

コンクリートダム of 亀裂分離ブロックにおける 地震時挙動の個別要素解析

岩下 友也¹・倉橋 宏²・佐々木 晋³・山口 嘉一⁴・佐々木 隆⁵

¹独立行政法人土木研究所水工研究グループ 総括主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:iwashita@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所水工研究グループ 交流研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:kuraha44@pwri.go.jp

³独立行政法人土木研究所水工研究グループ 研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:ssasaki@pwri.go.jp

⁴独立行政法人土木研究所水工研究グループ 上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:yamaguti@pwri.go.jp

⁵国土交通省東北地方整備局胆沢ダム工事事務所長 (〒023-0403 岩手県奥州市胆沢区若柳字下松原77)

E-mail:sasaki-t82bf@thr.mlit.go.jp

大規模地震に対する重力式コンクリートダムの耐震性能の照査において、解析上、堤体に生じた引張亀裂が上下流面に貫通した場合には、堤体の上部分離ブロックの安定性の詳細な検討が必要とされている。そのため、亀裂貫通後のダム堤体の地震時挙動形態を考慮した、大規模地震時における終局的安定性の評価手法の開発が必要である。本研究は、ロッキング現象が顕著な堤体高標高部の上部分離ブロックと、滑動現象が卓越するフィレット取付箇所からの亀裂による上部分離ブロックを対象にして、その分離ブロックの地震時の挙動を個別要素解析により分析した。個別要素解析では、亀裂貫通させた模型の振動実験の再現解析及び亀裂面を設けた一面せん断試験を行い、貫通亀裂界面の物性値を設定した。

Key Words : concrete gravity dam, distinct element method, tensile crack, seismic resistance, shaking table test, direct shear test

1. はじめに

国土交通省では、大規模地震による地震動に対するダムの耐震性能の照査方法を体系的に示した「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説」¹⁾を2005年3月に策定し、現在試行している。同指針(案)では、ダム本体の照査は、①ダムの貯水機能が維持されること、及び、②生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることの2点を確認することとしている。上記①に対して、コンクリートダムでは損傷過程を考慮した地震応答解析を実施し、生じる損傷が限定的であることを確認する。特に、重力式コンクリートダムでは、一般に引張破壊に対する条件が最も厳しくなり、引張破壊については、上下流面間に連続する引張亀裂の発生によって堤体の分断が生じていなければ①の条件は満足するとしている。しかし、解析上、引張亀裂が堤体を上下流間に連続することとなっても、その上部の堤体ブロック全体が不安定

化しなければ、①は満足できると考えられる。そこで、コンクリートダム堤体に引張亀裂が貫通した状態を想定して、その状態のもとで、上部分離ブロックの大地震時の安定性を評価する手法を開発していくことが必要となっている。

本研究では、大規模地震時に重力式コンクリートダムの堤体における引張亀裂の進展・貫通形状や上部分離ブロックの運動モードを分析した上で、その上部分離ブロックの地震時の挙動を個別要素解析により分析・検討した。その際、個別要素解析に用いる引張亀裂界面におけるせん断摩擦係数等の各種物性値については、コンクリート供試体を用いた模型振動実験及びその再現解析、並びに亀裂面を設けたコンクリート供試体による一面せん断試験を実施して、その設定を試みた。

2. 亀裂面の形状及び亀裂貫通後の運動モード

重力式コンクリートダム、地震動を受けることにより発生する引張亀裂の主要な形状としては、Koyna 地震（1967 年）により堤体に亀裂が生じた Koyna ダム（図-1）²⁾ のように堤体高標高部の勾配変化箇所から引張亀裂が発生する場合や、大規模地震動に対する亀裂進展解析結果（例えば、図-2）や模型振動実験結果^{4)・5)} に見られるように、フィレットを有するコンクリートダムの上流側勾配変化箇所のフィレットから亀裂が発生して下流側へと亀裂が進展し、下流面から発生した亀裂と結合する場合が考えられる。

