

◆特集：大規模地震に対するダムの耐震性能照査◆

ダムの耐震性能照査に用いるレベル2地震動の設定方法

安田成夫* 金銅将史** 佐野貴之*** 松本徳久****

1. はじめに

レベル2地震動を想定して大規模地震に対するダムの耐震性能を照査する方法を示した『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)』¹⁾(以下、指針(案))の試行が開始されることとなった。

照査にあたり考慮するレベル2地震動は、『当該ダム地点で現在から将来にわたって考えられる最大級の強さをもつ地震動』と定義されている。これは、兵庫県南部地震後、土木学会の第3次提言²⁾において示された『当該地点で現在から将来にわたって考えられる最大級の強さをもつ地震動』を踏襲した定義である。今回の指針(案)策定過程においてこのレベル2地震動を具体的にどのような手順で設定するのかが、議論の焦点の一つであった。

本稿ではレベル2地震動設定の具体的設定手順について、記述する。

2. レベル2地震動の設定方法

レベル2地震動の設定手順の概要を図-1に示す。以下、これに沿ってレベル2地震動の設定の考え方を説明する。

2.1 想定地震の選定

指針(案)では、「照査に用いるレベル2地震動の設定にあたっては、あらかじめダム地点周辺において過去に発生した地震に関する情報や周辺に分布する活断層やプレート境界等の情報について文献調査等により十分な調査を行い、その結果に基づき、当該ダムに最も大きな影響を及ぼす可能性のある地震(以下「想定地震」という。)を選定する。」としている。

第一の要点は、ダムの耐震性能照査では、照査

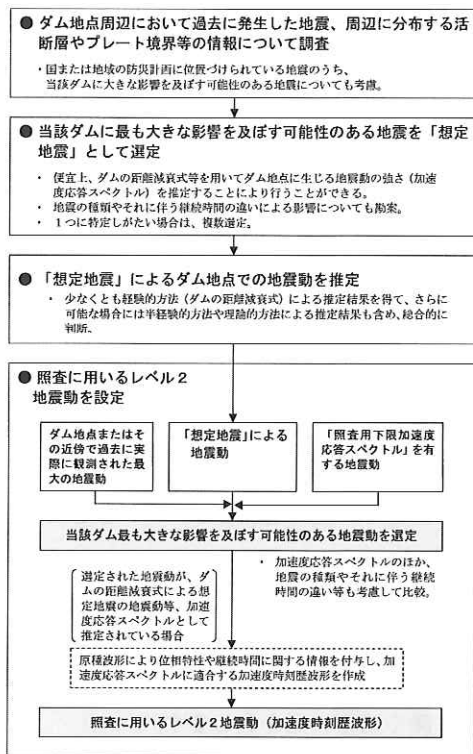


図-1 レベル2地震動の設定手順

に用いるレベル2地震動をダム毎に設定する方法を採っている点である。

これは、ダムは万一地震によって重大な損傷を受けた場合、下流域など周辺への影響が極めて大きい構造物であること、また、道路や鉄道等の線状構造物と異なり点的な構造物であり、また全国的な施設数が橋梁などに比べ限られており、個々のダムの事情を考慮して地震動を設定することが現実的に可能であることによる。

なお、原子力発電所もダムと同様、個別に地震動を設定する方式を採っている。

第二の要点は、レベル2地震動の設定では、過去に周辺で発生した地震(歴史地震等)や、周辺に分布する活断層やプレート境界等(プレート内

Methods for Setting of Level 2 Earthquake Motions to Evaluate the Seismic Performance of Dams

地震の震源も含む。)、地震の震源となる断層に関する情報に基づいて行うことである。

過去に発生した地震の情報を調査するのは、過去に大きな被害をもたらした地震の再来の可能性を考慮する趣旨であり、また活断層やプレート境界等の情報を調査するのは、それらを震源とする地震発生の可能性を考慮するために行うものである。

レベル2地震動の設定において最初に必要となるのが、各種文献資料等からこれらの情報を収集・整理する作業である(図-2、表-1)。

この作業により、当該ダム地点の周辺において将来発生する可能性のある様々な地震(あるいは、その震源として考慮すべき断層等)を抽出することができる。

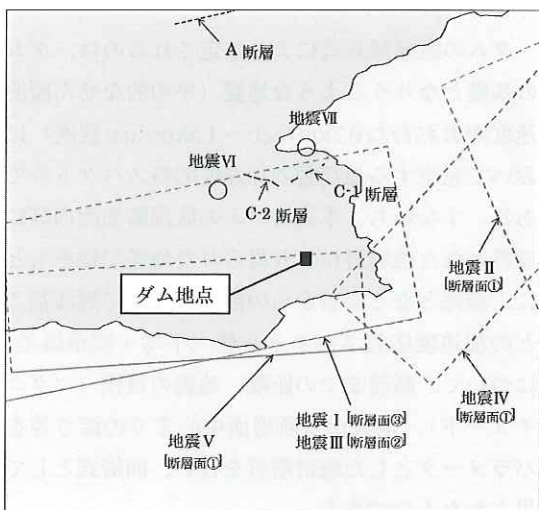


図-2 周辺に位置する断層等の調査結果(例)

表-1 断層等の情報の整理(例)

地震の種類	地震または震源	地震規模	断層モデル諸元等					断層面までの距離[km]		
			長さL[km]	幅W[km]	上端深さd[km]	傾斜角δ[°]	断層面中心深さHc[km]	最短距離R	等価震源距離Xeq	
活断層	A断層	M8.0	66~74	20~60	0	15~45	10.0	85	101	
	C-1断層	(M6.7)	13	13	0	90	6.5	26	29	
	C-2断層	(M6.6)	11	11	0	90	5.5	25	29	
プレート境界	地震I	M8.4	①	115	70	2	34	18.7	16	80
			②	150	100	3	24			
			③	150	70	10	10			
			④	140	80	1	20			
			⑤	60	80	1	20			
	地震II	M8.4	①	150	100	3	24	22.7	75	145
			②	115	70	2	34			
	地震III	M8.4	①	150	120	1	20	19.5	16	85
			②	150	70	10	10			
	地震IV	M7.9	①	154	67	0	30	17.8	38	81
②			84	78	0	30				
地震V	M8.0	①	122	38	2.3	22	11.2	17	78	
		②	129	54	2.3	22				

その際、国または地域の防災計画において位置づけられている地震についても考慮する必要がある。

指針(案)では、このようにして抽出された様々な地震のうち、当該ダムに最も大きな影響を及ぼす地震を特に「想定地震」と呼ぶこととしている。当該ダム地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動としてのレベル2地震動は、この想定地震によってダム地点に生じる地震動の推定結果を踏まえて設定することとなる。

様々な地震によるダムへの影響は、その地震によってダム地点で生じる地震動の強さはもとより、地震動の継続時間、またダムの固有振動周期と地震動の卓越周期との関係等、様々な要因に左右される。

このため、実務的には、想定地震の選定は便宜上、後述するダムの距離減衰式等を用い、ダム地点に生じる地震動の強さ(加速度応答スペクトル)を推定することにより行うことができる旨、指針(案)の解説に考え方が示している。

様々な地震によるダム地点での地震動の加速度応答スペクトルをダムの距離減衰式により求めて比較した例を図-3に示す。

なお、地震がダムに及ぼす影響は地震動の強さだけでなく、継続時間などにもよる。例えば、プ

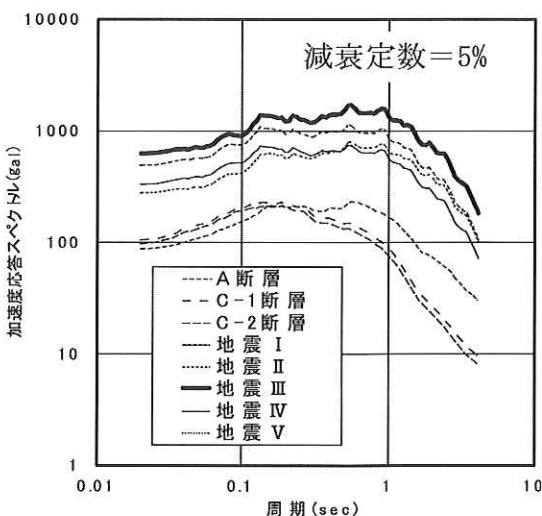


図-3 表-1の各地震によるダム地点での地震動(加速度応答スペクトル)推定結果

プレート境界で発生する規模の大きな地震による地震動は、活断層で発生する地震に比べ一般に継続時間が長く、強さの大小とは別に継続時間の短い地震動に比べてダムに及ぼす影響が大きくなる可能性がある。

このため、想定地震の選定にあたっては、継続時間の違いなどによる影響を勘案する必要がある。したがって、ある1個の地震が他の地震よりも応答スペクトルの大きさ、継続時間、周波数特性の全ての面からそのダムへの影響が最も大きいと判断され難く、想定地震を1つに特定しがたい場合には、複数の地震を選定することも必要である。

2.2 想定地震による地震動の推定

想定地震が選定されれば、それによる当該ダム地点での地震動を推定することになる。指針(案)では特定の推定手法を規定していない。その解説において、ダムの距離減衰式に代表される既往の地震動記録に基づく経験的な方法、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法など断層面やその破壊過程をモデル化してダム地点での地震動を求める半経験的方法、また、断層面やその破壊過程に加え、断層からダム地点までの地震動の伝播経路特性についてもモデル化してダム地点での地震動を求める理論的方法などを紹介している。

このうち、半経験的方法や理論的方法等では、断層面の破壊過程や伝播過程等について適切にモデル化できるだけの十分な情報がある場合にはダム地点における地震動を推定できるが、そのよう

な情報が得られる断層は実際には限られている。このため、指針(案)の解説では、「少なくとも①経験的方法であるダムの距離減衰式による推定結果を得て、さらに、②半経験的方法や③理論的方法によって地震動が推定できる場合には、それらの推定結果も含め総合的に判断して適切な地震動を設定する」としている。

2.3 ダムの距離減衰式^{3),4)}を用いた地震動推定

ダムの距離減衰式は、わが国のダム基礎で得られた多数の地震動記録をもとにしてつくられた地震動推定のための経験式であり、地震のタイプ(表-2)ごとに震源からの距離や地震の規模等をパラメータとして、そのダム地点で生じる地震動強さ(加速度応答スペクトル)を推定することができる。

ダムの距離減衰式により推定されるのは、ダムの基礎となりうるような地盤(平均的なせん断波速度がおおむね0.7km/sec~1.5km/sec程度)において発生する地震動の加速度応答スペクトルである。すなわち、本式はダムの底部監査廊内等に設置された強震計により得られた地震記録をもとに、震源となる断層からの距離に応じて周波数ごとの加速度応答スペクトル値(平均+標準偏差)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た統計解析を行い、回帰式として得られたものである。

具体には、震源からの距離の取り方により、断層面と対象とするダム地点の最短距離を用いた最短距離式(式1)および、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対象とするダム地点間の距離(等価震源距離)を用いた等価震源距離式(式2)がある。

$$\log S_a(T) = C_a(T)M + C_c(T)H_c - C_d(T)\log(R + 0.334 \exp(0.653M)) + C_o(T) \dots \dots \dots (1) \quad 3), 4)$$

$$\log S_a(T) = C_a(T)M + C_b(T)H_c - C_d(T)X_{eq} - \log X_{eq} + C_o(T) \dots \dots \dots (2) \quad 3), 4)$$

ここに、
T：固有周期、

表-2 ダムの距離減衰式において考慮された地震のタイプ^{3),4)}

地震のタイプ	備考
内陸型地震	内陸地殻内の地震。日本海東縁部の地震や山梨・神奈川県境付近の地震、伊豆半島周辺の浅い地震を含む。
海洋型地震	海域で発生した深さ60km以下の地震。主に東北日本太平洋側のプレート境界地震
プレート内 稍深発型地震	内陸部のやや深い地震。主に深さ60kmを超える地震であるが、西南日本下の深さ40km程度のプレート内地震を含む。

SA (T) : 水平方向2成分の平均応答スペクトル、
M : 断層で発生する地震の規模 (気象庁マグニチュード)、

Hc : 断層面中心の地表からの深さ (ただし、100kmを超える場合は100km)

R : 断層面までの最短距離

Xeq : 等価震源距離 (図-4)

Cm(T), Ch(T), Cd(T), Co(T) : 地震のタイプに応じて過去の多数の地震記録より得られる回帰係数

ダムの距離減衰式を用いて地震動を推定するには、ダム地点と断層との距離 (RまたはXeq)、断層で発生する地震の規模 (M) および断層面中心の地表からの深さ (Hc) を具体的に設定する必要がある。

このうち、R、XeqおよびHcは文献資料をもとに断層面の位置がわかれば算定できる。

断層で発生する地震の規模 (M) については、文献資料において具体的にその値が示されている場合はその値を用いることができる。しかし、断層の長さしかわからないような場合には、断層長さと同層幅、また断層面積と地震規模の間に経験的に得られている関係式などを用い、当該断層が活動した場合に生じる地震の規模を推定することとなる。

2.4 照査用下限加速度応答スペクトル

レベル2地震動は、想定地震によるダム地点での地震動を用いることが基本となる。しかし、既往の文献等で周辺に地震の震源となる活断層が知

られていない場合には、想定地震の震源までの距離が長くなるのでダム地点での地震動は小さくなる。

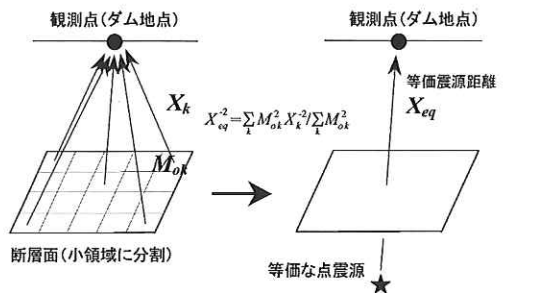
一方、地震活動の極めて活発なわが国では、地表に活断層の存在が知られていなくても、地下に未知の活断層が存在する可能性も否定できない。

本指針 (案) では、地震の震源となる活断層が地表に現れていない場合でも、地下の活断層を震源とするある程度の規模の地震が発生する可能性を想定することとし、図-5に示す加速度応答スペクトルを「照査用下限加速度応答スペクトル」と称し、たとえ想定地震による地震動の推定値がこれを下回る場合でも、このレベルの地震動を考慮するものとされている。

この照査用下限加速度応答スペクトルを具体的にどのようなレベルに設定すべきかについては、指針 (案) 策定の過程で特に議論になった点のひとつである。議論の焦点は、存在が知られていない地下の活断層においても発生する可能性を考慮すべき地震の規模であった。

土木学会の提言にも示されているように、M6.5を超える規模の地震は地表面に何らかの痕跡を残すものと考えられている。照査用下限加速度応答スペクトルは、このM6.5規模の地震がダム地点直下で発生した場合に地表面で生じる地震動をダムの距離減衰式等を用いて試算した結果 (予測値のばらつきを考慮し、安全側として平均値に標準偏差を加えたレベルに相当する加速度応答スペクトル) をほぼ包絡するとともに、ダムの応答特性 (固有周期帯) の影響も加味して設定された。

2000年10月に発生した鳥取県西部地震 (M7.3)



M_{ok} : 断層面内の小領域 k における地震モーメント

X_k : 断層面内の小領域 k から観測点 (ダム地点) までの距離

図-4 等価震源距離の算定

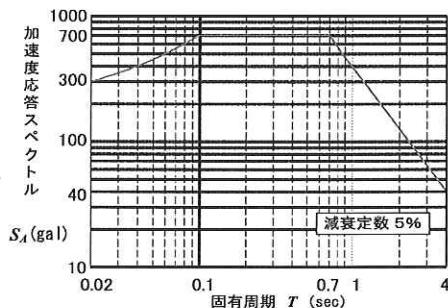


図-5 照査用下限加速度応答スペクトル

では、震源となった活断層は事前に知られていなかった。その震源断層が仮に事前に詳細な調査を行ってれば現在の技術で発見可能であったかどうかは専門家の間でも見解が分かれているところである。しかしながら、このような事例もあることを考慮し、同地震と同規模の直下地震を考慮した試算も行い、上記により設定した照査用下限加速度応答スペクトルがM7.3の地震による地震動の推定値についてもその平均値レベルは包絡していることを確認している。

2.5 レベル2地震動の加速度時刻歴波形の作成

指針(案)では、「ダムの耐震性能の照査には、想定地震によってダム地点において発生するものと推定される地震動の加速度時刻歴波形(加速度応答スペクトルを推定した場合は、それに適合するもの)を用いることを基本とする。」としている。

レベル2地震動という極めて強い地震動に対する照査ではダムに損傷が生じることも想定した上でダムの耐震性能を評価する必要がある。ダムの損傷過程を調べるには、時々刻々の損傷がどのように進展するかを時刻歴応答解析により予測する必要がある。そのため、ダムの距離減衰式により推定される加速度応答スペクトルではなく、それに適合する加速度時刻歴波形を用いることとした。

なお、ダムの距離減衰式によって想定地震によるダム地点での地震動を推定した場合、その地震動は加速度応答スペクトルとして推定されることとなる。このため、既往の加速度時刻歴波形等によって位相特性を与え、ダムの距離減衰式を用いて推定された加速度応答スペクトル(それが照査用下限加速度応答スペクトルを下回る場合には、照査用下限加速度応答スペクトル)に適合する加速度時刻歴波形を作成する作業が必要となる。

このとき、既往の加速度時刻歴波形(原種波形という)は、当該ダム地点において、想定地震の震源としている活断層やプレート境界等を震源とする地震によって強震記録が既に得られているときはそれを用いる。そして、その周波数特性を推定された加速度応答スペクトルに適合するよう

調整することにより、ダム地点における地震動の加速度時刻歴波形を求めるのがよいと考えられる。

この方法は、想定地震として考慮すべき地震の震源特性やダム地点周辺の地盤の伝播経路特性等がその強震記録にある程度反映されていることを前提としたものである。

そのような記録が得られていない場合は、過去の大規模地震時にダム基礎で得られている代表的な強震記録を原種波形とし、その周波数特性を推定された加速度応答スペクトルに適合するよう調整して得られる加速度時刻歴波形を用いることが考えられる。その際、継続時間等の特性が加速度時刻歴波形に加味されるよう、原種波形の選定では、選定された想定地震と同じ種類(活断層で発生する地震あるいはプレート境界で発生する地震等)で規模も同程度の地震により得られた強震記録を採用する必要がある。

なお、原種波形としてこのような条件に合うものを一つに選定しがたい場合には、既往の強震記録から複数のものを選定し、それぞれの加速度時刻歴波形を作成することも考えられる。この場合、照査に用いる地震動をその周波数特性に幅を持たせて設定していることになる。

なお、半経験的方法や理論的方法によって地震動を推定する場合には、断層の破壊過程を考慮した波動伝播の計算となり、別の手法となる。

参考として、これまでの主な地震において震源近傍のダム基礎において得られている代表的な強震記録(加速度時刻歴波形)の例を内陸の活断層地震である兵庫県南部地震およびプレート境界地震である十勝沖地震についてそれぞれ図-6および図-7に示す。

3. まとめ

以上、ダム地点周辺の断層等の情報をもとに、最終的に照査に用いるレベル2地震動の加速度時刻歴波形を得ることができる。

その手順は図-1に示したとおりであるが、ダムの照査における要点は、以下のとおりである。

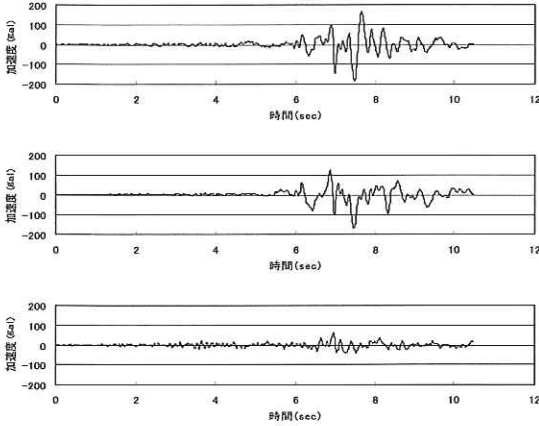


図-6 1995年兵庫県南部地震時の強震記録

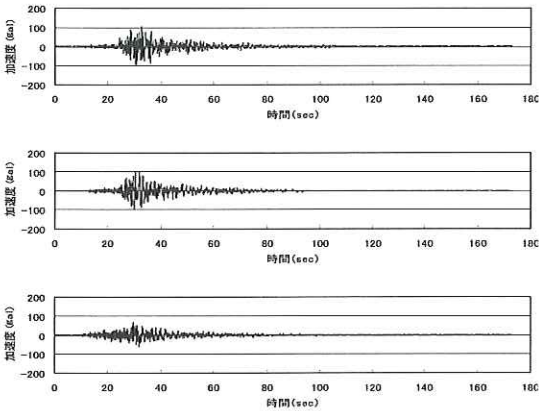


図-7 2003年十勝沖地震時の強震記録

③最終的に照査に用いるレベル2地震動は、②により推定された地震動、照査用下限加速度応答スペクトルを有する地震動、既往最大の地震動を考慮し、それら3つの中でダムに最も大きな影響を及ぼす地震動として設定する。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課：『大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）』（2005）
- 2) 土木学会（土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会）：土木構造物の耐震性能と耐震設計法等に関する第3次提言（2000）
- 3) Matsumoto, N., Yoshida, H., Sasaki, T. and Annaka, T.: Response Spectra of Earthquake Motion at Dam Foundations, Proc. Twenty-first International Congress on Large Dams (2003)
- 4) 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)

- ①照査用地震動はダム毎に個別に設定する。
- ②過去の地震や断層等の情報をもとに当該ダムに最も大きな影響を及ぼすと考えられる地震（想定地震）を選定し、次に、想定地震によってダム地点において生じる地震動を推定する。

安田成夫*



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室長、工博
Dr. Nario YASUDA

金銅将史**



財団法人ダム技術センター企画部企画課長（前 国土交通省国土技術政策総合研究所河川部ダム研究室主任研究官）
Masafumi KONDO

佐野貴之***



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部ダム研究室研究官
Takayuki SANO

松本徳久****



財団法人ダム技術センター顧問
Norihisa MATSUMOTO