位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究

その7 連動型地震に関する波動の重ね合わせ技法

A STUDY ON A GENERATION OF SIMULATED EARTHQUAKE GROUND MOTION
CONSIDERING PHASE DIFFERENCE CHARACTERISTICS

Part 7 Superposition technique for seismic waves from consecutive earthquakes

山根尚志*, 長橋純男**

Takashi YAMANE and Sumio NAGAHASHI

The purpose of this paper is to present a superposition technique for seismic waves from consecutive earthquakes. Seismic waves from each earthquake are synthesized by the waveform generation methods proposed in previous papers. The consecutive seismic waveforms are superposed so as to match the positions on the time history axis with respect to a wave arriving from the border between fault planes, considering the relationship between the distribution of phase differences and the time history of the accelerogram. By analyzing the dynamic behavior of high-rise buildings using the proposed superposition technique, it is indicated that a proper evaluation of ground motions is important in the case of consecutive earthquakes.

Keywords : Waveform generation method, Simulated earthquake ground motion, Superposition technique, Consecutive earthquakes, Fourier phase, Phase difference

波形合成法, 模擬地震動, 重ね合わせ技法, 連動型地震, フーリエ位相, 位相差分

1. 序

2000年の建築基準法改正を契機に、建築物の構造設計は性能設計の時代に入った。性能設計の基本精神は、(1)建築物の性能を個別に評価すること、(2)その結果を一般社会に明解に説明できると要約される。耐震安全性や地震時の居住性等の性能評価においてこれらの基本精神を実現するためには、計画地周辺の地震環境や地盤条件を考慮でき、且つ、地震動特性が建築物の応答に与える影響を明解に説明できる設計用入力地震動が必要となる。

地震動時刻歴の評価手法としては、経験的グリーン関数法^{例えは 1)}、統計的グリーン関数法^{例えは 2)}、及び、これらの手法(短周期側)と理論的手法(長周期側)を組み合わせたハイブリッド法^{例えは 3)}などが提案されている。これらの手法は基本的に、地震という複雑な自然現象を精度良く説明することを目的として地震学の分野で開発されたものであり、事象の複雑さに対応した数のパラメータを用いて震源破壊過程や地盤構造に関する条件を詳細に設定できるという特長を有している。このような手法を用いて設計用模擬地震動作成することにより、建築物の動的挙動も、震源や地盤モデルの詳細な条件を反映した外乱に対する応答として評価できることになる。

上記のようなアプローチに対し、筆者らは、設計実務における利用を前提として、地震動特性を大局的に捉え、フーリエ振幅とフー

リエ位相に関する基本的な性質を規定する模擬地震動作成手法の提案を目指した。すなわち、地震動が有する様々な特性とそれらに係する要因を大きく捉えることにより、手法の骨格とパラメータ構成を、建築物の動的応答の傾向を把握するために十分な程度に簡明なものとし、少ないパラメータで安定した結果が得られるような模擬地震動作成手法の構築を目指した。

そのために、筆者らは、まず、地震動の位相情報が有している物理的意味について考察した^{4)~6)}。この検討は、位相特性の定量的評価法を確立し、模擬地震動作成手法に取り込むことを目的として、フーリエ位相に反映される震源・伝播・地盤特性について分析したものである。そして、得られた知見を基に、与条件に適するフーリエ位相を観測記録から選択し、フーリエ振幅に関する既往の研究成果と組み合わせて模擬地震動作成する手法を提案した^{7)~10)}。

提案手法^{7)~10)}は、振幅特性及び位相特性という2個の要因と震源・伝播・地盤特性という3個の要因で構成されるマトリクスの計6個の構成要素をそれぞれ独立して規定するものである。その特徴は、まず、模擬地震動作成に必要なパラメータが、震源距離、地震モーメント、位相差分(後述)の標準偏差、及び一次元的地盤モデルのみと少なく、数多くの設計案件に適用できる実用性を有していることにある。これらのパラメータは設定が容易で、且つ手法の骨格

本論文3節の内容の一部は文献19)で公表済みである。

* (株)日建設計構造設計室 主査・博士(工学)

** 千葉工業大学工学部建築都市環境学科 教授・工博

Senior Structural Engineer, Structural Engineering Dept., Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

も簡明であるため、パラメータの変動がスペクトルレベルや周波数特性、波形の経時特性に与える影響を連続的、安定的に評価できることも特徴の一つと言える。更に、水平動、鉛直動、Love 波に関する手法が統一した概念で展開されているため^{7)~9)}、様々な条件下の入力地震動を体系的に提供し、建築物の応答特性を相対的に評価することが可能である。

提案手法は以上のような特徴を有するが、設計用模擬地震動作成手法の体系としては、複数の断層が動く連動型地震を想定した地震動評価法も必要である。例えば、近い将来、発生が予想される南海地震、東南海地震が連動した場合の地震動を、単独発生地震動との関係も含めて適切に評価することは、設計実務においても重要な課題と言える。そこで、本論文では、先に提案した手法により単独の断層破壊を想定して作成した模擬地震動を、隣り合う断層が連動して動いた場合の時刻歴として重ね合わせる技法を提示する。

この技法では、隣り合う断層から発した地震動を、断層が接する地点から到達した波動の時間軸上の位置が一致するように重ね合わせるが、その際、位相差分布(後述)の横軸が加速度時刻歴の時間軸に対応するという性質⁴⁾を利用する。すなわち、観測記録のフーリエ位相を利用する模擬地震動作成手法では合成波の原点に物理的意味がないため⁶⁾、断層の両端から発振した波動の到達時間の平均と合成波の位相差分の平均を対応付けることにより、断層端部から到達する波動の時間軸上の位置を決定する。

提案した技法の有用性を確認するために、想定南海地震と想定東南海地震が連動した場合の模擬地震動を作成し、それらの入力地震動の有する特性が高層建築物の応答に与える影響について考察する。なお、この技法は S 波と Love 波に共通して適用できるものであり、本論文でも両者に関する検討結果を提示する。

2. S 波に関する模擬地震動作成手法の概要

既報⁷⁾において提案した S 波の水平成分に関する模擬地震動作成手法は、以下の各項目を規定してフーリエ逆変換によって地震基盤における加速度時刻歴を作成した後、一次元重複反射理論を適用して地表波を合成するものである。

2.1 フーリエ振幅に関する特性

フーリエ振幅に関する震源特性

震源特性としては式(1)で与えられる ω^2 モデル¹¹⁾を採用する。

$$\begin{aligned}\Omega_A(f) &= M_0(2\pi f)^2 & (f \leq f_c) \\ \Omega_A(f) &= M_0(2\pi f_c)^2 & (f > f_c)\end{aligned}\quad (1)$$

