

コンクリート重力ダム～不連続基礎岩盤系の一安定性評価手法

INTERACTION OF A CONCRETE DAM WITH A JOINTED ROCK FOUNDATION

関口宏二*・Lo, K.Y.**・Rowe, R.K.**・小川豊和***
Koji SEKIGUCHI, K.Y. LO, R.K. ROWE and Toyokazu OGAWA

A methodology to analyze the interaction of a concrete gravity dam with a jointed rock foundation is proposed, where the elasto-plastic finite element method with the non-linear joint element formulated based on elasto-viscoplasticity plays an important role. Then, the methodology is applied to the safety assessment of an existing concrete dam in Ontario. Severe uplift pressures observed in the field is also incorporated in the analysis.

1. 緒 言

一般にコンクリート重力ダムは、極限釣り合いによる安定解析¹⁾によって設計される。しかし、同手法では①ダム～基礎岩盤系の変形やダムと岩盤との接触面（以降、コンタクトと略称する）における応力分布を合理的に評価することができない、②コンタクトにおけるクラックの発生状況も評価できない、などの問題点を有する。こうした問題の評価には、岩盤の状況に応じて適切な数値解析手法²⁾の選択が必要と考えられる。本論文では、幾つかのマスタージョイントを有する基礎岩盤上に建設されたコンクリート重力ダムの安定性評価に限定して議論を進めることとする。この場合には、非線形ジョイント要素を用いた弾塑性有限要素法が適していると考えられる。それは、岩盤やコンクリートの弾（塑）性変形や不連続面における滑り・剥離現象を合理的に評価できるからである。しかし、数値的に安定しかつ工学的に有用な解を得るためには、非線形解析手法や貯水の影響評価などに若干の配慮が必要があると思われる。本論文では、数値解析上の安定性に優れた粘塑性法^{3),4)}による弾塑性有限要素解析手法に基づき、比較的簡便にダム～基礎岩盤系の応力・変形解析を行い得る一つの枠組みを提案する。また、同手法を片麻岩・結晶質石灰岩上に建設された重力ダムの安定性評価に適用した事例について報告する。⁵⁾

2. 解析手法

ダム～基礎岩盤系の応力～変形解析を行うためには、①基礎岩盤内の初期応力状態、②ダム建設の影響、③貯水の影響、④長期的なコンタクトのせん断強度劣化、などを合理的に評価する必要がある。ここでは、これらを一貫して評価できる一つの枠組みとして、Fig.1 に示す手法を提案し、以下にその概要を説明する。

(1) Stage 1 (初期応力状態)： ほとんどの地盤工学上の問題では初期応力状態の評価が極めて重要である。ここでも、適切な初期応力状態を入力データあるいは自重解析により与える。

(2) Stage 2 (ダム建設の影響)： ダムの建設が非常にゆっくり行われると考えて排水条件を仮定し、ダムの建設をシミュレートする（具体的には、建設されるダムの要素の剛性と自重を解析に考慮）。

