

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	東海・東南海・南海連動地震における単独地震と連動地震の対応関係 - 履歴型ダンパーを付与した制振構造における累積値の分析 -
Title(English)	
著者(和文)	臼田雄作, 佐藤大樹, 松田頼征, 北村春幸, 山本優, 木村雄一, 大和伸行, 木村暢志
Authors(English)	Daiki Sato, Yoriyuki MATSUDA, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 545-548
Citation(English)	, , , pp. 545-548
発行日 / Pub. date	2017, 3

東海・東南海・南海連動地震における単独地震と連動地震の対応関係
—履歴型ダンパーを付与した制振構造における累積値の分析—

構造—振動

正会員 ○ 臼田雄作*¹ 正会員 佐藤大樹*² 正会員 松田頼征*³
正会員 北村春幸*⁴ 正会員 山本 優*⁵ 正会員 木村雄一*⁶
正会員 大和伸行*⁶ 正会員 木村暢志*⁶

長周期地震動 東海・東南海・南海連動地震

履歴型ダンパー 累積損傷 超高層建物 制振構造

1. はじめに

近年、南海トラフ沿いの巨大地震として東海・東南海・南海地震が連動する三連動地震の発生が懸念されている。三連動地震が発生すると主要都市圏では長周期地震動の発生が予想されることから、制振ダンパーによる超高層建物の長周期地震動対策が進んでいる¹⁾。連動地震は、連動する個々の地震(以降、単独地震と呼ぶ)の震源モデルが同一でも、破壊開始点や発生順序等の差異により様々な想定が可能で、その予測波は単独地震に比べて膨大な数となり、バラツキを有する²⁾。そのため予測された地震動に対してのみ耐震性能を評価するのではなく、予測地震動のバラツキを考慮した上で耐震設計を行なう必要がある。

筆者らは、耐震構造の建物を対象として、単独地震の応答に基づいた連動地震による最大値と累積値の評価法を提案してきた^{2,3)}。本研究は、この続報で履歴型ダンパーを有する建物を対象とした評価法の提案を目的としている。これまで、特定のモデルによる提案法の検討を行ってきた⁴⁾が、ダンパーの設定条件を変化させた際の検討は行っていない。

そこで本報では、ダンパーの設定条件をパラメータとした建物モデルを用いて、単独地震と三連動地震による累積値の対応関係の分析を行う。

2. 検討用建物モデルの概要

本報では、地上 50 階、高さ約 200 m の純ラーメン架構²⁾へ履歴型ダンパーをコア周りに連層配置とした建物を部材レベルでモデル化した。図 1 に (a) 軸組図、(b) 基準階伏図、表 1 に主要断面部材を示す。解析は、剛床仮定で X 方向のみの 1 方向入力とし P-δ 効果は考慮していない。構造減衰は、主架構のみの場合の一次固有周期 T_1 に対して $h = 2\%$ の剛性比例型とした。

ダンパーは、履歴型ダンパーとして座屈拘束ブレースを用い、塑性化部、弾性部、取り付け部で構成される。部材長さ L に対して塑性化部の長さ $L/4$ とし、塑性化部断面積 A_d に対して弾性部・取り付け部断面積 $2A_d$ とする。塑性化部には LY225 材(降伏応力度 225 N/mm²)を用いる。

