

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560171

研究課題名(和文)単点強震動予測式(Single-Station GMPE)開発の試み

研究課題名(英文)Development of Single-Station GMPE

研究代表者

高井 伸雄(TAKAI, Nobuo)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10281792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：一般的な既往の距離減衰式は、複数の地域で発生した多くの地震からの複数サイトの記録を用いた回帰分析によって作成されているため、予測値と観測値は大きな残差を有している。そこで、本研究では、単一サイトにおける地震動予測式(SS-GMPE: Single-Site Ground Motion Prediction Equations)を提案した。提案した三陸沖アウターライズ地震に対するSS-GMPEは、サイトごとに擬似速度応答スペクトルを予測するもので、MWと震源距離をパラメータとした回帰分析によって構築した。構築した予測式では、残差の大幅な低減が確認できた。

研究成果の概要(英文)：There were considerable residuals between the observed and predicted values. These residuals result from the site and source effects, because the previous attenuation formulae were constructed based on many site's strong motion records from many earthquakes occurring at various source areas. In order to overcome the weakness of the previous attenuation equations, we proposed empirical ground motion prediction equations for a single site; we named these equations "Single-Site GMPE (SS-GMPE)". We carried out a regression analysis with respect to MW for each site assuming the previously estimated internal attenuation for intraslab earthquakes. The residuals between the observed and predicted values were considerably decreased. We applied the SS-GMPE to earthquakes not used in the regression analysis and found the good correspondence of predicted and observed spectra.

研究分野：地震工学

キーワード：地震動予測式 擬似速度応答スペクトル アウターライズ地震

1. 研究開始当初の背景

- (1) 一般に地震動予測式 (Ground Motion Prediction Equation [GMPE]) は震源位置・規模から簡便に地震動指標を推定できるため、多くの予測式が構築されてきているが、複数地震に対する複数観測点の記録を用いた回帰分析により得られたものであり、震源・パスの地域性の影響や地盤増幅特性が依然としてその精度を下げている。
- (2) GMPE は現在でも用いるデータが更新され、地震タイプ・震源深さ・パス・地盤増幅特性を考慮したのも見られるようになり、日本でも M9 に対応できるものや、米国や海外においても NGA 等の新しい GMPE が各種提案されている。申請者もこれまでに、東北日本で発生する地震に関して、地震波減衰性状の大きく異なる、火山フロントの前弧側・背弧側の伝播距離を考慮することで、速度応答スペクトルに関する GMPE を提案してきた。この GMPE により特に短周期での精度良い予測ができていることは確認している。しかし、既存の GMPE は、複数地震に対する複数観測点の記録を用いた回帰分析により得られたものであり、地震発生地域の違いは通常考慮されていない。また、様々な地盤増幅特性を有する地点のデータを回帰している。よって、パスの地域性の影響や地盤増幅特性は完全には除去しきれない。
- (3) 一方で、1つの観測点に注目して、複数の地震に対して振幅が検討されており、発生地域を考慮した事例もみられる。しかし、検討観測点数が少なく、振幅値の空間的分布の検討等はなされていない。この解消にはデータセットの充実が不可避であった。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では個別の観測点に注目し、各観測点において様々なタイプ・規模・距離の地震に対しての検討を行い、各観測点 (Single Station) での GMPE = SS-GMPE の構築を試みる。
- (2) 1996 年以降整備された K-NET, KiK-net 等により、飛躍的に観測点数は増加し、それらデータを用いた GMPE の更新は非常に活発である。また、2011 年東北地方太平洋沖地震以降日本周辺での地震活動が非常に活発になり、大地震を含めた多くの観測記録が蓄積されてきている。
- (3) これまで、多くの地震に対して、多数の観測点で回帰して作成された GMPE であるが、地震タイプ・発生地域を限定し、1観測点で回帰することで、地域的な減衰特性や地盤増幅特性の影響を反映した GMPE を観測点毎に構築できる可能性が有る。このような GMPE を、Single

