

## 論文の内容の要旨

論文題目     ダム堤体ならびに基礎岩盤の耐震安全性評価に関する研究  
氏 名       木 全 宏 之

我が国のダムの現行耐震設計法は震度法を基本としている。震度法は弾性設計法であり、想定以上の大規模地震動を受けた場合、終局限界状態すなわち破壊に対してダムがどの程度の耐震安全性を有しているか評価できず、耐震設計法として十分とは言えない。これより、本研究は、ダムの合理的な耐震設計法確立のための基礎資料の提供を目的として種々の解析的検討を行い、大規模地震時のダムの挙動を解明し、耐震安全性評価を行ったものである。

本研究では、特に重力式コンクリートダム堤体ならびにアーチ式コンクリートダム基礎岩盤を対象として解析的検討を行った。重力式コンクリートダムは無筋コンクリート構造物であり、過去の地震被害事例に基づき、大規模地震時には堤体にクラックが発生し、進展することが予想されることから、動的クラック進展解析(スミアードクラックモデルによるFEM動的非線形解析)を基本にして解析的検討を行った。一方、アーチ式コンクリートダム基礎岩盤については、大規模地震時の破壊現象を精緻に予測、追跡し、破壊挙動を進行性破壊挙動として直接的に取り扱うため、岩盤の不連続面を考慮したFEMによる動的非線形解析を基本に解析的検討を行った。そして、大規模地震時の重力式コンクリートダム堤体ならびにアーチ式コンクリートダム基礎岩盤の挙動を明らかにし、耐震安全性評価を行った。

本論文において「第 部 動的クラック進展解析による重力式コンクリートダム堤体の耐震安全性評価」の研究成果は、以下のとおりである。

重力式コンクリートダムを模擬した無筋コンクリート構造物の既往の模型振動実験結果を用い、動的クラック進展解析で適用する減衰モデルについて検討し、解析手法の妥当性を検証した。

その結果、従来のレーリー減衰や初期剛性比例型減衰に対し、クラック進展に伴って時々刻々変化する接線剛性比例型減衰を採用することで、模型振動実験結果を極めて精度良く再現することができた。クラック直交面に作用する不要な減衰力を解放することが可能となり、クラックは分散せず無筋コンクリート構造物特有のクラック局所化現象を適切に表現できることを実証した。

フィレットを有する堤高が 150m といった我が国最大級の重力式コンクリートダムをモデルダムとして想定し、接線剛性比例型減衰を適用した動的クラック進展解析を実施して、クラック発生、進展挙動を検討した(図 1 参照)。

その結果、クラックは上流側の堤体底面とフィレット上部の勾配変化部から発生し、進展して

いくことがわかった。堤体底面のクラックは上流側より下流側に底面に沿って進展する。一方、上流側フィレット上部からのクラックは下流側に堤体内部で進展し、除々に鉛直下方に向かって進展することがわかった。堤体の滑動や転倒に関する安定性向上のために設けたフィレットがクラック誘発の役目をしており、堤体にフィレットを設置する場合にはクラック発生、進展の観点から十分な配慮が必要である。

