

応力降下量をパラメータとした 加速度応答スペクトルの距離減衰式

片岡正次郎¹・日下部毅明²

¹国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 主任研究官（〒305-0804 つくば市旭1）

E-mail: kataoka-s92rc@nilim.go.jp

²国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室 室長（〒305-0804 つくば市旭1）

E-mail: kusakabe-t88d8@nilim.go.jp

中小地震のK-NET及びKiK-net強震記録(約10,000波)を用いて、I種地盤、工学的基盤における地震動の加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成した。この距離減衰式は、モーメントマグニチュードと震源距離の他、スペクトルインバージョンにより推定された応力降下量または加速度震源スペクトルの短周期レベルをパラメータとした回帰式である。各観測点での地点補正係数と応力降下量を考慮した回帰の対数標準偏差は固有周期0.05～10秒で約0.2となり、応力降下量等を考慮しない場合や震源深さをパラメータとした場合と比較して、短周期領域で顕著にばらつきの小さい距離減衰式が得られた。

Key Words : attenuation relation, response spectrum, stress drop, short period level, variance

1. はじめに

地震動の最大加速度、最大速度や応答スペクトルの距離減衰式^{1), 2)}は、対象地点における地震動強さ、あるいは地震動強さの分布を簡便に推定することができるため、設計地震力の設定や地震被害想定に広く活用されている。近年では同じ目的に統計的グリーン関数法やハイブリッド法も用いられるようになってきているが、比較できる強震記録がない場合には、推定結果の検証として距離減衰式との比較^{3), 4)}が行われている。距離減衰式による地震動強さの推定では、複雑な震源過程等の影響を考慮することはできないが、実際に観測された地震動強さに直接基づいたものであることから、距離減衰式は依然信頼性の高い地震動推定手法の一つと考えられる。

距離減衰式は一般に、地震の規模を表すパラメータ（マグニチュード）と震源距離などの距離のパラメータを与えて地震動強さを推定するものであるが、それに加えて震源深さをパラメータとしたもの^{6), 8)}や、内陸地震やプレート境界地震など地震のタイプを考慮したもの^{7), 9)}もある。これらは、震源深さや地震のタイプによる地震動強さの違いを考慮することによって精度の向上を目指したものである。

同じマグニチュードの地震でも、震源深さや地震のタイプによって地震動強さが異なる原因としては、伝播経路の影響のほか、応力降下量の違いが挙げられる⁷⁾。一般に、震源が深いほど応力降下量が大きくなる傾向があることや、スラブ内地震の応力降下量がプレート境界地震よりも大きいことが明らかになってきている^{10), 12)}。

一方、地震の発生地域によって応力降下量に特徴があることも指摘されている^{10), 13)}。このような応力降下量の地域性を考慮する方法として、地域ごとに強震記録を分類して距離減衰式を作成することも考えられるが、大地震の強震記録が得られていない地域では、作成した距離減衰式の適用範囲が限定されることになる。

本研究では以上のような背景から、震源深さ、地震のタイプ、地域による応力降下量の違いを直接的に考慮するために、スペクトルインバージョンにより推定されている応力降下量¹²⁾をパラメータとした加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成した。対象とした地震は応力降下量が推定された中小規模の地震に限られているものの、この距離減衰式は加速度応答スペクトルに基づく統計的グリーン関数の作成⁵⁾に用いることが可能である。

想定地震の震源モデルを設定する際にアスペリティの大きさや応力降下量を規定するパラメータとして、加速

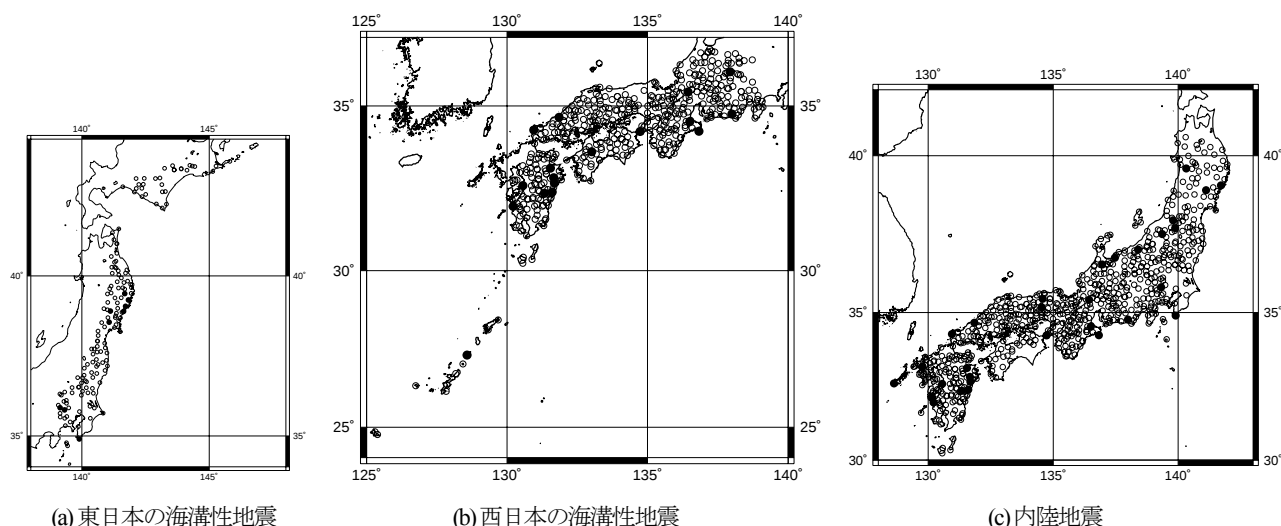


図-1 強震記録を用いた I 種地盤の観測点 (○) と工学的基盤の観測点 (●) の位置

度震源スペクトルの短周期レベル（以下、短周期レベル）が最近よく用いられており^{3), 4)}，震源過程が複雑になる大地震については応力降下量よりも適切と考えられる．そこで，大地震についても今後同様の検討を行うことを念頭に，短周期レベルをパラメータにした場合についても検討することとした．