但し、 $\Omega_A(f)$ は加速度震源スペクトル、 f は周波数、 M_0 と f_c は地震モーメント及びコーナー周波数を示す。 $f_c = 1/(\pi\tau)$ は、Sato¹²⁾が提案した地震モーメント M_0 と立ち上がり時間 τ の関係を定式化した式(2)を用いて評価する(M_0 の単位は Nm)。

$$\tau = 4.3 \times 10^{-7} M_0^{1/3} \quad (2)$$

フーリエ振幅に関する伝播特性

Kanamori and Anderson¹³⁾に倣って式(3)を適用する。

$$\left| \ddot{U}(r_0, f) \right| = \frac{R_{\theta\phi}}{4\pi\rho V_s^3} \frac{1}{r_0} \Omega_A(f) \quad (3)$$

ここに、 $\left| \ddot{U}(r_0, f) \right|$ は計画地直下の地震基盤における加速度フーリエ振幅、 r_0 は震源距離、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン係数、 ρ と V_s は地殻の密度及び S 波速度を表す。なお、本研究では $R_{\theta\phi} = 0.63$ ¹⁴⁾を採用し、高域遮断周波数¹⁵⁾は $f_{\max} = 10$ Hz を基本とする⁷⁾。

フーリエ振幅に関する地盤特性

地震基盤から地表への地盤増幅については一次元重複反射理論を適用する。但し、深部地盤構造の減衰定数は、S 波速度 700 m/s 未満の場合に $h = 2.0\%$ 、同 700 m/s 以上の場合に $h = 0.5\%$ とする。この設定の妥当性は合成波と観測波の比較により確認されている^{7), 8)}。

2.2 フーリエ位相に関する特性

位相特性の定量的評価のため、隣り合うフーリエ位相の差である位相差分 $\Delta\phi_k$ (k は次数)を区間 $[0, -2\pi]$ で定義し、パワースペクトルの低次からの累積が 99 % となる範囲までの周波数成分に関する傾度分布を表した位相差分分布¹⁶⁾を利用する。一連の研究では、位相差分の分散の程度を表す指標としてその標準偏差 σ を採用し、これを π で規準化した σ/π を評価指標とする^{7)~10)}。図 1 に示す 1968 年十勝沖地震 ($M_J = 7.9$ 、 $h = 0$ km) における八戸港湾の記録では $\sigma/\pi = 0.18$ 、1995 年兵庫県南部地震 ($M_J = 7.3$ 、 $h = 16$ km) における神戸海洋気象台の記録は $\sigma/\pi = 0.05$ であり、 σ/π によって位相差分の分散の程度を議論できることが分かる。なお、パワースペクトルの低次からの累積が 99 % となる周波数は前者で約 8.1 Hz、後者で約 6.7 Hz であり、Nyquist 振動数 50 Hz (後述) までの全周波数に対し約 16% 及び約 13 % の成分を用いて位相差分分布を算定した。但し、模擬地震動の作成においては観測波の全周波数成分を採用する。

図 1 加速度波形と位相差分分布の例

フーリエ位相に関する震源・伝播特性

2003 年十勝沖地震 ($M_J = 8.0$ 、 $h = 42$ km) の観測記録を回帰分析して得られた σ/π と震源距離 r_0 (単位は km) の関係は式(4)及び式(5)で与えられる⁷⁾。これらの評価式を、断層長さ 100 km 級のプレート境界地震に関するフーリエ位相の選択基準とする。

＜断層長さ 100 km 級のプレート境界地震＞

$$\text{破壊進行方向： } \sigma/\pi = 0.05 + 0.0003 r_0 \quad (4)$$

$$\text{破壊進行直交方向： } \sigma/\pi = 0.08 + 0.0003 r_0 \quad (5)$$

フーリエ位相に関する地盤特性

地盤増幅による位相差分分布の変化が小さいという性質⁶⁾を利用し、地表で観測された地震動の位相特性を基盤波に適用する。また、一次元重複反射理論による増幅特性の評価においても、この性質が反映されている⁶⁾。

2.3 波形処理に関する方針

波形処理にあたっては、データの長さが σ/π の評価に影響するため、時刻歴全長を $T_d = 327.68 \text{ sec}$ に統一する。この全長は継続時間の長い波動を評価するために決定したが、観測記録のデータ長さが 327.68 sec に満たない場合には後続のゼロを付加して調整する。また、時間刻みは $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ (Nyquist 振動数 50 Hz) に統一し、これと異なる記録は刻み直す。なお、 σ/π の算定においては、フーリエ変換におけるリンク効果と同様の影響が位相差分布にも現れるため、 $-1.5\pi \geq \Delta\phi_k > -2.0\pi$ の範囲のデータは無視して標準偏差を計算する。

3. プレート境界地震に関するフーリエ位相の選択基準

断層長さ 100 km 級のプレート境界地震に関するフーリエ位相の選択基準は、式(4)と式(5)を基にして図2のように表現される⁷⁾。但し、断層面に対して斜め方向に位置する地点の σ/π は地点 A と地点 C の値を補間して設定し、また、深さ方向の次元は無視した。

図2 断層長さ 100 km 級のプレート境界地震に関する断層面と位相差分の標準偏差の関係
破壊進行方向は破壊開始点(星印)から右方向。

本節では、図2の関係を基に、断層長さ 200 km 級及び 300 km 級のプレート境界地震に関するフーリエ位相の選択基準を提示する。そのためにまず、図2の地点 A ($r_0 = 100 \text{ km}$) の $\sigma/\pi = 0.08$ について、断層の両端から発振する波動の到達時間差を用いて考察する⁷⁾。

一般的に、破壊開始点から発振した波動と、反対側の断層端部から発振した波動が破壊進行方向の観測点に向かう場合の到達時間差 ΔT は式(6)で表される。ここに、 L は断層長さ、 r_0 は震源距離、 V_R は破壊伝播速度を示す。

$$\Delta T = \frac{L}{V_R} + \frac{r_0 - L}{V_S} - \frac{r_0}{V_S} = \left(1 - \frac{V_R}{V_S}\right) \frac{L}{V_R} \quad (6)$$

式(6)に $L = 100 \text{ km}$ 、 $V_S = 3.8 \text{ km/s}$ ¹⁷⁾、及び $V_R = 0.72 V_S$ なる関係式¹⁸⁾、を適用すると $\Delta T = 10 \text{ sec}$ が得られる。また、図3には、 $\sigma/\pi = 0.08$ である観測記録(K-NET)の一例を示すが、この加速度時刻歴の主要動継続時間は 15 sec 程度であることが確認できる。ここで、波動が伝播とともに分散する性質を考慮すると、式(6)で得られた $\Delta T = 10 \text{ sec}$ はこの継続時間に対応しているものと判断できる。つまり、地点 A での評価値 $\sigma/\pi = 0.08$ は、主要動継続時間が 15 sec 程度の時刻歴波形に対応していると考えられる。

