

上部構造の目標応答性能を満足する免震設計法に関する研究

その 2 免震設計法の設計例

Research on the Seismic Isolation Design Method that Satisfies the Target Response of the Upper Structure
Part 2 Design Example of the Seismic Isolation Design Method

中山勝仁², 秦一平¹, 豊田悠紀子³

Katsuhito Nakayama², Ippei Hata¹, Yukiko Toyoda³

This paper shows the detailed design example according to the flow chart shown in Part 1. As a result, it demonstrates the effectiveness of the proposed design method through a time history analysis.

2.1. はじめに

その 1 では、応答性能設計図表を用いて上部構造の目標応答性能を満足する免震層パラメータ設計方法の概要について示した。その 2 では、具体的な設計例を示し、提案設計法の有効性を示す。

2.2. 検討モデル

検討モデル及びパラメータを Figure2-1, Table2-1 に示す。このモデルは、41 階建て、高さ 141.85(m)の超高層建築物を想定しており、せん断型モデルとして扱う。また、内部減衰は、1 次モードに対して初期剛性比例型で 2(%)とする。

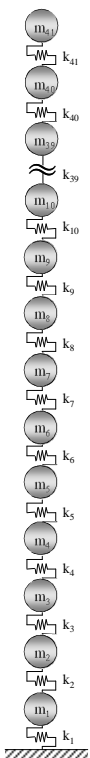


Figure2-1 検討モデル

Table2-1 モデルパラメータ

FL	質量 m _i (ton)	初期剛性 k _i (kN/m)	層高さ H _i (m)
41	2,442	4,699,218	3.35
40	1,680	3,442,738	3.35
39	1,667	3,673,548	3.35
38	1,670	3,828,384	3.35
37	1,670	3,944,804	3.35
36	1,670	4,078,090	3.35
35	1,670	4,220,556	3.35
34	1,670	4,295,956	3.35
33	1,670	4,359,750	3.35
32	1,670	4,425,347	3.35
31	1,670	4,476,918	3.35
30	1,670	4,556,320	3.35
29	1,668	4,759,333	3.35
28	1,670	5,046,587	3.35
27	1,670	5,121,408	3.35
26	1,670	5,124,860	3.35
25	1,670	5,038,931	3.35
24	1,686	4,971,471	3.35
23	1,686	4,995,263	3.35
22	1,686	5,075,805	3.35
21	1,698	5,304,005	3.35
20	1,688	5,596,451	3.35
19	1,688	5,698,134	3.35
18	1,688	5,754,268	3.35
17	1,688	5,792,971	3.35
16	1,688	5,829,705	3.35
15	1,688	5,859,665	3.35
14	1,688	5,902,802	3.35
13	1,688	5,967,194	3.35
12	1,688	6,072,795	3.35
11	1,688	6,126,004	3.35
10	1,688	6,188,349	3.35
9	1,688	6,308,723	3.35
8	1,688	6,460,031	3.35
7	1,688	6,607,640	3.35
6	1,685	6,711,904	3.35
5	1,688	6,892,579	3.35
4	1,688	7,246,250	3.35
3	1,688	8,476,744	3.35
2	1,874	7,627,268	3.35
1	1,794	10,435,281	3.35
免震層	3,210	-	4.50

2.3. 設計例

その 1 で提案したフローチャートに従い、検討モデルに対して免震層の設計を行う。手順①:上部構造総質量 $m_s=69,966.6(\text{ton})$, 免震層質量 $m_b=3,209.9(\text{ton})$ を得る。手順②:上部構造の複素固有値解析を行い、上部構造の

1 次固有周期 $T_s=2.782(\text{s})$ を得る。手順③:設計用入力地震動を設定する。ここでは、BCJ-L2 の最大速度を 100(kine)に基準化したものを使用する。応答スペクトルを Figure2-2

に示す。手順④:応答スペクトルとの兼ね合いから、免震層を含む 1 次固有周期 T_1 を設定する。本設計例では、免震層を含む 1 次固有周期

$T_1=4.0(\text{s})$ とする。

手順⑤: T_1

を満足する免震層等価周期 T_b を(1-4)式より算出する。手順⑥:免震層等価剛性 K_b を算出し、複素固有値解析を行う。その結果を Table2-2, Figure2-3 に示す。また、応答スペクトルから免震層を含む 1 次固有周期 $T_{0,1}=3.885(\text{s})$ 時のスペクトル値を読み取ると、 $S_{v,40}=1.150(\text{m/s})$, $p_{S_{v,40}}=0.814(\text{m/s})$, $D_{40}=0.503(\text{m})$ となる。手順⑦:上部構造の目標応答性能を層間変形角 $R=1/150$ とする。Figure2-2 の応答スペクトルより変位応答は 1 次及び 2 次モードが支配的と判断できる。従って、SRSS 法による 1 次、2 次モードの最大層間変形角が

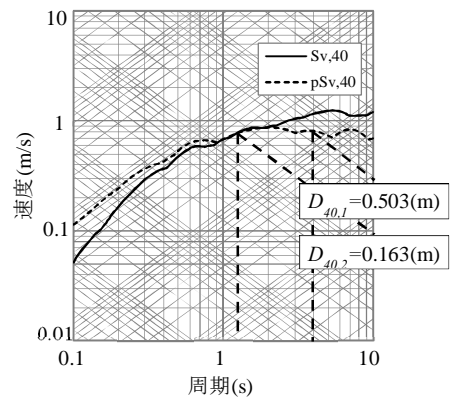


Figure2-2 応答スペクトル

Table2-2 複素固有値解析結果

モード	固有周期 $T(\text{s})$	減衰定数 h
1次	3.885	0.527
2次	1.298	0.543
3次	0.737	0.566
4次	0.508	0.586
5次	0.383	0.609
6次	0.309	0.633
7次	0.257	0.658
8次	0.221	0.682
9次	0.194	0.706
10次	0.172	0.730

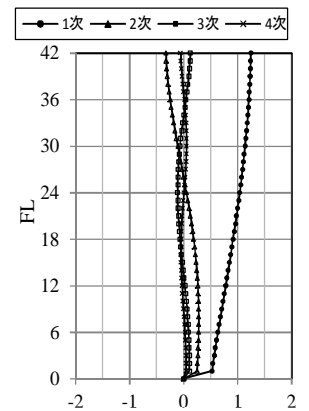


Figure2-3 刺激関数(Real)

1: 日大理工・教員・建築 2: 日大理工・院(前)・建築 3: 日大理工・学部・建築

$R=1/150$ 以内となればよい。各モードの目標層間変形角 R は変位応答スペクトル D_{40} の値の比率より、1次： $R_1=1/200$ 、2次： $R_2=1/614$ と算出した。1次層間刺激関数が最も大きくなる層の変位限界値 D_i を基準変位限界値 $D_{max}=0.694(m)$ 、 $D_{max}/D_{40}=1.379$ を算出する。なお、変位限界値 D_i は層間変形角 R 、各層高さ H_i 、各層刺激関数 $\beta_i r_i$ を用いて(1-5)式より算定した。

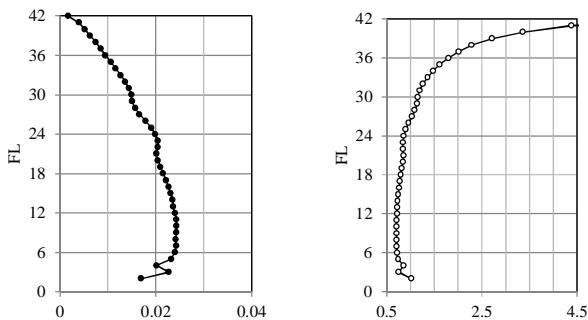


Figure2-4 1次層間刺激関数 Figure2-5 1次基準変位(m)

手順⑧:応答性能設計図表より、目標応答性能を満足するパラメータを選択する。オイルダンパーを速度に対して線形(リリース率 $\mu_v=1.0$ 、2次減衰比 $p_v=1.0$)、バイリニア係数 $p_d=0.3$ とすると応答性能設計図表は、Figure2-6 となる。Figure2-6 の応答性能設計図表より、 $D_{max}/D_{40}=1.379$ 以下となる $h_0=0.15$ 、 $\mu_d=5$ のパラメータを選択し、応答変位倍率 $D_{max}/D_{40}=1.221$ を読み取る。次に、免震層の弾性周期 T_E を(2-1)式より算定する。(2-1)式は、実効周期 T_l と弾性周期 T_E の関係式となっている。(2-1)式より、弾性周期 T_E を $T_l=2.91(s)$ 、 $\mu_d=5$ 、 $p_d=0.3$ から求めると、 $T_l/T_E=1.27$ より $T_E=3.07(s)$ となる。また、建物の総質量 $M=73,176.5(ton)$ 、固有円振動数 $\omega_E=2\pi/T_E$ より、免震層パラメータを計算すると、弾性剛性 $K_E=M\omega_E^2=307,327.6(kN/m)$ 、減衰係数 $C_E=2h_0\omega_E M=44,989.2(kN\cdot s/m)$ となる。

$$\frac{T_l}{T_E} = \frac{\omega_E}{\omega_1} = \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\mu_d}{1+p_d(\mu_d-1)}} - \sqrt{\frac{2}{1+p_d}} \right\} \quad (2-1)$$

