

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-026-10 改3
提出年月日	2020年7月22日

中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書に関する補足説明資料

2020年7月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-8-4-3「中央制御室遮蔽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 中央制御室遮蔽他のスラブの耐震性評価

(参考資料1) 計算機プログラム（解析コード）の概要

別紙 1 中央制御室遮蔽他のスラブの耐震性評価

目 次

1. 概要	別紙 1-1
2. 評価方針	別紙 1-2
3. 振動特性の確認	別紙 1-3
3.1 解析方針	別紙 1-3
3.2 固有値解析結果	別紙 1-10
4. 応答増幅の影響評価	別紙 1-15
4.1 評価方法	別紙 1-15
4.2 応力解析方法	別紙 1-15
4.3 評価結果	別紙 1-18

別紙 1-1 天井スラブを支持する鉄骨小ばりの耐震性評価

1. 概要

本資料は、V-2-8-4-3「中央制御室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

中央制御室遮蔽及び中央制御室バウンダリを構成するスラブは遮蔽性及び気密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し、1次固有振動数が 20Hz を下回る場合には、当該スラブの応答増幅について影響評価を行う。

3. 振動特性の確認

3.1 解析方針

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うち、スラブのスパンから判断して、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、V-2-8-4-3「中央制御室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、四辺固定版または両端固定ばりとしてモデル化している。本検討における境界条件は、耐震壁で支持されている範囲は固定とし、下部に壁がない大ばり及び鉄筋コンクリート造の小ばりは、鉛直変位方向のみ自由とする。

固有値解析には、解析コード「MSC NASTRAN」及び「DIANA」を用いる。

使用材料の物性値を表 3-1 及び表 3-2 に、解析モデルを図 3-2 に示す。

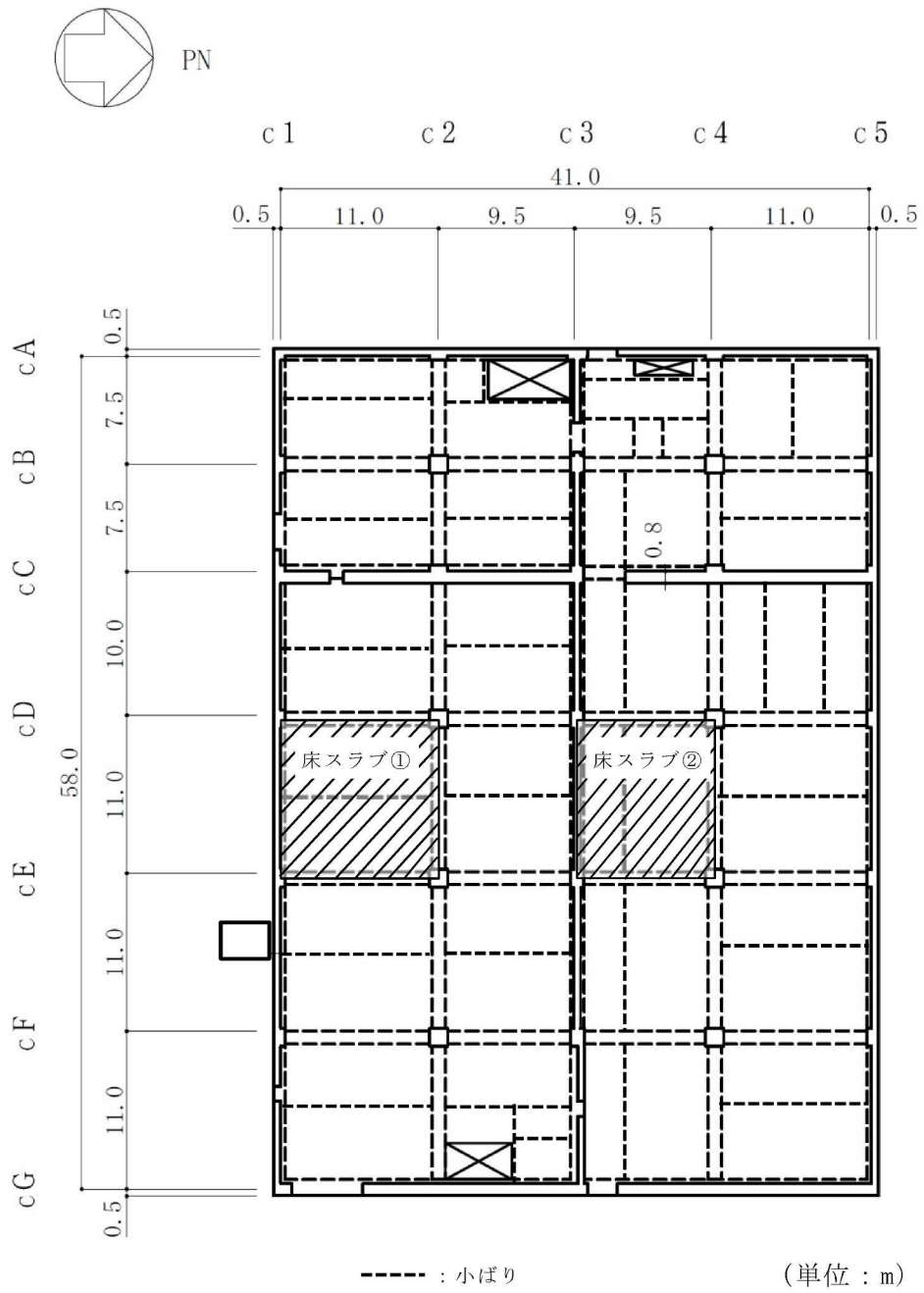
表 3-1 コンクリートの物性値

諸元	物性値
ヤング係数	$2.88 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.2

注：剛性はコンクリートの実強度（ 43.1 N/mm^2 ）に基づく

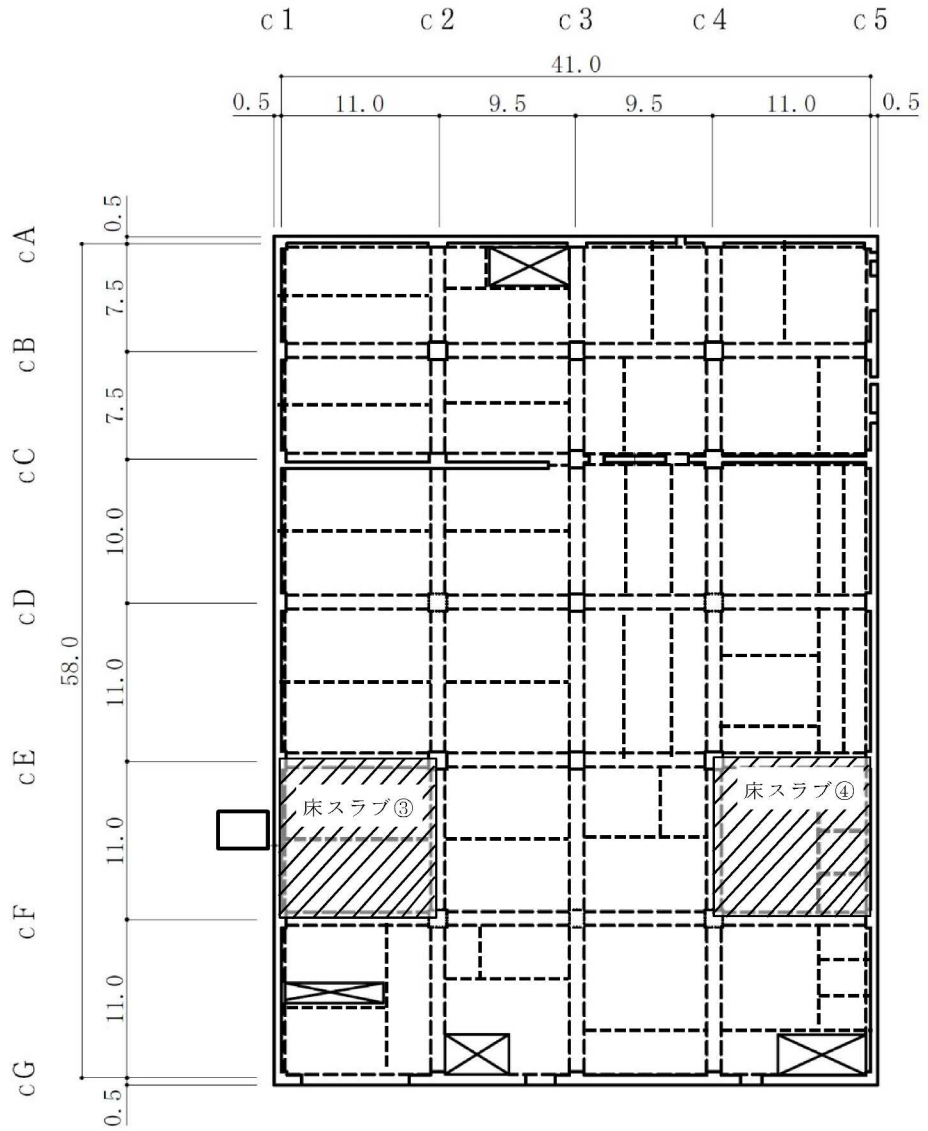
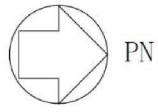
表 3-2 鉄骨の物性値

諸元	物性値
鋼種	SM41A (SM400 相当)
ヤング係数	$2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$



(a) 中央制御室（下部）床スラブ
 (1F, T.M.S.L. 12.3m)

図 3-1 スラブの評価を記載する部材の位置 (1/3)