図3 2003年十勝沖地震における北海道浜中(HKD075)EW成分 ($\sigma/\pi = 0.08$) の加速度波形と位相差分布

以上の概念を基に、 $L = 200 \text{ km}$ のプレート境界地震について検討する¹⁹⁾。この場合、式(6)より、破壊開始点と反対側の断層端部では $\Delta T = 20 \text{ sec}$ と評価される。そこで、前述した $L = 100 \text{ km}$ の例と同様、波動の分散性を考慮して主要動継続時間を 30 sec 程度と仮定し、これに対応する観測記録(一例を図4に示す。)を分析して、図5の地点 D ($r_0 = 200 \text{ km}$) において $\sigma/\pi = 0.10$ と設定した。

この評価値は、図2の地点 B と図5の地点 D を比較することにより以下のように解釈できる。すなわち、図2の地点 B ($r_0 = 200 \text{ km}$ 、 $\sigma/\pi = 0.11$) では、断層の破壊速度と波動の伝播速度が近いことによるディレクティビティ効果は $r_0 = 0 \sim 100 \text{ km}$ の区間で発生し、 $r_0 = 100 \sim 200 \text{ km}$ の区間では震源距離に応じて位相差分が分散する効果が σ/π に反映される。一方、図5では $r_0 = 0 \sim 200 \text{ km}$ の全区間においてディレクティビティ効果が生じるため、地点 D ($r_0 = 200 \text{ km}$) では同じ震源距離にある図2の地点 B に比べて波動の集中度が高くなり、 σ/π が小さく評価される。このように地点 D の評価値 $\sigma/\pi = 0.10$ は、地点 B の値($\sigma/\pi = 0.11$)を基準にして解釈することもできる。

また、断層長さ 100 km 級のプレート境界地震では、式(4)と式(5)を基に断層直上で一律 $\sigma/\pi = 0.08$ と評価したことを踏まえ(図2)、 200 km 級のプレート境界地震に関しても断層直上では同一の σ/π を仮定した。つまり、図5に示すように破壊進行直交方向の評価式の基点を、破壊進行方向の地点 D における $\sigma/\pi = 0.10$ と同一とした。この関係を式(4)及び式(5)と同様に表現すると、式(7)と式(8)が得られる。

＜断層長さ 200 km 級のプレート境界地震＞

$$\text{破壊進行方向: } \sigma/\pi = 0.04 + 0.0003 r_0 \quad (7)$$

$$\text{破壊進行直交方向: } \sigma/\pi = 0.10 + 0.0003 r_0 \quad (8)$$

図4 2003年十勝沖地震における北海道弟子屈(HKD080)NS成分 ($\sigma/\pi = 0.10$) の加速度波形と位相差分布

図5 断層長さ 200 km 級のプレート境界地震に関する断層面と位相差分の標準偏差の関係
破壊進行方向は破壊開始点(星印)から右方向。

図6には、断層長さ 300 km 級のプレート境界地震に関するフーリエ位相の選択基準を示す¹⁹⁾。前述の例と同様にディレクティビティ効果と波動伝播による分散を考慮し、図5の地点 E ($r_0 = 300 \text{ km}$ 、 $\sigma/\pi = 0.13$) を基

準として、図6の地点F($r_0 = 300$ km)における評価値を $\sigma/\pi = 0.12$ と設定した。この設定と、断層直上における σ/π を同一とする仮定により式(9)及び式(10)の関係式が得られる。

＜断層長さ300 km級のプレート境界地震＞

$$\text{破壊進行方向： } \sigma/\pi = 0.03 + 0.0003 r_0 \quad (9)$$

$$\text{破壊進行直交方向： } \sigma/\pi = 0.12 + 0.0003 r_0 \quad (10)$$

図7には位相差分特性として $\sigma/\pi = 0.12$ を有する観測記録の一例を示すが、主要動継続時間は50sec程度であり、式(6)で得られる $\Delta T = 31$ secとの対応関係が確認できる。

図6 断層長さ300 km級のプレート境界地震に関する断層面と位相差分の標準偏差の関係
破壊進行方向は破壊開始点(星印)から右方向。

図7 2003年十勝沖地震における北海道中札内(HKD096)NS成分($\sigma/\pi = 0.12$)の加速度波形と位相差分分布

図2、図5及び図6を比較すると、断層長さ $L = 100$ km、 200 km、 300 kmに対応して断層直上の評価値が $\sigma/\pi = 0.08$ 、 0.10 、 0.12 と変化している。この数値の差は、断層が大きいほど破壊の継続時間が長くなり波動(位相差分)が分散することを意味しており、この効果を考慮して設計用模擬地震動を作成することを提案するものである。但し、図5と図6は図2を基にして演繹的に導かれたものであり、その妥当性は、将来、断層長さ200 km級及び300 km級のプレート境界地震が発生し、観測記録が蓄積されるのを待って再確認する必要がある。

4. 地震動の重ね合わせ技法

本節において、隣り合う断層で発生した地震動を、断層端部から到達する波動を基準として重ね合わせる技法を展開する。重ね合わせの基本方針は、断層が接する地点から到達する波動の時間軸上の位置を一致させるという簡明なものであるが、それぞれの地震動の時間軸上でこの波動を位置付けるために、断層の両端から発振する波動の到達時間差を利用する。なお、実際の現象としては、小領域から発振した集中度の高い地震動も波動伝播とともに分散するが、

ここでも既報⁷⁾及び3節の展開と同様、波動の時間軸上の中心が到達する時間を基準として考察する。

4.1 断層の両端から発振する波動の到達時間差

計画地が断層面に対して任意の位置にある場合、断層の両端から発振した波動の到達時間差は式(11)で与えられる(図8参照)。ここに、各記号は式(6)のものと同一であり、破壊開始点(図8の星印)と計画地(白丸)を結ぶ直線が破壊進行方向(破壊開始点から右方向)となす角度を θ と表す。

$$\Delta T = \frac{L}{V_R} + \frac{\sqrt{(r_0 \cos \theta - L)^2 + r_0^2 \sin^2 \theta}}{V_S} - \frac{r_0}{V_S} \quad (11)$$

$$= \left(1 + \frac{\sqrt{r_0^2 - 2r_0 L \cos \theta + L^2} - r_0}{L} \cdot \frac{V_R}{V_S} \right) \frac{L}{V_R}$$

図8 断層面の破壊伝播と計画地への波動伝播に関する概念図
星印は破壊開始点、白丸は計画地、矢印の向きは破壊進行方向及び波動伝播方向を示す。各記号は式(11)に対応。

4.2 地震動の重ね合わせに関する基本方針

図9に示すように破壊開始点を断層1のA端とし、B端まで破壊が伝播した後、連続して断層2のC端に到達する場合、断層1と断層2で発生した地震動を、地点Bから発振した波動の各時間軸における位置が一致するように重ね合わせる。この概念は、式(11)で与えられるそれぞれの ΔT との関係も含めて図10のように表現される。以下、このタイプの地震を連動型地震タイプ1と称す。

