

# 東北地方太平洋沖地震およびその余震を考慮した 距離減衰式の提案

佐々木 隆・伊藤壮志

## 1. はじめに

2005年に国土交通省河川局（当時）により「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」<sup>1)</sup>（以降、指針案と呼ぶ。）が策定され、試行が開始された。この指針案の中では、ダム地点におけるレベル2地震動を選定することが必要となるが、その目的のため、「加速度応答スペクトルの距離減衰式」（以降、「ダム距離減衰式」と呼ぶ。）が、指針案の策定と並行して作成された。ダム距離減衰式は、全国のダム基礎岩盤に最も近い状態の位置に設置された強震計により得られた多数の地震記録を基に、各周波数の加速度応答スペクトル値について、断層までの距離、地震の規模（マグニチュード）、地表から断層面中心までの深さ等をパラメータとして、統計解析により得られた回帰式である。ダム距離減衰式として初めて提案された式は、2003年及び2004年に発表された松本ら<sup>2),3)</sup>によるものであり、1974年から2000年までの63地震において、91ダムで観測された293水平地震動成分の統計分析を基に導き出された。（「H13式」と称する。）近年では、1974年から2008年までの88地震において、213ダムで観測された642水平地震動成分および318鉛直地震動成分の統計分析に基づく距離減衰式が2008年に改訂され、（「H20式」と称する。）それが日本のダムにおける設計地震動の設定方法の主要な一つの手段として、運用されてきた<sup>4)</sup>。

今回2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）およびその余震にてダムで観測された地震動を考慮し、新たな距離減衰式（「H23式」と称する。）を提案したので、その概要を報告する。

## 2. 分析に利用した加速度記録

分析に用いた加速度記録は気象庁マグニチュードM<sub>J</sub>5.0以上、ダムサイトから震源距離が200km

以下、震源深さが100km以下の地震で得られたものである。表-1にこれまでに作成してきた距離減衰式で用いた回帰データ数の変遷を示す。

表-1 距離減衰式の回帰データ数

	対象期間	対象地震	ダム数	観測記録数	
				水平動	鉛直動
H13式	1974年～2000年	63地震	91ダム	293成分	—
H20式	1974年～2008年	88地震	213ダム	642成分	318成分
H23式	1974年～2011年	91地震	239ダム	794成分	394成分

