

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-5 改3
提出年月日	平成30年7月27日

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-5 【中央制御室遮蔽の床スラブの耐震性評価に関する
補足説明】

平成30年7月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要.....	1
2. 評価方針.....	2
3. 振動特性の確認.....	3
3.1 解析方法.....	3
3.2 固有値解析結果.....	7
4. 応答増幅の影響評価.....	10
4.1 評価方法.....	10
4.2 応力解析方法.....	10
4.3 評価結果.....	15

別紙 ねじれの影響を考慮した耐震壁及びスラブの検討

1. 概要

本資料は、東海第二発電所の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。

本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・ 添付書類 V-2-8-4-2 「中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書」

2. 評価方針

中央制御室遮蔽を構成するスラブは気密性及び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。

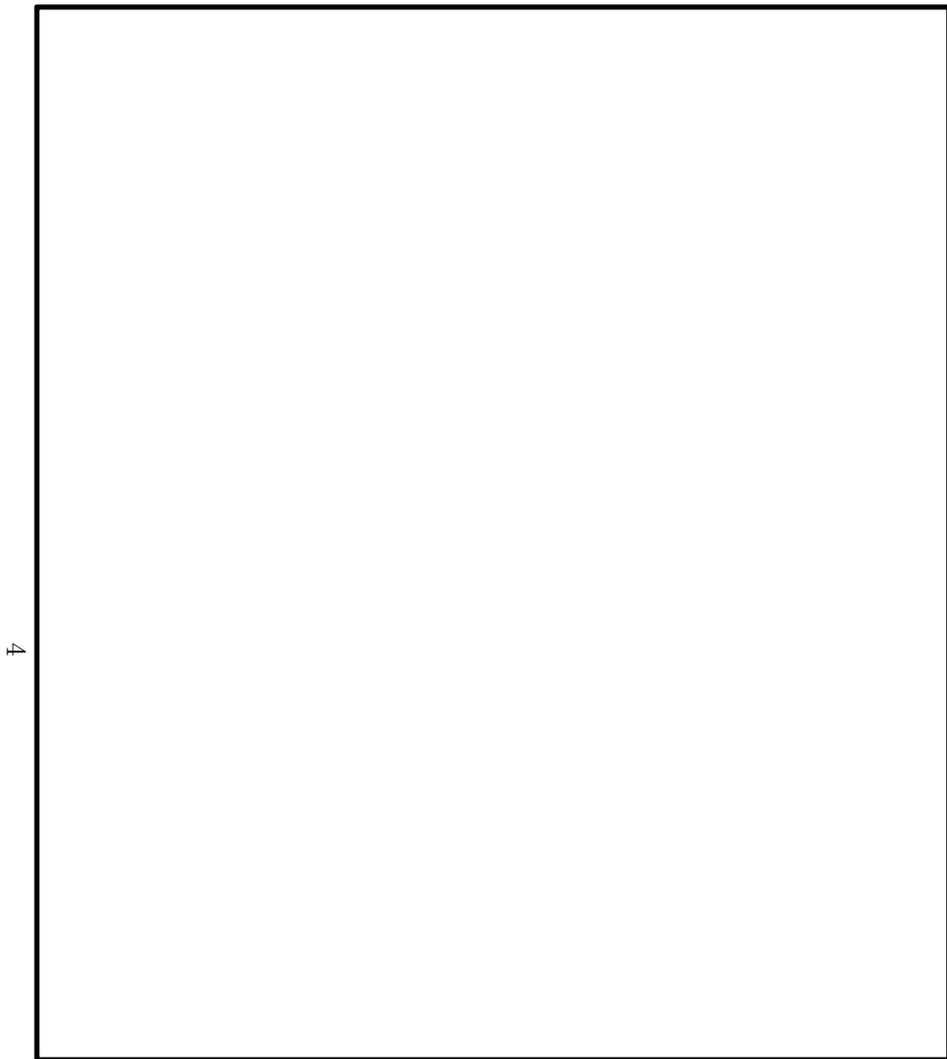
図3-1に示す耐震壁及び梁で囲まれたスラブの範囲のうち、スラブのスパンから判断して、鉛直方向地震力による増幅の影響が最も大きいと思われる部位を評価対象部位としてモデル化する。また、梁についても幅の半分をモデル化し、梁の柔性の影響を考慮する。なお、床部については開口についてもモデル化する。解析モデルに使用するFEM要素は、形状及び厚さを踏まえたシェル要素とする。境界条件は、資料V-2-8-4-1「中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書」では、鉄筋コンクリート造の梁もしくは耐震壁に支持されている状況に応じ、4辺固定版または両端固定梁としてモデル化している。本検討における境界条件は、耐震壁で支持されている範囲を固定とし、梁の上部もしくは下部に壁がない場合に、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 Ver. 2016. 1. 1」を用いる。