図9 連動型地震タイプ1の震源破壊及び波動伝播に関する概念図
星印(地点A)は破壊開始点、白丸は計画地、矢印の向きは破壊進行方向及び波動伝播方向を示す。

図10 連動型地震タイプ1の時刻歴の重ね合わせに関する概念図
横軸は時間、縦軸は加速度を意味する。A、B、Cは図9の対応する地点から到達する波動の時間軸上の位置を示す。

一方、断層が接している地点 B を破壊開始点とし、破壊が断層 1 では A 端まで、断層 2 では C 端まで伝播する場合(連動型地震タイプ 2、図 11)、時刻歴の重ね合わせに関する概念は図 12 のように表される。

図 11 連動型地震タイプ 2 の震源破壊及び波動伝播に関する概念図
星印(地点 B)は破壊開始点、他の記号等は図 9 に同じ。

図 12 連動型地震タイプ 2 の時刻歴の重ね合わせに関する概念図
図の表現は図 10 に同じ。A、B、C の表記は図 11 に対応。

4. 3 断層端部から到達する波動の時間軸上の位置

断層端部から到達する波動を時間軸上で位置付けるため、位相差分布の横軸 $[0, -2\pi]$ が加速度時刻歴の時間軸 $[0, T_d]$ に対応する性質⁴⁾を利用する。すなわち、まず、合成波の位相差分の平均 μ が波形の重心に対応すると仮定し、断層の両端から発振した波動が計画地に到達する時間の平均 $\bar{t}$ を式(12)によって算定する(T_d は波形全長)。次に、得られた $\bar{t}$ を中心に前述した到達時間差 ΔT を $1/2$ ずつ割り振ることにより、断層端部から到達する波動の時間軸上の位置を決定する。

$$\frac{\bar{t}}{T_d} = -\frac{\mu}{2\pi} \quad (12)$$

具体的には、連動型地震タイプ 1(図 9)では、断層 1 で発生する地震動の時間軸において地点 B(破壊の終端)から到達する波動を $\bar{t}_1 + \Delta T_1/2$ に、また、断層 2 で発生する地震動の時間軸においては地点 B(破壊の始端)から到達する波動を $\bar{t}_2 - \Delta T_2/2$ に位置付け、これらの位置が一致するように時刻歴を重ね合わせる。表 1 に、断層端部から到達する波動の時間軸上の位置について整理する。

表 1 断層端部から到達する波動の時間軸上の位置
(連動型地震タイプ 1)

	破壊の始端から到達する波動	破壊の終端から到達する波動
断層 1	$\bar{t}_1 - \Delta T_1/2$ (地点 A)	$\bar{t}_1 + \Delta T_1/2$ (地点 B)
断層 2	$\bar{t}_2 - \Delta T_2/2$ (地点 B)	$\bar{t}_2 + \Delta T_2/2$ (地点 C)

注) 断層 1 と 2 の位置関係、及び破壊の始端、終端については図 9 参照。
() 内は破壊の始端及び終端に対応する地点名。

同様に、表 2 には連動型地震タイプ 2(図 11)に関する各対応関係を示す。この場合、地点 B(破壊の始端)から到達する波動をそれぞ

れの地震動の時間軸上で $\bar{t}_1 - \Delta T_1/2$ (断層 1) と $\bar{t}_2 - \Delta T_2/2$ (断層 2) に位置付け、これらの位置を基準として地震動を重ね合わせる。

表 2 断層端部から到達する波動の時間軸上の位置
(連動型地震タイプ 2)

	破壊の始端から到達する波動	破壊の終端から到達する波動
断層 1	$\bar{t}_1 - \Delta T_1/2$ (地点 B)	$\bar{t}_1 + \Delta T_1/2$ (地点 A)
断層 2	$\bar{t}_2 - \Delta T_2/2$ (地点 B)	$\bar{t}_2 + \Delta T_2/2$ (地点 C)

注) 断層 1 と 2 の位置関係、及び破壊の始端、終端については図 11 参照。
() 内は破壊の始端及び終端に対応する地点名。

5. 模擬地震動の作成事例

本節において、想定南海地震と想定東南海地震(以下、南海地震、東南海地震と略す。)が連動した場合の模擬地震動の作成事例を示す。既報⁹⁾で述べたように一連の研究で提案した手法では、計画地が震源近傍(震源距離 r_0 が断層長さ L の 1.5 倍程度以内)に存在する場合には S 波の手法を適用することを基本としており、5.1 節で示す大阪市における合成波も S 波として評価する。後述するようにこの例では $r_0/L=1.1$ 程度であり、Love 波に関する手法を適用して円筒波として評価した場合のフーリエ振幅の値は、5.1 節で球面波として算定した場合のたかだか数%増しである⁹⁾。一方で、S 波として評価した方が位相差分の集中度は高く、応答のレベルが高くなること⁶⁾も踏まえると、上述の判断は設計用入力地震動の評価として妥当なものであると考えられる。また、この判断は、計画地と震源断層の位置関係と、最深部で 30 km 程度と震源域が深いことを考慮した結果、建築物に影響を与える地震動は、短周期成分の励起も含め、S 波が支配的であると解釈したものとも言える。

なお、フーリエ位相の選択にあたっては、プレート境界地震の場合、現状で観測記録が豊富に得られている 2003 年十勝沖地震のデータセットを利用する。具体的には、まず、このデータセットから与条件に適する σ/π を有するフーリエ位相をすべて採用して模擬波を作成する。次に、全合成波の擬似速度応答スペクトルを重ね描きしてその平均+標準偏差を周波数ごとに算定し、これに近いスペクトル特性を有する模擬波を 3 波選択する。但し、本論文は地震動の重ね合わせ技法の提示を目的としているため、単独の地震に対してそれぞれ選択した 3 波の模擬波のうち、1 波のみを例示する。

5. 1 S 波に関する模擬地震動の重ね合わせ

南海地震と東南海地震が連動して発生した場合の大阪市における模擬地震動の例を示す。ここでは 4.2 節で例示した連動型地震タイプ 1 とタイプ 2 を想定し、南海地震と東南海地震の震源域をそれぞれ断層 1 及び断層 2(図 9 と図 11)に対応させる。すなわち、タイプ 1(図 9)では足摺岬沖を破壊開始点として破壊が静岡県浜名湖付近まで連続して伝播する震源過程を、また、タイプ 2(図 11)では紀伊半島沖を破壊開始点とし、破壊が東西に進行する震源過程を想定する。計画地は K-NET の観測点大阪府大阪(OSK005)とし、地盤モデルは文部科学省研究開発局・他²⁰⁾の図より読み取り表 3 と設定した。但し、建築物の基礎底を GL-20m と仮定し、それ以浅の地盤は無視した。

なお、本論文は地震動の重ね合わせ技法の提示を目的としているため、浅部地盤に関する非線形性は考慮せず初期剛性を採用する。

このように線形問題として扱う場合、計画地直下の地震基盤上面で波動を重ね合わせた後、地盤増幅に関する伝達関数を乗じることと、先に伝達関数を乗じて各地表波を合成した後にそれらを重ね合わせることとは等価である。地盤の非線形性を考慮する必要がある場合には、地震基盤で波動を重ね合わせた後、等価線形解析や非線形解析を適用して地表波を作成することになる。