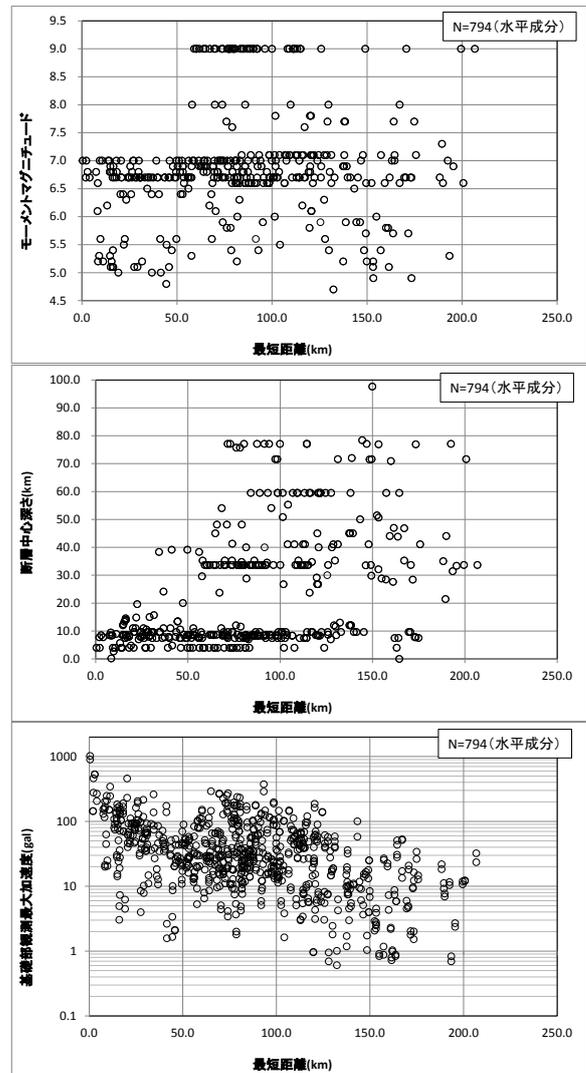


図-1 解析に用いた地震動の特徴

今回の分析では、1974年から2011年4月までに発生した91地震239ダムで得られた水平加速度成分794個、鉛直加速度成分394個を用いている。

Proposal of the Attenuation Equations of Earthquake Motion at Dam Foundation in consideration of the 2011 Tohoku Earthquake and its aftershocks

なお、H20式での回帰データから追加された観測記録の詳細であるが、H23.3.11東北地方太平洋沖地震の本震でのデータに関しては、水平動成分98個及び鉛直動成分49個、H23.4.7余震（宮城県沖地震）でのデータに関しては、水平動成分42個及び鉛直動成分21個、H23.4.11余震（福島県浜通り地震）でのデータに関しては、水平動成分12個及び鉛直動成分6個となる。

ここで用いた全ての加速度記録は、岩盤上に建設されたダムのもので、ダム基礎の平均的なせん断弾性波速度は、0.7~1.5km/secの範囲である。図-1に、解析に用いた地震のマグニチュード、断層中心深さ、水平最大加速度と最短距離（起震断層面のうち、ダム地点から最も近い点とダム地点との距離）の関係を示す。

### 3. 距離減衰式の改良

#### 3.1 地震の種類

今回、表-2に示すように4つの地震に分類した。ただし、日本海東縁部の地震については、観測記録が少なくバラツキが大きいため、個別の距離減衰式は作成していない。なおプレート内地震に関して、今回のH23式では地震タイプは断層深さによって分類しないことにし、このことはH23式とH20式との相違点である。

表-2 地震種別の分類、加速度記録数

タイプ名	地震種別	解析対象の地震動観測記録数								
		地震数	観測記録数（水平動）			観測記録数（鉛直動）				
タイプA	内陸地殻内地震	37	288	組	456	成分	226	組	226	成分
タイプB	プレート境界地震	31	101	組	200	成分	99	組	99	成分
タイプα	プレート内地震	17	57	組	114	成分	57	組	57	成分
タイプE	日本海東縁部の地震	6	12	組	24	成分	12	組	12	成分

#### 3.2 回帰モデル

回帰分析にあたっては、まず地震種別による分けを行わずに全ての地震動を対象に行い、回帰係数を算出する。その後、地震種別毎に観測記録による応答スペクトルと得られた回帰式による応答スペクトルとの比の幾何平均および標準偏差を求め、地震種別に応じた補正倍率を評価している。即ち、本論文で提案する回帰モデルは、2段階の算出過程を経た上で、求められている。

今回提案するH23式については、基本的にH20式の式形を踏襲するが、巨大規模の地震にも一貫して適用できるよう、マグニチュードの定義を気象庁マグニチュードM<sub>J</sub>からモーメントマグニ

チュードM<sub>W</sub>に見直しを行っている。式(1)および式(2)にH23式を示す。式(1)がダムから断層までの最短距離を用いた式（以下、最短距離式と呼ぶ。）、式(2)が等価震源距離を用いた式（等価震源距離式と呼ぶ。）である。

$$\begin{aligned} \log SA(T) &= C_{m1}(T)M_W + C_h(T)H_C - \log(R + C_1(T) \cdot 10^{0.5M_W}) \\ &\quad - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_C)R + C_o(T) \quad (M_W \leq 5.0) \\ \log SA(T) &= C_{m1}(T)M_W + C_{m2}(T)(M_o - M_W)^2 + C_h(T)H_C \\ &\quad - \log(R + C_1(T) \cdot 10^{0.5M_W}) \\ &\quad - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_C)R + C_o(T) \end{aligned}$$

(M<sub>o</sub> = 5.0, M<sub>W</sub> > 5.0) … 式(1)