また，応力降下量や短周期レベルをパラメータとしない場合と比較することにより，距離減衰式のばらつきについて考察するとともに，応力降下量，短周期レベルにより距離減衰式から推定される地震動強さがどのように変化するかを示した．

2. 距離減衰式の作成

(1) 強震記録

距離減衰式の作成に用いた強震記録は，1996年5月～2002年6月のK-NET及びKiK-net強震観測データ（地表）からマグニチュード，震源深さ，震源距離などの条件で選択したものであり，スペクトルインバージョンによる応力降下量の推定に用いられた強震記録¹²⁾と共通である．

既往の研究により，海溝性地震と内陸地震，あるいは同じ海溝性地震でも東日本と西日本では伝播特性がかなり異なるという結果が得られている⁹⁾ことから，上記の強震記録を海溝性地震と内陸地震に分類し，さらにそれぞれを糸魚川－静岡構造線を境に東日本と西日本に分類して，4つのデータセットについて距離減衰式を作成した．

PS検層データから地盤種別¹⁴⁾が I 種地盤となる観測点 822点での強震記録を用いているため，I 種地盤における地震動を対象とした距離減衰式が得られる．

また，深さ20[m]までのPS検層データにS波速度 V_s が

表-1 地震数及び波形数

	海溝性地震		内陸地震		合計
	東日本	西日本	東日本	西日本	
地震数	52	30	62	24	168
波形数	2044	2198	2030	3464	9736

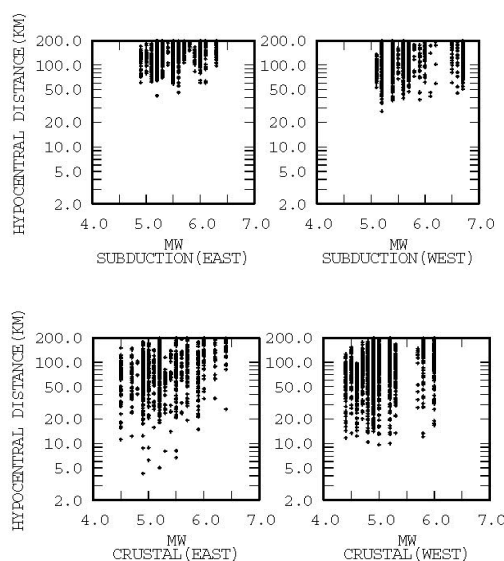


図-2 データセットの M_w と震源距離の関係

600～800[m/s]の範囲にある層があり，その最上層上面から地表までの地盤の特性値¹⁴⁾（基本固有周期）が0.05[s]以下となるような観測点を工学的基盤の観測点とした．I 種地盤の観測点と工学的基盤の観測点の位置を図-1に示す．工学的基盤の観測点は38点あり，地下30[m]までの平均S波速度（層厚30[m]を伝播時間で除したもの）の平均値 $AVS30 = 730$ [m/s]となった．後述のように，工学的基盤の観測点での地点補正值により，工学的基盤における地震動を対象とした距離減衰式が得られる．

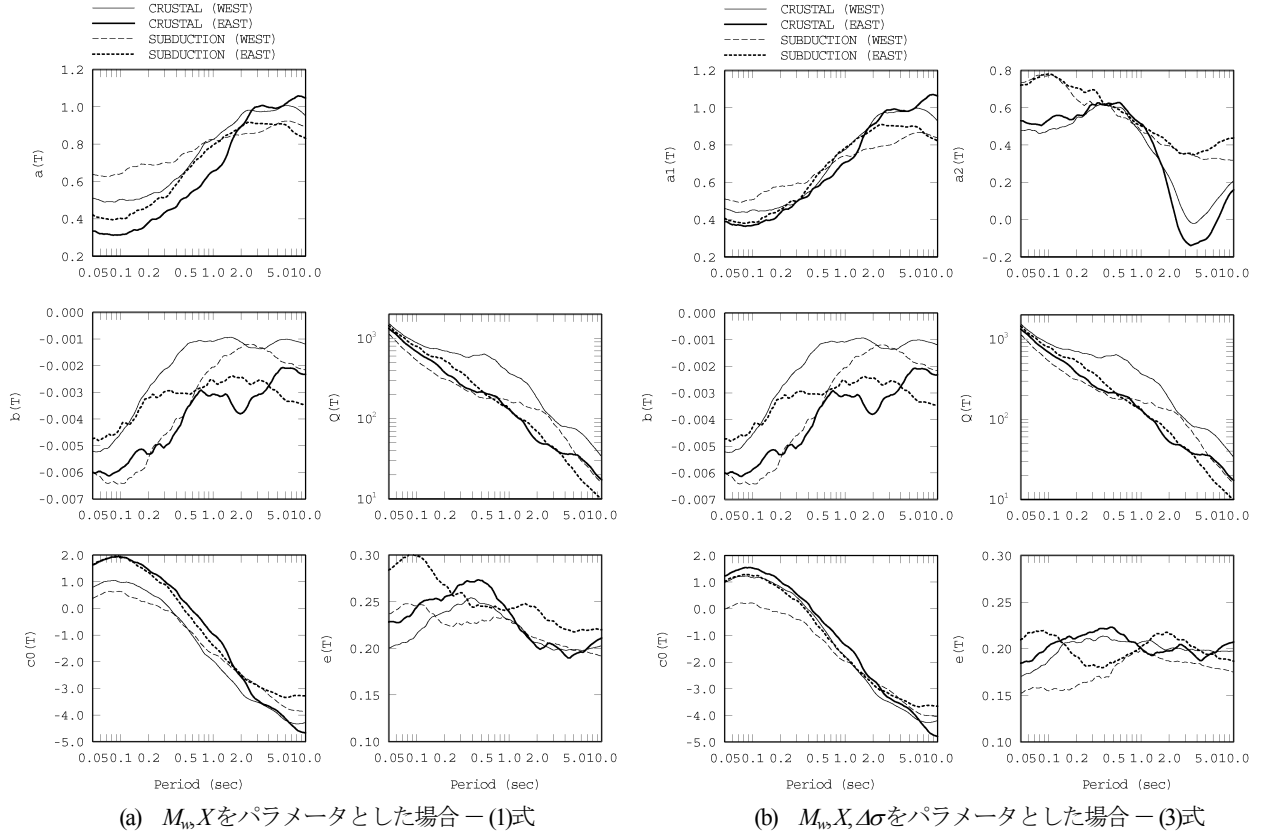


図-3 作成した距離減衰式の回帰係数、標準偏差及び換算したQ値

回帰分析には、震源深さ60[km]以下、海溝性地震は気象庁マグニチュード M_J 5.0以上6.9（モーメントマグニチュード M_w 6.7）以下、内陸地震は M_J 4.5以上6.5以下の地震で得られた震源距離200[km]以下の強震記録を用いた。全データ数は168地震の約10,000波である。表-1に地震タイプと地域別の地震数と波形数を、図-2に4つのデータセットごとに M_w と震源距離の関係を示す。

(2) 回帰モデル

上記の強震記録からS波部以降の全継続時間（ただし最大120秒）を用いて計算される減衰定数 $h=0.05$ の加速度応答スペクトルを対象とした。加速度応答スペクトルは、固有周期 $T=0.05\sim10.0$ [s]を対数軸で等分割した115ポイントで計算を行った。

各固有周期 T の加速度応答スペクトル $S_A(T)$ を次の(1)～(4)式の4つの回帰モデルでモデル化し、ダミー係数を用いた2段階回帰分析手法¹⁵⁾で回帰分析を行った。

$$\log S_{A_j}(T) = a(T)M_w - \log X + b(T)X + c_0(T) + \sum_k \delta_{kj}c_k \pm e(T) \quad (1)$$

$$\log S_{A_j}(T) = a_1(T)M_w + a_2(T)D - \log X + b(T)X + c_0(T) + \sum_k \delta_{kj}c_k \pm e(T) \quad (2)$$

$$\log S_{A_j}(T) = a_1(T)M_w + a_2(T)\log \Delta\sigma - \log X + b(T)X + c_0(T) + \sum_k \delta_{kj}c_k \pm e(T) \quad (3)$$

$$\log S_{A_j}(T) = a_1(T)M_w + a_2(T)\log A - \log X + b(T)X + c_0(T) + \sum_k \delta_{kj}c_k \pm e(T) \quad (4)$$

(1)式と(2)式は従来用いられているモデルであり、マグニチュードと震源距離をパラメータとした場合と震源深さを追加した場合である。また、(3)式と(4)式はそれぞれ応力降下量、短周期レベルをパラメータとして追加した場合である。なお、内陸地震については、スペクトルインバージョンの場合と同様に、幾何減衰項は $X_r=80$ [km]以下では $\log X$ 、 X_r を超えると $\log X$ の代わりに $\log(X_r \cdot X)^{0.5}$ を用いた¹²⁾。これらの式で、 $S_{A_j}(T)$ は i 番目の地震の j 番目の観測点における加速度応答スペクトル[cm/s²]、 X は震源距離[km]、 D は震源深さ[km]、 $\Delta\sigma$ は応力降下量[MPa]、 A は短周期レベル[dyn・cm/s²]、 $c_k(T)$ は k 番目の観測点の地点補正値、 $e(T)$ は標準偏差である。また、 $a(T)$ 、 $a_1(T)$ 、 $a_2(T)$ 、 $b(T)$ 、 $c_0(T)$ 、 $c_k(T)$ は回帰係数である。回帰分析の際、 M_w 、 $\Delta\sigma$ 、 A は文献12)で得られた結果を用いた。 $c_k(T)$ は $c_k(T)$ の平均が0となるように求められているため、 $c_k(T)=0$ の場合はI種地盤での加速度応答スペクトル $S_{AII}(T)$ の距離減衰式とみなすことができる。

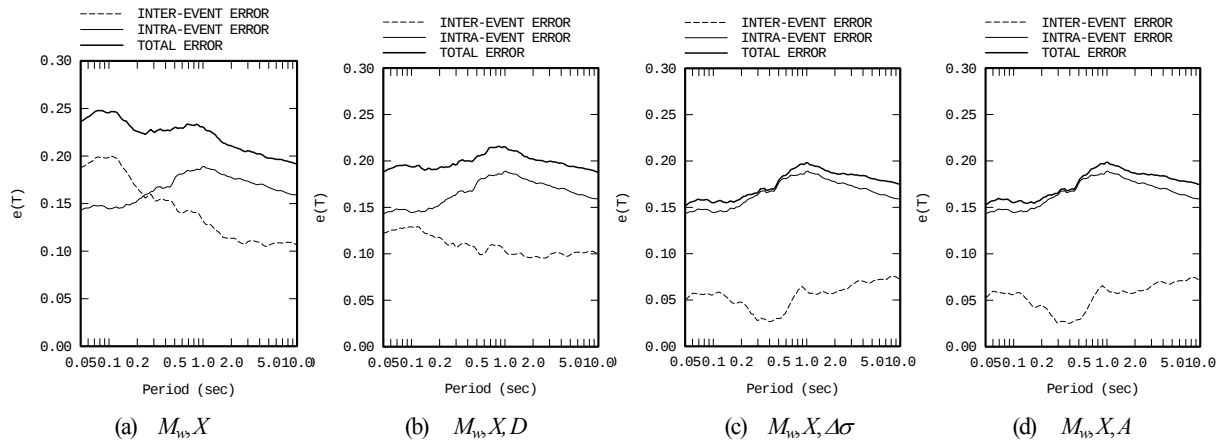


図-4 西日本の海溝性地震のデータセットを用いた4種類の回帰式における回帰誤差の標準偏差

工学的基盤における地震動の加速度応答スペクトル $S_{AE}(T)$ の距離減衰式は、工学的基盤の観測点での地点補正値 $c_k(T)$ の平均値 c_{Eav} と標準偏差 c_{Esd} を用いて次式で算出することができる。

$$\log S_{AE}(T) = \log S_{AI}(T) + c_{Eav}(T) \pm c_{Esd}(T) \quad (5)$$

3. 作成した距離減衰式の特徴

(1) 回帰係数

作成した距離減衰式の回帰係数を、標準偏差及び粘性減衰項の回帰係数 $b(T)$ から換算した Q 値である $Q(T)$ とともに図-3に示す。ここでは例として、(1)式と(3)式による回帰結果を示した。

2段階回帰分析の1段階目で計算される $b(T)$ 及び $Q(T)$ はどの式でも同一になるため、図-3の(a)と(b)でも全く同じとなっている。一方、地震のタイプ及び地域によって $b(T)$ はかなり異なる。伝播経路の特性を示す $b(T)$ は、本来は地震のタイプの影響を受けない性質のものであるため、この違いは地震のタイプによる発生位置の偏り（文献12）の図-1, 2を参照）を反映したものと考えられる。

マグニチュード依存性を示す係数 $a(T)$, $a_1(T)$ についてみると、(1)式の回帰係数 $a(T)$ は短周期領域で地震のタイプ及び地域によるばらつきが大きい。しかし、(2)式では応力降下量をパラメータとして地震のタイプ及び地域による応力降下量の違いを考慮することにより、 $a_1(T)$ のこのようなばらつきは小さくなっていることが分かる。

応力降下量の係数 $a_2(T)$ は地域による違いは小さいものの、地震のタイプでは異なる値となっている。海溝性地震の $a_2(T)$ は長周期領域で0.4程度であり、長周期領域での加速度応答スペクトルが応力降下量に依存することを示しているが、内陸地震ではその依存性は小さい。これは海溝性地震の応力降下量が内陸地震の10倍程度と大きい¹²⁾ため、レベルの小さい周期1秒程度以上の長周期領域の加速度応答スペクトルが、振幅の大きい短周期領

域の成分の影響を受けやすいためと考えられる。内陸地震についても、周期3～5秒程度では $a_2(T)$ がほぼ0になっているが、同様の理由により、周期10秒近くでは $a_2(T)$ が0.2程度の依存性を示している。

(2) 距離減衰式のばらつき

図-3において回帰誤差の標準偏差 $e(T)$ を比較すると、 M_w と震源距離 X のみをパラメータとした(1)式の場合と比較して、応力降下量もパラメータとした(3)式の場合の回帰誤差は小さいことが確認できる。

周期 1 [s] 以下の短周期領域でみると、この標準偏差 $e(T)$ の値は、(1)式と(3)式の場合にそれぞれ0.25程度、0.20程度となっている。したがって、(1)式に含まれる応力降下量のばらつきによる回帰誤差の標準偏差を概算すると、 $(0.25^2 - 0.20^2)^{0.5} = 0.15$ 程度となる。これは、既往の研究¹⁶⁾で最大加速度や最大速度の距離減衰式について推測されている0.10という値よりもやや大きい、マグニチュードの小さな地震ほど応力降下量のばらつきが大きいという指摘¹⁷⁾もあり、本研究が中小地震を対象としていることを考慮すれば、整合する結果と考えられる。

図-3の $e(T)$ は地震間誤差(inter-event error)と地震内誤差(intra-event error)を合わせた全体誤差(total error)の標準偏差であり、地震間誤差と地震内誤差に分離することができる。例として、西日本の海溝性地震のデータセットを用いた場合の、(1)～(4)式の回帰モデルによる全体誤差、地震間誤差、地震内誤差を図-4に示す。地震内誤差は4種類の回帰式に対して共通であるが、応力降下量 $\Delta\sigma$ や短周期レベル A をパラメータとした場合には地震間誤差が大幅に小さくなっていることが分かる。なお、短周期レベル A と応力降下量 $\Delta\sigma$ は、 ω^{-2} モデルを仮定すると地震モーメントを M_0 として $A \propto M_0^{1/3} \cdot \Delta\sigma^{2/3}$ という従属関係にあるため、(3)式と(4)式の回帰誤差は同じになっている。また、震源深さ D をパラメータとした(2)式の地震間誤差は、(1)式と(3)、(4)式の間であるが、(1)式に近い値となった。

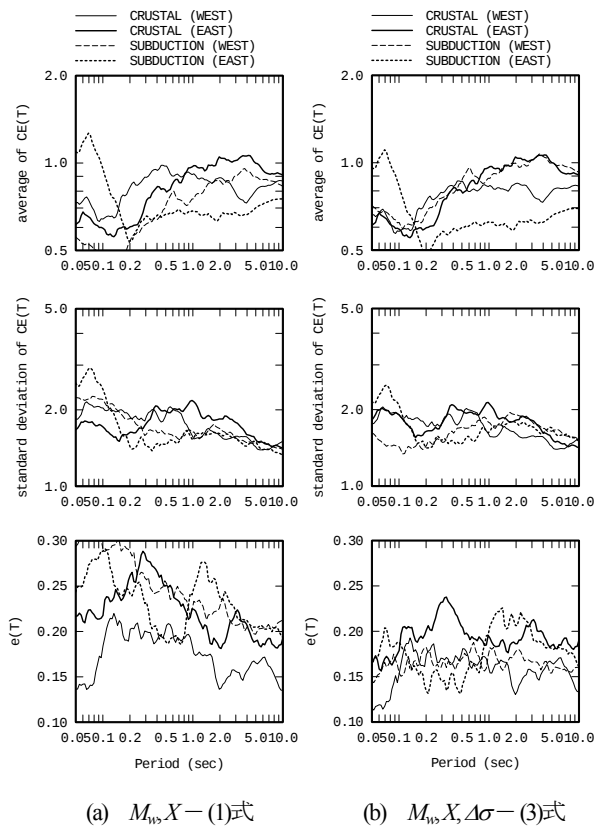


図-5 工学的基盤の観測点の地点補正値の平均値と標準偏差、及び工学的基盤の観測点のデータのみを用いた場合の回帰誤差

(3) 工学的基盤の観測点の地点補正値

工学的基盤の観測点での地点補正値 $10^{d(T)}$ の平均値 $10^{CE(T)}$ と標準偏差 $10^{Exd(T)}$ 、及び工学的基盤の観測点のデータのみを用いた場合の回帰誤差の標準偏差を図-5に示す。ここで、平均値 $10^{CE(T)}$ はI種地盤に対する工学的基盤の距離減衰式による推定値の比を、標準偏差 $10^{Exd(T)}$ はその平均値に対しての倍率を表している。ここでは例として、(1)式と(3)式による回帰結果を示した。

この図によると、東日本の海溝性地震については、地点補正値の平均が0.1[s]以下のごく短周期領域で大きくなっている。これは、東日本の海溝性地震の記録が得られている工学的基盤の観測点が東北地方の太平洋側に集中しており、これらの観測点においてごく短周期領域で地盤増幅があることによるものである。したがって、この距離減衰式を実際に利用する際には、地盤増幅の影響を取り除くなどの対処が必要な場合も考えられる。東日本の海溝性地震を除けば、工学的基盤の観測点での地点補正値の平均は周期0.1[s]以下で0.6~0.7で、長周期ほど大きくなり、周期10[s]で1に近い値となっている。また、地点補正値の標準偏差は短周期領域では2倍程度であるが、長周期になるほど小さくなっている。

工学的基盤の観測点のデータのみを用いた場合の回帰誤差の標準偏差は、図-3と同様、応力降下量をパラメー

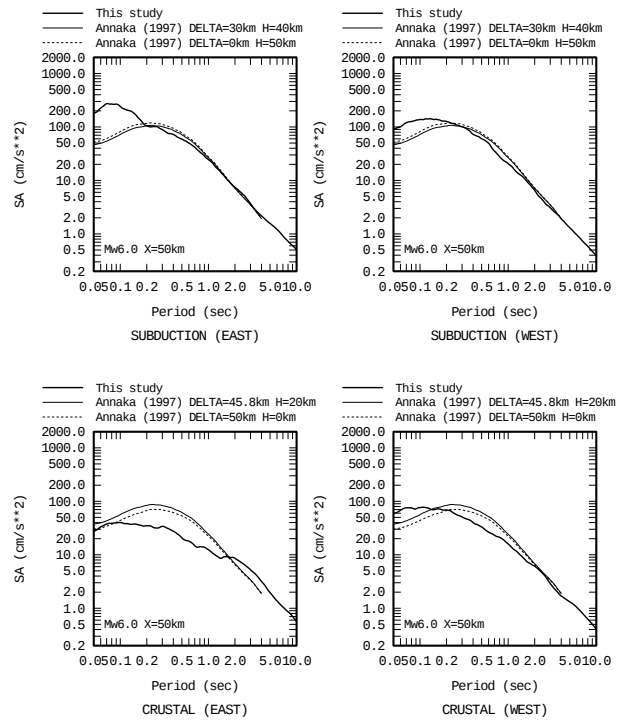


図-6 本研究の M_w と X をパラメータとした距離減衰式(1)式(工学的基盤)と既往の距離減衰式⁶⁾で推定した加速度応答スペクトルの比較($M_w=6.0$, $X=50[\text{km}]$)

タとした場合の方が全体的に小さい。データ数が少ないため周期による変動が大きい、平均的には図-3のI種地盤の全観測点のデータから得られる回帰誤差よりやや小さい傾向がある。

(4) 既往の研究との比較

本研究の M_w と X をパラメータとした距離減衰式(1)式(工学的基盤)と、安中・他(1997)の距離減衰式⁶⁾で推定した加速度応答スペクトルを $M_w=6.0$, $X=50[\text{km}]$ の場合について比較したものが図-6である。安中・他(1997)の式には震源深さの項があるため、海溝性地震については震源深さ40[km]と50[km]の場合を、内陸地震については震源深さ0[km]と20[km]の場合について示した。

本研究の東日本の海溝性地震の加速度応答スペクトルは0.2[s]以下でかなり大きい、これは図-5に示したように、東日本の海溝性地震の工学的基盤での地点補正値がこの周期帯域で大きいためである。これを除けば、本研究の距離減衰式に基づく加速度応答スペクトルは、海溝性地震では安中・他(1997)と同レベルであるが、内陸地震では安中・他(1997)よりもやや小さい。これは、内陸の $M_w 6.5$ 以下の中小地震の応力降下量が、より規模の大きい地震よりも小さい傾向にある¹⁸⁾ことを反映したものと考えられる。海溝性地震と内陸地震に対する本研究の距離減衰式は顕著に異なるが、これと比較すれば、東日本と西日本との違いは小さいことが分かる。

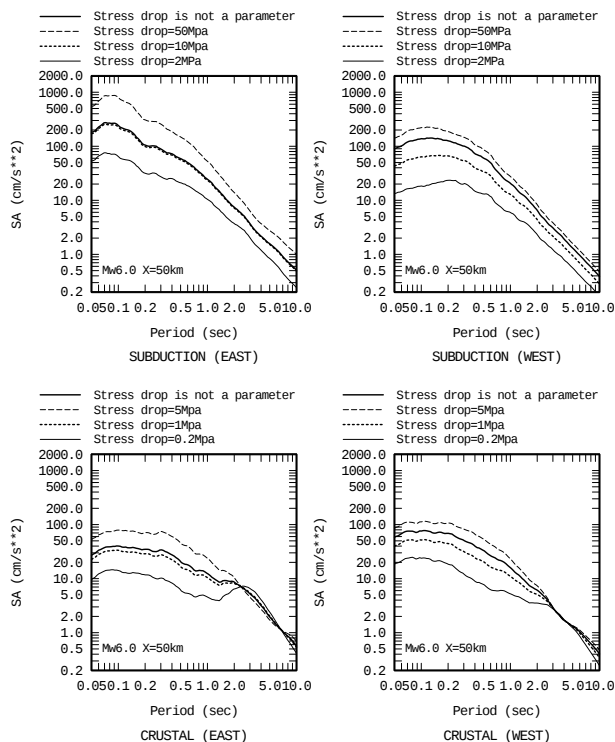


図-7 M_w と X をパラメータとした距離減衰式(1)式と応力降下量を追加した距離減衰式(3)式で推定した加速度応答スペクトルの比較

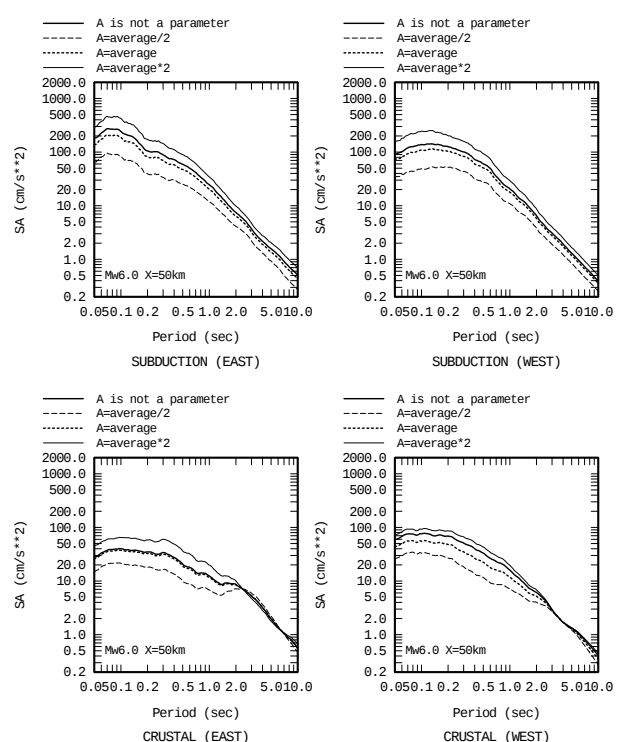


図-8 M_w と X をパラメータとした距離減衰式(1)式と短周期レベルを追加した距離減衰式(4)式で推定した加速度応答スペクトルの比較

4. 距離減衰式から推定される地震動強さ

(1) 応力降下量の影響

得られた距離減衰式のうち、 M_w と X 及び応力降下量をパラメータとした距離減衰式(3)式と、 M_w と X のみをパラメータとした距離減衰式(1)式により推定した加速度応答スペクトルを図-7に示す。応力降下量をパラメータとした距離減衰式については、海溝性地震は応力降下量が50, 10, 2[MPa]の場合、内陸地震は5, 1, 0.2[MPa]の場合について示した。

内陸地震では周期 2[s] 以上の長周期領域の加速度応答スペクトルは応力降下量に依存しないのに対して、海溝性地震では長周期領域でも応力降下量に依存している。

3. (1)でも述べたように、海溝性地震では内陸地震と比較して平均的に応力降下量が大きいため、短周期領域の応答スペクトルが大きく、この影響が長周期領域まで及んでいる可能性が考えられる。

東日本についてみると、海溝性地震では応力降下量が10[MPa]のケースが、内陸地震では1[MPa]のケースが応力降下量をパラメータとしない場合と同レベルである。

(2) 短周期レベルの影響

同様に、 M_w と X 及び短周期レベル A をパラメータとした距離減衰式(4)式と、 M_w と X のみをパラメータとし

た距離減衰式(1)式により推定した加速度応答スペクトルを図-8に示す。短周期レベル A をパラメータとした距離減衰式(4)式については、 A と M_0 の関係式¹²⁾の平均値と平均値±標準偏差のケースを示した。前述のように短周期レベルと応力降下量は従属関係にあるため、図-8は図-7と同様の特徴を示している。

(3) 最大加速度・最大速度

2. と同様の手法により、最大加速度と最大速度の距離減衰式を作成した。ただし、ここではP波部も含めた波形全体を対象とした。得られた距離減衰式の回帰係数を表-2と表-3に示す。ここでは例として、(1)式と(3)式による回帰結果を示しているが、これらの距離減衰式は、3. で述べた加速度応答スペクトルの距離減衰式とほぼ同様の特徴を有しており、応力降下量をパラメータとした場合の回帰誤差はかなり小さくなっている。

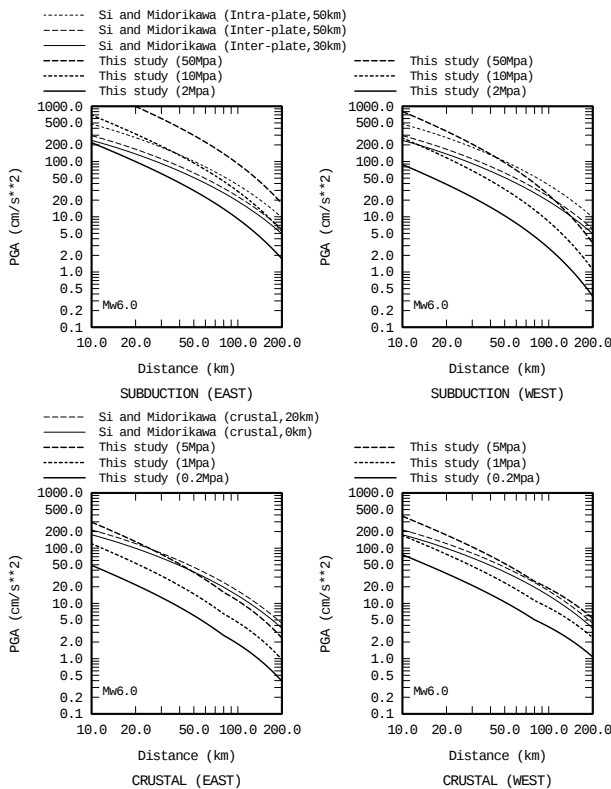
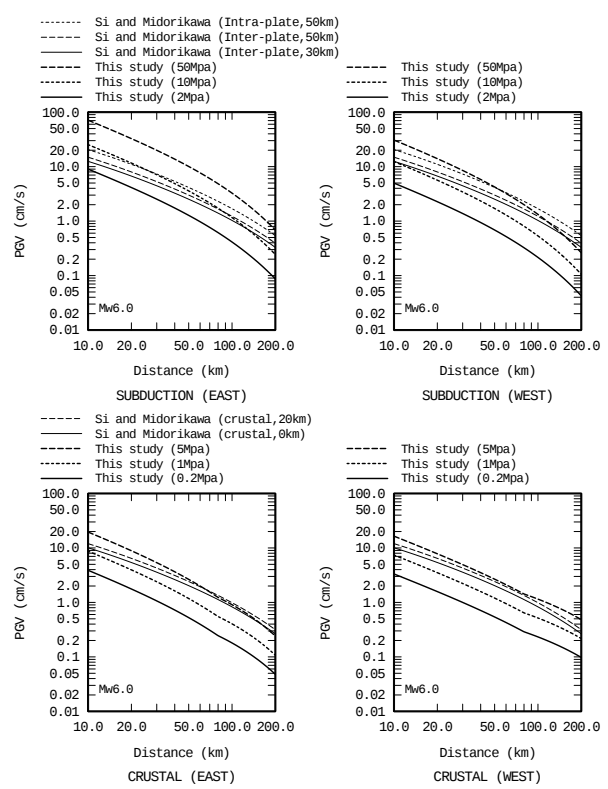
ここで得られた工学的基盤の最大加速度・最大速度の距離減衰式と、司・翠川(1999)の距離減衰式とを $M_w=6.0$ の場合について比較したものが図-9と図-10である。図-9では最大加速度を比較しているが、司・翠川(1999)の距離減衰式を岩盤でのサイト補正係数1.4⁷⁾で除した式との比較を行っている。また、図-10では最大速度を比較しているが、司・翠川(1999)の距離減衰式は $A/V30 = 600[m/s]$ のものであるため、(7)式⁷⁾に $A/V30 = 730[m/s]$ を代

表-2 最大加速度の距離減衰式の回帰係数

M_w, X をパラメータとした距離減衰式						
	a		b	c_0	e	$10^{c_{Env}^{\text{JWW}}}$
海溝性(東)	0.46		-0.0042	1.19	0.27	0.89
海溝性(西)	0.66		-0.0057	0.12	0.23	0.53
内陸(東)	0.35		-0.0052	1.32	0.24	0.62
内陸(西)	0.52		-0.0040	0.48	0.21	0.74
M_w, X と $\Delta\sigma$ をパラメータとした距離減衰式						
	a_1	a_2	b	c_0	e	$10^{c_{Env}^{\text{JWW}}}$
海溝性(東)	0.45	0.71	-0.0042	0.59	0.19	0.79
海溝性(西)	0.54	0.69	-0.0057	-0.25	0.15	0.67
内陸(東)	0.41	0.56	-0.0052	0.90	0.19	0.61
内陸(西)	0.46	0.50	-0.0040	0.68	0.18	0.66

