

地盤非線形性を考慮した最大地動の増幅係数の簡易予測手法

清水建設 技術研究所 正会員 藤川 智

1. はじめに

地震学や地震工学の成果により、高度な強震動予測が可能となっているが、様々な地震を対象とする地震ハザード評価¹⁾や、緊急地震速報を利用した即時の予測などでは、距離減衰式と増幅係数(サイトごとの補正係数)の組合せによる、簡便な地震動(最大地動)予測手法が用いられる。増幅係数は、微地形や表層平均S波速度などから、経験的にその平均値が与えられることが多い。最近では、強震動まで適用範囲を広げるために、地盤の非線形性を考慮した増幅係数の予測手法^{2),3),4)}が提案されている。本研究では、最大加速度と最大速度の増幅係数について、地盤の非線形性を考慮した新たな予測手法の提案を行う。

2. 地震観測記録と観測点地盤情報

予測手法の構築には観測記録を用いた。地盤非線形性を考慮するため、様々な硬さの地盤で、小振幅から大振幅までの観測記録が得られている地震が適している。ここでは、2003年十勝沖地震(M8.0)と余震(M5.2~M7.1の32地震)、および2004年11月29日の釧路沖の地震(M7.1)と余震(M6.9)を対象とし、防災科研のK-NETとKiK-netの83地点の記録を利用した。地表記録の水平2成分のうち最大値が大きい成分を用いた。観測点と震源の距離の算出には、十勝沖地震本震では断層面の大きさを考慮⁵⁾して断層最短距離を計算し、その他の地震は点震源を仮定した。地盤のパラメータは表層20mの平均S波速度(AVS20)を用いた。既往の研究では、表層30mの平均S波速度(AVS30)が用いられることが多いが、K-NETでは20mまでしかS波速度が与えられていないことと、AVS30とAVS20の相関がよい⁶⁾ことから、ここではAVS20を用いた。AVSの算出は、層厚を伝播時間の総和で割った値と定義した。観測点のAVS20の最小値は76、最大値は673[m/s]である。

3. 観測記録の分析

各観測点における増幅係数は、既存の距離減衰式を基準として観測記録から算出した(いわゆる Non-reference site approach)。距離減衰式として、加速度は福島・田中⁷⁾の式を、速度には司・翠川⁸⁾の式を用いた。

地震*i*による観測点*j*での増幅係数 A_{ij} を、地表観測記録の最大地動 SG_{ij} と距離減衰式による最大地動 SR_{ij} (基盤地震動)の比として、次式のように定義する。

$$\log A_{ij} = \log SG_{ij} - (\log SR_{ij} + \delta_i) + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\delta_i = \log \alpha_{vs} + \eta_i$$

ここで、 \log は常用対数(\log_{10})を表す。 δ_i は SR_{ij} の補正項で

あり、距離減衰式による最大地動に対する地震*i*による最大地動の系統的なずれを表すイベント項 η_i と、地盤のAVS20に関する補正項 α_{vs} の和で表す。 α_{vs} は基準とする地盤のAVS20と距離減衰式が基準とする地盤のAVS20が異なる場合に、増幅係数を補正するものである。 ε_{ij} は地震内のばらつきを表す項である。増幅係数の算出にあたっては、地震*i*により同時に得られた記録のうち、AVS20 \geq 300[m/s]の地点における観測値の対数と基盤地震動の対数の残差の平均を δ_i とし、地震*i*による全記録をこれで補正した。このとき、基盤地震動は、(1)式の右辺第2項に補正される。

AVS20の大きさを観測点を5グループに分類し、増幅係数*A*と基盤地震動*SR*の関係を図1に示す。このとき、加速度は2[cm/s/s]未満、速度は0.2[cm/s]未満の小振幅のデータは切り捨てた。AVS20が150[m/s]以下と、150~200[m/s]のグループでは、*SR*の大きさに従い、増幅係数が低減していることが明瞭にわかる。これは、加速度のみではなく、速度でも見られる。藤本・翠川(2006)では、速度の増幅係数は入力レベルに依存せず、非線形性を考慮していないが、ここでは異なる結果が見られた。

4. 増幅係数の予測手法

上述の基盤地震動*SR*と増幅係数*A*の関係から、*SR*があるレベル(*SR_c*)より小さい範囲(Low-input motion)と、それより大きい範囲(High-input motion)に分け、*SR*と*A*が両対数軸上で、バイリニアの関係と仮定する。ここでは、*SR_c*を加速度は10[cm/s/s]、速度は1[cm/s]に設定した。

