

不連続面を有するダム基礎岩盤の 進行性破壊挙動に関する基礎的検討

木全 宏之¹・藤田 豊²・ルンバナパン ポンウィット³

¹フェロー会員 工博 清水建設株式会社 土木技術本部設計第二部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

²工博 清水建設株式会社 原子力・火力本部設計部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

³工博 清水建設株式会社 土木技術本部設計第二部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館)

従来ダム基礎岩盤については連続体として扱われ、内在する節理等の不連続面の影響が考慮されていないのが現状である。筆者らは既に重力式コンクリートダムを対象に、動的非線形解析により基礎岩盤不連続面の進行性破壊挙動を考慮した耐震安全性評価を行ってきた。本報では、不連続面を考慮した既往模型実験に対して二次元FEM非線形解析によるシミュレーション解析を実施し、実験結果と解析結果を比較することで基礎岩盤不連続面の構成モデルの妥当性を検討した。

キーワード：ダム基礎岩盤，進行性破壊，不連続面，模型実験，FEM非線形シミュレーション解析

1. はじめに

1959年、アーチ式コンクリートダムであるMalpassetダム（フランス）が基礎岩盤のすべりが原因で決壊に至ったように、ダムの耐震安全性を評価する上で、堤体のみならず基礎岩盤の地震時挙動を精緻に予測、追跡することは重要である。従来ダム基礎岩盤については連続体として扱われ、内在する節理等の不連続面の影響が考慮されていないのが現状である。筆者らは既に重力ダムを対象に、動的非線形解析により基礎岩盤不連続面の進行性破壊挙動を考慮した耐震安全性評価を行ってきた^{1)~3)}。

本報では、不連続面を考慮した既往模型実験に対して二次元FEM非線形解析によるシミュレーション解析を実施し、実験結果と解析結果を比較することで基礎岩盤不連続面の構成モデルの妥当性を検討する。

2. 既往模型実験の概要

(1) 実験装置と試験体

実験装置と試験体の概要を図-1、図-2に示す。本模型実験⁴⁾は、過去にアーチ式ダムの耐震安全性を確認するために実施されたもので、アーチ式ダムの

アバットメントを模擬して試験体を構築している。

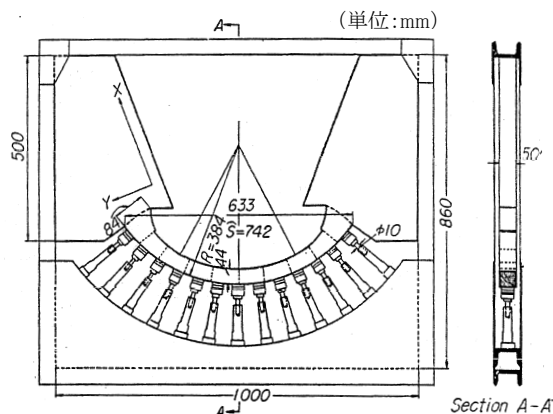


図-1 実験装置の概要

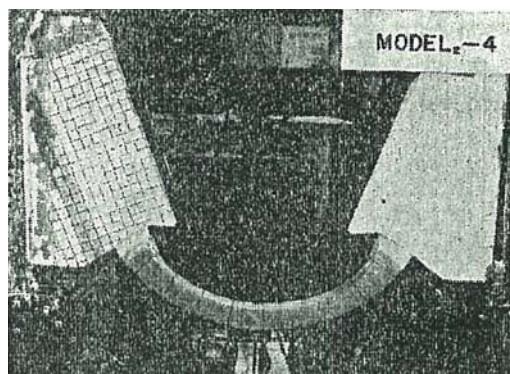


図-2 試験体の概要

試験体の厚さは50mmで、ダム堤体と基礎岩盤を構築し、その模型を1000mm×860mmの加力フレーム内にジャッキを含め配置している。また、载荷には13本のジャッキを用いており、ダム堤体に加わる水圧（地震時の動水圧を含む）を表現している。

基礎岩盤自体はモルタルで製作されており、その平面寸法が20mm×20mmの正方形の要素を積層するように基礎岩盤を構築している。不連続面を表現するために、要素と要素の境界部分は、せん断特性が明確なプラスターと珪藻土を混ぜ合わせた材料を2mmの厚さで設けている。本試験体は、アバットメントにおける合力線の方法にほぼ平行ならびに直角な規則正しい二群の不連続面を有する試験体である。他にもアバットメントにおける合力線の方法とほぼ45°の角度をなす規則正しい二群の不連続面を有する試験体等を作成し、種々の実験が行なわれている。本実験では、計測は载荷荷重と変位について行われている。

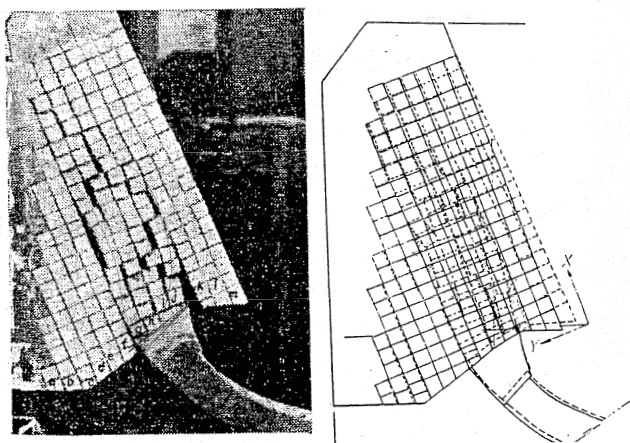


図-3 試験体の破壊状況

(2) 破壊状況

試験体の破壊状況を図-3 に示す。アーチを介して基礎岩盤に加えた圧縮荷重は、基礎岩盤を押し込みながら、基礎岩盤の不連続面のせん断破壊と加力方向に平行な開口破壊を深部まで発生させている。

この破壊現象は、圧縮力により拘束の弱い内側の基礎岩盤がはらみ出し、せん断破壊と開口破壊が生じたものと考えられる。このはらみ出しは着岩部近傍のみならず、かなり深い位置でも大きく現れており、アバット内側の基礎岩盤が薄い場合にはこの破壊が顕著になるものと想定される。また、最終破壊は、アバット内側の基礎岩盤が開口破壊し、支持力を失う結果になっている。

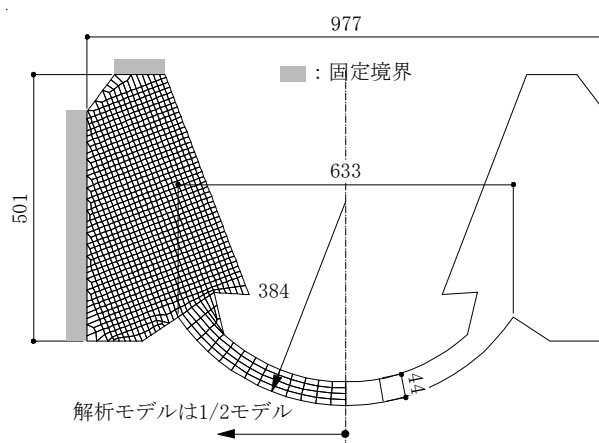


図-4 解析モデル

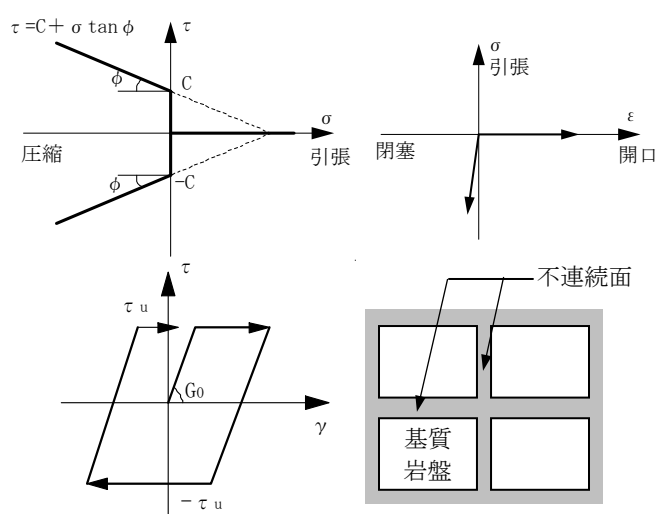


図-5 不連続面の構成モデル

表-1 解析物性値

項 目	基礎岩盤	境界要素
ヤング係数 E (GPa)	2.0	—
ポアソン比 ν	0.2	—
密度 γ (kg/m ³)	2000	—
粘着力 (MPa)	—	0.12
内部摩擦角 (°)	—	18

3. 解析モデルの概要

二次元平面ひずみ状態を仮定し、試験体を模擬した解析モデルを図-4 に示す。基質岩盤は4節点四角形要素でモデル化し、破壊することはないものとして線形弾性としている。

不連続面はインターフェイス要素でモデル化し、図-5 に示す構成モデルを設定した。Mohr-Friction

モデルを組み込み、不連続面での開口とすべりの非線形性を評価できるようにしている。不連続面で生じるすべり抵抗（ τ - γ 関係）はバイリニアでモデル化しており、要素間に開口が生じた場合は、せん断抵抗を無視している。表-1 には解析物性値を示す。

境界条件は、実験時を考慮して、試験体枠に接する位置で固定境界、それ以外では自由境界としている。荷重方法は、実験に習い、ジャッキ位置で集中の増分荷重を加えている。

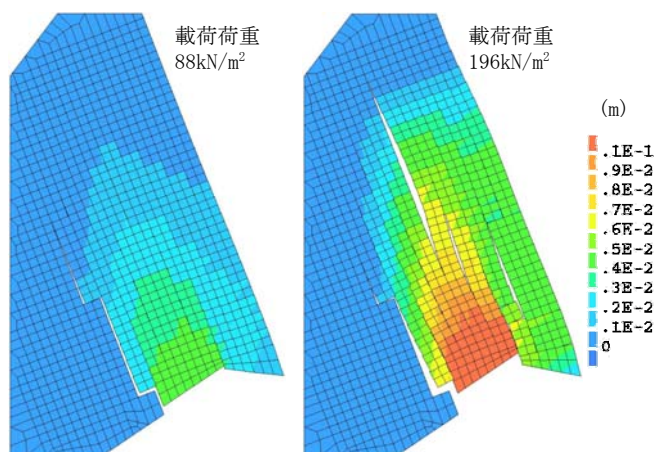


図-6 変形分布

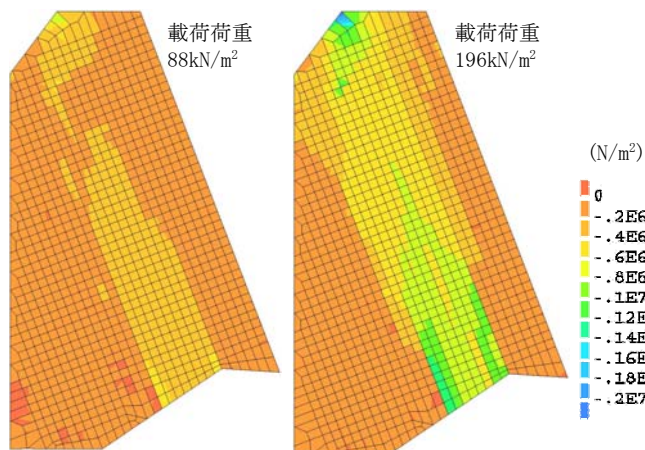


図-7 最小主応力分布

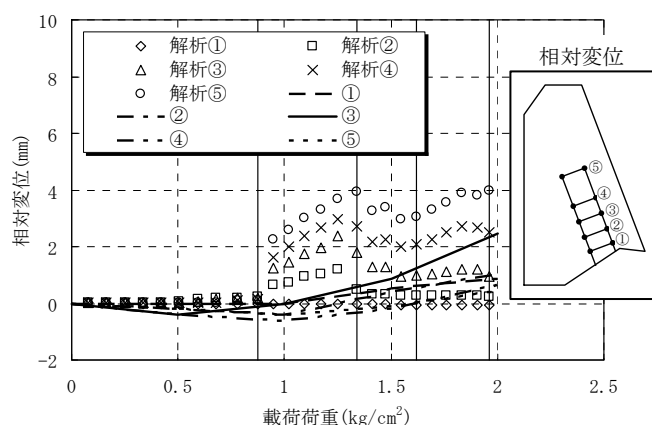


図-8 基礎岩盤の相対変位の比較

4. 非線形解析による進行性破壊挙動

二次元 FEM 非線形解析により得られた変形分布を図-6 に、最小主応力分布を図-7 に示す。

変形分布によれば、初期荷重を加えた時点から、変形は拘束の弱い基礎岩盤の内側にはらみ出す傾向を示し、荷重の増加とともにその傾向は顕著になっている。最小主応力分布によれば、アバット部分の荷重による基礎岩盤の圧縮応力は深い位置まで到達しており、最終的にはアバット両端の圧縮応力が増加して破壊に至っている。解析による破壊性状は、図-3 に示した実験結果と同様の結果を示しており、基礎岩盤の破壊がせん断破壊と開口破壊によるものであることが明らかである。

また、基礎岩盤のはらみ出しが破壊の指標の一つと考えられることから、基礎岩盤のはらみ出しに関する相対変位について実験結果と比較したものを図-8 に示す。解析結果によれば、ある荷重以上で相対変位が急激に大きくなる傾向を示している。一方、実験結果はなだらかな増加傾向を示しているものの、実験結果と解析結果は概ね類似の相対変位を生じており、設定した構成モデルは妥当であると考えられる。

5. まとめ

アーチダム基礎岩盤を模擬し不連続面を考慮した既往模型実験に対し、二次元 FEM 非線形解析によるシミュレーション解析を実施した。実験結果と解析結果の比較から、本報の不連続面の構成モデルを用いることで概ね基礎岩盤の進行性破壊挙動を表現できることがわかった。

参考文献

- 1) 木全宏之, 藤田豊, 堀井秀之, M. YAZDANI: 不連続面を有する岩盤上の重力式コンクリートダム of 動的クラック進展解析, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, 2009. 9.
- 2) 木全宏之, 新美勝之, 井上篤史, 玉井誠司, 藤田豊: 不連続面節理を有する岩盤上の重力式コンクリートダムの動的非線形挙動, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 2010. 9.
- 3) Kimata, H., Fujita, Y., Horii, H. and Yazdani, M.: Dynamic crack propagation analysis of concrete gravity dams on jointed rock foundation, *3rd Japan-Greece Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, proceedings of the workshop*, pp. 486-494, 2009. 9.
- 4) 高野稔: アーチダムの基礎の安全性に対する実験的検討方法に関する研究, 土木学会論文集, No. 78, 1962. 1.