

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：33903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25750147

研究課題名(和文)南海トラフ地震にも利用可能な緊急地震速報の構築

研究課題名(英文) Estimation of the Earthquake Early Warning available in Nankai-trough earthquake

研究代表者

倉橋 奨 (Kurahashi, Susumu)

愛知工業大学・工学部・その他

研究者番号：60510899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：南海トラフ巨大地震にも対応した緊急地震速報の高度化のため、震源に近い観測点のP波震動からより震源から遠い観測点のS波震動を予測する方法を提案し、適用性の検証を行った。具体的には、波線理論を基とした、P波震動とS波震動の比から計算される伝達関数を計算し、観測記録のP波震動と重畳積分することにより、S波震動を推定する方法である。また、リアルタイムで計算できるよう、伝達関数を時刻歴にするIIRフィルターも構築した。M5クラスの地震動によりその適用性は確認できたが、南海トラフ巨大地震に対しては、P波を含めたシミュレーション波形が得られなかったため、検証できなかった。

研究成果の概要(英文)：We proposed method to predict S-wave at target site from observed P-wave at reference site due to upgrading the Earthquake Early Warning and inspected applicability of this method. Procedure of this method shown as follow, 1: transfer function is estimated from ratio of P-wave and S-wave calculated based on ray theory, 2: S-wave is calculated by the convolution of observed P-wave and the transfer function. The IIR filter which calculates the transfer function in time domain was estimated because predicted S-wave has to be calculated in real time. As a result, applicability of this method was confirmed by analysis using M5 earthquake. However, we could not confirm applicability to the Nankai trough earthquake because we cannot get simulation waves include P-wave.

研究分野：地震工学

キーワード：緊急地震速報 南海トラフ巨大地震 P波震動 S波震動

1. 研究開始当初の背景

緊急地震速報は、大きな揺れが到達するまでの時間(到達時間)と予想される揺れの大きさ(予想震度)を提供するものである。この緊急地震速報の有効性は、2008年岩手宮城内陸地震などで示されている。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北地震)では、以前から指摘されていた緊急地震速報における巨大地震への適用の問題点が実証される形となった。この問題点とは、巨大地震時において緊急地震速報の予想震度が過小評価となる地点が発生することである。実際に、東京で実測震度が最大で震度5強であったにもかかわらず、緊急地震速報の予想震度は最大で震度4であった。予想震度が過小評価になると、震度5弱で避難放送を鳴動するように設定している地点では避難放送が流れない。すなわち、緊急地震速報が利用できないことになる。

緊急地震速報は、地震の規模、対象地点と地震波を生成する場所(断層が破壊する場所:断層破壊域)との距離、対象地点の地盤情報、によって予想震度が計算される。このうち、上記に示した緊急地震速報が巨大地震で予想震度を過小評価してしまう原因は、の影響が大きい。地震は、最初ある点(破壊開始点)から断層の破壊が開始するが、徐々に断層破壊域が広がっていく。地震規模が大きいと断層破壊域も大きくなり、M9の東北地震の断層破壊域は、南北に450km、東西に200kmにもおよんだ。すなわち、対象地点の予想震度は、断層破壊域との距離を基に、予想震度を計算しなければならない。しかしながら、緊急地震速報では、破壊開始点と対象地点との距離を基に予想震度が計算される。そのため、東北地震では、破壊開始点の近くである宮城県に関しては、実測と予想震度に差はなかったが、東京など破壊開始点から離れた場所では、予想震度が過小評価となった。このことから、この問題点の解決は、いかに早く断層破壊の広がりをリアルタイムで推定できるかがカギとなる。

応募者を含む研究グループは、提案してきたP波加速度を用いた予想震度推定法の提案してきた過程で、P波の距離減衰から、P波加速度値は震源近傍において飽和する(頭打ちする)ことを明らかにした。さらに、倉橋他(2009)では、内陸地震のP波加速度値から、この震源近傍における飽和域と断層破壊域の大きさが調和的となることを示し、倉橋他(2010)では、集集地震の記録から、P波加速度ではなく上下動加速度を利用すべきことを指摘した。これらの成果は、上下動加速度値により、観測地点が断層破壊域付近かどうかの判定が可能であることを示しており、特に、リアルタイムの観測記録であれば、断層破壊の広がりがリアルタイムで推定可能と考えられてきた。

