利用目的に応じた地震動指標の距離減衰式を作成するための一般化手法の提案

(株)ANET (正)○下野 五月 (公財)鉄道総研 (正) 岩田 直泰 (公財)鉄道総研 (正) 是永 将宏
(公財)鉄道総研 野田 俊太 (株)ANET 小野 友也 (公財)鉄道総研 山本 俊六

1. 概要

緊急地震速報等による被害予測に資するため，著者らは地震動指標の予測式(距離減衰式[1])の精度向上を図っており，新たな距離減衰式を提案している(是永他[2])。ただし，既存の距離減衰式で予測した指標には地震動が大きいほど予測値が過小評価となるような，系統的な誤差の偏りがあることが分かっている。防災上の目的からはこうした予測値の誤差の偏りは是正したい。そこで本研究では，誤差の偏りが少なく，大きな地震動での誤差が小さい一般的な距離減衰式の作成手法と具体例を提案する。地震動の指標としては，加速度の水平合成(PGA)，主に鉄道各社で利用されている5Hzローパスフィルタを施した加速度の水平合成(PGAJR)，計測震度(I)及びSI値[3](SI)取り上げる。

2. データセット

使用したデータセットは1996年～2010年の間にK-NET及びKiK-netで観測された245地震29734波形から福島[4]に従い，最大加速度が10gal未満と推定される波形を除外した11133波形である。これには日本全国の内陸地震と海溝性地震を含み，マグニチュードは3.8から8.0，断層最短距離または震源距離は約1～400km，震源深さは約0～150kmまで広く分布する。

3. 距離減衰式

各指標の観測値をO，計算値をC，誤差をO/C(但しIのみO-Cとする。)とすると，是永他[2]で提案された距離減衰式においては，図1の一番左に示したように，Oが大きくなるに従い誤差がほぼ線形で増大しCが過小評価する相関が認められるが，この相関は指標を適当な関数hで変換した距離減衰式に置き換えることによって解消される。即ち，距離減衰式を一般化して以下のように関数fとhを用いて記述する。ここで，$\log(Y_{ij})$はlog(PGA)，log(PGAJR)，Iまたはlog(SI)である。また，Xは断層最短距離または震源距離(km)，Mは気象庁マグニチュード，Dは震源深さ(km)である。本稿ではhとして一次関数，fとして是永他[2]と同様の関数に限定して検討を行うが，高次の項を含め任意の関数に拡張が可能である。

$$h(\log Y_{ij}) = f(M, D, X)$$

以下では，(A)～(C)の3つの手法と具体例を提案する。また，地震動が相対的に大きい場合の予測精度に着目するため，評価するPGAの閾値(下限値)を100gal及び200gal，PGAJRの閾値を40gal及び120gal，Iの閾値を震度4及び震度5弱，並びに，SIの閾値として6kine及び12kineとして，全てのデータによる誤差のほかに，各指標の閾値以上のデータに対する誤差の大きさを検討する。

(A) 幾何減衰項の係数の導入

hを線形変換とした場合はfを線形変換することと同値であり，是永他[2]の方法に対しては幾何減衰項に係数を導入することと式の形の上で同等である。そこで，以下の式(式Aとする。)で，係数a_1, a_2, b, c_0, d_1, d_2, d_3, c_j(観測点ごとに決まる地盤補正値)，w_1, w_2およびw_3(ここでは，d_2は0.5，w_3は1に固定した。以下同様。)を，4段階の多段階回帰分析手法による回帰分析で決定した。eは誤差である(以下同様。)。結果の係数を表1，Oと誤差の分布を図1，各指標に対してデータ全体及び各閾値以上のデータのみに対する誤差を図2に示す。結果として何れの閾値でも誤差の偏りはほとんど解消しないが，全体の誤差は同等もしくは若干小さくなった。

$$\log Y_{ij} = a_1 M + a_2 D - bX + c_0 - d_3 \log\left(X + d_1 10^{d_2 M}\right) + c_j + \frac{w_1(M - w_2)}{1 + 10^{w_3(M - w_2)}} \pm e$$

地盤補正値c_jは平均が0となるように調整した(以下(B)及び(C)でも同様。)。そのため，任意の場所で本式を用いて地震動指標の予測をする上での大凡の傾向はc_jを0と仮定することで把握可能である。より高精度の予測を行う為には，地震計の設置場所では実測波形による観測値と本式による計算値を統計的に比較することで計算されるc_jの値を用いることが有効である。また，既知の地盤増幅率，表層地盤の平均S波速度や地盤種別等との比較から推定することも可能と考えられるが，その詳細な方法は今後の研究で検討を進めたい。

(B) 計算値の変換による補正

次に，距離減衰式による計算値$\log Y_{ij}^{old}$を関数hで変換したものを新たな計算値$\log Y_{ij}^{new}$とした。ここでは，以下の式のようにfは是永他[2]による結果，hは係数g1及びg2を用いた線形変換とし(式Bとする。)，g1及びg2の値は各指標の閾値以上のデータに対する誤差が小さくなり，かつ，Oと誤差の相関が小さくなるように決めた。結果を(A)の場合と同じ図表に示す。結果として全体の誤差は大きくなるが，何れの閾値以上のデータに対しても誤差が有意に小さくなり誤差の偏りがほぼ解消した。

$$g_1 \log Y_{ij}^{new} = \log Y_{ij}^{old} + g_2 = a_1 M + a_2 D - bX + c_0 - d_3 \log\left(X + d_1 10^{d_2 M}\right) + c_j + \frac{w_1(M - w_2)}{1 + 10^{w_3(M - w_2)}} + g_2 \pm g_1 e$$

キーワード 距離減衰式，地震動指標，多段階回帰分析，幾何減衰項，緊急地震速報，目的論

連絡先 〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2丁目23番地 (株)ANET TEL03-6866-7080

表１　距離減衰式の係数（式A～C）

式	指標	a1	a2	b	c0	d1	d3	w1	w2	g1	g2
A	PGA	0.51366	0.00621	0.00294	1.02388	0.00470	1.33112	0.00000	0.00000	-	-
	PGAJR	0.54696	0.00591	0.00246	0.43765	0.00430	1.26059	0.18804	4.81333	-	-
	I	1.19048	0.01126	0.00428	0.73930	0.00710	2.55059	-	-	-	-
	SI	0.69421	0.00550	0.00160	-0.98247	0.01304	1.50014	-	-	-	-
B	PGA	0.51404	0.00607	0.00404	0.48503	0.00581	1	-0.09495	5.70615	0.84204	-0.16511
	PGAJR	0.54634	0.00580	0.00332	0.01746	0.00492	1	0.17508	4.62703	0.81888	-0.20278
	I	1.09849	0.01065	0.00865	-1.38401	0.00279	1	-	-	0.83873	-0.43362
	SI	0.65626	0.00531	0.00295	-1.63288	0.01284	1	-	-	0.78969	-0.05546
C	PGA	0.61472	0.00597	0.00597	-0.04411	0.00753	1	-0.09228	5.64906	0.84204	-
	PGAJR	0.63245	0.00563	0.00526	-0.41343	0.00677	1	0.11778	4.55667	0.81888	-
	I	1.10819	0.00985	0.00997	-1.62458	0.00380	1	-	-	0.83873	-
	SI	0.69876	0.00494	0.00447	-1.65855	0.01765	1	-	-	0.78969	-

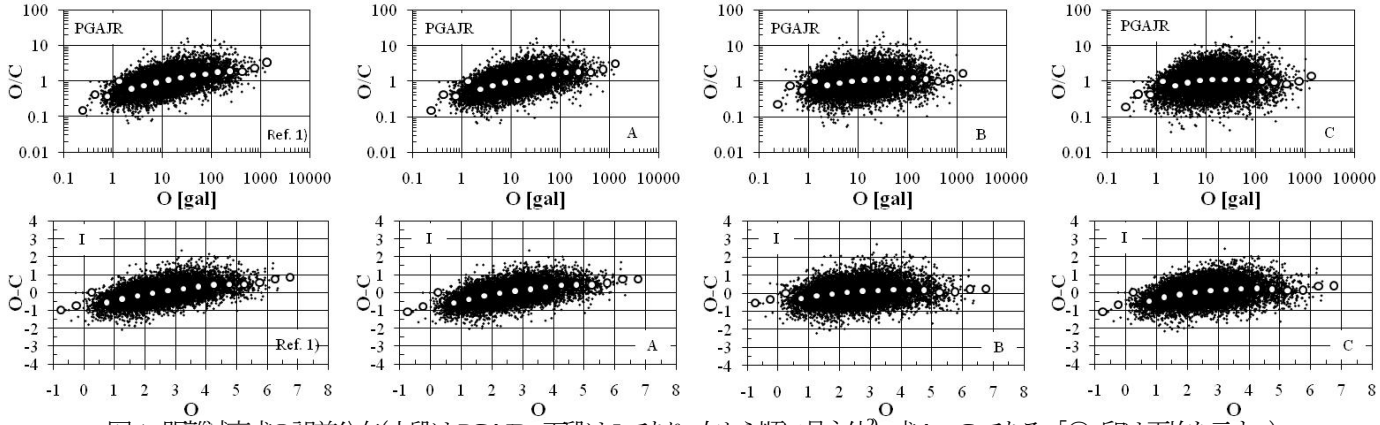

図１　距離減衰式の誤差分布（上段はPGAJR，下段はIであり，左から順に是永他[2]，式A～Cである。「○」印は平均を示す。）

(C)　変換した観測値に対する回帰分析

最後に，実際の観測値を関数 h で変換したものを観測値と見做して回帰分析を行った。ここでは，hとして係数g_1によるスケール変換とし，g_1の値は，(B)で決めた値と同じ値とした。つまり，以下の式（式Cとする。）の左辺を目的変数とし各係数を 4 段階の多段階回帰分析手法による回帰分析で決定した。結果を(A)の場合と同じ図表に示す。結果として全体の誤差は(B)と同様に大きくなるが，PGAJR の閾値 40gal を除いて誤差が有意に小さくなり，誤差の偏りがほぼ解消した。特にIとSIにおいては，全体の誤差が(B)よりも小さく，また，何れの閾値でも誤差が最も小さくなった。

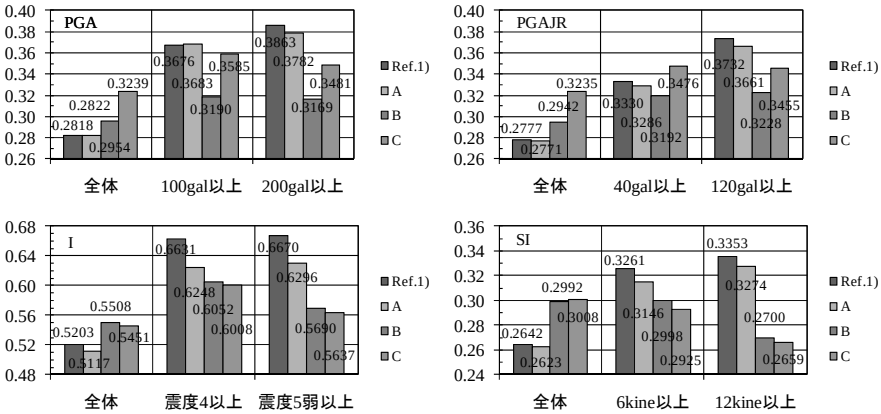

図２　距離減衰式の誤差（是永他[2]，式A～C）

$$g_1 \log Y_{ij} = a_1 M + a_2 D - bX + c_0 - \log\left(X + d_1 10^{d_2 M}\right) + c_j + \frac{w_1\left(M - w_2\right)}{1 + 10^{w_3 (M - w_2)}} \pm g_1 e$$

4.　結論

系統的な誤差の偏りが少なく，大きな地震動の予測誤差の少ない距離減衰式の一般的な作成手法として，距離減衰式を一般化して$h(\log Y_{ij})=f(M,D,X)$のように関数 f と h を用いて記述する手法を提案し，関数 h を線形変換に限定した枠内での具体例を複数提案した。その結果，全体の誤差の大きさと系統的な誤差の偏りの間にはトレードオフの関係が存在する。そのため，全体の誤差を小さくする目的には(A)の手法を用いればよく，各指標の閾値以上の予測に対して誤差を小さくする目的には，PGA 又は PGAJR の場合は(B)の手法を，I 又は SI の場合は(C)の手法を用いれば良いことが判った。(B)及び(C)で全体の誤差が大きくなるのは，既存の距離減衰式[1][2]が最小二乗法を基本とする解析に基づくが，本研究の(B)及び(C)は最小二乗法以外の手続きを含むため，モデル（関数形）が同じならば全体の誤差は当然大きくなるからである。一方で，一定の閾値以上で誤差が小さくなる一般的な条件は自明とは言えない。当該トレードオフの発生原理を今後詳細に究明するにあたっては，提案した距離減衰式の一般化は有用と思われる。

参考文献

1)　司宏俊，他，日本建築学会構造系論文報告集，523，63-70，1999
2)　是永将宏，他，土木学会全国大会第66回年次学術講演会（投稿中）
3)　古川洋之，他，1999年8月発行号，2-11
4)　福島美光，清水建設研究報告，63，75-88，1996