

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	複数建物を有する街区免震の設計手法 その3 街区免震の設計例
Title(English)	Design Method of Multiple Building Base-isolated System Part3:Examples of design for Multiple Building Base-isolated System
著者(和文)	長谷川愛理, 佐藤大樹, 李晶
Authors(English)	HASEGAWA Airi, SATO Daiki, LI Jing
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 489-492
Citation(English)	, , , pp. 489-492
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

複数建物を有する街区免震の設計手法

その3 街区免震の設計例

構造—振動

正会員 ○ 長谷川愛理^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}// 李晶^{*1}

免震構造 街区免震 エネルギー法

等価入力地震波 応答スペクトル 等価線形化法

1. はじめに

本報その1, その2では疑似等価地震波を提案し, 免震層条件が疑似等価地震波に及ぼす影響について検討した。本報その3では, 疑似等価地震波により得られた応答スペクトルを用いて多棟モデルの設計を行う。具体的には, 日本免震構造協会 (JSSI) が提案した街区免震¹⁾に対して JSSI で用いた設計用地震波以外のより大きな地震波を対象として設計を行う場合における, 上部構造条件の変更方法について検討する。

2. 解析概要

2.1. 解析モデルと入力地震動

解析対象モデルは, 本報その1に示したMMモデルおよび Σm モデルである。上部構造の建物番号をTable 1に示す。

Table 1 上部構造の番号

上部構造	LB	HB	GYM	EC	DC	HOS
j	1~4	5, 6	7, 8	9	10	11

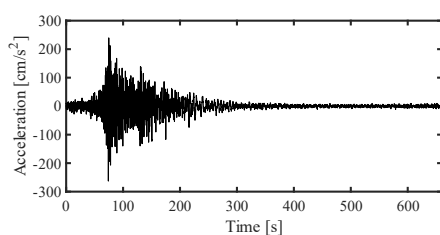
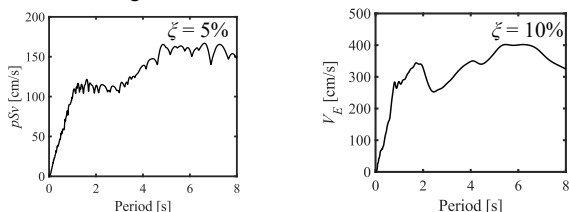


Fig. 1 入力地震動の時刻歴波形



(a) 擬似速度応答スペクトル (b) エネルギースペクトル

Fig. 2 応答スペクトル

入力地震動には基成促波²⁾のOS1を用いる。Fig. 1に加速度の時刻歴波形, Fig. 2(a)に擬似速度応答スペクトル $p\delta_v$ ($h=5\%$) と(b)にエネルギースペクトル V_E ($h=10\%$) を示す。

2.2. 免震層の設計

免震層にはアイソレータと履歴系ダンパーおよび粘性系ダンパーを用いる。履歴系ダンパーの復元力特性はノーマルバイリニア型とする。Fig. 3に免震層の変位 δ_0 とせん断力 Q_0 の関係を示す。ここで, Q_y , Q_{0D} はそれぞれ免震層の降伏せん断力, 最大せん断力を, δ_y , δ_{0D} は免震層の降伏変形および最大変形を, k_0 , k_y , k_{0eq} はそれぞれ免震層の初期剛性, 降伏剛性, 等価剛性を表している。