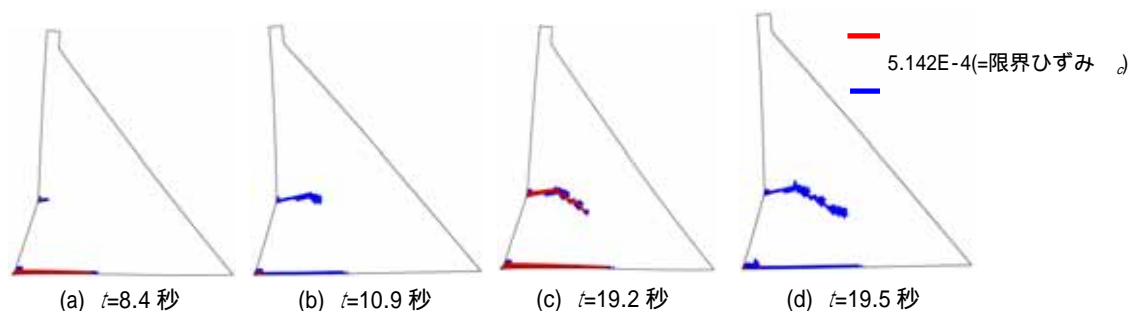


図1 クラック開口ひずみ分布

ダムのもっとも重要な機能である貯水機能確保、維持の観点から、大規模地震時の重力式コンクリートダム堤体のクラック貫通破壊に対する耐震安全性評価指標として、安全余裕度を表すリガメント残存率を提案した。モデルダムを対象に、入力地震動の加速度レベルを変化させた動的クラック進展解析を実施し、リガメント残存率と最大入力加速度の関係から、堤体のクラック貫通破壊に対する耐震安全性を評価した(図2参照)。

その結果、リガメント残存率が50%程度(最大入力加速度  $4.5\text{m/s}^2$ 程度)を下回ると最大入力加速度の増加とともに急激にクラック貫通破壊へ近づくことがわかった。このことから、本モデルダムの場合、耐震安全性を確保するためには、一つの目安としてリガメント残存率を50%程度以上とすることが望ましいと考えられる。また、本研究で想定したマグニチュード  $M=8.0$  の入力地震動(最大加速度  $5.735\text{m/s}^2$ )はダムサイト直下で起こり得る最大級の大規模地震動と考えられるが、当該地震動に対してもリガメント残存率は30%程度とクラック貫通破壊には至らなかった。

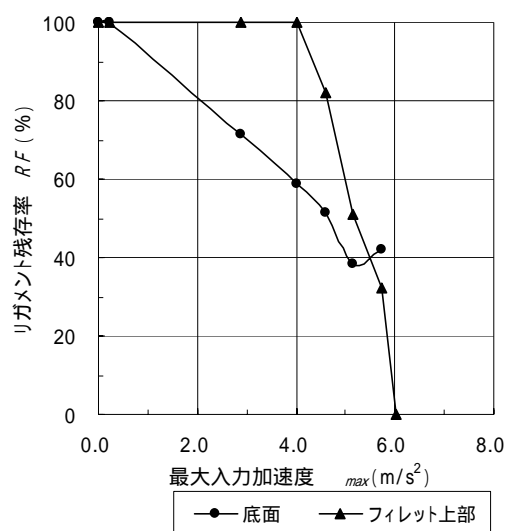


図2 リガメント残存率と最大入力加速度の関係

本研究で示したリガメント残存率と最大入力加速度の関係に基づく重力式コンクリートダム堤体の耐震安全性評価手法について、実務設計へ適用し、展開を図る場合に参考となる二つの例示を行った。一つは、ダムの計画地点選定への適用であり、もう一つは、既設ダムの耐震診断への適用である。

「第 部 岩盤の不連続性を考慮した動的非線形解析によるアーチ式コンクリートダム基礎岩盤の耐震安全性評価」の研究成果は、以下のとおりである。

アーチ式コンクリートダム基礎岩盤の耐震安全性評価手法として、数値解析上の問題から三次元解析でなく、近似的に二次元解析による評価手順について示した。また、不連続面の開口量やすべり量に関する 4 つの破壊指標について提案し、入力地震動の加速度レベルを変化させた解析から基礎岩盤が終局破壊に至る限界加速度を求め、基礎岩盤の地震時進行性破壊挙動を検討し耐震安全性を評価する方法を示した。

我が国の平均的なアーチ式コンクリートダムをモデルダムとして想定し、先に検討した手法に基づき、モデルダム基礎岩盤の地震時進行性破壊挙動について検討した。国内の主要なアーチ式コンクリートダムの基礎岩盤について調べ、花崗岩や堆積岩の実績が多いことから、直交する 2 組の不連続面を想定し、不連続面の方向の異なるモデル 1 ( $\alpha_1=-45^\circ$ 、 $\alpha_2=+45^\circ$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  はダム軸方向から反時計回りに正)、モデル 2 ( $\alpha_1=-26.6^\circ$ 、 $\alpha_2=+63.4^\circ$ ) およびモデル 3 ( $\alpha_1=0^\circ$ 、 $\alpha_2=+90^\circ$ ) を想定した。また、アーチ式コンクリートダム基礎岩盤を念頭に、不連続面の強度としてタイプ 1 (粘着力  $c=0.16\text{MPa}$ 、内部摩擦角  $\phi=42^\circ$ ) とタイプ 2 (粘着力  $c=0.54\text{MPa}$ 、内部摩擦角  $\phi=45^\circ$ ) を設定し、均一な強度分布を想定して二次元 FEM による動的非線形解析を実施した。

その結果、想定した入力地震動 (最大加速度  $5.735\text{m/s}^2$ ) に対し、限界加速度は入力地震動の最大加速度以上の  $7.46\text{m/s}^2 \sim 10.32\text{m/s}^2$  となって、当該基礎岩盤は終局破壊に至ることがわかった。

また、当該基礎岩盤の破壊は、着岩部直近の不連続面が大きく開口し、せん断抵抗を喪失して生じており、不連続面の開口とすべりによる引張ならびにせん断の連成破壊であることがわかった (図 3 参照)。アーチ式コンクリートダム基礎岩盤の現行耐震設計では、せん断破壊に対してのみ耐震安全性照査が行われているが、大規模地震時には着岩部近傍で局所的に大きな引張応力が発生し、不連続面には開口が生じて基礎岩盤が破壊に至る可能性があることに留意する必要がある。

さらに、不連続面の方向の違いによる限界加速度の変化の度合いはタイプ 1 では 20% 前後、タイプ 2 では 11% 程度であり、大局的に見れば、基礎岩盤の終局破壊に対する不連続面の方

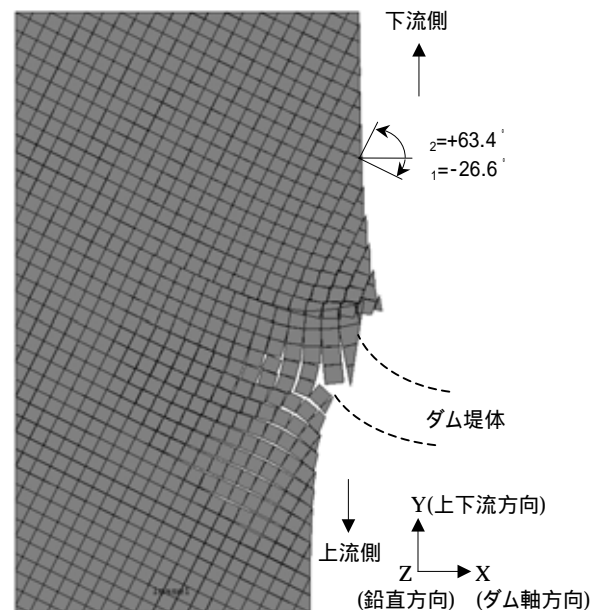
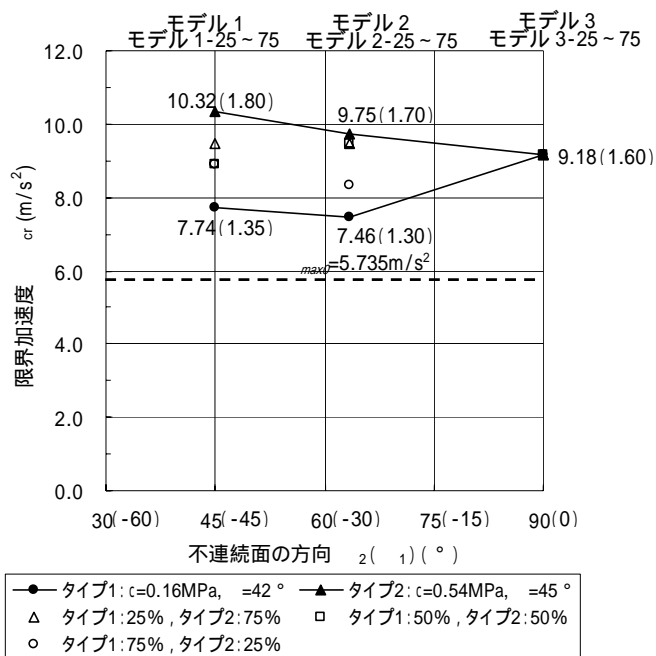


図 3 基礎岩盤の破壊直前の変形モードの一例 (モデル 2、タイプ 1)

向依存性は顕著でないことがわかった(図4参照)。また、モデル1とモデル2では、不連続面の粘着力が大きくなると限界加速度は増大するのに対し、上下流方向とダム軸方向の不連続面を有するモデル3では、粘着力の違いにより限界加速度は変化せず、基礎岩盤の終局破壊に及ぼす粘着力の影響は現れないことがわかった(図5参照)。



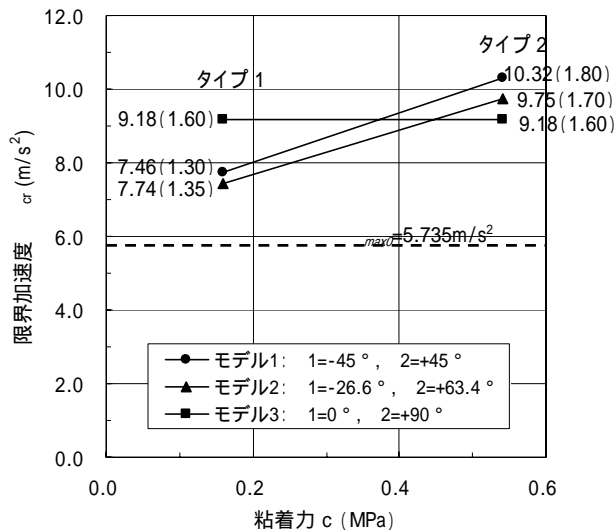
注) 図中の数字は、限界加速度  $a_c$  の値であり、( ) の値は本研究で想定した入力地震動の最大加速度  $a_{max}$  = 5.735m/s<sup>2</sup> に対する倍率を示す。

図4 限界加速度と不連続面の方向の関係

実岩盤状態を勘案し、モデル1~3でそれぞれ2つのタイプの強度を有する不連続面が混在する不均一なモデル1-25~75、モデル2-25~75、モデル3-25~75、について、同様の二次元FEM動的非線形解析を実施した。その結果、不均一なモデルの限界加速度は各タイプの均一なモデルそれぞれの限界加速度の中間値であった(図4参照)。また、変形モードについても同様であった。

本研究で想定したマグニチュード  $M=8.0$  の入力地震動は、ダムサイト直下で起こり得る最大級の大規模地震動と考えられるが、当該地震動に対してもモデルダム基礎岩盤は破壊に至らず、入力地震動の最大加速度 5.735m/s<sup>2</sup> に対する限界加速度 7.46~10.32m/s<sup>2</sup> の比率すなわち安全率は 1.30~1.80 となり、モデルダム基礎岩盤の耐震安全性が確認された。

また、ダムの立地地点の地震環境を考慮し、地震動の再現期間の観点からモデル基礎岩盤の耐震安全性を評価した例示を行った。この例示では、加速度の比率より大きな比率の安全率が得られ、モデルダム基礎岩盤はさらに十分な耐震安全性を有していると評価された。



注) 図中の数字は、限界加速度  $a_c$  の値であり、( ) の値は本研究で想定した入力地震動の最大加速度  $a_{max}$  = 5.735m/s<sup>2</sup> に対する倍率を示す。

図5 限界加速度と粘着力の関係