

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーを有する制振建物のエネルギーに関する分析（その1：粘性ダンパーの性能低下を考慮した応答評価手法）
Title(English)	Analysis on energy of passive control structure with viscous dampers (part1: response evaluation method of viscous dampers considering its performance decrement)
著者(和文)	岡田亮佑, 佐藤大樹, 劉錫媛
Authors(English)	Ryousuke Okada, Daiki Sato, Xiyuan LIU
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 405-408
Citation(English)	, , , pp. 405-408
発行日 / Pub. date	2019, 3

粘性ダンパーを有する制振建物のエネルギーに関する分析

(その 1: 粘性ダンパーの性能低下を考慮した応答評価手法)

構造—振動

正会員 岡田亮佑^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}○劉錫媛^{*3}

粘性ダンパー 超高層建築物 エネルギー

長周期地震動 性能低下 評価手法

1. はじめに

近年、南海トラフ地震による長周期地震動が三大都市圏等で発生することが予想されており、固有周期の比較的長い超高層建築物などへ及ぼす影響が懸念されている。これに対して、応答を効果的に制御することの出来る制振構造を採用する例が増加している。

制振構造の設計には、時間経過ごとの応答を分析できる「時刻歴応答解析」やエネルギーの釣合いに基づき簡易に応答を予測する「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法（以後、エネルギー法）」¹⁾等が用いられる。エネルギー法は大臣認定取得が不必要であり、申請期間を低減することの出来る設計手法²⁾であり、詳細な分析ができる時刻歴応答解析と併用していくことが今後望ましいと考えられる。

筆者ら³⁾は、長時間・長周期地震動で生じる粘性ダンパー（以後、ダンパー）の性能低下の傾向を、長時間正弦波加振実験結果をもとにし、近似式で表現している。さらに、時刻歴応答解析による、ダンパーの性能低下を踏まえた建物の応答評価手法を提案・検討している。しかし、その検討は層間変形角や絶対加速度のみに留まっており、エネルギーに関する分析は未だ行われていない。

そこで本報その 1 では、ダンパーの性能低下を踏まえたエネルギー法による設計手法の確立のための初期段階として、既往研究で提案されている応答評価手法についてエネルギーに関する分析を行う。

2. 入力地震動概要

入力地震動として、コーナー周期 $T_c = 0.64\text{s}$ 以降の領域で、速度応答スペクトル $S_v = 100\text{cm/s}$ ($h = 5\%$)となるレベル 2 相当の模擬地震動波形 ARTHACHI(位相特性: HACHINOHE 1968 EW)を採用する。さらに、基整促波の中でも比較の入力エネルギーの大きい CH1、東海・南海地震動を想定した東海地方の長周期地震動である三の丸波 (SAN) を採用する。Fig.1(a), (b)に、それぞれの地震動の擬似速度応答スペクトル $\rho S_v (h = 5\%)$ 、エネルギースペクトル $V_E (h = 10\%)$ を示す。

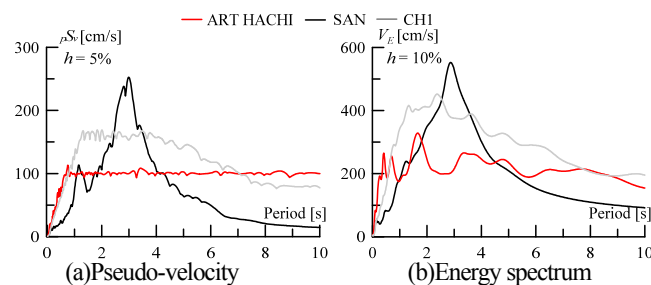


Fig.1 Response spectrum spectrum

3. 粘性ダンパーおよび建物概要

3. 1 粘性ダンパー

対象とするダンパーは、長時間正弦波加振実験において用いた D2-2F, D3-2F (Table 1) の 2 種類とする。本報では、ダンパー速度の指数乗 α 、軸方向粘性係数 $\hat{C}_d$ 、等価支持材剛性 $\hat{K}_b^*$ は Table 1 を使用している⁴⁾。ここで等価支持材剛性 $\hat{K}_b^*$ は、Fig.2 のようにダンパーと取付け部材は直列にモデル化しているため、内部剛性 $\hat{K}_b$ と取付け部材剛性 $\hat{K}_d$ をまとめて表したものである⁵⁾。なお、ダンパーの取付け角度を全層で 30° とし、取付け角度を考慮して軸方向に粘性係数および等価支持材剛性を変換している。

Table 1 Viscous damper factor

object	α	$\hat{C}_d [\text{kN} \cdot (\text{s/mm})^\alpha]$	$\hat{K}_b [\text{kN/cm}]$	$\hat{K}_d [\text{kN/cm}]$	$\hat{K}_b^* [\text{kN/cm}]$
D2-2F	0.38	98	2663	2525	1296
D3-2F	0.38	196	4858	4842	2425

*D2-2F is Medium volume, D3-2F is Large volume.