Low-input motionでの増幅係数 A_L は、基盤地震動の大きさには依存せず、AVS20により決まる一定値と仮定した。図2に示す増幅係数 A_L とAVS20の関係を示す。両対数軸上で直線関係を仮定し、以下の回帰式を得た。

$$\log A_L = a + b \cdot \log AVS20 \quad (2)$$

$$\text{加速度: } a = 1.91, b = -0.730 (2 \leq SR < 10 [\text{cm/s/s}])$$

$$\text{速度: } a = 2.07, b = -0.808 (0.2 \leq SR < 1 [\text{cm/s}])$$

このとき、増幅係数が1になるAVS20は、加速度の場合は411[m/s]、速度の場合は361[m/s]となる。

次に、High-input motionでの増幅係数 A_H のモデル化について述べる。先述の図1には、ポイント(*SR_c*, A_L)を通る回帰直線を示した。このとき勾配 SP_H とAVS20(各グループの平均値)の関係を図3に示す。AVS20が小さいほど、勾配 SP_H が小さく(勾配の絶対値が大きくなる)なっている、ここでは、AVS20 \geq 245m/sで勾配はゼロとし、AVS20<245m/sで勾配とAVS20の対数が直線関係になるように回帰した。

キーワード 増幅係数, 地盤非線形, 距離減衰式, 平均S波速度, 強震記録

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設 技術研究所 TEL03-3820-6549

回帰式は次式であり、図3中に示した。

$$SP_H = a + b \cdot \log AVS20 \quad (AVS20 < 245 [m/s]) \quad (3a)$$

加速度: $a = -1.70, b = 0.710$

速度: $a = -1.17, b = 0.489$

$$SP_H = 0 \quad (AVS20 \geq 245 [m/s]) \quad (3b)$$

これより、High-input motionでの基盤地震動SRと増幅係数 A_H の関係は次式であらわされる。

$$\log A_H = SP_H \cdot (\log SR - \log SR_c) + \log A_L \quad (4)$$

加速度: $SR_c = 10 [cm/s/s]$

速度: $SR_c = 1 [cm/s]$

以上より、加速度と速度の増幅係数は、地盤のAVS20と距離減衰式による基盤地震動だけで予測することが可能である。観測値と予測値の比較例を図4に示す。AVS20の違いにより、Low-input motionでの増幅係数の差と、High-input motionでの勾配の差が見られ、広範囲の基盤地震動に対して観測値とよく対応している。

4 まとめ

地震ハザード評価等で地表の最大地動を予測するための増幅係数を、地盤非線形性を考慮し、簡易に評価する手法を開発した。本手法の特徴は、必要なサイト情報がAVS20と距離減衰式による基盤地震動SRのみの簡易な予測式であることと、加速度のみならず速度にも増幅係数の振幅依存性を取り入れたことである。この増幅係数を用いることにより、地震ハザード評価の精度向上につながる可能性がある。ただし、予測式の構築には、限られた地域の強震記録を用いたため、他の強震記録で妥当性を検証する必要がある。

謝辞: 観測記録は、(独)防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの記録を使わせていただきました。また、当社の奥村俊彦博士と渡辺基史氏には、十勝沖地震の震源に関するご教授とアドバイスをいただきました。

参考文献 1)地震調査研究推進本部: 全国を概観した地震動予測地図報告書, 2006. 2)Sugito et al.: 7th Japanese earthquake engineering symposium, No.96, p.571-576, 1986. 3) Choi and Stewart: Earthquake Spectra, Vol.21, No.1, pp.1-30, 2005. 4)藤本, 翠川: 日本地震工学会論文集, 6巻, 1号, pp.11-22, 2006. 5)奥村, 渡辺, 藤原: 地震学会秋季大会, B026, 2004. 6)Kanno et al.: Bull. Seism. Soc. Am., 96, pp. 879-897, 2006. 7)福島, 田中: 日本地震学会秋季大会, 1992. 8)司, 翠川: 日本建築学会構造系論文集, 523号, pp.63-70, 1999.

