

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	長時間繰り返しによる制振性能低下を考慮した応答評価
Title	Response Evaluation considering Degradation of Damping Performance by Long-Period Cyclic Loading
著者	岡田亮佑, 佐藤大樹
Author(s)	Ryousuke Okada, Daiki Sato
出典	鋼構造年次論文報告集, vol. 26, , pp. 578-593
Citation	Proceedings of Constructional Steel, vol. 26, , pp. 578-593
発行日 / Pub. date	2018, 11

長時間繰返しによる制振性能低下を考慮した応答評価
Response Evaluation considering Degradation of Damping Performance
by Long-Period Cyclic Loading

論文

○岡田 亮佑*
Ryousuke Okada

佐藤 大樹**
Daiki Sato

ABSTRACT The purpose of this paper is to carry out a response evaluation of passive control structure with viscous dampers considering its performance decrement under long-period ground motion. An analytical model of the viscous damper is considered to evaluate its performance decrement caused by the long-period cyclic loading, and its accuracy is verified by comparing with test results. Time-history analysis of a 20-story model with the proposed viscous dampers is performed when the main frames are elastic and elasto-plastic. It is verified that we can safely evaluate the response using the proposed evaluation method of this study when the response is large.

Keywords : 長周期地震動, 粘性ダンパー, 超高層建物, 性能低下, 応答評価手法
*Long Period Ground Motion, Viscous Damper, High-rise Building,
Performance Degradation, Response Evaluation*

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、国土交通省は、2016年6月に技術的助言を通知し、設計用長周期地震動として基整促波¹⁾を策定した。一方、本研究で対象とする粘性ダンパーは、封入した粘性体の流動抵抗力をダンパー力として利用する流動抵抗式²⁾で表され、振動時のエネルギーを粘性体の熱エネルギーに変換する際の温度上昇に伴いダンパーの特性が変化する温度依存性を持つ。そして長周期地震動の作用を受ける場合、長時間の繰返しでダンパーの性能は大きく低下する可能性がある³⁾。これらのことから、基整促波におけるダンパーの性能低下までを考慮した制振構造の設計が求められる。

文献4)では、粘性ダンパーの性能低下を時々刻々と考慮できる応答評価手法と、繰返しによる性能低下を考慮しない通常の粘性ダンパーモデルを用いた場合のエネルギー密度を利用した簡易な応答評価手法の2つの手法が示されており、

その妥当性を超高層制振建物の時刻歴応答解析により検討している。しかし、主架構が弾性範囲を超える応答となる場合においても、主架構を弾性とした検討のみに留まっている。

本報では、文献4)で提案されている応答評価手法について、設計用長周期地震動である基整促波入力時での解析・検討および主架構弾塑性とした場合での妥当性を検討する。

2. 特性値低下を考慮した解析モデル

3種類の実大粘性ダンパー(表1)を用いて行った、様々な条件における正弦波加振実験(表2)より得られた、繰返しによるダンパーの最大力の低下率の変化とエネルギー密度(後述)の関係を図1(後述)に示す³⁾。粘性ダンパーおよび実験の詳細については文献3)を参照されたい。なお、本報で用いる粘性ダンパーの履歴は、ほぼ矩形の形状(図2, 後述)を示すことから、ダンパーの最大力だけでなく、1サイクル当たりのエネルギー吸収量や損失係数¹⁾の低下率も、ほぼ同様の傾向となる。よって、以降それらをまとめてダンパーの特性値と呼ぶ事とする⁴⁾。

*大学院生 東京工業大学 環境社会理工学院建築学専攻
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

**准教授(博士(工学)) 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所
(〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

Table 1. Specifications of the viscous dampers

Name	l [mm]	Damper				Brace		
		l _d [mm]	A _d [mm ²]	φ _d [mm]	C _d [kN/(mm/s) ^α]	l _b [mm]	A _b [mm ²]	φ _b [mm]
D1-2F D2-2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159
D3-2F	3849	689	28124	286	196	1542	15323	236

* The values of α and K_d are 0.38 and ∞, respectively.

