを用いる。

(1) 底面地盤ばね

- ・ 水平ばね

振動アドミッタンス理論に基づく水平ばねより算出する。

- ・ 鉛直ばね

基礎浮上りを考慮し，回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミッタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

(2) 側面地盤ばね

- ・ 水平ばね

Novak の手法に基づく水平ばねにより算出する。

- ・ 鉛直ばね

基礎版の埋込み部分については，基礎版の側面と接する部分にマンメイドロックを打設することとしている。地震応答解析モデルでは，保守的な評価となるように側面地盤の回転に対する拘束効果を考慮していないが，応力解析においては地震時の基礎版の転倒に対する拘束効果として側面回転ばねを考慮する。ばね値は Novak の手法に基づく回転ばねにより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

- ・ はり要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し，曲線部材がある場合は，その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。更に，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

- ・ シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重条件より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1：2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1：3 程度までで，分割に際し

ては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面板構造の場合は、平板要素や軸対称シェル要素の大きさは、集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10~20 分割すると適切な応力分布が求められ、構造物の半径 (R) と板厚 (t) が考慮されている。また、面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは、シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり、応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

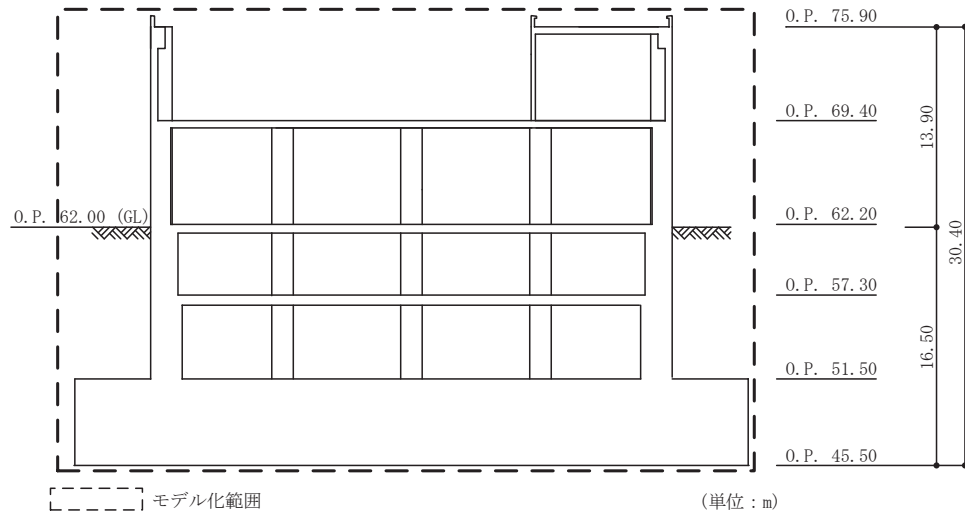
注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (1/3)

モデル概要

○モデル化範囲

- ・基礎版及び基礎版より立ち上がる O. P. 51.5m~O. P. 75.9m の耐震壁をモデル化する。
- ・耐震壁の剛性を境界条件として考慮する。



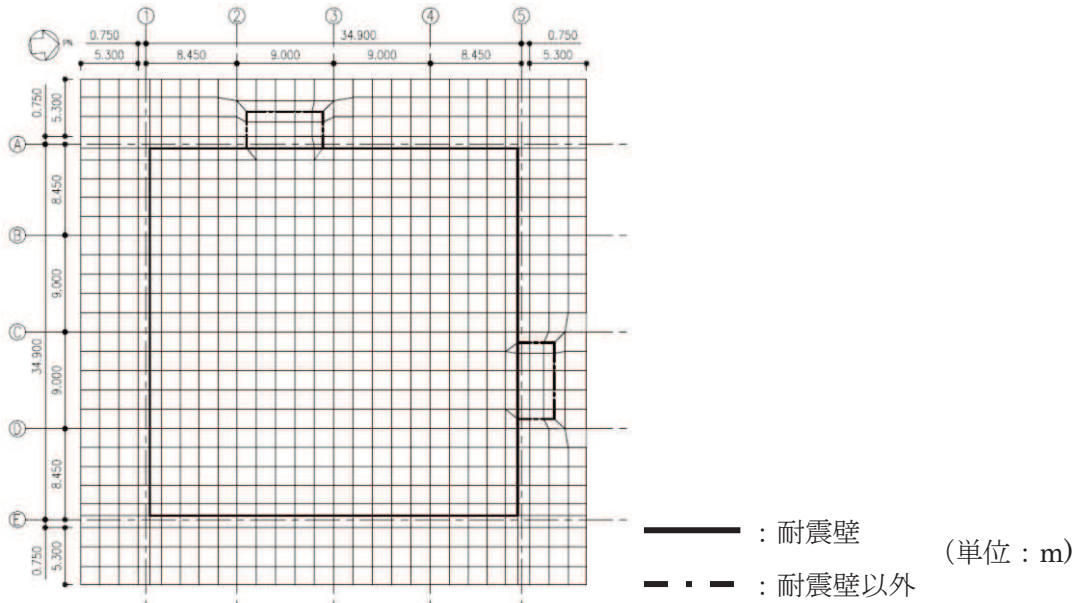
モデル化範囲

○使用要素

- ・基礎版: シェル要素
- ・耐震壁: はり要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 1.5m~2.0m 程度とし, 耐震壁の配置を考慮して分割する。



モデル概要

表 2-1(2) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (2/3)

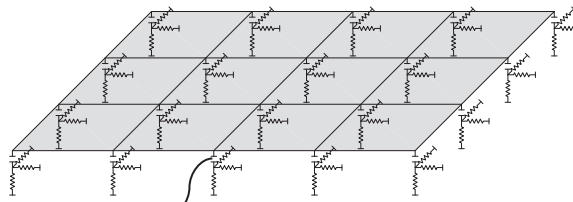
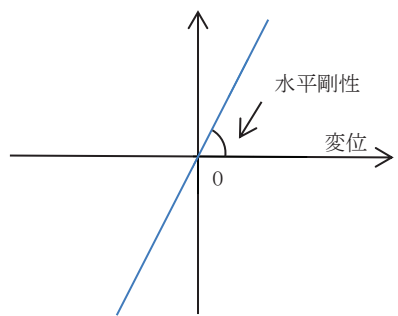
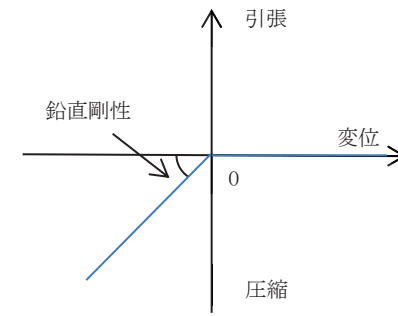
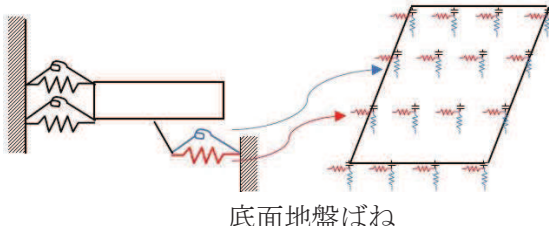
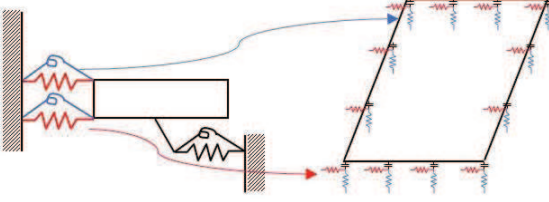
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎版の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎版と上部構造物の境界部においては, 上部構造物の剛性を考慮することで, 基礎版の応力・変形状態を評価する。 	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> 曲げ剛性 (断面二次モーメント) : $I = t \times h^3 / 12$ せん断剛性 (せん断断面積) : $A_s = t \times h$ 	<ul style="list-style-type: none"> t : 壁の厚さ h : モデル化する壁の高さ
基礎スラブと地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 地震時の評価については, 基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け, 基礎スラブと底面地盤との間の剥離 (基礎スラブの浮上り) を考慮する。 	 <p style="text-align: center;">ギャップ要素</p> <p style="text-align: center;">モデル概要</p>
○ギャップ要素	
鉛直ばねに引張力が発生した際に, 水平剛性及び鉛直剛性をゼロとし, 浮上りを考慮する。	
<p style="text-align: center;">水平ばね応力</p>  <p style="text-align: center;">(a) 水平剛性</p>	<p style="text-align: center;">鉛直ばね応力</p>  <p style="text-align: center;">(b) 鉛直剛性</p>
注: 鉛直ばねに引張力が発生した場合には, 水平剛性もゼロとする。	
ギャップ要素の概念図	

