

巨大地震にも適用可能な深部地盤構造と地震規模依存性を考慮した地盤増幅度評価式の検討

Investigation of evaluation formula for amplification factor applicable to great earthquake considering deep underground structure and dependence of earthquake magnitude

舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員 西川 隼人

(研究計画ないし研究手法の概略)

研究の概要

最大地動加速度、最大地動速度などの地震動指標の地盤増幅度には強い地震規模依存性があることが指摘されている。また、規模の大きい地震では長周期地震動が励起されるため、地盤増幅度評価において長周期地震動と関連する深部地盤構造を考慮する必要がある。

本研究では巨大地震に適用できる深部地盤構造の影響や地震規模依存性を組み入れた地盤増幅度評価式を構築するために、極値理論とパーセバルの定理に基づき導いた地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式によって、以下の3つの地盤増幅度評価式を提案した。

- ① 地震動スペクトルの無限積分値による地盤増幅度評価式
- ② 地震動スペクトルの台形積分値による地盤増幅度評価式
- ③ 平均S波速度をパラメータとする経験的な地盤増幅度評価式

いずれの式もサイト増幅特性や平均S波速度によって、深部までの地盤構造の影響を地盤増幅度評価に反映させている。①式、②式は震源スペクトルを考慮しているため、様々な規模の地震の震源特性を組み込むことが可能であり、③式はマグニチュード7クラス以上の大規模地震に対して適用できる。①式はマグニチュード6～7クラス、②式はマグニチュード6～9クラスの地震を対象に適用し、観測記録から求めた地盤増幅度との比較を行った。また、②式に基づき経験的に求めた③式によって、東海地方の巨大地震を想定した広域的な地盤増幅度評価を行った。

1. 地震動スペクトルの無限積分値による地盤増幅度評価式

解析的に地盤増幅度を評価する手法として震源スペクトルやサイト増幅特性のパラメータに基づく評価式¹⁾が提案されており、地盤増幅度の地震規模依存性や深部までの地盤構造の影響を考慮した地盤増幅度評価が可能である。しかし、提案した地盤増幅度評価式で用いるサイト増幅特性に対応する関数は単一のピークを有するものであるため、ピークが複数ある複雑なサイト増幅特性に対しては、地盤増幅度評価式を適用することは難しい。

そこで本研究ではピークが複数ある現実的なサイト増幅特性に対応する地盤増幅度評価式を求めるために、サイト増幅特性に対応する関数を改良した。この関数は単一のピークを有する関数などを合成して、複数のピークを有するサイト増幅特性を表現するものである。

地盤増幅度評価式は極値理論とパーセバルの定理に基づき、次の地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式をもとに求めた。

$$F = \frac{A_s}{A_b} \doteq \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (1)$$

ここに F は地盤増幅度、 A_s は地表波の最大振幅、 A_b は解放基盤の地震波の最大振幅である。また、 $G(f)$ は対象地点のサイト増幅特性、 $S(f)$ は震源スペクトルである。

震源スペクトルは次の $\omega 2$ モデルのスペクトルに高域遮断フィルターを考慮した式を用いた。

$$S_A(f) = \frac{(2\pi)^2 f_c^2 f^2}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (2) \quad S_V(f) = \frac{2\pi f_c^2 f}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (3)$$

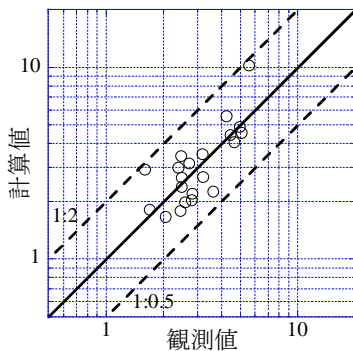
$S_A(f)$ は加速度震源スペクトル、 $S_V(f)$ は速度震源スペクトル、 f_c はコーナー振動数、 f_{max} は高域遮断振動数である。

サイト増幅特性に対応する関数として、式(4)で表されるローパスフィルターの関数か定数 β_1 、式(5)で表現される単一のピークを有する関数を式(6)のように合成し、複数のピークを有する複雑なサイト増幅特性を表現した。

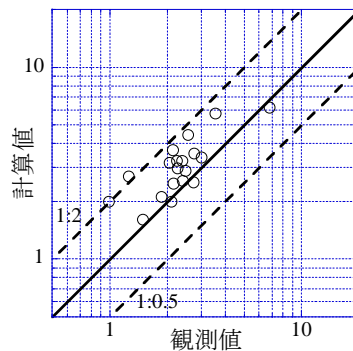
$$G_0(f) = \sqrt{\frac{\beta_2 f_0^2}{f^2 + f_0^2}} \quad (4) \quad G_i(f) = \sqrt{\frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2}} \quad (5) \quad G(f) = \sqrt{G_0^2(f) + \sum_{i=1}^{N_g} G_i^2(f)} \quad (6)$$