Table 2. Parameters of sinusoidal tests

Test name	Period T [s]	Amplitude u _d [mm]	Duration t ₀ [s]	Number of cycles	Initial temperature θ ₀ [°C]	Specimen name
V-1	4.0	20	600	150	10	D1-2F
V-2	4.0	20	1800	450	15	
V-3	4.0	20	3600	900	15	
V-4	4.0	20	10800	2700	13	
V-5	2.0	20	230	115	15	
V-6	4.0	10	1200	300	15	D2-2F
V-7	4.0	20	600	150	15	
V-8	4.0	30	400	100	15	
V-9	6.0	20	900	150	15	
V-10	4.0	20	1800	450	26	D3-2F

※D3-2F is large capacity; all others are mid-capacity

図 1 中の破線は式(1)に示した粘性係数の低下率 λ⁽ⁿ⁾を示しており、λ⁽ⁿ⁾は実験より得られた粘性ダンパーの特性値の低下と良く対応していることが分かる。

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}) \quad (1)$$

ここで、a₀ はエネルギーの累積吸収による低下の程度を表す係数であり、同じ流動抵抗式¹⁾の粘性ダンパーでも規格によっては異なる値をとる。本報では、実験結果³⁾より得られた 1.695 × 10⁶ m²/kN を用いる。

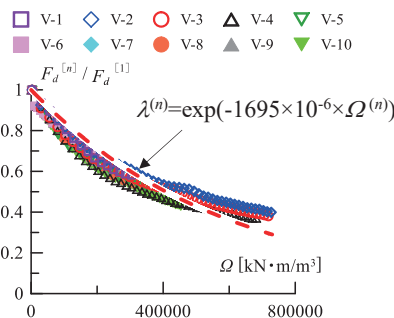


Figure 1. Reduction rate of maximum damper force

エネルギー密度 Ω⁽ⁿ⁾ は式(2)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。

$$\Omega^{(n)} = \frac{\sum W_d^{(n)}}{V_V} \quad (2)$$

ここで、ΣW_d⁽ⁿ⁾ はダンパーの累積エネルギー吸収量、V_V は粘性ダンパー内に封入されている粘性体の容量である。

上記の実験結果を踏まえて、長時間繰り返しによる粘性ダンパーの特性値低下を考慮した解析モデルを示す。粘性ダンパーを Maxwell 体で表すと、任意の解析時間ステップ n における粘性ダンパーの荷重 F_d⁽ⁿ⁾ は、式(3)で表される⁴⁾。

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

ここで、α はべき乗指数、u_d⁽ⁿ⁾ は n ステップにおける粘性要素の速度である。繰り返し効果を考慮した場合での n ステップにおける粘性係数 C_d⁽ⁿ⁾ は、λ⁽ⁿ⁾を用いて式(4)より算出される。

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

この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て、実験値と比較することで解析モデルの精度を検証する。図2に実験結果と解析結果を比較した履歴の一例 (V-6, V-10(表 2)) を示す。なお、解析に用いる粘性ダンパーの α および C_d⁽⁰⁾ は表 3 の値⁵⁾を用いて算出した。ここで、表中の u_{d0} は変位振幅を意味する。図2より、繰り返しによるダンパーの特性値低下を考慮した解析モデルは、いずれの実験においても、ダンパー特性が変化する傾向を精度良く再現できていることが確認されている⁴⁾。

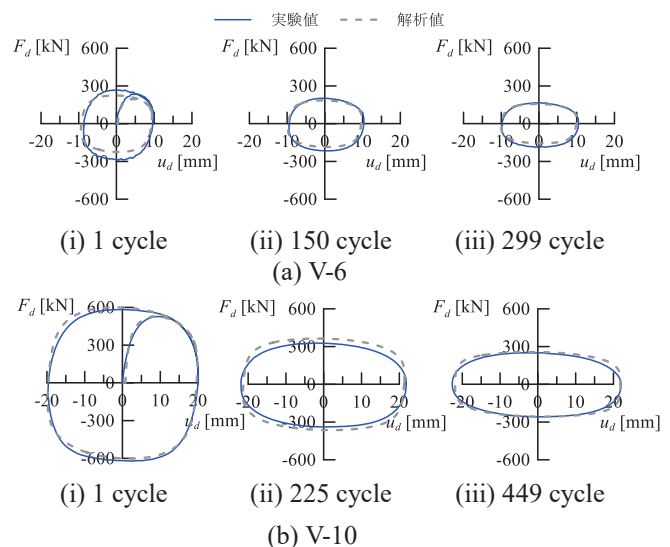


Figure 2. Comparison of test and analysis results

Table 3. Approximate values of α and C_d⁵⁾

	α = A ₁ u _{d0} ^{A₂}		C _d ⁽⁰⁾ = A ₃ u _{d0} ^{A₄}	
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Medium capacity	0.860	-0.205	24.1	0.319
Large capacity	0.806	-0.156	42.2	0.288