第 i 層のダンパーの降伏層せん断力 ${}_dQ_{y,i}$ は、ダンパーの第 1 層の降伏耐力 ${}_dQ_{y,1}$ を

$${}_dQ_{y,i} = {}_d\alpha_{y,i} \times \sum_{j=1}^N M_j g \tag{1}$$

と算出しこれを基準として定める。 A_i 分布に基づく設計用

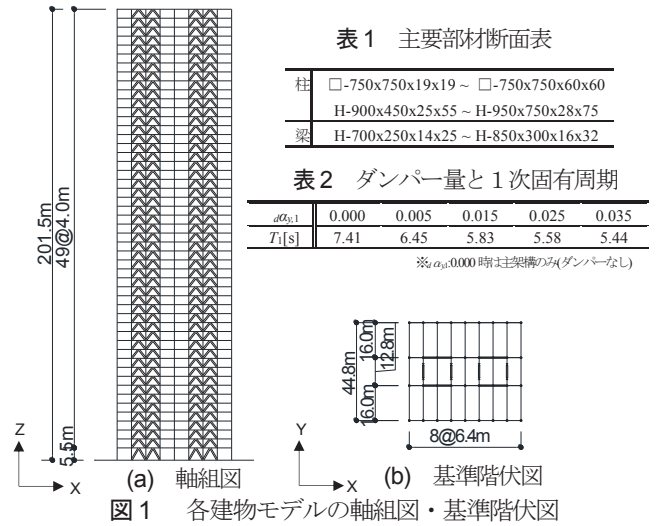


図 1 各建物モデルの軸組図・基準階伏図

表 1 主要部材断面表

柱	□-750x750x19x19 ~ □-750x750x60x60 H-900x450x25x55 ~ H-950x750x28x75
梁	H-700x250x14x25 ~ H-850x300x16x32

表 2 ダンパー量と 1 次固有周期

${}_d\alpha_{y,1}$	0.000	0.005	0.015	0.025	0.035
T_1 [s]	7.41	6.45	5.83	5.58	5.44

※: ${}_d\alpha_{y,1}=0.000$ 時主架構のみ(ダンパーなし)

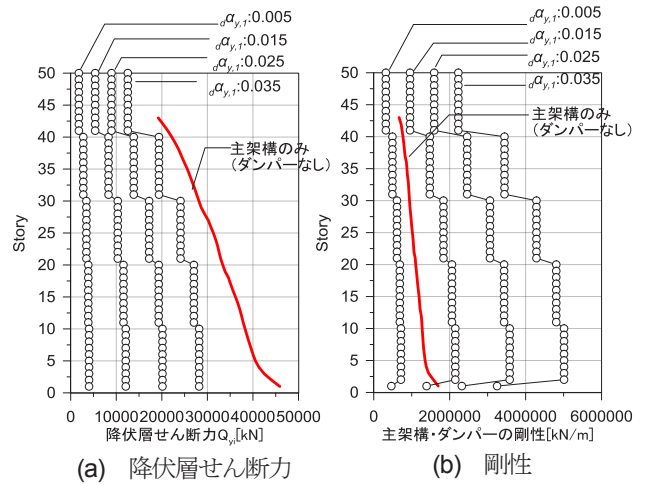


図 2 ダンパーの耐力・剛性

層せん断力係数に基づき 10 層ごとの 5 段階分布として

$${}_dQ_{y,i} = A_i \times {}_dQ_{y,1} \tag{2}$$

より定める。ここに、 ${}_d\alpha_{y,1}$:ダンパーの第 1 層の降伏層せん断力係数、 M_i :第 i 層における建物の質量、 g :重量加速度

式(1)における ${}_d\alpha_{y,1}$ (以降、ダンパー量と呼ぶ)をパラメータとして 0.005~0.035 間を 0.010 刻みとして設定した制振構造の建物モデルを用いて検討を行う。表 2 に設定したダンパー量 ${}_d\alpha_{y,1}$ と 1 次固有周期 T_1 、図 2 にダンパーの高さ方向における (a) 降伏層せん断力・(b) 剛性分布を示す。ダンパー量 ${}_d\alpha_{y,1}$ が大きいほど、ダンパーの降伏層せん断力・剛性は大きくなる設定条件となる。

3. 検討用地震動の概要

本報では、中央防災会議で提示された 2003 年の震源モデル⁵⁾に基づき山本・吉村が作成した 3 次元 FEM による三連動地震の予測波⁶⁾を用いる。この予測波は周期 2.5 s 以上が適用範囲である。本研究では、実在建造物の固有周期を考慮し解析対象周期を 2.5~10 s と定める。地震発生ケースは 2 種類で、紀伊半島沖を破壊開始点とし、南海地震が西へ、東南海地震と東海地震が東へ破壊が伝播する Case-1、破壊開始点を南海地震西端の足摺岬沖とし、南海地震、東南海地震、東海地震の順に破壊が伝播する Case-2 である。