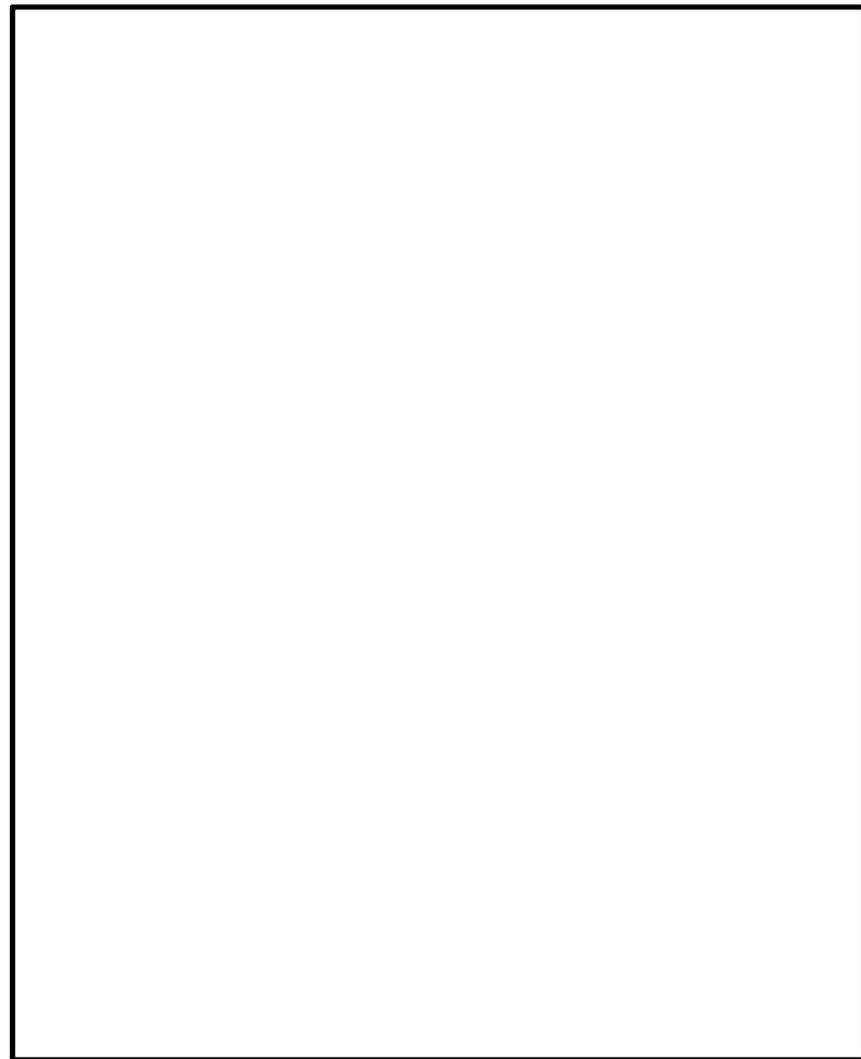
材料物性値を表3-1に、解析モデルを図3-2に示す。

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
22.1	2.21×10 ⁴	0.2



(a) 天井スラブ (EL. 23.0 m)



(b) 床スラブ (EL. 18.0 m)

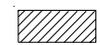
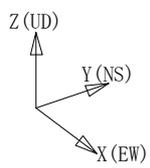
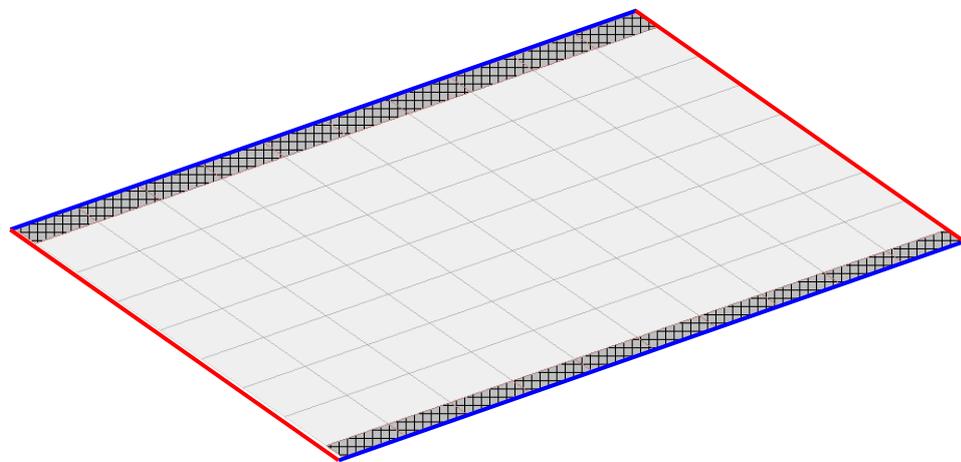
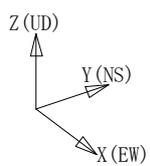
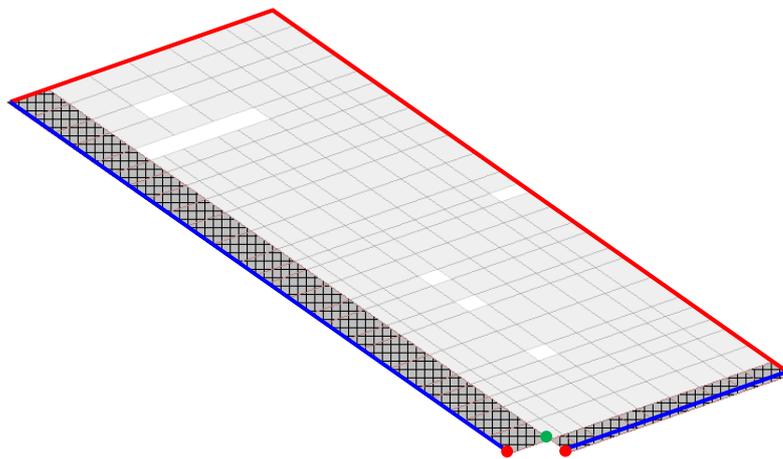
 : FEMモデル化範囲

図 3-1 評価対象部位



- : 固定
- : 鉛直のみ自由
- (ハッチング部は梁の範囲を示す)

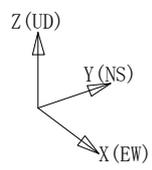
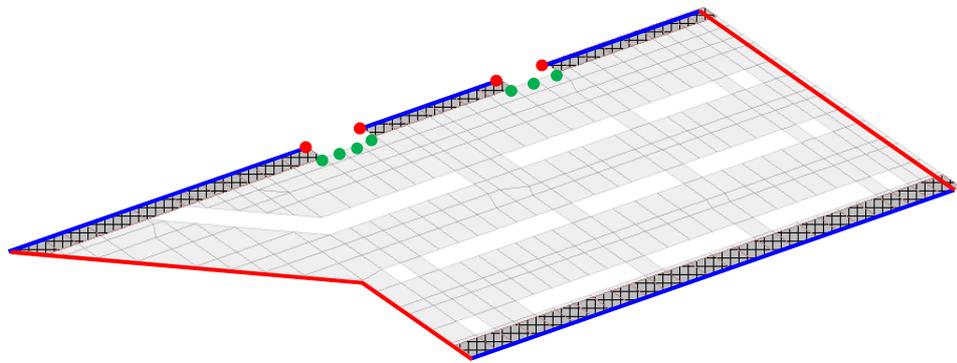
(a) 天井スラブ



