

半経験的強震動予測手法を用いる際の補正に関する研究 ～距離減衰，放射特性，破壊伝播方向補正についての検討～

名古屋大学工学部社会環境工学科
建築学コース福和研究室 渡辺莉奈

1 はじめに

強震動予測手法の一つである波形合成法は，想定される地震の断層を要素断層に分割し，中小地震の震源特性と要素断層の震源特性の違い，伝播経路による減衰特性の違い，破壊伝播や地震波の伝播を考慮し，要素地震動を合成して対象地震の強震動を予測する手法である。この際に考慮すべき項目のうち，震源やその伝播の特性をどのように設定するかによって，強震波形はまったく違うものになる可能性をはらんでいる。本論では，より精度の高い強震動予測を指向して，これらの項目の設定の方法が強震動予測結果に与える影響についてシミュレーションを用いて検討を行った。

2 検討の概要

強震動を正確に表すためには，要素断層から発生した地震動を単純に重ね合わせるだけでなく，地震動がもつ特徴に即した補正をしながら重ね合わせる必要があり，この過程を経て強震動を作成する方法を波形合成法という。波形合成法の模式図を図1に示す。半経験的手法において共通する，波形合成の際の基本的な考え方は，次の式で表される。

$$U(\omega) = \sum_{j=1}^N \frac{\phi_j(\omega)}{\phi^*(\omega)} \cdot \frac{R^*}{R_j} \cdot \frac{e^{-i\omega\tau_j}}{\text{時間遅れ}} \cdot u^*(\omega) \text{要素地震}$$

波形合成をする際には放射特性や距離減衰，震源スペクトルなどの，補正項だけでなく，破壊伝播方向による影響などの別の視点からの補正も考慮する必要がある。

本研究においては，波形合成を行う際に特に影響が大きいと思われる，①距離減衰の補正方法，②放射特性の補正方法，③要素地震の破壊伝播方向による影響，が予測結果に及ぼす影響を考察し，より理論波形に近い結果が得られる補正方法を提案する。

3 解析結果と考察

3.1 距離減衰の補正に関する検討

地震波の振幅は一般には伝わる距離に応じて減衰し，これを距離減衰という。地震波は大きく実体波と表面波に分けられ，震源と観測点との間の距離が R のとき，点震源に対する実体波の振幅は $1/R$ ，表面波の振幅は $1/\sqrt{R}$ に比例して減少する。現行の波形合成法は，実体波の距離減衰特性のみを適用するが，この補正が強震動予測結果に及ぼす影響とその改善策を提示する。

地盤を半無限線形弾性体とし，図2に示す断層モデルと表1に示す断層パラメータを仮定して，波数積分法により要素地震を作成し，以下の3つの条件で比較することで考察する。

- (A) 波数積分法により全要素断層に対して観測される地震動の理論解を求め，波形合成
- (B) 波数積分法で作成した要素地震をすべて実体波の距離減衰特性を用いて補正し，波形合成
- (C) 要素地震を実体波相当分と表面波相当分に分離し，それぞれの距離減衰補正を適用して全要素断層で波形合成

なお，実体波と表面波の分離は田中(2010)¹⁾の方法に従い，Boore(1983)²⁾の経時特性モデル $E_B(t)$ を用いて時刻歴切出しウィンドウ $W_B(t)$ を作成す

ることにより分離した。実体波と表面波の分離の模式図を図3に示す。

波形合成結果の速度波形のEW成分を図4に示す。70秒付近のS波到達後の実体波のみが存在している部分では，実体波の距離減衰特性で補正した波形の方がわずかではあるが理論解に近い。100秒付近の表面波と思われる部分は実体波の距離減衰特性で補正すると過小評価になることが分かる。また，実体波と表面波を分離してそれぞれの距離減衰特性で補正した結果，S波初動は距離減衰の特性に忠実な波形が得られたが，表面波部分は理論解よりもかなり過大評価となった。実体波と表面波を明確に分離できていない可能性があるため，今後実体波と表面波を分離する方法を模索する必要がある。

表1 距離減衰補正検討用の断層パラメータ

走向	傾斜	すべり角	マグニチュード	地震モーメント	すべり量	応力降下量
90°	90°	0°	8.1	1.6×10^{21} N·m	8.8 m	10.0 MPa

