

I-52

北海道で収集した実加速度記録の確率距離減衰特性について

開発局開発土木研究所	正員	佐藤	京
開発局留萌開発建設部	〳	吉田	紘一
開発局開発土木研究所	〳	島田	武
〳	〳	佐藤	昌志

はじめに

公共構造物等を合理的に耐震設計するためにまた、地震防災上の措置や地震災害発生時の対応策を講じるためには、構造物の建設地点や調査対象地点周辺での期待される地震動の的確な予測が必要となる。現状では、地震動を予測する場合、地震の発生機構や伝播経路の特性、着目地点周辺の地形地盤条件等が複雑に影響すると考えられるため、地震動の特性を解析的に求めることは非常に困難であると思われる。このことから、多くの研究者はこれまで得られた実記録を基に統計解析をして推定式^{1)~5)}を導いてきた。

しかし、この統計解析で導き出されている推定式は、用いているデータの影響を大きく受けているため、用いられたデータと同一条件の地域でのみ有効となると思われる。つまり、ある特定地域で用いる場合、地域の特性を考慮した修正がそれぞれ必要であると考えられる。

そこで、地域性を加味したより実測値と相関の高い減衰式に修正することを目的として、北海道地域に限定した減衰式を導いた。

本論文では平成5年より北海道周辺で発生した大規模地震のデータを用いて、道路橋示方書⁶⁾に記載されている式の形態に帰着するように重回帰分析を行ったので報告する。

1. 解析に用いた強震記録

解析対象としたものは、表-1に示す、平成5年より北海道周辺で発生した大規模地震で得られた記録2@49成分の水平成分加速度記録および46成分の上下成分加速度記録である。一般的に解析に用いられるデータは、水平成分を時間領域で合成しものである。しかし、合成した最大値の記録は、水平2成分のどちらか一方の大きいほうに比較して約10%程度しか大きくなっていないという結果が算出されていることと、被害を地震動の記録から想定した場合には、合成したものより水平2成分をそれぞれ用いたものの方が小さな値を与えることになり、構造物被害に対して危険側の値になることから、本分析では水平成分を合成せずにそれぞれを1つのデータとして統計解析のサンプルデータとした。また、これらを記録した強震計は、橋梁の耐震設計の資料用に設置したものであるため、記録の軸方向が橋梁の軸方向と一致させて設置している。このため、すべての強震計の軸方向は同じではない。しかし、当研究室において波形解析した結果、観測地点での地震の主方向はないと思われる結果が出ているので解析に用いているデータは単純に最大値を用いている。

これらの記録を選択した理由として、北海道周辺で発生している地震の中で、比較的規模が大きく、得られているデータの信頼性が高いことが挙げられる。また、被害の記録が得られているため被害と相関をとる場合に容易となることも挙げられる。

この記録のうち、もっとも大きな加速度が得られているものは、1993 釧路沖地震の広尾橋で記録された583.8(gal)である。また、最も震央距離が長い記録は、1994 北海道東方沖の七峰橋の648.1(km)で最大加速度は、12.3(gal)であった。

2. 解析手法

2.1 距離減衰式の形式

最大地震動の距離減衰特性に関してはさまざまな検討が行なわれており、これらの結果から距離減衰式として次式が実測値と最も対応が良いとされている。

$$X(M, \Delta, GC_i) = a(GC_i) \times 10^{b(GC_i)M} \times (\Delta + \Delta_0)^{c(GC_i)}$$