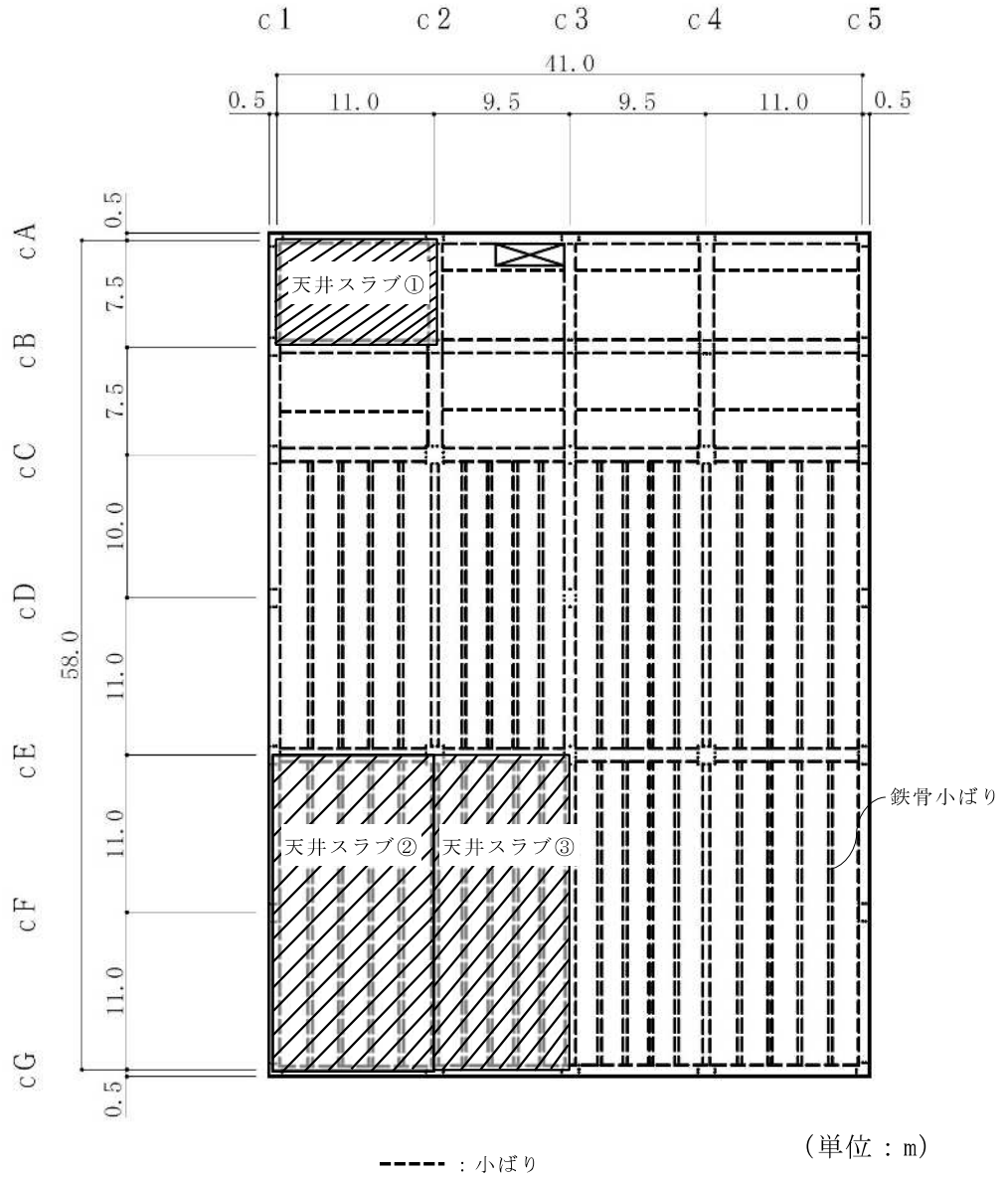
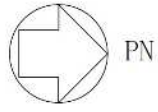


(単位 : m)

(b) 中央制御室 (上部) 床スラブ

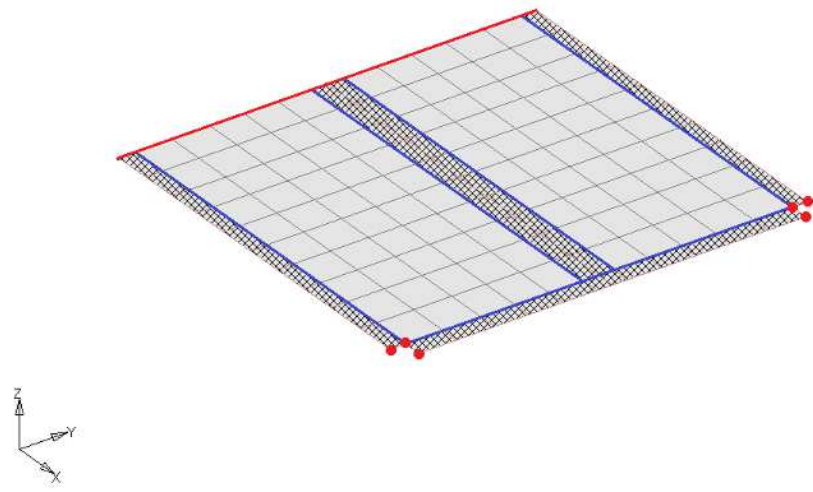
(2F, T. M. S. L. 17.3m)

図 3-1 スラブの評価を記載する部材の位置 (2/3)

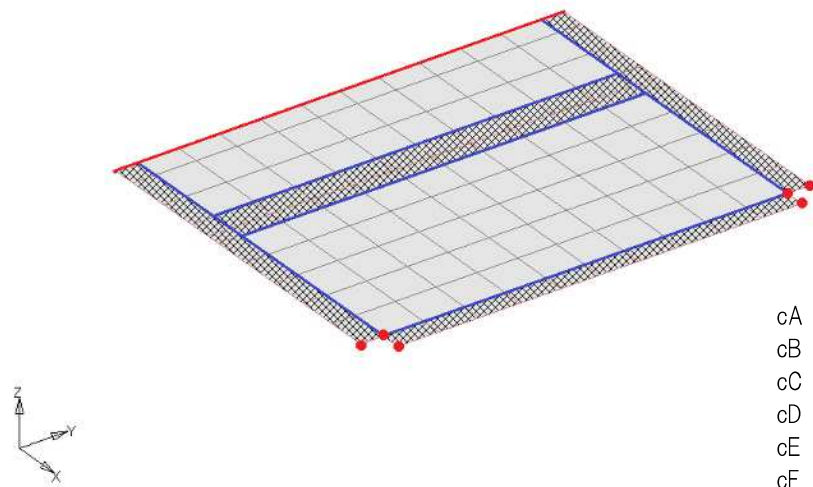


(c) 中央制御室 (上部) 天井スラブ
(RF, T.M.S.L. 24.1m)

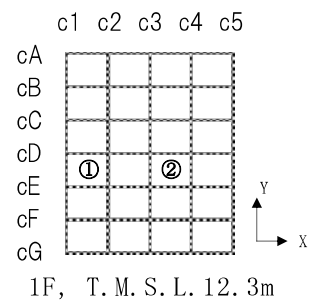
図 3-1 スラブの評価を記載する部材の位置 (3/3)



(a) 床スラブ①

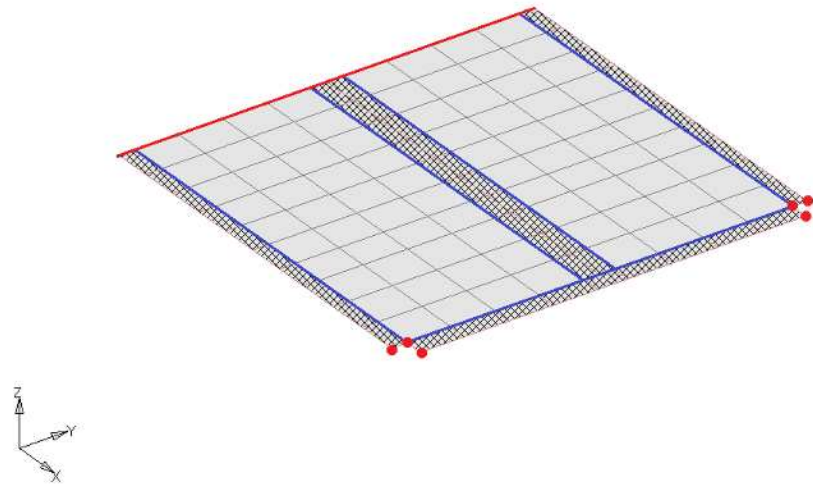


(b) 床スラブ②

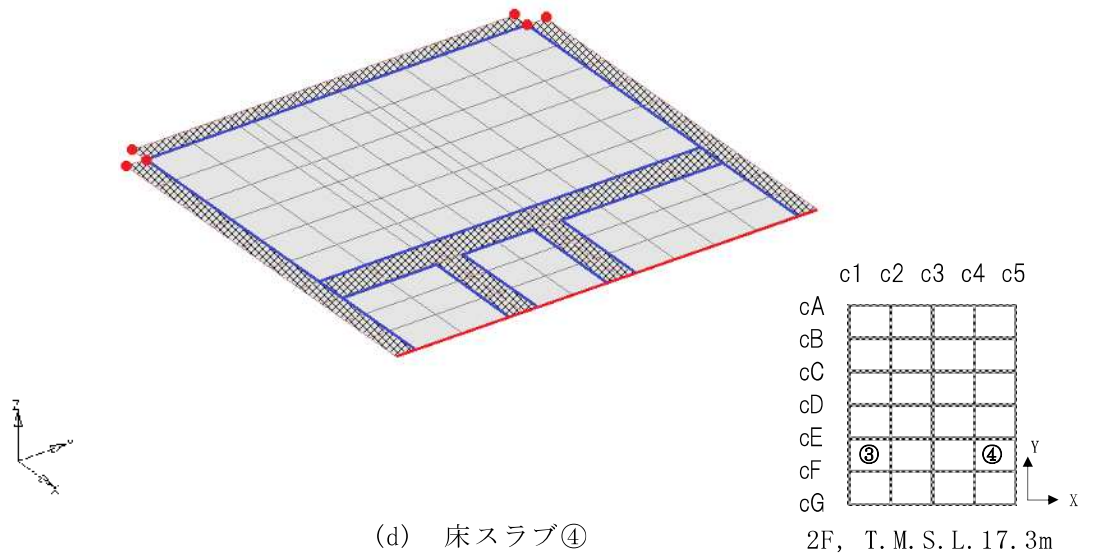


● , — : 固定 — : 鉛直のみ自由 (ハッチング部ははりの範囲を示す)