β_2 は低振動数での収束値に対応する定数であり、 f_0 は高域遮断振動数である。ここに α_i は振幅を調整するための係数、 f_i はサイト増幅特性のピーク振動数、 h_i はピーク振幅を規定する係数である。 N_g は $G_i(f)$ の数である。式(1)分子、分母の無限積分値を留数定理によって求めたが、煩雑な計算式であるため、詳細は発表論文2を参照して頂きたい。

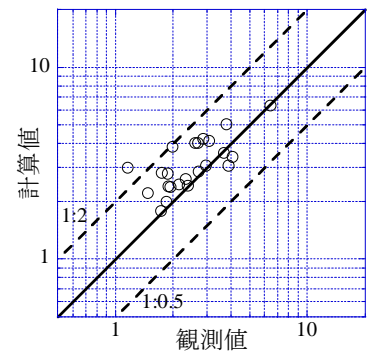
式(1)の評価精度を調べるために、地震観測記録による地盤増幅度(観測値)と評価式による地盤増幅度(計算値)を比較した。マグニチュード6~7クラスの6地震を対象に地盤増幅度の観測値と計算値を比較したが、ここではマグニチュード7クラスの地震の結果のみ示す。図1に最大地動加速度、図2に最大地動速度の地盤増幅度の観測値と計算値の対応を示す。図1、図2を見ると、最大地動加速度の方が観測値と計算値のばらつきが大きい傾向にあるが、全体的に見ると両者に相関が見られ、ほとんどの計算値が観測値の0.5~2倍の範囲に入っている。



(a) 2008年岩手・宮城内陸地震
($M_{JMA}=7.2$)



(b) 2011年3月11日茨城県沖の地震
($M_{JMA}=7.6$)



(c) 2011年4月7日宮城県沖の地震
($M_{JMA}=7.2$)

図1 最大地動加速度の地盤増幅度の観測値と無限積分による計算値の対応

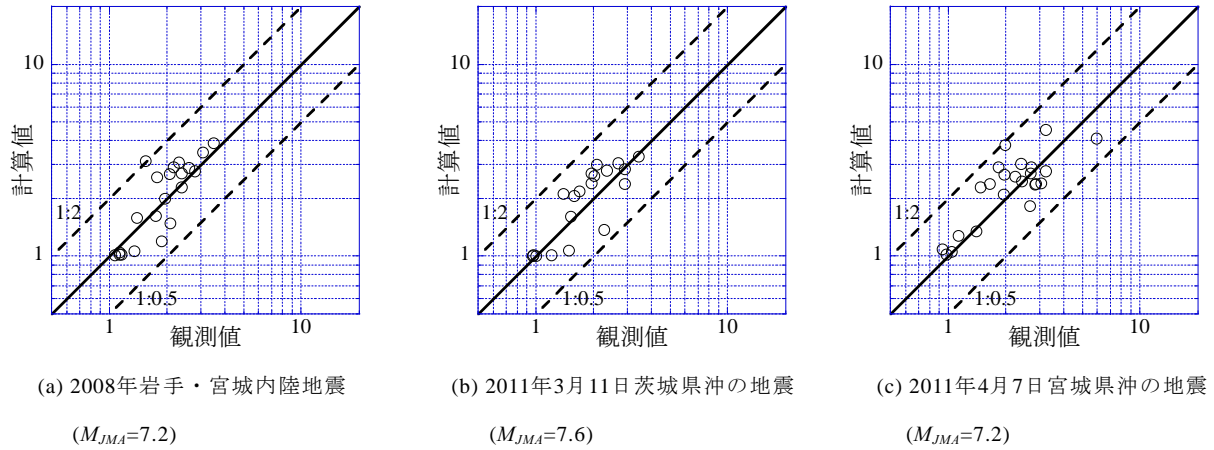


図2 最大地動速度の地盤増幅度の観測値と無限積分による計算値の対応

2. 地震動スペクトルの台形積分値による地盤増幅度評価式

先の無限積分値による評価手法は解析的に地盤増幅度を評価することができるが、サイト増幅特性を式(4)~(6)の関数によってフィッティングさせる必要がある。また、評価式が長い計算が煩雑である。そこで無限積分を台形積分に置き換えることにより、サイト増幅特性をフィッティングさせる手間などを省き、無限積分による方法よりも簡便に地盤増幅度を評価する手法を提案した。地盤増幅度評価の基本となる式(1)において、無限積分値を0~50Hzを対象とした台形積分の積分値に置き換え、最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度を評価した。