表-3 最大速度の距離減衰式の回帰係数

M_w, X をパラメータとした距離減衰式						
	a	b	c_0	e	$10^{c_{Env}}$	
海溝性(東)	0.64	-0.0038	-1.24	0.25	0.74	
海溝性(西)	0.74	-0.0041	-1.90	0.22	0.68	
内陸(東)	0.60	-0.0043	-1.41	0.24	0.76	
内陸(西)	0.67	-0.0023	-1.90	0.21	0.83	
M_w, X と $\Delta\sigma$ をパラメータとした距離減衰式						
	a_1	a_2	b	c_0	e	$10^{c_{Env}}$
海溝性(東)	0.63	0.64	-0.0038	-1.78	0.18	0.66
海溝性(西)	0.64	0.56	-0.0041	-2.20	0.16	0.82
内陸(東)	0.65	0.50	-0.0043	-1.79	0.20	0.75
内陸(西)	0.62	0.50	-0.0023	-1.71	0.19	0.75

図-9 M_w, X と応力降下量をパラメータとした本研究の距離減衰式と既往の距離減衰式⁷⁾で推定した最大加速度の比較図-10 M_w, X と応力降下量をパラメータとした本研究の距離減衰式と既往の距離減衰式⁷⁾で推定した最大速度の比較

入して算出される地盤増幅率 $C_R = 0.87$ を司・翠川(1999)の式に乗じた式との比較を行っている。

$$\log C_R = 1.83 - 0.66 \log AVS30 \quad (7)$$

本研究で得られた距離減衰式の粘性減衰項の係数 b は、司・翠川(1999)が採用している最大加速度で-0.003, 最大速度で-0.002という値よりも絶対値が大きく、遠距離では司・翠川(1999)による推定値の方が大きくなる傾向がある。震源近傍で比較すると、司・翠川(1999)の距離減衰式は、東日本の海溝性地震では2~10[MPa], 西日本の海溝性地震では10~50[MPa], 内陸地震では約5[MPa]の応力降下量に対応するものであることが分かる。

5. まとめ

本研究では、震源深さ、地震のタイプ、地域による応力降下量の違いを直接的に考慮するために、応力降下量をパラメータとした加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成した。得られた距離減衰式はばらつきが小さく、地震動強さの推定精度向上に資するものと考えられる。

また、同様に短周期レベルをパラメータとした距離減衰式を作成したが、これを確率論的地震ハザードマップに適用することにより、短周期レベルに基づいて震源モデルを設定した確定論的な地震動の推定との整合を図ることができる。

今後は、本研究と同様の手法により、大地震の観測記録も含めた距離減衰式を作成して適用範囲を広げるとともに、応力降下量や短周期レベルの地域性についてもより詳細な検討を行い、将来発生する地震について、これらのパラメータの予測精度を高める必要がある。

謝辞：(株)大崎総合研究所の佐藤智美博士には、本研究を行う上で格別のご助力を賜った。ここに記して謝意を表する。本研究では、防災科学技術研究所によるK-NET, KiK-net強震記録を使用した。本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- 1) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告第166号, 1985.
- 2) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, pp. 757-783, 1990.
- 3) 中央防災会議東海地震に関する専門調査会(第10回)資料, 2001.
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 糸魚川-静岡構造線断層帯(北部, 中部)の地震を想定した強震動評価, 2002.
- 5) 片岡正次郎, 村越潤, 田村敬一: 統計的グリーン関数法を用いた震源近傍における強震動のシミュレーション, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 561-566, 2002.
- 6) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁87型強震計記録を用いた最大地震動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.161-164, 1997.
- 7) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集第523号, pp. 63-70, 1999.
- 8) Takahashi, T., Kobayashi, S., Fukushima, Y., Zhao, J. X., Nakamura, H. and Somerville, P. G.: A spectral attenuation model for Japan using strong motion data base, *Proc. 6th Int. Conf. of Seismic Zonation*, 6p. (CD-ROM), 2000.
- 9) 佐藤智美, 片岡正次郎, 奥村俊彦: K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.615-620, 2002.
- 10) 加藤研一, 武村雅之, 八代和彦: 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震2, Vol. 51, pp. 123-138, 1998.
- 11) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第556号, pp. 15-24, 2002.
- 12) 佐藤智美: 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, 2003(投稿中).
- 13) 武村雅之, 稗圃成人, 池浦友則, 植竹富一: プレーートの沈み込み帯における中小規模地震の震源スペクトルの地域性, 地震2, Vol. 42, pp. 349-359, 1989.
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002.
- 15) 壇一男, 宮腰淳一, 八代和彦: 中小規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, pp. 35-46, 1996.
- 16) 翠川三郎, 大竹雄: 地震動強さの距離減衰式にみられるパラメータに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, Vol. 3, pp. 59-70, 2003.
- 17) Youngs, R. R., Abrahamson, N., Mkdisi, F. I. and Sadigh, K.: Magnitude dependence variance of peak ground acceleration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 1161-1176, 1995.
- 18) 壇一男, 渡辺基史, 宮腰淳一: 既存のスペクトルインバージョン結果と震源インバージョン結果から推定されるアスペリティの実効応力と断層タイプ及び深さとの経験的關係, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp. 55-62, 2003.

(2003. 6. 30 受付)

ATTENUATION RELATIONS OF ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM USING STRESS DROP AS A REGRESSOR

Shojiro KATAOKA and Takaaki KUSAKABE

Attenuation relations are proposed for acceleration response spectrum of ground motion at the Class I ground and engineering bedrock using about 10,000 strong motion records of K-NET and KiK-net. The attenuation relations treat stress drop or short period level of acceleration source spectrum as input parameters besides moment magnitude and hypocentral distance. After taking site coefficient at each station and the stress drop of each earthquake into consideration, the logarithmic standard deviation of the regression analysis becomes about 0.2, which is remarkably smaller than that without stress drop, in the range of natural period from 0.05 to 10[s].