- : 固定
- : 鉛直のみ自由
- : 鉛直拘束
- (ハッチング部は梁の範囲を示す)

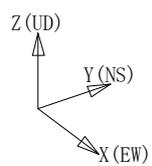
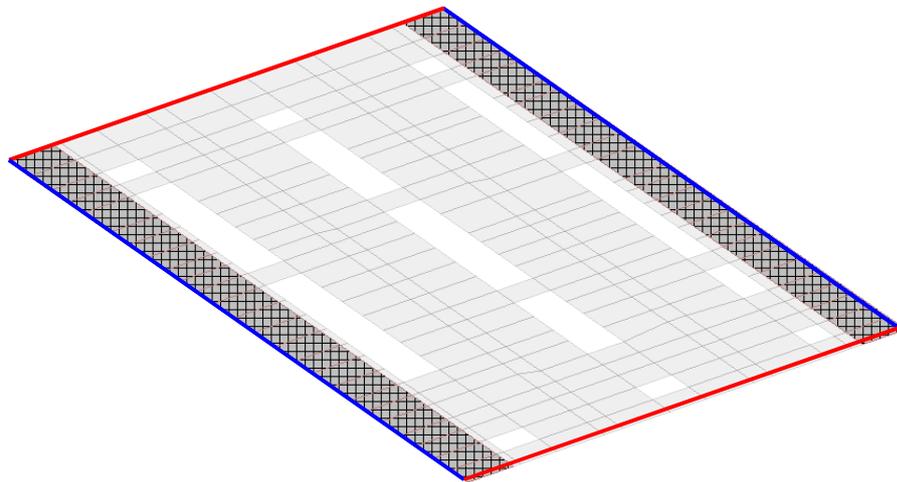
(b) 床スラブ①

図 3-2 (1/2) 解析モデル図



- : 固定
 - : 鉛直のみ自由
 - : 鉛直拘束
- (ハッチング部は梁の範囲を示す)

(c) 床スラブ②



- : 固定
 - : 鉛直のみ自由
- (ハッチング部は梁の範囲を示す)

(d) 床スラブ③

図 3-2 (2/2) 解析モデル図

3.2 固有値解析結果

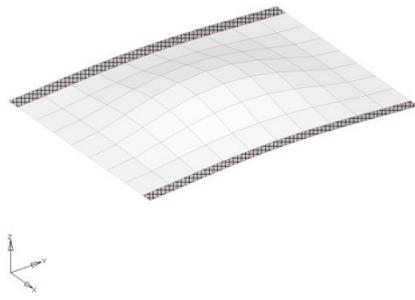
床及び天井スラブの固有振動数を表 3-2 に、モード図を図 3-3 に示す。

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、天井スラブ及び床スラブ①の 1 次固有振動数は 20Hz を上回っており、当該部位の応答の増幅は考慮しない。

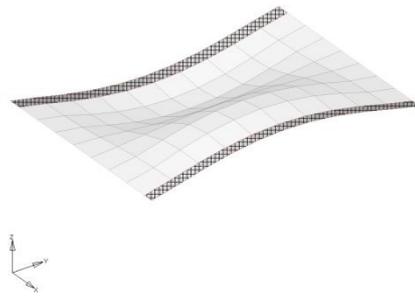
表 3-2 床及び天井スラブの固有振動数

部 位	次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数*
天井スラブ	1 次	21.6	11.64
	2 次	36.3	-0.27
	3 次	36.4	0.00
床スラブ①	1 次	32.1	9.33
	2 次	56.0	-0.31
	3 次	76.2	3.51
床スラブ②	1 次	15.9	10.77
	2 次	27.4	-0.05
	3 次	30.1	-0.88
床スラブ③	1 次	16.3	11.13
	2 次	28.7	-0.42
	3 次	30.0	0.19