表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (3/3)

境界条件, 拘束条件
<p>基礎スラブと地盤の境界</p> <p>添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」における地震応答解析モデルでは側面水平地盤ばねのみを考慮し、保守的に側面回転地盤ばねは考慮しないが、基礎版の応力解析モデルにおいては、基礎版側面をマンメイドロックで埋戻すことを踏まえ、側面水平地盤ばねに加えて、鉛直方向に対する拘束効果として側面回転地盤ばねを考慮する。地震応答解析モデルに対して側面回転地盤ばねを考慮しないことの保守性については、「別紙 1-1-2 側面回転地盤ばねを考慮した解析結果について」に示す。</p> <p>○底面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 水平剛性：振動アドミタンス理論による水平ばね K_H を節点支配面積 A_i で離散化。 $K_{Hi} = (K_{H\ NS} / A + K_{H\ EW} / A) / 2 \times A_i \quad A: \text{基礎スラブの底面積}$ 鉛直剛性：地震時は、転倒モーメントが支配的となるため振動アドミタンス理論による回転ばね K_R を節点支配面積 A_i で離散化。 $K_{Vi} = (K_{R\ NS} / I_{NS} + K_{R\ EW} / I_{EW}) / 2 \times A_i \quad I: \text{基礎スラブの断面二次モーメント}$  <p style="text-align: right;">基礎スラブ底面全体で 離散化</p> <p style="text-align: center;">底面地盤ばね</p> <ul style="list-style-type: none"> 基礎版と側面地盤との間には剥離は考慮せず、側面地盤ばねは線形ばねとして設定する。 <p>○側面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 水平剛性：Novak の手法に基づく側面水平地盤ばね定数 ${}_sK_s$ を節点支配長さ L_i で離散化。 ${}_s k_{s_i} = ({}_s K_s / (2 \times L_{NS} + 2 \times L_{EW})) \times L_i$ $L_{NS}: \text{基礎スラブ辺長 (NS 方向)}, L_{EW}: \text{基礎スラブ辺長 (EW 方向)}$ 鉛直剛性：Novak の手法に基づく側面回転地盤ばね定数 ${}_sK_r$ を節点支配長さ L_i で離散化。 ${}_s k_{v_i} = ({}_s K_r / I'_{NS} + {}_s K_r / I'_{EW}) / 2 \times L_i$ $I'_{NS(EW)} = L_{EW(NS)} \times L_{NS(EW)}^2 / 2 + L_{NS(EW)}^3 / 6$  <p style="text-align: right;">基礎スラブ外周で 離散化</p> <p style="text-align: center;">側面地盤ばね</p>

別紙 3-1 緊急時対策所遮蔽についての補足説明資料

目 次

1. 概要 別紙 3-1-1
2. 評価方針 別紙 3-1-1
3. 評価部位の選定 別紙 3-1-1

別紙 3-1-1 緊急時対策所遮蔽のスラブの固有値確認結果

1. 概要

本資料は、添付資料「VI-2-8-4-5 緊急時対策所遮蔽の耐震性についての計算書」に示す緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの応力解析における断面の評価部位の選定について示すものである。

2. 評価方針

床スラブ及び屋根スラブについては、スラブ周辺の境界条件を考慮して四辺固定版として評価する。

3. 評価部位の選定

選定部位については、B1F (O. P. 57. 30m) 及び 1F (O. P. 62. 20m) の床スラブ及び屋根スラブに相当する 2F (O. P. 69. 40m) において、スラブの設計荷重及び大ばり・小ばりの支持スパンを考慮した場合に、断面評価上最も厳しくなる部位とした。

緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの設計荷重（積載荷重 P）を図 3-1 に、評価における荷重の組合せケースを表 3-1 に、緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの位置及び断面の評価位置を図 3-2～図 3-4 に、スラブ厚及び配筋一覧を表 3-2～表 3-4 に示す。

各評価項目の検定値一覧を表 3-5 に、断面力評価が最も厳しくなる評価位置及び断面の評価結果を図 3-5 に示す。

A	1	2	3	4	5
		3.6	5.2	4.9	4.1
B		8.0	7.2	7.2	4.4
C		7.6	6.6	6.7	4.9
D		7.8	7.5	7.8	4.1
E					

(単位 : kN/m²)

(a) B1F O.P. 57.30m

A	1	2	3	4	5
		3.6	10.0	5.4	4.2
B		7.0	8.2	6.0	8.7
C		7.1	7.9	7.9	7.8
D		4.5	8.6	12.2	3.4
E					

(単位 : kN/m²)

(b) 1F O.P. 62.20m

A	1	2	3	4	5
		3.3	5.0	7.3	10.1
B		5.1	11.9	5.9	5.7
C		4.2	3.9	6.5	6.1
D		2.3	8.1	4.8	3.7
E					

(単位 : kN/m²)

(b) 2F O.P. 69.40m

図 3-1 緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの設計荷重 (積載荷重 P)

表 3-1 荷重の組合せケース

外力の状態	荷重の組合せ
S s 地震時	$(1 + K_v)(G + P) + P_s$

- G : 固定荷重
 P : 積載荷重
 K_v : 鉛直震度
 P_s : 積雪荷重* (屋根スラブのみ考慮)

注記* : 積雪量は、添付書類「VI-1-1-2-1-1 発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」に基づき、石巻測候所の最深積雪量（1923年2月17日）を考慮して43cm（1cmあたりの積雪荷重：20N/m²）とし、地震時は0.35の係数を乗じて、積雪荷重を0.30kN/m²と算出した。