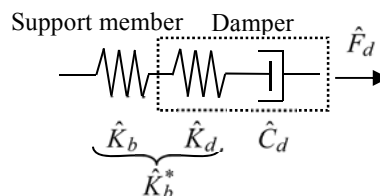


Fig.2 damper and support member

3. 2 性能低下を考慮した解析モデル

本報で対象とするダンパーの基本特性式は、式 (3) のように表される³⁾。

$$F_d^{(n)} = C_d^{(n)} \cdot \left| \dot{u}_d^{(n)} \right|^\alpha \text{sgn}(\dot{u}_d^{(n)}) \quad (3)$$

ここで、 $C_d^{(n)}$ は n ステップにおける粘性係数、 $\dot{u}_d^{(n)}$ は n ステップにおける粘性要素の速度である。

繰返し効果を考慮した場合での $C_d^{(n)}$ は式 (4) より算出される³⁾。繰返しによる粘性係数の低下率 λ はダンパーのエネルギー密度 Ω を用いて式 (5) より求められる⁵⁾。

$$C_d^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot C_d^{(0)} \quad (4)$$

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (5)$$

ここで、 $C_d^{(0)}$ は粘性係数の初期値、 a_0 は繰返しによる低下の程度を表す係数である。本報では、 a_0 は実験結果より得られた $1.695 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}$ を用いる⁶⁾。エネルギー密度 Ω は式 (6) で定義され、単位容積あたりで吸収した累積吸収エネルギーを意味し、粘性体による発熱と直接関連する値である。

$$\Omega^{(n)} = \frac{\Sigma W_{di}}{V_V} \quad (6)$$

ここで、 ΣW_{di} は全ダンパーの吸収エネルギーの総量、 V_V はダンパー内封入されている粘性体の容量である。

Fig.3 に、粘性ダンパーの解析モデルに実験と同じ正弦波の強制変位を与えた結果と、実験値を比較したものを示す⁴⁾。Fig.3 より、ダンパー力がサイクル毎に低下する傾向を、解析モデルは精度良く再現できている。

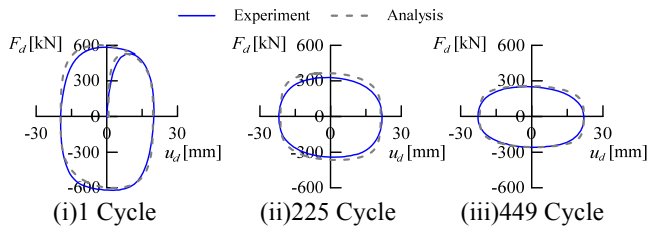


Fig.3 Comparison between experiment and analysis result

3. 3 対象建物モデル

本報では、20 層の鋼構造建物モデル⁷⁾（以後、部材モデル）の建物諸元を参考に作成した多質点せん断モデルを使用する。長辺方向を X 方向、短辺方向を Y 方向とする。なお、X 方向を検討対象とする。Fig.4 に、部材モデルの軸組図と基準階図を示す。なお、構造減衰は 1 次と 2 次で等価な 1% のレーリー型減衰、主架構は弾性とする。主架構 (X 方向) の 1 次固有周期 T_1 は 2.29 s である。

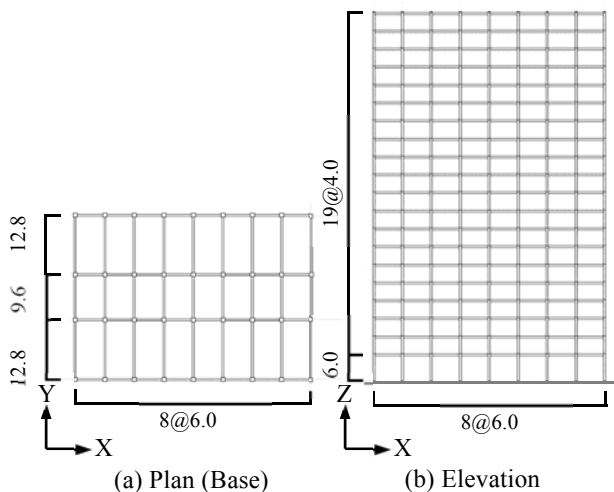


Fig. 4 Plan and Elevation (unit [m])