研究申請当初の背景は以上であるが、その後、研究が進んでいくとともに Hoshiba

(2013)から以下の研究成果が出された。

断層の広がりを短時間で正確に捉えることは難しく、対象地点の予測をするためには、計算量も多くなる。このことから断層破壊の広がりを推定するよりも、震源に近い観測記録から、より震源から遠い地点の波形を予測する方がより高精度に予測することができるという考え方で、震源に近いS波観測震動から、より震源の遠いターゲットサイトのS波震動を再現するものである。

実際に、巨大地震の震源域を早期に精度よく推定することは難しいと考えられており、早期解決・早期運用が必要なるこの問題に対しては、上記の考え方が適切であると考えられる。そこで申請者は、上記の研究背景を基に研究をすすめるように方針を転換した。

2. 研究の目的

上記の研究背景より、本研究の主目的は当初目的の「南海トラフにも利用可能な緊急地震速報の構築」に変更はないが、この目的を達成するための方法としてマグニチュードを決めないで、対象地点よりも震源に近い地点の地震動からより震源の遠い地点の地震動を推定する方法の構築を目的とした。特に、P波震動の観測記録から、対象地点のS波震動を予測する方法にターゲットを絞って研究を進めた。

3. 研究の方法

研究の方法は以下の通りである。

(1) P波震動からS波震動への予測方法の構築

対象地点よりも震源に近い地点(リファレンスサイト)のP波震動から、より震源から遠い地点(ターゲットサイト)のS波震動を予測するための理論式を構築する。ここでは、波線理論を基にして構築をする。具体的には、リファレンスサイトとターゲットサイトの地震動を比で表現することにより、リファレンスサイトとターゲットサイトの伝達関数を計算する。伝達関数は過去の小・中地震記録から推定できる。地震発生後に観測されるP波観測波形と伝達関数を重畳積分することで、ターゲットサイトのS波震動を推定する。

(2) IIR フィルターの構築

緊急地震速報に利用するためには、地震が発生し観測記録を観測してから、リアルタイムで計算をしなければならない。そこで、上記で推定した伝達関数をリアルタイムでIIRフィルター化することを考える。

(3) P波震動からS波震動への予測結果の検討

中規模(M5クラス)の地震を対象として、構築した方法の有効性の検証を行った。

(4) 南海トラフ巨大地震への適用性の検証
最後に、上記で検討した結果を、南海トラフ巨大地震に適用して、その検証を実施する。南海トラフ巨大地震については、理論計算または、経験的グリーン関数法などにより構築または入手する必要がある。なお、経験的グリーン関数法を利用する場合など、南海トラフ

巨大地震の震源域で発生した地震記録は重要なデータとなるため、本研究では地震計と観測口ガーを含めた地震観測システムも構築する。

4. 研究成果

(1) P波震動からS波震動への予測方法の構築

P波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

震源特性、伝播経路特性、地盤特性および、すでに観測された地点、予測される地点との幾何学的な関係を図1に示す。

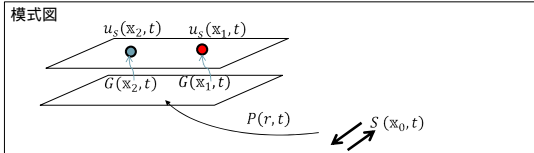


図1 本研究で考える地震特性および対象地点の幾何学的関係図

ここで、 $S(x_0, t)$ は x_0 点における震源の震源特性、 $P(r, t)$ は震源距離 r となる伝播経路特性、 $G(x, t)$ は x 点におけるサイト特性を示す。また、 $u_s(x_1, t)$ および $u_s(x_2, t)$ は x_1, x_2 における地震動を示す。また、それぞれの記号の上付き文字のVとHは、それぞれ上下動成分と水平動成分を示す。ここで、すでに記録された地点(x_1)の地表での上下動と水平動の震動および予測される地点(x_2)の地表での上下動と水平動の震動は、以下のように記述される。

- すでに記録された地点の地表での上下動と水平動の震動

$$u_s^V(x_1, t) = S^V(x_0, t) * P^V(r_1, t) * G^V(x_1, t)$$

$$u_s^H(x_1, t) = S^H(x_0, t) * P^H(r_1, t) * G^H(x_1, t)$$

$$r_1 \sim |x_1 - x_0|$$

- 予測される地点の地表での上下動と水平動の震動

$$u_s^V(x_2, t) = S^V(x_0, t) * P^V(r_2, t) * G^V(x_2, t)$$

$$u_s^H(x_2, t) = S^H(x_0, t) * P^H(r_2, t) * G^H(x_2, t)$$

$$r_2 \sim |x_2 - x_0|$$

この式から、 x_1 におけるP波震動から x_2 におけるS波震動への伝達関数を推定する。

$$T^{V \text{ to } H}(x_1, x_2, f) = \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_1, f)}$$