表 3 に想定地震とその略称を示す。検討地点は関東・濃尾・大阪平野からそれぞれ代表して 3 点、計 9 地点の予測波を採用する。表 4 に検討地点とその略称を示す。同表の検討地点のうち、代表として OSOS2 における予測波における擬似速度応答スペクトル ρS_v とエネルギースペクトル V_E を図 3 に示す。三連動地震と単独地震を比較すると、Case1 では三連動地震が大きく、 ρS_v では最大単独地震に対して概ね 1.5 倍、Case2 では同程度で周期によっては単独地震より小さい。三連動地震においては 2 つのケースでば

表 3 想定地震と略称

想定地震		略称
単独地震	東海地震	T
	東南海地震	TN
	南海地震(Case-1)	N 1
	南海地震(Case-2)	N 2
連動地震	三連動地震(Case-1)	T-TN-N 1
	三連動地震(Case-2)	T-TN-N 2

表 4 検討地点とその略称

(a) 関東平野		(b) 濃尾平野		(c) 大阪平野	
検討地点	略称	検討地点	略称	検討地点	略称
野田市役所	CBMT	南知多町	AIMT	Kik-net	OSKH
久喜市役所	CBND	常滑市役所	AITK	大阪市役所	OSOS2
東京都庁	TKTK	四日市市役所	MIYK	八尾市役所	OSYO

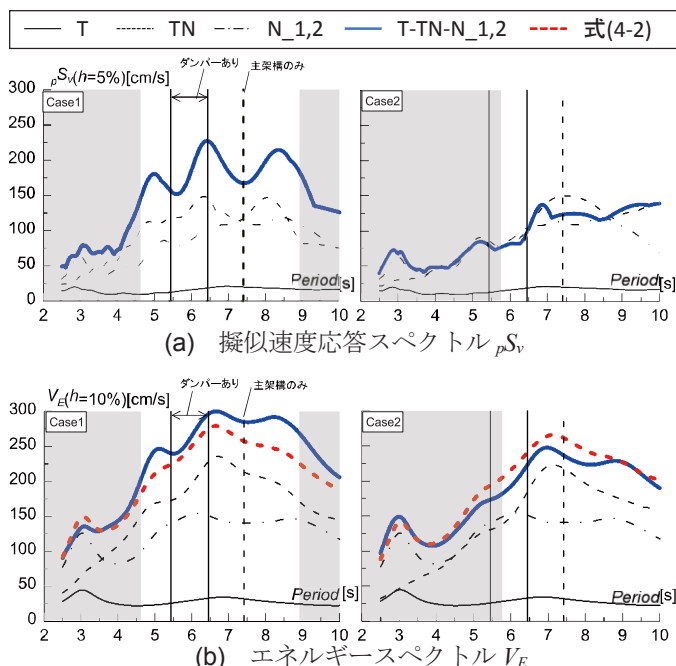


図 3 検討地点 OSOS2 における応答スペクトル

つきが大きく、 ρS_v では周期 6.3 秒周辺で約 140 cm/s の差異がみられる場合もある。このように、連動地震は、発生ケースによってレベルのばらつきがあり、多くの場合は個々の単独地震よりも大きい稀に小さくなる場合がある。

本報では、これらの地震動に対して、既報で定めた長周期地震動が卓越する「特定の周期帯」、最も応答が大きくなる主軸方向⁷⁾を対象に議論を進める。

4. 単独地震と三連動地震における累積値の対応関係

4.1 入力エネルギーの対応関係

北村らは、長寿命建築物が遭遇する 3 つの単独の地震動を想定し、これらを時系列に連続して作用させた時刻歴応答解析結果から入力エネルギーが各地震動の累積となることを示している⁷⁾。本報においても、この考えに基づき n 個の単独地震が連動する場合、連動地震の入力エネルギー E を次式で考える。

$$E = \sum_{j=1}^n E_j \quad (3)$$

速度換算値であるエネルギースペクトル V_E は次式で表される。

$$V_E = \sqrt{\sum_{j=1}^n V_{E,j}^2} = \sqrt{2 \sum_{j=1}^n E_j / M} \quad (4)$$