図 3-2 解析モデル図 (1/3)



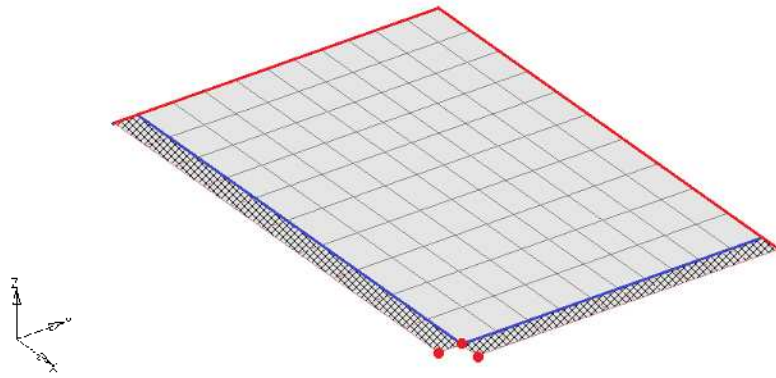
(c) 床スラブ③



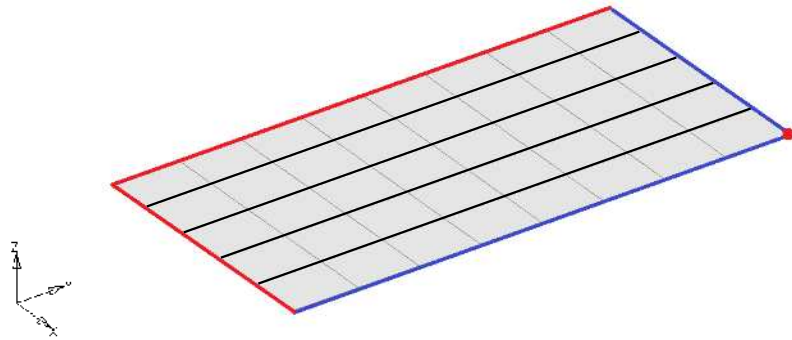
(d) 床スラブ④

●, — : 固定 — : 鉛直のみ自由 (ハッチング部ははりの範囲を示す)

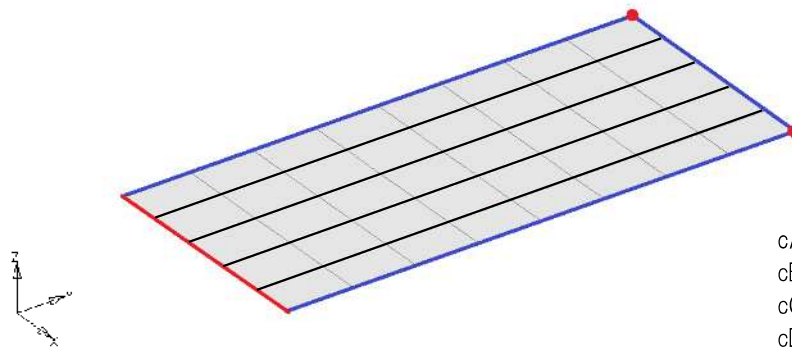
図 3-2 解析モデル図 (2/3)



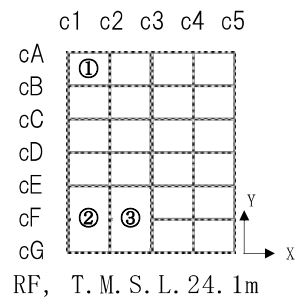
(e) 天井スラブ①



(f) 天井スラブ②



(g) 天井スラブ③



●, — : 固定 — : 鉛直のみ自由 — : 鉄骨小ぶり
 (ハッチング部ははりの範囲を示す)

注記: 鉄骨小ぶりのモデル化に当たっては, はり位置のオフセットを考慮している。

図 3-2 解析モデル図 (3/3)

3.2 固有値解析結果

床及び天井スラブの固有振動数を表 3-3 に，モード図を図 3-3 に示す。

1 次固有振動数が 20Hz を下回っているスラブについては応答増幅の影響評価を行うこととする。なお，天井スラブ②及び天井スラブ③以外は 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 3-3 床及び天井スラブの固有振動数

部位	T. M. S. L. (m)	次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
床スラブ①	12.3	1 次	27.9	-18.21	
		2 次	36.6	0.35	
		3 次	42.4	-3.70	
床スラブ②	12.3	1 次	27.2	18.09	
		2 次	39.3	3.87	
		3 次	40.9	0.04	
床スラブ③	17.3	1 次	28.5	-17.52	
		2 次	37.6	0.31	
		3 次	43.4	-3.62	
床スラブ④	17.3	1 次	24.6	15.03	
		2 次	37.2	-2.74	
		3 次	38.9	-7.23	
天井スラブ①	24.1	1 次	28.3	16.61	
		2 次	45.9	1.02	
		3 次	49.0	0.94	
天井スラブ②	24.1	1 次	14.4	17.68	20Hz を下回る
		2 次	27.0	1.36	
		3 次	28.6	1.06	
天井スラブ③	24.1	1 次	14.6	18.00	20Hz を下回る
		2 次	24.2	0.00	
		3 次	28.9	1.17	

注記*：一般化質量の値が 1.0 になるように正規化した値を示す。

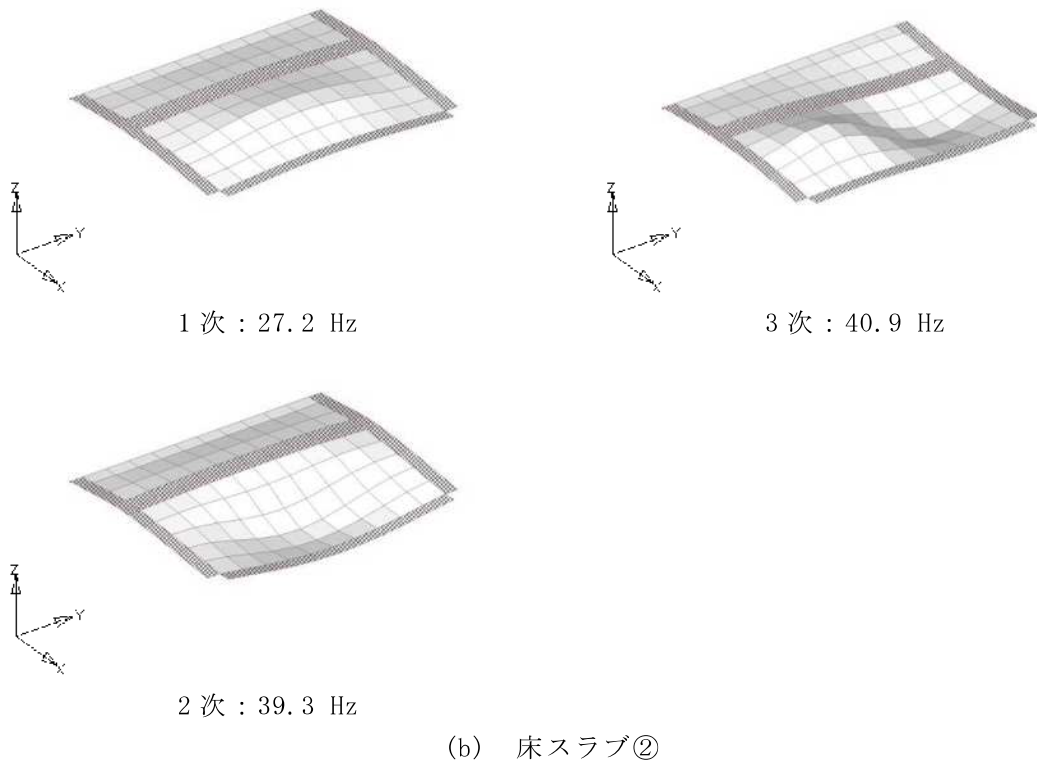
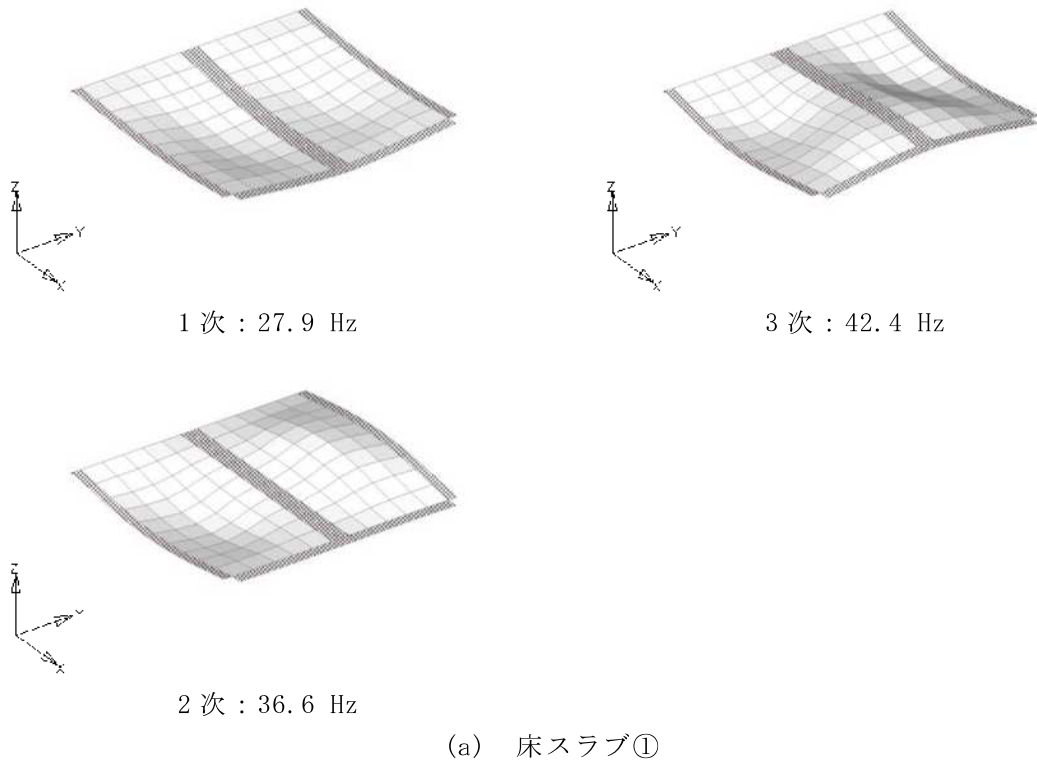
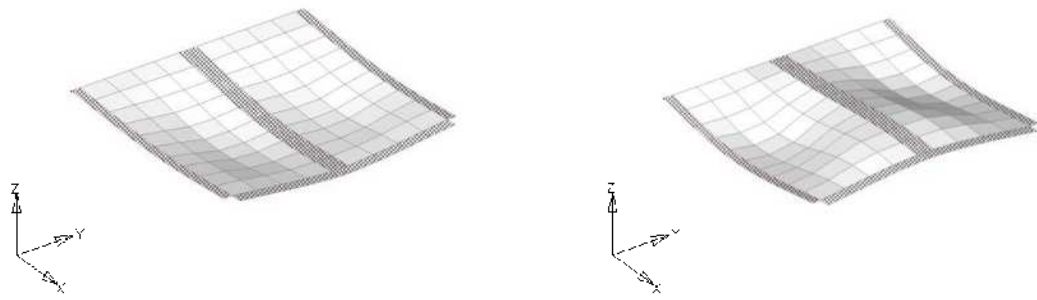
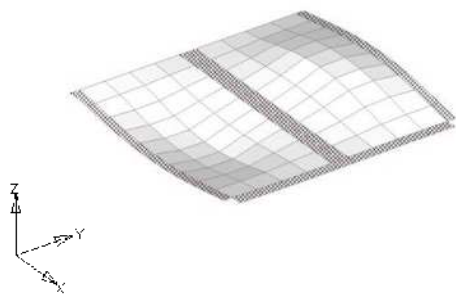