3. 入力地震動と解析モデル

3.1 入力地震動概要

入力地震動は東海・南海地震動を想定した長周期地震動である三の丸波 (SAN)⁶⁾、基整促波である CH1¹¹⁾の2波を採用する。また、ダンパー設計用の入力地震動として、海溝型地震に分類される1968年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分 (以降、この模擬波を ART HACHI と呼ぶ。)を用いる。図3に加速度波形を、図4(a), (b)に擬似速度応答スペクトル ρS_v ($h = 5\%$)、エネルギー Spektral V_E ($h = 10\%$)を示す。図3中には、最高加速度 Acc_{max} 、実効地震継続時間 $e t_0$ ⁷⁾を併せて示す。図4より、主架構 (後述)の1次固有周期 (2.69 s) 付近で、いずれもレベル2相当の地震動 (ART HACHI) より大きい値を有する地震動であることが分かる。

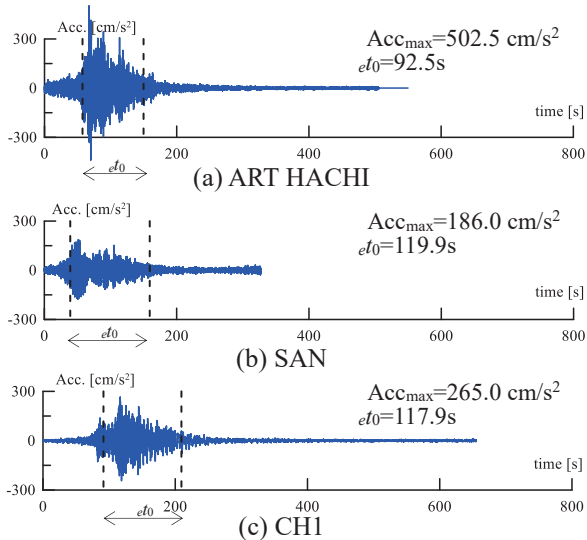


Figure 3. Time history of acceleration

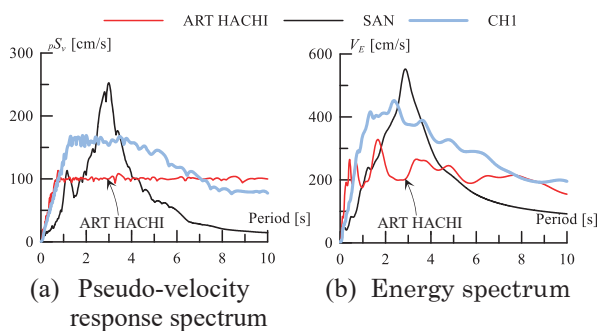


Figure 4. Earthquake spectra

3.2 建物モデルの概要

本報では、建物高さ 81.7 m の 20 層の鋼構造建物 (短辺方向) を対象とし⁸⁾、20 質点の等価せん断モデルを用いる。主架構の1次固有周期 T_1 は 2.69 s である。構造減衰は、1次と2次で1%とな

るレーリー型減衰とする。なお、主架構は弾性“Elastic”，弾塑性“Elasto-Plastic”の2ケースとし、解析を行う。主架構弾塑性とした解析における各層の復元力特性の設定を以下に示す。

本報では、部材モデル⁸⁾の主架構に対する静的解析より得られた各層の層せん断力と層間変形角の関係から、弾性型・バイリニア型復元力特性を作成する^{9),10)}。なお、層を構成するいずれかの部材でヒンジができた時を降伏と定義し、降伏に達した層 (1F~13F) をバイリニア型、降伏に達しない層 (13F~) を弾性型とする。なお、バイリニア型では層間変形角 $R = 1/50$ までの面積等価とし、 $R = 1/50$ に達しない層は静的解析終了時の変形までの面積等価とする。図5に静的解析より得られた荷重変形関係と復元力特性を示す。

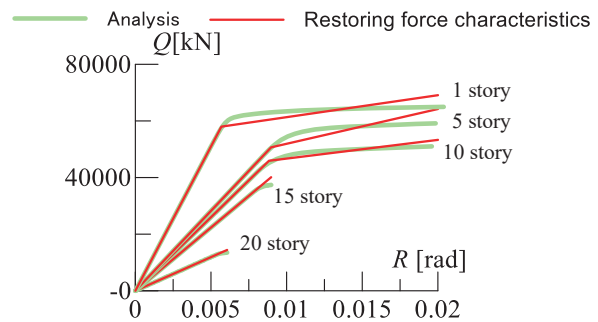


Figure 5. Force-displacement relationship and restoring force characteristics

3.3 ダンパー概要

粘性ダンパーは図6のようにダンパーと支持部材を直列にモデル化し、内部剛性 K_d と支持部材剛性 K_b をまとめて等価支持材剛性 K_b^* で表す (表4)。図7に高さ方向における粘性ダンパーの粘性係数を示す。粘性ダンパーの配置は、V100, V150 の2つを設定する。V100 では ART HACHI において層間変形角 $R = 1/100$ 以内、V150 では $1/150$ 以内に収まるように粘性ダンパーを配置している¹¹⁾。

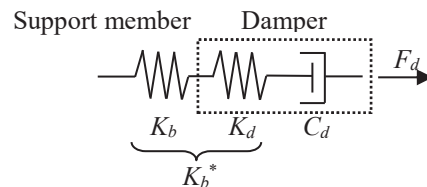


Figure 6. Damper and Support member

Table 4. Equivalent support member stiffness

	K_d [kN/cm]	K_b [kN/cm]	K_b^* [kN/cm]
D2-2F	2663.0	2525.0	1296.1

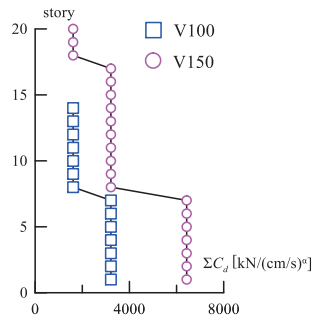


Figure 7. Setting of viscosity coefficient

4. 時刻歴応答解析結果

本章では、高さ方向における最大応答分布として、層間変形角、絶対加速度、全体架構（主架構+ダンパー）の層せん断力を示す。なお、解析刻みは SAN 入力時では 0.001 s、CH1 では 0.002 s として解析を行う。

4. 1 層間変形角

図 8(a), (b)に時刻歴応答解析より得られた層間変形角の最大値 R を示す。図 8(a)は SAN 入力での結果、図 8(b)は CH1 入力時での結果であり、(i)は主架構弾性モデル、(ii)は主架構弾塑性モデルでの結果である。

特性値低下を考慮せず解析を行ったもの（以降、考慮なし“*No-decrease method*”）と、解析ステップ n ごとに $\lambda^{(n)}$ （式(1)）を計算し、その値に応じて粘性係数を低下させた解析を行ったもの（以降、精算手法“*Accurate method*”）の結果を比較する。図 8(a),(b)より、SAN, CH1 入力時において主架構弾性時では V100, V150 とともに、繰り返しにより粘性ダンパーの性能が低下することで、精算手法が考慮なしに比べて層間変形角が大きく増大している。一方、主架構弾塑性時では、ダンパーの性能低下による建物への影響は少ない。この理由を分析するために、エネルギー吸収量の配分を検討する。図 9 に SAN 入力時、V150、精算手法での地震終了時 t_{end} におけるエネルギー吸収量の配分を示す。ここで、 W_{fh} は主架構の減衰により消費されるエネルギー、 W_{fp} は主架構の累積塑性ひずみエネルギーである。図 9 より、全吸収エネルギーに対するダンパーの吸収エネルギー W_d の割合は主架構弾性時で 0.88、主架構弾塑性時で 0.81 となった。主架構弾性・弾塑性時の入力エネルギー E が殆ど同値であるのに対して、主架構弾塑性時におけるダンパーの吸収エネルギーが主架構弾性時に比べて少なく、ダンパーの性能低下も小さくなったことが、主架構弾塑性時でのダンパーの性能低下による建物への影響が少ない理由と考えられる。

次に考慮なしの解析より得られた地震終了時におけるダンパーのエネルギー密度 $\Omega^{(n)}$ から式(1)を用いて特性値低下を評価し、粘性係数の初期値 $C_d^{(0)}$ をあらかじめ低下させ、再度解析を行ったもの（以降、簡易手法“*Simplified method*”）と精算手法を比較する。図 8(a)より、主架構塑性化の考慮の有無に関わらず、応答の大きい層では、精算手法は考慮なしと簡易手法の間に位置している。一方、応答の比較的小さい上層では簡易手法による応答評価が精算手法に比べ危険側となることも確認できる。応答の大小によって簡易手法の応答評価の傾向が変化することは、CH1 入力時（図 8(b)）においても確認されている。

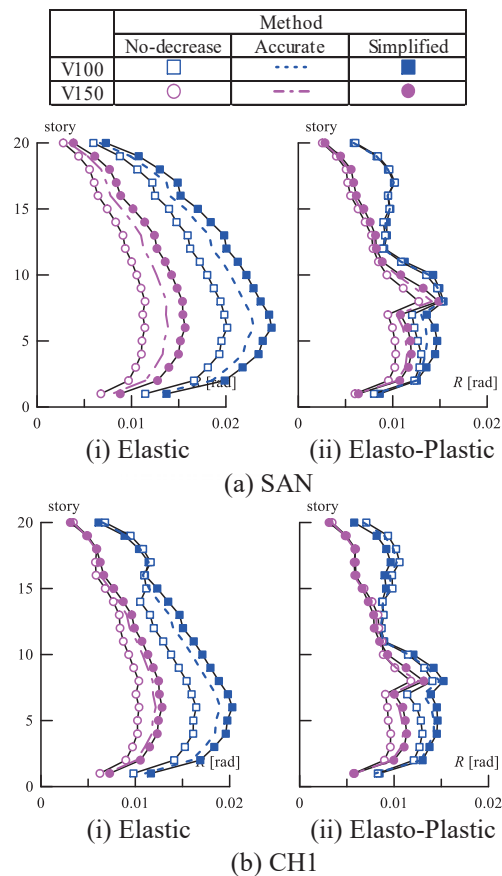


Figure 8. Distribution of story drift angle R

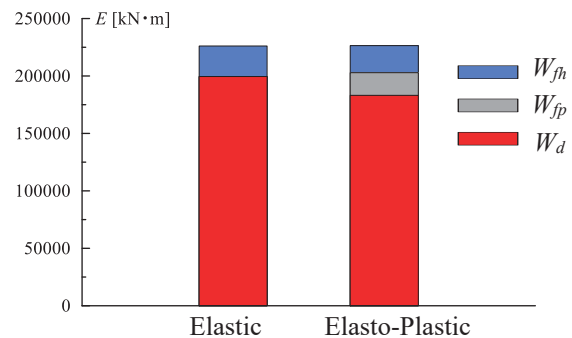


Figure 9. Energy allocation in t_{end}
(SAN, V150, “*Accurate method*”)

4. 2 絶対加速度

図 10(a), (b)に解析より得られた絶対加速度の最大値 A を示す. 図 10(a), (b)より, SAN, CH1 入力時における主架構弾性時の結果をみると, SAN 入力時では精算手法の結果が考慮なしと簡易手法の間に位置しているのに対して, CH1 入力時では殆どの層で簡易手法の応答が精解値である精算手法より危険側に応答を評価していることが分かる. これは, スペクトルの影響と考えられるが, 建物モデル, ダンパー量, 地震波のケースを増やし, この原因をさらに検討していく必要がある.

図 10(a)より, SAN 入力時における主架構弾塑性時の結果をみると, 殆どの層で考慮なしと精算手法の応答に差が見られない. 次に, 主架構弾塑性時での精算手法と簡易手法の結果を比較する. 図 10(a), (b)より, SAN 入力時では簡易手法と精算手法の応答の差は小さいものの, CH1 入力時では主架構弾性時と同様に簡易手法の評価が危険側となっている. 以上より, 絶対加速度の場合, 地震波によっては危険側の評価をしてしまうため, 注意が必要であることが分かる.

	Method		
	No-decrease	Accurate	Simplified
V100	□	---	■
V150	○	- - -	●

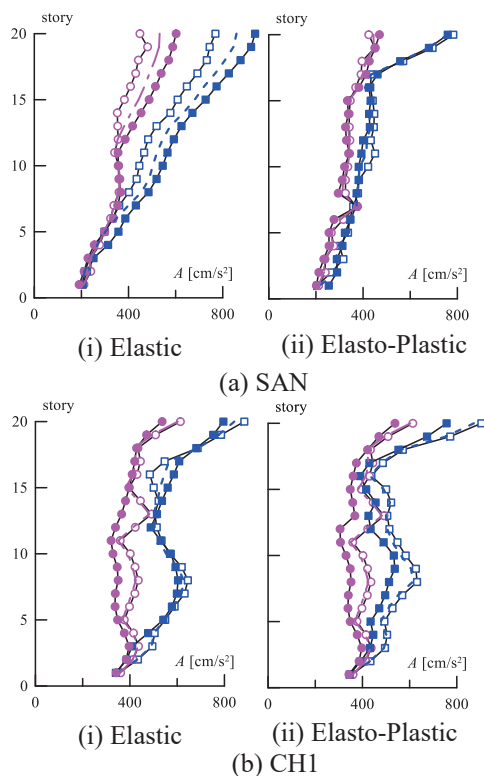


Figure 10. Distribution of absolute acceleration

4. 3 全体架構の層せん断力

図 11(a), (b)に解析より得られた全体架構の層せん断力の最大値 Q を示す. 考慮なしと精算手法の結果を比較する. 図 11 (a)より, 層間変形角と同様に, SAN 入力時の主架構弾性時では V100, V150 において, 精算手法が考慮なしに比べて応答が増大していることが分かる. 一方, 主架構弾塑性時には, 各手法での建物応答への影響は殆ど差がないことが分かる. これは図7で示すように, パイリニア型となる層 (1~13層) の復元力特性の2次勾配が小さいので, せん断力が上昇しなくなるためである. また, 4.1 節で述べたように主架構弾塑性時ではダンパーの性能低下は小さいことも各手法での建物応答に差が小さい理由と考えられる.

次に簡易手法と精算手法の結果を比較する. 図 11 (a)より, 主架構弾性時では応答の大きい層において, 精算手法は考慮なしと簡易手法の間に位置するような応答となる. 一方, 主架構弾塑性時には, それぞれの手法で応答に差が見られない. また, これらの傾向は図 11 (b)より, CH1 入力時においても確認されている.

	Method		
	No-decrease	Accurate	Simplified
V100	□	---	■
V150	○	- - -	●

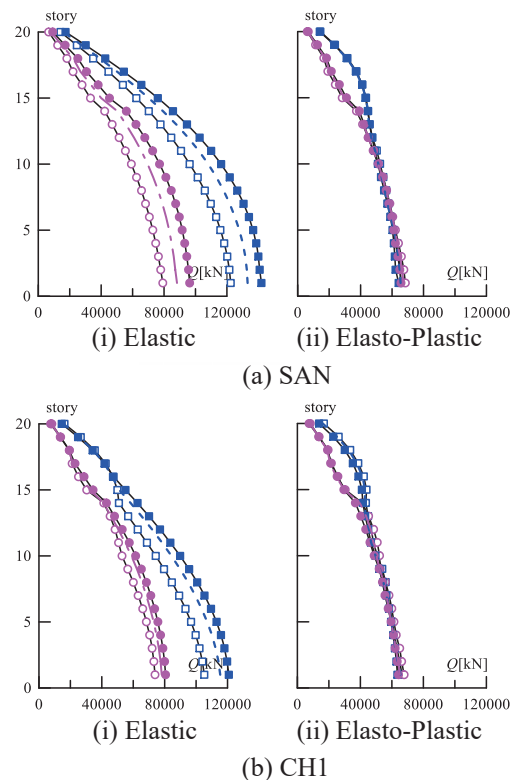


Figure 11. Distribution of all structure shear force

5. 簡易応答評価手法の妥当性

本章では、簡易手法による各層の応答結果を精解値である精算手法の結果で除したもの（以降、安全率）を用いて簡易手法による評価の妥当性を検討する。図12～14に、縦軸をそれぞれ最大層間変形角 R 、最大絶対加速度および全体架構の最大層せん断力での安全率、横軸を簡易手法による各層の最大層間変形角としたものを示す。ここで、右添え字にSが付くものを簡易手法、Aが付くものを精算手法による応答結果とする。