* 正会員 NKK 基礎技術研究所都市工学研究部

** Geotechnical Research Centre, The University of Western Ontario, Canada

*** 正会員 大成建設株式会社 技術研究所 (元 The University of Western Ontario)

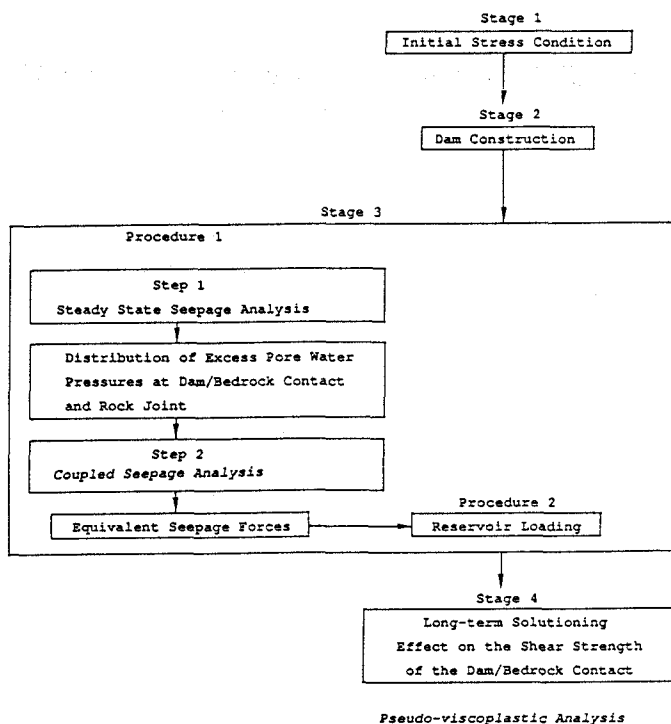


Fig. 1 Method of dam-foundation interaction analysis

(3) Stage 3 (貯水の影響)： 貯水の影響は、最も厳しい条件と考えられる満水位定常状態を対象として 等価浸透力⁹⁾を外力とする。

(4) Stage 4 (コンタクトのせん断強度の長期的劣化の影響)： ある条件下ではコンタクトのせん断強度 C_c が長期的に劣化する場合があり得る。¹¹⁾ この影響を考慮するにも、粘塑性法は好都合である。すなわち、Stage 3 による解析結果を初期条件として、 C_c を所定の値まで低下させた後に粘塑性アルゴリズムによる時間積分を計算が収束するまで継続する。

3. 解析事例

Barrett Chute 発電所は、カナダ、オンタリオ州、マダウスカ川水系に建設された 178 MW の発電能力を持った水力発電所である。同所の主ダムは、1938 年から 1942 年にかけて建設され、高さ 27 m、底面幅 21 m、長さ 360 m である。本ダムでは、1987 年に排水孔が設けられるまで設計時の仮定の 2 倍にも達する高い揚圧力が計測された(Fig.2)。1987 年以降、現地試験や現地より採取されたコンタクトや基礎岩盤 (含むジョイント) 試料を用いた室内強度試験などが実施された。⁹⁾ 最も危険な状態にあったと推定される 1987 年 4 月時点における水圧の計測データを用い、CH.5+00 断面を対象として、Fig.3 に示すようなモデル・境界条件で解析を行った。なお、材料定数については、文献 7), 10) を参照されたい。

コンタクトおよびジョイントの水圧分布、コンタクトにおける既存のクラック (接着していないため、 $C_c=0$ とみなすコンタクト) などをパラメータとして、幾ケースかの解析を実施したが、ここでは一つの事例として Case B1 の結果を紹介する。Case B1 ではコンタクトおよびジョイントの水圧分布として、計測値を用いて補正したものを使用した(Fig.4)。また、コンタクトの上流側 7.5 m の部分にクラックが存在している