図 3-3 床スラブ及び天井スラブのモード図 (1/4)



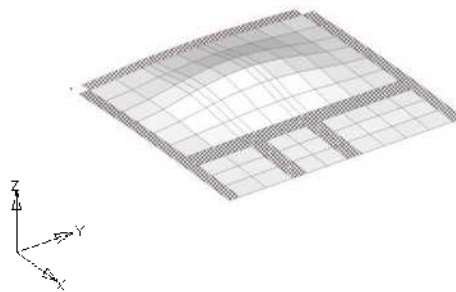
1次 : 28.5 Hz

3次 : 43.4 Hz

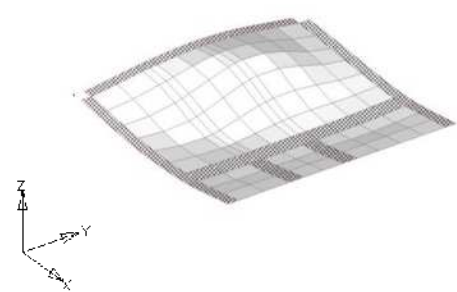


2次 : 37.6 Hz

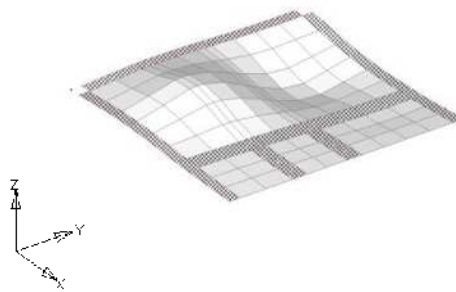
(c) 床スラブ③



1次 : 24.6 Hz



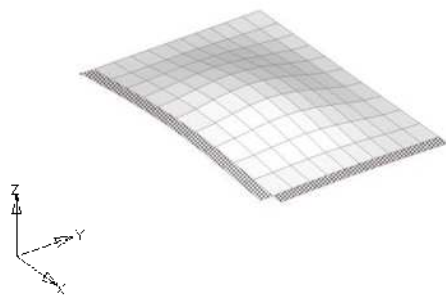
3次 : 38.9 Hz



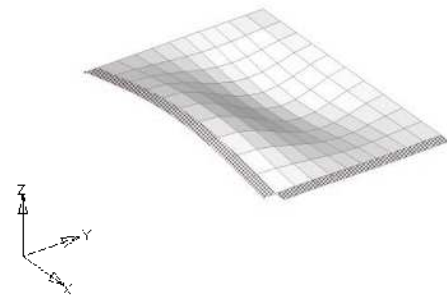
2次 : 37.2 Hz

(d) 床スラブ④

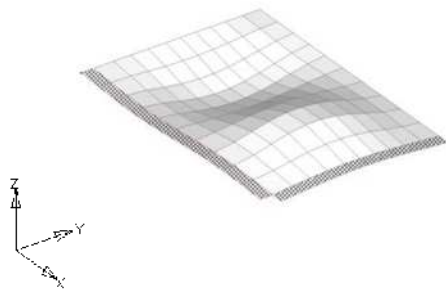
図 3-3 床スラブ及び天井スラブのモード図 (2/4)



1次 : 28.3 Hz

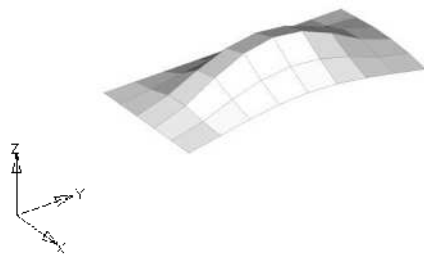


3次 : 49.0 Hz

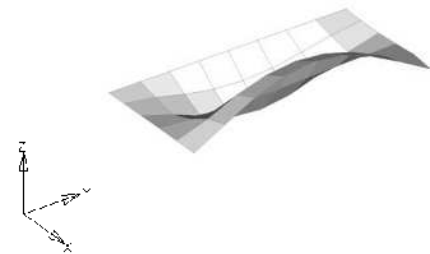


2次 : 45.9 Hz

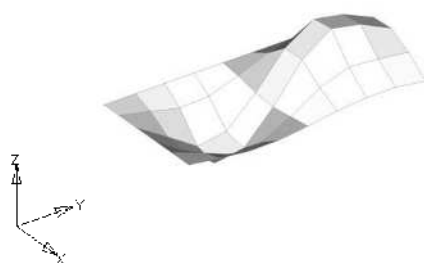
(e) 天井スラブ①



1次 : 14.4 Hz



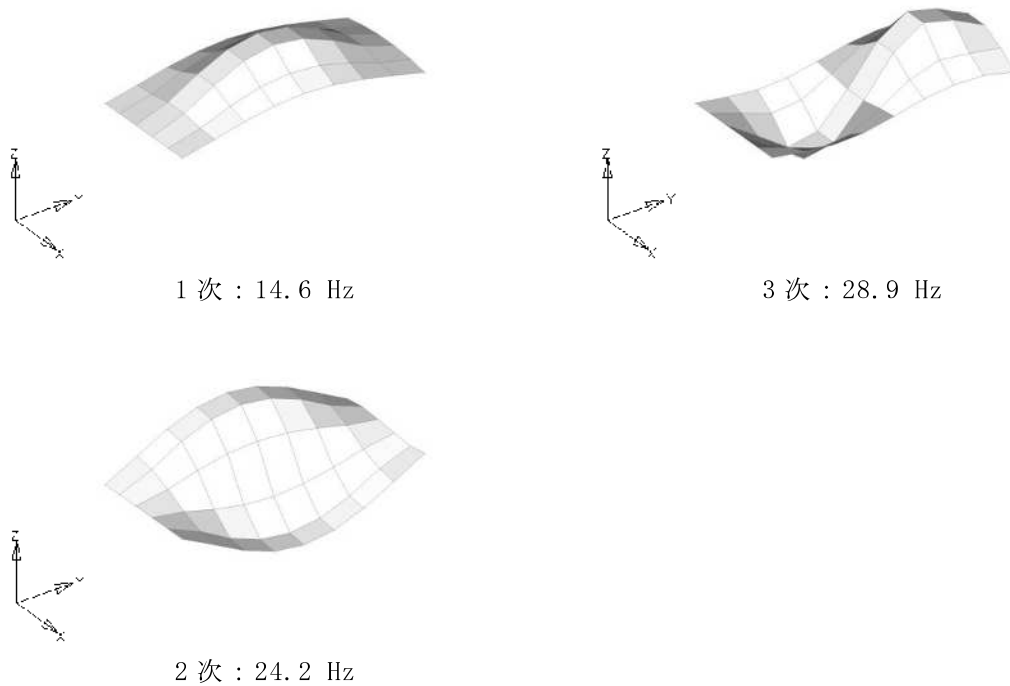
3次 : 28.6 Hz



2次 : 27.0 Hz

(f) 天井スラブ②

図 3-3 床スラブ及び天井スラブのモード図 (3/4)