図12(a),(b)より層間変形角では、主架構塑性化の考慮の有無、ダンパー量に関わらず、 $R_S \geq 1/100$ の範囲において殆どの層で安全側の評価となる。一方、 $R_S \leq 1/100$ の範囲において、主架構弾性時と弾塑性時を比較すると、弾性時に比べ弾塑性時には危険側の評価が多く見られる。図13(a),(b)より絶対加速度では、V100,V150ともに殆どの層で危険側の評価となり、特に $R_S \leq 1/100$ の範囲では最も危険側の評価となる層で絶対加速度の安全率 A_S/A_A は0.74となった。

図14(a),(b)より全体架構の層せん断力では、主架構弾性時では、 $R_S \geq 1/100$ の範囲において殆ど全ての層で安全側の評価となる。一方、主架構弾塑性時には $R_S \geq 1/100$ の範囲において安全率 Q_S/Q_A は1.0程度であることが確認できる。

図12～14より、各応答での安全率を確認すると、応答が大きい場合 ($R_S \geq 1/100$) で簡易手法は比較的に安全側の評価に近づく事が分かった。層間変形角では主架構弾性時に比べ、主架構弾塑性時には危険側の評価が多く見られたが、これは4.1節で示したように、ダンパーの性能低下がより少なく、精算手法の応答と簡易手法の応答に大きな差が生じなかったことが影響していると考えられる。しかし、絶対加速度では主架構の塑性化の有無に関わらず、応答の大きい層でも危険側の評価が確認されることから、簡易応答評価手法による絶対加速度の評価では注意が必要である。

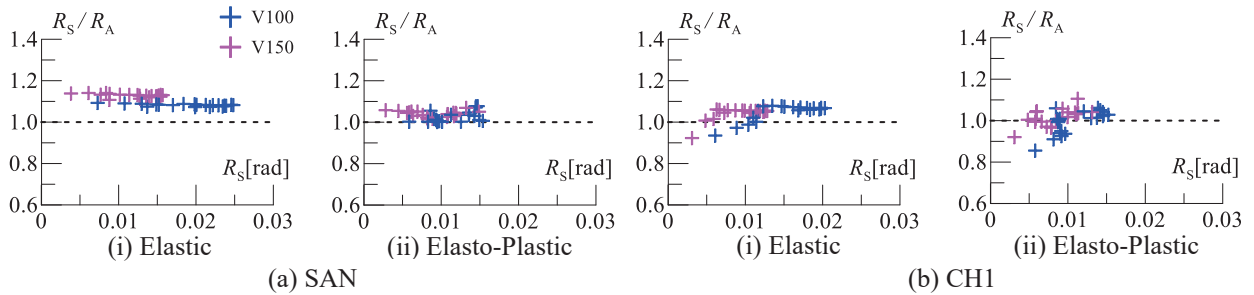


Figure 12. Safe ratio of story drift angle R (R_S/R_A)

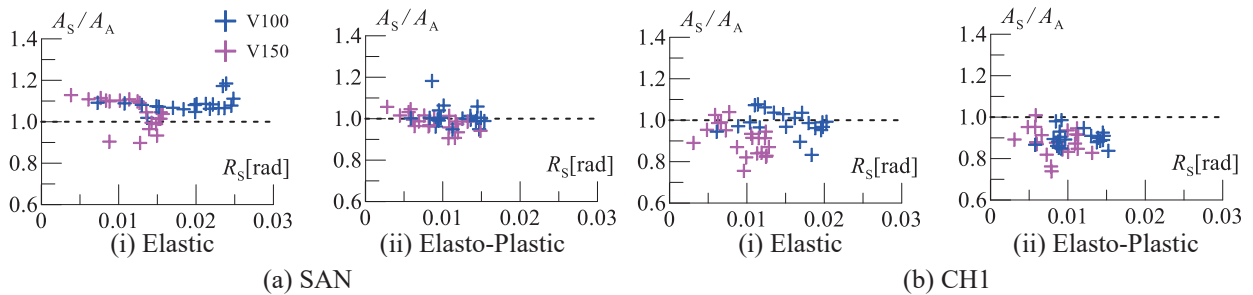


Figure 13. Safe ratio of absolute acceleration (A_S/A_A)