図 4 に、時刻歴応答解析から得られる入力エネルギーの速度換算値 V_E について、横軸に単独地震の総和 (式 (4))、縦軸を T-TN-N_1,2 による速度換算値とした対応関係を示す。式(4)と T-TN-N_1,2 による入力エネルギーは、ダンパー量 $\alpha \alpha_{y,1}$ に関わらずその対応は良く、やや単独地震の総和が大きい傾向が確認できる。連動地震は個々の地震動が連動することで位相の干渉や継続時間の増加により入力エネルギーの増大が考えられる。これを踏まえると、式 (3) および (4) による個々の単独地震の総和とした評価は連動地震に対して概ね安全側の評価と考えられる。

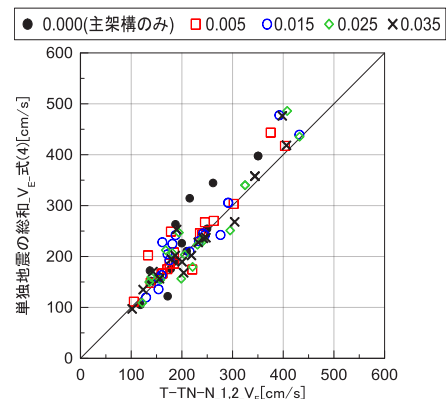


図 4 入力エネルギーの速度換算値 V_E の対応関係

4.2 ダンパー・主架構の塑性歪エネルギーの対応関係

次に、ダンパー・主架構の塑性歪エネルギーについて述べる。入力エネルギー同様に、 n 個の単独地震の総和として、ダンパー塑性歪エネルギー μW_p および主架構塑性歪エネルギー

ギー ${}_dW_p$ をそれぞれ次式で表現する。

$${}_dW_p = \sum_{j=1}^n {}_dW_{p,j} \quad (5)$$

$${}_fW_p = \sum_{j=1}^n {}_fW_{p,j} \quad (6)$$

図 5 に縦軸に式(5), 横軸に T-TN-N_1,2 としたダンパーの塑性歪エネルギーの対応関係を示す。式(5)が T-TN-N_1,2 よりも大きい傾向がある。とりわけダンパー量 ${}_d\alpha_{y,1}$ が小さい 0.005, 0.015 の場合に顕著である。これは、式 (1) より ${}_d\alpha_{y,1}$ が小さいほど、三連動地震よりも小さい単独地震においてもダンパーが早期に降伏しエネルギー吸収するためだと考えられる。一方、 ${}_d\alpha_{y,1}$ が 0.025, 0.035 と大きい場合は、プロットがやや右斜め下に位置する傾向にあり、連動地震によるエネルギーがやや大きい。これは、単独地震においてダンパーが降伏しないケースがあるためである。

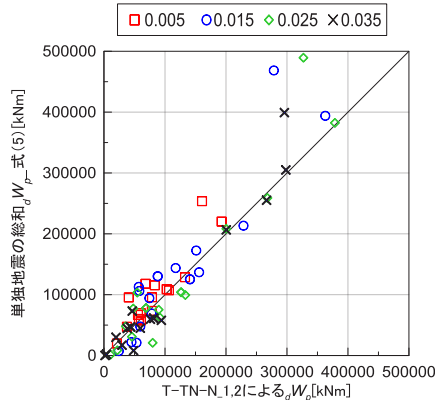


図 5 ダンパーの塑性歪エネルギーの対応

次に、主架構の塑性歪エネルギーについて述べる。図 6 に、ダンパー同様、主架構の塑性歪エネルギーの対応関係を示す。プロットは、やや右斜め下に位置する傾向がみられ

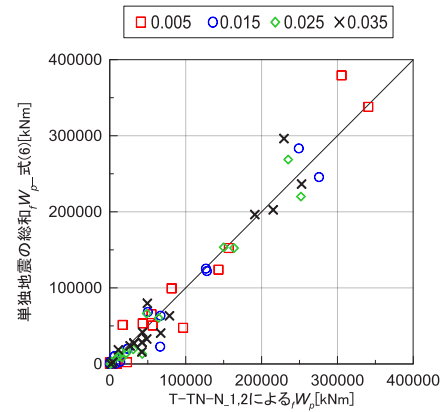


図 6 主架構の塑性歪エネルギーの対応

る。ダンパー量による傾向はみられない。これについて、三連動地震は、地震動が連動することで位相差の干渉による振幅の増幅およびそれに伴う変形の増大が生じ主架構の塑性化が進むと考えられる。それに対して、単独地震では、ダンパーの塑性歪エネルギーが大きい (図 5) ことからその制振効果に伴い、塑性化の程度が小さく (場合によっては弾性応答に留まる) ことが要因として考えられる。一部左上に位置するプロットは、3 章で述べたように連動地震のばらつきが影響しそのエネルギー量が小さくなった結果である。