手順⑨:複素固有値解析の収斂計算により、1次モードが選択した性能となるように免震層パラメータを調整すると、減衰係数 $C_E=82,736.6(kN\cdot s/m)$ 、弾性剛性 $K_E=1,265,002.0(kN/m)$ 、バイリニア係数 $p_d=0.1$ 、塑性率 $\mu_d=17.3$ となる。複素固有値解析結果を Figure2-7、2-8 に示す。手順⑩:(2-2)式と読み取った応答変位倍率 D_{max}/D_{40} より、免震層の弾性限変形 $x_{ed}=0.024(m)$ を算出する。

$$x_{ed} = \frac{(D_{max}/D_{40}) \cdot D_{40} \cdot \beta_i r_{i,b}}{\mu_d} \quad (2-2)$$

手順⑪:時刻歴応答解析により、応答が目標値を満足しているか確認する。時刻歴応答解析結果を Figure2-9、2-10 に示す。目標層間変形角 $R=1/150$ 以内に収まっていることが確認できる。

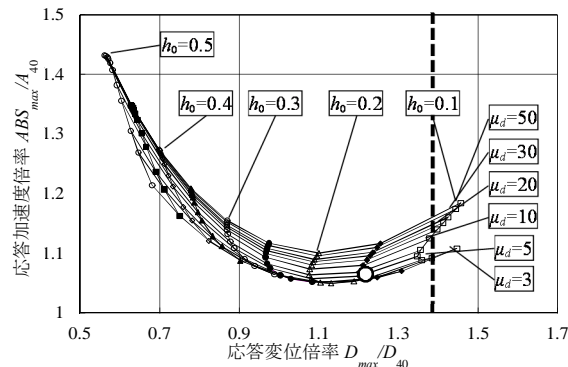


Figure2-6 応答性能設計図表

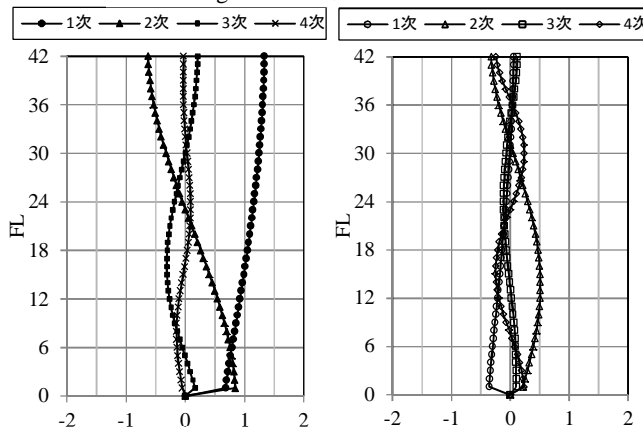


Figure2-7 刺激関数(Real)

Figure2-8 刺激関数(Imag.)

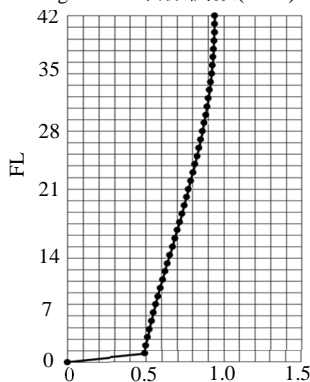


Figure2-9 層変位(m)

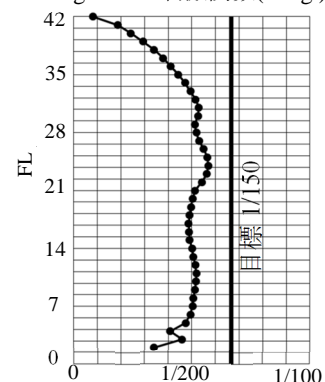


Figure2-10 層間変形角(rad)

2.4. まとめ

その2では、提案した設計フローチャートに従い、上部構造の目標応答性能を満足する免震設計法の設計例を示し、提案設計法の有効性を示した。

2.5. 参考文献

- [1]石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計」入門，彰国社，2004.3
- [2]秦一平，石丸辰治，長谷川純：非線形粘性ダンパーと弾塑性ダンパーを併用した系の応答性能設計手法，日本建築学会構造系論文集，第617号，pp.47-54，2007.7
- [3]中山勝仁，秦一平，石丸辰治他：応答性能設計図表を用いた免震層の逆設計法に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術梗概集，pp.447-452，2012.9