

§ 5 限界耐力計算による構造性能の評価

5.1 本設計における限界耐力計算法に関する概要

建築行政情報センター「2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書」

日本建築学会「限界耐力計算による伝統的木造建築物構造設計指針（2013）」

他に準拠して2層の立体架構を1自由度系に縮約し、応答値を確認した後に、また元の2層の立体架構に戻すまでの手順を以下に示す。

1) 1自由度系に縮約する

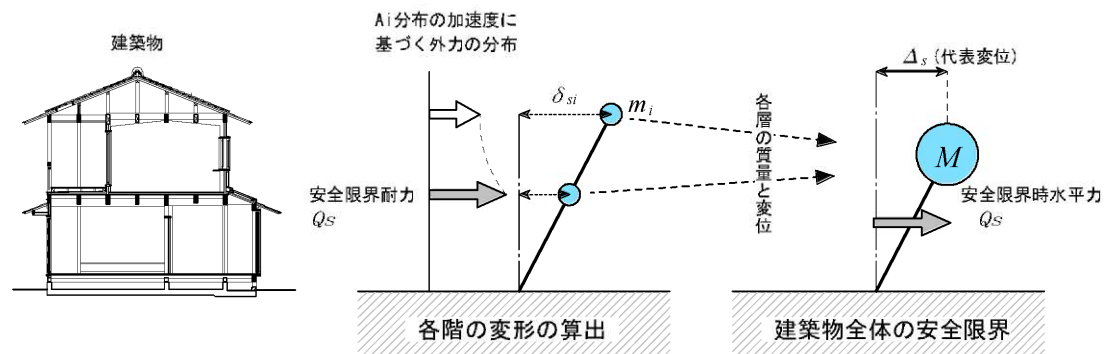
① 各階の復元力特性を求める。このとき、各階の水平変位は重心位置の値を採用する。

② 1自由度系モデルに縮約し、建物全体の復元力特性を求める。

$$\text{有効質量 } Mu = \frac{(m_1 \delta_1 + m_2 \delta_2)^2}{m_1 \delta_1^2 + m_2 \delta_2^2}$$

$$\text{代表変位 } \Delta = \frac{m_1 \delta_1^2 + m_2 \delta_2^2}{m_1 \delta_1 + m_2 \delta_2}$$

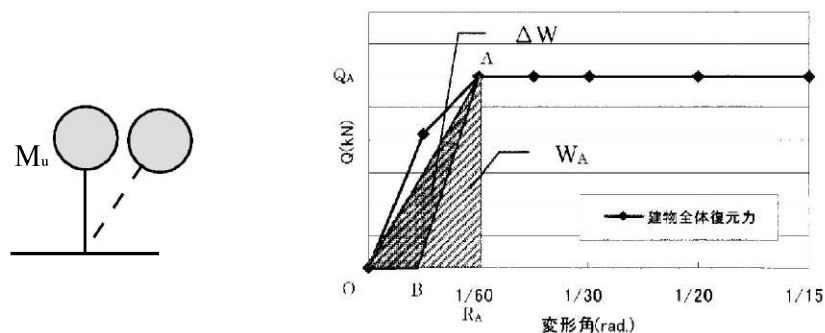
$$\text{等価高さ } He = \frac{m_1 \delta_1 H_1 + m_2 \delta_2 H_2}{m_1 \delta_1 + m_2 \delta_2}$$



③ 各変位に対して、等価固有周期(Te)・等価粘性減衰定数(heq)を求める。

$$T_e = 2\pi \sqrt{Mu \frac{\delta}{Q}} \quad \delta : \text{変位}, Q : \delta \text{ 時の建物のせん断耐力}$$

$$h_{eq} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\Delta W}{W_A} \quad \Delta W : \text{三角形 OAB の面積}, W_A = R_A \times Q_A / 2$$



2) 1 自由度系に関する応答スペクトルを求める

縮約された 1 自由度系の応答スペクトルを求める手順を以下に示す。

④ 等価固有周期・等価粘性減衰定数・表層地盤加速度増幅率より、応答加速度スペクトルから応答加速度 (S_A) が求まる。

⑤ 応答加速度 (S_A) を応答せん断力 (Q_n) と応答変位 (S_D) に換算する。

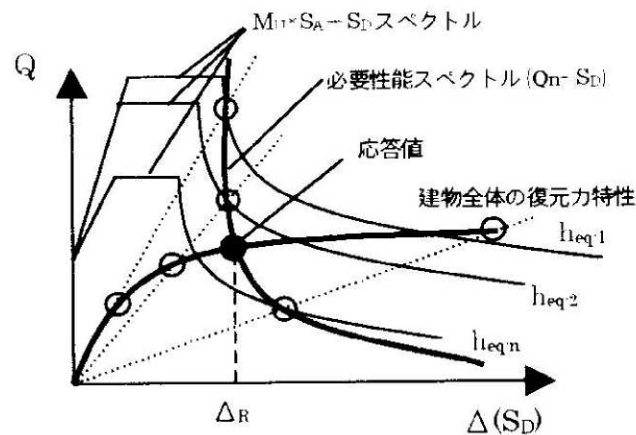
$$Q_n = M_n \cdot S_A, \quad S_D = \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 S_A$$