表 3 大阪府大阪 (OSK005) の地盤モデル²⁰⁾

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S 波速度 (m/s)
0	160	1.7	350
160	300	1.8	550
460	520	2.1	1100
980	—	2.7	3200

地震動の評価事例として、まず、連動型地震タイプ 1 の重ね合わせについて述べる。

図 13 及び図 14 に、南海地震と東南海地震が単独で発生した場合の加速度波形、及びそれらの模擬地震動を作成する際に採用したフーリエ位相の位相差分布を示す。地震の規模は中央防災会議¹⁷⁾の公表値 $M_0 = 8.76 \times 10^{21}$ Nm (南海地震) 及び $M_0 = 2.45 \times 10^{21}$ Nm (東南海地震) を採用し、断層長さについては、公表されている断層面積と震源域図¹⁷⁾を基に $L = 300$ km (南海地震) 及び $L = 200$ km (東南海地震) と設定した。立ち上がり時間は式 (2) を用いて $\tau = 8.9$ sec (南海地震)、 $\tau = 5.8$ sec (東南海地震) と算定した。

震源距離は震源域図¹⁷⁾から読み取り、南海地震に関して 330km、東南海地震に関しては 150km と設定した。これらの値を基に、式 (7) ~ 式 (10)、及び図 5 と図 6 に示す計画地と断層面の位置関係を考慮して、フーリエ位相選択時の指標を $\sigma/\pi = 0.16$ (南海地震)、 $\sigma/\pi = 0.15$ (東南海地震) と決定した。なお、フーリエ位相は 2003 年十勝沖地震における K-NET の観測記録より採用した (以下同じ)。

提案手法では、震源距離 r_0 が断層長さ L より短い場合、 $r_0 = L$ を式 (3) に適用してフーリエ振幅を評価する。すなわち、断層直上及び近傍の領域 ($r_0 \leq L$) においては、式 (3) における r_0 の下限を L としてフーリエ振幅の上限を規定する。但し、上述の東南海地震の例のように計画地が破壊進行直交方向に位置し、且つ $r_0 \leq L$ である場合には、破壊開始点を反対側の断層端部と仮定した場合の震源距離 (この例では $r_0 = 230$ km) を用いてフーリエ振幅を評価する (図 15)。この場合、計画地 (図 15(a) の白丸) におけるフーリエ振幅は、断層直上における評価値 (式 (3) に $r_0 = 200$ km を適用) の約 87% に設定される。一般的に、震源破壊が計画地に向かってくる場合 (図 15(b)) の方が、進行方向が逆の場合 (図 15(a)) に比べて位相差分の集中度が高く、応答スペクトルのレベルが高くなることを踏まえ、単独の地震を想定した場合には前者の破壊開始点 (図 15(b)) を採用する。なお、加速度フーリエ振幅と無減衰弾性系のエネルギースペクトルは等価であるため²¹⁾、この仮定は、断層の破壊進行方向に依存せず建築物への総入力エネルギーを同等と見做したものと解釈できる。

式 (3) における地殻の平均的な密度と S 波速度に関しては、中央防災会議¹⁷⁾の提案値 $\rho = 2.8$ t/m³ 及び $V_s = 3.8$ km/s を採用した。また、地震基盤から地表面への地盤増幅は初期剛性を用いた線形問題

であるが、解析には利便性を考慮して SHAKE²²⁾ を利用した。

図 13 南海地震を想定した模擬地震動 (S 波) の加速度波形と採用したフーリエ位相の位相差分布 ($\sigma/\pi = 0.16$)
北海道木間内 (HKD169) EW 成分の位相特性を採用。

図 14 東南海地震を想定した模擬地震動 (S 波) の加速度波形と採用したフーリエ位相の位相差分布 ($\sigma/\pi = 0.15$)
北海道上の湯 (HKD153) NS 成分の位相特性を採用。

(a) 破壊が計画地に近い断層 端部から開始する場合 (b) 破壊が計画地から遠い断層端部から開始する場合

図 15 断層面の破壊進行方向と計画地への波動伝播距離の関係
星印は破壊開始点、白丸は計画地、矢印の向きは破壊進行方向及び波動伝播方向を示す。

図 13 に示した南海地震に関する例では、位相差分の平均値 (2π で規準化) は $\mu/2\pi = -0.19$ であり、式 (12) により $\bar{t}_1 = 62$ sec (但し、 $T_d = 327.68$ sec)、また、式 (11) に $\theta = 30$ deg. と $r_0 = 330$ km を代入して $\Delta T_1 = 66$ sec が得られる。同様に東南海地震に関しては (図 14)、 $\mu/2\pi = -0.16$ より $\bar{t}_2 = 52$ sec、 $\theta = 80$ deg. 及び $r_0 = 150$ km を適用して $\Delta T_2 = 94$ sec となる。これらの値を用いて、断層が接する地点から到達する波動の時間軸上の位置を算定すると、南海地震に関して $\bar{t}_1 + \Delta T_1/2 = 95$ sec、東南海地震に関して $\bar{t}_2 - \Delta T_2/2 = 5$ sec となり、それぞれの模擬地震動の時間軸におけるこれらの位置が一致するように時刻歴を重ね合わせる。図 16 に、得られた地震動の加速度波形、及び Trifunac²³⁾ の手法によって算定した速度波形を示す。

図 16 連動型地震タイプ 1 の模擬地震動 (S 波) に関する
加速度及び速度波形

次に、連動型地震タイプ 2 について整理する。この場合、南海地震の破壊進行方向は前述の連動型地震タイプ 1 の場合と逆であり、式 (10) に $r_0 = 150$ km を適用して $\sigma/\pi = 0.17$ が得られる。図 17 に、模擬地震動と採用したフーリエ位相の位相差分布を示す。但し、フーリエ振幅の設定においては、前述したように、破壊開始点を反対側の断層端部と仮定した場合の $r_0 = 330$ km を式 (3) に適用した。

図 17 南海地震を想定した模擬地震動(S波)の加速度波形と採用したフーリエ位相の位相差分布($\sigma/\pi=0.17$)
北海道神恵内(HKD141)NS 成分の位相特性を採用。

この例では $\mu/2\pi=-0.14$ より $\bar{t}_1=46$ sec、 $\theta=90$ deg. と $r_0=150$ km を式 (11) に適用して $\Delta T_1=158$ sec が得られ、 $\bar{t}_1-\Delta T_1/2=-33$ sec となる。東南海地震に関しては連動型地震タイプ 1 と条件が同じであるため図 14 に示す模擬地震動を採用し、この地震の時間軸上の $\bar{t}_2-\Delta T_2/2=5$ sec の位置と、南海地震を想定した模擬地震動(図 17)の時間軸上の $\bar{t}_1-\Delta T_1/2=-33$ sec の位置が一致するように時刻歴を重ね合わせた。図 18 に得られた地震動の加速度及び速度波形を示す。