4.3 ダンパー・主架構の累積塑性変形倍率の高さ方向分布

累積値の高さ方向の分布を確認する。代表として検討地点 OSOS2 の応答解析結果よりダンパーと主架構の累積塑性変形倍率を検討する。ダンパーの累積塑性変形倍率 ${}_d\eta_m$ は、第 i 層におけるダンパー1 本分の塑性歪エネルギー ${}_dW_{p,i,m}$ を用いて次式で算出される。

$${}_d\eta_m = \frac{{}_dW_{p,m,i}}{{}_dN_{y,i} \cdot {}_d u_{y,i}} \quad (7)$$

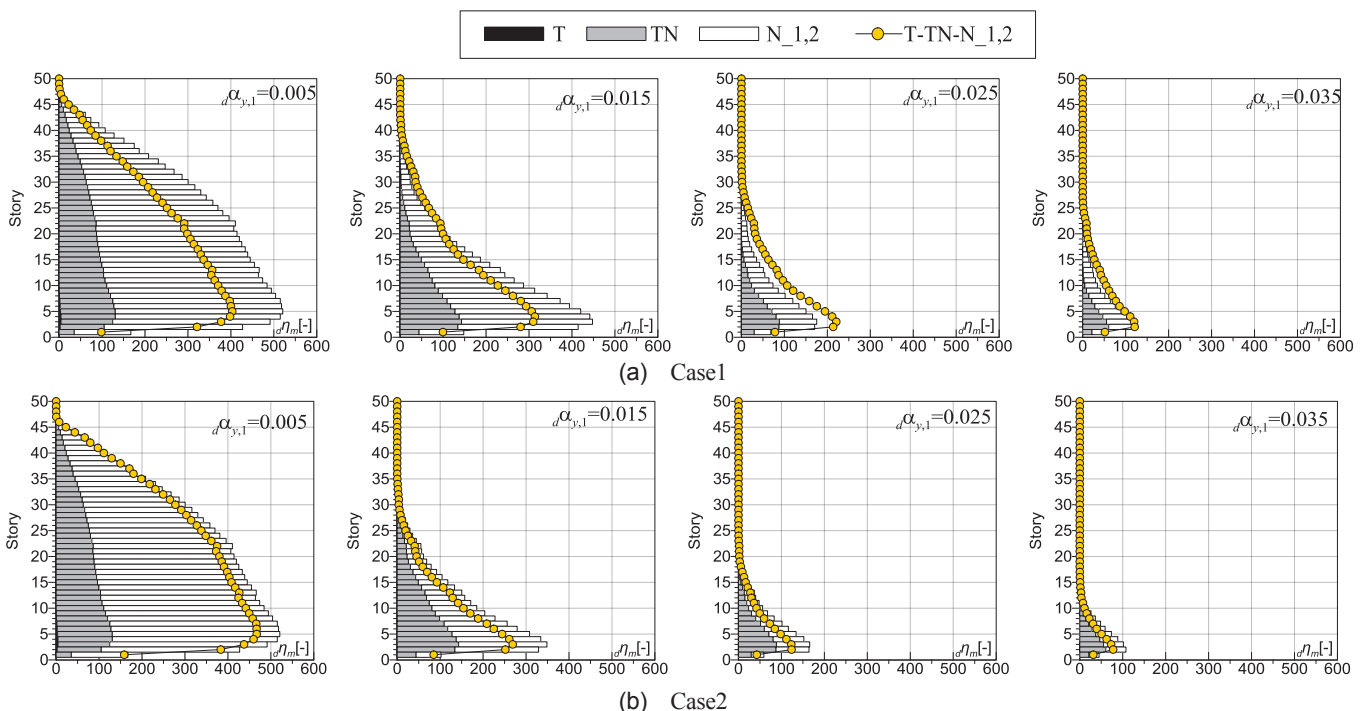


図 7 検討地点 OSOS2 における主架構の累積塑性変形倍率 ${}_d\eta_m$ (式(7))