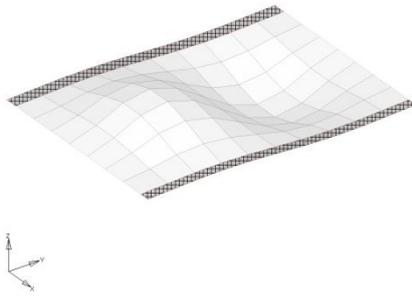
※：一般化質量の値が 1.0 になるように正規化した値を示す。



1次 : 21.6Hz

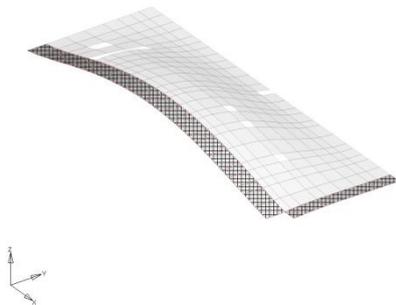


2次 : 36.3Hz

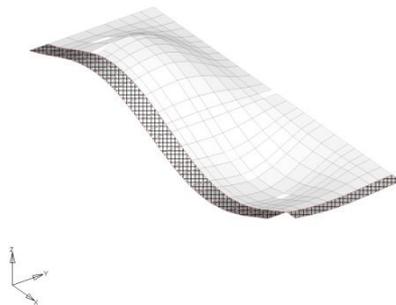


3次 : 36.4Hz

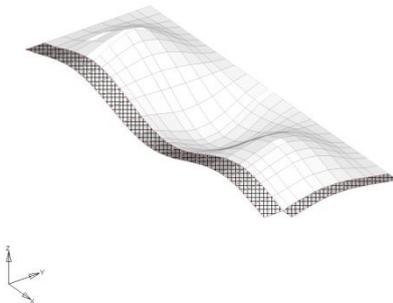
(a) 天井スラブ



1次 : 32.1Hz



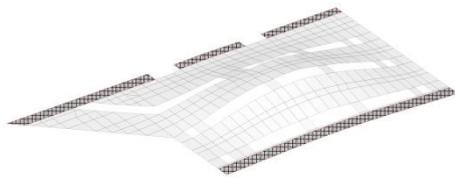
2次 : 56.0Hz



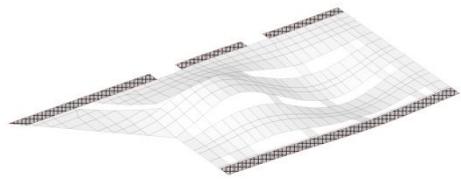
3次 : 76.2Hz

(b) 床スラブ①

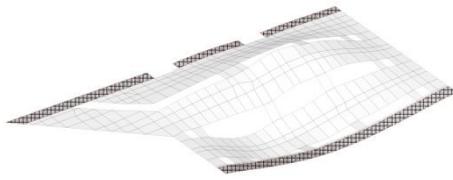
図 3-3 (1/2) 床及び天井スラブのモード図



1次 : 15.9Hz

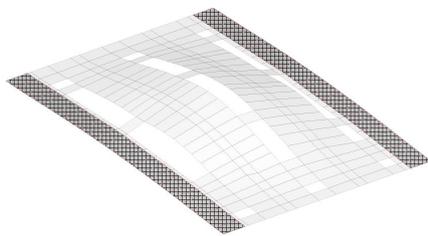


2次 : 27.4Hz

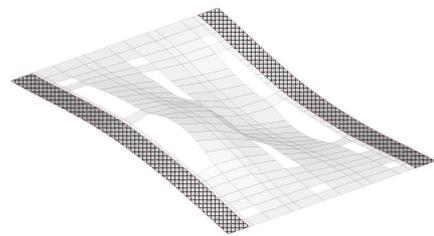


3次 : 30.1Hz

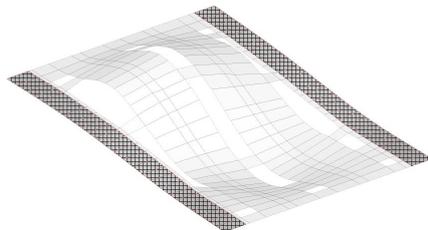
(c) 床スラブ②



1次 : 16.3Hz



2次 : 28.7Hz



3次 : 30.0Hz

(d) 床スラブ③

図 3-3 (2/2) 床及び天井スラブのモード図 (2/2)

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を下回ったスラブを評価対象とし，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，中央制御室床レベルの質点がないため，安全側に直上階レベルに位置する質点の床応答スペクトルより，評価対象の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。

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_v （鉛直方向）に対する質点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応答加速度を求め，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，長期荷重時の端部モーメント，中央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，長期荷重時の端部モーメント，中央モーメントは「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）」に準拠して算出する。

評価対象が位置する質点の床応答スペクトルを図4-1～図4-3に，それらより算出した鉛直震度を表4-1に示す。また，長期荷重時の端部モーメント，中央モーメント及びせん断力を表4-2に，鉛直震度より算出した端部モーメント，中央モーメント及びせん断力を表4-3に示す。

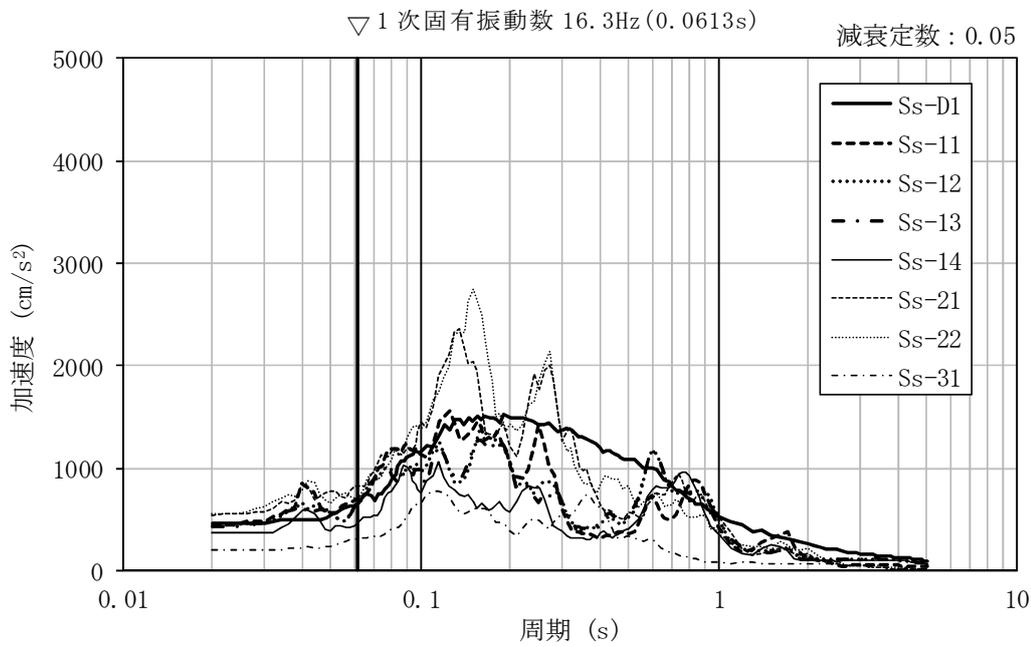
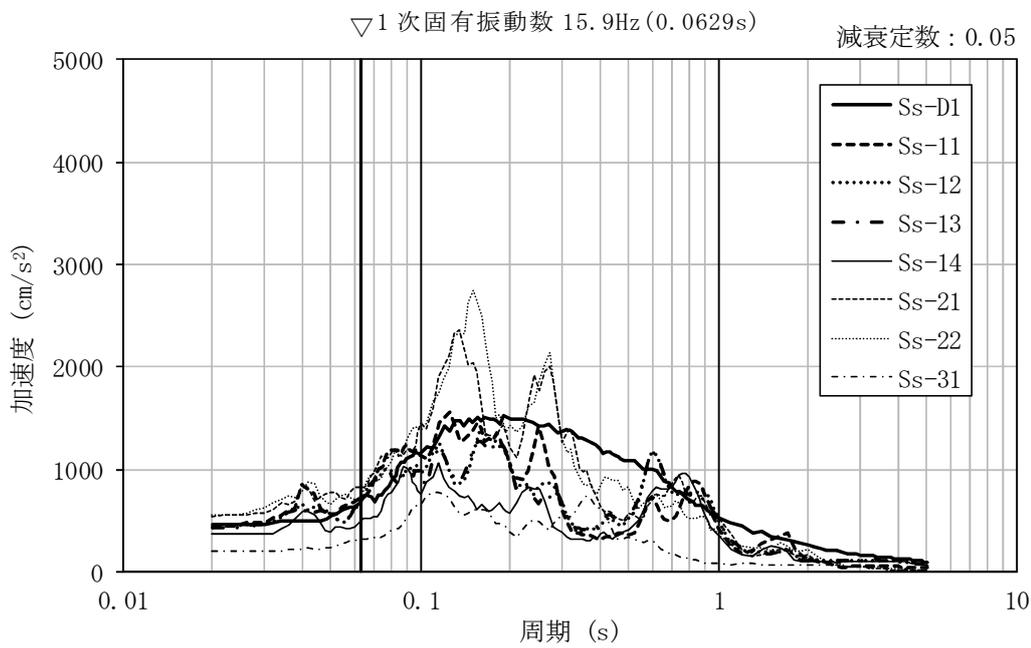