堤体高標高部での上下流面の亀裂貫通による上部分離ブロック運動モードについては、米国エネルギー規制委員会や米国陸軍工兵隊の検討^{6)・7)} でも示されるように、地震動により、上部分離ブロックにロッキング振動が発生し、転倒する現象が考えられる。また、フィレット部からの亀裂貫通では、亀裂位置は比較的堤体低標高部であり、上部分離ブロック自体は大規模で大きな自重があることから、上部分離ブロックのロッキングによる転倒は考えにくく、上部分離ブロックの運動モードとしては滑動が卓越する現象となることが考えられる。

3. 個別要素解析による上部分離ブロックの地震時挙動解析

本研究では、堤高 100 m 級のフィレットを有した重力式コンクリートダム堤体をモデルとし、地震等の要因で亀裂が発生し、堤体が分断された場合の上部分離ブロックの挙動の検討を個別要素解析を用いて実施した。2. で述べた地震時のダム堤体への亀裂の発生・進展特性を踏まえ、図-3 のように亀裂分離ブロックのロッキング・滑動を対象にすべきパターンと、滑動を主対象にすべきパターンの 2 種の上部分離ブロックについて検討を行った。個別要素解析が必要となる亀裂界面の摩擦角等の物性値は、以降で述べる模型振動実験の再現解析や、亀裂面を模擬したコンクリート供試体の一面せん断試験による要素試験で設定した。

(1) 亀裂界面の物性値の設定

a) 模型振動実験の再現解析

(ロッキング・滑動に対する物性値検討)

図-4 に示す高さ 1.7m、幅 0.4m、厚さ 0.2m の左右両端に勾配変化箇所を有する柱状の供試体を、無筋コンクリートで作製した。供試体は、亀裂の発生・進展の状況を把握するという別目的から、低強度コンクリートを用いている。28 日材齢における一軸圧縮強度はおおよそ

$\sigma_c = 1.6 \text{ N/mm}^2$ である。振動台において、正弦波加振して供試体の勾配変化箇所から亀裂を発生させた。

その後、亀裂を貫通させて分断したコンクリート供試体を、再度、正弦波（振幅 290gal、振動数 22Hz、継続時間 2 秒間）で加振することによって、亀裂貫通後の供試体の上部分離ブロックの応答を測定した。

この亀裂で分断された上部ブロック供試体の振動実験実測挙動について再現解析を個別要素解析で行い、ロッキング・滑動運動を再現するための亀裂面の摩擦、減衰等の物性値を決めた。個別要素法による再現解析には UDEC[®] を用い、解析モデルは図-5 に示すとおりである。解析では図-6 に太線で示すように、貫通亀裂を円弧状に模擬した亀裂形状とした。入力物性値を表-1 に示す。

