

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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累積値の評価 その1：エネルギー吸収量とその分担率に着目した考察
Title(English)	Seismic Response Evaluation for Cumulative Damage of High-Rise Building under Tokai-Tonankai-Nankai Multi-Segment Earthquake based on Response of Earthquakes Constituting Multi-Segmen Earthquake. Part1:A Study of Focus on Energy Absorption and Sharing Ratio
著者(和文)	木村暢志, 臼田雄作, 佐藤大樹, 山本優, 北村春幸, 松田頼征, 木村雄一, 大和伸行
Authors(English)	Masashi Kimura, Yusaku Usuda, Daiki Sato, Yu Yamamoto, Haruyuki Kitamura, Yoriyuki MATSUDA, Yuichi Kimura, Nobuyuki Yamato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 73-74
Citation(English)	, vol. B-2, , pp. 73-74
発行日 / Pub. date	2017, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

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累積値の評価

その1: エネルギー吸収量とその分担率に着目した考察

長周期地震動 耐震構造 超高層建物 制振構造 時刻歴応答解析 連動地震 同 同 同 同 正会員 ○ 木村暢志\*1 同 白田雄作\*2 同 佐藤大樹\*3 山本 優\*1 同 北村春幸\*2 同 松田頼征\*2 木村雄一\*1 同 大和伸行\*1

1. はじめに

東海・東南海・南海地震が連動する三連動地震の発生により、長周期地震動による超高層建物の被害が懸念されている。超高層建物の設計には、制振構造が採用され、エネルギー吸収量に着目した累積値の評価が重要視されている<sup>1,2)</sup>。

連動地震は、構成する個々の地震(以下、単独地震)の震源モデルが同一でも、破壊開始点や発生順序、破壊開始時刻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、ばらつきを有する<sup>3,4)</sup>。そのため予測された地震動に対してのみ耐震性能を確認するのではなく、予測地震動のばらつき幅を考慮した上で耐震安全性を確かめることが望まれる。筆者らは、こうした連動地震に対する応答評価法の提案を目的として検討を進めている。

本報その1では、超高層建物を用いた時刻歴応答解析結果より、単独地震と連動地震のエネルギー吸収量と分担率の対応関係を確かめる。その2では、その対応関係の分析を行い、単独地震に基づいた連動地震による累積値の評価を試みる。

2. 検討対象建物モデルの概要

建物モデルは鋼構造の超高層建物を想定した。地上50階、高さ約200mの純ラーメン架構<sup>3,4)</sup>の建物(耐震構造)とその架構へ履歴型ダンパーをコア周りに連層配置とした建物(制振構造)を部材レベルでモデル化した。図1(a)軸組図、(b)基準階伏図、表1に主要部材断面表を示す。建物総重量は806,000kN、弾性限界時のベースシア係数 $\alpha_{y,1}$ は0.048である。静的増分解析結果より各層の層せん断力と層間変形角の関係を図2に示す。時刻歴応答解析は、剛床仮定でX方向のみ1方向入力、 $P-\delta$ 効果は考慮していない。構造減衰は、架構の一次固有周期 $T_1$ に対し $h=2\%$ 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プレースを想定し、塑性化部、弾性部、剛域で構成される。塑性化部にはLY225材(降伏応力度225N/mm<sup>2</sup>)を用いる。部材長さ $L$ に対して塑性化部の長さ $L/4$ 、塑性化部断面積 $A_c$ に対して弾性部・剛域部断面積 $2A_c$ とする。第 $i$ 層のダンパーの降伏層せん断力 $dQ_{y,i}$ は、第1層の降伏層せん断力 $dQ_{y,1}$ をもとに設定した。第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 $\alpha_{y,1}$ (以下、ダンパー量)より次式より $dQ_{y,1}$ を算出する。

$$dQ_{y,1} = d\alpha_{y,1} \times \sum_{i=1}^N M_i g \quad (1)$$

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 $i$ 層における建物質量、 $g$ :重量加速度、 $N$ :全層数。

なお、 $dQ_{y,i}$ は、 $A_i$ 分布に基づく設計用層せん断力係数に基づき10層ごとの5段階分布として定めた。

検討対象建物モデルは、式(1)ダンパー量 $\alpha_{y,1}$ をパラメータとし、 $\alpha_{y,1}:0.000$ の耐震構造、 $\alpha_{y,1}:0.005\sim 0.035$ 間を0.010刻みとした制振構造のモデルを用いる。表2に $\alpha_{y,1}$ と1次固有周期 $T_1$ 、図3に主架構・ダンパーの降伏耐力と剛性を示す。

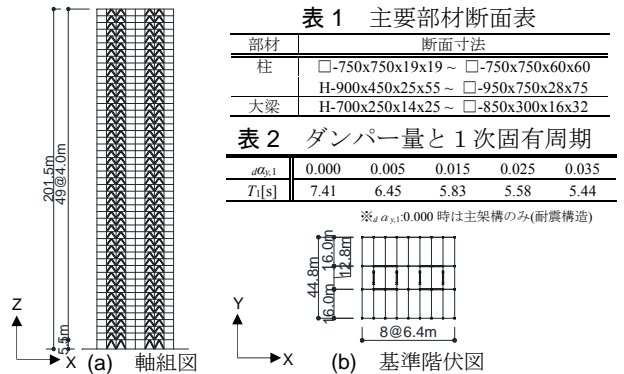


図1 各建物モデルの軸組図・基準階伏図

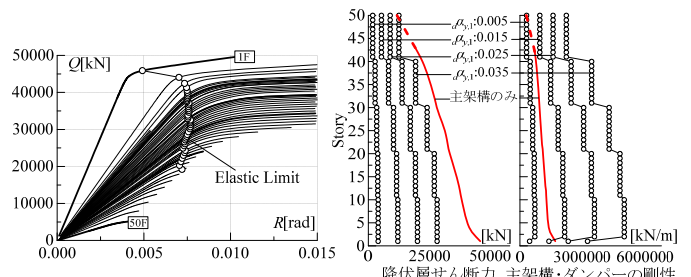


図2 荷重-変形関係 図3 主架構・ダンパー耐力・剛性

3. 検討用地震動の概要

本報では、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<sup>5)</sup>を用いる。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、表4に示す関東・濃尾・大阪平野からそれぞれ代表して3地点、計9地点の予測波を採用する。

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
連動地震	南海地震(Case-2)	N 2
	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	CBND	南知多町役場	AIMT	Kik-net 此花	OSKH
久喜市役所	SIKK	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

4. 単独地震と連動地震の累積値の対応

4.1 入力エネルギーとエネルギー分担率の対応

文献<sup>4)</sup>では、T-TN-N<sub>1,2</sub>の入力エネルギーについて、 $n$ 個の単独地震の総和として捉えることで、下式より地震終了時のエネルギーを評価できることを確認している。

$$\sum_{k=1}^n E^{(k)} = \sum_{k=1}^n ( \int W_h^{(k)} + \int W_p^{(k)} + d W_p^{(k)} ) \quad (2)$$

ここで、 $E$ :入力エネルギー  $fW_h$ :減衰による消費エネルギー、

KIMURA Masashi, USUDA Yusaku, SATO Daiki, YAMAMOTO Yu, KITAMURA Haruyuki, MATSUDA Yoriyuki, KIMURA Yuichi and YAMATO Nobuyuki

Seismic Response Evaluation for Cumulative Damage of High-Rise Building under Tokai-Tonankai-Nankai Multi-Segment Earthquake based on Response of Earthquakes Constituting Multi-Segmen Earthquake. Part1:A Study of Focus on Energy Absorption and Sharing Ratio.

$fW_p$ :主架構の塑性歪エネルギー,  $dW_p$ :ダンパーの塑性歪エネルギーである. また, 右上添え字の(k)は連動する単独地震の数を意味し,  $fW_p$ が大きいほど建物への影響が大きい単独地震と考え, その値が大きい順に  $k=1,2,3$  と定義する.

例として地点 OSOS2 における単独地震と T-TN-N\_1,2 による制振構造 ( $d\alpha_{y,i}=0.015$ ) のエネルギー吸収量を図 3 に示す. T-TN-N\_1,2 に対して個々の単独地震の  $E$  は小さいが, 式(2)による入力と同程度となる. その内訳は, 単独地震では  $fW_p$  は小さいが  $dW_p$  が大きく, その分式(3)においては  $dW_p$  が大きい. 一方, T-TN-N\_1 では塑性歪エネルギーのうち  $fW_p$  が占める割合が大きいことが確認できる. 連動地震は単独地震波の位相干渉の影響で応答レベルが増減する. その多くは増大し応答も大きくなる. そのため(a)Case-1 のように  $fW_p$  が大きくなる傾向があるが, 稀に(b)Case-2 のように, 応答レベルが減少しエネルギーの内訳が変わり  $fW_p$  が式(2)より小さくなる場合も起こり得る. このように連動地震はばらつきをもち, Case-2 にみられる連動地震の予測波は, 超高層建物の耐震安全性を検証するための地震動としては適切ではないと考えている.

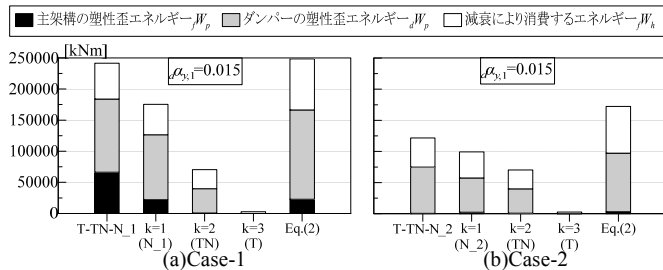


図 3 地点 OSOS2 における制振構造のエネルギー吸収量

表 4 に示した地点における T-TN-N\_1,2 と式(2)との対応として図 4 に入力エネルギー<sup>4)</sup>, 図 5 にエネルギー分担率の対応を示す. 入力エネルギーは,  $d\alpha_{y,i}$  に問わず両者の対応は良い. 図 5(a)ダンパーは  $d\alpha_{y,i}$  が 0.005~0.015 と小さい場合, 式(2)による割合と同程度である. ダンパーの降伏耐力が小さい場合, 図 3 からわかるように応答レベルの小さい単独地震においてダンパーが降伏しエネルギー吸収量が大きくなるためと考えられる. (c)主架構は T-TN-N\_1,2 による割合が大きい傾向にある. (d)内部減衰の割合は式(2)が明らかに大きい.

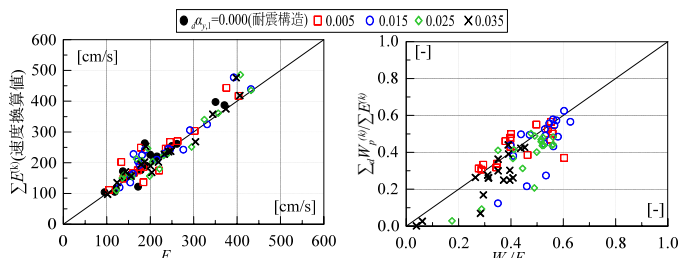


図 4 入力エネルギー  $E$  の対応<sup>4)</sup>

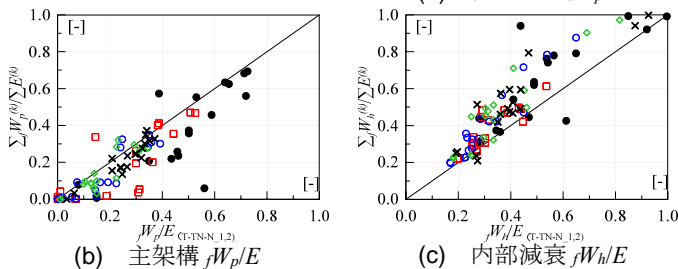


図 5 T-TN-N\_1,2 に対するエネルギー分担率の対応

## 4.2 エネルギーの対応

次に, 式(2)の考えに基づき算出したダンパーと主架構の累積塑性変形倍率について, T-TN-N\_1,2 との対応を確認する(図 6(a),(b)). ダンパーの累積塑性変形倍率  $d\eta_m$  は, 第  $i$  層のダンパー 1 本の塑性歪エネルギー  $dW_{p,i,m}$  を用いて式(3a)より算出する. 主架構における累積塑性変形倍率  $f\eta$  は, 第  $i$  層の主架構の塑性歪エネルギー  $fW_{p,i}$  を用いて式(3b)より算出する. ここに,  $dN_{y,i}$ :ダンパーの降伏軸力,  $du_{y,i}$ :ダンパーの降伏軸変形,  $fQ_{y,i}$ :第  $i$  層の主架構の降伏層せん断力,  $f\delta_{y,i}$ :第  $i$  層の降伏変形.

$$d\eta_m = \frac{dW_{p,m,i}}{dN_{y,i} \cdot du_{y,i}}, \quad f\eta = \frac{fW_{p,i}}{fQ_{y,i} \cdot f\delta_{y,i}} \quad (3a, b)$$

図 6(a)より, T-TN-N\_1,2 に対して  $\Sigma d\eta_m^{(k)}$  による評価が大きくなる傾向がある.  $d\alpha_{y,i}$  が 0.005~0.015 の結果に着目すると, 両者の差は顕著で  $d\eta_m$  は約 2 倍に至る場合もある. この要因として, 図 3 より確認したように連動地震よりも個々の単独地震の吸収エネルギーが大きいことが挙げられる. 図 6(b)主架構はダンパー量に関わらず, プロットが右斜に分布し T-TN-N\_1,2 が大きい傾向にある. 一部, 左斜めに分布するプロットもみられ, 連動地震の予測波による応答は個々の単独地震による応答を下回る場合もある. 特に, 耐震構造においてはダンパーによる制振効果がないため  $\eta$  の差異が顕著に現れ  $\eta(T-TN-N_1,2)=2.2$  に対して  $\Sigma \eta^{(k)}=7.1$  となる結果もみられる.

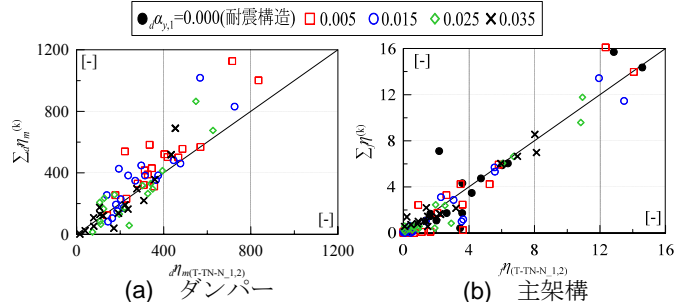


図 6 T-TN-N\_1,2 に対する累積塑性変形倍率の対応

## 5.まとめ

その 1 では鋼構造の超高層建物の時刻歴応答解析結果より, 単独地震と連動地震の累積値の対応関係を確認した. 以下に, 得られた知見を示す.

- (1) ダンパーの累積値は, 個々の単独地震による吸収エネルギーが大きく, エネルギーの和と捉えた値は連動地震のダンパーの累積値を上回る傾向であった.
- (2) 主架構の累積値は, 連動地震による塑性歪エネルギーが上回る傾向にある. 稀に連動した際のばらつきの影響で個々の単独地震のエネルギーを下回る場合がある.
- (3) 入力に対する主架構の塑性歪エネルギーの割合が評価できれば連動地震の累積値を評価できると考えられる.

### 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) 国土交通省:超高層建物における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動案について, 平成 28 年 12 月 17 日
- 3) 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
- 4) 白田雄作, 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: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, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2017.3
- 5) 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

\*1 大成建設  
\*2 東京理科大学  
\*3 東京工業大学

\*1 Taisei Corporation  
\*2 Tokyo University of Science  
\*3 Tokyo Institute of Technology