3. 4 ダンパーの配置

Fig.5 に、高さ方向における粘性係数 C_{di} を示す。ダンパーの配置は、 M_{R100} , M_{R150} , L_{R100} , L_{R150} の 4 ケースである。なお、Table 1 に示した D2-2F（以後、中容量）のダンパーを使用したものは左添え字に「M」、D3-2F（以後、大容量）を用いたものは「L」とする。 M_{R100} , L_{R100} ではレベル 2 相当の地震動 ARTHACHI において層間変形角 $R=1/100$ 以内、 M_{R150} , L_{R150} では $1/150$ 以内に収まるようにダンパーを配置した。なお、大容量のダンパーの粘性係数 C_{di} は中容量の 2 倍であり、ダンパーの本数は中容量の半分にしているため、粘性係数は同値である。

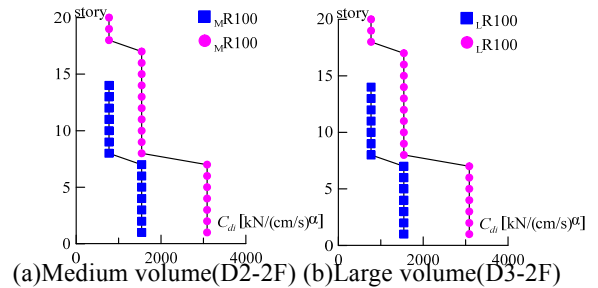


Fig.5 Viscous coefficient

4. 時刻歴応答解析結果

本章では、通常手法 (Conventional method)、簡易手法 (Simplified method) および精算手法 (Detailed method) の 3 つの応答評価手法（後述）での時刻歴応答解析結果のうちエネルギーに着目して示す。通常手法とはダンパーの性能低下を考慮せず、解析を行ったものである。簡易手法とは通常手法の解析より得られた地震終了時における Ω から λ を算出し (式 5)、 $C_d^{(0)}$ に λ を乗じて、再度解析を行ったものである。精算手法とは λ をステップごとに計算し (式 5)、解析を行ったものである。Table 2 に、本報における時刻歴応答解析のケースを示す。

Table2 Case of viscous damper for different seismic

case	model	wave
1		ART HACHI
2	M_{R100}	CH1
3		SAN
4		ART HACHI
5	M_{R150}	CH1
6		SAN
7		ART HACHI
8	L_{R100}	CH1
9		SAN
10		ART HACHI
11	L_{R150}	CH1
12		SAN

4. 1 入力エネルギー

本節では、それぞれの応答評価手法における入力エネルギー結果およびエネルギー法による入力エネルギーの予測値 E_{Pre} を示し、分析を行なう。ここで、予測値は Fig.6 に示すように T_1 から速度換算値 V_E を求め、式 (7) を用いて算出している。