(g) 天井スラブ③

図 3-3 床スラブ及び天井スラブのモード図 (4/4)

4. 応答増幅の影響評価

固有値解析の結果，1次固有振動数が20Hzを下回った天井スラブ②及び天井スラブ③を評価対象とし，振動特性を踏まえ鉛直方向の応答増幅による影響評価を行う。

4.1 評価方法

鉛直方向の応答増幅の影響評価にあたっては，評価対象が位置する質点の床応答スペクトルより，評価対象の1次固有振動数に相当する応答加速度から鉛直震度を算出し，その鉛直震度を用いて得られた応力により影響評価を行う。評価にあたっては，材料物性の不確かさを考慮する。

4.2 応力解析方法

(1) 荷重ケース

作用荷重のうち地震荷重は，固定荷重及び積載荷重と同じ下向きに作用する場合に生じる応力が最大となるため，地震荷重は鉛直下向きの場合のみを考慮する。

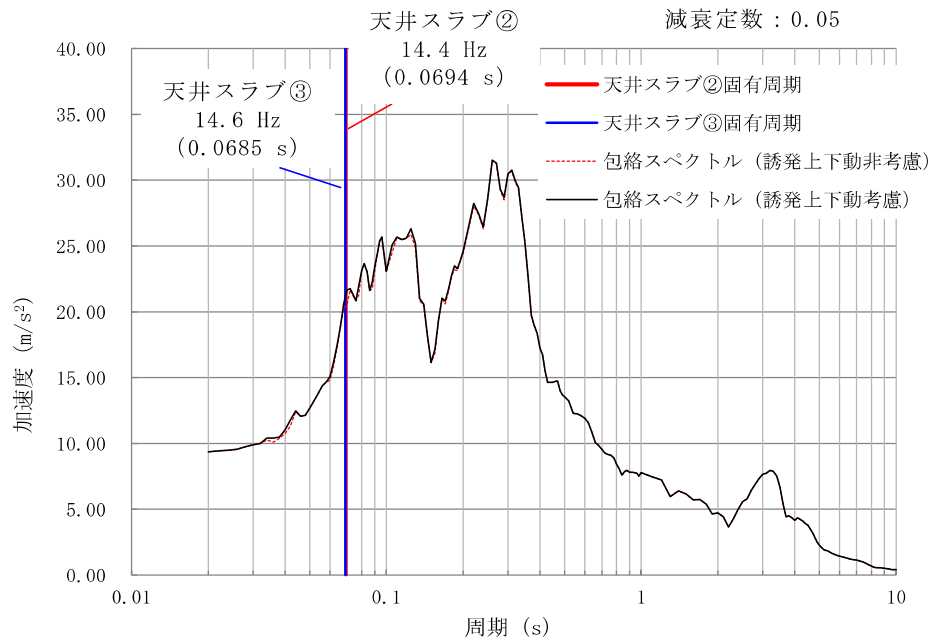
(2) 発生応力の算出

影響評価を行うスラブにおいて，基準地震動 S_s （鉛直方向）に対する質点系モデルの床レベルの加速度応答スペクトル図より，スラブの1次固有振動数相当の最大加速度を求め，この最大応答加速度を重力加速度で除すことにより鉛直震度を算出する。

地震時の発生応力は，長期荷重時の端部曲げモーメント，中央部曲げモーメント及びせん断力を鉛直震度により係数倍することで算出する。なお，長期荷重時の端部曲げモーメント及び中央部曲げモーメントは「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005制定）」に準拠して算出する。

評価対象が位置する質点の鉛直方向の減衰定数5%の加速度応答スペクトルを図4-1に，それらより算出した鉛直震度を表4-1に示す。なお，加速度応答スペクトルは材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果を包絡し，誘発上下動による鉛直方向の応答加速度も考慮したもの（図4-1の黒色実線）とする。また，図4-1には誘発上下動による鉛直方向の応答加速度非考慮のもの（赤色破線）も参考に示す。

長期荷重時の端部曲げモーメント，中央部曲げモーメント及びせん断力を表4-2に示す。評価に用いた荷重及び荷重の組合せはV-2-8-4-3「中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書」に基づき設定した。また，鉛直震度より算出した端部曲げモーメント，中央部曲げモーメント及びせん断力を表4-3に示す。



注：図中の包絡スペクトルは、材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果を包絡したものである。

図 4-1 天井スラブ②及び天井スラブ③が位置する質点の鉛直方向の加速度応答スペクトル (質点番号 1, 鉛直方向)

表 4-1 1次固有振動数を考慮した鉛直震度

項目	天井スラブ②	天井スラブ③
1次固有振動数における加速度応答スペクトルの値 (m/s ²)	21.46	20.97
上記のスペクトルの値から算出した鉛直方向震度 (長期荷重を含む)	3.19	3.14

表 4-2 長期荷重時の端部曲げモーメント, 中央部曲げモーメント及びせん断力

部位	方向	端部曲げモーメント M (kNm)	中央部曲げモーメント M (kNm)	せん断力 Q (kN)
天井スラブ②	短辺 (NS 方向) 両端固定ばり	9.1	4.5	24.7
天井スラブ③	短辺 (NS 方向) 両端固定ばり	7.5	3.7	22.5

表 4-3 鉛直震度より算出した端部曲げモーメント, 中央部曲げモーメント及びせん断力

部位	方向	端部曲げモーメント M (kNm)	中央部曲げモーメント M (kNm)	せん断力 Q (kN)
天井スラブ②	短辺 (NS 方向) 両端固定ばり	25.2	12.6	68.6
天井スラブ③	短辺 (NS 方向) 両端固定ばり	20.5	10.2	61.4

4.3 評価結果

天井スラブ②及び天井スラブ③について、鉛直震度を乗じた発生応力に対する評価結果を表 4-4 に示す。スラブの増幅を考慮した場合においても、発生応力が「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説((社)日本建築学会, 2005)」に基づく許容限界を超えないことを確認した。

表 4-4 評価結果

部位		天井スラブ②	天井スラブ③
方向		短辺 (NS 方向) 両端固定ばり	短辺 (NS 方向) 両端固定ばり
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		□ × 1000	□ × 1000
有効スパン l (mm)		2200	2000
有効せい d (mm)		240	240
配筋	上ば筋	D13@200 (635mm ² /m)	D13@200 (635mm ² /m)
	下ば筋	D13@200 (635mm ² /m)	D13@200 (635mm ² /m)
曲げモーメント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	25.2	20.5
	許容限界 M _A (kN・m/m)	46.0	46.0
	検定値 M/M _A	0.55	0.45
面外せん断力	発生せん断力 Q (kN/m)	68.6	61.4
	せん断スパン比による 割増し係数 α	1.0	1.0
	許容限界 Q _A (kN/m)	254.1	254.1
	検定値 Q/Q _A	0.27	0.25
判定		可	可

別紙 1-1 天井スラブを支持する鉄骨小ばりの耐震性評価

目 次

1. 概要	別紙 1-1-1
2. 評価方針	別紙 1-1-2
3. 評価方法	別紙 1-1-8
4. 断面の評価方法	別紙 1-1-11
5. 評価結果	別紙 1-1-12