3) 1 自由度系に関する応答値を求める

縮約された 1 自由度系の応答値を求める手順を以下に示す。

⑥ 各変位における (Q_n , S_D) 点を建物の復元力特性のグラフ上にプロットする。各 (Q_n , S_D) 点を結んだ線を必要性能スペクトルと呼ぶ。

⑦ 必要性能スペクトルと建物の復元力特性が交差した点が、等価 1 自由度系モデルの応答値となる。



4) 縮約された 1 自由度系の応答値を元の立体架構に戻す

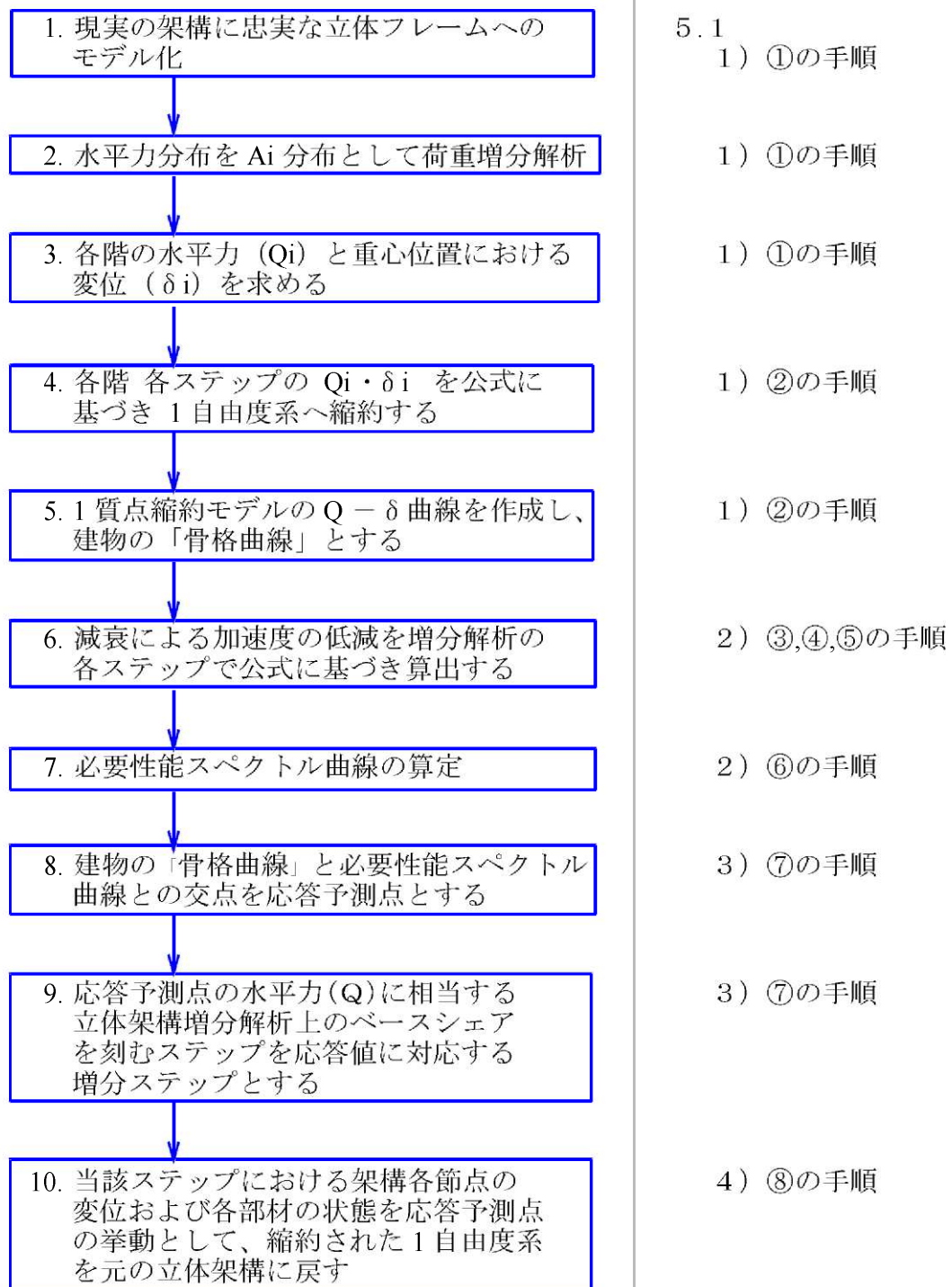
縮約された 1 自由度系の応答値を元の立体架構に戻し、応答値を求める。

⑧ 等価 1 自由度系モデルの応答値が求まれば、次に元の立体架構に戻る。

等価 1 質点系の応答値を算出した荷重ステップに対応する元の立体架構の増分ステップにおける応力・変位状態が、縮約モデルの応答値と対応する元の立体架構の応答値と考えられる。

その理由は、立体架構を等価 1 質点系モデルに縮約する手順 ② において有効質量・代表変位・等価高さを計算する各ステップは、元の立体架構の増分ステップであり、1 質点系モデルの骨格曲線に刻まれたステップ と 元の立体架構の荷重ステップとは、1:1 に対応しているためである。