 Statistical Study on Attenuation of Seismic Motion in Hokkaido

by Takashi SATOH, Kouichi YOSHIDA, Takeshi SHIMADA, Masashi SATO

表-1 解析に用いた地震

地震名	年月日時分	規模	深さ (km)	強震計設置箇所	地盤種別	震央距離 (km)	水平成分記録	上下成分記録
1993 釧路沖地震	1993年1月15日 20時06分	7.8	101	千代田大橋	Ⅲ	79.14	○	○
				暖海橋	I	143.78	○	○
				大楽毛橋	Ⅱ	13.29	○	○
				石狩河口橋	Ⅲ	247.47	○	○
				斜里大橋	Ⅲ	112.49	○	○
				静内橋	Ⅲ	176.02	○	
				濃根沼大橋	Ⅲ	99.17	○	○
				広尾橋	I	112.18	○	○
				空知大橋	Ⅱ	210.38	○	○
				鷹松沢橋	Ⅱ	230.15	○	○
				札幌 I C 高架橋	Ⅲ	240.78	○	○
				白鳥大橋	Ⅲ	286.89	○	○
				札幌大橋	Ⅲ	240.70	○	○
十勝河口橋	Ⅲ	64.66	○	○				
厚岸大橋		29.24	○	○				
1994 南西沖地震	1993年7月12日 22時17分	7.8	35	千代田大橋	Ⅲ	344.74	○	○
				新石狩大橋	Ⅲ	195.21	○	○
				七峰橋	I	156.04	○	○
				無意坂大橋	I	166.69	○	○
				石狩河口橋	Ⅲ	183.97	○	○
				磯谷橋	Ⅲ	97.70	○	○
				上島崎橋	I	141.49	○	○
				札幌 I C 高架橋	Ⅲ	185.45	○	○
				白鳥大橋	Ⅲ	153.49	○	○
				新浜厚真橋	Ⅲ	219.06	○	○
1994 東方沖地震 余震	1994年8月31日	6.5	90	千代田大橋	Ⅲ	226.91	○	○
				大楽毛橋	Ⅱ	156.67	○	○
				別海橋	Ⅲ	63.85	○	○
				錦岡橋	Ⅱ	385.13	○	○
				濃根沼大橋	Ⅲ	54.07	○	○
				十勝大橋	Ⅱ	241.33	○	○
1994 東方沖地震	1994年10月4日 22時23分	8.1	30	千代田大橋	Ⅲ	352.14	○	○
				大楽毛橋	Ⅱ	280.73	○	○
				新石狩大橋	Ⅲ	500.55	○	○
				七峰橋	I	647.43	○	○
				石狩河口橋	Ⅲ	513.45	○	○
				斜里大橋	Ⅲ	251.29	○	
				静内橋	Ⅲ	448.81	○	
				錦岡橋	Ⅱ	510.58	○	○
				濃根沼大橋	Ⅲ	177.94	○	○
				広尾橋	I	376.95	○	○
1994 東方沖地震 余震	1994年10月9日	7.3	5	千代田大橋	Ⅲ	370.37	○	○
				大楽毛橋	Ⅱ	299.24	○	○
				新石狩大橋	Ⅲ	516.28	○	○
				錦岡橋	Ⅱ	528.90	○	○
				濃根沼大橋	Ⅲ	195.59	○	○
十勝大橋	Ⅱ	385.12	○	○				

where;

X ;最大地震動（最大加速度，最大速度，最大変位）

M ;気象庁マグニチュード

Δ ;距離の指標

Δ_0 ; Δ が小さい範囲の X を調整する定数

GC_i ;地盤種別 ($i=1,2,3$)

$a(GC_i), b(GC_i), c(GC_i)$;地盤条件ごとに定める係数

この式中の説明変数である距離の指標は，震央距離，震源距離，震源域までの最短距離等が挙げられる。しかし，震央距離や震源距離はどの地震に対しても一定の計算手法で求めることが出来ることから，一般的には震央距離や震源距離を用いている例が多い。しかし，実用上，震源距離を用いる場合，震央距離と震源深さの両方を与えなければならないため使いづらい点がある。また， Δ_0 は震央距離が0の場合，推定地震動が無限大とならないために用いられているものである。地震動は断層に近くなる程大きくなると考えられるが，断層直線上ではある一定の値に近づくといわれており，この式を用いて回帰分析している建設省土木研究所（以下，土木研究所）では，土木構造物を対象としていることから，M8クラスの地震をを想定し，その断層の大きさの1/2程度を考慮して $\Delta_0=30$ と定めている。¹⁾

