建物被害と相関を持つ地震動強さ指標に対応した表層地盤増幅率の推定に関する研究

有馬　拓

1.　はじめに

1996 年から導入された気象庁計測震度は地震発生直後の災害応急対応の基準に用いられるなど、地震防災上で非常に重要な指標であるが、その一方で建物被害との相関が低いことが指摘されている [1)]。

そこで境・他(2002)[2)]は 1～2 秒程度の弾性応答が実際の建物被害と強い相関をもつことを示し、これを地震動強さ指標として用いることを提案した。さらに、新井・境（2011）[3)]では、その地震動強さ指標を用いて地震被害推定システムを提案した。このシステムでは地表の地震動強さ指標を計算する際に表層地盤特性を考慮するが、木造建物、中低層非木造建物の大きな被害と相関をもつやや短周期に対応した地震動強さ指標（1-1.5 秒応答）[4)5)]の増幅率としては、先名・翠川（2009）[6)]による微地形区分ごとのスペクトル増幅率の 1-1.5 秒の値の平均値、また高層非木造建物の大きな被害と相関をもつやや長周期に対応した地震動強さ指標（2-4 秒応答）[7)]の増幅率としては、防災科学技術研究所の J-SHIS 地震ハザードステーションで公開されている微地形区分ごとの最大速度の増幅率 [8)]が用いられている。そのため、それぞれの地震動強さに対応した増幅率があれば、さらに精度の高い被害推定が可能になると思われる。

そこで本研究では、建物被害と相関を持つ地震動強さ指標（減衰 5%の 1-1.5 秒応答，減衰 5%の 2-4 秒応答）に対応した新たな表層地盤増幅率を提案する。また、減衰 5%の 1-1.5 秒応答よりも正確に建物被害を推定できる減衰 20%の 1-1.5 秒応答 [9)]も検討を行った。

2.　導出方法

導出方法として、地震間誤差を考慮した観測値と地震動予測式から求まる予測値の偏差を表層地盤増幅率と定義し、これと日本全国で 250m メッシュごとに得られる AVS30（表層 30m までの平均 S 波速度）との関係式を導出することにより、広域を対象とした統一的な表層地盤増幅率を得る。その際用いる応答スペクトルの地震動予測式として、1-1.5 秒平均加速度応答，2-4 秒平均加速度応答を算出する地震動予測式を構築する。ここで、地震間誤差とは地震動予測式から求まる予測値に対する地震ごとの平均的な特性である。

3.　地震記録のデータベース

本研究では、防災科学技術研究所 [10)]による K-NET と KiK-net で観測された 1996 年 6 月 2 日 18 時 37 分から 2018 年 9 月 6 日 3 時 8 分までの強震記録を用いる。そして本研究では収集した観測記録から Kanno et al.2006[11)]（以後 KN06）と同様に以下の条件で観測記録を選別し、データベースを構築した。

① M_wが 5.5 以上である。
② 震源深さが 200km 以内である。
③ 地表面で観測された強震記録である。
④ 直交する水平動 2 成分が記録されている。
⑤ 条件を満たす観測点が 5 つ以上ある。
⑥ Fukushima and Tanaka[12)]にて提案されている以下の式を満たす。

$$F_{(X,M_w)} > \log 2 \tag{1}$$

$$F_{(X,M_w)} = 0.42M_w - 0.0033X + 1.22 - \log(X + 0.025 \cdot 10^{0.42M_w}) \tag{2}$$

また、F-net[13)]より得られる震源深さ、震源メカニズム、プレート境界位置から地殻内地震（Crustal）、プレート境界地震（Inter）、スラブ内地震（Intra）の 3 種類に分類し、火山性地震やアウターライズ地震の可能性のある地震は排除した。なお、地震タイプごとの観測記録と地震の数を表 1 にまとめる。

表 1　本研究で用いた観測記録と地震の数

Crustal		Inter		Intra	
Data	Earthquake	Data	Earthquake	Data	Earthquake
24457	123	32817	174	24072	161

4.　地震動予測式の導出

本研究では、目的変数を減衰 5%の 1-1.5 秒平均加速度応答、減衰 20%の 1-1.5 秒平均加速度応答、減衰 5%の 2-4 秒平均加速度応答、説明変数を断層最短距離 X とモーメントマグニチュード M_w とし、式(3)のモデルを用いて地震タイプごとに回帰分析を行った。回帰モデルは、多くの研究で提案されている地震動予測式の基本的なパラメータを考慮した形に加え、M_w項は一次式では震源スペクトルのコーナー周波数がうまく表現できないとの指摘 [14)]もあるため、M_w項を二次式で表現した形に設定した。

$$\log pre_k = a_k{}'M_w{}^2 + a_kM_w - b_kX + c_k - \log(X + d_k \cdot 10^{0.50M_w}) \tag{3}$$

ここで、pre_kは地震タイプkの予測値を示す。$a_k{}'$、a_k、b_k、c_k、d_kは地震タイプkの回帰係数を表し、M_wはモーメントマグニチュード、Xは断層最短距離を示す。$10^{0.50M_w}$は地震動の振幅が震源近傍で飽和する現象を再現するための項である。ここで対数は常用対数を表す。加速度応答スペクトルは、それぞれの波形の水平動 2 成分の時間領域におけるベクトル合成波形から算出した。M_wは F-net もしくは気象庁[15]より得た。また、震源から観測点までの距離については、断層モデルが明らかな場合は断層最短距離、それ以外の地震に関しては震源距離を採用して代用している。断層モデルは気象庁、防災科学技術研究所、地震調査研究推進本部[16]による震源過程解析の結果を用いた。

地震動予測式導出における回帰分析には、遺伝的アルゴリズム（GA）[17]を用いた。探索範囲は既往研究の回帰係数を参考に設定した。本研究では、パラメータを 6 bit で離散化し、1 世代あたりの個体数は 40、世代数は 500、交叉率は 70%とする。なお、断層近傍の観測記録の影響を十分に反映させるために断層最短距離によって記録に重み付けを行った。重み付けは、Morikawa and Fujiwara (2013)[18]（以後 MF13）と同様に（X≦10 : 10＜X≦20 : 20＜X≦40 : 40＜X＝8 : 4 : 2 : 1）とした。導出した回帰係数を表 2 に示す。

図 2 にプレート境界地震における M_w の違いによる加速度応答の予測値の変化を示す。減衰 5%、減衰 20%の 1-1.5 秒平均加速度応答と比較し、減衰 5%の 2-4 秒平均加速度応答ではモーメントマグニチュードによる予測値の変化が大きいことが分かる。これは地殻内地震やスラブ内地震でも同様の結果が得られた。

5. 表層地盤増幅率の導出

地震動予測式による予測値と観測記録の誤差は大別すると地震間誤差と地震内誤差に分けられる。地震間誤差は予測値に対する地震ごとの平均的な特性であり、式(4)で表せる。一方、地震内誤差は一つの地震内で生じる誤差であり、式(5)で表せる。

$$\sigma_{inter_j} = \frac{1}{N_j}\sum_{i=1}^{N_j}\left(\log obs_{ij} - \log pre_{ij}\right) \tag{4}$$

$$\sigma_{intra_j} = \sqrt{\frac{1}{N_j}\sum_{i=1}^{N_j}\left(\log obs_{ij} - \sigma_{inter_j} - \log pre_{ij}\right)^2} \tag{5}$$

ここで、N はデータ数、obs は観測値、pre は地震動予測式から求まる予測値、i は観測点、j は地震を表す。

地表で観測された強震動は表層地盤の硬軟によってその振幅が大きく変わることから、地震内誤差の生じる主な要因は地盤増幅特性であると考えられる。よって、本研究では式(6)で表す地震間誤差を考慮した観測値と予測値の偏差の観測点ごとの平均値を表層地盤増幅率とみなし、地盤の硬軟を表す AVS30 との関係式を構築する。

$$Res_i = \frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N_i}\left(\log obs_{ij} - \sigma_{inter_j} - \log pre_{ij}\right) \tag{6}$$

また、本研究における表層地盤増幅率は、KN06 と同様に式(7)で定義した。

$$\log G = Res = p\log AVS30 + q \tag{7}$$

ここで、G は表層地盤増幅率、p、qは回帰係数である。対数は常用対数とする。図 3 に減衰 5%の 1-1.5 秒平均加速度応答における偏差と AVS30 の関係を示す。偏差は AVS30 が増加するにつれて減少し、AVS30=800 m/s 程度で一定となる傾向がみられた。これはいずれの地震動強さ指標でも同様の傾向が見られた。そこで一つの直線で表現されるモデルをモデル 1、AVS30=800 m/s で一定となるモデルをモデル 2 として比較を行った。

式(8)で示す誤差をそれぞれのモデルで求め、精度の検討を行った。

$$\sigma_{G_m} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\{Res_i - \log G_m\}^2} \tag{8}$$

ここで、G_m は各モデルの表層地盤増幅率である。図 4 に回帰モデルによる誤差の比較を示す。いずれの地震動強さ指標においてもモデル 2 の方が誤差は小さいため本研究ではモデル 2 を表層地盤増幅率と AVS30 の関係式として採用した。得られた回帰係数を表 3 に示す。

表 2　回帰分析によって得られた係数

Crustal	a'	a	b	c	d
1-1.5s(5%)	-0.0381	1.1359	0.0007	-2.4141	0.0011
1-1.5s(20%)	-0.0162	1.0100	0.0037	-2.0100	0.0420
2-4s(5%)	-0.0126	1.0938	0.0026	-3.1875	0.0300
Inter	a'	a	b	c	d
1-1.5s(5%)	-0.0383	1.1875	0.0017	-2.4688	0.0180
1-1.5s(20%)	-0.0420	1.1875	0.0022	-2.4375	0.0134
2-4s(5%)	-0.0488	1.4375	0.0013	-4.2812	0.0122
Intra	a'	a	b	c	d
1-1.5s(5%)	-0.0215	0.9797	0.0023	-1.7375	0.0303
1-1.5s(20%)	-0.0238	0.9437	0.0022	-1.6750	0.0151
2-4s(5%)	-0.0237	1.0734	0.0012	-3.0687	0.0081

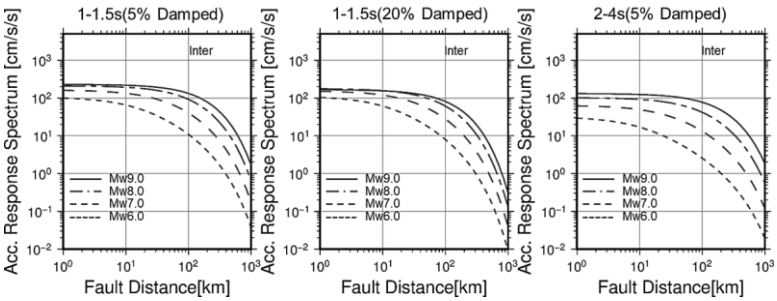

図 2　M_w の違いによる加速度応答の予測値の変化

また、式(3)で求めた予測値の地盤特性補正を行い、補正前後の地震内誤差の標準偏差を比較することで補正の効果を検証する。図 5 に地盤特性補正前後の地震内誤差の標準偏差の比較を示す。いずれの指標も標準偏差が小さくなり改善が見られた。

6. 既往の地震動予測式との比較

本研究で提案する地震動予測式による予測値と既往研究との比較を行う。ここでは予測値が加速度応答スペクトルであるものを比較対象として MF13、内山・翠川（2006）[19]（以後 UM06）を選択した。なお、MF13、UM06 による予測値は減衰 5%の加速度応答であるため、本研究による減衰 20%の 1-1.5 秒平均加速度応答の予測値の比較は行っていない。

図 6 に Mw=7.0 とした場合の予測値を示す。MF13 と UM06 において、周期 1.0 秒、1.1 秒、1.2 秒、1.3 秒、1.5 秒のそれぞれの予測値の平均値を 1-1.5 秒平均加速度応答とし、周期 2.0 秒、2.2 秒、2.5 秒、3.0 秒、3.5 秒、4.0 秒のそれぞれの予測値の平均値を 2-4 秒平均加速度応答とした。また、UM06 では震源深さを考慮しているため地殻内地震、プレート境界地震、スラブ内地震でそれぞれ D=10 km、D=40 km、D=60 km としている。ここで、UM06 は AVS30 が 500 m/s 程度の工学的基盤における予測値であるため、本研究と MF13 で AVS30=500 m/s の地盤における予測値に補正を行った。

地殻内地震を対象とした比較において、本研究による予測値は MF13 や UM06 と距離 300km 以下でよく一致する。プレート境界地震を対象とした比較において、1-1.5 秒平均加速度応答、2-4 秒平均加速度応答のどちらでも本研究による予測値は距離 100 km 以上で同程度の値を示しているが、100 km 以下で MF13 や UM06 よりもやや小さな値を示す。また、スラブ内地震を対象とした比較において、1-1.5 秒平均加速度応答や 2-4 秒平均加速度応答において距離 200 km 程度以下で本研究による予測値は小さい。これは、MF13 においては震源近傍における予測値の飽和を表す係数が本研究に対して小さいからと考えられる。一方、UM06 では震源が深いほど震源から近い距離の予測値は大きくなる性

表 3　回帰分析によって得られた係数

	p	q
1-1.5s(5%)	-1.0454	2.6563
1-1.5s(20%)	-1.0319	2.6516
2-4s(5%)	-0.8143	2.1029

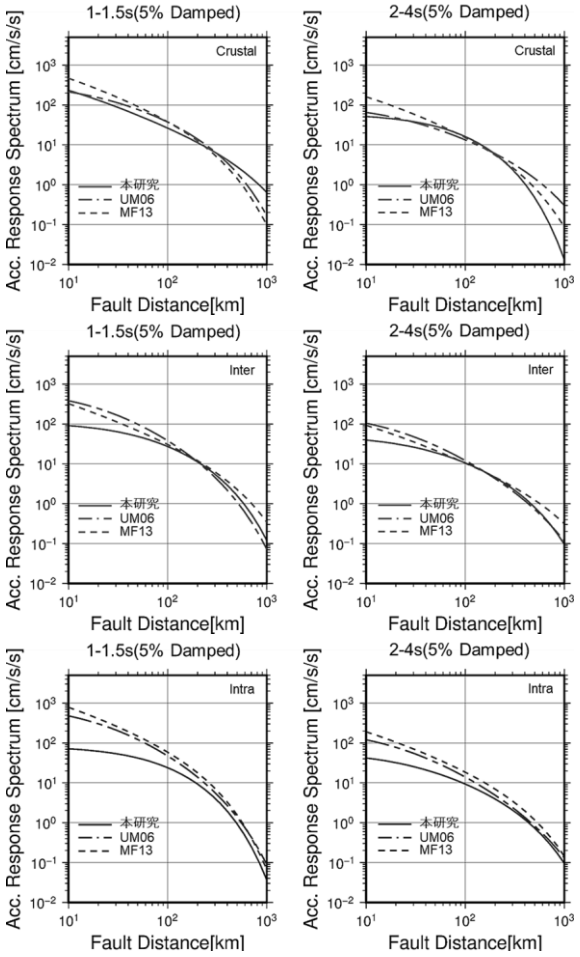

図 6　既往の地震動予測式との比較

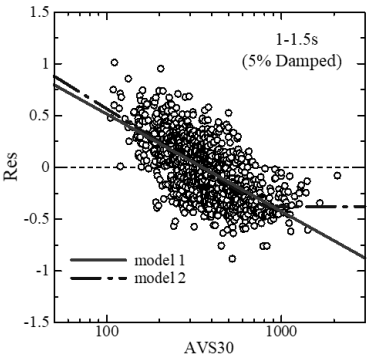

図 3　偏差と AVS30 の関係と各モデルの回帰直線

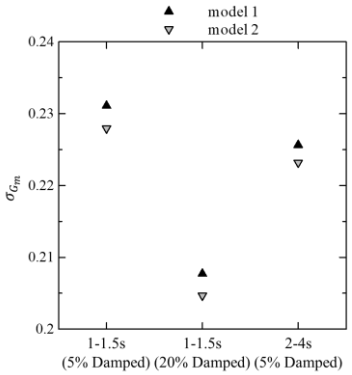

図 4　回帰モデルによる誤差の比較

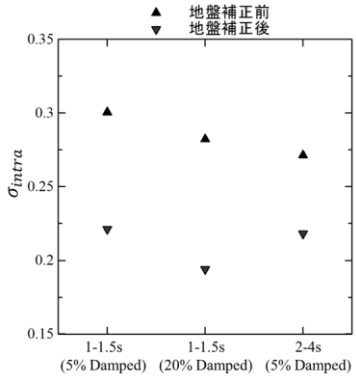

図 5　地盤補正前後の地震内誤差の比較

質があるため、これが影響したと考えられる。

7. 2016 年熊本地震における適用例

過去に起きた地震を対象に、本研究で導出した地震動予測式による予測値と観測値の比較を行う。ここでは揺れによる建物被害が大きかった 2016 年 4 月 16 日の熊本地震の本震（Mj=7.3、Mw＝7.1）を選んだ。図 7 に熊本地震における観測値と本研究の地震動予測式による予測値の比較を示す。図 7 の点線は標準偏差を表す。減衰 5%の 1-1.5 秒平均加速度応答では観測値の多くが標準偏差内にあり、概ね精度よく観測値を評価していることが確認できる。一方、減衰 20%の 1-1.5 秒平均加速度応答や減衰 5%の 2-4 秒平均加速度応答において断層距離 10km 程度以内で過小評価している。この要因の一つに断層の動きそのものが作る地殻変動（近地項）の影響が考えられる。断層のごく近傍では強い揺れに加え、近地項による影響を考慮する必要があると考えられる。

今後の課題として近地項に加え、様々な地震動の影響についても検討を行い、地震動予測式の精度向上を図る必要があると思われる。

8. 総括

本研究では 1-1.5 秒平均加速度応答，2-4 秒平均加速度応答を算出する地震動予測式を構築し、地震間誤差を考慮した観測値と予測値の偏差を表層地盤増幅率とみなし、AVS30 との関係式を導出した。得られた知見を以下にまとめる。

・得られた表層地盤増幅率に関して、2-4 秒応答では 1-1.5 秒応答に対して AVS30 による影響は比較的小さい

・得られた表層地盤増幅率の回帰式で本研究における地震動予測式から求まる予測値の地盤特性補正を行った結果、いずれの地震動強さ指標においても地震内誤差の標準偏差は小さくなり、改善が見られた。

・既往の地震動予測式との比較を行った結果、本研究における予測値は断層距離が短くなるにつれて既往の地震動予測式よりも小さな値となる傾向が見られた。

・2016 年熊本地震を対象に本研究で導出した地震動予測式による予測値と観測値の比較を行った結果、近地項のような特異な地震動の影響も地震動予測式に考慮する必要があると考えられる。