5) 本設計における『1自由度系への縮約 ～ 各部の応答値』のフロー

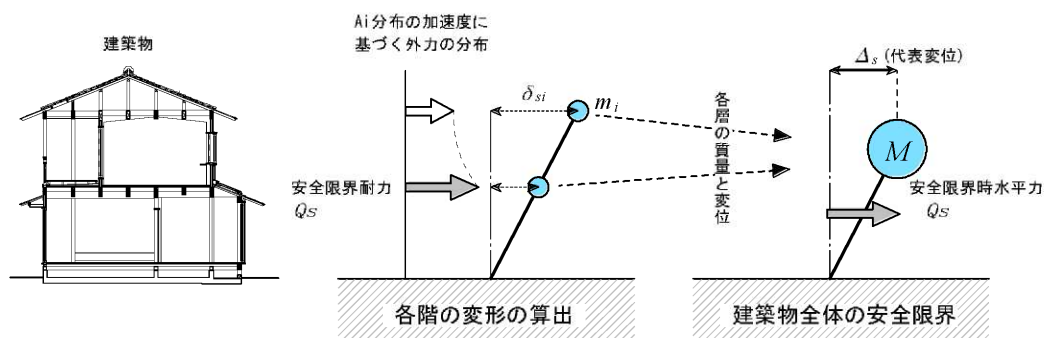


5.2 1 質点系縮約モデルに関する諸元

1) 計画建物の立体架構解析に関する諸元

建物の諸元			
解析上の桁高さ	2 階		2,705 mm
	1 階		2,815 mm
地震用建物重量 Wi (Σ Wi)	屋根	屋根～ 2 階壁上半分	233.9 kN (233.9 kN)
	2 階	2 階壁下半分～ 2 階床～ 1 階壁上半分	375.4 kN (609.3 kN)
	1 階	1 階壁下半分 (土台、基礎含まず)	85.4 kN (694.7 kN)
増分解析外力分布	Ai 分布	2 階	A ₂ = 1.318
		1 階	A ₁ = 1.000
地域係数 Z			1.0
地盤種別			2 種
Gs の計算方法			略算法

2) 1 質点縮約モデルに関する諸元



1 質点系にモデル化するに当たり、実際の架構を立体架構モデル (2 層) として、増分解析を行い、各階重心位置におけるせん断力－変位曲線を得る。
 上記 2 質点の解析結果を公式に基づき 1 質点縮約モデルに縮約する。
 次頁以下に、限界耐力計算の諸元を抜粋して示す。なお、表中の層間変形角に目安と計算値があるのは、増分解析が荷重増分であり、制御が困難なためである。
 なお、層間変形角 1/15 では解析が収束せず、追跡できなかった。以下に、抜粋して諸元を表示する。

a) X 方向（南北方向）

1 質点縮約モデル の層間変形角(rad)		せん断力 Q (kN)	固有周期 Te (sec)	有効質量 M (t)	代表高さ H (m)
目安	計算値				
1/200	1/201	197.8	0.496	58.9	4.207
1/150	1/151	259.5	0.498	59.0	4.203
1/120	1/120	314.9	0.508	59.3	4.186
1/ 90	1/ 90	375.1	0.539	60.2	4.145
1/ 60	1/ 56	404.0	0.661	61.7	4.054
1/ 30	1/ 30	431.3	0.877	62.5	3.979
1/ 20	1/ 26	437.4	0.926	62.6	3.969
1/ 15	—	—	—	—	—

— は解析が収束せず、追跡できなかった。

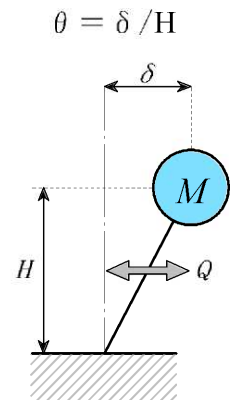
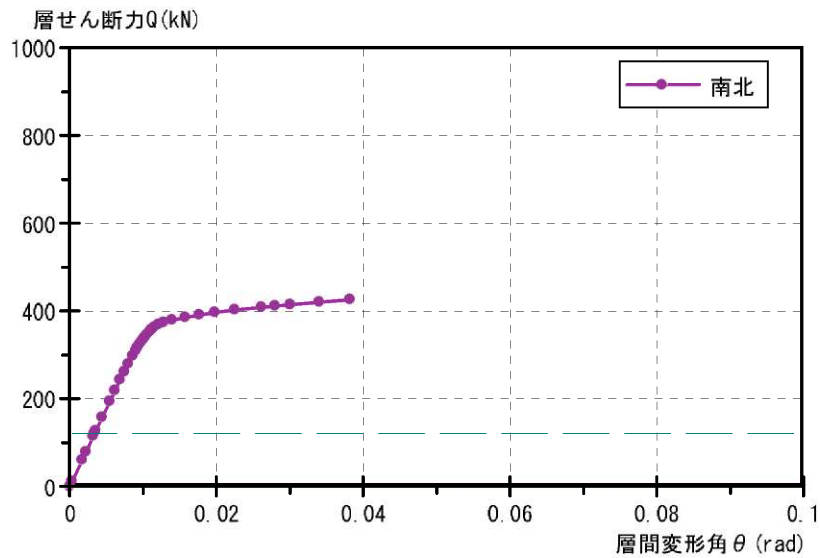
b) Y 方向（東西方向）

1 質点縮約モデル の層間変形角(rad)		せん断力 Q (kN)	固有周期 Te (sec)	有効質量 M (t)	代表高さ H (m)
目安	計算値				
1/200	1/199	98.3	0.708	58.9	4.208
1/150	1/155	123.0	0.716	59.0	4.200
1/120	1/114	159.1	0.736	59.4	4.184
1/ 90	1/ 93	175.4	0.777	60.0	4.152
1/ 60	1/ 63	199.3	0.824	60.6	4.097
1/ 30	1/ 30	228.2	1.206	62.1	4.017
1/ 20	1/ 22	237.6	1.365	62.1	4.018
1/ 15	—	—	—	—	—