Station Ground Motion Prediction Equation(SS-GMPE)と呼ぶ。

3. 研究の方法

- (1) SS-GMPE の構築に用いる強震動データは防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net で得られた地表の加速度記録とし、対象とする三陸沖アウターライズ地震の 5 地震すべてで記録が得られている 217 サイトを対象として解析を行った。
- (2) 予測対象に用いる速度応答値は既往研究との比較検討も行うため擬似速度応答値とした。擬似速度応答値は、既往研究に倣い観測記録の水平 2 成分の全区間から計算した各周期の加速度応答時刻歴をベクトル合成して得られる最大値を角周波数 で除すことで求めた。アウターライズ地震に関しては前述の通り、短周期帯域の地震動の励起が特徴的であるため、固有周期 $T=0.1-3.0\text{sec}$ に関して検討を行う。

4. 研究成果

- (1) 高密度強震観測網のデータを用いて三陸沖で発生するアウターライズ地震の地震動特性 (擬似速度応答値) を既往のスラブ内地震 GMPE と比較し、その適用性に関して検討した。スラブ内地震に対する既往の予測式は短周期帯域に対してはアウターライズ地震への適用性を有するが、しかし、依然として観測値と予測値間の残差はかなりのばらつきを有していた。この残差は、既往の距離減衰式が複数の地域で発生した多くの地震の複数サイトの記録を用いた回帰分析によって作成されているため、サイト特性と震源特性を適切に評価出来ないことが原因である。
- (2) そこで、この両特性を適切に含んだ予測式構築のため、三陸沖のほぼ同一地域で発生した 5 地震 ($M_w 6.0-7.6$) の擬似速度応答値を用い、既往の距離減衰式の減衰項とこれらの M_w をパラメータとする三陸沖で発生するアウターライズ地震に対する各サイトでの GMPE (SS-GMPE) を構築した。構築に用いた地震の観測値と予測値の残差を比較すると既往の GMPE と比較して、非常に小さな残差を示し、精度の向上が示された (図 1)。

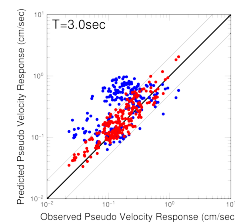


図 1 SS-GMPE による精度向上の例 (青丸が既往の予測式、赤丸が本研究)

- (3) 三陸沖で発生するアウターライズ地震に対して構築した SS-GMPE を、対象とする地域で発生した回帰に用いていない 2 地震に適用した結果、観測値の空間分布の特徴、各サイトでのスペクトル形状が良く再現されており、回帰に用いた地震に対する高精度な予測が、他の地震に対しても示されていると言える。
- (4) 2012 年 12 月 7 日に M_w 7.3 (F-net15))、 M_w 6.2 のアウターライズ地震が三陸沖で連続して発生している。このうち M_w 7.3 地震の震源過程は複雑で、Global-CMT では M_w 7.2 の地震がほぼ同時に 2 回発生したと考えられているが、その各イベントの規模には議論があり、SS-GMPE によるこの地震の検討は今後の課題とし、ここでは震源過程が比較的単純な M_w 6.2 の地震を例に検証を行う。
- (5) 観測された擬似速度応答値の空間分布では $T=0.1\text{sec}$ では太平洋側のサイトにおいて応答値が大きく、背弧側では小さくなっている。また、他の地震と同様に、周期が長くなるにつれてその傾向は弱まり、 $T=1.0\text{sec}$ では堆積盆地構造を有する平野部と北上川流域での応答値が大きくなっている。
- (6) 本研究で構築した三陸沖アウターライズ地震に対する SS-GMPE により予測される擬似速度応答値の空間分布は、短周期帯域での前弧側と背弧側の応答値の大小関係や、北上川流域で高振幅となる様子が空間分布として良く再現されている。予測サイトを対象として、観測値と予測値の比較を示すと、 $T=0.1\text{sec}$ では予測値が系統だてずれており、若干大きいのが、既往の予測式による予測値と比較して、どの周期でもばらつきは小さい(図 1 に一例を示す)。観測と予測の擬似速度応答スペクトルを比較すると(図 2)、振幅レベル、スペクトル形状ともに、再現性が高い。