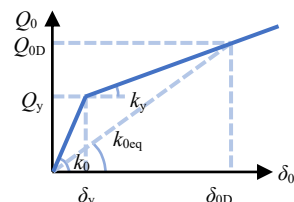


Fig. 3 免震層の変位とせん断力の関係

エネルギー法³⁾を用いて免震層のアイソレータとダンパーを設計する。JSSIと同様にアイソレータの周期を $T_b = 4.55$ sとしたときの予測曲線をFig. 4に示す。ここで, 設計用入力エネルギーの速度換算値は $V_E = 350$ cm/s, 鋼材ダンパーの等価繰返し数は $n_h = 10.5$ とする。この時, 無減衰時の免震層せん断力係数は $\alpha_{b,0} = 0.49$, 無減衰時の免震層変形は $\delta_{b,0} = 253$ と求められる。まず, JSSIで用いた条件¹⁾と同様, 履歴系ダンパーの降伏せん断力係数を $\alpha_{h,y} = 0.022$ としたとき, $\alpha_{h,y} / \alpha_{b,0} = 0.045$ (①)となる。Fig. 4より $\delta_{0max} / \delta_{b,0} = 0.25$ (②)と定まる。その結果, 免震層の最大変形は $\delta_{0max} = 63.4$ cmとなり, 免震層のクライテリア $\delta_{0C} = 40$ cmを超えることが確認できる。そこで, 本検討では $\delta_{0max} \leq \delta_{0C}$ を満たす設計として, 履歴系ダンパーの降伏せん断力係数を増加させるCase1と, 履歴系ダンパーはJSSIと同じとしオイルダンパーを追加するCase2の2ケースについて検討する。

Case1について, クライテリアを満たす履歴系ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{h,y}$ を決定する。アイソレータの

周期を JSSI と同じ $T_b = 4.55$ s とした時、 $\delta_{0max} / \delta_{b,0} = 0.16$ (③), $\alpha_{h,y} / \alpha_{b,0} = 0.07$ (④) となり $\alpha_{h,y} = 0.036$ が得られる。

Case2 について、JSSI 同様の履歴型ダンパー ($\alpha_{h,y} = 0.022$) に粘性系ダンパーを追加する場合の粘性系ダンパーの減衰率 ζ_v を決定する。アイソレータの周期を JSSI と同じの $T_b = 4.55$ s としたとき、文献⁴⁾より粘性系ダンパーを付加した場合の予測曲線は Fig. 4 の破線になる。ここで、粘性系ダンパーの等価繰返し数は $n_v = 7.88$ とする。 $\alpha_{h,y} = 0.022$ の場合、 $\alpha_{h,y} / \alpha_{b,0} = 0.045$ (①) である。Fig. 4 より、 $\delta_{0C} = 40$ cm を満足するためには、 $\alpha_v / \alpha_{b,0} \geq 0.05$ であることがわかる (図中▲)。よって、Case2 では $\alpha_v / \alpha_{b,0} = 0.05$ を用いて次式より、必要な粘性系ダンパーの粘性係数は $C_v = 0.156$ と決定した。

$$C_v = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_v}{\alpha_{b,0}} \right) (A + \sqrt{A^2 + 1}) \quad (1)$$

ここで A は次式で表される。

$$A = 4n_h \left(\frac{\alpha_{h,y}}{\alpha_{b,0}} \right) + \pi n_v \left(\frac{\alpha_v}{\alpha_{b,0}} \right) \quad (2)$$

— : 履歴系ダンパーのみ - - - : 粘性系ダンパー付加

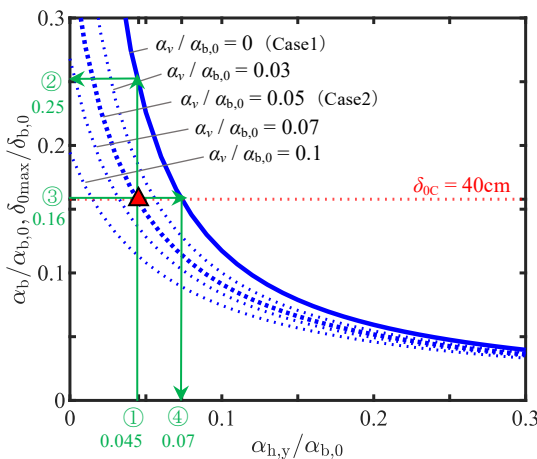


Fig. 4 免震層の予測曲線
($V_E = 350$ cm/s, $n_h = 10.5$, $n_v = 7.88$)