図 18 連動型地震タイプ 2 の模擬地震動(S 波)に関する
加速度及び速度波形

図 16 と図 18 の時刻歴波形を比較すると、連動型地震タイプ 1 の場合、それぞれの震源域から到達した波動が時間差を伴って重ね合わされているのに対し、タイプ 2 では、両断層の破壊が同時に開始するため地震動の到達時間差が小さく、主要動部分が重なった形状の波形となっている。このように本技法では、連動型地震のタイプの違いを反映させて波動を重ね合わせることができる。

図 19 に応答スペクトル、図 20 にはエネルギースペクトル²⁴⁾を示す。応答スペクトルについてはタイプ 2 の結果の方がタイプ 1 のものより大きくなっている(図 19)。この結果は、タイプ 1 では、2 個の地震動が時間差を伴って到達するため最大応答値が単独の地震動の結果と同程度となるのに対し、タイプ 2 では両断層からの地震動の到達時間差が小さく、加速度振幅が単独のものより増大するため最大応答値が大きくなると説明できる。一方、連動型地震のエネルギースペクトルがタイプ 1 とタイプ 2 でほぼ同等で、単独の地震を想定した場合の約 1.4 倍となっていることは、両タイプの連動型地震による総入力エネルギーがほぼ同じであり、単独の地震の場合の約 2 倍であることを示唆している(図 20)。

図 19 模擬地震動(S 波)の応答スペクトル($h=5\%$)
太実線は連動型地震タイプ 1、太破線は同タイプ 2、細実線は南海地震、細破線は東南海地震を想定した模擬地震動を示す。

図 20 模擬地震動(S 波)のエネルギースペクトル($h=10\%$)
太実線は連動型地震タイプ 1、太破線は同タイプ 2、細実線は南海地震、細破線は東南海地震を想定した模擬地震動を示す。

5. 2 Love 波に関する模擬地震動の重ね合わせ

連動型地震タイプ 1 として南海地震と東南海地震が連続して発生した場合に東京都心部に到達する Love 波について考察する。

既報で提案した Love 波に関する模擬地震動作成手法は S 波に関する手法(2 節)と同様の骨格を有するが、フーリエ位相の選択基準に関しては、堆積盆地に波動が入射した後、位相差分がより分散する効果を考慮した評価式を採用している⁹⁾。そこで、式(7)～式(10)にもこの効果を反映し、フーリエ位相の選択基準として式(13)～式(16)を提案する。ここに、 r_2 は盆地端部までの震源距離を示す。

＜断層長さ 200 km 級のプレート境界地震＞

$$\text{破壊進行方向： } \sigma/\pi=0.04+0.0003r_2+0.0012(r_0-r_2) \quad (13)$$

$$\text{破壊進行直交方向： } \sigma/\pi=0.10+0.0003r_2+0.0012(r_0-r_2) \quad (14)$$

＜断層長さ 300 km 級のプレート境界地震＞

$$\text{破壊進行方向： } \sigma/\pi=0.03+0.0003r_2+0.0012(r_0-r_2) \quad (15)$$

$$\text{破壊進行直交方向： } \sigma/\pi=0.12+0.0003r_2+0.0012(r_0-r_2) \quad (16)$$

南海地震の場合、震源域図¹⁷⁾から $r_0=720$ km、 $r_2=650$ km と設定し、図 6 及び式(15)を基に $\theta=10$ deg. も考慮して $\sigma/\pi=0.32$ とした。また、東南海地震に関しては $\theta=0$ deg. であり、式(13)に $r_0=430$ km と $r_2=360$ km を適用して $\sigma/\pi=0.23$ と設定した。一方、フーリエ振幅は、幾何減衰として円筒波を仮定し、表面波としての周波数特性を反映した伝達関数を用いて評価した⁹⁾。伝達関数の算定に用いた東京都千代田区北の丸公園の地盤モデル²⁵⁾を表 4 に示す。

表 4 東京都千代田区北の丸公園の地盤モデル²⁵⁾

深さ (m)	層厚 (m)	密度 (t/m³)	S 波速度 (m/s)
0	2	1.74	100
2	5	1.80	270
7	130	1.88	520
130	260	1.93	690
390	1170	2.01	940
1570	1010	2.19	1500
2570	—	2.71	3110

注) 深さと層厚の一部は 10m 単位で端数処理を施した値²⁵⁾。

図 21 と図 22 に、南海地震及び東南海地震が単独で発生した場合の Love 波を示す。これらの模擬地震動を作成する際に採用したフ

ーリエ位相に関しては $\mu/2\pi = -0.24$ (南海地震)、 $\mu/2\pi = -0.28$ (東南海地震) であり、式(12)によりそれぞれ $\bar{t}_1 = 79 \text{ sec}$ 、 $\bar{t}_2 = 91 \text{ sec}$ と算定される。また、前述した r_0 、 θ 、 L を式(11)に代入して $\Delta T_1 = 33 \text{ sec}$ と $\Delta T_2 = 20 \text{ sec}$ が得られる。これより、図 21(a) の $\bar{t}_1 + \Delta T_1/2 = 95 \text{ sec}$ と図 22(a) の $\bar{t}_2 - \Delta T_2/2 = 81 \text{ sec}$ の位置が一致するように時刻歴を重ね合わせた。

図 21 南海地震を想定した模擬地震動(Love 波)の加速度波形と採用したフーリエ位相の位相差分布 ($\sigma/\pi = 0.32$) 東京都塩浜 (TKY020) NS 成分の位相特性を採用。

図 22 東南海地震を想定した模擬地震動(Love 波)の加速度波形と採用したフーリエ位相の位相差分布 ($\sigma/\pi = 0.23$) 茨城県日立 (IBR003) EW 成分の位相特性を採用。

図 23 に得られた地震動の加速度及び速度波形を示すが、断層長さの総計が 500 km におよぶ地震が遠方で発生した際の継続時間の長い波動が評価されていると判断できる。なお、本節でも σ/π の評価の際には波形全長を 327.68 sec に統一したが(2.3 節)、図 21(a) に示す南海地震を想定した模擬地震動の作成にあたっては、後続のゼロを付加して $T_d = 655.36 \text{ sec}$ としてデータを処理した。その理由は、 $\sigma/\pi = 0.32$ を有する東京都塩浜 (TKY020) の観測記録のデータ長さは 350 sec 程度あり、その位相情報を有効に利用するためである。但し、このデータでは 350 sec 程度を超える領域の位相情報は存在しないため、図 23 に示す波形もその領域において振幅が小さくなっている。将来、位相特性として $\sigma/\pi = 0.32$ を有し、且つ継続時間のより長い記録が観測されて模擬地震動作成に利用できるようになると、この領域の振幅もより適切に評価されるものと推察される。