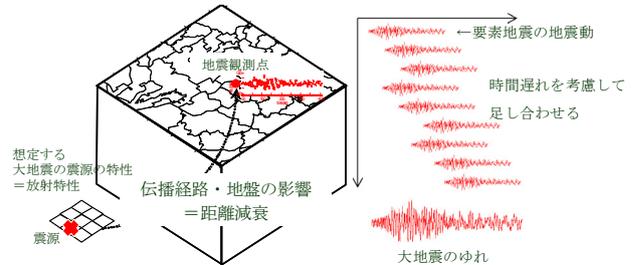


図1 波形合成法の模式図

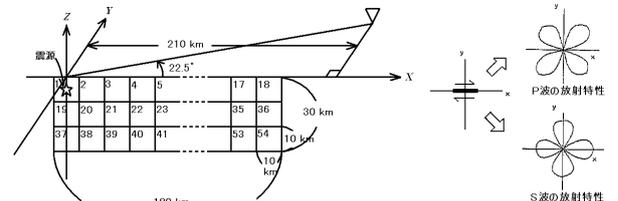


図2 距離減衰式検討用断層モデル

図5 放射特性の模式図

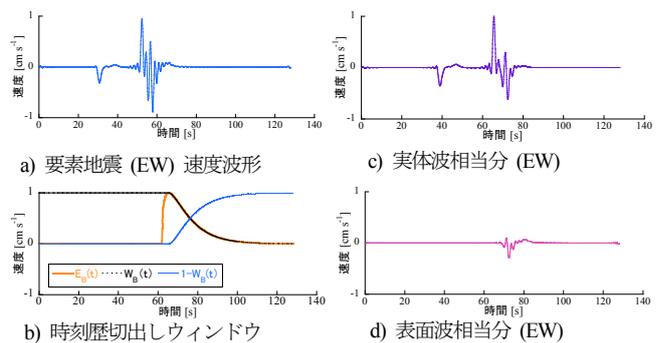


図3 実体波と表面波の分離

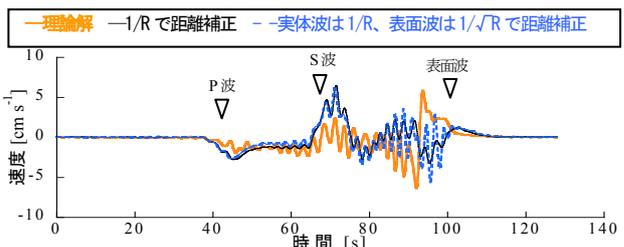


図4 各距離減衰補正を行った合成波形 (EW)

3.2 放射特性の補正に関する検討

震源での3次元のすべり方向により、振幅の大きくなる方向と小さくなる方向が空間的に生じる。この振幅分布を空間的に表したものを放射特性という。図5に示した放射特性の模式図のように、放射特性には、震源から見て観測点がある角度のときに振幅がゼロに極めて近くなる地点が存在する。この地点で得られた観測記録を用いて半経験的手法により波形合成をすると、放射特性の補正を行っても、極めてゼロに近い振幅がある係数倍するだけであり、合成波形の信頼性に問題が生じる。

そこで、図6に示す断層モデル、表2に示す断層パラメータを仮定して、以下の3つの条件で比較することにより、放射特性の補正が合成波形に及ぼす影響を検討する。

- (A) 波数積分法により全要素断層から理論解を求め、波形合成
- (B) 波数積分法で作成した要素地震を、放射特性の補正を行わずに、波形合成
- (C) 波数積分法で作成した要素地震を水平成分はS波の放射特性、上下成分はP波の放射特性を適用し、波形合成

今回の検討では、放射特性が顕著に表れるような震源と観測点を設定しており、図6に示す要素地震E, C, Wから合成した波形をそれぞれ合成波形E, C, Wとする。

波形合成結果のEW成分を図7に示す。要素地震E, Wを使って波形合成をした結果、振幅に非常に大きな差がみられ、S波、P波どちらの放射特性で補正をしても正しい結果は得られなかった。これは極めてゼロに近い振幅がある倍率で拡大したり、大きな振幅をゼロに近くなるように縮小したりする過程での無理な計算によるものと考えられる。また、用いる放射特性によって合成波形が受ける影響を検討した結果、水平成分はS波の放射特性で、上下成分はP波の放射特性で補正した合成波形と理論解がよく対応していることが確認された。

3.3 要素地震の破壊伝播方向の影響に関する検討

地震が発生すると、断層の破壊伝播方向では、地震動が大きくなり、発達したパルスが観測される現象が起こる。この破壊伝播方向による影響を、ディレクティブ効果という。ここでは、想定する大地震の破壊伝播方向とは異なる方向に破壊が伝播した要素地震を用いて大地震の波形合成を行った場合に、ディレクティブ効果が合成波形に与える影響について検討する。