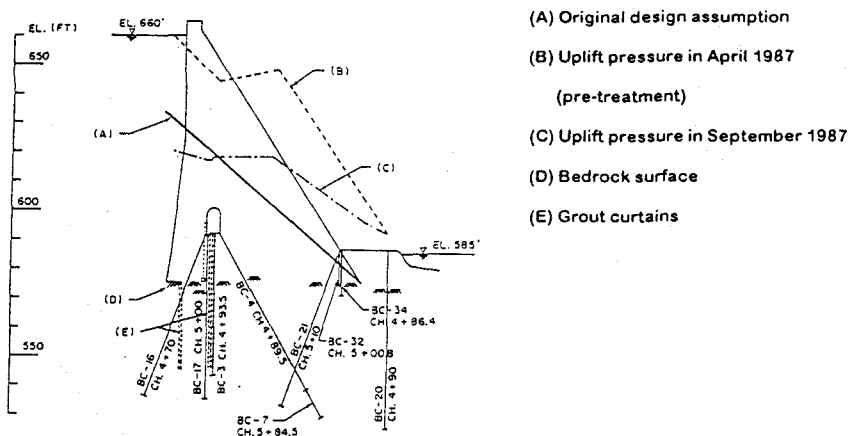


Fig. 2 Cross-section of Barrett Chute Dam for stability analysis

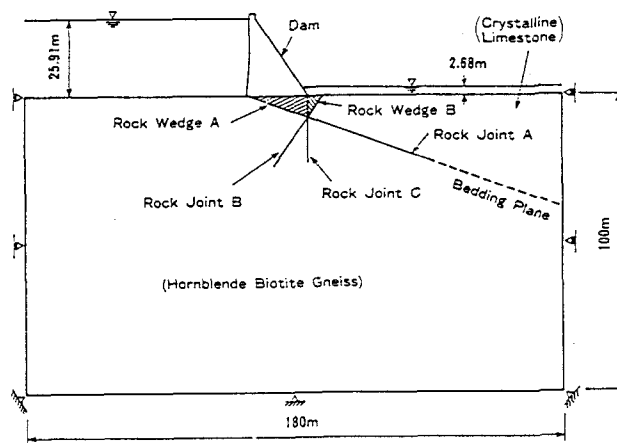


Fig. 3 Domain of analysis

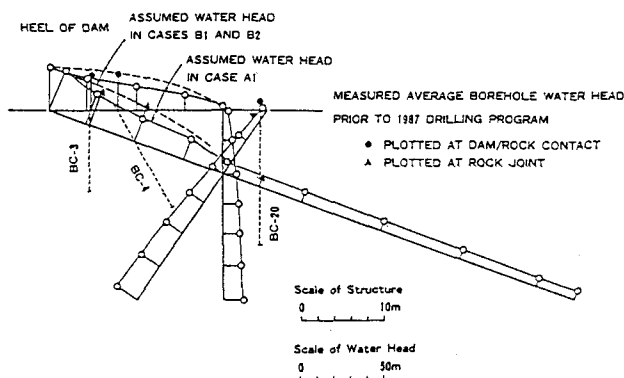
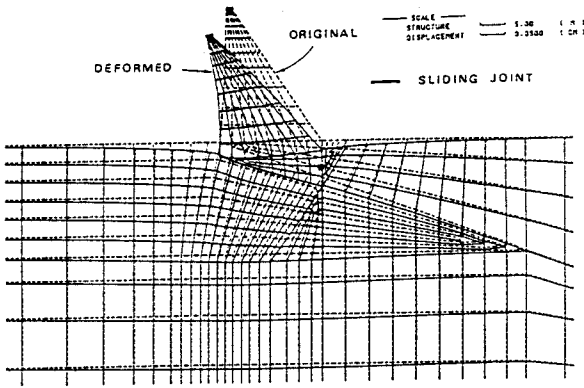
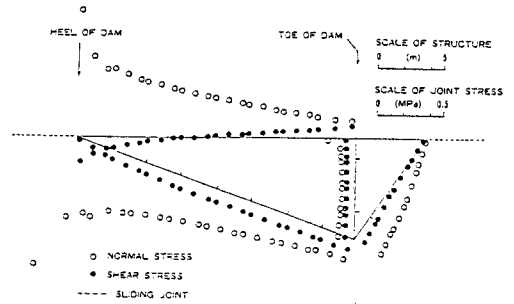


Fig. 4 Assumed water heads at the dam-rock contact and rock joints for the coupled seepage analysis

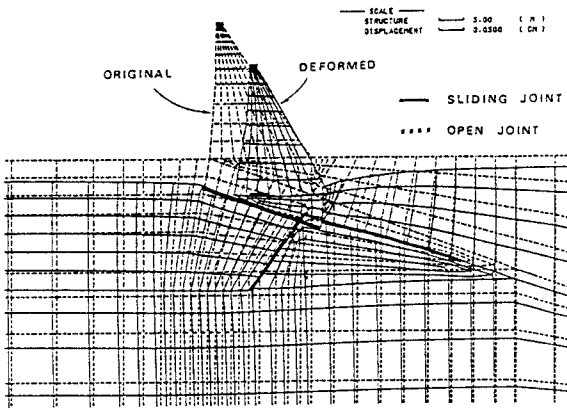


(a) Displacements (Scale = 1 : 10,000)

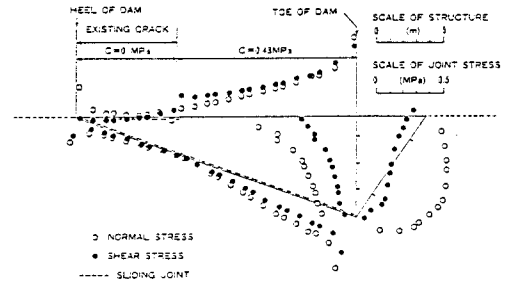


(b) Stresses along contact and rock joints

Fig. 5 Calculated results (Case B1; Stage 2 = Dam construction)

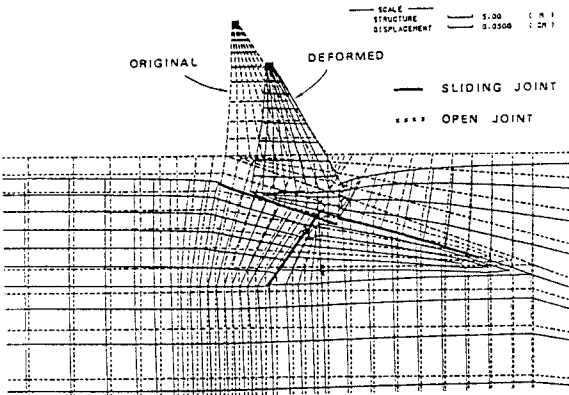


(a) Displacements (Scale = 1 : 10,000)

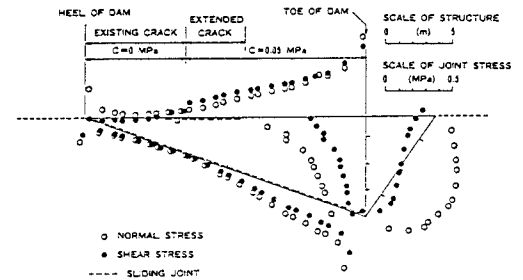


(b) Stresses along contact and rock joints

Fig. 6 Calculated results (Case B1; Stage 3 = Reservoir loading)