図 4-1 評価対象が位置する質点での床応答スペクトル
(質点番号 7, S_s , 基本ケース, 鉛直方向)

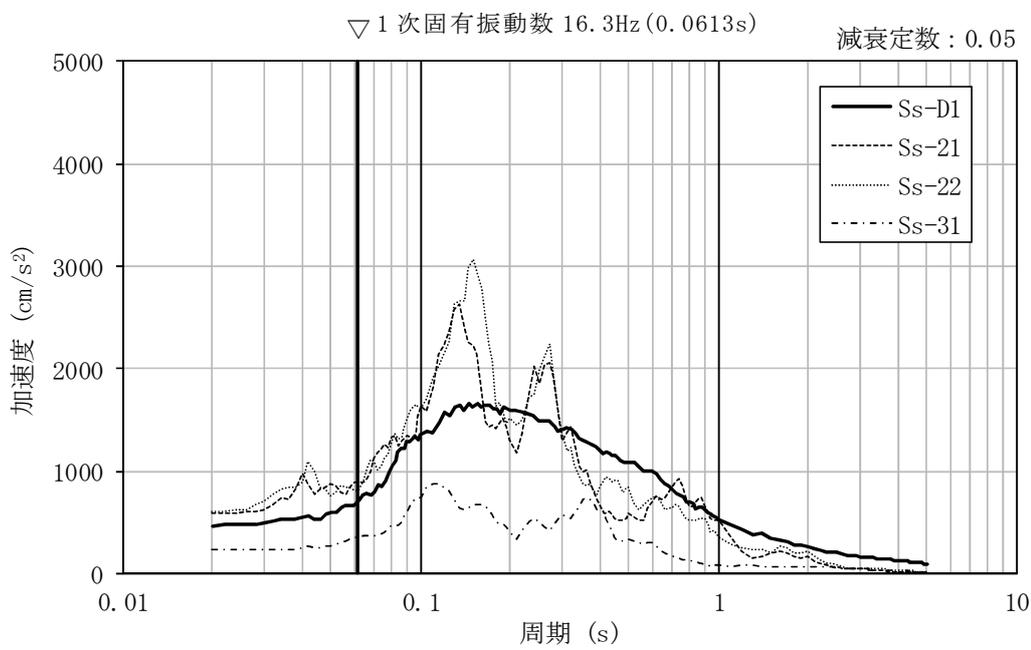
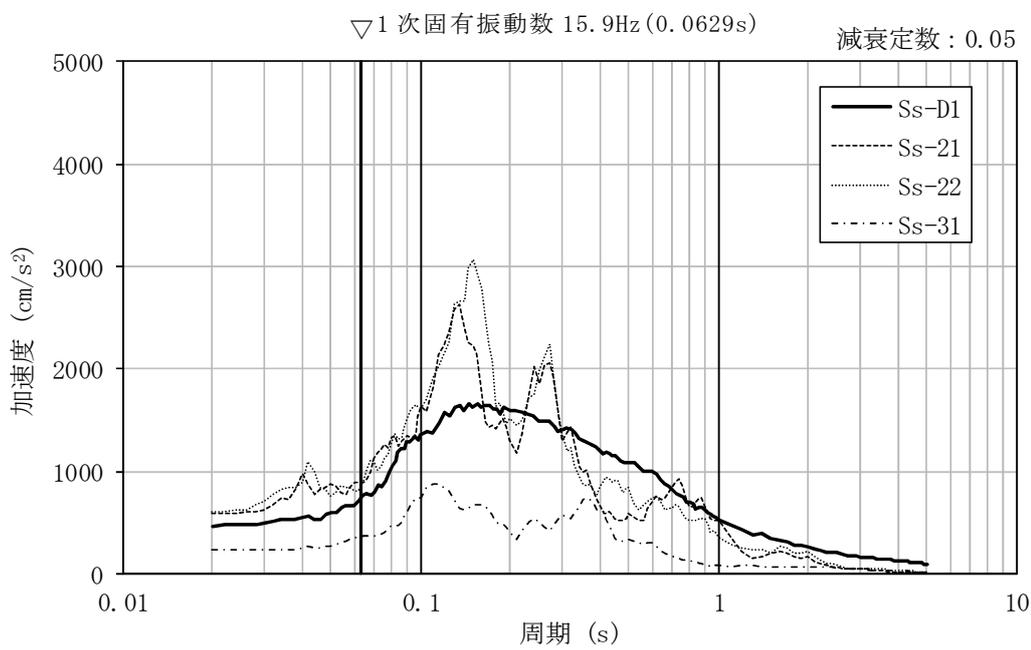