今回の検討では、波数積分法で求めた理論波形を用いて破壊伝播方向の異なる2種類の要素地震を合成する。観測点に近づく方向に破壊が伝播するものを要素地震1、観測点から遠ざかる方向に破壊が伝播するものを要素地震2とする。

破壊伝播特性の違う要素地震1, 2を、表3に示す断層パラメータ、図8に示す断層モデルに適用して波形合成した結果を合成波形1, 2とし、速度波形のEW成分とフーリエ振幅スペクトルを図9に示す。これらの合成結果を見ると、最大振幅で2倍以上の差が見られ、周期特性も要素地震1より要素地震2を用いた結果の方が長周期成分が多く、ディレクティブ効果の影響が顕著に現れている。

表2 放射特性補正検討用の断層パラメータ

走向	傾斜	すべり角	マグニチュード	地震モーメント	すべり量	応力降下量
90°	90°	0°	7.4	$1.8 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$	2.9 m	5.7 MPa

表3 破壊伝播特性検討用の大断層パラメータ

走向	傾斜	すべり角	マグニチュード	地震モーメント	すべり量	応力降下量
270°	20°	90°	8.2	$2.9 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{m}$	5.2 m	3.4 MPa

4 まとめ

本研究では、波形合成を行う際に距離減衰や放射特性などの補正方法が波形合成の結果に及ぼす影響を考察し、より理論波形に近い計算結果が得られる補正方法を提案することを目標に、さまざまな観点から検討した。しかし、本研究は強震動予測の高精度化への一観

点に過ぎず、本論で述べた項目の他にも、考察すべき検討内容が課題として残っている。それらが及ぼす影響を検討していくことにより、より高精度な強震動予測手法が確立されることが望まれる。図6 放射特性検討用断層モデル

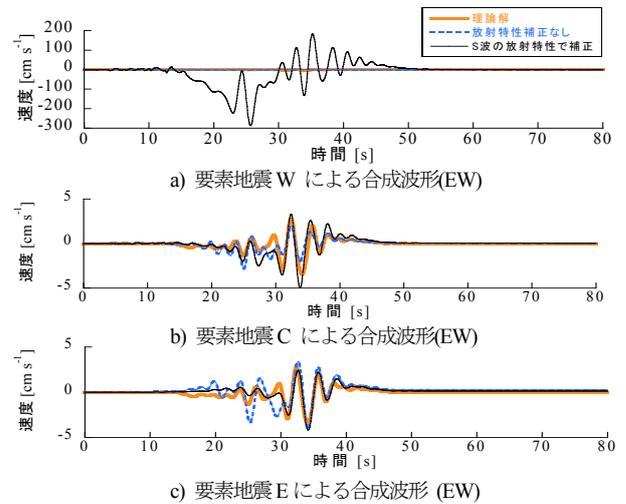
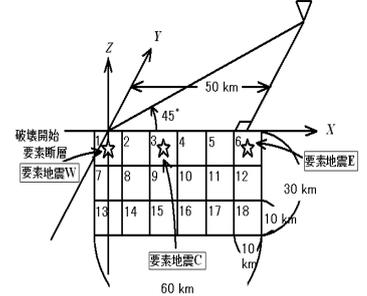


図7 各放射特性補正を行った合成波形 (EW)

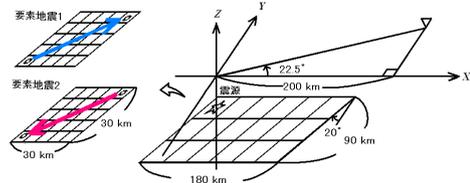


図8 破壊伝播特性の補正検討用の断層モデル

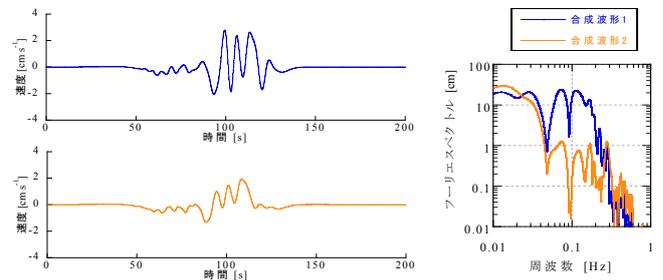


図9 合成波形1, 2の速度波形(EW)とフーリエ振幅スペクトル

参考文献

- 1) 田中清和：広帯域地震動予測におけるS波主要動実体波・後続動表面波の概略的な分離の適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp. 903-904，2010.9
- 2) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 1865-1894, 1983.

謝辞

名古屋大学大学院生、平井敬氏には、本論をまとめるにあたり親切な御指導・御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。