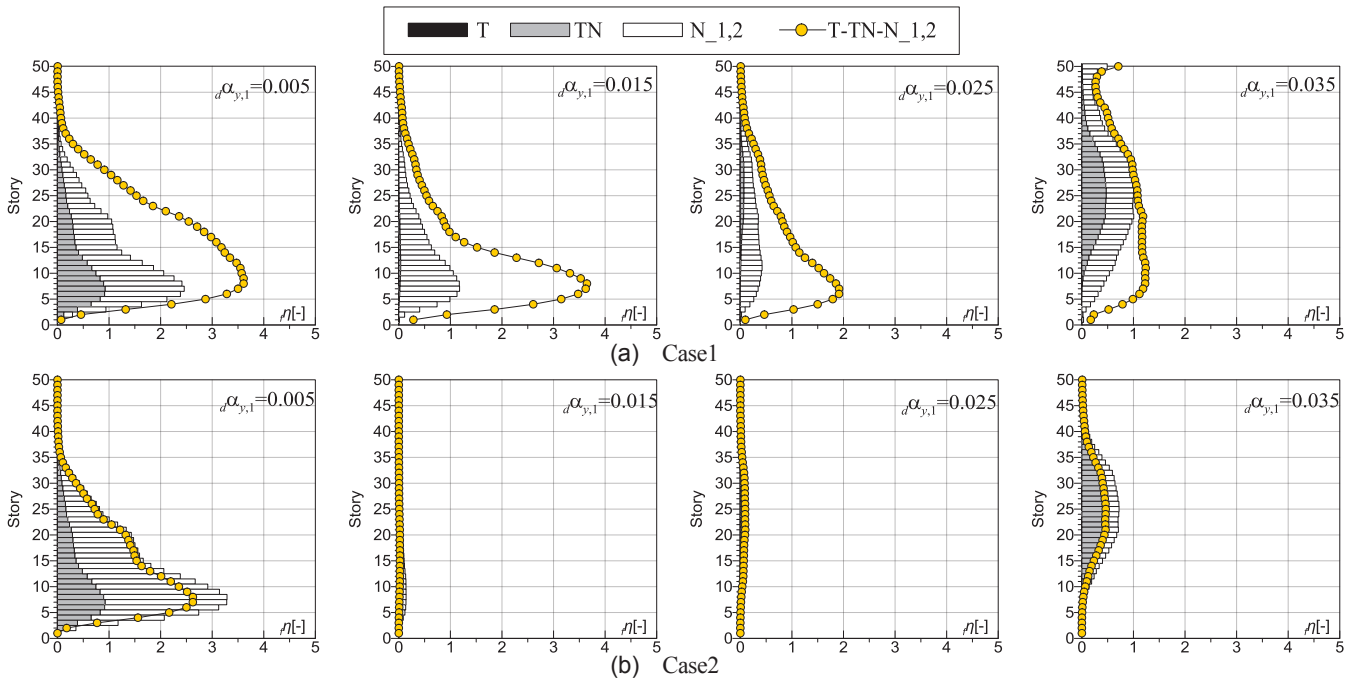


図 8 検討地点 OSOS2 における層の累積塑性変形倍率 η (式(8))

ここで、 dN_y :ダンパーの降伏軸耐力、 dU_y :ダンパーの降伏軸変形である。主架構における層の累積塑性変形倍率 η は、第 i 層における主架構の塑性歪エネルギー $\int W_{p,i}$ より

$$\eta = \frac{\int W_{p,i}}{\int Q_{y,i} \cdot \int \delta_{y,i}} \quad (8)$$

と算出する。ここで、 $\int Q_{y,i}$:第 i 層における主架構の降伏層せん断力、 $\int \delta_{y,i}$:第 i 層の降伏変形である。