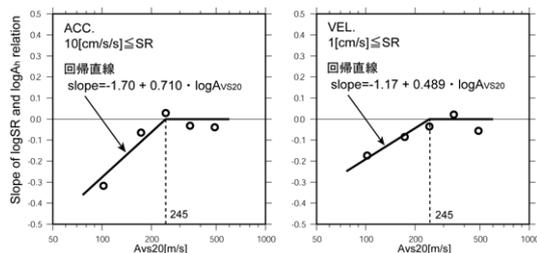


図3 high input-motionでの増幅係数 A_H ~SR関係の勾配 SP_H とAVS20の関係。プロットは図1のグループごとのAVS20の平均値と勾配 SP_H の関係を示す。実線はモデル化した関係を示す。

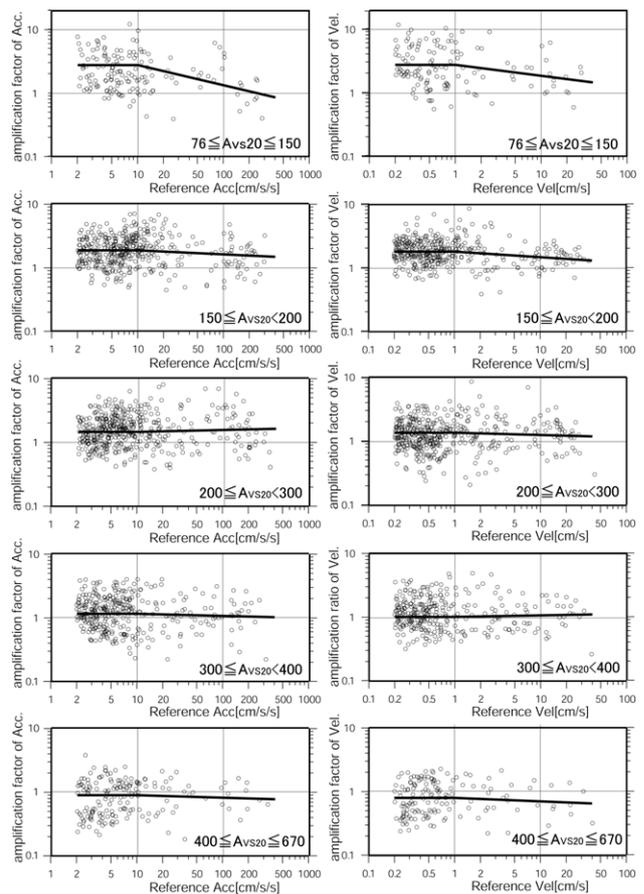


図1 増幅係数Aと基盤地震動SR(横軸)の関係。プロットは観測記録による増幅係数を示す。実線は SR_c (加速度は10cm/s/s,速度は1cm/s)以下は(2)式の回帰式による予測値を示し, SR_c 以上はAとSRの回帰直線を示す。

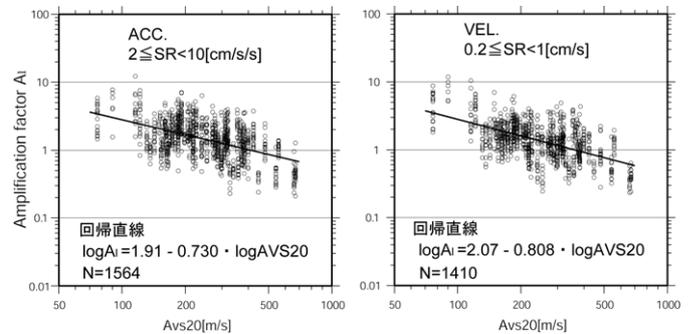


図2 low input-motionでの増幅係数 A_L とAVS20の関係。プロットは観測記録による増幅係数, 実線は回帰直線を示す。

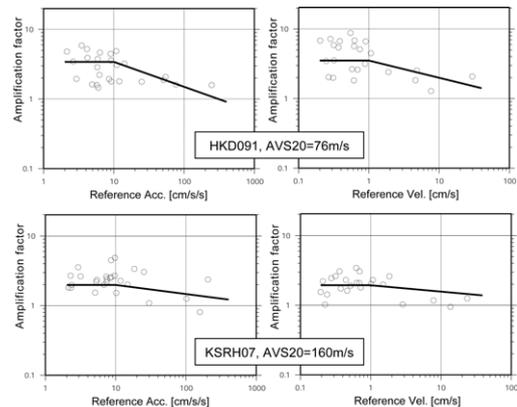


図4 増幅係数の観測値(プロット)と予測値(実線)の例。