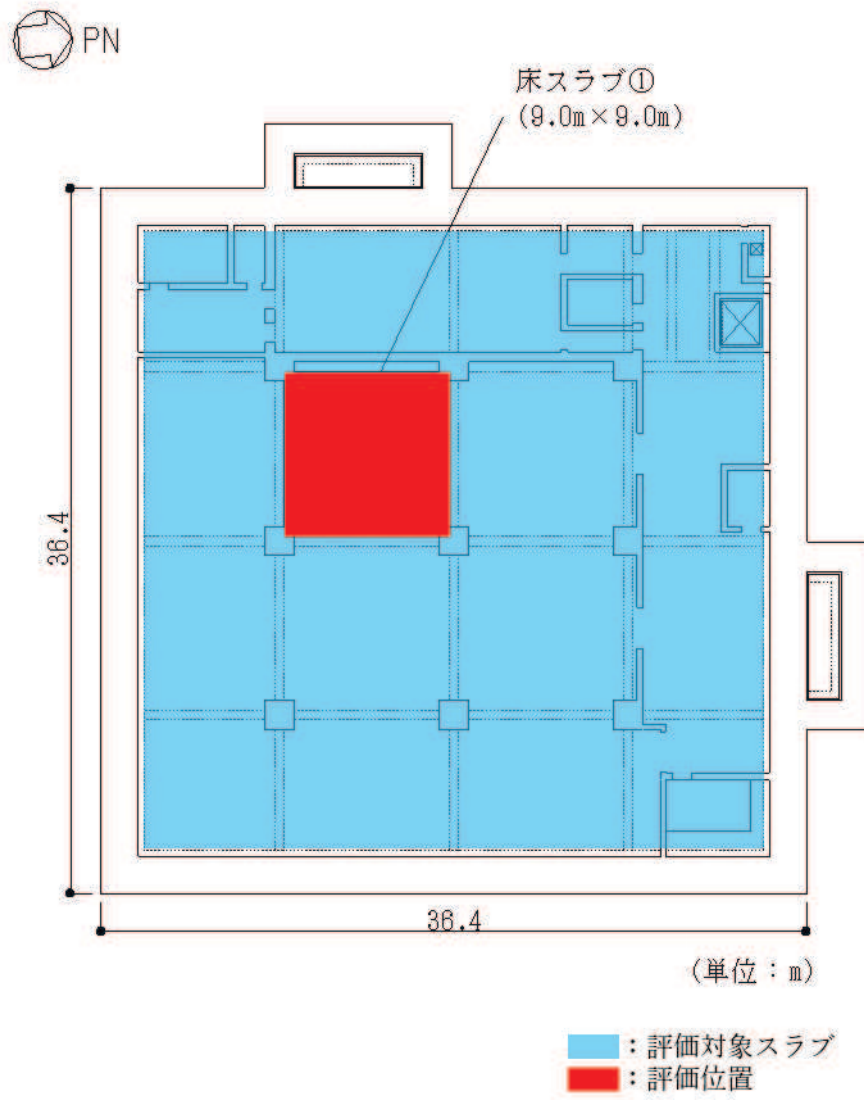


図 3-2 緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの位置及び断面の評価位置
(B1F O.P. 57.3m)

表 3-2 スラブ厚及び配筋一覧 (B1F O.P. 57.30m)

符号	スラブ厚 (mm)	配筋 (上下共)	
		NS 方向	EW 方向
床スラブ①	700	D25@200	D25@200

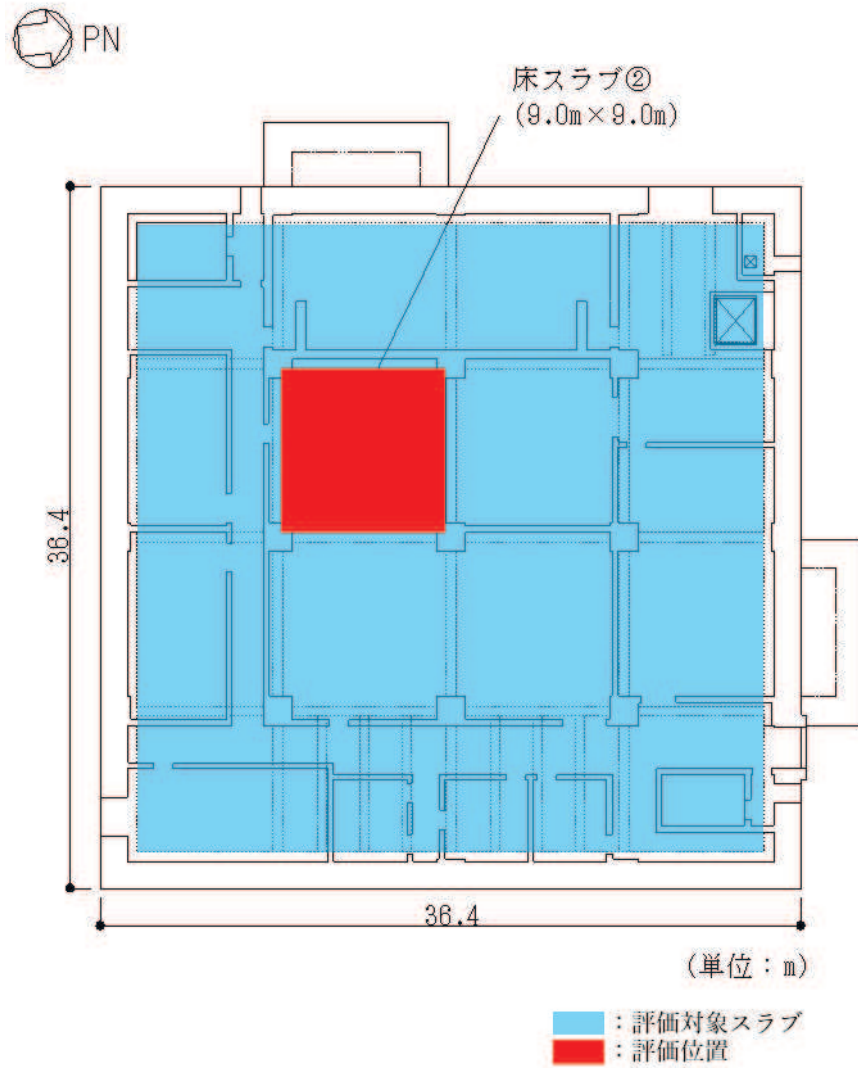


図 3-3 緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの位置及び断面の評価位置
(1F O.P. 62.20m)

表 3-3 スラブ厚及び配筋一覧 (1F O.P. 62.20m)

符号	スラブ厚 (mm)	配筋 (上下共)	
		NS 方向	EW 方向
床スラブ②	600	D25@200	D25@200

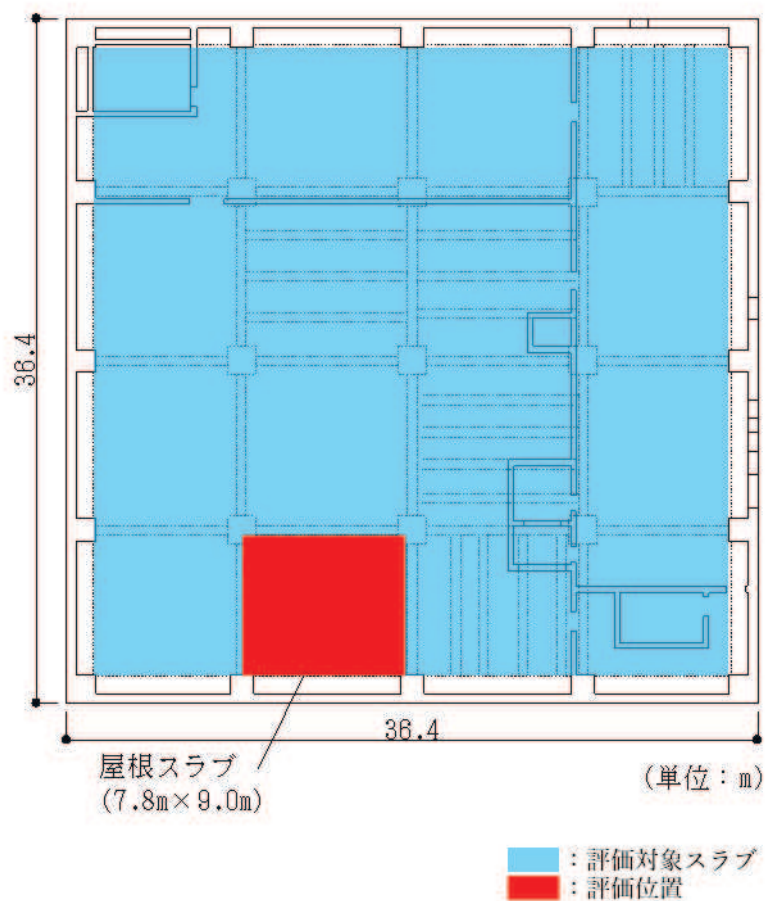


図 3-4 緊急時対策所遮蔽を構成するスラブの位置及び断面の評価位置
(2F O.P. 69.40m)