— は解析が収束せず、追跡できなかった。

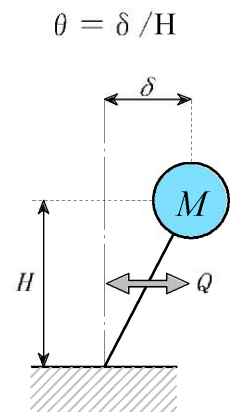
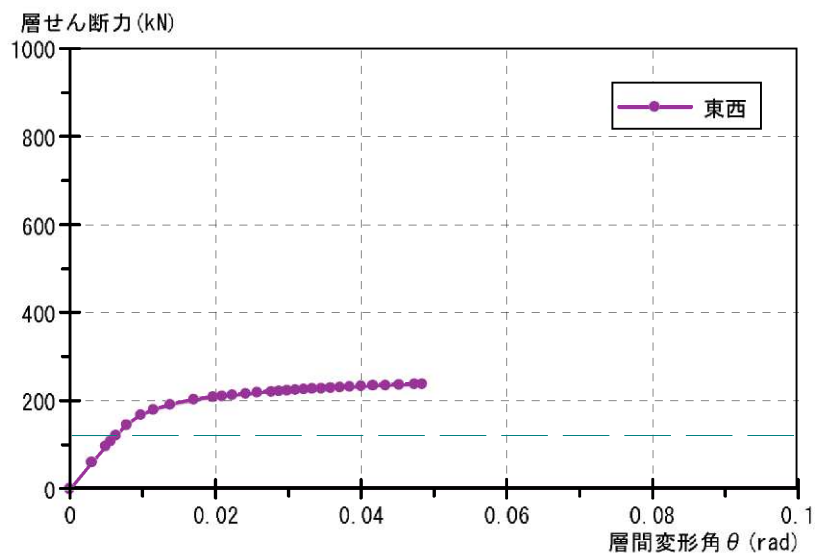
3) 1 質点縮約モデルの復元力特性

a) X 方向 (南北方向)



X 方向 1 質点縮約モデル 荷重－変形曲線

b) Y 方向 (東西方向)



Y 方向 1 質点縮約モデル 荷重－変形曲線

5.3 必要性能スペクトルに関する諸元

1) 概要

1 質点系縮約モデルの層間変形角ごとに加速度応答スペクトルを求め、これに有効質量を乗じて応答せん断力を算出する。算出式を以下に示す。

なお、パラメータの説明および次頁に示すグラフは、日本建築センター新・技術セミナー資料「振動応答をイメージして耐震設計法を学ぶ（鉄骨造編）」を参考とした。

a) 稀地震（損傷限界時）の場合

応答せん断力 $Q_d = S_{ad} \times M_{ud}$

$$S_{ad} = S_{a0} \times Z \times G_s \times p \times q$$

応答変位 SD_d は、 $T_d = 2\pi \sqrt{M_{ud} \frac{\Delta d}{Q_d}}$ の式を変位 Δd について整理して、

$$SD_d = \left(\frac{T_d}{2\pi} \right)^2 \times \frac{Q_d}{M_{ud}} = \left(\frac{T_d}{2\pi} \right)^2 \times S_{ad}$$

ここで、 Q_d ：損傷限界時の応答せん断力（kN）

M_{ud} ：損傷限界時の有効質量（t）

S_{ad} ：損傷限界時用加速度応答スペクトル（m/sec²）

S_{a0} ：解放工学的基盤における加速度応答スペクトル（m/sec²）
（グラフを次頁に示す。）

Z ：地域係数

G_s ：表層地盤における加速度の増幅率

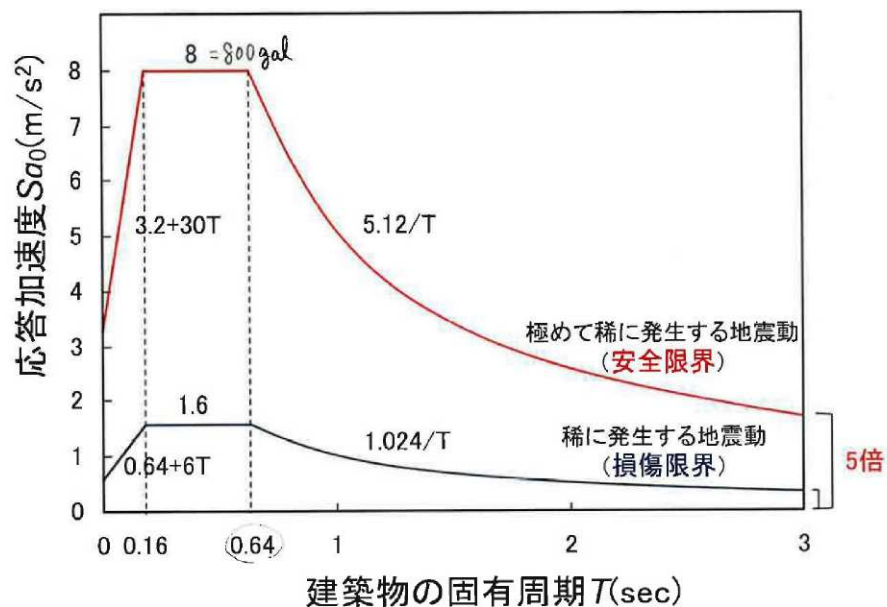
p ：低層建築物補正係数

（低層建築物で過大評価となっている応答値を補正するための係数）

q ：有効質量比補正係数

（有効質量比 $M_u / \sum m_i$ による補正が 0.75 未満とならないようにするための係数）

SD_d ：加速度応答スペクトルから得られる損傷限界時の
応答変位（mm）



建築物の固有周期 $T(\text{sec})$
 解放工学的基盤における加速度応答スペクトル

日本建築センター新・技術セミナー資料
 「振動応答をイメージして耐震設計法を学ぶ（鉄骨造編）」より抜粋

b) 極稀地震（安全限界時）の場合

応答せん断力 $Q_s = S_{as} \times M_{us}$

$S_{as} = S_{a0} \times Z \times G_s \times F_h \times p \times q$

応答変位 $SD_s = \left(\frac{T_s}{2\pi} \right)^2 \times \frac{Q_s}{M_{us}} = \left(\frac{T_s}{2\pi} \right)^2 \times S_{as}$

ここで、 Q_s : 安全限界時の応答せん断力 (kN)

M_{us} : 安全限界時の有効質量 (t)

S_{as} : 安全限界時用加速度応答スペクトル (m/sec^2)

F_h : 履歴減衰による加速度の低減率

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h}$$

SD_s : 加速度応答スペクトルから得られる安全限界時の
 応答変位 (mm)

上記以外については、a) 稀地震時参照

2) 損傷限界・X 方向

1 質点縮約モデル の層間変形角(rad)		加速度応答 スペクトル	応答 せん断力	応答変位	増幅率
目安	計算値	Sad (m/sec ²)	Qd (kN)	SDd (mm)	Gs
1/200	1/201	2.00	117.9	12.5	1.500
1/150	1/151	1.98	116.9	12.5	1.500
1/120	1/120	1.92	114.1	12.6	1.500
1/ 90	1/ 90	1.76	105.6	12.9	1.500
1/ 60	1/ 56	1.41	86.9	15.6	1.549
1/ 30	1/ 30	1.18	73.6	22.9	2.025
1/ 20	1/ 26	1.09	68.3	23.7	2.025
1/ 15	—	—	—	—	—

3) 損傷限界・Y 方向

1 質点縮約モデル の層間変形角(rad)		加速度応答 スペクトル	応答 せん断力	応答変位	増幅率
目安	計算値	Sad (m/sec ²)	Qd (kN)	SDd (mm)	Gs
1/200	1/199	2.04	120.1	25.9	1.658
1/150	1/155	2.04	120.4	26.5	1.678
1/120	1/114	2.04	121.1	28.0	1.724
1/ 90	1/ 93	2.04	122.5	31.2	1.822
1/ 60	1/ 63	2.00	121.7	39.5	2.025
1/ 30	1/ 30	1.46	90.8	53.9	2.025
1/ 20	1/ 22	1.29	80.2	61.0	2.025
1/ 15	—	—	—	—	—

4) 安全限界・X 方向

1 質点縮約モデル の層間変形角		加速度応答 スペクトル	応答 せん断力	応答変位	増幅率	減衰
目安	計算値	Sas (m/sec ²)	Qs (kN)	SDs (mm)	Gs	h
1/200	1/201	10.00	589.2	62.3	1.500	0.053
1/150	1/151	9.91	584.4	62.3	1.500	0.054
1/120	1/120	9.61	570.2	62.8	1.500	0.059
1/ 90	1/ 90	8.78	528.2	64.7	1.500	0.074
1/ 60	1/ 56	7.05	434.7	77.9	1.549	0.117
1/ 30	1/ 30	5.88	367.8	114.6	2.025	0.156
1/ 20	1/ 26	5.46	341.6	118.6	2.025	0.162
1/ 15	—	—	—	—	—	—

5) 安全限界・Y 方向

1 質点縮約モデル の層間変形角		加速度応答 スペクトル	応答 せん断力	応答変位	増幅率	減衰
目安	計算値	Sas (m/sec ²)	Qs (kN)	SDs (mm)	Gs	h
1/200	1/199	9.94	585.2	126.1	1.658	0.054
1/150	1/155	9.74	574.9	126.5	1.678	0.057
1/120	1/114	9.32	553.2	127.7	1.724	0.064
1/ 90	1/ 93	8.60	516.5	131.6	1.822	0.078
1/ 60	1/ 63	7.27	443.3	143.7	2.025	0.106
1/ 30	1/ 30	4.34	269.3	159.8	2.025	0.153
1/ 20	1/ 22	3.65	226.9	172.4	2.025	0.165
1/ 15	—	—	—	—	—	—

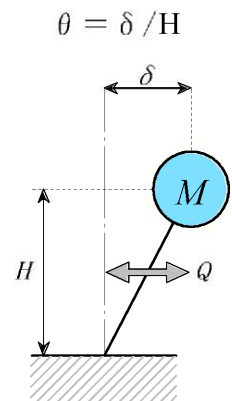
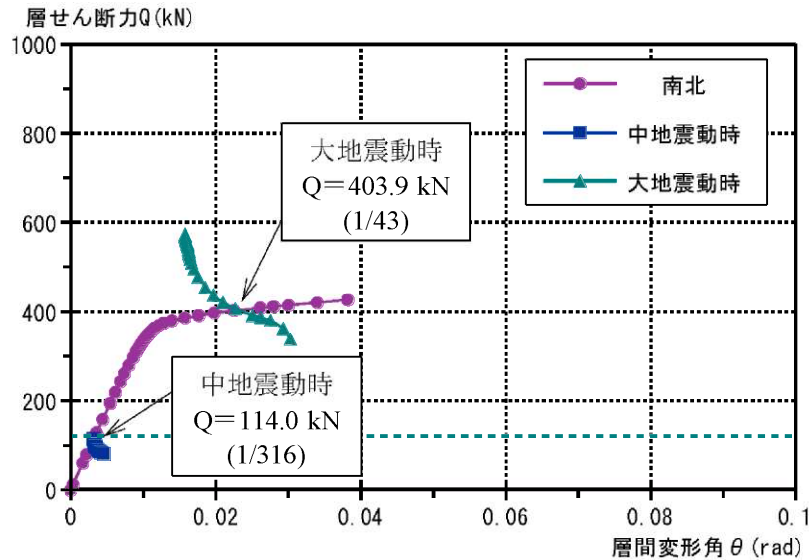
6) 必要性能スペクトル曲線