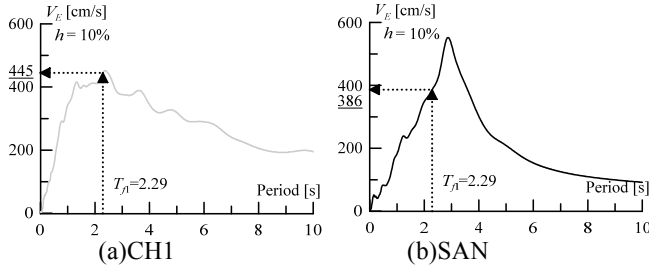


Fig.6 Energy spectrum

$$E_{Pre} = \frac{MV^2}{2} \quad (7)$$

ここで、 M は主架構の総質量とする。

Fig.7に、縦軸を通常手法での解析値 E_{Con} 、簡易手法での解析値 E_{Sim} 、予測値 E_{Pre} とし、横軸を精算手法での解析値 E_{Det} としたものを示す。なお、CH1,SAN入力時の結果のみを示す。Fig.7(a)より、CH1,mR100では、それぞれの手法での入力エネルギーの差異をみると、 E_{Det} と E_{Con} , E_{Sim} との差異は $\pm 10\%$ 程度となった。Fig.7(a),(b)より、 E_{Det} と E_{Con} , E_{Sim} との差異をみると、mR100に比べ mR150では差異は比較的小さく、ダンパー本数を増やすことでそれぞれの手法での入力エネルギーの差異が小さくなることが分かった。同様に Fig.7(a),(c)をみると、mR100ではCH1入力時に比べ SAN では E_{Det} と E_{Con} , E_{Sim} との差異は小さい。これは、mR100でも同様に確認できる。このように手法によって入力エネルギーに差異が生じる傾向は、それぞれの手法の粘性係数が異なり、建物全体の固有周期に違いを生じさせているためであり、ダンパー本数や入力エネルギーの大きさに依存する。

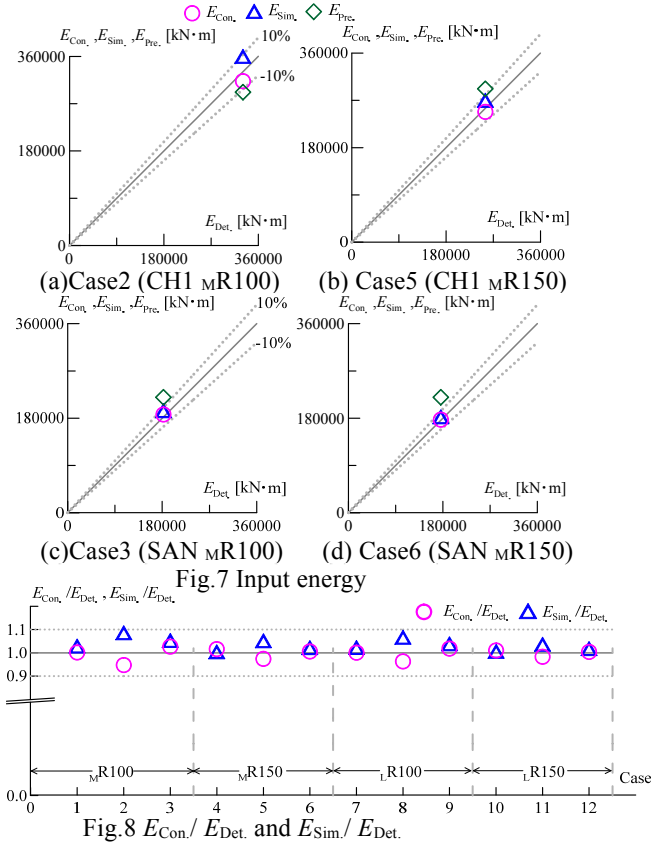


Fig.8 E_{Con}/E_{Det} and E_{Sim}/E_{Det} .

Fig.7(a)~(d)より、 E_{Det} と E_{Pre} を比較すると、 T_d から算出した E_{Pre} が E_{Det} を多少危険側の評価となるケースも見られるが、おおよそ予測できており、エネルギー法による入力エネルギーの予測が出来ることが分かった。

Fig.8に、縦軸を E_{Con} と E_{Sim} を E_{Det} で除したものとし、横軸を解析ケース (Table 2) としたものを示す。Fig.8より、ARTHACHI 入力時では入力エネルギーが小さいため、手法による差異が小さいことが分かる。また、大容量ダンパーでは中容量のものと比較し、手法による差異は小さい。これは大容量の粘性体を使用した場合、それぞれの手法の粘性係数にそれほど違いが無いためだと考えられる。

4. 2 入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収

Fig.9に、縦軸を吸収エネルギーの総量 ΣW_{di} とし、横軸を入力エネルギー E としたものを示す。なお、CH1, SAN入力時の結果のみを示す。Fig.9(a),(b)より、CH1,mR150では、それぞれの手法での入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収量 $\Sigma W_{di}/E$ は80%程度、mR100では60%程度と、粘性係数が小さいほどダンパーへの寄与率は比較的小さくなる結果となった。また、mR150に比べ mR100では各手法での差異が大きい事が分かる。これは、mR100では粘性係数の低下が著しく、精算・簡易手法での粘性係数が小さいことが要因と考えられる。これらの傾向は SAN 入力時でも同様に確認できる (Fig.9(c),(d))。

Fig.10に、縦軸に $\Sigma W_{di}/E$ 、横軸に解析ケース (Table 2) としたものを示す。Fig.10より、大容量ダンパーでは中容量のものと比較し、 $\Sigma W_{di}/E$ は殆ど同様の値となり、手法による差異は小さいことが分かる。

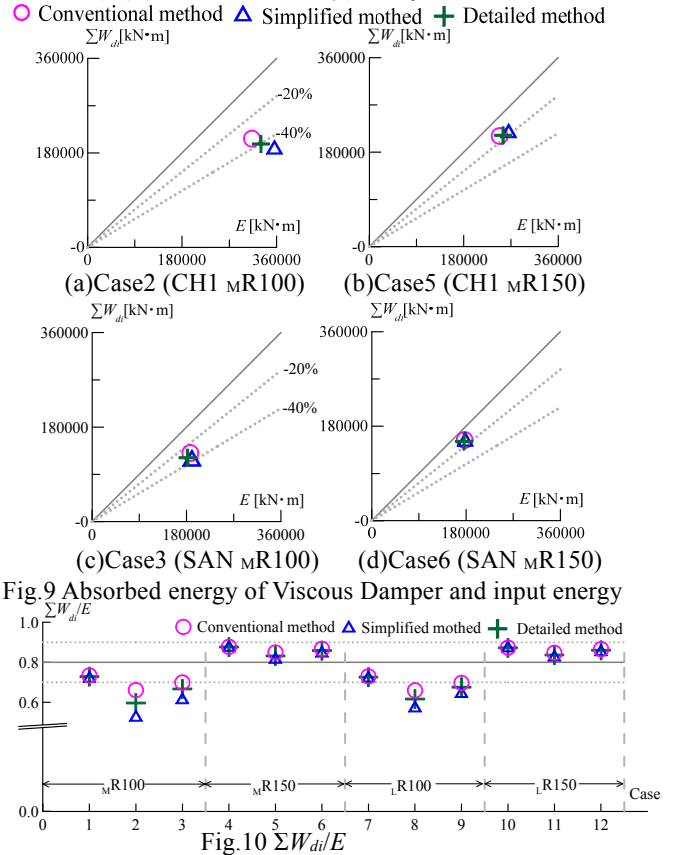


Fig.10 $\Sigma W_{di}/E$

4. 高さ方向における粘性ダンパーのエネルギー吸収量

Fig.11(a)~(l)に、全解析ケースの高さ方向におけるダンパーのエネルギー吸収量 W_{di} を示す。ここで、 W_{di} は第 i 層の粘性ダンパーの吸収エネルギーである。

Fig.11(a)より、ARTHACHI 入力時の $mR100$ では、エネルギー吸収量 W_{di} が最大となる層（6層、精算手法）で各手法を比較すると、通常手法と精算手法の差は 1.2%、簡易手法と精算手法の差は 0.3%となっており、手法による差異は殆ど無いといえる。これに対して、CH1 入力時（Fig.11(c)）では、通常手法と精算手法の差は 7.2%、簡易手法と精算手法の差は 8.2%と多少差異がみられた。SAN 入力時でも ARTHACHI に比べ差異が生じており、入力エネルギーが比較的大きい地震動では、ダンパーの性能低下が生じると共に、高さ方向におけるエネルギー分配は各手法で多少異なることが分かった。

3 波の中でも特に差異がみられた CH1 入力時の $mR100$ のエネルギー吸収量に着目すると（Fig.11(c)）、全層で簡易手法< 精算手法< 通常手法となる事がみられ、粘性係数の低下率 λ の影響が確認された。Fig.11(c),(d)より、 $mR100$ と $mR150$ を比較すると、 $mR150$ に比べ $mR100$ では比較的大きな差異が大きい事が分かる。

Fig.11(c),(i)より、CH1 入力時の $mR100$ と $lR100$ を比較すると、 $lR100$ では通常手法と精算手法の差は最大 4.5%、簡易手法と精算手法の差は最大 4.2%となっており、先した $mR100$ に比べ、差異が小さい結果となった。これらの傾向は、他のケースでも同様に確認できる。

5. まとめ

本報では、粘性ダンパーの性能低下を踏まえたエネルギー法による設計手法の確立のための初期段階として、既往研究で提案されている時刻歴応答解析による、性能低下を考慮した応答評価手法についてエネルギーに関する分析を行った。以下の知見が得られた。