【参考文献】

1) 境有紀, 吉岡伸悟, 纐纈一起, 壁谷澤寿海: 1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, No. 549, pp. 43-50, 2001.
2) 境有紀, 纐纈一起, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp. 85-91, 2002.
3) 新井健介, 境有紀: 建物被害と相関を持つ地震動強さ指標を用い構造種別や層数を考慮した地震被害推定システムの開発, 日本地震工学会論文集, 第11巻, 第4号, 2011
4) 境有紀: 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討－2007年能登半島地震, 新潟県中越沖地震のデータを加えて－, 日本建築学会構造系論文集, 第642号, 2009. , pp. 1531-1536.
5) 熊本匠, 境有紀: 非木造建物の被害と相関を持つ地震動の周期帯—2007年能登半島地震, 中越沖地震の非木造建物の被害状況との対応—, 日本建築学会学術講演梗概集, 2008. , pp. 675-676.
6) 先名重樹, 翠川三郎: 地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第4号, 2009. , pp. 11-25.
7) 境有紀, 津野靖士, 纐纈一起, 神野達夫, 地震動の破壊力から見た改正基準法による設計用入力地震動, 第29回地盤震動シンポジウム 改正基準法の地震動規定を考える, 2001. , pp. 111-122.
8) 地震ハザードステーション J-SHIS, http://www.j-shis. bosai. go.jp/
9) 境有紀, 2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性－建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標－, 日本建築学会構造系論文集, 第683号, 35-40, 2013.
10) 防災科学技術研究所, http://www.bosai.go.jp/
11) Kanno et al. : A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bull. Seism. Soc. Am. , 96, pp. 879-897, 2006
12) 福島美光・田中貞二: 新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 地震学会講演予稿集, No. 2, 116. , 1992
13) NIED F-net 広帯域地震観測網, http://www.fnet.bosai.go.jp /top.php?LANG=ja
14) 池浦友則, 加藤研一, 武村雅之, 嶋悦三: 地震動スペクトルの回帰分析結果とその解釈, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造1, 331-332. , 1991
15) 気象庁, http://www.jma.go.jp/jma/index.html
16) 政府 地震調査研究推進本部, https://www.jishin.go.jp/
17) 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平, パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版株式会社, 1997
18) Morikawa Nobuyuki and H.Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol. 8, No. 5, 878-888, 2013
19) 内山泰生, 翠川三郎: 震源深さを考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第606号, 81-88, 2006

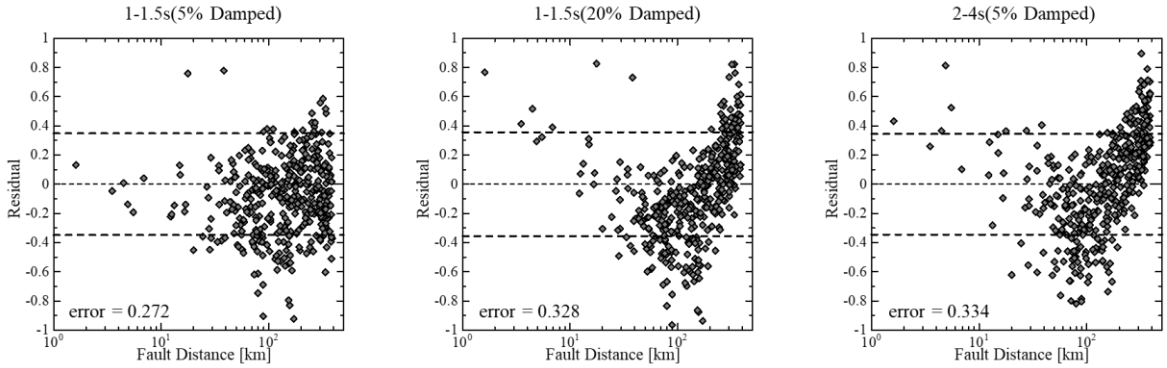

図 7　熊本地震の観測値と本研究による予測値の比較