当研究室においては，川島らの研究を基に上記式を重回帰することとした。また， Δ_0 については，当研究室が対象とする構造物も土木構造物であることから土木研究所と同じ $\Delta_0=30\text{km}$ とする。しかし，川島らにより算出されている推定式¹⁾では，地盤種別により減衰式を個々に算出しているが，当研究室で得られた記録では，地盤による加速度の差が大きくないと思われるため，地盤種別ごとの式は算出しない。以下に帰着させる式を示す。

$$\alpha = a \times 10^{bM} \times (\Delta + 30)^c \dots\dots\dots(1)$$

2, 2 回帰分析

回帰分析するにあたり，得られた記録をすべて有効として，独立変数を地震の規模，震央距離とし，従属変数を地震動とする。これを最小自乗法により重回帰分析をして式(1)の a, b, c を算出している。また，導き出された推定式と実測値との誤差が正規分布すると仮定してその分散より，推定式の有効範囲を定めた。以下に回帰分析の概略の流れを示す。

上記に示した式(1)に帰着させるため推定式を以下のように変換する。

$$\log \alpha = \log a + bM + c \log(\Delta + 30)$$

この式を以下のように置き換える。

$$z = A + Bx + Cy \dots\dots\dots(2)$$

where; $z = \log \alpha$, $A = \log a$, $B = b$

$x = M$, $C = c$, $y = \log(\Delta + 30)$

得られているデータを用いて，最小自乗法により A, B, C を推定する。

つまり求める推定式(1)は，以下のように書ける。

$$\alpha = 10^{\bar{A}} \times 10^{\bar{B}M} \times (\Delta + 30)^{\bar{C}}$$

where; $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ は， A, B, C の回帰による推定値であることを示している。

また，推定式の有効幅は推定式から得られる推定地震動と実測値との標準偏差をもとめることにより算出している。

3, 分析結果と考察

以上の方法により，求めた回帰式を以下の表-2に示す。なお，速度および変位は加速度記録より算出している値を用いて重回帰している。また，表-3に実測値に対する推定式の有意水準50%確率の領域を示している。

この表-2に示すように今回，分析した回帰式は実測値との相関係数が約0.8であり，統計的におおむね有効な回帰式であると考えられる。また，最も良い相関を示しているものが速度の推定式であり，相関係数は0.83

であった。

また、表-3に示している誤差比とは、推定値に対する実測値の誤差が正規分布していると仮定し誤差の標準偏差から求めているもので、推定式の確率的有効範囲といえる。表中に示している誤差比は、実測値に対して推定値が50%程度の有効な確率で推定される範囲を示している。これにより、測定箇所に対する地域別の固有の誤差が確率的に含まれると思われることから、推定式にこの値を示すことは、有意であると考えられる。

表-2 重回帰による推定式

(水平動)

	加速度	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$\alpha = 7.505 \times 10^{0.567M} \times (\Delta + 30)^{-1.446}$	0.78	0.34
示方書I種	$\alpha = 987.4 \times 10^{0.216M} \times (\Delta + 30)^{-1.218}$	0.52	0.50
示方書II種	$\alpha = 232.5 \times 10^{0.313M} \times (\Delta + 30)^{-1.218}$	0.73	0.38
示方書III種	$\alpha = 403.8 \times 10^{0.265M} \times (\Delta + 30)^{-1.218}$	0.67	0.36

(上下動)

	加速度	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$\alpha = 3.809 \times 10^{0.566M} \times (\Delta + 30)^{-1.474}$	0.79	0.35
示方書I種	$\alpha = 117.0 \times 10^{0.268M} \times (\Delta + 30)^{-1.190}$	0.54	0.40
示方書II種	$\alpha = 88.2 \times 10^{0.297M} \times (\Delta + 30)^{-1.190}$	0.74	0.41
示方書III種	$\alpha = 13.5 \times 10^{0.402M} \times (\Delta + 30)^{-1.190}$	0.71	0.37

	速度	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$v = 0.0191 \times 10^{0.776M} \times (\Delta + 30)^{-1.412}$	0.83	0.32
示方書I種	$v = 20.82 \times 10^{0.263M} \times (\Delta + 30)^{-1.222}$	—	0.54
示方書II種	$v = 2.805 \times 10^{0.430M} \times (\Delta + 30)^{-1.222}$	0.88	0.28
示方書III種	$v = 5.105 \times 10^{0.404M} \times (\Delta + 30)^{-1.222}$	0.70	0.37

	速度	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$v = 0.0234 \times 10^{0.646M} \times (\Delta + 30)^{-1.211}$	0.87	0.24
示方書I種	$v = 1.02 \times 10^{0.311M} \times (\Delta + 30)^{-0.968}$	—	0.52
示方書II種	$v = 0.558 \times 10^{0.374M} \times (\Delta + 30)^{-0.968}$	0.83	0.27
示方書III種	$v = 0.0837 \times 10^{0.511M} \times (\Delta + 30)^{-0.968}$	0.78	0.26

	変位	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$d = 0.0029 \times 10^{0.749M} \times (\Delta + 30)^{-1.186}$	0.78	0.34
示方書I種	$d = 0.626 \times 10^{0.327M} \times (\Delta + 30)^{-1.254}$	—	0.98
示方書II種	$d = 0.062 \times 10^{0.507M} \times (\Delta + 30)^{-1.254}$	0.71	0.38
示方書III種	$d = 0.070 \times 10^{0.584M} \times (\Delta + 30)^{-1.254}$	0.68	0.40

	変位	相関係数	誤差の標準偏差
推定式	$d = 0.0206 \times 10^{0.466M} \times (\Delta + 30)^{-0.765}$	0.79	0.22
示方書I種	$d = 0.01 \times 10^{0.474M} \times (\Delta + 30)^{-0.879}$	—	0.51
示方書II種	$d = 0.0289 \times 10^{0.417M} \times (\Delta + 30)^{-0.879}$	—	0.58
示方書III種	$d = 0.00363 \times 10^{0.579M} \times (\Delta + 30)^{-0.879}$	0.59	0.26

表-3 推定式の誤差比 (推定式有効確率50%)

水平動

推定値	誤差比
加速度	$10^{(\pm 0.674 \times 0.343)}$
速度	$10^{(\pm 0.674 \times 0.322)}$
変位	$10^{(\pm 0.674 \times 0.344)}$

上下動

推定値	誤差比
加速度	$10^{(\pm 0.674 \times 0.347)}$
速度	$10^{(\pm 0.674 \times 0.236)}$
変位	$10^{(\pm 0.674 \times 0.220)}$

これらの結果を道路橋示方書(以下、示方書)に記載されている式と比較して図-1、-2に示す。ここでは、加速度記録のみ記載する。

図-1に示している水平成分記録をみると、釧路沖地震では、震央距離が約100km~200km付近で加速度は約300gal~600galと大きな値を記録しているが、震央距離が200kmを越えると加速度が20gal~100galと急激な減衰傾向が見られる。また、南西沖地震においても震央距離が約100km~160km付近で加速度が約100gal~240galを示しそれを越えると加速度が10gal~100galと釧路沖地震と比較して大きく減衰してはいないが急激な減衰と思われる。加えて東方沖では、震央距離が遠くなくても他の地震と比較して大きな加速度値を示しているが、約300km付近で大きな減衰を示している。このことから北海道周辺で発生した地震は、比較的震央距離の遠いところまで大きな加速度が発生し、急激に減衰すると考えられる。また、一般的に言えることであるが震央距離が近いところでも加速度に大きな差が生じていることもあげられる。