\parallel \parallel \parallel
 T_{source} T_{path} T_{site}

震源特性の表現

震源特性は、地震発生場所および地表の密度と速度に加えて、放射特性で表現される。なお、P波震源は速度がP波速度、S波震源はS波速度となる。P波とS波の震源特性に関する量の比は、以下のように表される。

$$u^P(x_1, t) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\rho_S^{1/2} \cdot \alpha_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \alpha_G^{1/2}} \cdot \frac{1}{r} \cdot R_{\theta\phi}^P \cdot S_0(t)$$

$$u^S(x_1, t) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\rho_S^{1/2} \cdot \beta_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \beta_G^{1/2}} \cdot \frac{1}{r} \cdot R_{\theta\phi}^S \cdot S_0(t)$$

なお、密度と速度の比は、P波とS波の比の

3乗で、P波とS波の放射特性の比は、高周波とするとおよそ1と仮定でき、簡単に表現できる。

$$\frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} = \frac{\rho_S^{1/2} \cdot \alpha_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \alpha_G^{1/2}}{\rho_S^{1/2} \cdot \beta_S^{5/2} \cdot \rho_G^{1/2} \cdot \beta_G^{1/2}} \cdot \frac{R_{\theta\phi}^S}{R_{\theta\phi}^P}$$

$\sim \frac{\alpha_S^3}{\beta_S^3}$ 短周期地震動について ~ 1

伝播経路特性の表現

P波とS波の伝播経路特性に関する量の比は、以下のように示すことができる。

$$\frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp\left[\left(-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} - \frac{\pi r_1}{\alpha Q_\alpha}\right) \cdot f\right]$$

地盤特性の表現

地震波の上下動と水平動に関する地盤特性の量の比は以下のように示すことができる。

$$\frac{G_S^H(x_2, f)}{G_S^V(x_1, f)} = \frac{G_S^V(x_2, f)}{G_S^V(x_1, f)} \cdot \frac{G_S^H(x_2, f)}{G_S^V(x_2, f)}$$

サイト間の上下動地震動の比 x_2 での地震動のH/V

ここで、右側の右側の項は、 x_2 点と x_1 点の上下動地震動の比として表現でき、左側の項は、 x_2 点での地震動のH/Vで表現できる。

P波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

P波震動による x_1 の上下動地震動からS波震源による水平動地震動への伝達関数は、以下の式で表される。

$$T^{V \text{ to } H}(x_1, x_2, f) = \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_1, f)}$$

$$= 1 \cdot \frac{\alpha^3 r_1}{\beta^3 r_2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\alpha Q_\alpha}\right] \cdot \frac{G^V(x_2, f)}{G^V(x_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_2, f)}$$

上の伝達関数は、 r_1 と r_2 が近い時、減衰特性に関する項はほぼ1.0で近似できるので、 x_1 と x_2 での上下動の増幅特性の比および x_2 での地震動のH/Vを前もって調べておくことで、容易に評価可能である。

S波上下動震動からS波水平主要動への伝達関数

S波震源による x_1 の上下動地震動からS波震源による水平動地震動への伝達関数は、以下で評価できる。P波震源とS波震源の比の違いであったP波速度とS波速度の比は、S波速度とS波速度の比となるため、1となる。

$$T^{V \text{ to } H}(x_1, x_2, f) = \frac{S^H(x_0, f)}{S^V(x_0, f)} \cdot \frac{P^H(r_2, f)}{P^V(r_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_1, f)}$$

$$= 1 \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \exp\left[-\frac{\pi r_2}{\beta Q_\beta} + \frac{\pi r_1}{\beta Q_\beta}\right] \cdot \frac{G^V(x_2, f)}{G^V(x_1, f)} \cdot \frac{G^H(x_2, f)}{G^V(x_2, f)}$$