表 3-4 スラブ厚及び配筋一覧 (2F O.P. 69.40m)

符号	スラブ厚 (mm)	配筋 (上下共)	
		NS 方向	EW 方向
屋根スラブ	500	D32@200	D32@200

表 3-5 各評価項目の検定値一覧

(a) B1F 0. P. 57. 30m

符号	検定値	
	曲げモーメント	せん断力
床スラブ①	0.339	0.18

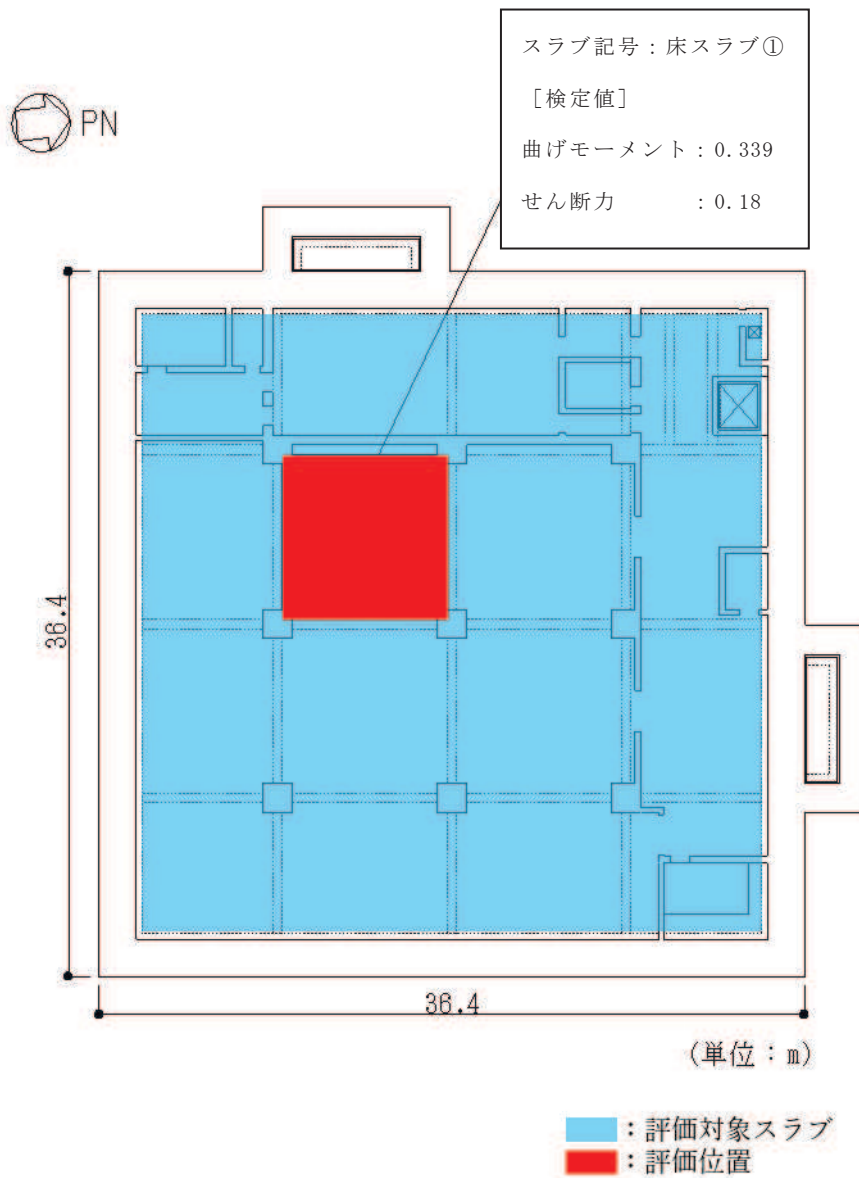
(b) 1F 0. P. 62. 20m

符号	検定値	
	曲げモーメント	せん断力
床スラブ②	0.433	0.26

(c) 2F 0. P. 69. 40m

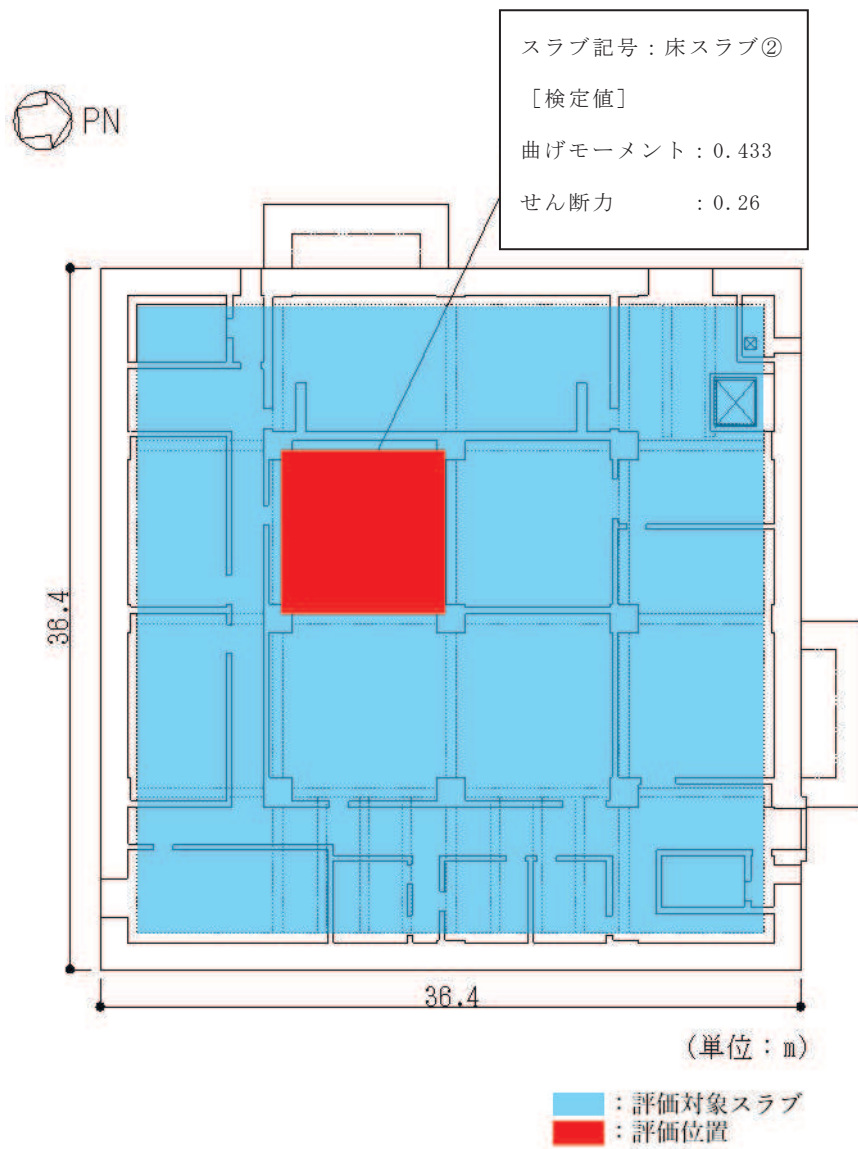
符号	方向	検定値	
		曲げモーメント	せん断力
屋根スラブ	短辺 (EW) 方向	0.420	0.56
	長辺 (NS) 方向	0.329	0.45