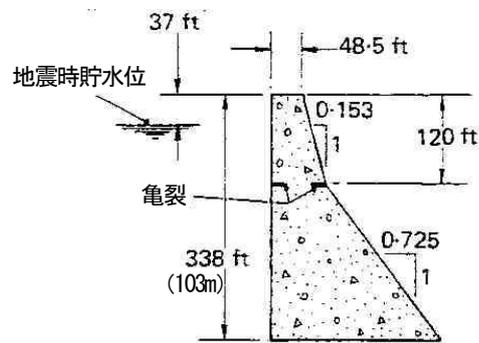


図-1 Koynaダム（第16ブロック）の亀裂被害の状況²⁾

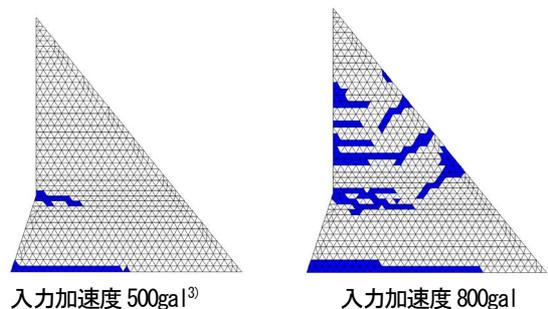


図-2 重力式コンクリートダムの分布型亀裂進展解析結果の例（入力波形：ダム照査用下限スペクトル¹⁾の波形）
（網掛け部：引張亀裂発生要素）

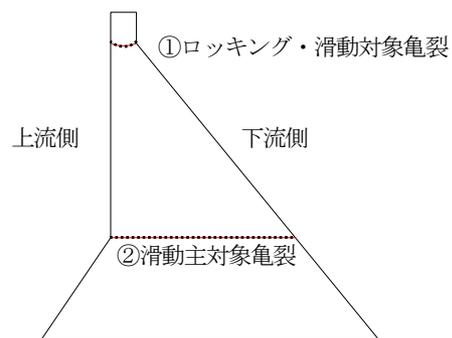


図-3 検討対象分離ブロックの概要

また、再現解析に用いる減衰は、UDEC 内部のグローバル減衰⁸⁾を用い、減衰係数 R は以下の式で定義される。

$$R = \sum P / \sum \dot{E}_k \quad (1)$$

ここで、 P は節点における粘性減衰エネルギー、 \dot{E}_k は節点における内部エネルギーの変化率である。

再現解析の結果、パラメータを表-2 のように設定することにより、概ね実験挙動の再現が可能となった。ただし、せん断摩擦角の設定は、実験で上部ブロックの滑動が発生しなかったことから、解析において亀裂面での滑動が発生しないせん断摩擦角を求めた。せん断摩擦角を 40° 以上とすることで、滑動がほとんど生じない解析結果が得られた。

図-7、図-8 に再現解析結果を示す。図-7 は測点 1、測点 3 での速度の時刻歴である。各測点での速度の時刻歴を実験と解析で比較すると、位相のずれはみられない。測点 3 では、応答速度の振幅はよく整合している。しかし、供試体上部の測点 1 では、実験より大きい速度振幅の解析結果が得られている。これは、振動実験ではロッキング現象が発生し、亀裂面が閉じた際の衝撃によるエネルギーロスや、加振による微細な亀裂の発生、進展によるエネルギーの消費の影響などにより、亀裂面より上では、実験応答が解析応答に比べて小さくなったと考えられる。

また、供試体の勾配変化箇所での開口変位時刻歴の比較を図-8 に示す。位相のずれはなく、解析速度応答が亀裂面より上部で実験より大きくなったことが原因で、解析における開口変位が実験より大きい結果となったが、概ね再現性のよい結果である。

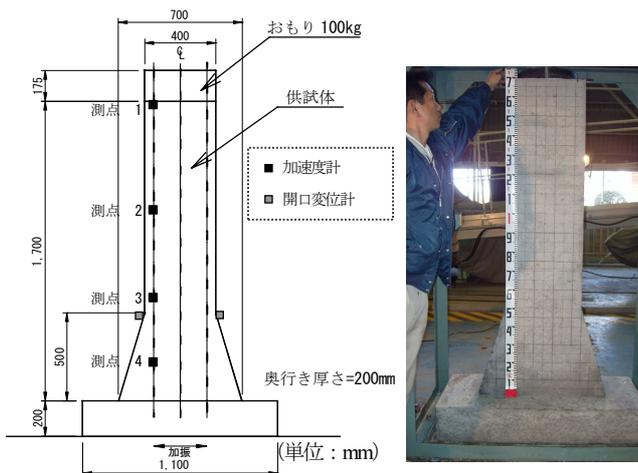


図-4 模型振動実験の供試体（亀裂分断前）

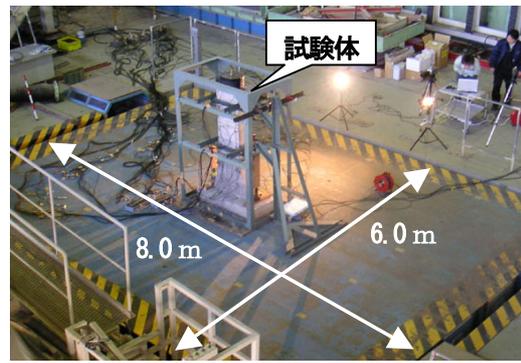


写真-1 振動実験の状況

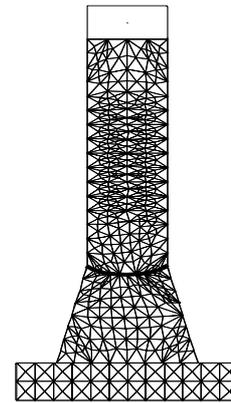


図-5 模型供試体の解析モデル（太線：貫通亀裂界面）

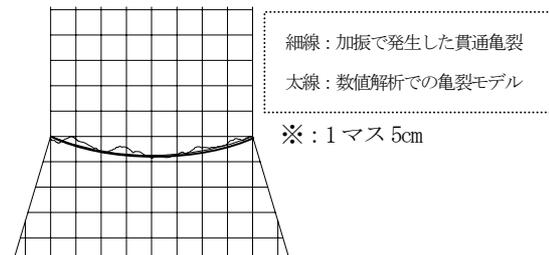


図-6 振動実験による亀裂形状と解析での亀裂モデル

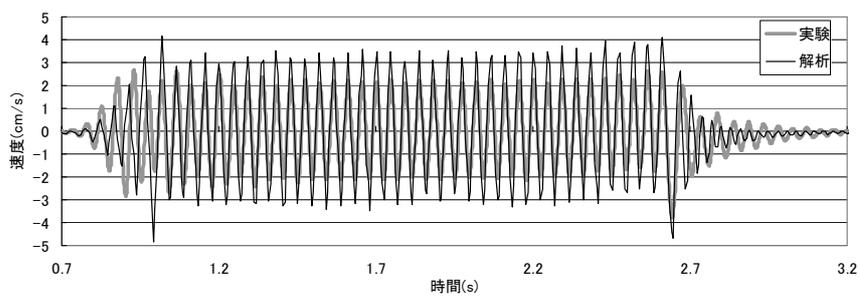
表-1 模型振動実験の再現解析の設定条件

考慮荷重	堤体自重、堤体慣性力	
材料物性	弾性係数	6,300 N/mm ²
	ポアソン比	0.15
	単位体積質量	2,300 kg/m ³
貫通後亀裂面	引張強度	0 N/mm ²
	純せん断強度	0 N/mm ²
亀裂形状	両端の勾配変化箇所を円弧状に結ぶ曲線	

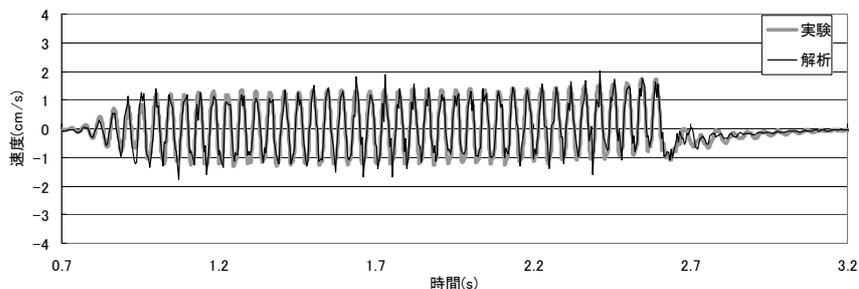
表-2 再現解析で設定した物性値

項目	物性値
亀裂面の垂直方向ばね係数 k_n	10K
亀裂面のせん断方向ばね係数 k_s	10K
グローバル減衰 R	10%
亀裂面のせん断摩擦角 ϕ	40° 以上

K：供試体の体積弾性係数



a) 測点1



b) 測点3

図-7 水平応答速度時刻歴 (測点1、測点3)

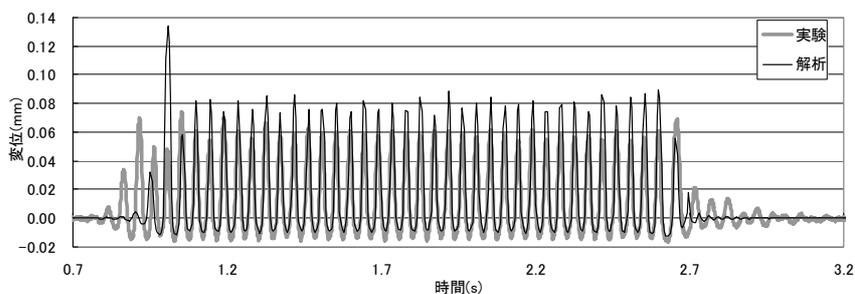


図-8 開口変位時刻歴 (勾配変化箇所左側)

b) 亀裂面に対する一面せん断試験

(滑動に対する物性値検討)

亀裂貫通状態を模擬したコンクリート供試体に対する一面せん断試験を行い、亀裂貫通後のせん断摩擦角を要素試験から導出した。図-9 に一面せん断試験の概要を示す。

コンクリート供試体は、寸法 200mm×200mm×200mm で、骨材最大寸法、コンクリート設計圧縮強度、垂直圧縮応力、亀裂面性状の組合せを変えて一面せん断試験を行った。供試体はあらかじめ高さ 100mm の位置で、供試体と加圧板に鋼製のエッジを挟んで加圧し、割裂分断させてせん断面を形成した。亀裂面の性状は以下の2パターンとした。

- ①地震動により任意箇所から亀裂が発生し貫通したと想定したモデル (以下、割裂モデルと呼ぶ) : 作製した一体のコンクリート供試体を高さ 100mm の位置で分断させたもの。(写真-2①)
- ②堤体コンクリートの打継目に沿って亀裂が発生し貫通したと想定したモデル (以下、打継モデルと呼ぶ) :

供試体を2層に分けて打設し、打継面から分断させたもの。打継面はコンクリートダムの打設における一般的な処理にみられるモルタルの打設はせずに、ワイヤーブラシにより1層目の表面に浮いたレイタンスを除去して表面を粗にし、その後、表面に剥離剤を塗布した上で2層目を打設し、硬化後に供試体を打継面で分断できるようにした。(写真-2②)

図-10、表-3 に一面せん断試験結果を示す。割裂モデルのせん断摩擦角はおよそ 50~65°、純せん断強度は 0.68~1.94 N/mm² となった。打継モデルのせん断摩擦角はおよそ 53~57°、純せん断強度は 0.44~0.48 N/mm² となった。

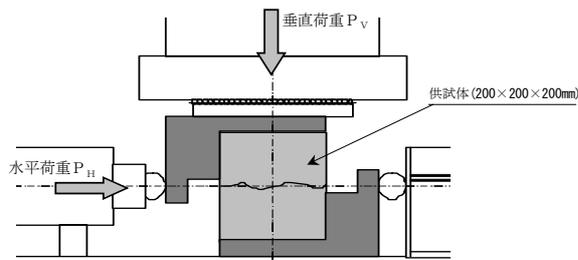
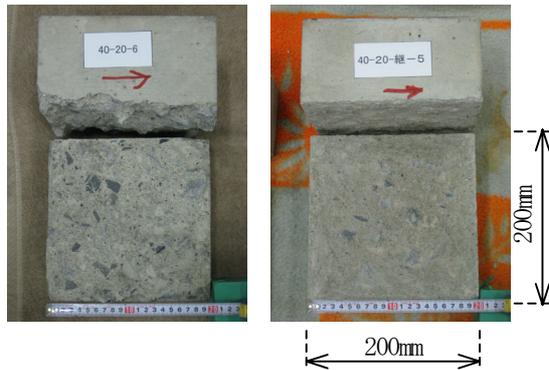


図-9 一面せん断試験概要図



①割裂モデル

②打継モデル

写真-2 一面せん断試験供試体

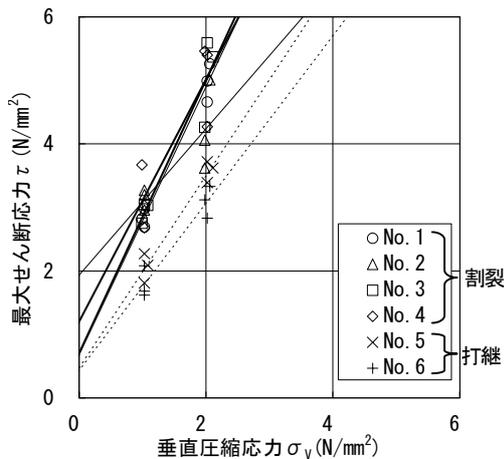


図-10 一面せん断試験結果

表-3 一面せん断試験結果一覧表

供試体 No.	亀裂面性状	粗骨材最大寸法 (mm)	設計圧縮強度 (N/mm ²)	凹凸面積 [※] (mm ²)	純せん断強度 (N/mm ²)	せん断摩擦角 (°)
1	割裂	20	20	948	0.68	64.6
2			30	1,212	1.94	49.1
3		40	20	1,732	0.71	65.1
4	打継	20	30	1,537	1.20	62.3
5			20	482	0.48	56.5
6		30	364	0.44	52.8	

※) 凹凸面積は、亀裂面の起伏・粗さの度合いを示す。

(2) ダムモデルの分離ブロック地震時挙動の検討

a) 解析モデル及び物性値

亀裂が貫通し、堤体が分断された堤高 100 m級の重力式コンクリートダムの地震時挙動を個別要素解析により検討した。亀裂面の物性値については、亀裂面の起伏の発生状態、粗骨材が亀裂面の出現する程度によっては、

3. (1) で導出したせん断摩擦角 (模型実験再現解析: 40° 以上, 一面せん断試験: 50~65°) 以上と推測されるが、本検討における解析では、解析結果が危険側となる、せん断摩擦角を 50°、及び、純せん断強度をゼロと設定して解析を行った。

分離ブロックの形状は、本章冒頭で述べたブロックの運動モードのパターンを踏まえ、以下の 2 パターンの形状のブロックを対象として地震時挙動を検討した。

- ① ロッキング・滑動するブロックの挙動 (図-11①) : 堤体上部の下流側勾配変化箇所からの亀裂 (円弧状亀裂)
- ② 滑動が卓越するブロックの挙動 (図-11②) : フィレット部の上流側勾配変化箇所からの亀裂 (水平直線亀裂)

なお、既往の亀裂進展解析結果 (図-2) を見ると、上流フィレットから伸びる亀裂は、下流面から発生する亀裂と結合して、上下流に亀裂が貫通するパターンが卓越すると考えられる。その際、亀裂面は V 字型を形成すると考えられるが、本研究における②滑動に対する検討としては、滑動に対する安定性が危険側と想定される、フィレットの勾配変化箇所から水平に貫通した亀裂を対象に検討を行った。

個別要素解析に用いる解析物性値は表-4 に示すとおりである。入力地震動は 2000 年鳥取県西部地震で賀祥ダムの下部監査廊で観測された加速度時刻歴波形 (最大加速度 570gal) を用いた。加速度、及び、速度時刻歴は図-12 に示すとおりである。なお、今回の解析では貯水の影響は考慮していない。

b) ロッキング・滑動するブロックの挙動

滑動に加えてロッキングの影響が大きいと考えられる、図-11 の①の亀裂面における上部分離ブロックの地震時挙動を検討した。

図-13 に貫通亀裂の左右端の節点における、水平、鉛直開口変位時刻歴を示す。水平開口変位から、亀裂面上部分離ブロックが下流方向へ移動して、残留変位が生じたことがわかる。また、亀裂面は円弧形状でモデル化したため、水平方向の残留変位に伴い、鉛直方向の残留変位も観測されている。水平変位は、大きなロッキング現象が発生した瞬間 (24.8 秒付近) から増加し始め、ロッキングを起こすごとに変位が増加している。残留変位が生じていることから、このモデルではロッキングだけで

なく、亀裂面での滑動が発生していることがわかる。

c) 滑動が卓越するブロックの挙動

主に滑動が卓越する、図-11 の②の亀裂面における上部分離ブロックの地震時挙動を検討した。

図-14 に貫通亀裂の左右端の節点における水平、鉛直開口変位時刻歴を示す。上部分離ブロックが上流方向へ移動して水平開口変位に残留変位が生じている。鉛直開口変位について、上部分離ブロックの運動モードとして、上流側と下流側の鉛直開口変位波形が逆位相であることから、滑動だけでなく、加振中に上部分離ブロックにはロッキング現象も生じていることがわかる。また、下流側の測点で開口変位振幅が大きくなっているのは、貯水の影響を考慮していない条件や上部分離ブロックが三角形形状であり、上部分離ブロックが上流側に倒れやすいためと考えられる。今回の入力地震動レベルでは、残留変位は上流側に1.2~1.4mm程度の小さな値であった。