2.3. 上部構造の設計

本節では、擬似等価応答スペクトルを用いて上部構造の設計方法を示す。Fig. 5 に HOS の擬似等価変位応答スペクトル、Fig. 6 に HB の擬似等価変位応答スペクトル $S_{D,pep}$ を示す。図中の赤破線はクライテリア (層間変形角 $R = 1/200$) を示している。一方、青破線はクライテリアに 0.9 を乗じ 10% の安全率を見込んだ値 (クライテリア 90%, と表記) を表している (3.3 節, 後述)。なお、本報では紙幅の都合上、応答が大きい HOS と HB の結果のみを示す。HOS に着目すると Fig. 5 より、Case1, 2 共に JSSI の条件 ($T_{U,11} = 1.676$, $\zeta_{U,11} = 2\%$) に該当するスペクトル値ではクライテリアを超えていることが確認できる。一方、2 番目に応答が大きい HB は Fig. 6 より、JSSI の条件のとき ($T_{U,5} = 1.526$, $\zeta_{U,5} = 3\%$) Case1, 2 共にクライテリアを満たすことがわか

る。以上より、Case1, Case2 のどちらにおいても HOS の設計を変更する必要があることがわかった。なお、そのほか 4 種類 (LB, GYM, EC, DC) の上部構造もクライテリア内に収まっており、設計条件の変更の必要は無いことを確認している。

ここで、HOS の設計の変更を行う上で 2 つの方法を検討する。1 つ目は、建物の減衰はそのままとし上部の固有周期を変更、すなわち剛性と耐力を変更することでクライテリアを満たす方法であり、これを Method1 とする。建物 j における剛性および耐力の割増係数 $\lambda_{k,j}$ は、変更前の建物 j の周期を $T_{Uold,j}$ 、擬似等価スペクトルより求められるクライテリアを満たすために変更した周期を $T_{Unew,j}$ とすると、次式で表される。

$$\lambda_{k,j} = \left(\frac{T_{Unew,j}}{T_{Uold,j}} \right)^{-2} \quad (3)$$

2 つ目は、上部構造の固有周期はそのままとし、上部構造に制振ダンパーを設置することを想定して上部構造の減衰定数 $\zeta_{U,j}$ を変更することでクライテリアを満たす方法とし、これを Method2 とする。