図 23 連動型地震タイプ 1 の模擬地震動(Love 波)に関する加速度及び速度波形

図 24 及び図 25 に応答スペクトルとエネルギースペクトルを示すが、表 4 の地盤特性を反映した、7~8sec の周期帯成分が卓越する Love 波の特徴が表れている。

図 24 模擬地震動(Love 波)の応答スペクトル ($h = 5\%$) 太実線は連動型地震タイプ 1、細実線は南海地震、細破線は東南海地震を想定した模擬地震動を示す。

図 25 模擬地震動(Love 波)のエネルギースペクトル ($h = 10\%$) 太実線は連動型地震タイプ 1、細実線は南海地震、細破線は東南海地震を想定した模擬地震動を示す。

6. 建築物の応答特性評価

5 節で作成した模擬地震動を適用し、高層建築物の応答特性について議論する。ここでは、建築物の動的応答の傾向を把握することが目的であるため、1 層 1 質点のせん断型モデルを採用し、せん断剛性は弾性とする。また、地震動との共振現象に着目するため、5.1 節で示した合成波に対しては図 19 と図 20 の卓越周期を考慮して一次固有周期 4.5sec のモデル建築物を、5.2 節の例では図 24 及び図 25 の周期特性を踏まえ、同 6.0sec のモデル建築物を採用する。

6.1 大阪市における高層建築物の応答特性

45 階建てモデル建築物(高さ 180m、一次固有周期 4.5sec、内部粘性減衰 $h = 2\%$)に、5.1 節で示した模擬地震動(S 波)を適用して振動応答解析を行った。各地震動に対する応答特性を把握するため、図 26 に、建築物最上階の変位に関する時刻歴を示す。但し、図 26(b) の東南海地震に関する結果は原点を時間軸の正方向へ 90sec 移動させた。この移動量は、連動型地震タイプ 1 の模擬地震動作成の際の $\bar{t}_1 + \Delta T_1/2 = 95 \text{ sec}$ (南海地震) と $\bar{t}_2 - \Delta T_2/2 = 5 \text{ sec}$ (東南海地震) の時間差、つまり、重ね合わせの際の原点の時間差に対応しており、この操作により図 26(a)、図 26(b) 及び図 26(c) の時間軸は同期することになる。

連動型地震タイプ 1 の変位波形(図 26(c))には、南海地震による揺れ(図 26(a))の後、東南海地震による揺れ(図 26(b))が続いている傾向が表れている。一方、連動型地震タイプ 2 では両地震が同時に発生するため計画地への波動の到達時間差が小さく、建築物の応答も最大値がより大きく、継続時間(自由振動として振幅が減少し始める時間までを指す。)が短くなっている(図 26(d))。また、建築物への総入力エネルギーは、 $2.5 \times 10^5 \text{ kNm}$ (南海地震)、 $2.3 \times 10^5 \text{ kNm}$ (東南海地震)、 $5.0 \times 10^5 \text{ kNm}$ (連動型地震タイプ 1)、 $6.0 \times 10^5 \text{ kNm}$ (連動型地震タイプ 2) となっており、地震が連動することにより 2~2.5 倍のエネルギーが建築物に入力されることが確認された。以上のよ

うに、本技法を用いることにより、連動型地震のタイプの違いが建築物の応答に与える影響を把握することができる。この結果は、連動型地震を適切に評価することの重要性を示唆している。

図 26 45 階建てモデル建築物の最上階変位に関する時刻歴
(a) 南海地震と (b) 東南海地震については図 13 及び
図 14 の模擬地震動、(c) 連動型地震タイプ 1 につい
てはこれらを重ね合わせた図 16 (以上は時間軸が
同期)、(d) 連動型地震タイプ 2 については図 14 と
図 17 を重ね合わせた図 18 の時刻歴を適用。

6.2 東京都心部における高層建築物の応答特性

60 階建てモデル建築物(高さ 240m、一次固有周期 6.0sec、内部粘性減衰 $\eta = 2\%$)に、5.2 節で示した模擬地震動(Love 波)を適用して高層建築物の応答特性を把握する。図 27 に、建築物最上階の変位に関する時刻歴を示す。ここでも、図 27(a)、図 27(c)と図 27(b)の時間軸を同期させるため、図 27(b)における時間軸の原点を 14sec ($\bar{t}_1 + \Delta T_1 / 2 = 95\text{sec}$ (南海地震)と $\bar{t}_2 - \Delta T_2 / 2 = 81\text{sec}$ (東南海地震)の差)、正方向へ移動した。

図 27 60 階建てモデル建築物の最上階変位に関する時刻歴
(a) 南海地震と (b) 東南海地震については図 21 及び
図 22、(c) 連動型地震タイプ 1 についてはこれらを
重ね合わせた図 23 の時刻歴を適用。時間軸は同期。

図 27(a)の南海地震に関する例では応答の継続時間が長く、変位振幅の最大値が 0.54m であるのに対し、図 27(b)の東南海地震に関する例では継続時間は図 27(a)の例より短く、変位振幅の最大値は 0.99m となっている。この傾向の違いは、フーリエ位相に着目すると、東南海地震に比べ南海地震の方が、断層長さが長く、且つ震源域がより遠方にあるため位相差分の分散の程度が高くなり、地震動

の継続時間が長くなることに起因していると説明できる。また、振幅特性の観点では、東南海地震の方が南海地震より震源距離が短い
ためフーリエ振幅が大きくなり、位相差分の集中度の高さとの相乗効果によって地震動の加速度振幅、ひいては建築物の応答変位が大きくなると解釈できる。

一方、建築物への総入力エネルギーは、 $5.2 \times 10^4 \text{ kNm}$ (南海地震)、 $5.7 \times 10^4 \text{ kNm}$ (東南海地震)、 $1.1 \times 10^5 \text{ kNm}$ (連動型地震タイプ 1)であり、変位振幅の最大値が東南海地震と連動型地震タイプ 1 でほぼ同じであるのに対し、総入力エネルギーは約 2 倍となっている。また、前節の例と比較すると各地震とも総入力エネルギーは 1/5 程度であり、提案手法^{7)~10)}と本技法は、建築物への入力エネルギーを定量的に評価できるという点でも有用なものと言える。

なお、図 27(a)と図 27(c)では 350sec 以降の変位振幅が小さくなっている。この理由は、前述したように、採用したフーリエ位相の関係でこの時間帯では入力地震動の加速度振幅そのものが小さくなっているためである。提案した模擬地震動作成手法を用いる場合、建築物の応答の継続時間も、フーリエ位相を採用した観測記録のデータ長さに依存している点に留意する必要がある。

7. 考察

本論文で提示した重ね合わせ技法は、先に提案した手法^{7)~10)}で作成した模擬地震動の利用を前提としており、それらの手法と同様、実現象を精度良く再現することではなく、地震動が有する特性を大域的に捉え、その特性を建築物の応答評価に反映させることを目的としたものである。この点を踏まえ、4.3 節において、断層の両端から発振した波動の到達時間の平均が位相差分の平均に対応するという仮定を導入したが、5 節と 6 節で示したようにこの仮定は、計画地で考慮すべき設計用入力地震動の傾向を捉えるという観点から工学的に許容できるものと判断できる。