(2) 伝達関数のためのフィルターの作成

フィルターの作成

前章で記述したように、地盤特性は“x2点とx1点の上下動震動の比”と“x2点での地震動のH/V”の掛け算で表現される。これらは、過去の小地震などの観測記録により計算が可能である。しかしながら、緊急地震速報に利用するためには、すでに観測された記録にリアルタイムで逐次的に計算する必要がある。そこで、ここでは、これらの周波数特性を再現したIIRフィルターを作成する。本研究では、Hoshiba(2013)の方法を踏襲する。“x2点とx1点の上下動震動の比”と“x2点での地震動のH/V”のフィルターのモデル化ここでは、“x2点とx1点の上下動震動の比”と“x2点での地震動のH/V”を周波数領域であらかじめ計算をしておく。これらの周波数に合うように、1次と2次の線形フィルターでモデル化する。モデル化された式は以下に示す。

$$F(s) = G_0 \prod_{n=1}^N \left(\frac{\omega_{2n}}{\omega_{1n}} \right) \frac{s + \omega_{1n}}{s + \omega_{2n}} \cdot \prod_{m=1}^M \left(\frac{\omega_{2m}}{\omega_{1m}} \right)^2 \frac{s^2 + 2h_{1m}\omega_{1m}s + \omega_{1m}^2}{s^2 + 2h_{2m}\omega_{2m}s + \omega_{2m}^2}$$

N, M : 1次, 2次フィルターの数
 $\omega_{1n}, \omega_{2n}, \omega_{1m}, \omega_{2m}$: 角周波数
 h_{1m}, h_{2m} : damping factor
 $s = i(2\pi f)$

この式からわかるように、これらのフィルターは角周波数と減衰項の関数であるため、“x2点とx1点の上下動震動の比”と“x2点での地震動のH/V”に合うようにこのパラメータを決める。本研究では、焼きなまし法により最適な角周波数と減衰項の値を決めた。

デジタルフィルターの構成

決定した角周波数と減衰項により構築された周波数領域のフィルターのデジタルフィルターを構成する。この方法には、Scherbun(1996)を利用した。

対象地点のH/VのIIRフィルターの計算例図2に、5地震の観測記録から推定されたターゲットサイトのH/Vから、IIRフィルター化した計算例を示す。

左上図は、5地震の観測記録から計算されたターゲットサイトのH/Vスペクトルとその平均H/Vスペクトルを示す。右上図は、この平均H/Vスペクトルを答えとして、1次と2次の線形フィルターの周波数特性とをフィッティングさせて、線形フィルターの角周波数とdamping factorを決定させた結果である。下図は、同定した線形フィルターを時刻歴波形にした結果である。

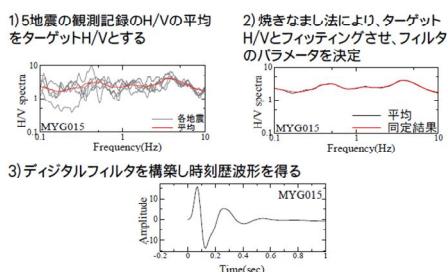


図2 IIRフィルターの結果の一例

(3) P波震動からS波震動への予測結果の検討

上記で構築した予測式の検討として、宮城県沖で発生したMj5.4の地震をターゲットとして解析を行った。解析に利用した地震観測点は、防災科学技術研究所により設定されたK-NETとKiK-netの記録を利用した。図3に対象とした地震および対象として観測点を示す。

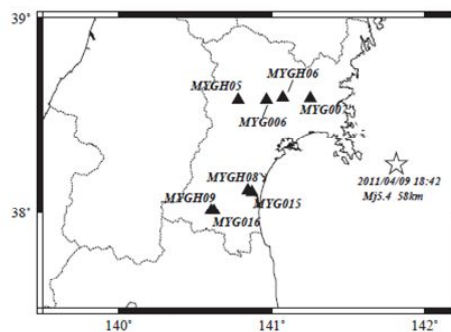


図3 対象地震と対象地震観測点の図

以下に解析方法を示す。

リファレンスサイトとターゲットサイトを決め、地盤特性の伝達関数を計算する。すなわち、リファレンスサイトとターゲットサイトの上下動の地震動の比および、ターゲットサイトのH/Vスペクトルを計算する。

上記の地盤特性の結果を、IIRフィルターによって、時刻歴波形にする。

今回利用するMj5.4の地震における、リファレンスサイトの地震動に、震源特性と伝播経路特性のパラメータおよび地盤特性の時刻歴波形を重ね積分することで、ターゲットサイトの地震動の再現を試みる。