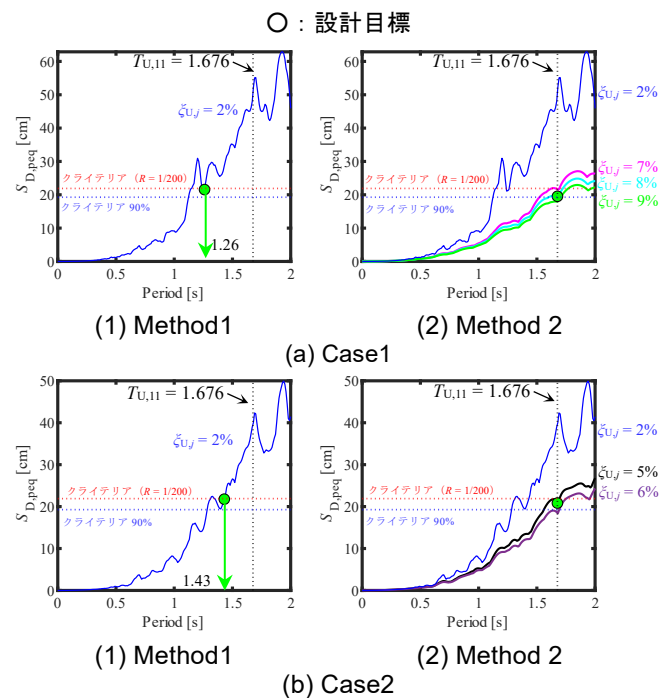


Fig. 5 HOS (S 造) の応答スペクトル

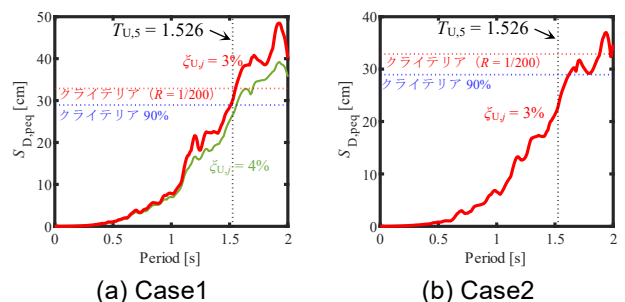


Fig. 6 HB (RC 造) の応答スペクトル

Table 2 上部構造の設計変数 (HOS)

(a) Case1		
Method	剛性および耐力の割増係数 λ_k	減衰定数 ζ_U
1	1.77	0.02
2	—	0.07
(b) Case2		
Method	剛性および耐力の割増係数 λ_k	減衰定数 ζ_U
1	1.37	0.02
2	—	0.05

Fig. 5 に、HOS の変更後の設計を○印で表している。また、Table 2 に変更方法として、それぞれのケースにおいて採用する λ_k と ζ_U を示す。なお、Method1 においてクライテリアに収まる中で最も固有周期が長い値、Method2 において最も減衰定数が小さい値を採用している。

Method1 の Case1 と Case2 を比較すると、Fig. 5、Table 2 より、Case2 の方が長い固有周期となるため、上部構造の剛性および耐力の割増を抑えることができる。Method2 の Case1 と Case2 を比較すると、Case2 の方が少ない減衰、つまり上部構造に付加する制振ダンパーの量を抑えた設計とすることができる。

3. 時刻歴解析による検証および上部構造の設計変更

本章では、2章で設計したモデルを用いて時刻歴解析を行い、クライテリア内に収まっているか検証を行う。

3.1. 免震層の検証

Fig. 7 に免震層の最大応答変形を示す。Case1 および 2 において、それぞれ上部構造の設計変更をしていない場合、Method1、Method2 の応答を示す。また、免震層を JSSI と同様とし上部構造の変更をしていないモデルを JSSI とし、その時の応答も示す。なお、図中の赤破線は免震層変形のクライテリアを表している。Fig. 7 より JSSI モデルではクライテリアを大幅に超えているが、免震層を変更した Case1 および Case2 ではクライテリア内まで応答が低減していることがわかる。また、Case1 の中で 3 パターンを比較してみると、ほぼ同程度の値を示すことが確認できる。Case2 においても同様の傾向が見られ、上部構造の条件に関わらずクライテリアを満たすことがわかる。

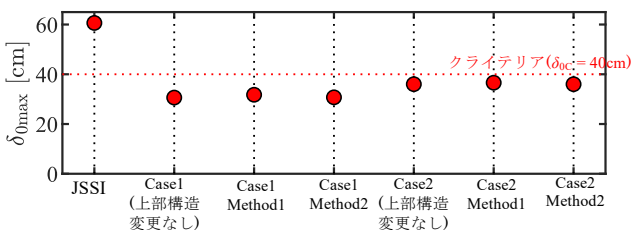


Fig. 7 免震層の最大応答変形

3.2. 上部構造の応答検証

Fig. 8 に層間変形角 R の高さ方向分布を示す。Case1、Case2 ともに灰色のプロットはそれぞれの変更前のモデル

における応答値を、○印は Method1 で変更した際の結果を、△印は Method2 で変更した際の結果を表している。赤破線は層間変形角のクライテリアを指す。紙幅の都合上、本報では応答が大きい HOS と HB の結果を記載しているが、その他の建物については全ての条件下でクライテリアを満たすことを確認している。

Fig. 8 より、Method1 の Case1、Case2、および Method2 の Case2 の 3 ケースでは HOS、HB ともにクライテリアを満たすことが確認できる。一方で Method2 の Case1 では、HOS、HB ともにクライテリアをやや上回る結果となった。履歴系ダンパーのみの Case1 より、粘性系ダンパーを付加した Case2 の方が、変更前の上部構造の応答が小さくなる。そのため Case1 に比べ Case2 の HB では余裕を持って安全側に設計できる結果となった。