解析対象とした地震はマグニチュード6~9クラスの6つの地震である。 $M_W=9.0$ の2011年東北地方太平洋沖地震は野津²⁾の提案した疑似点震源モデルのサブイベントの情報を解析に使い、その他の地震は無限積分値による評価と同じ震源情報を用いた。図3に2011年東北地方太平洋沖地震における最大地動加速度と最大地動速度の地盤増幅度の観測値と計算値の対応を示す。計算値が観測値に比べて大きくなる傾向が見られるが、おおむね観測値の0.5~2倍の範囲におさまり、高い相関が見られた。その他の5つの対象地震でも、同様の傾向が見られた。また、観測値と計算値のばらつきを表すRMS値はいずれの地震でも最大地動速度が最大地動加速度よりも小さな値となり、最大地動速度の方が地盤増幅度評価式の精度が良いことが明らかになった。

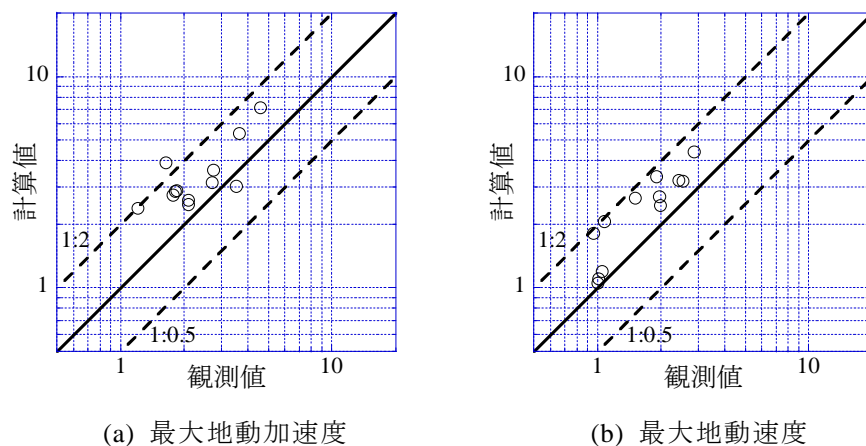


図3 2011年東北地方太平洋沖地震における地盤増幅度の観測値と台形積分による計算値の対応

3. 平均S波速度をパラメータとする経験的な地盤増幅度評価式

上記の2つの手法は震源スペクトルやサイト増幅特性からなる地震動スペクトルの積分値によって地盤増幅度を評価するものであったが、広域的な地盤増幅度評価を行う際には、より簡便な評価手法が必要である。地盤増幅度評価には表層30mの平均S波速度をパラメータとする経験式が広く用いられているが、ここでは表層30mの平均S波速度だけでなく、大規模地震時に励起される長周期地震動と関連する深部までの平均S波速度をパラメータとした地盤増幅度評価式を求めた。さらに得られた地盤増幅度評価式によって東海地方で発生が懸念される大規模地震を想定した地盤増幅度評価を行った。評価に必要な地盤情報は日本全国を対象に整備されている地震ハザードステーション(J-SHIS)³⁾の地盤情報を用いた。

地盤増幅度評価式は地震観測記録から評価した地盤増幅度と以下の式で得られる地盤増幅度 F の誤差が最小となるようにして求めた。

$$\log F = c_1 \log \left\{ \sum_{i=1}^3 c_{i+1} / \bar{V}_i \right\} + c_5 \quad (7)$$

ここに $c_1 \sim c_5$ は係数、 \bar{V}_i は表層からある深さまでの平均S波速度($i=1 \sim 3$)である。式(7)は非線形の式であるため、粒子群最適化法によって係数を求めた。 \bar{V}_i として、表層30、100、500、1000、1500、3000mの平均S波速度を用い、最適な地盤増幅度評価式を検討した結果、表層100、500、1500mの \bar{V}_i を用いることとした。地震観測記録から評価した地盤増幅度は $M_w=7 \sim 7.9$ の地震記録を対象に求めた値である。図4に地盤増幅度の観測値と式(7)による計算値の対応を示す。同図に示す決定係数 R^2 から明らかなように、地盤増幅度の観測値と計算値の対応が良いことが分かる。

求めた式(7)によってマグニチュード7クラスの大規模地震を想定した場合の東海地方の最大地動速度の地盤増幅度分布を評価した。地盤増幅度の評価に必要な地盤の平均S波速度はJ-SHISで公開されているデータを用いた。J-SHISで公開されている深部地盤構造は1kmメッシュのデータであるので、地盤増幅度は各1kmメッシュの中心座標の地点の値とした。表層30mの平均S波速度は250mメッシュの値であるので、1kmメッシュの中で最も小さい250mメッシュの表層30mの平均S波速度の値を増幅度評価に用いた。

図5に評価した地盤増幅度分布図を示す。増幅度分布は約10km間隔で示しており、色の濃い地点ほど地盤増幅度が大きい。図5から分かるように名古屋市とその周辺の地域で地盤増幅度が大きくなっている。

