

資料 1—7 照査用下限加速度応答スペクトル

「照査用下限加速度応答スペクトル」は、地震の震源となる活断層が地表面に現れていない場合を想定して、最低限考慮すべき水平地震動を加速度応答スペクトルとして設定したものである。その設定にあたっては、これまでの知見等に基づき、存在が知られていない地下の活断層の活動により発生する可能性があるとして考慮すべき地震の規模を定め、そのような規模の地震により地表のダム基礎岩盤相当の地盤において生じる地震動を推定した上で、ダムの応答特性等を考慮して行った。以下、設定に至る検討の過程を示す。

活断層が知られていない場所の直下で発生する可能性があるものとして考慮すべき地震の規模については、土木学会がとりまとめた『土木構造物の耐震設計ガイドライン』¹⁾にその考え方が示されている。同ガイドラインでは、「対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合など、レベル 2 対象地震が明確に選定できない場合には、マグニチュード（以下「M」と示す。）6.5 程度の直下地震が発生する可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル 2 地震動の下限とする。」としている注 1)。

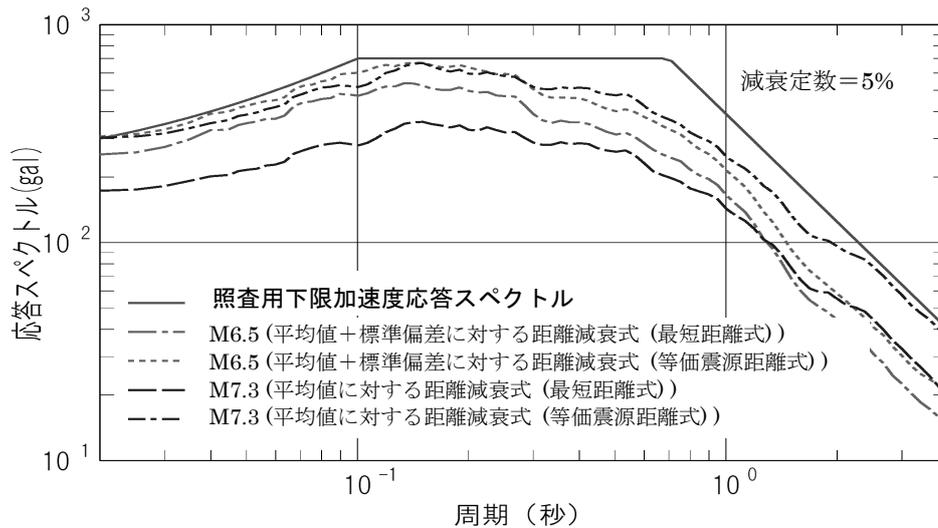
指針（案）における「照査用下限加速度応答スペクトル」の検討にあたっては、この考え方を踏まえ、ダム地点直下における M6.5 の地震の発生を仮定した場合にダム地点で生じる可能性のある地震動の強さを推定した。具体には、既往の調査研究により経験的に得られている M と断層面の長さや幅の関係式を用いて、断層面の長さや幅を仮定した断層モデルを設定した。この断層面の深さや傾き等のパラメータを種々変化させた場合に、当該断層において発生する M6.5 の地震により地表付近のダム基礎岩盤相当の地盤で発生する水平地震動の加速度応答スペクトルを経験的方法および半経験的方法（統計的グリーン関数法）を用いて試算した。

経験的方法による地震動の推定にあたっては、ダムサイトにおける多数の地震動記録の統計的分析により得られた回帰式であるダムの距離減衰式^{2) 3)}（最短距離式および等価震源距離式）を用いたが、その適用にあたっては、推定値に対するばらつきの影響に対する安全側の配慮として、平均値と標準偏差の和に対応する推定式を用いている。

「照査用下限加速度応答スペクトル」は、以上のような検討によって推定されたモデル断層面の中心の直上から一定距離の地表面範囲^{注 2)}において発生する水平地震動を統計的にほぼカバーするレベル^{注 3)}のものとして求められた地震動の加速度応答スペクトルをもとに、これにダムサイトにおいて得られている既往の強震記録の加速度応答スペクトルの形状特性や、ダムの周波数応答特性（固有周期帯）等の諸要因を総合的に考慮した上で設定したものである。

参考として、ダム地点の直下を震源とする未知の活断層による地震によって地表のダム地点で生じる地震動の加速度応答スペクトルについて、ダムの距離減衰式を用いて試算した結果と最終的に設定した「照査用下限加速度応答スペクトル」をあわせて図—1.7.1 に示す。

なお、同図中には、M6.5 の直下地震を想定した場合の平均値と標準偏差の和に対するダムの距離減衰式による推定結果とともに、これより大きい M7.3 の直下地震を想定した場合の平均値に対するダムの距離減衰式による推定結果についてもあわせて示している。平均値で評価した場合には、「照査用下限加速度応答スペクトル」は、M7.3 程度の直下地震が未知の活断層で発生した場合の地震動についてもほぼカバーするものとなっている。



図—1.7.1 直下地震による地表面での地震動の試算結果と照査用下限加速度応答スペクトル^{注2 注3)}

注1) 『土木構造物の耐震設計ガイドライン』¹⁾において、その発生の可能性に配慮する直下地震の規模をM6.5程度としたのは、内陸地殻内で発生したこれまでの地震記録から得られた以下のような知見を踏まえたものとされている。

- ① M6.5以下の地震では、地表地震断層が生じる地震は極めて少ないこと。
- ② M6.8を超える規模の地震では、地表地震断層が生じる地震が多いこと。
- ③ M6.5以下およびM6.8以上の地震に比べ、M6.6およびM6.7の地震の発生数が少ないこと、またこのことは偶然ではなく、震源断層が地表に突き抜ける影響でMに不連続が生じているためと考えられること。
- ④ 例外的に、M6.5を超える地震でも地表地震断層を生じない場合もあるが、そのような地震による被害の程度はM6.5以下の地震による被害の上限とそれほど大きな差がないこと。

注2) 試算では、M6.5の直下地震を想定した試算では、ダム地点を中心とした半径10km、またM7.3の直下地震を想定した場合には同半径15kmの円内の範囲について考慮した。

注3) 上記の範囲内の各地点において生じるものと推定される地震動レベルの84%フラクタイル（累加確率が84%以下となる確率変数（ここでは応答スペクトル）の値）に相当するレベルとした。

参考文献

- 1) 土木学会 地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）
—耐震基準作成のための手引き—（2001）
- 2) 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)
- 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)

資料 1—8 コンクリートダム本体の照査における地震応答解析

1. 基本事項

指針（案）では、ダム地点において設定された照査用の入力地震動を時刻歴加速度波形として解析モデルに対して与え、時刻歴応答を求める動的解析（時刻歴応答解析）を行うことを想定している。

各形式のコンクリートダムについて、有限要素法による数値解析モデル作成の基本的な考え方、当該解析モデルへの地震動入力の考え方および解析手法を以下に示す。なお、解析に用いる有限要素モデルの作成にあたっては、ダムの形式等に応じた構造特性や動的応答特性を踏まえ、解析結果が照査上危険側の結果とならないこと、解析結果の評価に必要な精度を確保できること、いたずらに計算量が大きくならないことなどの点から適切なものとするよう留意する必要がある。

以下、重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムに分けて、解析方法の概要を述べる。

2. 重力式コンクリートダム

2.1 解析モデル

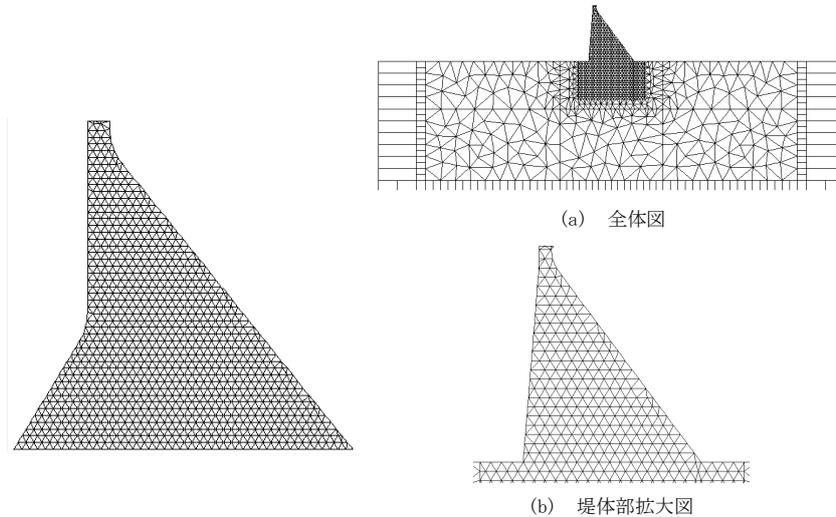
重力式コンクリートダム堤体は、ダム軸方向を横断するような横継目によって幅 15m 程度のブロックごとに分割されていることから、設計においては 2 次元断面でその構造安定性を確認している。そこで、耐震性能照査においても、基本的には 2 次元断面で検討を行うことができると考えられる（図-1.8.1）。ただし、その際には、地震時に最も厳しい条件になると予想される最大断面等を対象とする必要がある。

堤体のほか基礎地盤もあわせてモデル化するのがよい。堤体のみをモデル化した解析とすることも可能であるが、この場合には、堤体とともに基礎地盤をモデル化してその変形性を考慮する場合に比べ、解析上堤体内の発生応力は大きくなることに注意が必要である。

基礎地盤部の境界条件は、領域外への地震動伝播を考慮し、エネルギー逸散が適切に考慮できるものが望ましい。そのような境界条件を設定しない場合には、解析モデルの減衰を適宜大きめに設定することが必要となる。

堤体の応答解析結果から堤体上に設置されたゲートなどの放流設備の地震応答解析用の入力地震動を求める場合、堤体および基礎地盤部の有限要素モデルの要素寸法を大きくすると、ゲートの固有周期に対応する高周波成分が過小評価されるおそれがあるため、適切な要素寸法を用いる必要がある。

地震時動水圧は、貯水を圧縮性流体としてモデル化することによりその影響を考慮するのがよいが、近似的に非圧縮性流体とみなして、付加質量マトリクス等により考慮する方法も採りうる。



(1) 堤体だけの2次元モデル (2) 堤体と基礎地盤を含む2次元モデル

図-1.8.1 重力式コンクリートダム解析モデル

2.2 地震動入力

当該ダムに最も大きな影響を及ぼす可能性のある地震を選定し、その地震によってダム地点において発生すると推定される地震動の加速度時刻歴波形をダムの耐震性能照査に用いる。その際、ダムの距離減衰式による経験的方法のようにダム堤体底面における地震動が推定される場合と、ダムが存在しない開放基盤上での地震動が推定される場合がある。

ダム堤体底面における地震動が推定される場合には、基礎地盤部についてもモデル化する際は、堤体底面において、ダム地点において設定された照査用地震動が作用するような地震動を解析モデルの基礎地盤部底面から入力する。そのような地震動は、解析モデルにおける堤体底面と基礎地盤部底面との伝達関数を利用して、ダム地点において設定された照査用地震動を基に求めることができる。開放基盤上での地震動が推定される場合には、一次元成層地盤応答解析により解析モデルの基礎地盤の境界条件等を考慮して、基礎地盤部底面から入力する地震動を算出することができる。なお、堤体のみをモデル化する場合、照査用地震動を堤体底面から直接入力することとなる。

2.3 解析手法

数値解析法により、コンクリートダム堤体内の引張破壊を考慮する方法の主なものとして、離散型クラックモデルと分布型クラックモデル（スミアドクラックモデル（*smear crack model*））がある。離散型クラックモデルは、引張破壊により発生したクラックの開きを変位として考慮できる要素（例：ジョイント要素）を用いるもので、通常クラックが入る可能性がある位置に予めクラックを表現する要素を導入して解析を行うことが一般的である。動的解析中にクラックが入る場所を特定しながらクラックを表現する要素を導入していく方法もあるが、計算途中段階で要素分割形状を修正することが必要になる場合には多大な計算時間を必要とするため、コンピュータ技術が進歩した現在でも動的解析との組合せでは実施例が少ない。

一方、分布型クラックモデルは、要素自体にクラック発生前後の特性を付与する方法で、予めクラックが入る場所を設定する必要がない。また、クラック発生後もコンクリートを連続体として扱い、クラックを要素の材料特性の変化としてモデル化するので、初期に設定した幾何学的条件を変更することな

くクラックの進展を追跡できる。しかし、この分布型クラックモデルは、クラック発生が構造物の応力状態、巨視的な変形状態に与える影響を表現することは可能であるが、クラックの開きを要素のひずみに置き換えて評価する手法であるため、クラックそのものの開きを直接的に評価することには適していない。ダム堤体内の引張破壊を考慮する方法には、これ以外にも種々の手法があるが、各々に一長一短がある。

大規模地震時における重力式コンクリートダム堤体のクラック発生箇所および進展方向を予め推定・予測することは困難であることから、重力式コンクリートダムのクラック進展解析では分布型クラックモデルを用いた事例が比較的多くみられる。コンクリート材料の破壊進行は、引張軟化開始応力、破壊エネルギー、引張軟化式（軟化曲線形状）などのコンクリート材料の引張軟化特性により決定づけられる。

3. アーチ式コンクリートダム

3.1 解析モデル

構造上、3次元的な挙動が特徴的であるダム型式であるため、堤体および基礎地盤を含めた3次元モデルを用いることが適切である（図-1.8.2）。基礎地盤部の境界条件は、領域外への地震動伝播を考慮し、エネルギー逸散が適切に考慮できるものが望ましい。そのような境界条件を設定しない場合には、解析モデルの減衰を適宜大きめに設定することが必要となる。

地震時動水圧は、貯水を圧縮性流体としてモデル化することによりその影響を考慮するのがよいが、近似的に非圧縮性流体とみなして、付加質量マトリクス等により考慮する方法も採りうる。

3.2 地震動入力

ダム堤体底面における地震動が推定される場合には、基礎地盤部についてもモデル化する際は、堤体底面において、ダム地点において設定された照査用地震動が作用するような地震動を解析モデルの基礎地盤部底面から入力する。そのような地震動は、解析モデルにおける堤体底面と基礎地盤部底面との伝達関数を利用して、ダム地点において設定された照査用地震動を基に求めることができる。開放基盤上での地震動が推定される場合には、一次元成層地盤応答解析により解析モデルの基礎地盤の境界条件等を考慮して、基礎地盤部底面から入力する地震動を算出することができる。

3.3 解析手法

隣接ブロックおよび岩盤双方への応力伝達が重要な役割を果たしているアーチ式コンクリートダムでは、地震応答解析にあたり、ブロック間の応力伝達を受け持つ横継目や堤体と岩盤間の応力伝達を受け持つ接合部（周辺継目が設けられている場合はその継目部）の挙動を適切に考慮する必要がある。特に、地震時においてこれらの箇所で引張応力が発生する場合は、それが開くことによる堤体内発生応力の緩和効果が期待される。このため、損傷過程として継目や堤体と岩盤の接合部の開口挙動を考慮できるよう、有限要素モデルにおいてこれらを接合要素としてモデル化し、引張応力が生じた場合に相対変位を許容する等、その発生応力に応じて開口条件を適切に設定した非線形動的解析によることが考えられる。

レベル2地震動として想定するような極めて強い地震動によって、アーチ式コンクリートダムが損傷を受ける場合を想定すると、まず継目や堤体と岩盤の接合部が開き、それでも発生応力が堤体コンクリートの強度を超える場合には、コンクリートに引張亀裂による損傷が生じることも考えられる。このよ

うな場合には、重力式コンクリートダムと同様、損傷過程として継目や堤体と岩盤の接合部の開きとともに、堤体コンクリートにおける引張亀裂の発生を考慮する必要がある。その場合には、既作成の要素分割モデルの要素境界に沿って接合要素を導入し、堤体コンクリートの引張亀裂の発生を考慮する方法が考えられる（図-1.8.3）。それでも堤体に発生する引張応力が堤体コンクリートの引張強度を超える場合には、分布型クラックモデル等を用いて任意の方向に引張亀裂が発生することを考慮した3次元動的解析を実施することが考えられる。

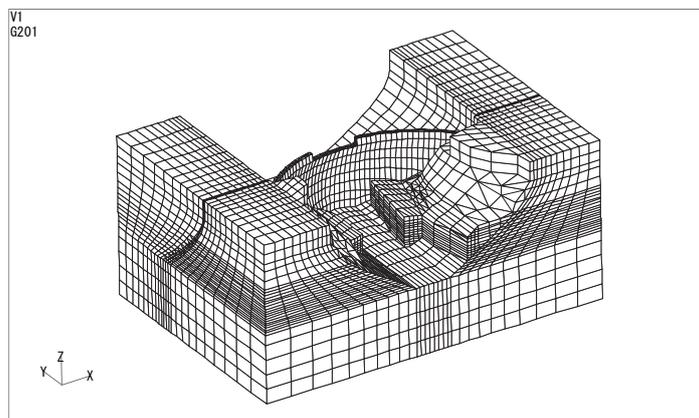


図-1.8.2 アーチダムの解析モデル（基礎地盤を含む3次元モデル）

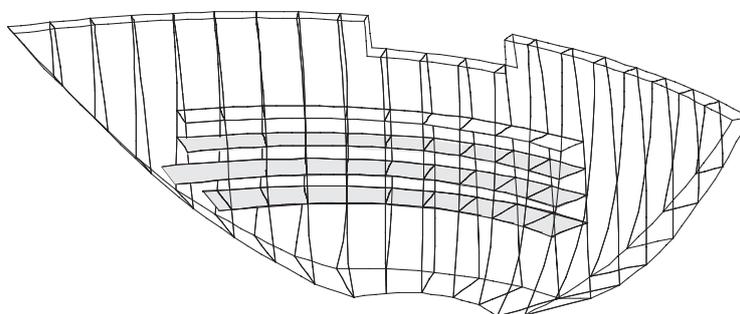


図-1.8.3 アーチ式コンクリートダムへの要素分割境界に沿った接合要素の導入例