注：ハッチングは各評価位置の検定値のうち最も大きい値を表示



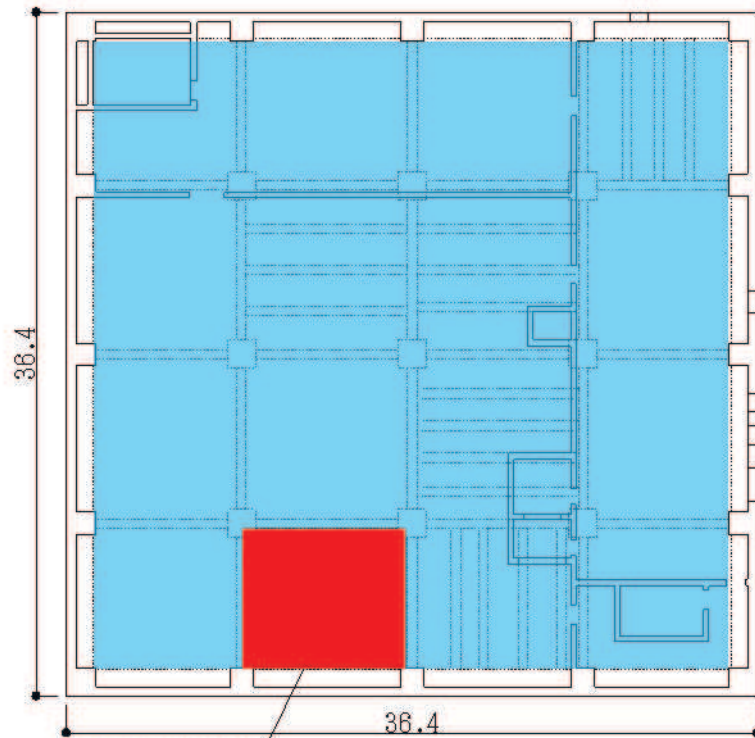
(a) B1F O.P. 57.30m

図 3-5(1) 断面の評価位置及び評価結果(1/3)



(b) 1F O.P. 62.20m

図 3-5(2) 断面の評価位置及び評価結果(2/3)



スラブ記号：床スラブ②	(単位：m)
[検定値]	短辺 (EW) 方向, 長辺 (NS) 方向
曲げモーメント	: 0.420, 0.329
せん断力	: 0.56, 0.45

■ : 評価対象スラブ
■ : 評価位置

(c) 2F 0.P.69.40m

図 3-5(3) 断面の評価位置及び評価結果 (3/3)

別紙 3-1-1 緊急時対策所遮蔽のスラブの固有値解析結果

目 次

1. 概要	別紙 3-1-1-1
2. 評価方針	別紙 3-1-1-2
3. 振動特性の確認	別紙 3-1-1-3
3.1 解析方法	別紙 3-1-1-3
3.2 固有値解析結果	別紙 3-1-1-9

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-2-8-4-5 緊急時対策所遮蔽の耐震性についての計算書」におけるスラブの鉛直地震力に対する耐震評価を補足的に説明するものである。

2. 評価方針

緊急時対策所遮蔽を構成するスラブは遮蔽性を維持するための構成部材の一つであり、基準地震動 S_s による地震力に対し機能維持が求められている。

地震時の機能維持の確認では、当該スラブは十分に剛であるとし、地震荷重は質点系モデルにおいて、当該部が位置する質点の鉛直方向の応答値を用いている。

ここでは、当該スラブの支持条件を適切にモデル化した 3 次元 FEM モデルを用いた固有値解析により当該スラブの振動特性を確認する。

3. 振動特性の確認

3.1 解析方法

評価対象部位の振動性状の確認は、3次元 FEM モデルを用いた固有値解析により行う。

図 3-1 に示す耐震壁及び大ばりで囲まれたスラブの範囲のうち、スラブのスパンに加えて、小梁及び間仕切壁の有無から判断して、鉛直方向地震力による増幅の影響が最も大きいと思われる部位を評価対象部位としてモデル化する。また、大ばりについても幅の半分をモデル化し、はりの柔性の影響を考慮する。解析モデルに使用する FEM 要素は、形状及び厚さを踏まえたシェル要素とする。境界条件は、添付書類「VI-2-8-4-5 緊急時対策所遮蔽の耐震性についての計算書」では、はりもしくは耐震壁に支持されている状況に応じ、4 辺固定版としてモデル化している。本検討における境界条件は、はりの上部もしくは下部に壁がない大ばりは、鉛直方向のみ自由とする。

固有値解析には、解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

材料物性値を表 3-1 に、解析モデルを図 3-2 に示す。

表 3-1 鉄筋コンクリートの物性値

コンクリートの 設計基準強度 F_c (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
30	2.44×10^4	0.2

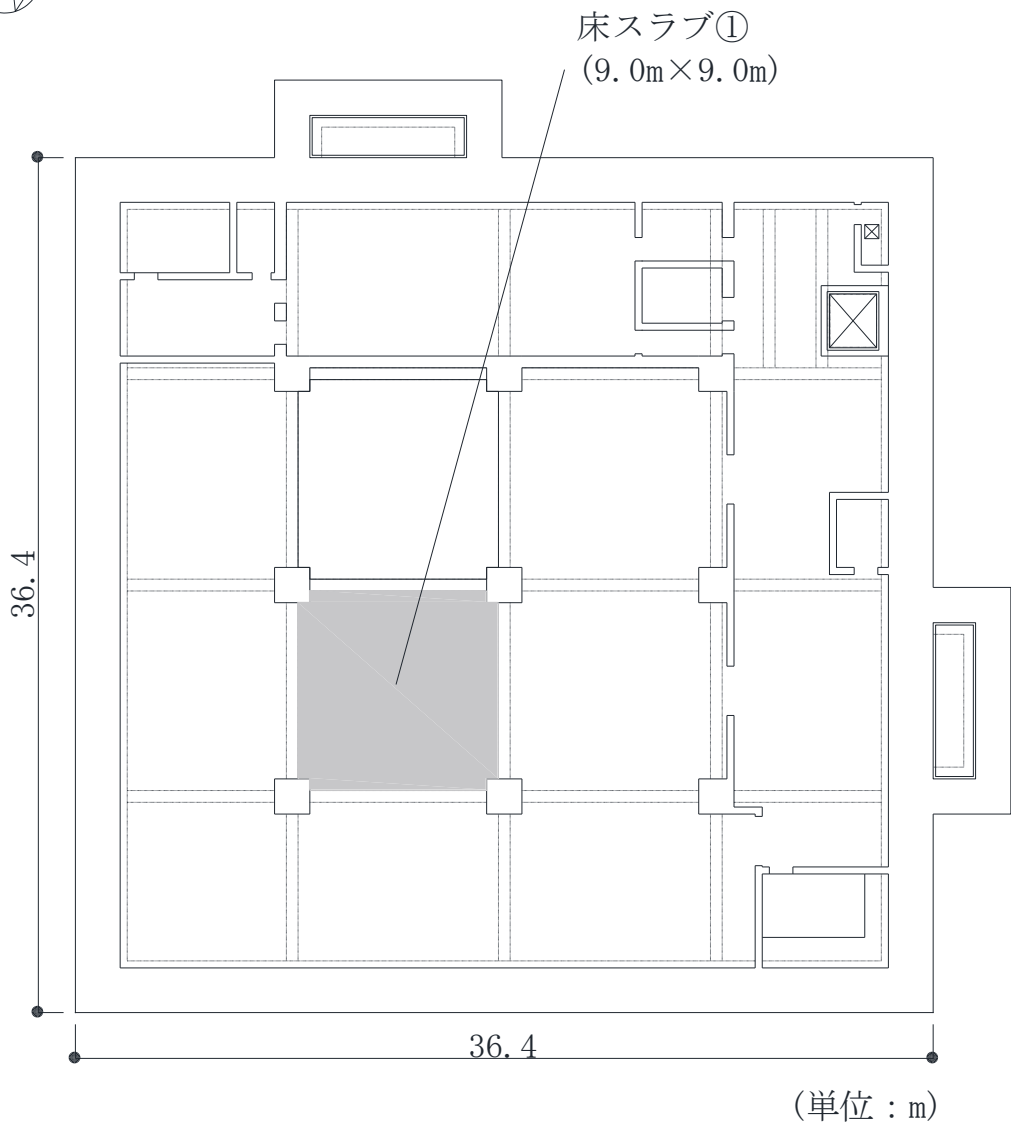


図 3-1(1) スラブの評価を記載する部材の位置 (B1F 0.P. 57.30m)