図 4-2 評価対象が位置する質点での床応答スペクトル
(質点番号 7, S_s , $+\sigma$ ケース, 鉛直方向)

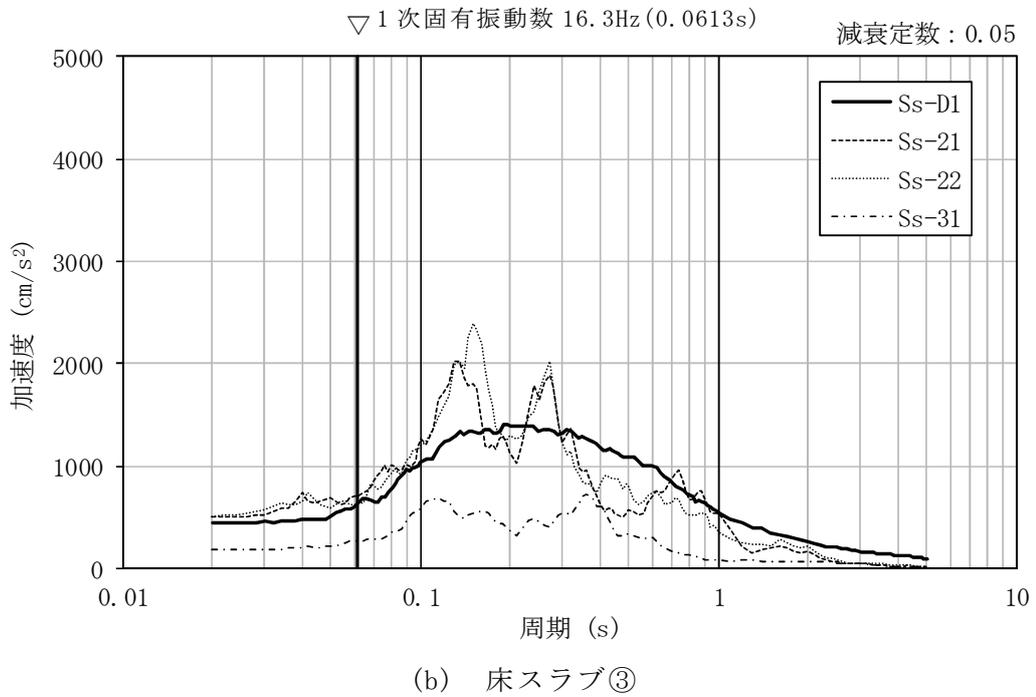
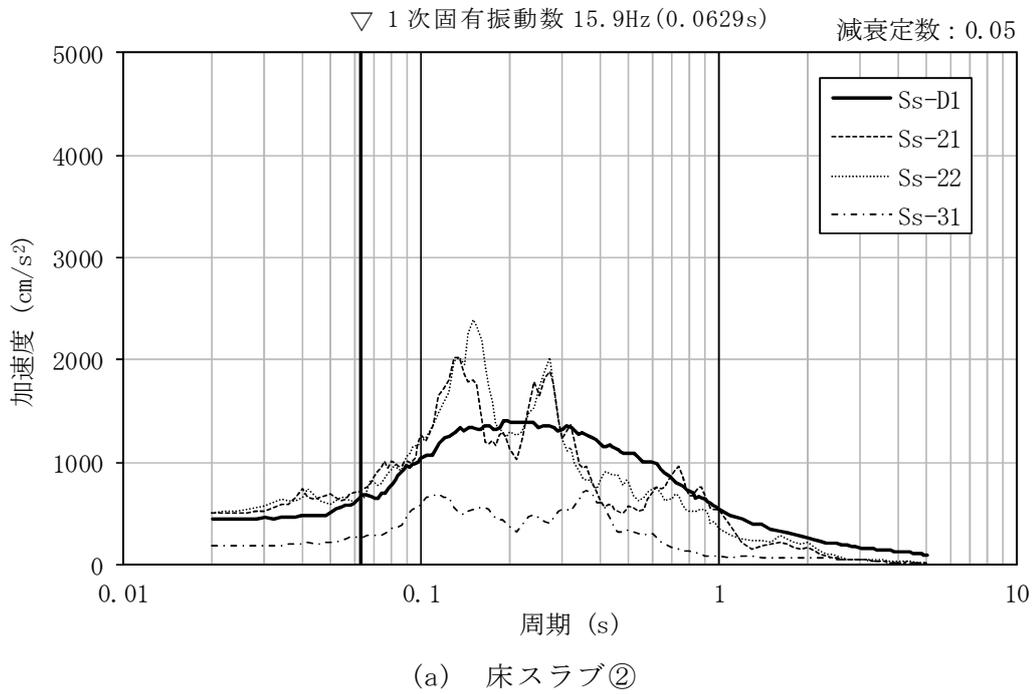


図 4-3 評価対象が位置する質点での床応答スペクトル
(質点番号 7, S_s , $-\sigma$ ケース, 鉛直方向)