上記の諸表に示す通り、層間変形角と応答せん断力が求められたため、これを1 質点系縮約モデルの骨格曲線グラフ上に書き込めば必要性能スペクトル曲線を得る。

5.4 限界耐力計算結果の概要

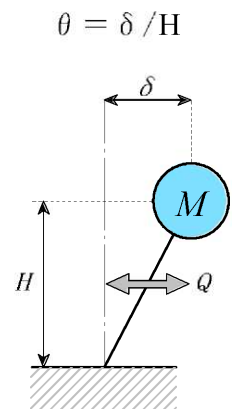
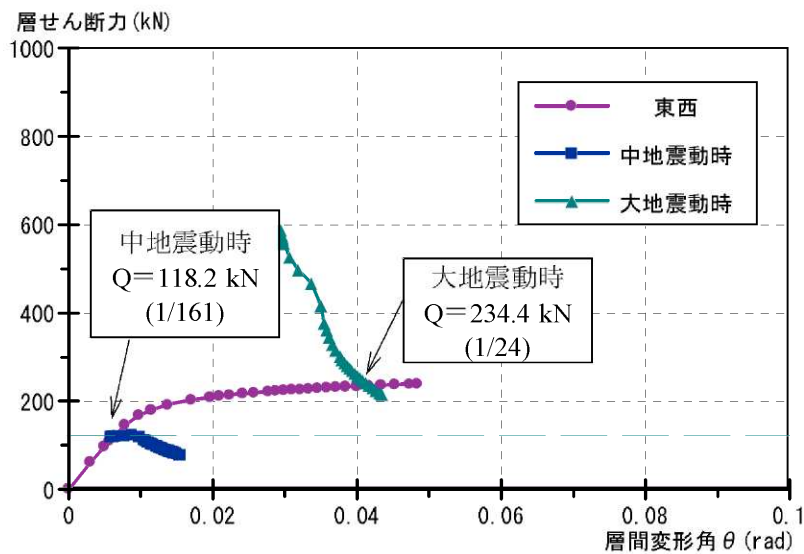
- 1) 1質点系縮約モデルの荷重-変形曲線(骨格曲線)と損傷限界・安全限界に関する必要性能スペクトル曲線との交点をそれぞれ「損傷限界」「安全限界」の変形応答せん断力とする。

2) X方向(南北方向)の損傷限界と安全限界



1 質点系縮約モデルと必要性能スペクトル曲線

3) Y方向(東西方向)の損傷限界と安全限界



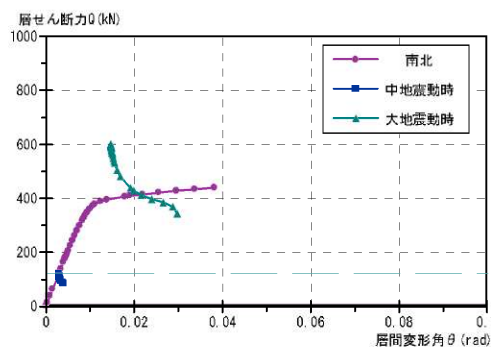
1 質点系縮約モデルと必要性能スペクトル曲線

5.5 縮約された1質点を元の2質点と立体架構に戻した応答値の概要

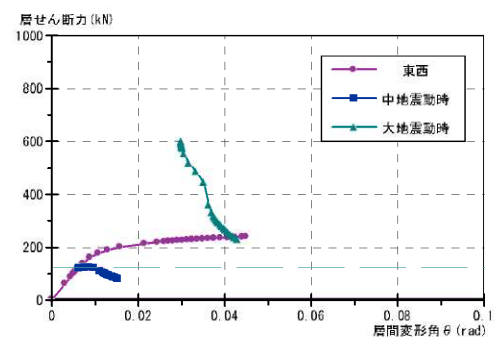
1) 概要

1質点系縮約モデルの骨格曲線と必要性能スペクトル曲線の交点より求められた損傷限界および安全限界に対応する元の2層立体架構モデルの力学的状態を確認するために以下の手順を踏む。

P.99 にて示した通り、立体架構を等価1質点系モデルに縮約する手順②において有効質量・代表変位・等価高さを計算する各ステップは、元の立体架構の増分ステップであり、1質点系モデルの骨格曲線に刻まれたステップと元の立体架構の荷重ステップとは、1:1に対応しているため、等価1質点系の応答値が算出された荷重ステップに対応する元の立体架構の増分ステップにおける応力・変位状態が、立体架構の応答値と考えられる。