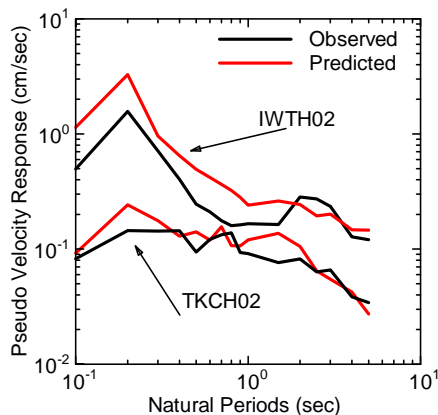
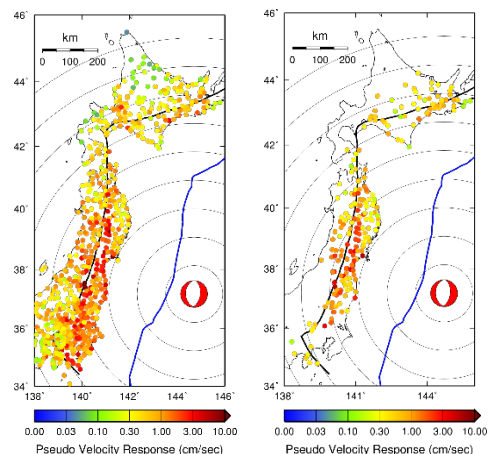


図 2 応答スペクトルの予測例

- (7) 2013 年 10 月 26 日に M_w 7.1 のアウターライズ地震が三陸沖で発生した。本地震における観測された擬似速度応答値

の空間分布は他のアウターライズ地震と同様に $T=0.1\text{sec}$ では太平洋側のサイトにおいて応答値が大きく、火山フロント背弧側では小さくなっている。また、周期が長くなるにつれてその傾向は弱まり、 $T=1.0\text{sec}$ では堆積盆地構造を有する平野部での応答値が大きくなっており、他の地震同様に北上川流域の応答値が大きい。

- (8) SS-GMPE により予測される本地震の擬似速度応答値の空間分布を図 3 に観測値とともに示す。短周期帯域での前弧側と背弧側の応答値の大小関係や、北上川流域で高振幅となる様子が空間分布として良く再現されている。観測値と予測値の比較を既往の予測式による予測と比較すると、どの周期でもばらつきは小さいものの、 $T=0.1, 0.3\text{sec}$ では予測値が系統だてずれている。全観測点の標準偏差を予測値の母集団の標準偏差 0.125 ($T=0.1\text{sec}$)、0.107 ($T=0.3\text{sec}$) と仮定し、本地震の予測値と観測値の残差の平均値 0.322 ($T=0.1\text{sec}$)、0.271 ($T=0.3\text{sec}$) を基に t 検定 (両側棄却 5%) を実施すると有意な差が認められた。



観測値 予測値
図 3 観測値と予測値の空間分布

- (9) 以上のように、精度が向上した理由として、SS-GMPE が震源から各サイトまでの伝播経路特性と各サイトの地盤増幅特性を適切に評価した GMPE であるためであり、座間・ほかが気象官署等の記録を用いて加速度応答スペクトルの長周期帯域に関して地震発生地域を地震地体構造区分ごとに評価した結果と整合する。ただし、発生地域・地震タイプの異なる地震に対しては適用範囲外であり、座間・ほかが用いた震源地区分等を参考に、適用可能な領域の設定に関して、他地域での適用とその結果の検討を通して今後議論が必要である。