ここで Case1 の HB に着目すると、Fig. 6 の応答スペクトルよりクライテリアを満たすと予測したが、解析の結果 (Fig. 8) 変更前のモデルではクライテリアを超えることが確認できる。これは、擬似等価応答スペクトルの精度が悪く、実際の応答よりやや小さく予測していることが原因と考えられる。対して、HOS を変更した Method1 ではクライテリアを満たす応答となることがわかる。この時、HB の周期は未変更であることから、HOS の周期を変更したことが HB の応答低減に大きく影響したと考えられる。他の建物においても、HOS の周期を短くすることで変更前以下の応答となることを確認しており、変更後に応答が増大するケースは見られなかった。一方で、上部構造の減衰定数を変化させた Method2 の Case1 および Case2 では、未

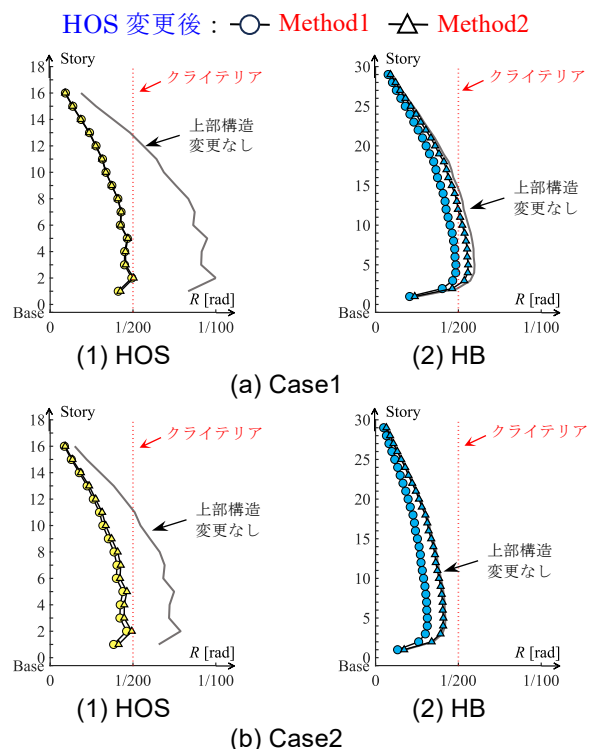


Fig. 8 層間変形角の高さ方向分布 (HOS のみ変更)

変更の HB の応答はほぼ変わらないことがわかる。このことから、上部構造同士の相互作用は固有周期に大きく影響を受けると考えられるが、明確な原因は現在検討中である。

以上より、Method2 の Case1 を除く 3 パターンでは、擬似等価応答スペクトルを用いることで、目標設計値内に収めることができた。上部構造の応答が小さく、余裕を持って安全側に設計できることから、Case2 を用いた設計の方が容易であると言える。また、Method2 の Case1 のように変更後でもクライテリヤを超えてしまう場合があることから、やや余裕を持った設計が必要であると考えられる。

3.3. 10%の安全率を考慮した上部構造の設計変更

3.2 節で述べたように、クライテリヤぎりぎり設計した場合一部条件下で目標設計値に収まらないことがわかった。そこで安全率を 10% 見込み、スペクトルによる予測でクライテリヤの 90% までの応答に抑えられるよう、再度上部構造の変更を行う。3.2 節にて Method2 の Case1 を除く 3 ケースでは目標値に収まる結果となったが、安全率 10% を見込んだ場合についても確認する。Fig. 5, Fig. 6 に青破線で新たに設定したスペクトル値の上限を示す。この上限値以内に収まる最も固有周期が長い (Method1)、もしくは減衰定数が小さい値を採用する (Method2)。Fig. 5, Fig. 6 より、Case1 において HOS と HB, Case1 において HOS のスペクトル値が目標値を満たしていないため、変更を行う必要があることがわかる。なお、他の 4 種類の建物は変更の必要がないことを確認している。Table 3 に変更する剛性および耐力の割増係数 λ_k と減衰定数 ζ_u を示す。