(1) 粘性ダンパーの粘性係数の低下が著しいケース（ダンパー本数および粘性体容量が少なく、入力エネルギーが大きい場合）では、粘性ダンパーの性能低下を考慮しない通常手法、簡易に性能低下を評価できる簡易手法、精緻に性能低下を評価できる精算手法の、入力エネルギー・入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収量・ダンパーのエネルギー分配の各結果に多少差異が生じる。

(2) 粘性ダンパーの粘性係数が小さいほど、入力エネルギーに対するダンパーのエネルギー吸収量は小さくなる。

(3) 主架構の 1 次固有周期とエネルギースペクトル($h = 10\%$)から算出した入力エネルギーの予測値が、精算手法の入力エネルギーをおおよそ予測できており、エネルギー法による入力エネルギーの予測は出来ることが分かった。しかし、多少危険側の評価となるケースも見られており、今後さらに検討していく必要がある。

謝辞および参考文献はその 2 にまとめて示す。

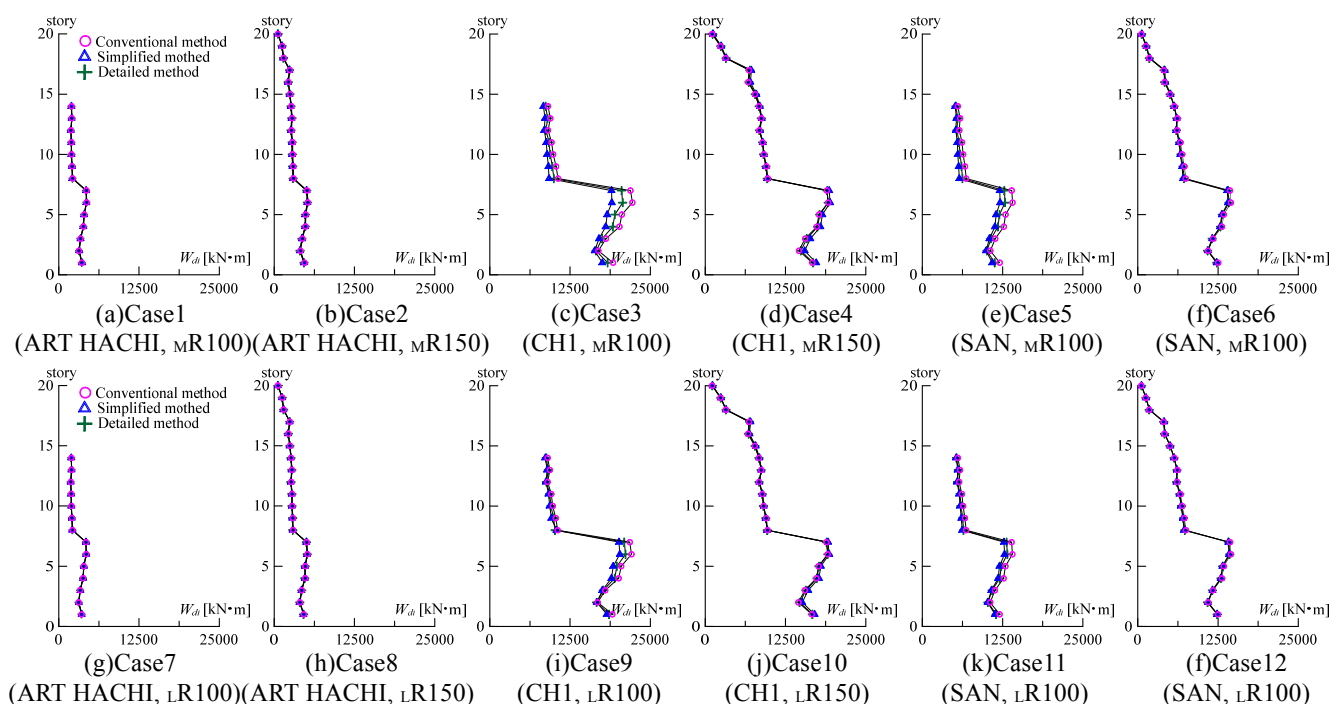


Fig.11 Energy dispersion coefficient of viscous damper

*1 東京工業大学大学院 大学院生

*2 東京工業大学大学院 准教授・博士（工学）

*3 東京工業大学大学院

* Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

* Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. *2

* Tokyo Institute of Technology *3