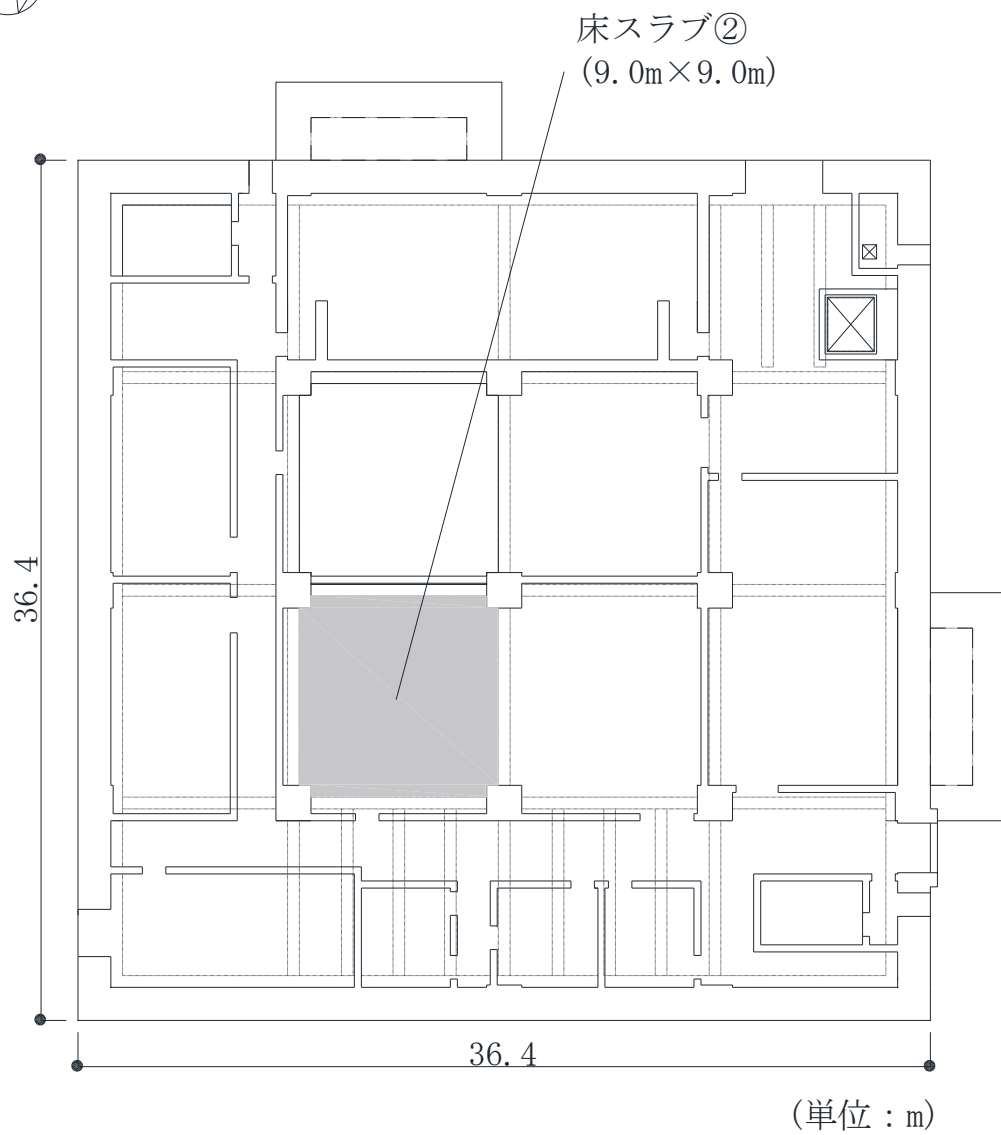


図 3-1(2) スラブの評価を記載する部材の位置 (1F 0.P. 62.20m)

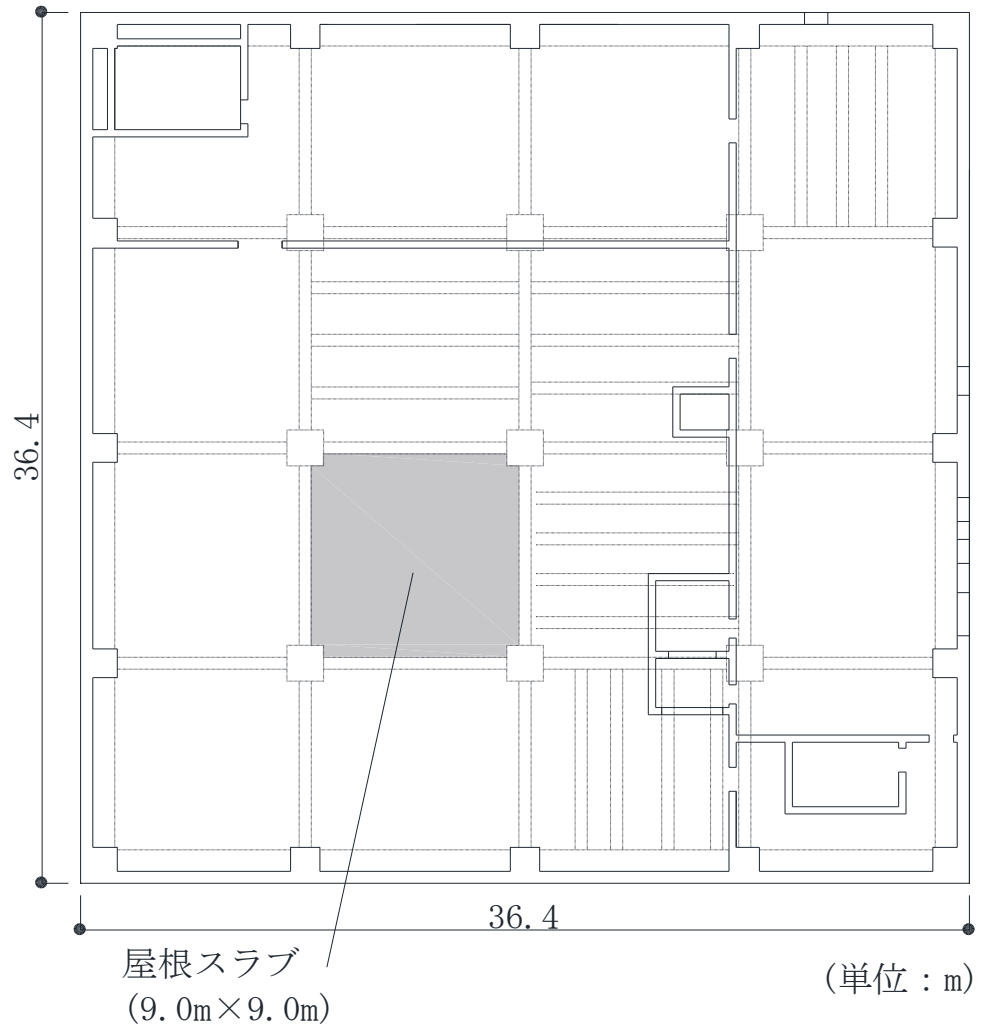
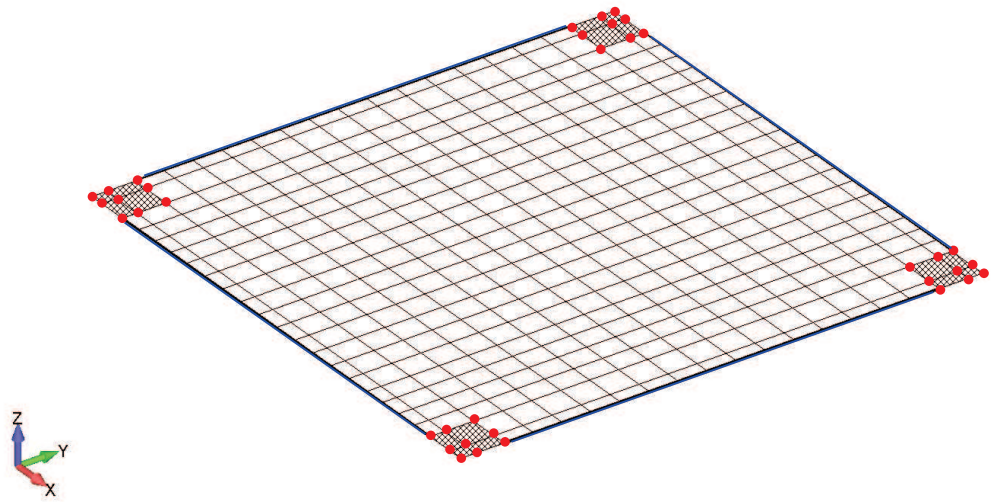
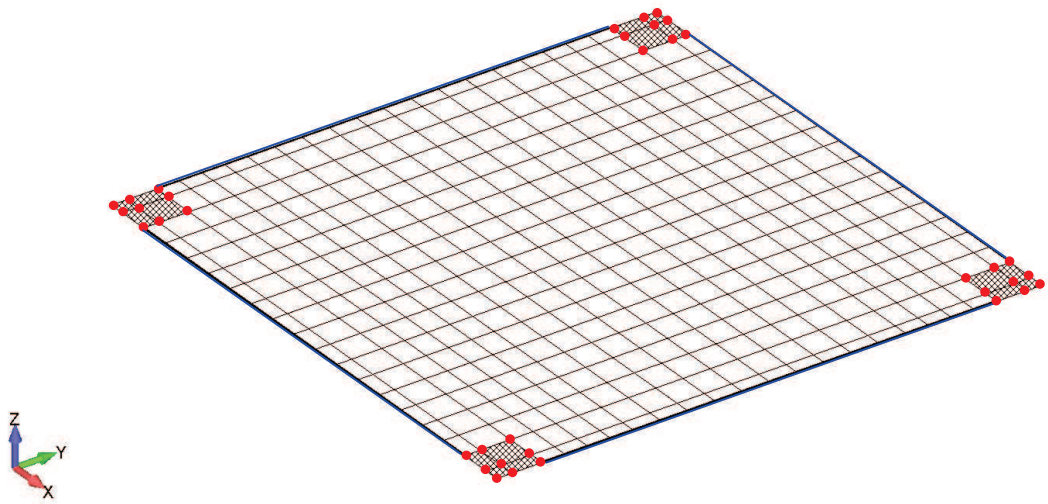


図 3-1(3) スラブの評価を記載する部材の位置 (2F 0.P.64.90m)



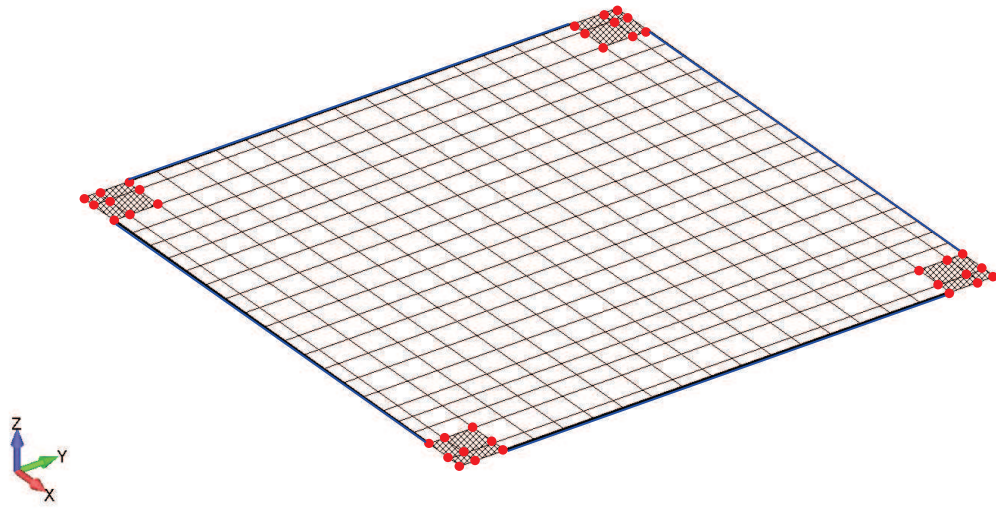
(a) 床スラブ①



(b) 床スラブ②

●, — : 固定 — : 鉛直のみ自由 — : 鉄骨梁
 (ハッチング部は柱の範囲を示す)

図 3-2(1) 解析モデル図



(c) 屋根スラブ

●, — : 固定 — : 鉛直のみ自由 — : 鉄骨梁
 (ハッチング部は柱の範囲を示す)

図 3-2(2) 解析モデル図

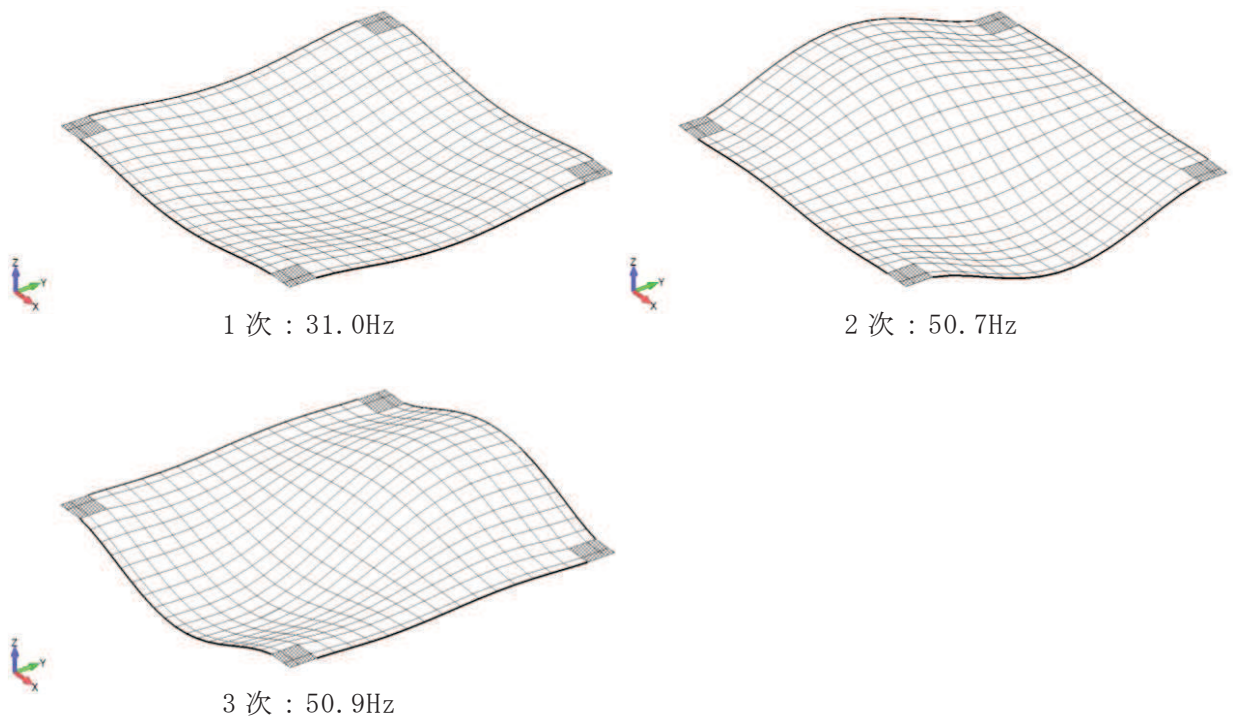
3.2 固有値解析結果

床及び屋根スラブの固有振動数を表 3-2 に、モード図を図 3-3 に示す。

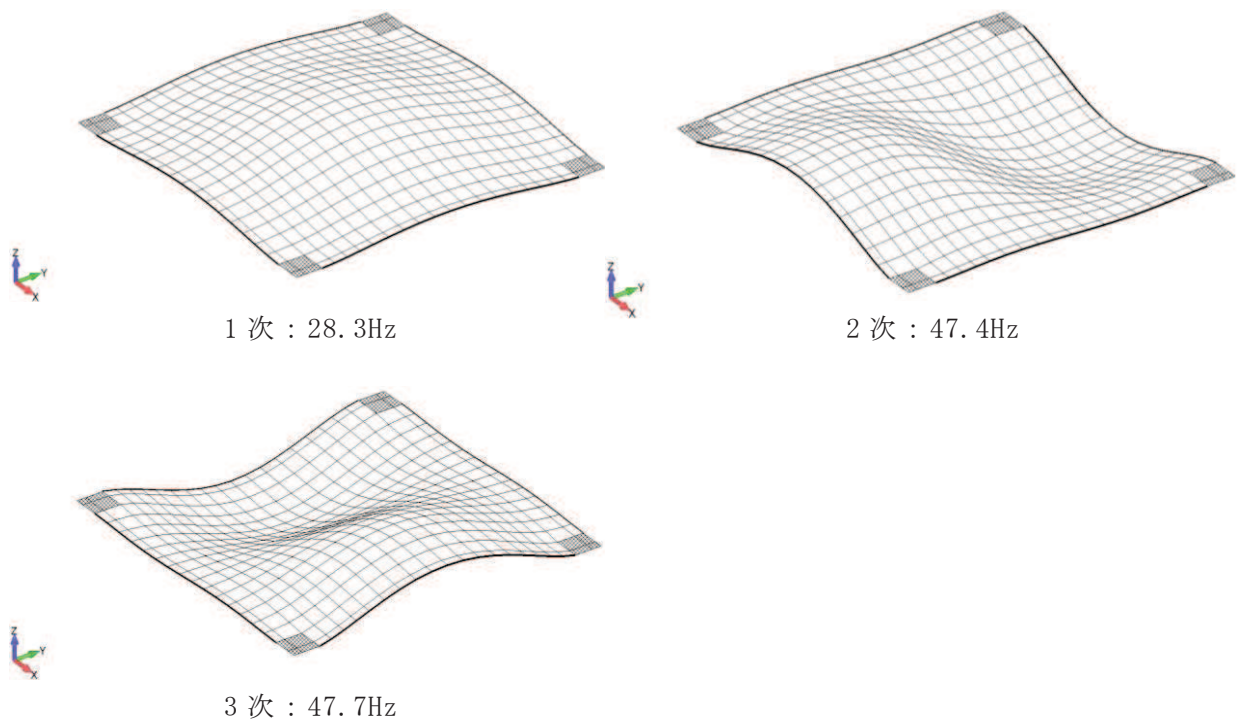
全ての部位で 1 次固有振動数が 20Hz を上回っており、当該部位の応答の増幅は考慮しない。

表 3-2 床及び天井スラブの固有振動数

部 位	次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数
床スラブ①	1 次	31.0	1.67
	2 次	50.7	0.00
	3 次	50.9	0.00
床スラブ②	1 次	28.3	1.72
	2 次	47.4	0.00
	3 次	47.7	0.00
屋根スラブ	1 次	20.7	1.74
	2 次	35.9	0.00
	3 次	36.1	0.00

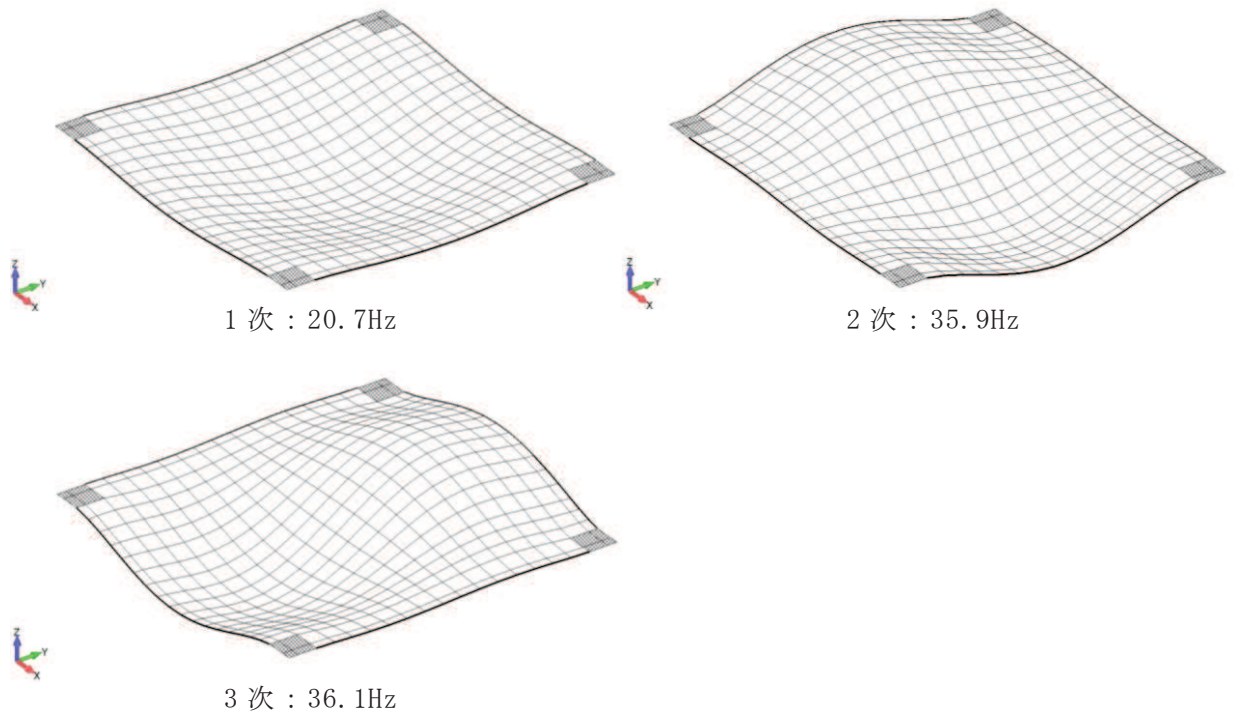


(a) 床スラブ①



(b) 床スラブ②

図 3-3(1) 床及び屋根スラブのモード図 (1/2)



(c) 屋根スラブ

図 3-3(2) 床及び屋根スラブのモード図 (2/2)