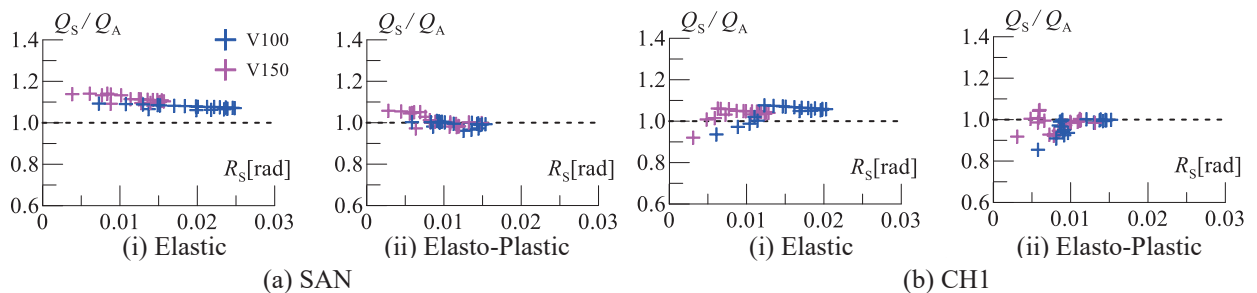


Figure 14. Safe ratio of all structure shear force (Q_S/Q_A)

6. まとめ

本報では、文献 4)で示されている粘性ダンパーの性能低下を容易に考慮できる簡易応答評価手法について、主架構の塑性化を考慮した場合での妥当性の検討を行った。さらに、設計用長周期地震動である基整促波入力時での解析・検討を行った。以下の知見が得られた。

- ・基整促波においても、ダンパーの性能低下によって建物応答は増大することが確認された。
- ・主架構弾塑性時では、主架構弾性時に比べ、ダンパーの性能低下による建物応答の増大は少ないものの、応答の増大が確認された。
- ・最大層間変形角、最大全体架構の層せん断力では主架構弾性時、弾塑性時ともに、応答が大きい場合であれば、簡易応答評価手法はほぼ安全側の評価ができる。
- ・最大絶対加速度では主架構弾性時、弾塑性時ともに、応答が大きい場合にも関わらず、簡易応答評価手法は危険側の評価が多い結果となった。今後、建物モデル、ダンパー量、地震波のケースを増やし、この原因をさらに検討していく必要がある。

謝辞

本研究は、元東京工業大学佐藤研究室の長山祥氏の研究成果の一部を用いたものです。ここに記して、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 建築研究所:長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ, <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html> (2017.6.30)
- 2) 日本免震構造協会:パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 第3版, 2013.11
- 3) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥:長時間正弦波加振実験による4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工学論文集, Vol.63B, pp.275-283, 2017.3
- 4) 佐藤大樹, 長山祥, 笠井和彦, 松田和浩:長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価, 日本建築学会技術報告集, 24(56),59-62, 2018.2
- 5) 笠井和彦, 山際創, 西島正人, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 引野剛, 大木洋司:粘性ダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第695号, pp.47-56, 2014.1

- 6) 愛知県建築住宅センター:名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成(概要版), (財)愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会, pp.1-48, 2004.6
- 7) Trifunac, M.D. and Brady, A.G.:A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, June 1975
- 8) 日本建築学会:鋼構造制振設計指針, 第1版, 2014.11
- 9) 北村春幸:性能設計のための建築振動解析入門, 彰国社, 2002.9
- 10) 株式会社 日建設計東京オフィス構造設計室:建築物の性能設計と検証法, オーム社, 2003.9
- 11) 中井亜里沙, 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩:長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その1 建物モデル概要とダンパー配置計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.163-164, 2016.8