図4に3地点における解析結果の一例を示す。図4上図は、リファレンスサイトの上下動観測記録、中図は、解析結果(青線: P波震動からS波震動を推定した結果、赤線: S波震動からS波震動を推定した結果)、下図はターゲットサイトの観測記録を示す。すなわち、上図のP波部分から下図のS波部分の振幅が再現できていればよいこととなる。ただし、位相測定に関しては、IIRフィルターの部分で最小位相関数となっているため、議論の対象外となる。

解析の結果(中図の青線)をみると、振幅は、ターゲットサイトのS波震動のものと同様となった。この結果が、リファレンスサイトのP波部分から計算されているため、時間利得として15秒程度得られていることもわかる。また、リファレンスサイトでS波が観測され始めたら、解析方法もS波震動からS波震動を解析する方法に変換する。その結果が中図の赤線であるが、その結果もターゲットサイトのS波震動の振幅と整合性があることがわかる。

これらの結果より、震源に近い観測点のP波震動からより震源から遠い観測点のS波震動

が解析可能である可能性を示すことができた。

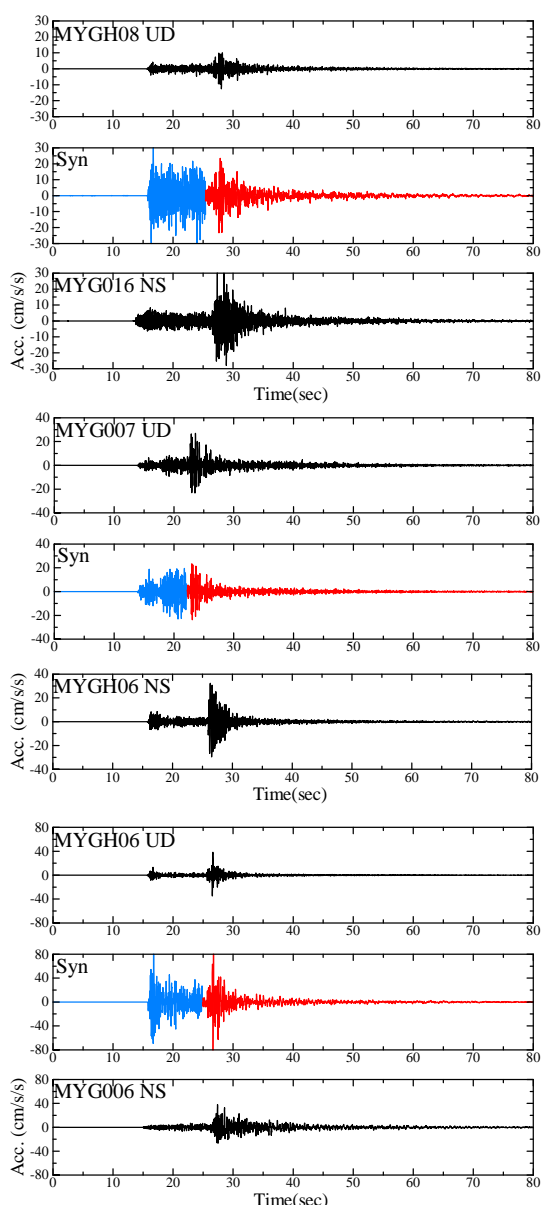


図4 3地点の解析結果

(4) 南海トラフ巨大地震への適用性の検証
南海トラフ巨大地震のシミュレーション波形を利用して、南海トラフ巨大地震時での本研究の考え方の検証を行う予定であったが、シミュレーション波形でのP波部分の検討がされてないため、検証できなかった。
また、簡易地震計による常時監視およびトリガー方式で地震記録の収集システムについては、ハード面についても構築し観測を実施しているが、南海トラフの想定震源域内で発生した地震がなかったため、結果的には、解析に利用できる記録が観測できなかった。ただし、今後も観測は実施していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

倉橋 奨、入倉 孝次郎、P波震動波形からS波最大動の波形を即時予測する方法の提案、土木学会平成26年度全国大会、2014年9月10日~12日、大阪大学豊中キャンパス
倉橋奨、入倉孝次郎、緊急地震速報における上下動加速度記録を利用した主要動波形の即時予測手法の提案、日本地球惑星科学連合2013年大会、5月19日~24日、千葉県幕張メッセ

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉橋 奨 (KURAHASHI, Susumu)

愛知工業大学・地域防災研究センター・客員講師

研究者番号：60510899