1. 概要

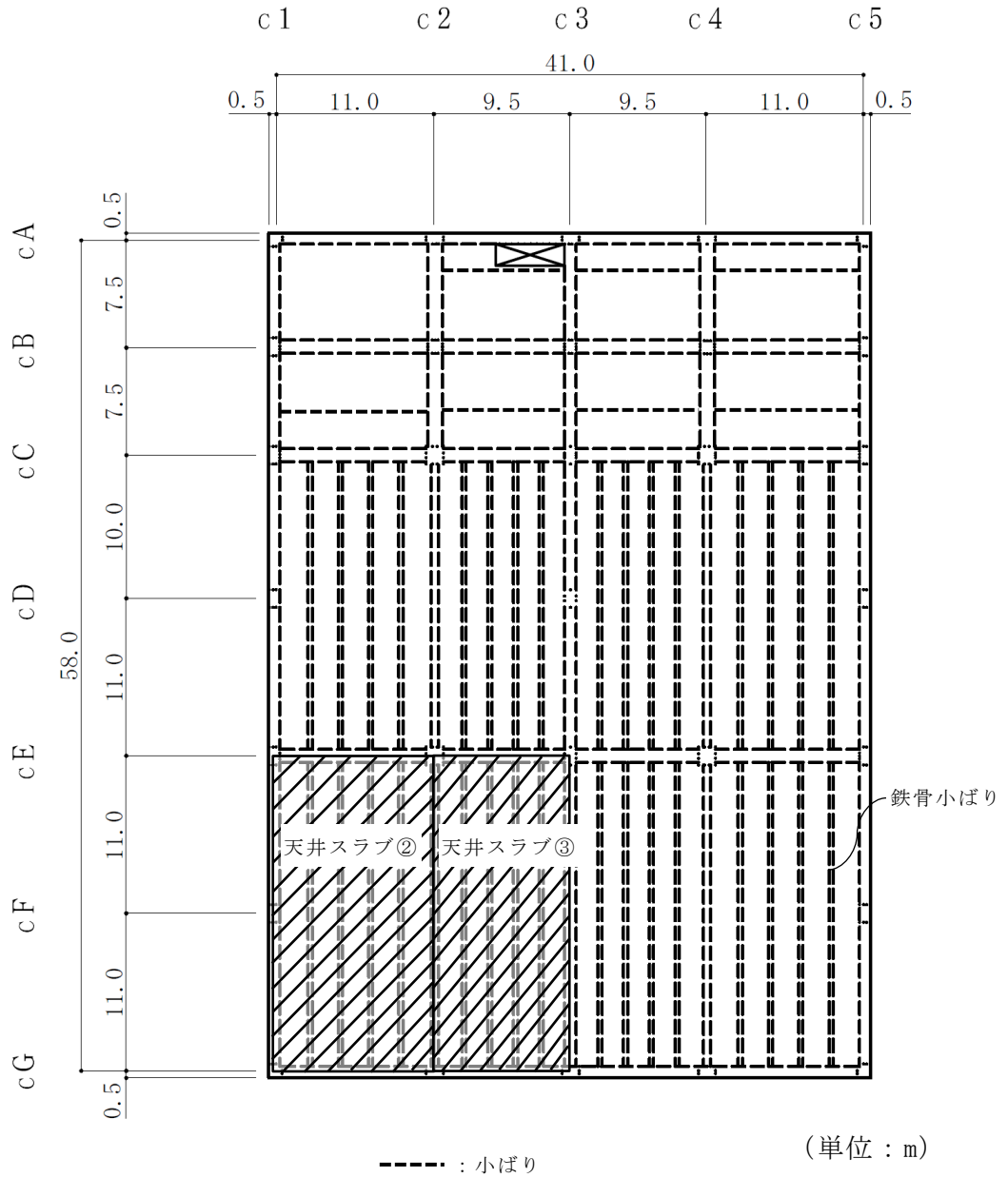
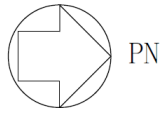
本資料では、「別紙1 中央制御室遮蔽他のスラブの耐震性評価」（以下、「別紙1」という。）の応答増幅を考慮した天井スラブ評価においてモデル化している、天井スラブを支持する鉄骨小ばりの応答増幅について影響評価を行う。

2. 評価方針

別紙 1 において、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スラブの振動特性を確認し、1 次固有振動数が 20Hz を下回る天井スラブ②及び天井スラブ③について応答増幅に対する影響評価を行っている。天井スラブ②及び天井スラブ③の位置を図 2-1 に、解析モデルを図 2-2 に、刺激係数が支配的な 1 次のモード図を図 2-3 に、天井スラブの固有振動数を表 2-1 に示す。

本資料では、上記スラブを支持する鉄骨小ぶりについて、別紙 1 と同様に応答増幅に対する影響評価を行う。なお、評価にあたっては材料物性の不確かさを考慮する。

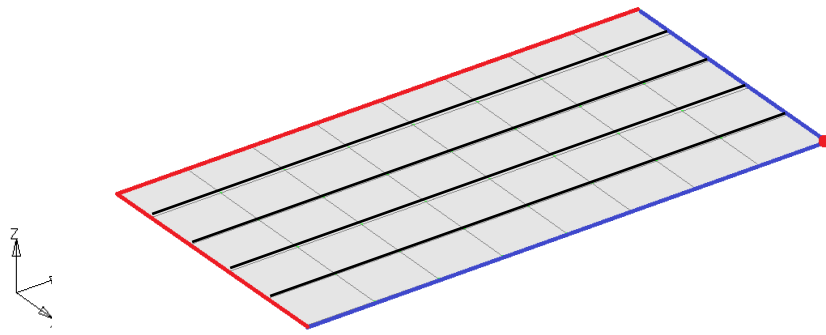
評価対象の鉄骨小ぶりの位置を図 2-4 に、鋼材の弾性限強度を表 2-2 に示す。



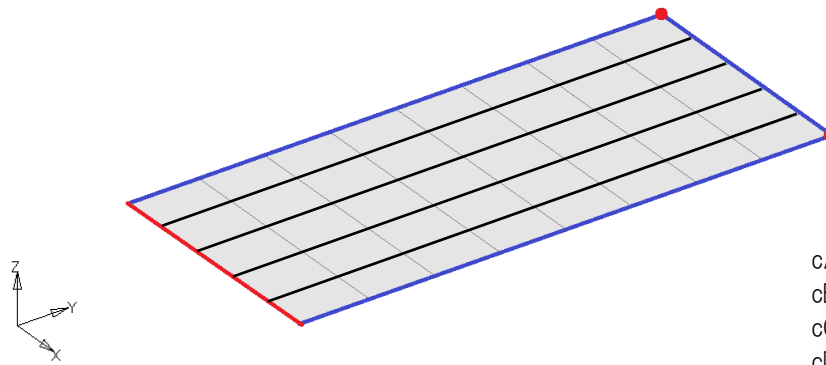
中央制御室（上部）天井スラブ

(RF, T.M.S.L. 24.1m)

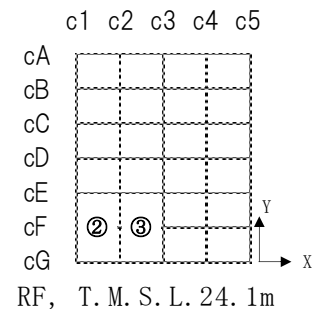
図 2-1 スラブの評価を記載する部材の位置



(a) 天井スラブ②



(b) 天井スラブ③



●, — : 固定 — : 鉛直のみ自由 — : 鉄骨小ぶり
 (ハッチング部ははりの範囲を示す)

注記: 鉄骨小ぶりのモデル化に当たっては, はり位置のオフセットを考慮している。

図 2-2 解析モデル図

表 2-1 天井スラブの固有振動数

部位	T. M. S. L. (m)	次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	備考
天井スラブ②	24.1	1次	14.4	17.68	20Hz を下回る
		2次	27.0	1.36	
		3次	28.6	1.06	
天井スラブ③	24.1	1次	14.6	18.00	20Hz を下回る
		2次	24.2	0.00	
		3次	28.9	1.17	

注記*：一般化質量の値が 1.0 になるように正規化した値を示す。

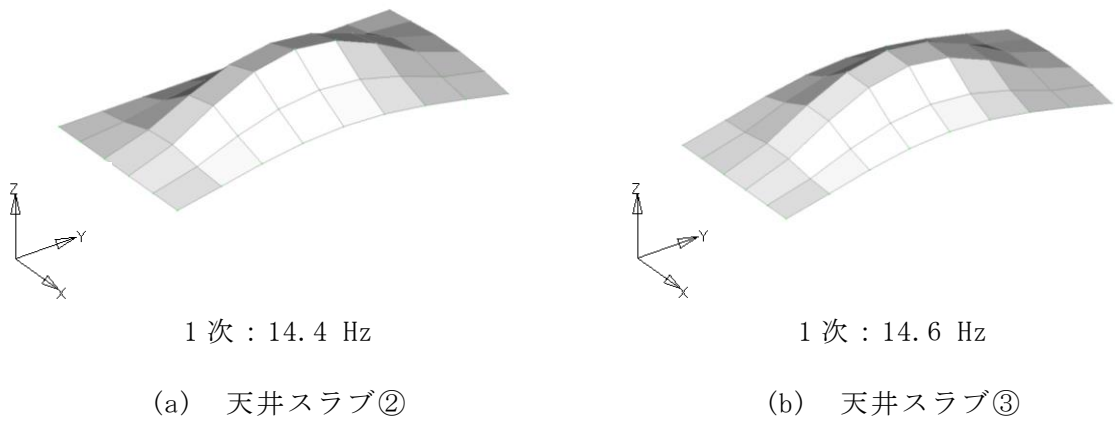
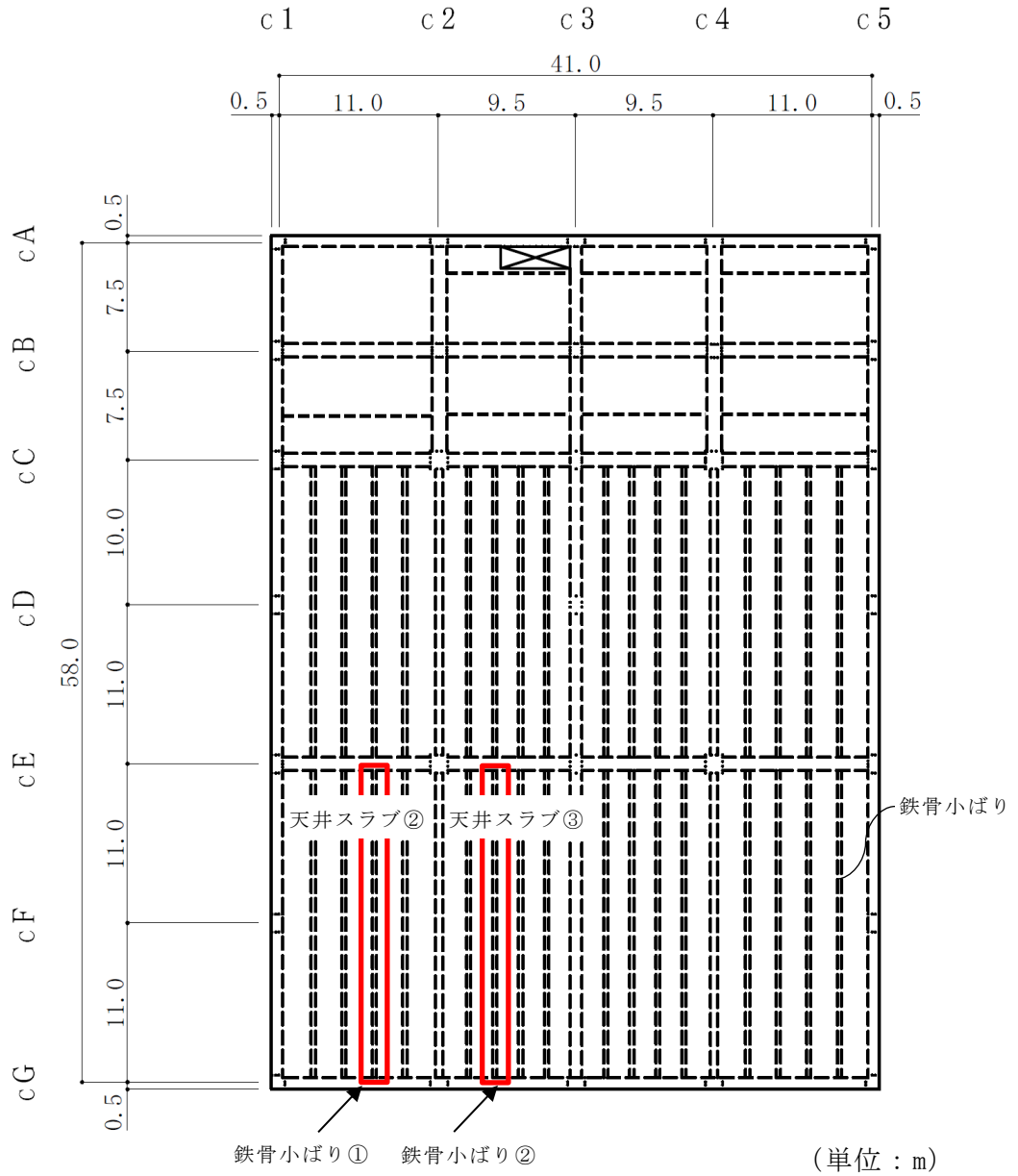
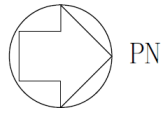


図 2-3 天井スラブの 1 次モード図



注記：天井スラブ②の鉄骨小ばり間隔は 2.2m，天井スラブ③の鉄骨小ばり間隔は
両端部が 1.75m，中央部の 3 スパンが 2.0m である。

図 2-4 評価対象の鉄骨小ばりの位置 (RF, T. M. S. L. 24. 1m)

表 2-2 鋼材の弾性限強度

(単位：N/mm²)

材 料	板 厚	基準強度 F 値	弾性限強度		
			圧縮* 引張	曲げ*	せん断*
SM41 (SM400A相当)	t ≤ 40mm	235	258	258	149

注記*：「2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書（国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所）」（以下「技術基準解説書」という。）に基づき，F 値に1.1倍の割増しを考慮する。

3. 評価方法

3.1 モデル化の基本方針

鉄骨小ばりの上部が天井スラブに埋め込まれているため、合成ばりとして評価する。鉄骨小ばりの断面図を図 3-1 に示す。

鉄骨小ばりにかかる荷重は、屋根スラブの荷重のうち鉄骨小ばりでの負担幅を考慮した荷重及び鉄骨小ばりの自重を考慮する。鉄骨小ばりに発生する応力は別紙 1 の結果を踏まえ、応答増幅による影響を考慮し、1 次固有振動数に相当する応答加速度から算出した鉛直震度を用いて、固定荷重、積載荷重及び積雪荷重を係数倍することで算出する。固定荷重を表 3-1 に、積載荷重を表 3-2 に、積雪荷重を表 3-3 に、1 次固有振動数を考慮した鉛直震度を表 3-4 に、解析諸元を表 3-5 示す。

作用荷重のうち地震荷重は、固定荷重及び積載荷重と同じ下向きに作用する場合に生じる応力が最大となるため、地震荷重は鉛直下向きの場合のみを考慮する。鉄骨小ばりを含む天井スラブの固有値解析結果より、刺激係数が大きい 1 次固有モード形状を考慮した鉛直震度分布を用いる。1 次固有モード形状を考慮した鉛直震度分布を図 3-2 に示す。

応力解析は、鉛直荷重を静的に作用させたはりモデルによる弾性応力解析にて断面力を算定する。解析に使用するコードは「MSC NASTRAN」である。解析モデル図を図 3-3 に示す。解析モデルに使用する要素は、はり要素である。また、両端はピン支持とする。解析モデルの節点数は 9、要素数は 8 である。

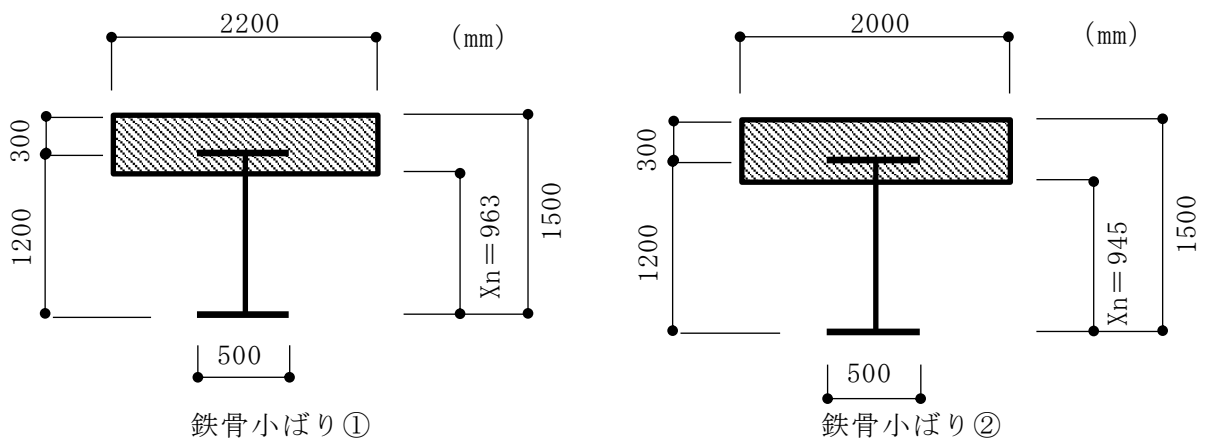


図 3-1 鉄骨小ばりの断面図

表 3-1 固定荷重(G)

部位	固定荷重 (kN/m)
鉄骨小ばり①	42.38
鉄骨小ばり②	39.23

表 3-2 積載荷重(P)

部位	積載荷重 (kN/m ²)
鉄骨小ばり①	0.88
鉄骨小ばり②	0.88

表 3-3 積雪荷重(SNL)

外力の状態	積雪荷重 (kN/m ²)
地震時	2.89

表 3-4 1次固有振動数を考慮した鉛直震度

項目	鉄骨小ばり①	鉄骨小ばり②
1次固有振動数における加速度応答スペクトルの値 (m/s ²)	21.46	20.97
上記のスペクトルの値から算出した鉛直方向震度 (長期荷重を含む)	3.19	3.14

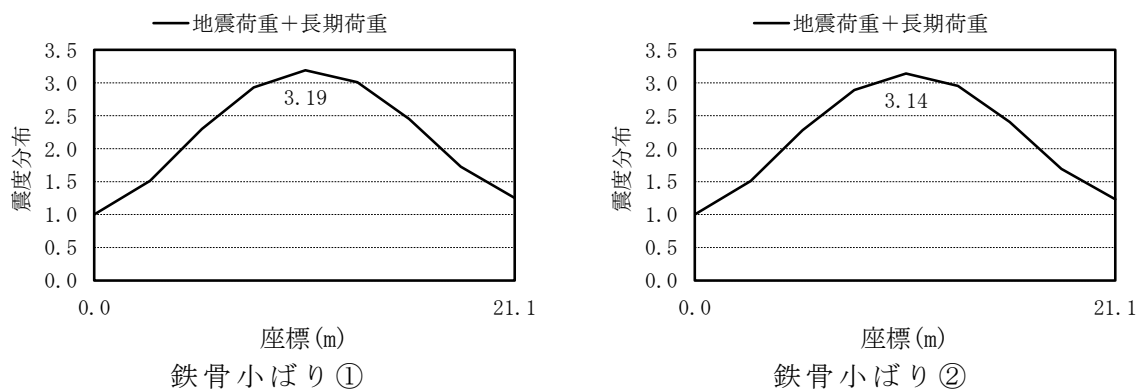


図 3-2 1次固有モード形状を考慮した鉛直震度分布

表 3-5 鉄骨小ばりの諸元

項目	鉄骨小ばり①	鉄骨小ばり②
使用部材	BH-1200×500×16×36	BH-1200×500×16×36
負担幅 B (m)	2.2	2.0
評価スパン L (m)	21.1	21.1
断面係数 Z ($\times 10^3 \text{mm}^3$) *1	30343	30116
せん断断面積 A (mm^2) *2	13440	13440
ヤング係数 E (N/mm^2)	205000	205000
せん断弾性係数 G (N/mm^2)	79000	79000

注記*1：合成ばりとして評価し，鋼材のコンクリートに対するヤング係数比は「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許容応力度設計法ー（（社）日本建築学会，1999 改定）」に基づきヤング係数比 $n = 13$ を用いた。

*2：ボルトの欠損を考慮

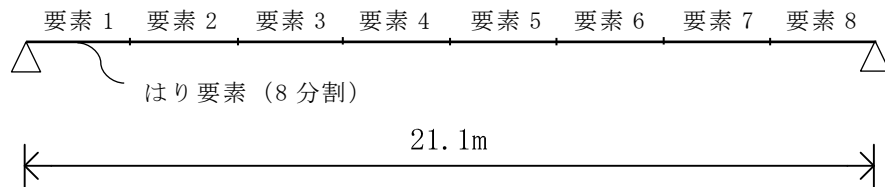


図 3-3 解析モデル

4. 断面の評価方法

鉄骨小ばりの評価は、はりモデルを用いた弾性応力解析により評価対象部位に生じる曲げモーメント及びせん断力による応力度が許容限界を超えないことを確認する。なお、許容限界については、終局耐力に対し妥当な安全裕度を有する許容限界を設定し、その許容限界は、表 2-2 に示すように、弾性限強度として「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（社）日本建築学会，1999 改訂」の F 値に「技術基準解説書」に基づき 1.1 倍の割増しを考慮する。

鉄骨小ばりの増幅を考慮した端部曲げモーメント、中央部曲げモーメント及びせん断力を表 4-1 に示す

表 4-1 鉄骨小ばりの増幅を考慮した端部曲げモーメント、
中央部曲げモーメント及びせん断力

部位	位置	端部曲げ モーメント M (kNm)	中央部曲げ モーメント M (kNm)	せん断力 Q (kN)
鉄骨小ばり①	要素 8	3085	—	1239
	要素 4	—	7481	—
鉄骨小ばり②	要素 8	2802	—	1125
	要素 4	—	6802	—

5. 評価結果

「4. 断面の評価方法」に基づいた鉄骨小ばり①及び鉄骨小ばり②の評価結果を表5-1に示す。鉄骨小ばりの増幅を考慮した場合の発生応力が許容限界を超えないことを確認した。

表5-1 鉄骨小ばりの評価結果

発生 応力	部材	鉄骨小ばり①	鉄骨小ばり②
	種別	BH-1200×500×16×36 SM41	BH-1200×500×16×36 SM41
曲 げ モー メント	発生曲げモーメントM ($\times 10^6 \text{N}\cdot\text{mm}$)	7481	6802
	断面係数Z ($\times 10^3 \text{mm}^3$)	30343	30116
	曲げ応力度 σ_b (N/mm^2)	247	226
	許容限界 f_b (N/mm^2)	258	258
	検定値 σ_b / f_b	0.96	0.88
せん 断 力	発生せん断力Q ($\times 10^3 \text{N}$)	1239	1125
	せん断断面積A (mm^2) *	13440	13440
	せん断応力度 τ (N/mm^2)	92	84
	許容限界 f_s (N/mm^2)	149	149
	検定値 τ / f_s	0.62	0.57

注記* : ボルトの欠損を考慮

(参考資料 1) 計算機プログラム (解析コード) の概要

D I A N A

1. 使用状況一覧

使用補足説明資料		バージョン
別紙 1	中央制御室遮蔽他のスラブの耐震性評価	Ver. 10. 2

2. 解析コードの概要

項目	コード名 D I A N A
使用目的	固有値解析
開発機関	TNO DIANA 社
開発時期	1983 年
使用したバージョン	Ver. 10. 2
コードの概要	<p>本解析コードは，TNO DIANA BV（オランダ）により開発され，国内においては JIP テクノサイエンス（株）により保守されている汎用市販有限要素法プログラムである。</p> <p>土木及び建築分野に特化した要素群及び材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学及び民間を問わず，多くの利用実績がある。</p>
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	<p>本解析コードは，中央制御室遮蔽他及び緊急時対策所遮蔽のスラブの 3 次元有限要素法による固有値解析に使用している。</p> <p>【検証（Verification）】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードを用いて評価したシェル要素の固有振動数が理論解と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <p>【妥当性確認（Validation）】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検証内容のとおり，シェル要素の固有値解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、有限要素法による汎用非線形構造解析プログラムである。材料非線形性及び幾何学的非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的解析、熱伝導解析、地盤の浸透流、圧密解析が提供されている。また、各分野特有の連成問題（熱応力、構造－流体連成、圧密－浸透流連成等）も解析可能である。本解析コードは、コントロール建屋の床スラブの固有値解析に使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・非線形構造問題（材料及び幾何学的非線形）に必要な機能が充実している。
- ・数多くの要素及び材料構成則が提供されており、多様な構造物のモデル化が可能である。
- ・連成問題が解析可能である。

また、今回の解析における本解析コードの使用要素はシェル要素である。

3.3 解析フローチャート

本計算機コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

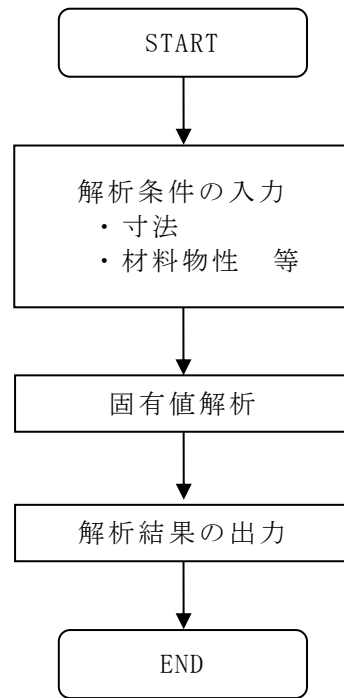


図 3-1 解析フローチャート

3.4 検証(Verification)と妥当性確認(Validation)

3.4.1 理論解とシミュレーション解析の比較による検証

(1) 検証概要

シェル要素の固有振動数について、本コードによる解析結果と理論解との比較を行った。

(2) 検証モデル及び検討条件

シェル要素を用いて作成した検証モデルを図 3-2 に、検証条件を表 3-1 に示す。検討モデルの両端はピン支持とした。

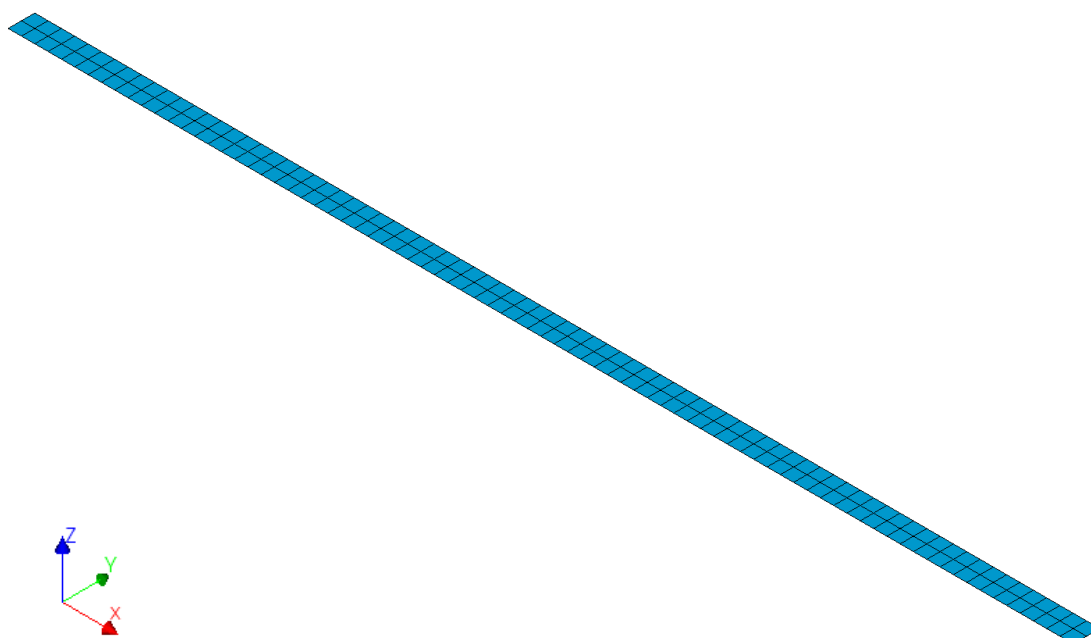


図 3-2 検証モデル

表 3-1 検証条件

諸元	記号	入力値	単位
長さ	l	2000	(mm)
断面積	A	2500	(mm ²)
断面二次モーメント	I	5.21E+05	(mm ⁴)
ねじり定数	J	8.80E+05	(mm ⁴)
せん断面積係数	K	0.833	(-)
ヤング係数	E	2.27E+04	(N/mm ²)
ポアソン比	ν	0.20	(-)
密度	ρ	2.40E-09	(ton/mm ³)

3.4.2 解析結果と理論解との比較

解析結果と理論解の固有振動数の比較を表 3-2 に示す。理論解は「機械工学便覧」（引用文献(1)参照）に示されている「支持-支持」のモデルに対する(3.1)式に基づき導出した。また、各次数におけるシェル要素の解析結果(モード図)を、図 3-3 に示す。

表 3-2 に示すとおり、本コードによる解析結果と理論解はよく一致していることが確認できる。

表 3-2 固有振動数の解析結果と理論解の比較

次数	固有振動数 [Hz]		解析結果*
	理論解	解析結果	理論解
1 次	17.43	17.42	1.00
2 次	69.74	69.51	1.00
3 次	156.91	155.78	0.99

・固有振動数

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.1)$$

ここで、 f : 固有振動数 (Hz)

l : 長さ (m)

E : ヤング係数 (N/m²)

I : 断面二次モーメント (m⁴)

ρ : 比重 (kg/m³)

A : 断面積 (m²)

λ : 振動数係数 (1 次 : π , 2 次 : 2π , 3 次 : 3π)



1 次



2 次



3 次

図 3-3 解析結果 (モード図)

4. 引用文献

- (1) 日本機械学会（編）：機械工学便覧 基礎編 A3 力学・機械力学 1986.6