ここで、SA(T)は加速度応答スペクトル（ガル）、Tは固有周期（秒）、M<sub>W</sub>はモーメントマグニチュード、Rは最短距離(km)、H<sub>C</sub>は断層中心深さ(km)、C(T)は係数である。H<sub>C</sub>について、100kmを超える場合はH<sub>C</sub>=100kmとした。

$$\begin{aligned} \log SA(T) &= C_{m1}(T)M_W + C_h(T)H_C - \log(X_{eq} + C(T)) \\ &\quad - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_C)X_{eq} + C_o(T) \quad (M_W \leq 5.0) \\ \log SA(T) &= C_{m1}(T)M_W + C_{m2}(T)(M_o - M_W)^2 + C_h(T)H_C \\ &\quad - \log(X_{eq} + C(T)) - (C_d(T) + C_{dh}(T)H_C)X_{eq} \\ &\quad + C_o(T) \end{aligned}$$

(M<sub>o</sub> = 5.0, M<sub>W</sub> > 5.0) … 式(2)

ここで、X<sub>eq</sub>は断層内のアスペリティは考慮しないで算出した等価震源距離であり、断層面から発散される地震のエネルギーと等価となる仮想的な点震源とダム地点間を結ぶ直線距離である。その他のパラメータは式(1)と同様である。

モーメントマグニチュードが求められていない地震については、気象庁マグニチュードM<sub>J</sub>からモーメントマグニチュードM<sub>W</sub>への変換は、武村<sup>5)</sup>の式に基づく地震調査推進本部で用いている方法により、種別Aの場合は式(3)によるものとし、その他の種別の場合はM<sub>W</sub>=M<sub>J</sub>とする。

$$M_W = 0.78M_J + 1.08 \dots \text{式(3)}$$

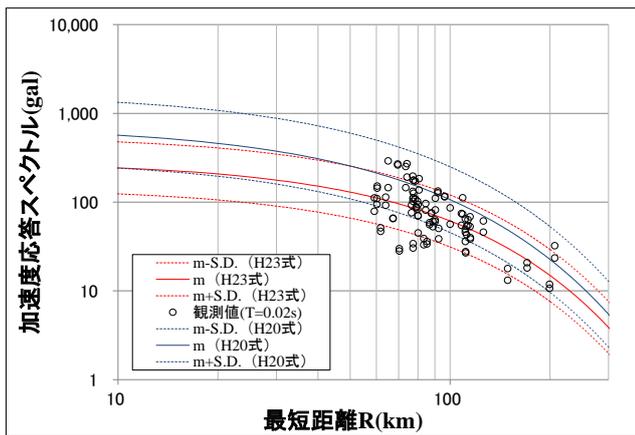
### 4. 距離減衰式による推定値と実測値の比較

今回提案するH23式による算出値とダムでの実測値との比較を通じ、H23式の適合性を検証する。

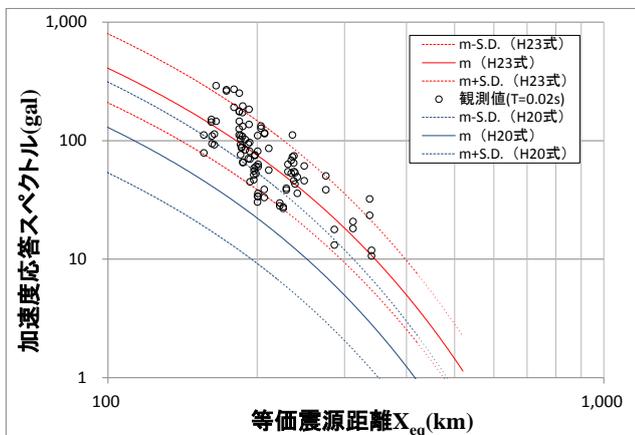
図-2に東北地方太平洋沖地震において各ダムで観測された基盤加速度（T=0.02s）を最短距離及び等価震源距離別に整理し、基盤における観測地震動の距離減衰特性を示す。図-2より、各ダムでの基盤加速度の距離減衰特性は、H20式に比べH23式による計算値は、いずれの式形においても、

実測値との適合度は改善している。

H23式の適合性を検証するにあたっては、個別の地震に対する各ダムにおける加速度応答スペクトルの計算値と実測値との比を全周期帯に渡って計算し、これらの平均的な適合度をもって評価することとした。図-3に、代表例として東北地方太平洋沖地震の場合の、最短距離式での結果を示す。図-3には各ダムのデータ全てを示したグラフと各ダムデータの周期毎の平均値及び平均値±標準偏差を示したグラフを併記して示す。このとき、平均値が1に近い程、適合度が高いということになる。図-4には等価震源距離式での結果（各ダムデータの周期毎の平均値及び平均値±標準偏差のグラフのみ）を示す。なお図-3と図-4は、H20式での結果との比較で示している。



(a)最短距離式での適合性



(b)等価震源距離式での適合性

図-2 東北地方太平洋沖地震（2011.3.11、Mw9.0）における基盤加速度の距離減衰特性

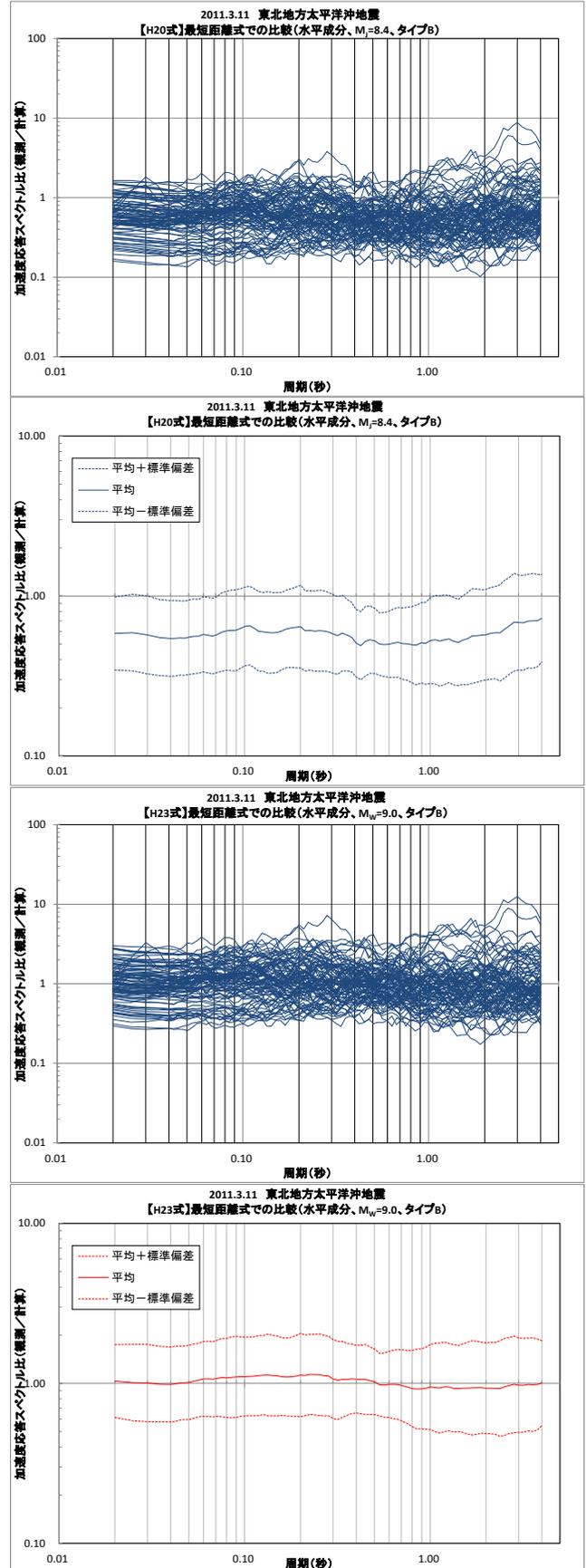


図-3 東北地方太平洋沖地震（2011.3.11、Mw9.0）に対する距離減衰式（最短距離式）の適合度検討

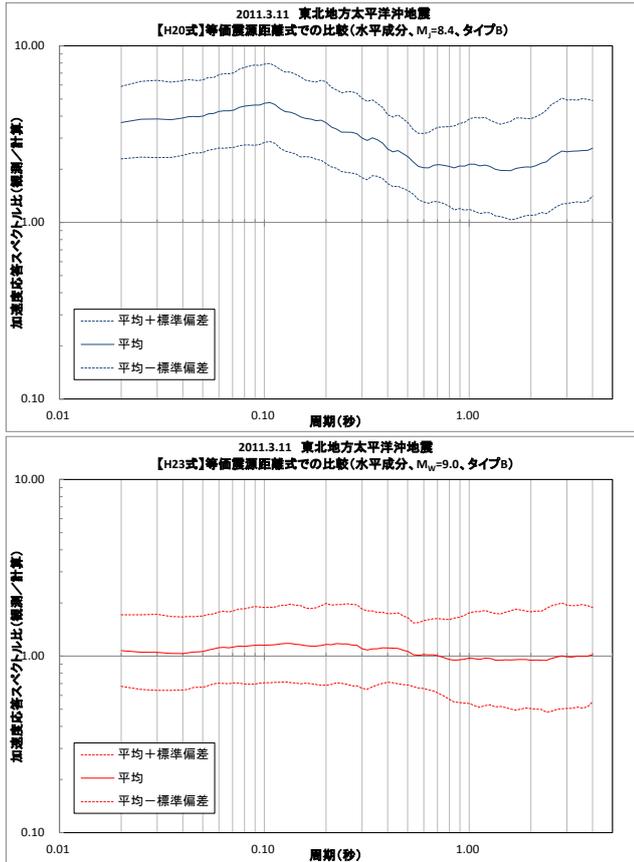


図-4 東北地方太平洋沖地震（2011.3.11、 $M_w$ 9.0）に対する距離減衰式（等価震源距離式）の適合度検討

H20式の場合、図-3では計算値が実測値に比べて大きく、図-4では計算値が実測値に比べて小さく評価されることが分かる。それに対して、H23式による計算値は、図-3及び図-4で示すとおり、両式とも、実測値との適合度は改善していることが分かる。

### 5. まとめ

以下に本論文で得られた知見を示す。

- ・ダム基礎における最新の距離減衰式として、2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震（ $M_w$ 9.0）で観測された地震動およびその余震を考慮したH23式を提案した。
- ・気象庁マグニチュードの適用限界を超える巨大規模の地震にも一貫して適用できるよう、H23式におけるマグニチュードの定義を気象庁マグニチュード $M_J$ からモーメントマグニチュード $M_w$ に見直しを行った。
- ・地震種別は、内陸地殻内地震、プレート境界地震、プレート内地震、日本海東縁部の地震の4類型に分類した。

・改良されたH23式は、 $M_w$ 9.0の東北地方太平洋沖地震での観測記録を精度良く再現できるようになった。また、紙幅の都合上、その他の地震については示さなかったが、これらについても精度良く再現できることが明らかとなっている。なお、今回の距離減衰式の改良については、関東地方整備局における平成23年度業務の中で実施されたものであり、関係者に御礼を述べる。

### 参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）、2005年3月
- 2) N.Matsumoto, H.Yoshida, T.Sasaki, T.Annaka, Response Spectra of Earthquake Motions at Dam Foundations, 21st Congress on Large Dams, Montreal, Q.83-R.35, Vol.3, pp.595-611, 2003
- 3) 松本徳久、吉田等、佐々木隆、安中正：ダムサイトでの地震動の応答スペクトル、大ダム、No.186、pp.69～76、2004
- 4) 三石真也、島本和仁：大規模地震に対するダム耐震性能照査について、ダム技術、No.274、pp.6～35、2009
- 5) 武村雅之：日本列島および周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震第43巻、pp.257～265、1990

佐々木 隆



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室長  
Takashi SASAKI

伊藤 壮志



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室研究官  
Takeshi ITO