(a) Displacements (Scale = 1 : 10,000)



(b) Stresses along contact and rock joints

Fig. 7 Calculated results (Case B1; Stage 4 = Long-term solutioning effect)

と想定した（コアボーリングの結果からは、接着していないコンタクトがある一定の箇所に集中するような傾向は認められなかったため、これはかなり厳しい仮定と言える）。さらに、長期的にコンタクトの強度の粘着成分は $C_c=0.05$ MPa まで低下するものと仮定した。

Fig.5～7 に Stage 2～4 における(a)変形図、(b)コンタクトおよびジョイントにおける直応力とせん断応力分布図を示す。これらの図には、滑り（せん断破壊）や剥離を生じている部分も合わせて表示した。Fig.5(b)より Stage 2（ダムも建設）ではコンタクトには滑りが発生しておらず、またせん断応力に対する直応力の比も比較的小さく、ダム～基礎岩盤系の安全性は高いと言える。Fig.6(a),(b)より、Stage 3（貯水の影響）では、Joint A, B に沿う基礎岩盤内の滑りや、コンタクトの既存クラック部分における滑りが見られる。さらに、Stage 4（コンタクトのせん断強度の長期的劣化の影響; Fig.7(a),(b)）では、コンタクトにおけるクラック長はダム底面幅の 1/2 以上にも達しており、Stage 3 よりさらに状況が悪化していることがわかる。

4. 結 語

幾つかのマスタージョイントを有する基礎岩盤上の重力式コンクリートダムの安定性を評価する一つの手法として、粘塑性法により非線形ジョイント要素を用いた弾塑性有限要素解析をベースとした方法を提案した。また、提案手法を、詳細な現地調査および室内試験が行われた実在の重力ダム(Barrett Chute Dam)に適用し、本手法が安定性評価に有用な情報を与え得ることを示した。

5. 参考文献

- 1) Bureau of Reclamation(1976): Design of Gravity Dams. A Water Resources Technical Publication. U.S. Dept. of the Interior, Denver, Colorado, pp.30-34.
- 2) 川本眺万(1992): 岩盤力学の回顧と展望、土木学会論文集、No.457/Ⅲ-21, pp.1-12.
- 3) Zienkiewicz, O.C. and Corneau, I.C.(1974): Visco-plasticity - plasticity and creep in elastic solid - A unified numerical solution approach, Int J. for Num. Methods in Engineering, Vol.8, pp.821-845.
- 4) Sekiguchi, K., Rowe, R.K., Lo, K.Y. and Ogawa, T.(1990): Time step selection criteria for 6-noded non-linear joint element in elasto-viscoplasticity analyses, Computers and Geotechnics, 10, pp.33-58.
- 5) Zienkiewicz, O.C. and Humpheson, C.(1977): Viscoplasticity - A generalized model for description of soil behaviour; in Chapter 3, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill Book Co., pp.116-147.
- 6) Lo, K.Y., Ogawa, T., Lukajic, B., Smith, G.F. and Tang, J.H.K.(1991): The evaluation of stability of existing concrete dams on rock foundations and remedial measures, Proc. of 17th International Congress, International Commission on Large Dams, Austria, pp.963-990.
- 7) Sekiguchi, K.(1993): Interaction of a concrete dam with a jointed rock foundation: in Chapter 7, Fundamental Studies on Numerical Analysis of Plastic Flow in Geomechanics, Doctoral thesis, Kyoto University, pp.110-154.
- 8) Ogawa, T. and Lo, K.Y.(1992): Study on the stability evaluation of concrete gravity dam. Part 1: Strength parameters of concrete-rock contact at the dam-foundation interface, 大成建設技術研究所報、第 25 号, pp.109-118.
- 9) Ogawa, T. and Lo, K.Y.(1993): Study on the stability evaluation of concrete gravity dam. Part 2: Shear strength of concrete-rock contact, aged concrete, and rock joint, 大成建設技術研究所報、第 26 号, pp.441-450.
- 10) Ogawa, T., Sekiguchi, K. and Lo, K.Y.(1994): Study on the stability evaluation of concrete gravity dam. Part 3: Example of stability analysis using shear strength parameters of contacts and rock joints determined in the laboratory, 大成建設技術研究所報、第 27 号, pp.339-350.
- 11) Lo, K.Y. and Grass, J.D.(1994): Recent experience with safety assessment of concrete dams on rock foundations, Proc. Canadian Dam Safety Conference, Winnipeg, p.231-250.