X 方向 限界変形角の算出

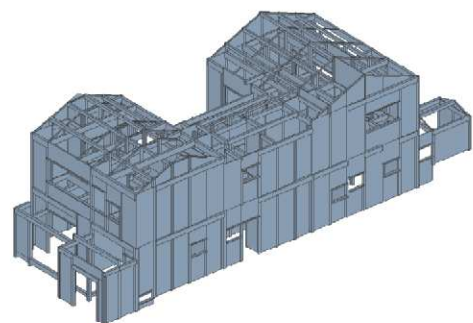


Y 方向 限界変形角の算出

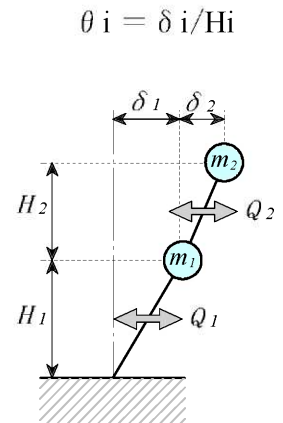
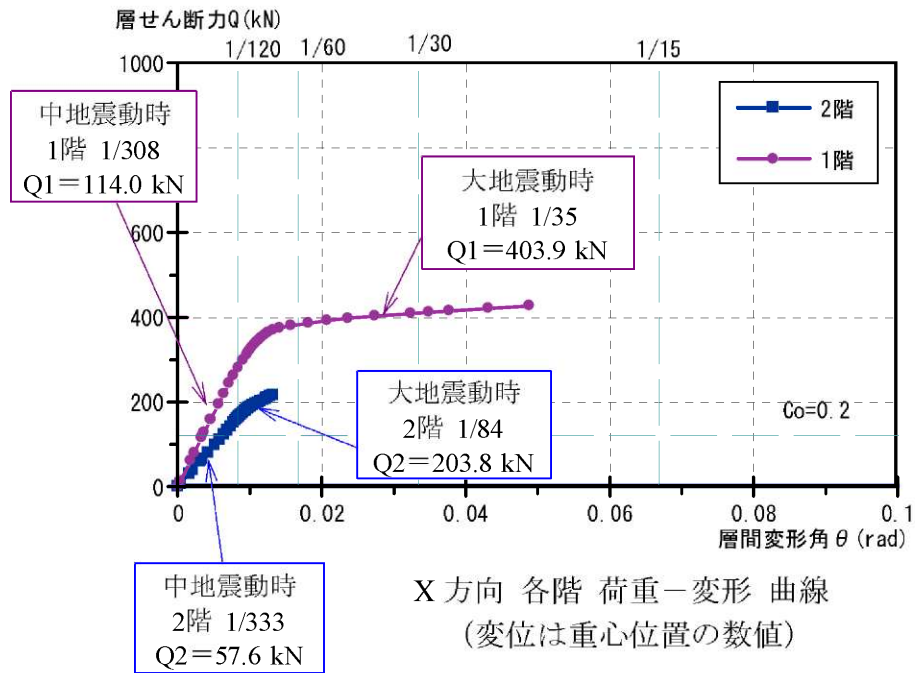
立体架構であるため各部の挙動が把握出来る。

- ・各節点の変位
- ・各部材の応力
- ・重心位置の変位
- ・等々

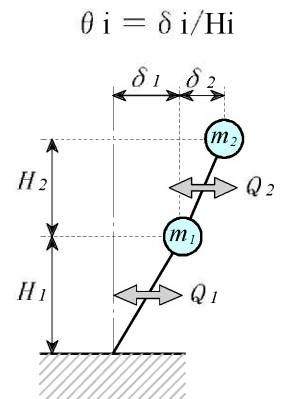
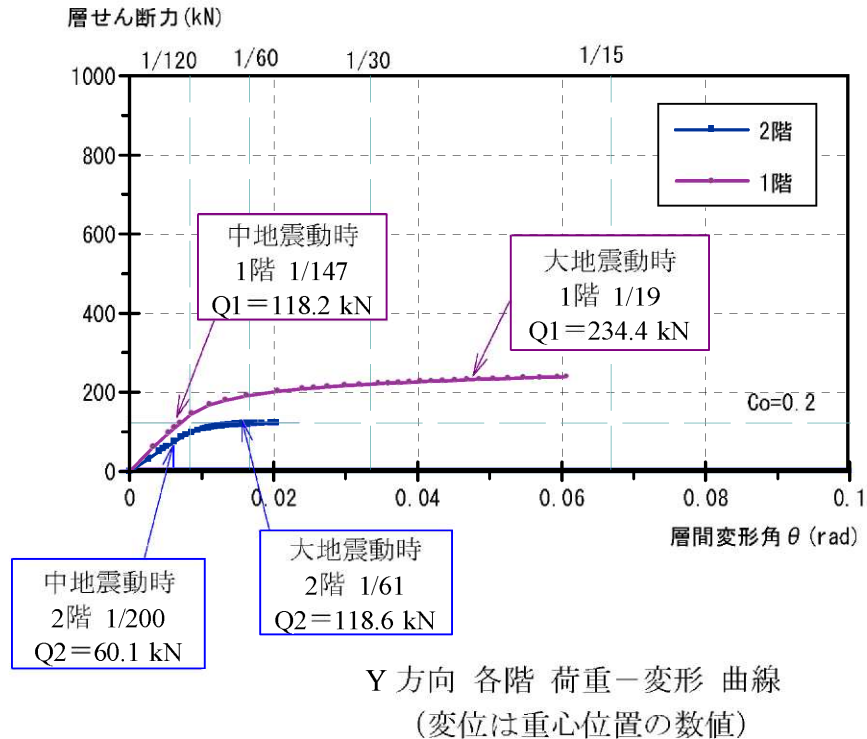
本設計では、応答層間変形角は重心位置を採用せず、各階の最大変位を基に算出した。



2) 実際架構の損傷限界と安全限界：X 方向（南北方向）



3) 実際架構の損傷限界と安全限界：Y 方向（東西方向）



5.6 稀地震時の応答変位・応答せん断力のまとめ

1) 応答値の概要（層間変形角）

a) X 方向（南北方向）

階	層せん断力 (kN)	層せん断力係数	層間変形角	クライテリア
2	57.6	0.246	最大 1/307	1/120 以下
			重心 1/333	
1	114.0	0.187	最大 1/261	1/120 以下
			重心 1/308	

稀地震時の等価固有周期および粘性減衰定数

損傷限界固有周期 Td	0.51 sec
粘性減衰定数 h	0.051

b) Y 方向（東西方向）

階	層せん断力 (kN)	層せん断力係数	層間変形角	クライテリア
2	60.1	0.257	最大 1/164	1/120 以下
			重心 1/200	
1	118.2	0.195	最大 1/135	1/120 以下
			重心 1/147	