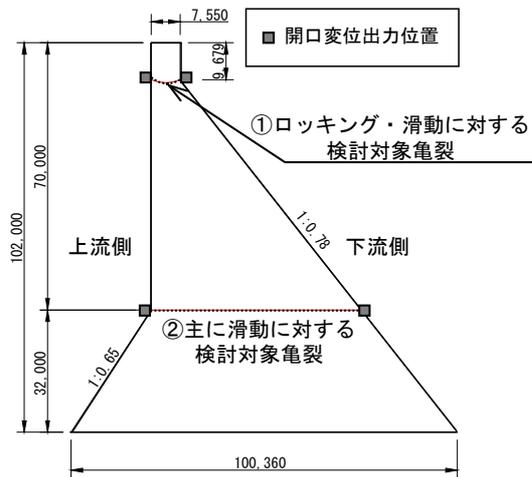


図-11 解析モデルの概要 (単位: mm)

表-4 ダムモデルの材料物性値

項目	物性値
単位体積質量 ρ	2,300 kg/m ³
弾性係数 E	29,000 N/mm ²
ポアソン比 ν	0.2
亀裂面の垂直、せん断方向	10K
ばね係数 k_n, k_s	K: 堤体の体積弾性係数
グローバル減衰 R	10 %
亀裂面のせん断摩擦角 ϕ	50°

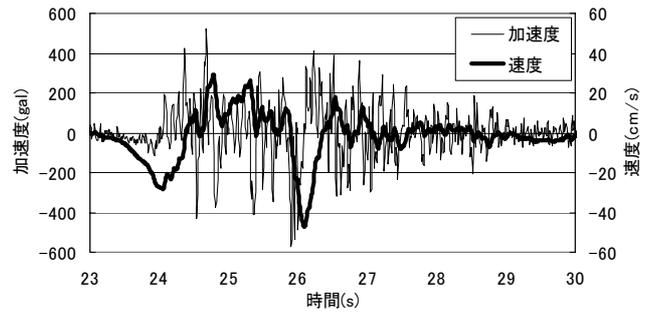


図-12 入力地震動 (賀祥ダム波形)

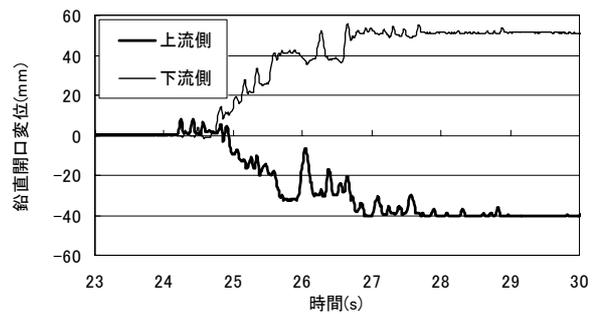
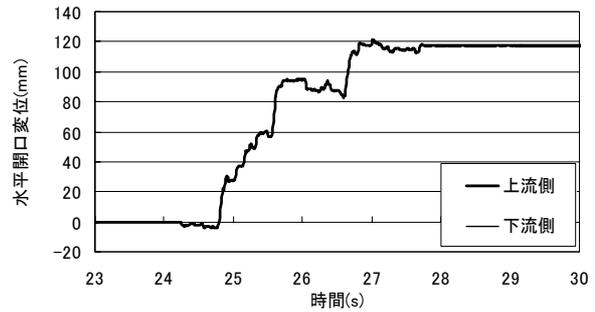


図-13 開口変位時刻歴 (①ロッキング・滑动検討ブロック)

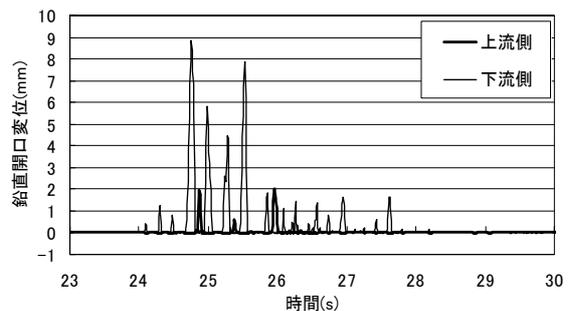
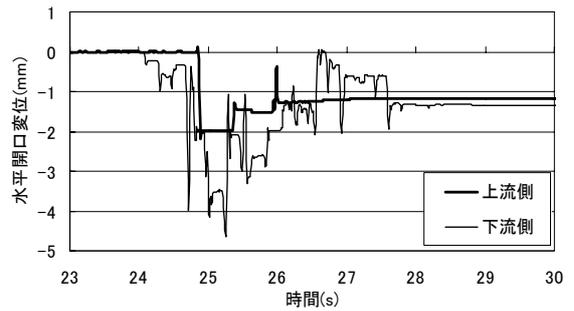


図-14 開口変位時刻歴 (滑动検討ブロック)

5. まとめ

本研究では、模型振動実験の再現解析、及び亀裂面を設けた一面せん断試験を行い、コンクリートの亀裂界面の各種物性値の設定を試みた上で、コンクリートダム堤体の上下流面に亀裂が貫通した重力式コンクリートダムの分離ブロックの地震時挙動を、個別要素解析により検討した。

ロッキング・滑動に対する堤体高標高部分離ブロックの検討では、今回の最大加速度570galの入力地震動では、ロッキングによる転倒には至らなかった。また、ロッキングと同時に亀裂面での滑動が生じていることが確認できた。滑動が卓越する堤体低標高部分離ブロックの検討では、今回の最大加速度570galの入力地震動レベルでは、亀裂上部ブロックの上流側への滑動が生じたが、残留変位はごくわずかであった。

今後、コンクリートダムの上下流面に連続する引張亀裂が生じた場合における地震時の終局的な安定性を検討していく上で、今後の本研究に関する課題としては、亀裂貫通後の堤体状態におけるブロック応答に及ぼす地震動特性の影響、及び、堤体上流面に作用する動水圧や亀裂面に作用する揚圧力といった貯水の影響などについて検討をしていくことが必要である。また、亀裂界面の物性のより精度の高い設定が必要と考えられる。その上で、ダムの安全性・使用性・修復性といったダムに要求される性能確保の観点から大規模地震に対するコンクリートダムの終局耐力評価手法を確立していく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説，2005.
- 2) Hansen, K. D. and L. H. Roehm: The response of concrete dams to earthquakes, *Water Power & Dam Construction*, pp.27-31,1979.
- 3) 佐々木隆，金縄健一，山口嘉一，千葉淳哉：地震動強度，堤体形状が重力式コンクリートダムのクラック損傷程度に与える影響，大ダム，No.193，pp.82-87，日本大ダム会議，2005.
- 4) 内田善久，粂田茂樹：コンクリート重力ダムのクラック進展を模擬した遠心振動模型実験，ダム技術，No.227，pp.79-86，ダム技術センター，2005.
- 5) Yamaguchi, Y., T. Sasaki, T. Iwashita, S. Sasaki and H. Kurahashi: Evaluation of Crack Phenomena in Unreinforced Concrete Structures by Crack Propagation Analyses and Shaking Table Tests, *Proc. of UJNR Fourth U.S.-Japan Workshop on Advanced Reseach on Dams*, 2007.
- 6) Federal Energy Regulatory Commission : Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Project, Chapter III,XI, 2002.10.
- 7) US Army Corps of Engineers : Response Spectra and Seismic Analysis for Concrete Hydraulic Structures, EM1110-2-6050, 1999.7.
- 8) Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC Theory and Background, 2004.

(2007.6.29 受付)

DEM ANALYSIS OF THE BLOCK SEPARATED BY TENSILE CRACKS OF A CONCRETE GRAVITY DAM DURING EARTHQUAKES

Tomoya IWASHITA, Hiroshi KURAHASHI, Susumu SASAKI,
Yoshikazu YAMAGUCHI and Takashi SASAKI

Concerning the seismic performance evaluation of concrete gravity dams for level 2 earthquake motions, that is equivalent of MCE, when continuous tensile cracks between the upstream and downstream surfaces are expected, further investigation should be conducted including analyses to confirm the stability of the upper block of the concrete dam body separated. The dynamic behavior of the upper block of the dam was analyzed using distinct element method (DEM). The physical properties of cracking interface of a concrete dam for DEM analysis were obtained from the simulation analyses of dynamic behavior of a concrete structure with a tensile crack by shaking table tests and from direct shear tests on concrete specimens with a cracked shear surface.