時刻歴解析より得られた層間変形角の高さ方向分布を Fig. 9 に示す。○印は Method1 で変更した際の結果を、△印は Method2 で変更した際の結果を表している。赤破線は層間変形角のクライテリヤを指す。なお、免震層がクライテリヤを満たしていることを確認している。Fig. 9 より、全ての条件下において HOS, HB とともにクライテリヤを満たしていることが確認できる。このことから 10% の安全率を見込むことで、上部構造を変更した 4 パターンの全てでクライテリヤを満たす設計が可能であることがわかった。

4. まとめ

本報その 3 では、擬似等価地震波により得られた応答スペクトルを用いて、より大きな地震波を対象とした際の設計条件の変更方法について検討を行った。免震層および上部構造の異なる条件を組み合わせた 4 パターンの変更方法のうち、3 パターンでは、擬似等価応答スペクトルを用いて目標設計値内に収めた設計を行うことができた。また、擬似等価地震波の応答スペクトルの精度を考慮して 10% の安全率を見込むことで、本検討モデルにおける全ての条件下でクライテリヤを満たすことがわかった。

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 准教授・博士 (工学)

Table 3 上部構造の設計変数 (10%の安全率)

(a) Case1			
Method	建物	剛性および耐力の割増係数 λ_k	減衰定数 ζ_u
1	HOS	2.24	0.02
	HB	1.14	0.03
2	HOS	—	0.09
	HB	—	0.04

(b) Case2			
Method	建物	剛性および耐力の割増係数 λ_k	減衰定数 ζ_u
1		1.43	0.02
2		—	0.06

HOSおよびHB変更後: ○ Method1 △ Method2

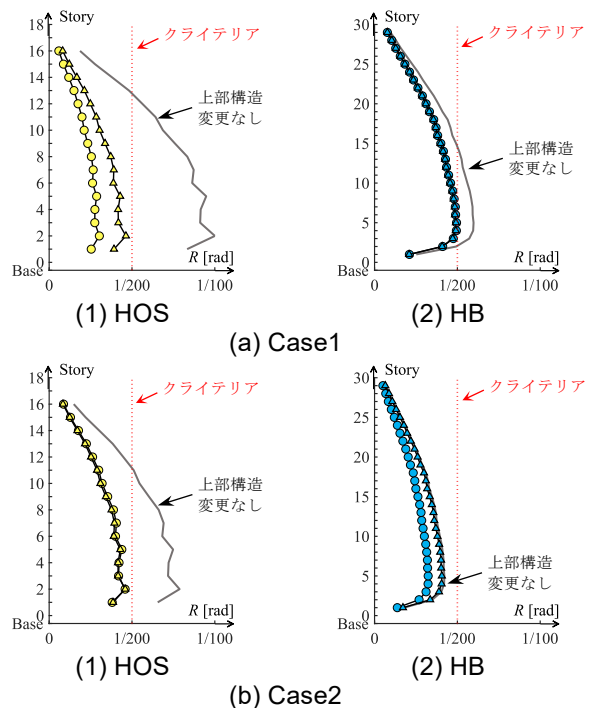


Fig. 9 層間変形角の高さ方向分布 (10%の安全率, HOS おとび HB を変更)

参考文献

- (1) 日本免震構造協会: 免震によるレジリエントな都市の実現を目指して~レジリエントな都市の実現構想研究会免震システム技術WG活動報告書~, 2023.5
- (2) 国土交通省: 「長周期地震動への対策」における『基盤促波』の作成, 2017.4
- (3) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 1999.11
- (4) 李晶, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介: DESIGN FOR ISOLATED BUILDING WITH OIL DAMPER CONSIDERING STIFFNESS DISTRIBUTION FOR INHOMOGENEOUS MASS RATIO, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.787-788, 2022.09

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng *2