

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	エネルギー法に基づく免震構造の耐震補強設計法
Title(English)	Seismic Retrofit Design Method for Base-Isolated Buildings Based on the Energy Balance Method
著者(和文)	李晶, 佐藤大樹
Authors(English)	Jing LI, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 453-456
Citation(English)	, , , pp. 453-456
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

エネルギー法に基づく免震構造の耐震補強設計法

構造—振動

正会員 ○ 李晶^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}エネルギー法 免震構造 耐震補強
設計法 反復収束 人工地震波

1. はじめに

既存の免震建物がより高い耐震要求に直面する場合、耐震補強として免震層に新たなエネルギー吸収デバイスを追加することで、より大きな地震作用下でも設計基準を満たすことが可能である¹⁾。

耐震補強設計においては、免震層の変位や層間せん断力係数など、複数の設計目標を同時に満足することが必要である。試行錯誤的な時刻歴分析法により設計パラメータの収束が困難になる問題を回避するためには、概念設計を行う必要がある。エネルギー法により、免震層の最大変位と諸元のせん断力係数などの性能曲線を用いて、設計パラメータをより迅速に決定できる²⁾。

しかし、従来のエネルギー法はエネルギー関連パラメータに大きく依存し、その保守的な設定により設計目標からの乖離を招く可能性がある。エネルギー法の特性に基づき、エネルギーパラメータを静的設定から動的反復に変更することで、設計精度の向上が可能となる。まず従来のエネルギー法で初期パラメータを設定し、質点モデルの時刻歴解析を通じて解析結果に基づくエネルギーパラメータを取得し、逐次更新しながら設計案を修正する。複数回の反復後、免震層の最大変位や層間せん断力係数の偏差が許容範囲内に収束することで、より精密かつ設計目標に適合したパラメータが得られる。

本報では、免震構造の耐震補強設計において、従来のエネルギー法を修正し、動的反復エネルギーパラメータに基づく設計法を提案する。また、実際の設計例を通じて本手法の有効性を検証する。

2. 解析モデルおよび入力地震波の概要

2.1. 解析モデル

剛体としてみなせる上部構造を持つ免震倉庫⁴⁾が研究対象として採用される。その解析モデルは、Fig. 1 に示すように、1 自由度モデルである。免震層の中には、線形アイソレータ、バイリニア履歴ダンパーおよび線形粘性ダンパーがそれぞれ配置されている。また、モデルの総質量

は M である。アイソレータと履歴ダンパーの剛性は k_b と k_h である。粘性ダンパーの減衰定数は c_v である。さらに、原設計のパラメータは Table. 1 に示す。原設計の免震層では、アイソレータと履歴ダンパーのみを採用した。免震層の設計クライテリアに対して、最大変位 δ_{lim} は 40 cm であり、最大せん断係数 $\alpha_{1,lim}$ は 0.15 である。免震層の復元力特性を Fig. 2 に示す。

2.2. 入力地震波

本報では、JMA KOBE 1995 EW⁵⁾の位相特性に基づく ART-KOBE という人工波を、入力地震波として採用する。原設計に用いた地震波はレベル 2 であり、耐震補強時には、1.5 倍のレベル 2 を採用する。入力地震波のスペクトルを Fig. 3 に示す。(a)は疑似速度スペクトルであり、(b)はエネルギースペクトルである。

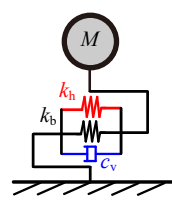
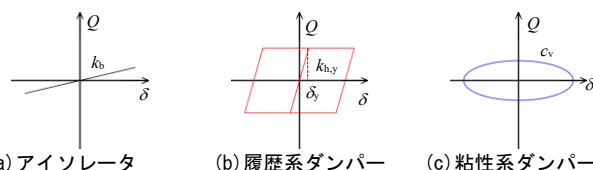


Fig. 1 解析モデル

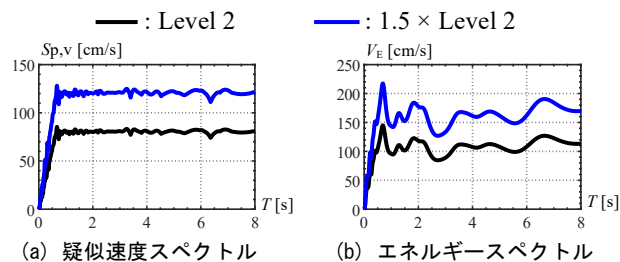
Table. 1 原設計のパラメータ

Parameters	Notation	Values
Mass	M	478.68
Period of isolators	T_b [s]	4.25
Shear coefficient of hysteretic dampers	$\alpha_{h,y}$	0.029
Yield deformation of hysteretic dampers	δ_y [cm]	3.23



(a) アイソレータ (b) 履歴系ダンパー (c) 粘性系ダンパー

Fig. 2 免震層の復元力特性

(a) 疑似速度スペクトル (b) エネルギースペクトル
Fig. 3 入力地震波のスペクトル (ART-KOBE)

3. 設計曲線の提案

3.1. 設計曲線

従来のエネルギー法⁴⁾の式に基づき、免震層の層間せん断力係数 α_1 とアイソレータ α_b 、履歴ダンパー α_h および粘性ダンパー $\alpha_{h,y}$ のせん断力係数の関係は、式(1)に示される。アイソレータのせん断力係数は式(2)に示す。

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_b^2 + \alpha_v^2} + \alpha_{h,y}, \quad \alpha_b = \frac{4\pi^2}{T_b^2 g} \delta_{\max} \quad (1, 2)$$

ここで、 g は重力加速度である。 δ_{\max} は最大変位である。

設計において、免震層の最大せん断力係数は設計クライテリヤを満たす必要があり、すなわち $\alpha_1 \leq \alpha_{1,\text{lim}}$ である。同様に、免震層の最大変位は設計クライテリヤを満たす必要があり、すなわち $\delta_{\max} \leq \delta_{\text{lim}}$ である。したがって、ダンパーの設計を簡便にするために、ダンパーのせん断力係数を変数として、式(2)を式(1)に代入し、免震層の最大せん断力係数の設計クライテリヤに基づき、免震層のせん断力係数の設計曲線を以下のように示す。

$$\alpha_v \leq \sqrt{(\alpha_{1,\text{lim}} - \alpha_{h,y})^2 - \left(\frac{4\pi^2 \delta_{\text{lim}}}{T_b^2 g}\right)^2} \quad (3)$$

免震層の最大変位と各要素のせん断力係数の関係⁴⁾は、以下のように示される。

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_0} = -\left(4n_h \frac{\alpha_{h,y}}{\alpha_0} + \pi n_v \frac{\alpha_v}{\alpha_0}\right) + \sqrt{\left(4n_h \frac{\alpha_{h,y}}{\alpha_0} + \pi n_v \frac{\alpha_v}{\alpha_0}\right)^2 + 1} \quad (4)$$

ここで、 n_h と n_v は、履歴ダンパーと粘性ダンパーの繰り返し回数である。また、同一地震下における、免震層がアイソレータのみを有する場合の変位 δ_0 およびせん断力係数 α_0 は、以下のように示される⁴⁾。

$$\delta_0 = \frac{T_b V_E}{2\pi}, \quad \alpha_0 = \frac{2\pi V_E}{T_b g} \quad (5, 6)$$

同様に、ダンパーのせん断力係数を変数として、式(5)、(6)を式(4)に代入し、免震層の最大変位の設計曲線を以下のように示す。

$$\alpha_v \geq \frac{1}{2\pi n_v} \frac{\delta_{\text{lim}}}{g} \left(\frac{V_E^2}{\delta_{\text{lim}}^2} - \frac{4\pi^2}{T_b^2}\right) - \frac{4n_h}{\pi n_v} \alpha_{h,y} \quad (7)$$

設計曲線を Fig. 4 に示す。赤色の実線は免震層の最大せん断力係数($\alpha_{1,\text{lim}} = 0.15$)、青色の線は最大変位($\delta_{\text{lim}} = 40 \text{ cm}$)の境界線を示している。設計曲線から明らかなように、変位およびせん断力係数を同時に満たすダンパーの組み合わせは、変位曲線の上側、かつせん断力曲線の下側に存在

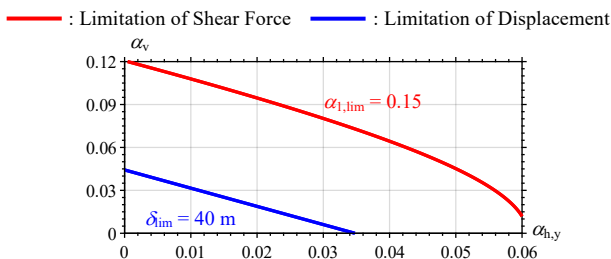


Fig. 4 設計曲線 ($V_E = 120 \text{ cm/s}$, $n_h = n_v = 1$)

する必要がある。設計はこの全範囲内で可能であるが、ダンパー性能を無駄なく活用する観点から、最適なダンパーの組み合わせは、せん断力係数のクライテリヤを満たしつつ、変位曲線上に位置するものが望ましい。本研究の以降の設計例もこの原則に基づいて設計されている。

3.2. エネルギーパラメータの影響

エネルギーパラメータが設計曲線に与える影響を Fig. 5 に示す。赤色の実線は免震層の最大せん断力係数($\alpha_{1,\text{lim}} = 0.15$)、青色の線は最大変位($\delta_{\text{lim}} = 40 \text{ cm}$)の境界線を示している。(a)はエネルギーの影響、(b)は繰り返し回数 n の影響を示している。なお、2種類のダンパーにおける n の違いは大きくないため、ここでは $n_h = n_v$ としている。図から明らかなように、エネルギーパラメータは設計曲線に非常に大きな影響を与える。そのため、安全側のエネルギーパラメータを採用して設計を行う場合、設計目標との乖離が大きくなる可能性がある。

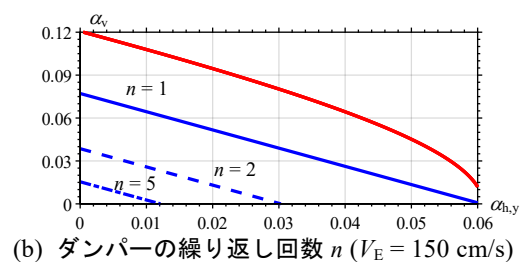
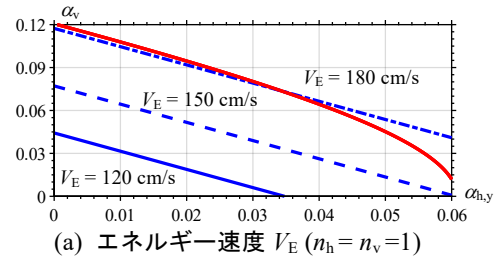


Fig. 5 エネルギーパラメータの影響

4. 設計法

4.1. 設計フローの提案

設計フローを Fig. 6 に示す。Step0~2 では、質量、設計クライテリヤ、アイソレータの周期およびダンパーのパラメータを順に設定する。Step3 および 4 では、エネルギーパラメータに基づきダンパーの設計パラメータ範囲を算出する。範囲が存在しない場合は、アイソレータの周期を再設定する必要がある。Step5~8 では、計算された設計範囲に基づき、適切なダンパーのパラメータ組み合わせを選定し、SDOF モデルの時刻歴解析結果により設計要件を満たしているかを検証する。危険側または過度に安全側である場合は、時刻歴解析結果のエネルギーパラメータを Step3 に戻してダンパーパラメータを再設計し、収束するまでこの過程を繰り返す。なお、次節の設計例は、粘性ダンパーのみを追加したケースである。

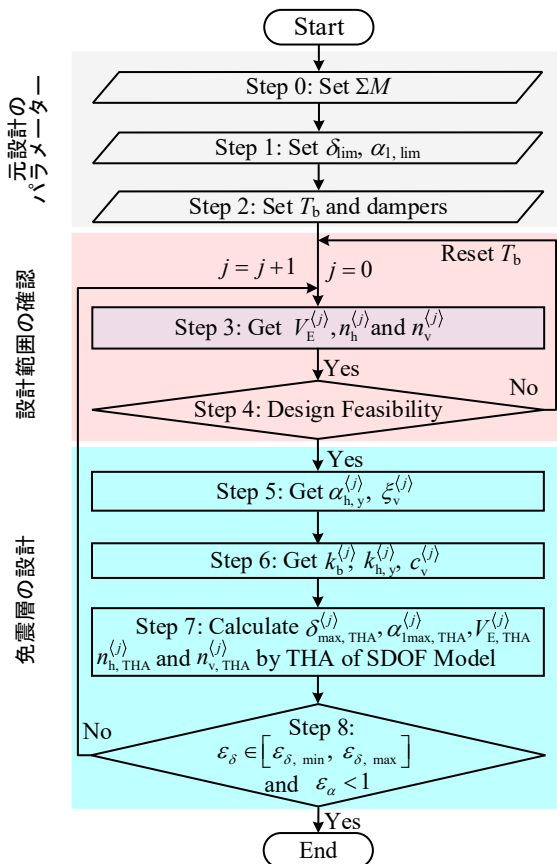


Fig. 6 設計フロー

4. 2. 設計例

Step 0: 質量の設定

原設計より、質量を 478.68 kN・s²/cm 設定する。

Step 1: 設計クライテリアの設定

免震層の設計クライテリアに対して、最大変位 δ_{lim} は 40 cm であり、最大せん断係数 α_{1,lim} は 0.15 である。

Step 2: アイソレータの周期とダンパーの設定

アイソレータの周期 T_b は 4.25 s。また、履歴ダンパーの降伏せん断力係数 α_{h,y} は 0.029 であり、降伏変位 δ_y は 3.23 cm である。

Step 3: エネルギーパラメータの決定

エネルギーパラメータについては、反復計算の初期段階において、従来のエネルギー法³⁾と同様に保守的な数値を採用する。等価速度 V_E はアイソレータの周期およびエネルギースペクトルに基づいて選定し、本研究では 160.69

— Limitation of Shear Force — : Limitation of Displacement
 ■ : Shear Force Region ■ : Displacement Region ■ : Designable Region

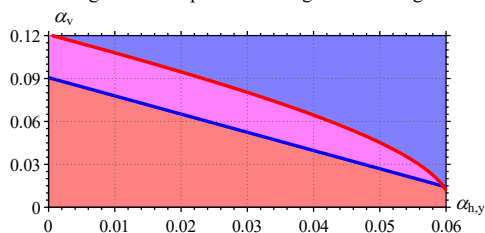


Fig. 7 設計範囲

cm/s とする。ダンパーの繰り返し回数 n は一律に 1 とした。設計結果が安全性を満たさない場合や過度に安全側である場合には、Step7 のエネルギーパラメータを用いる。

Step 4: 設計範囲の評価

設計曲線に基づき、設計範囲を Fig. 7 に示す。

Step 5: 設計パラメータの決定

本設計例では、粘性ダンパーのみを追加しているため、履歴ダンパーのパラメータは変更されていない。粘性ダンパーの減衰定数は以下の式³⁾で示される。

$$\xi_v^{<j>} = \frac{1}{4\pi n_v^{<j>} \alpha_b} \left(\frac{V_E^{<j>2}}{\delta_{lim} g} - 8n_h^{<j>} \alpha_{h,y}^{<j>} - \alpha_b \right) \quad (8)$$

Step 6: 免震層の計算

さらに、アイソレータと履歴ダンパーの剛性および粘性ダンパーの減衰係数は、以下の式により計算される。

$$k_b = \frac{4\pi^2 M}{T_b^2}, \quad k_h = \frac{Mg\alpha_{h,y}^{<j>}}{\delta_y}, \quad c_v^{<j>} = \frac{4\pi \xi_v^{<j>} M}{T_b} \quad (9,10,11)$$

Step 7: エネルギーパラメータの計算

時刻歴解析に基づき、免震層の最大変位、最大層間せん断力係数およびエネルギー関連パラメータを算出する。

Step 8: 設計結果の評価

最大変位の判定区間を設定する。本設計例では、判定区間 [ε_{δ,min}, ε_{δ,max}] を [0.95, 1] とする。すなわち、安全性を確保した上で、変位の誤差を 5% 以内に抑える。以下の式に基づき、最大変位および最大せん断力係数の精度をそれぞれ算出する。判定条件を満たさない場合は、Step3 に戻り、再度反復計算を行う。

$$\varepsilon_\delta = \frac{\delta_{max,THA}^{(j)}}{\delta_{lim}}, \quad \varepsilon_\alpha = \frac{\alpha_{1max,THA}^{(j)}}{\alpha_{1,lim}} \quad (12,13)$$

反復計算の結果を表 2 に示す。結果から明らかなように、反復計算前の変位は 25.6cm であり、過度に安全側であった。このような設計では、ダンパーの過剰設置による無駄が生じる可能性がある。しかし、わずか 2 回の反復で精度は大幅に向上し、0.92 まで改善された。さらに、4 回の反復後には変位の判定条件を満足するに至った。なお、反復の有無にかかわらず、最大せん断力係数はすべてのケースで設計クライテリアを満たしている。

Table. 2 反復計算の結果

j	V _E ^{<j>} [cm/s]	n _h ^{<j>}	n _v ^{<j>}	ξ _v ^{<j>}	δ _{max,THA} ^{<j>} [cm]	α _{1max,THA} ^{<j>}	ε _δ
0	160.69	1	1	0.301	25.6	0.12	0.64
1	85.95	0.36	0.74	0.019	48.56	0.14	1.21
2	139.12	1.22	1.27	0.085	36.65	0.12	0.92
3	115.61	0.84	1.26	0.040	43.48	0.13	1.09
4	137.34	1.27	1.45	0.060	39.56	0.12	0.99

4. 3. さらに耐震補強設計案

さらに、本手法の適用性をより詳細に検討するために、

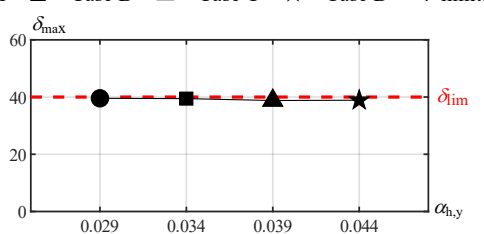
4.2節に示した粘性ダンパーのみを追加した設計例をCase Aとする。同様に、履歴ダンパーのみを追加した設計例をCase Dとする。さらに、履歴ダンパーのせん断力係数に基づき、Case AおよびCase Dの間に2つの設計例を均等に挿入し、これらをそれぞれCase BおよびCase Cとする。本研究で提案した耐震補強の設計法に基づく全ての設計案の設計パラメータをTable. 3に示す。

Table. 3 耐震補強設計のパラメータ

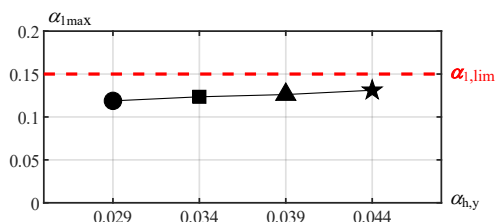
Parameters	Case A	Case B	Case C	Case D
$\alpha_{h,y}$	0.029	0.034	0.039	0.044
ξ_v	0.06	0.037	0.024	0

全ての設計ケースの時刻歴解析結果をFig. 8に示す。(a)は免震層の最大変位 δ_{max} 、(b)は免震層の最大せん断力係数 α_{1max} である。凡例において、異なる記号は各設計ケースを表し、赤色の破線は設計基準を示している。図から明らかなように、全ての設計ケースにおいて、変位制御の設計目標を高い精度で満足しているだけでなく、最大せん断力係数も設計基準を満たしており、複数の設計目標を十分に満足している。また、粘性ダンパーの割合が減少するにつれて、免震層の最大せん断力係数は上昇する傾向が見られる。実際の設計においては、設計者は本研究で提案した設計法を用いることで、複数の実現可能なダンパーの候補を迅速に得ることができる。その上で、予算制約や施工の容易さなど、より具体的な条件を検討して、最適なダンパーの組み合わせを選定することができる。

●: Case A ■: Case B ▲: Case C ★: Case D ---: limitation



(a) 免震層の最大変位 δ_{max}



(b) 免震層の最大せん断力係数 α_{1max}

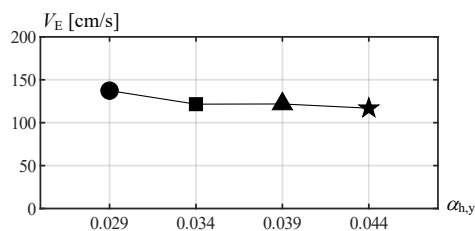
Fig. 8 時刻歴解析の結果

各設計ケースのエネルギーパラメータをFig. 9に示す。(a)はエネルギー速度 V_E 、(b)はダンパーの繰り返し回数 n である。図から明らかなように、各ダンパーの組み合わせ

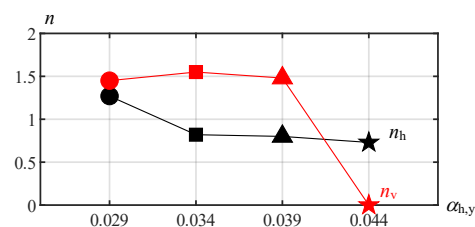
による V_E の違いは小さく、すべてエネルギースペクトルに対応する設計エネルギー(160.69 cm/s)を下回っている。一方、 n に対して、異なるケースにおいて分散が大きいものの、全体的に初期設定値である1付近に収まっている。

収束回数をFig. 10に示す。図から明らかなように、すべての設計ケースは4回以内に収まっている。これは、全ての設計例において、収束時のエネルギーパラメータが初期設定値に比較的近いことによるものと考えられる。

●: Case A ■: Case B ▲: Case C ★: Case D



(a) エネルギー速度 V_E



(b) ダンパーの繰り返し回数 n

Fig. 9 エネルギーパラメータ

●: Case A ■: Case B ▲: Case C ★: Case D

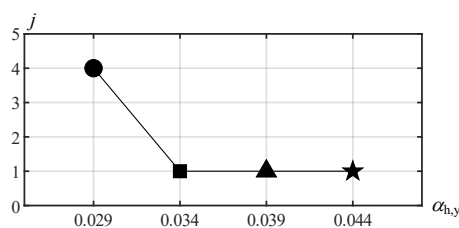


Fig. 10 収束回数

5. まとめ

本報では、免震構造の耐震補強設計において、従来のエネルギー法を修正し、動的反復エネルギーパラメータに基づく設計法を提案した。また、実際の設計例を通じて本手法の有効性を検証した。

参考文献

- 1) 林章二, 他 2名: 歴史的建造物の保存修復事例に基づく保存方針と耐震補強方法の対応関係の分析, 日本建築学会技術報告集, pp.653-664, 2011.3
- 2) 秋山宏: エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計, 1999
- 3) 東野さやか, 北村春幸: 粘性ダンパーを付与した免震構造のエネルギーの釣り合いに基づく応答評価法, Vol.70, No.588, pp.79-86, 2005.2
- 4) 新井雄大, 他 6名: 免震鋼構造における実効変形比に基づくブレース配置の設計法, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.571-571, 2023.7
- 5) 国土交通省: 強震波形(平成7年(1995年)兵庫県南部地震) https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html

*1 東京科学大学 大学院生

*2 東京科学大学 准教授・博士(工学)

Graduate Student, Institute of Science Tokyo *1

Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng *2