T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	発生時刻の差に着目した東海・東南海・南海三連動地震における応答性状の分析―応答スペクトルとエネルギースペクトルによる分析―
Title(English)	A Study of Response Focus on Difference between Occurrence Time subjected to Tokai-Tonankai-Nankai Multi-segment Earthquakes -A Study of Response spectra and Energy spectra
著者(和文)	臼田勇作, 北村春幸, 佐藤大樹, 山本優, 松田頼征, 木村雄一, 木村暢志
Authors(English)	Yusaku Usuda, Haruyuki Kitamura, Daiki Sato, Yu Yamamoto, Yoriyuki Matsuda, Yuichi Kimura, Masashi Kimura
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 57-58
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , , pp. 57-58
発行日 / Pub. date	2018, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

発生時刻の差に着目した東海・東南海・南海三連動地震における応答性状の分析
—応答スペクトルとエネルギースペクトルによる分析—

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

長周期地震動　連動地震　最大値
累積値

1.　はじめに

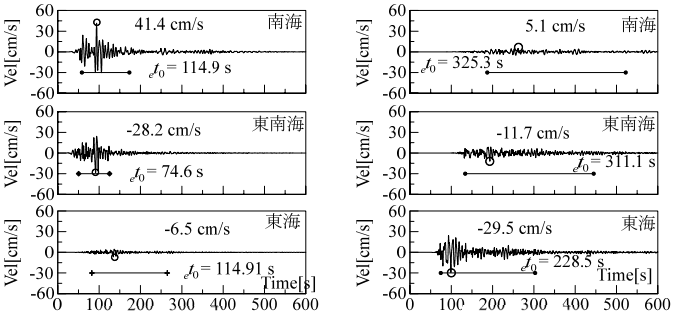
現在，超高層建物の設計時には，南海トラフ沿いの連動地震による長周期地震動の予測波を用いた検討が求められている [1]．連動地震の予測波が，単独地震の重ね合わせによるものと考える場合，それぞれの単独地震の破壊開始点や破壊開始時刻によって膨大なパターンの予測波が考えられるため，それらの応答も大きなばらつきを持つと予測される．

そこで，本報では，東海，東南海，南海地震(単独地震)の予測波を用いて，各地震の破壊開始時刻を変動させた三連動地震を多数作成し，応答スペクトルおよびエネルギースペクトルよりその応答性状を分析する．さらに，文献 2), 3)で提案された単独地震を用いた連動地震に対する応答スペクトルとエネルギースペクトルの対応関係式との比較を行う．

2.　三連動地震の作成

2. 1　作成方法

本検討では，地点 OSOS2(大阪市役所), TKTK(東京新宿)における東海地震，東南海地震，南海地震の予測波を用いる．図 1 に速度波形，最大振幅，実効継続時間 $_{e}t_0$ を示す．同図の時刻 0s は, 各地震の震源の破壊開始時刻である. なお, $_{e}t_0$ は，加速度累積自乗和が 5～95%となる時間とした．



(a) OSOS2　(b) TKTK

図 1　単独地震の速度波形

ここでは，連動時における各単独地震の破壊開始時刻に不確定性があると考え，単独地震の諸元は全て同一として，各地震の破壊開始時刻差のみランダムに定め，三連動地震を 100 波作成した．具体的な作成手順は，以下の通りである．

1. 各単独地震の加速度の累積自乗和が 5%，95%となる時刻 $_{e}t_{0(start)}$, $_{e}t_{0(end)}$ および実効継続時間 $_{e}t_0$ を計算する．
2. 図 2 に示すように, 一つの単独地震の $_{e}t_0$ の範囲に対して，他の単独地震の $_{e}t_0$ の範囲が重なる時間差を求める．ここでは，南海地震の破壊開始時刻(0s)に対する他の単独地震の破壊時刻の差 t_{Lag}^*を考える．t_{Lag}^*について，図 2(a), (b)より下式が得られ，この範囲で一様に乱数を発生させ定める．

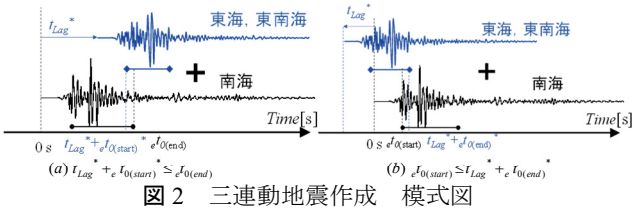


図 2　三連動地震作成　模式図

$$ {}_{e}t_{0(start)} - {}_{e}t_{0(end)}^* \le t_{Lag}^* \le {}_{e}t_{0(end)} - {}_{e}t_{0(start)}^* \qquad (1) $$

3. 定めた時刻をもとに，各単独地震の波形を足し合わせる．

2. 2　作成した三連動地震

作成例として，地点 OSOS2 について，単独地震および三連動地震を図 3 に示す．なお，横軸の時刻 0 s は，最初の単独地震の破壊開始時刻としている. 同図(左)は, 各単独地震の $_{e}t_0$ が連続する形で連動したケースで，本作成条件下で，位相の相互の干渉による影響が最小となる場合である．三連動地震の最大振幅は 43.2cm/s とその増分は小さい．同図(右)は，反対に，各単独地震の $_{e}t_0$ で位相が相互に干渉した場合で，最大振幅が-53.6cm/s と増大することが確認できる．

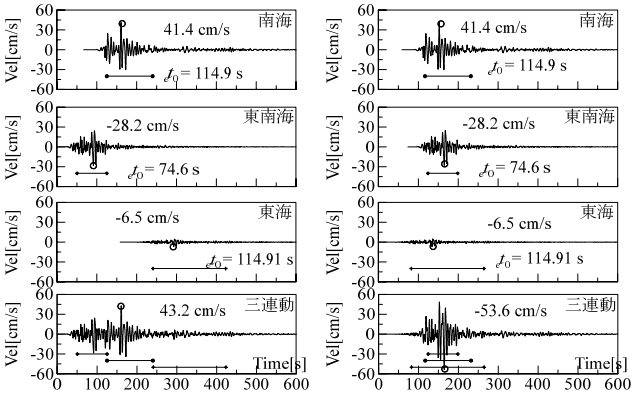


図 3　単独地震と三連動地震の速度波形 (地点 OSOS2)

3.　三連動地震による応答スペクトル

3. 1　単独地震による応答スペクトルとの比較

図 4 に単独地震と作成した 100 波の三連動地震，100 波の平均および平均± σ の擬似速度応答スペクトル $_{p}S_v$ を示す．なお，同図と図 3(後述)の白色の範囲は，長周期地震動が卓越する「特定の周期帯」域を示している [2]．両地点ともに，「特定の周期帯」で，三連動地震の応答レベルにばらつきが確認できる．東海地震のみ応答レベルが大きい TKTK と比べて，南海地震と東南海地震 2 つの地震の応答レベルが大きい OSOS2 では，ばらつきが大きい傾向である．OSOS2 での $_{p}S_v$ のピーク値は，単独で最大応答速度約 150 cm/s に対して，三連動地震で最大で約 250 cm/s であった．反対に，応答が小さくなる場合も確認でき，同地点で，三連動地震による $_{p}S_v$ は約 90cm/s にまで低減した．100 波の平均 $_{p}S_v$ は，単独地震の応答レベルと概ね同等であった．表 1 に，「特定の周期帯」における $_{p}S_v$ の平均値を示す．OSOS2 では，最大となる単独地震（南海）の平均値に対し, 100 波平均で 1.08 倍, 平均- σ で 0.90 倍，平均+ σ で 1.28 倍であった．各単独地震の破壊開始の時間差で，三連動地震の応答レベルは大きくばらつく．

3. 2　単独地震を用いた対応関係式との比較

三連動地震の応答スペクトル $_{p}S_v$ に対して，文献 2) では対応関係式を示している. 各単独地震の最大値を包絡する $_{min,p}S_v$ 式((2))，連動時に各単独地震による最大値が完全に一致する最大のケースである各単独地震の $_{p}S_v$ の和 $_{max,p}S_v$(式(4))を考え，

A Study of Response Focus on Difference between Occurrence Time subjected to Tokai-Tonankai-Nankai Multi-segment Earthquakes
-A Study of Response spectra and Energy spectra-

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

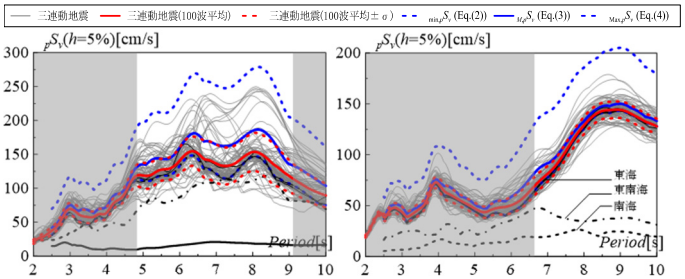
両者の中間的な値を示した各単独地震の ${}_pS_v$ を SRSS した ${}_{M,p}S_v$(式(3))を連動地震による ${}_pS_v$ として提案している．

$$ {}_{\min,p}S_v = Max({}_pS_v^{(k)} : k = 1,2,\cdots,n) \quad (2) $$

$$ {}_{M,p}S_v = \sqrt{\sum_{k=1}^{n}({}_pS_v^{(k)})^2} \quad (3) $$

$$ {}_{\max,p}S_v = \sum_{k=1}^{n}{}_pS_v^{(k)} \quad (4) $$

これら対応関係式と三連動地震による応答スペクトルを比較する．同図より，${}_{max,p}S_v$（式(3)）は，両地点ともに，三連動地震による ${}_pS_v$ の上限値を示していることが分かる．${}_{min,p}S_v$（式(2)）は，図 3(左)に示した三連動地震の ${}_pS_v$ と概ね一致し，${}_{et0}$ の範囲で位相が干渉することで三連動地震の ${}_pS_v$ が変動することが本検討で分かった．${}_{M,p}S_v$(式(3))は，三連動地震による ${}_pS_v$ の平均+σ と概ね同等であった．これら対応式は，ばらつきをもつ三連動地震の応答に対して，その予測波を作成することなくその応答を把握できる点で有用と考えられる．



(a) OSOS2　(b) TKTK

図 4　擬似速度応答スペクトル

表 1　「特定の周期帯」における平均擬似速度応答スペクトル

地点	単独地震			三連動(100 波)			対応関係式		
	東海	東南海	南海	平均	-σ	+σ	${}_{Min,p}S_v$ (式(2))	${}_{M,p}S_v$ (式(3))	${}_{Max,p}S_v$ (式(4))
OSOS2	17	101	124	137	113	161	126	162	242
TKTK	120	38	23	203	194	211	120	128	180

4. 三連動地震によるエネルギースペクトル

4. 1　単独地震によるエネルギースペクトルとの比較

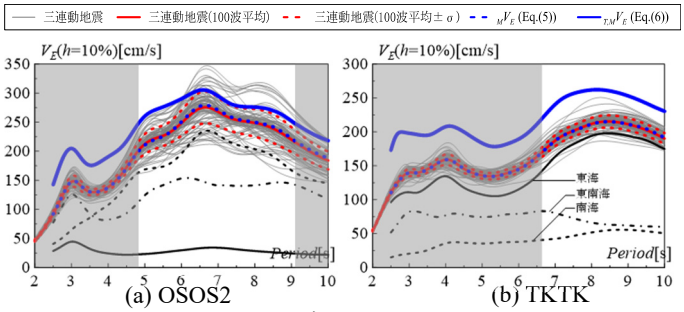
図 5 に単独地震と 100 波の三連動地震，100 波の平均および平均±σ のエネルギースペクトル V_E を示す．累積値であるエネルギースペクトルでもばらつきが確認できる．特に，2 つの単独地震の影響が大きい地点 OSOS2 ではその傾向が顕著で，単独地震による V_E と比較して，三連動地震による V_E は，増大の傾向で，一部小さくなる場合もみられた．OSOS2 での V_E のピーク値は，三連動地震で 200 ~ 350 cm/s の範囲で変動し，100 波平均で 250cm/s であった．表 2 に，「特定の周期帯」におけるエネルギースペクトルの平均値を示す．最大となる単独地震の平均値に対し，100 波平均で 1.23 倍，平均-σ で 1.17 倍，平均+σ で 1.34 倍であった．

4. 2　単独地震を用いた対応関係式との比較

次に，応答スペクトル同様に，文献 2) で提案されたエネルギースペクトル V_E における対応関係式と比較する．三連動地震の平均的な V_E として，個々の単独地震の入力エネルギーの和とした速度換算値 ${}_MV_E$(式(5))を提案している．さらに，個々の波形の重なり順序によって累積応答値が増大する可能性を想定した上で，水平 2 方向の入力エネルギーの総和とした速度換算値 ${}_{T,M}V_E$ (式(6))として安全側の評価式を提案している．

$$ {}_MV_E = \sqrt{2\sum_{k=1}^{n}E^{(k)}/M}, \quad {}_{T,M}V_E = \sqrt{2\sum_{k=1}^{n}({}_{EW}E^{(k)} + {}_{NS}E^{(k)})/M} \quad (5),(6) $$

これら対応関係式と三連動地震による V_E を比較する．図 5 より，${}_MV_E$(式(5))は，両地点ともに．三連動地震 100 波の平均 V_E と良く対応していることが分かる．また，${}_MV_E$ は，図 3(左)に示した三連動地震の V_E と一致し，${}_pS_v$ と同様，${}_{et0}$ の範囲で位相が干渉することで三連動地震の V_E が変動することが分かった．${}_{T,M}V_E$(式(6))は，OSOS2 では，三連動地震による V_E のばらつきが大きく，100 波の平均+σ と概ね一致した．TKTK において，三連動地震の V_E のばらつきが小さいため，${}_{T,M}V_E$ は安全側の評価となった．これらエネルギースペクトルの対応式は，応答スペクトル同様，三連動地震の予測波を作成することなくその応答を把握できる点で有用と考えられる．



(a) OSOS2　(b) TKTK

図 5　エネルギースペクトル

表 2　「特定の周期帯」における平均エネルギースペクトル

地点	単独地震			三連動(100 波)			対応関係式	
	東海	東南海	南海	平均	-σ	+σ	${}_MV_E$ (式(4))	${}_{T,M}V_E$ (式(5))
OSOS2	29	143	199	245	223	267	247	280
TKTK	184	68	51	203	194	211	203	250

5.　まとめ

本報では，東海，東南海，南海地震の予測波を用いて，各地震の破壊開始時刻を変動させた三連動地震を多数作成し，その応答性状の分析を行った．以下に，得られた知見を示す．

1) 各単独地震の破壊開始時刻差によって，三連動地震による応答スペクトル，エネルギースペクトルともに大きくばらつく傾向であった．特に，南海，東南海地震の 2 つ地震の影響が大きい大阪の地点では，その傾向が顕著にみられた．
2) 筆者らが提案した連動地震に対する応答スペクトル ${}_pS_v$ の対応関係式について，各単独地震の最大値を包絡する ${}_pS_v$ は 100 波平均と概ね同程度，各単独地震の ${}_pS_v$ を SRSS した ${}_pS_v$ は，100 波平均+σ と良く対応した．
3) エネルギースペクトル V_E の対応関係式について，各単独地震による入力エネルギーの総和とした V_E は，三連動地震 100 波平均と良い対応関係であった．

破壊開始時刻のみを対象とした検討であるが，連動地震の応答のばらつきを考慮した余裕ある設計を行うことが望ましい．

謝辞

本研究は，大成建設株式会社，東京工業大学佐藤研究室，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です．

参考文献

1) 国土交通省: 超高層建物等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への対策案について, 2016.6
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, pp873-883, 2015.6
3) 臼田雄作, 佐藤大樹, 北村春幸, 松田頼征, 木村雄一, 山本優, 木村暢志, : 単独地震の応答に基づく連動地震に対する超高層制振建物の応答推定手法―南海トラフ沿いにおける東海・東南海・南海三連動地震を対象として―, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 747 号, pp.687-697,　2018.5

*1　竹中工務店 (元東京理科大学)
*2　東京理科大学
*3　東京工業大学
*4　大成建設

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