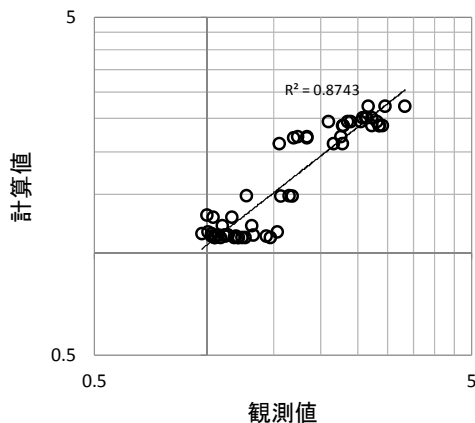


図4 地盤増幅度の観測値と式(7)による計算値の対応

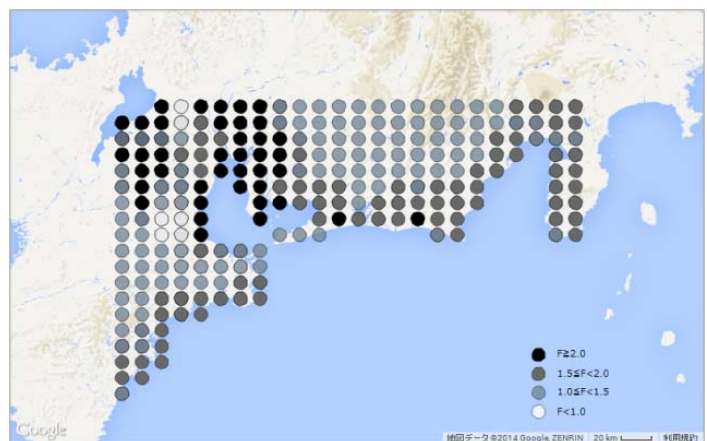


図5 東海地方の地盤増幅度分布

(実験調査によって得られた新しい知見)

本研究では巨大地震を対象に深部までの地盤構造と地震規模依存性を考慮した地盤増幅度評価手法として3つの評価式を提案した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 地震動スペクトルの無限積分値によって地盤増幅度を評価する手法では従来の研究で対応できなかった複雑なサイト増幅特性に対応する地盤増幅度評価式を提案した。マグニチュード6～7クラスの地震に対して、地震観測記録から求めた地盤増幅度(観測値)と評価式による地盤増幅度(計算値)を比較したところ、両者に良い対応が見られた。
- (2) 上記の地震動スペクトルの無限積分値を台形積分値に置き換えることにより、煩雑な計算作業を無くし、簡便に地盤増幅度を評価できる手法を提案した。評価手法を2011年東北地方太平洋沖地震に適用し、地盤増幅度の観測値と計算値を比較した。その結果、全体的に計算値が観測値よりも大きくなる傾向が見られたが、両者には高い相関が見られた。
- (3) 広域的な地盤増幅度評価を行う際はより簡便な手法が必要であるため、地表からある深さまでの平均S波速度をパラメータとする地盤増幅度評価式を構築した。既往研究では一般的に表層30mの平均S波速度が用いられているが、本研究では長周期地震動と関連する深い地盤構造の影響を考慮するために、地表から100m、500m、1500mまでの平均S波速度をパラメータとする地盤増幅度評価式を求めた。得られた地盤増幅度評価式によって、マグニチュード7クラスの大規模地震を想定した場合の東海地方の最大地動速度の地盤増幅度分布を求めた。その結果、名古屋市とその周辺の地域で地盤増幅度が大きい傾向が見られた。

謝辞

本研究では独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net観測記録、J-SHISの地盤情報を利用して頂きました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西川隼人、宮島昌克：地震規模依存性を考慮した地盤増幅度評価式の改良と観測増幅度との比較、日本地震工学会論文集、Vol. 12、No. 3、pp.34-48、2012.
- 2) 野津厚：少ない数のパラメータで記述された海溝型巨大地震の震源モデル、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、pp.61-62、2012.
- 3) 地震ハザードステーション(J-SHIS) : <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>(2014年11月16日閲覧)

(発表論文)

- 1) 西川隼人、宮島昌克：地震動スペクトルによる地盤増幅度評価、第34回土木学会地震工学研究発表会、講演番号 D21-634、2014.
- 2) 西川隼人、宮島昌克：合成したサイト増幅特性による地盤増幅度評価式の検討、第14回日本地震工学シンポジウム、pp.3706-3715、2014.
- 3) 西川隼人、宮島昌克：深部地盤構造を考慮した経験的な地盤増幅度評価式の検討、平成26年度土木学会中部支部研究発表会、pp.57-58、2015.
- 4) 西川隼人、宮島昌克：合成したサイト増幅特性による地盤増幅度評価式の検討、日本地震工学会論文集(特集号)、(投稿中).