次に、これらの実測値と示方書の式を比較すると実測値は減衰割合が大きく、震央距離が遠くなくても大き

な加速度を示していることがわかる。つまり、全体的に実測値よりも小さな値を予測している。これに対し、今回提案した推定式では、予測値そのものが示方書の推定式よりも大きくなっており震央に近い観測地では、示方書の式よりも実測値に対して近い値を示している。加えて、減衰割合が示方書の式よりも大きくなっており、表-2の相関係数から見ても北海道の地域特性を加味できたことがわかる。また、上記に述べたように震央距離が近い箇所でも加速度記録には幅が生じる。表-3に示すように誤差の偏差より推定式の有効となる幅を求めることは、実測記録に対して、推定式をより適正に評価できるものと期待できると考えられる。しかし、今回の分析ではデータ量の問題から、推定式と実測値の誤差分布状態を把握するまでに至っていない。

ここでは、示していないが速度および変位についても、示方書の式では実測値よりも比較的小さな値を予測しているが、今回の推定式では、加速度記録と同様に震央距離が短い観測点に対して比較的近い値を予測している。また、減衰割合も加速度記録と同様に示方書の式よりも大きくなっており単純に式(1)に帰着するように重回帰しても地域特性を加味できることが速度および変位についてもいえる。

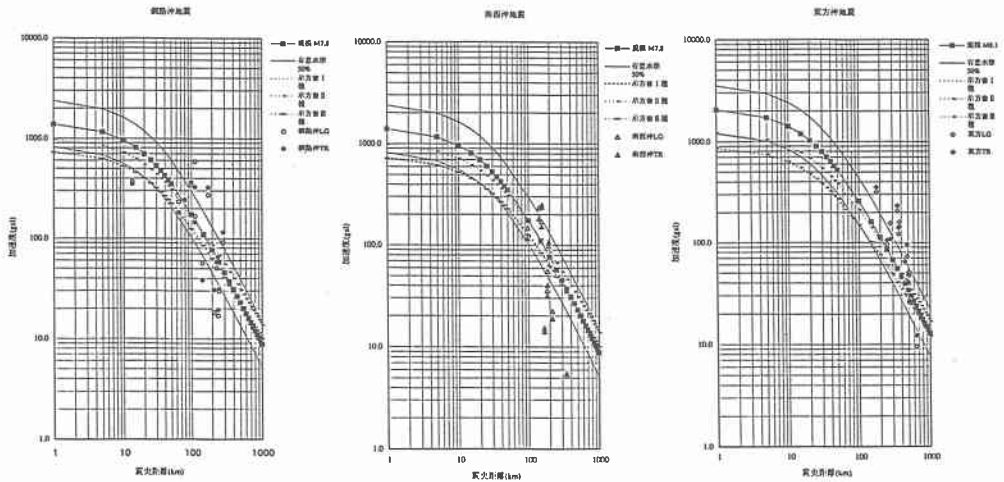


図-1 加速度距離減衰（水平動）

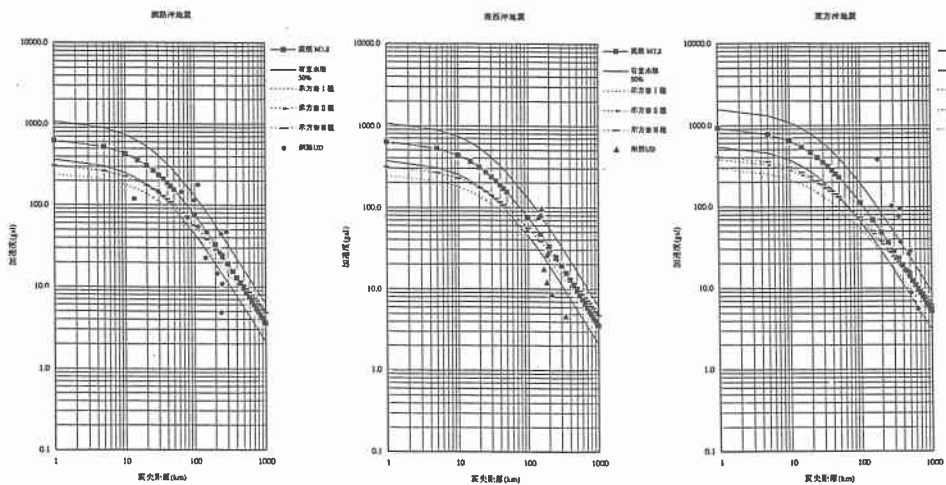


図-2 加速度距離減衰（上下動）

次に図-2に示している上下成分記録については、水平記録同様、釧路地震では約200km、南西沖地震では

約160km, 東方沖地震では約200kmの震央距離から加速度記録が大きく減衰している。つまり, 上下方向の加速度も水平記録と同じ傾向で, ある程度遠くまで, 加速度が減衰せずに伝達され急激に減衰していくと思われる。これらを示方書の推定式と比較すると推定式は実測値よりも震央距離の短い所では, おおよそ小さな値を推定し, 距離が長くなるにつれ大きな値を推定している。これは, 示方書の推定式が実測よりも減衰割合が小さくかつ震央付近の加速度値を小さく評価していることによると考えられる。これに対し, 本報告の推定式は, 示方書の推定式と比較して震央付近のデータを大きく評価しており, 震央距離の短い観測点から得られた実測との相関が良くなっている。また, 回帰に用いた式の形態による特徴より減衰割合については, 示方書の推定式と比較的似た傾向を示している。しかし, 多少ではあるが記録したデータに近い減衰割合であると思われる。この結果に加えて, 表-2に示した相関係数からも本報告の推定式は, 統計解析的に有効な推定式であると考えられる。このような結果については, 示方書の推定式は全国のデータを用いて統計解析したものであり, 本報告の推定式が実測に近い値を推定することは回帰分析的に当然のことである。