(10) SS-GMPE による予測が、短周期帯域に関して、約 1.5 倍の過大評価や約 1/2 倍の過小評価となった地震があった。一方で長周期帯域においては両地震ともに観測値と予測値の合致度は非常に高い。本研究では観測で得られた応答値を各地震の M_w のみで回帰しているが、菅原・植竹は、近接して発生した地震を対象とした解析において、 M_w の同じ地震であっても震源の応力降下量が地震動の最大加速度のばらつきに影響を与えている。また、加速度震源スペクトルの短周期レベルのスケーリング則はスラブ内地震と内陸地殻内地震において倍半分の範囲内にばらつく事が知られている。

(11) これらは、短周期帯域での予測式の構築が M_w のみでは十分でない事を指摘していることに他ならない。これが、短周期帯域での過大および過小評価の要因として考えられる。周期帯域ごとの係数 a の検討と併せ、今回見られた SS-GMPE の予測値の系統的なずれを震源の応力降下量等から定量的に議論し、同じく三陸沖で実施された短周期レベルに関する既往研究との比較を行い、ずれの要因を検討する必要性がある。

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 2 件)

Takai Nobuo, Shigefuji Michiko, Rajaure Sudhir, Bijukchhen Subeg, Ichianagi Masayoshi, Dhital Megh, Sasatani Tsutomu (2016): Strong ground motion in the Kathmandu Valley during the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68, 10 doi:10.1186/s40623-016-0383-7 査読有り。

高井伸雄, 前田宜浩, 重藤迪子, 笹谷努 (2015): 応答スペクトルの単一サイト予測式 (SS-GMPE) 三陸沖アウターライズ地震における検討, *日本地震工学会 論文集*, 15, 1_18-11_37, 10.5610/jae.15.1_18 査読有り。

[学会発表](計 8 件)

高井伸雄・重藤迪子・前田宜浩・笹谷努: 東北日本沈み込み帯で発生する地震の地震動と震源スペクトル その 1 アウターライズの SS-GMPE を用いた検討, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2015/09/05, 神奈川県・平塚市。

重藤迪子・高井伸雄・新村明広・笹谷努: 東北日本沈み込み帯で発生する地震の地震動と震源スペクトル その 2 S 波

フーリエスペクトル比を用いた検討, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2015/09/05, 神奈川県・平塚市。

新村明広・高井伸雄・重藤迪子・笹谷努: 東北日本沈み込み帯で発生する地震の地震動と震源スペクトル その 3 短周期レベルの推定, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2015/09/05, 神奈川県・平塚市。

重藤迪子, 笹谷努, 高井伸雄: 2012 年 12 月 7 日三陸沖アウターライズ地震 ($M_w7.2$) の短周期地震波励起, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2014/09/12, 兵庫県・神戸市。

高井伸雄, 前田宜浩, 重藤迪子, 笹谷努: SS-GMPE を用いた 2013 年 10 月 26 日三陸沖アウターライズ地震の地震動予測, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2014/09/12, 兵庫県・神戸市。

新村明広, 重藤迪子, 高井伸雄, 笹谷努: スペクトル比を用いた地震タイプ毎の高周波数強震動特性の比較, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2014/09/12, 兵庫県・神戸市。

高井伸雄, 重藤迪子, 前田宜浩, 笹谷努: Single-Station GMPE を用いた 2012 年 12 月 7 日三陸沖アウターライズ地震の地震動予測, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2013/08/30, 北海道・札幌市。

新村明広, 高井伸雄, 重藤迪子: 単一観測点における地震タイプを考慮した強震動特性の比較: KiK-net Iwth02・TKCH08 を一例として, 日本建築学会大会学術講演会・建築デザイン発表会, 2013/08/30, 北海道・札幌市。

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高井伸雄 (TAKAI, Nobuo)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10281792