表 4-1 1次固有振動数を考慮した鉛直震度

部 位	1次固有振動数 (Hz)	基 本 ^{※1} (cm/s ²)	地盤+σ ^{※2} (cm/s ²)	地盤-σ ^{※2} (cm/s ²)	最大値 (cm/s ²)	検討用 ^{※3} 鉛直震度
床スラブ②	15.9	824	884	723	884	1.91
床スラブ③	16.3	825	893	700	893	1.92

※1: S_s-D1, S_s-11, S_s-12, S_s-13, S_s-14, S_s-21, S_s-22及びS_s-31の最大値

※2: S_s-D1, S_s-21, S_s-22及びS_s-31の最大値

※3: 長期荷重を含む

表 4-2 長期荷重時の端部モーメント, 中央モーメント及びせん断力

部 位	スラブ厚 (mm)	方 向	端部モーメント (kN・m/m)	中央モーメント (kN・m/m)	せん断力 (kN/m)
床スラブ②	500	長辺 (NS)	317.4	158.7	179.7
床スラブ③	500	長辺 (EW)	317.4	158.7	179.7

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

部 位	検討用鉛直震度	方 向	端部モーメント (kN・m/m)	中央モーメント (kN・m/m)	せん断力 (kN/m)
床スラブ②	1.91	長辺 (NS)	606.2	303.1	343.2
床スラブ③	1.92	長辺 (EW)	609.4	304.7	345.0

4.3 評価結果

中央制御室遮蔽を構成するスラブについて、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)」に基づく許容値を超えないことを確認した。

表 4-4 (1/2) 評価結果 (床スラブ②)

方 向		NS 方向
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		500 × 1000
有効せい d (mm)		400
配 筋	上 端	D32@140 (5673 mm ²)
	下 端	D32@140 (5673 mm ²)
発生曲げモーメント M (kN・m)		606.2
許容値 M_A (kN・m)		685
検定値 M/M_A		0.89
発生せん断力 Q (kN)		343.2
せん断スパン比による割増係数 α		1.00
許容値 Q_A (kN)		371
検定値 Q/Q_A		0.93
判 定		可

表 4-4 (2/2) 評価結果 (床スラブ③)

方 向		EW 方向
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		500 × 1000
有効せい d (mm)		400
配 筋	上 端	D32@140 (5673 mm ²)
	下 端	D32@140 (5673 mm ²)
発生曲げモーメント M (kN・m)		609.4
許容値 M_A (kN・m)		685
検定値 M/M_A		0.89
発生せん断力 Q (kN)		345.0
せん断スパン比による割増係数 α		1.00
許容値 Q_A (kN)		371
検定値 Q/Q_A		0.93
判 定		可

別紙 ねじれの影響を考慮した耐震壁及びスラブの検討

目次

1. 概要..... 別紙-1
2. ねじれの影響を考慮した耐震壁の評価..... 別紙-1
3. ねじれの影響を考慮したスラブの評価..... 別紙-4

1. 概要

中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書において、地震応答解析による耐震壁の評価を行っているが、中央制御室が偏心して位置していることから、耐震壁はねじれの影響を受ける可能性があり、また、各耐震壁の挙動の差によりスラブに面内せん断力が生じる。

ここでは、ねじれの影響を考慮した耐震壁及びスラブの評価を行う。

2. ねじれの影響を考慮した耐震壁の評価

(1) 評価方針

補足説明資料「原子炉建屋の耐震性評価に関する補足説明」に示す、ねじれを考慮して算定した各耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界を（最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} ）を超えないことを確認する。ねじれを考慮して算定した各耐震壁の最大せん断ひずみを表 2-1 に示す。

なお、ねじれを考慮した各耐震壁のせん断ひずみの評価に用いた地震力は、基準地震動 $S_{s-D1} \sim S_{s-31}$ 及び地盤のばらつきケースの包絡値を用いている。

表 2-1 各耐震壁の最大せん断ひずみ

(a) NS 方向

最大せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)					
EL. (m)	I/W-W	I/W-E	S/W	O/W-W	O/W-E
63.65					
57.00	0.11	0.11			
46.50	0.20	0.20			
38.80	0.27	0.26	0.04		
34.70	0.56	0.54	0.18		
29.00	1.22	1.17	0.56		
20.30	0.85	0.47	0.46	0.23	
14.00	0.75	0.55	0.79	0.43	
8.20	0.32	0.31	0.22	0.21	0.15
2.00	0.21	0.22	0.18	0.18	0.14
-4.00	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22

注) I/W-W : 西側内部ボックス壁
 I/W-E : 東側内部ボックス壁
 O/W-W : 西側外部ボックス壁
 O/W-E : 東側外部ボックス壁

(b) EW 方向

最大せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)					
EL. (m)	I/W-N	I/W-S	S/W	O/W-N	O/W-S
63.65					
57.00	0.11	0.11			
46.50	0.21	0.21			
38.80	0.12	0.13	0.05		
34.70	0.22	0.26	0.14		
29.00	0.54	0.65	0.36		
20.30	1.59	0.36	0.66	0.23	
14.00	0.63	1.12	0.73	0.56	
8.20	0.59	0.44	0.58	0.27	
2.00	0.24	0.24	0.20	0.18	0.14
-4.00	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22

注) I/W-N : 北側内部ボックス壁
 I/W-S : 南側内部ボックス壁
 O/W-N : 北側外部ボックス壁
 O/W-S : 南側外部ボックス壁

 : 評価対象部位

(2) 評価結果

ねじれを考慮した中央制御室遮蔽の耐震壁の最大せん断ひずみを表2-2に示す。

表2-2より、ねじれを考慮して算定した各耐震壁の最大せん断ひずみが許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

表 2-2 ねじれを考慮した中央制御室遮蔽の耐震壁の最大せん断ひずみ

(a) NS 方向

部 位	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)
外部ボックス壁 (西側)	0.43
内部ボックス壁 (西側)	0.85

(b) EW 方向

部 位	せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)
外部ボックス壁 (北側)	0.56
内部ボックス壁 (北側)	1.59