すなわち、5.1 節で示した連動型地震タイプ 1 とタイプ 2 では、単独の地震による波形の重ね合わせのタイミングが異なり、この時間差の小さいタイプ 2 の方が応答スペクトルのレベルが高いこと、連動型地震に関する総入力エネルギーは単独の地震の約 2 倍であることが確認された。これらの地震動特性を反映し、6.1 節のモデル建築物に関する振動応答解析では、最上階変位の最大値はタイプ 2 の方が大きくなり、総入力エネルギーはタイプ 1 とタイプ 2 でほぼ同じで単独の地震の場合の 2~2.5 倍となっている。同様に、5.2 節で示した模擬地震動の作成事例でも、震源から遠方にある計画地における継続時間の長い波動が適切に評価されており、6.2 節での解析例では、応答の最大値は東南海地震単独の場合と概ね同じであるのに対し、揺れの継続時間は単独の場合よりも長く、総入力エネルギーは約 2 倍となっていることを指摘した。このように、本技法で重ね合わせた模擬地震動は、連動型地震を想定した際の建築物の応答特性を適切に評価できるものと判断できる。

また、本論文では断層が接している場合の地震動の重ね合わせについて展開したが、断層が連続せず、断層間に破壊の空白域が存在する場合にも、その間の時間差を与えることにより本技法を適用することが可能である。すなわち、4.2 節で述べた重ね合わせの際に、破壊の空白域で想定される時間を考慮してデータを処理することにより、断層が不連続である場合の地震動を評価できる。

更に、上述の概念をアスペリティモデルに発展させ、一つの断層に存在する複数のアスペリティから到達する地震動を、背景領域で想定される時間差を考慮して重ね合わせることも可能と考えられる。この場合、アスペリティごとに σ/π を規定するとともに、それぞれの ΔT も適切に評価する必要があるが、これらのパラメータの定量的評価は今後の検討課題と言える。

8. 結論

複数の断層が動く連動型地震に関する地震動評価法として、隣り合う断層で発生した地震動を、断層が接する地点から到達する波動を基準として重ね合わせる技法を提示した。この技法では、断層端部から到達した波動を模擬地震動の時間軸上で位置付けるために、位相差分分布の横軸と加速度時刻歴の時間軸の対応関係を利用する。この技法はS波とLove波に共通して適用できるものであり、その具体的な手順は以下のように要約される。

- (1) 各断層が単独で動いた場合の計画地における模擬地震動をそれぞれ作成する。
- (2) 作成した模擬地震動に関して、断層の両端から発振する波動の到達時間差をそれぞれ算定する。
- (3) 地震動ごとに位相差分の平均を時間軸に対応させ、この点を中心に前項の到達時間差を1/2ずつ割り振ることにより、断層端部から到達する波動の時間軸上の位置を決定する。
- (4) 断層が接している地点から到達した波動の時間軸上の位置が一致するように加速度時刻歴を重ね合わせる。

この技法を用いて、想定南海地震と想定東南海地震が連動した場合の模擬地震動(S波及びLove波)を作成し、連動型地震が地震動の経時特性、応答スペクトル、エネルギースペクトルに与える影響について考察した。地震が連動することにより波動の継続時間が長くなり、エネルギースペクトルも大きくなる傾向が捉えられており、本技法が工学的に有用なものであることを確認した。

また、得られた模擬地震動を適用して高層建築物の振動応答解析を行い、最上階変位の時刻歴及び総入力エネルギーに着目して、その動的応答の傾向を把握した。建築物の応答には入力地震動の特性の違いが反映されていることを示し、連動型地震に関する地震動特性の適切な評価を基に、建築物の動的挙動を合理的に把握することの重要性を指摘した。

謝辞

本研究では、港湾空港技術研究所・防災科学技術研究所の強震観測データ並びに気象庁87型電磁式強震計データを利用させていただきました。関係各機関に感謝いたします。

参考文献

- 1) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.151-156, 1986
- 2) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp. 1-9, 1991.12
- 3) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka: A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., 88, pp.357-367, 1998.4

- 4) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景, 日本建築学会構造系論文集, 第553号, pp.49-56, 2002.3
- 5) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その2 位相差分分布と震源・伝播・地盤特性の関係に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.55-62, 2002.9
- 6) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その3 ω^2 モデルに基づいた地震動評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第572号, pp.55-64, 2003.10
- 7) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その4 ω^2 モデルで規定したフーリエ振幅と位相差分の標準偏差を基準として選択したフーリエ位相を用いた模擬地震動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.45-53, 2005.4
- 8) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その5 水平動との相関関係に基づいた鉛直動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.31-40, 2006.11
- 9) 山根尚志, 長橋純男: 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その6 Love波に関する模擬地震動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第622号, pp.73-82, 2007.12
- 10) Yamane, T. and S. Nagahashi: A generation method of simulated earthquake ground motion considering phase difference characteristics, Proc. 14th WCEE, 11-0090, 2008.10
- 11) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., 72, pp.1217-1231, 1967.2
- 12) Sato, R.: Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude, J. Phys. Earth, 27, pp.353-372, 1979
- 13) Kanamori, H. and D. L. Anderson: Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am., 65, pp.1073-1095, 1975.10
- 14) Aki, K. and P. G. Richards: Quantitative Seismology, Theory and Methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco, California, 1980
- 15) Hanks, T. C.: f_{max} , Bull. Seism. Soc. Am., 72, pp.1867-1879, 1982.12
- 16) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 政尾亨: 地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 201-208, 1978.11
- 17) 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
- 18) Geller, R. J.: Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., 66, pp.1501-1523, 1976.10
- 19) 山根尚志, 長橋純男: 設計用模擬地震動作成手法におけるフーリエ位相の選択基準 ―プレート境界地震に関する位相差分特性―, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), B2, pp.389-390, 2007.8
- 20) 文部科学省研究開発局, 東京大学地震研究所, 京都大学防災研究所, 独立行政法人防災科学技術研究所: 大都市大震災軽減化特別プロジェクト I 地震動(強い揺れ)の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成14年度成果報告書, pp.536-561, 2003.5
- 21) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.11
- 22) Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.12
- 23) Trifunac, M.D., F. E. Udawadia and A. G. Brady: Recent developments in data processing and accuracy evaluations of strong motion acceleration measurements, Proc. 5th WCEE, Vol.1, pp.1214-1223, 1973.6
- 24) 加藤勉, 秋山宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.9
- 25) 東京都: 平成15年度23区内微動アレイ探査委託(その2)に関する調査成果報告書, 地震調査研究推進本部, 2004.3

(2009年7月10日原稿受理, 2009年11月18日採用決定)