図 7 にダンパーの累積塑性変形倍率 $d\eta_m$ の高さ方向の分布をダンパー量 $d\alpha_{y,1}$ ごとに示す。4.2 節で述べたように、 $d\alpha_{y,1}$ が 0.005, 0.015 と小さい場合、T-TN-N_1,2 と比較して単独地震の総和による $d\eta_m$ は大きく、その値は 400 を上回る。 $d\alpha_{y,1}$ が 0.035 と大きい場合は単独地震の総和とした $d\eta_m$ が小さくなり T-TN-N_1,2 と同程度となる。このことから、建物へ投入するダンパー量に応じて、連動地震より単独地震の総和と考えた値が大きくなる可能性がある。ダンパーの設計の際には、連動地震だけではなく、個々の単独地震による累積塑性歪エネルギーや疲労損傷といった評価にも留意する必要がある。

図 8 に主架構における層の累積塑性変形倍率 η の高さ方向の分布を $d\alpha_{y,1}$ ごとに示す。Case1 では、単独地震の総和と T-TN-N_1 と比較して、T-TN-N_1 の応答が大きい。これは図 3 (a) の pSv で T-TN-N_1 が大きいことから分かる。Case2 の $d\alpha_{y,1}$ が 0.005, 0.035 では単独地震の総和がやや大きい。連動地震の予測波の応答としては、Case1 のような個々の単独地震の応答を上回ることが殆どであることを確認しているが、連動することで Case2 のような応答となり得るため、そのばらつきには留意が必要である。

5. まとめ

履歴型ダンパーの設定条件をパラメータとした制振構造

の超高層建物モデルを用いて、累積値に着目した単独地震と三連動地震の対応関係を確認した。

- 1) 入力エネルギーは、ダンパー量に関わらず個々の単独地震の総和と考えることで三連動地震に対して概ね安全側に評価が可能である。
- 2) ダンパーの塑性歪エネルギーについて、ダンパー量が小さい場合、単独地震の総和は連動地震より大きい傾向がある。
- 3) 主架構の塑性歪エネルギーは、ダンパー量に関わらず単独地震の総和と連動地震では後者が大きい傾向がある。連動地震の応答のばらつきから、一部その関係が逆転する場合もある。

単独地震の総和とした入力エネルギーを分配することで、主架構やダンパーの累積値に対して、連動地震のばらつきを考慮した評価することが今後の課題である。

謝辞

本研究は大成建設(株)と東京理科大学北村研究室による地震動応答研究会の成果の一部をまとめたものです。

参考文献

- 1) 日本建築学会:長周期地震動と超高層建物の対応策—専門家として知っておきたいこと—, 2013.10
- 2) 木村暢志, 北村春幸, 佐藤利昭, 木村雄一, 青野英志, 山本優: 東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超高層建物の最大値と累積値の応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 712 号, pp.873-883, 2015.6
- 3) 白田雄作, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 山本優, 北村春幸, 木村雄一, 大和伸行, 木村暢志: 単独地震の建物応答に基づく東海・東南海・南海三連動地震による超高層建物の応答評価, 日本建築学会学術講演会(九州), 2016.9
- 4) 木村暢志, 北村春幸, 佐藤利昭, 木村雄一, 青野英志, 山本優: 東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による制振構造の最大値と累積値の応答評価法: その 1, 2, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2015.3
- 5) 中央防災会議: 東南海, 南海地震等に関する専門調査会 (第 16 回) 資料, 2003.12
- 6) 山本優, 吉村智昭: 3 次元大規模 FEM による東海・東南海・南海連動地震の長周期地震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 677 号, pp.1055-1064, 2012.7
- 7) 北村春幸, 野村綾, 川崎恵, 壇一男, 佐藤俊明: 長寿命鋼構造物が遭遇する複数の強震動を想定した累積損傷評価法の提案—名古屋三の丸地区で想定される強震動を対象として—, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, pp.1443-1452, 2009.8

*1 東京理科大学大学院 大学院生

*2 東京工業大学 准教授 博士(工学)

*3 東京理科大学 助教 博士(工学)

*4 東京理科大学 教授 博士(工学)

*5 大成建設 (株) 技術センター

*6 大成建設 (株) 設計本部