3. ねじれの影響を考慮したスラブの評価

(1) 評価方針

ねじれによる各耐震壁の挙動の差により生じるスラブのせん断ひずみについて確認する。スラブのせん断ひずみは、ねじれによる耐震壁間の相対変位をスラブの内法スパンで除して算定する。耐震壁間の相対変位は、地震応答解析による基礎版上端からの水平変位に、補足説明資料「原子炉建屋の耐震性評価に関する補足説明」に示す、ねじれに対する補正係数を乗じて算定する。ここで、中央制御室天井スラブ及び床スラブ位置の水平変位は、線形補間により算定する。また、ねじれ補正係数は、天井部(EL. 23.0 m)についてはEL. 20.3 m～EL. 29.0 mの値を、床部(EL. 18.0 m)についてはEL. 14.0 m～EL. 20.3 mの値を用いる。

なお、検討は、水平変位が最も大きくなる基準地震動 S_s-31 に対して行う。

基礎版上端からの水平変位を表3-1に、ねじれに対する補正係数を表3-2に、スラブのせん断ひずみを表3-3に示す。

表3-1 地震応答解析による基礎版上端からの水平変位（基準地震動 S_s-31 ）

(a) NS方向

EL. (m)	水平変位 (cm)	基礎版上端からの水平変位 (cm)
29.0	2.41	1.93
23.0 ^{※1}	2.00	1.52
20.3	1.81	1.33
18.0 ^{※2}	1.63	1.15
14.0	1.32	0.84
-4.0	0.48	—

※1：中央制御室天井レベル

※2：中央制御室床レベル

(b) EW方向

EL. (m)	水平変位 (cm)	基礎版上端からの水平変位 (cm)
29.0	2.54	2.05
23.0 ^{※1}	2.13	1.64
20.3	1.94	1.45
18.0 ^{※2}	1.74	1.25
14.0	1.38	0.89
-4.0	0.49	—

※1：中央制御室天井レベル

※2：中央制御室床レベル

表 3-2 ねじれに対する補正係数

(a) NS 方向

EL. (m)	I/W-W	I/W-E	S/W	O/W-W	O/W-E
63.65					
57.00	1.000	1.000			
46.50	1.000	1.000			
38.80	1.019	0.981	1.000		
34.70	1.030	0.970	1.000		
29.00	1.030	0.970	1.000		
20.30	1.089	0.792	0.941	1.171	
14.00	0.884	1.231	1.057	0.787	
8.20	1.218	0.913	1.066	1.306	0.807
2.00	0.991	1.008	1.000	0.986	1.014
-4.00	0.991	1.008	1.000	0.986	1.014

注) I/W-W : 西側内部ボックス壁
 I/W-E : 東側内部ボックス壁
 O/W-W : 西側外部ボックス壁
 O/W-E : 東側外部ボックス壁

(b) EW 方向

EL. (m)	I/W-N	I/W-S	S/W	O/W-N	O/W-S
63.65					
57.00	1.000	1.000			
46.50	1.000	1.000			
38.80	1.076	0.927	0.997		
34.70	1.051	0.951	0.997		
29.00	1.051	0.951	0.997		
20.30	0.897	1.282	1.102	0.798	
14.00	0.971	1.045	1.010	0.951	
8.20	0.934	1.269	1.113	0.846	
2.00	1.068	0.939	0.999	1.102	0.905
-4.00	1.049	0.954	0.998	1.073	0.929

注) I/W-N : 北側内部ボックス壁
 I/W-S : 南側内部ボックス壁
 O/W-N : 北側外部ボックス壁
 O/W-S : 南側外部ボックス壁

表 3-3 ねじれを考慮したスラブのせん断ひずみ

(a) NS 方向

位置	部位	水平変位 (cm)	相対変位 (cm)	せん断ひずみ* ($\times 10^{-3}$)
天井 (EL. 23.0m)	O/W-W	1.780	0.125	0.118
	I/W-W	1.655		
床 (EL. 18.0m)	O/W-W	1.196	0.148	0.140
	I/W-W	1.344		

※：相対変位をスラブの内法スパン(10.6m)で除して算定

(b) EW 方向

位置	部位	水平変位 (cm)	相対変位 (cm)	せん断ひずみ* ($\times 10^{-3}$)
天井 (EL. 23.0 m)	O/W-N	1.309	0.162	0.153
	I/W-N	1.471		
床 (EL. 18.0 m)	O/W-N	1.560	0.032	0.031
	I/W-N	1.592		

※：相対変位をスラブの内法スパン(10.6m)で除して算定

(2) 評価結果

ねじれにより生じるスラブの面内せん断ひずみは最大で 0.153×10^{-3} となっている。なお、実際のねじれ変形には、剛体的な挙動が含まれるが、ねじれによる相対変形を全てスラブの面内せん断変形とすることで保守的な評価となる。ここで、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に示される耐震壁のせん断応力度-せん断ひずみ関係の第1折点をせん断ひび割れ時と考えた場合のせん断ひずみを表 3-4 に示す。

ねじれにより生じるスラブの面内せん断ひずみ (0.153×10^{-3}) は、せん断ひび割れ時のせん断ひずみ (0.158×10^{-3}) 以下であり、せん断ひび割れを生じないことから、スラブの評価に影響を及ぼさないことを確認した。

表 3-4 せん断ひび割れ発生時のせん断ひずみ

ひび割れ時のせん断応力度	1.457 N/mm ²
コンクリートのせん断弾性係数	9210 N/mm ²
ひび割れ時のせん断ひずみ	0.158×10^{-3}

※ : $\tau_1 = \sqrt{0.31\sqrt{F_c}(0.31\sqrt{F_c} + \sigma_v)}$

F_c は、コンクリートの設計基準強度で 22.1 N/mm^2 を用いる。

σ_v は圧縮を正とする縦軸応力度で、 0 N/mm^2 とする。