稀地震時の等価固有周期および粘性減衰定数

損傷限界固有周期 Td	0.71 sec
粘性減衰定数 h	0.057

2) 部材の応答（稀地震）

耐震性能の項目	クライテリア	備考
木造部材の応力確認	短期許容応力度以下	
柱部材の応力確認	短期許容応力度以下	
耐力壁の性能確認	弾性域	

5.7 極稀地震時の応答変位・応答せん断力の算出結果

1) 応答値の概要（層間変形角）

a) X 方向（南北方向）

階	層せん断力 (kN)	層せん断力係数	層間変形角	クライテリア
2	203.8	0.880	最大 1/79	1/15 以下
			重心 1/84	
1	403.9	0.667	最大 1/34	1/15 以下
			重心 1/35	

極稀地震時の等価固有周期および粘性減衰定数

安全限界固有周期 T_s	0.79 sec
粘性減衰定数 h	0.137

b) Y 方向（東西方向）

階	層せん断力 (kN)	層せん断力係数	層間変形角	クライテリア
2	118.6	0.502	最大 1/44	1/15 以下
			重心 1/61	
1	234.4	0.381	最大 1/17	1/15 以下
			重心 1/19	

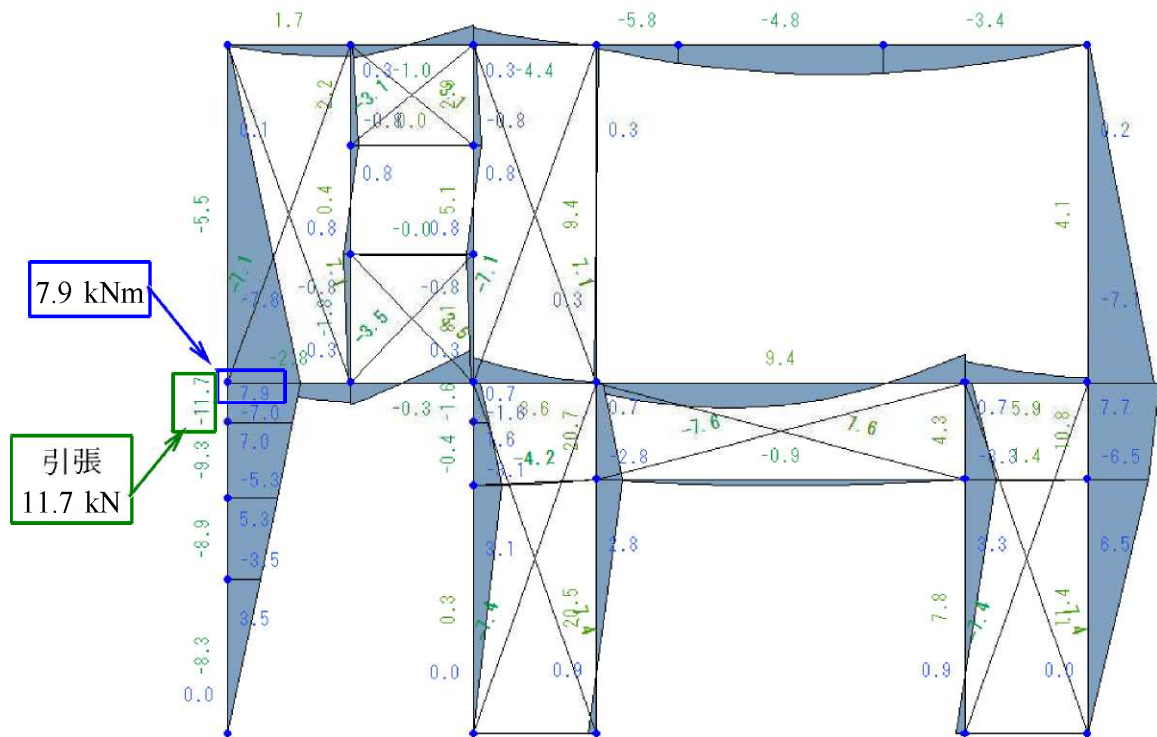
極稀地震時の等価固有周期および粘性減衰定数

安全限界固有周期 T_s	1.32 sec
粘性減衰定数 h	0.162

2) 部材の応答（極稀地震）

耐震性能の項目	クライテリア	備考
木造部材の応力確認	降伏耐力以下	
柱部材の応力確認	降伏耐力以下	柱の降伏を許容しない
耐力壁の性能確認	層間変形角 1/15 以下	

- ・ 柱部材は降伏耐力以下であることを確認する。
通り柱のある X19 通りの極稀地震時における曲げモーメント図を以下に示す。



Y19 通り曲げモーメント図

基準強度 $F_b = 26.7 \text{ N/mm}^2$

$F_t = 16.2 \text{ N/mm}^2$

断面係数の低減率 0.65 とする。

$$Z_e = 0.65 \times 150^3 / 6 = 36.56 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_b = M_d / Z_e = 7.9 \times 10^6 / 36.56 \times 10^4 = 21.6 \text{ N/mm}^2$$

引張検討用断面積の低減率 0.4 とする。

$$A_{et} = 0.4 \times 150 \times 150 = 9000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{M}{Z_e \cdot \sigma_b} + \frac{N}{A_{et} \cdot f_t} = 7.9 \times 10^6 / (36.56 \times 10^4 \times 26.7) + 11.7 \times 10^3 / (16.2 \times 9000)$$

$$= 0.81 + 0.08 = 0.89 < 1.0 \quad \text{OK}$$

柱部材は降伏耐力以下であることを確認した。