4, まとめ

現在, 解析的に距離減衰式を求めることが非常に困難であることから統計的に距離減衰式を求めていくことが, 最善の手法と思われる。しかし, 統計解析による推定式ではサンプルによる大きな影響を受けるため, 現在提案されている式を運用する場合には地域を限定した式として修正を行う必要があると考えられる。

本研究では, 現在提案されている推定式を修正して, 北海道地区の特性を加味した距離減衰式を求めることを目的として回帰分析を行った。その結果, 道路橋示方書に記載されている式の形に帰着するよう, 単純に重回帰するだけで北海道地区の特性を適正に加味出来ることが分かった。また, 求める式の実測値との誤差より式の有意となる範囲を求め, 震央距離の同じ箇所においても異なる加速度が確率的に求めることが地震動の今後の予測では有効的な表現方法であることも分かった。

最後に比較対象とした示方書の式では, 北海道のデータに対して減衰の傾向を適正に表すことが出来ていなかった。このことについてはサンプルデータが全国で得られている記録を用いたことに起因していると思われるが, 本分析により地域特定の減衰式が必要であることが再認識できた。今後は, 今回の分析が十分なデータ量から行ったとはいえないため, これから得られる強震観測データを用いて統計解析を行い, 修正を加えていく必要があると思われる。加えて, 誤差の分散の状態を確認し, 有効な範囲を決定していくことが必要となると思われる。

参考文献

- 1) 川島一彦, 相沢 興, 高橋和之, 最大地震動およ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
- 2) 板橋一雄, 葛野靖史, 松尾 稔, 距離減衰式とマグニチュードの頻度分布に関する研究, 第39回土木学会年次学術講演会, 昭和59年10月
- 3) 井合 進, 倉田栄一, 向井 健, 最大加速度の距離減衰(その1), 第46回土木学会年次学術講演会, 平成3年9月
- 4) 安中 正, 竹内信次, 加藤保治, 須田嘉彦, 最大加速度推定式のばらつきについて, 第46回土木学会年次学術講演会, 平成3年9月
- 5) 安中 正, 海津信廣, 野沢是幸, 関東及び周辺地域の水平最大加速度推定式, 第45回土木学会年次学術講演会, 平成2年9月
- 6) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 平成2年2月