

3.5 コンクリートダム地震時終局耐力評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：水工研究グループ（ダム構造物）

研究担当者：山口嘉一、岩下友也、切無沢徹

【要旨】

レベル2地震動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、堤体に生じた引張亀裂が上下流面に貫通した場合には、堤体の上部分断ブロックの安定性の詳細な検討・評価が必要である。そのため、コンクリートダムの亀裂分断後における堤体上部ブロックの地震時挙動を詳細に把握する必要がある。そこで本研究では、亀裂分断させたダム形状の模型試験体に対して、堤体模型上流側に貯水した状態で振動実験を実施した。上部ブロックの動的挙動を分析するとともに、分断面に作用する揚圧力の有無の荷重条件での比較振動実験を実施し、上部ブロックの挙動に及ぼす揚圧力の影響を分析した。さらに、模型振動実験の再現シミュレーションを個別要素解析により実施した。

キーワード：重力式コンクリートダム、レベル2地震動、振動実験、耐震性能、個別要素法

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」を2005年3月に策定し、現在直轄ダム等において試行している。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の条件は満足することとしている。しかし、同指針（案）解説¹⁾にも、引張亀裂が堤体を上下流間に連続することとなったとしても、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としているため、地震応答解析で亀裂が上下流面間に連続した場合には、より詳細な追加検討項目として亀裂分断後のダム堤体の終局的耐力の評価を行う必要がある。

そこで、大地震動によるコンクリートダム堤体の亀裂分断後における終局的な堤体の耐震安定性の評価手法を開発するため、堤体分断ブロックの地震時における変位挙動・メカニズムを解明することを目的として、ダム形状の分断堤体模型を作製し、貯水

による亀裂内揚圧力、動水圧の影響等を考慮できる形で振動実験を実施した。本年度は、昨年度実施した振動実験²⁾に対して、相似則に基づき強度の小さい試験体を作製した。さらに、個別要素解析により模型振動実験の再現解析を実施した。

2. 模型振動実験

2.1 概要

振動実験は、3次元大型振動台施設（テーブル寸法：8m×8m）を使用した。振動台の上に水槽（内寸：長さ1.25m×幅0.5m×高さ0.8m）を設置し、その中にあらかじめ分断させたダム形状のモルタル模型試験体を設置した。試験体の上流側に貯水した状態で（水深465mm）、ポンプ注水により水位を試験中一定に保持した（図-1）。また、試験体上部ブロックの挙動を阻害させないように試験体側面と水槽壁面の間からの漏水を防ぐために、シートをたるませた状態で試験体上流面と水槽壁面に貼付した。

2.2 模型試験体

ダム模型の試験体の寸法は、堤高515mm×上下流方向長さ318mm×奥行厚さ300mmとした。ダム模型の上流面勾配は鉛直、下流面勾配は1:0.8とした。

本実験では、加振時に大きな引張応力が発生するダム上流面の低標高部から、水平打継面に沿って亀裂が発生し上下流方向に亀裂貫通したことを想定して試験体を作製した。試験体は最大骨材寸法0.75mmのモルタルを使用した。試験体の配合を表-1に示し、試験体と同配合のモルタルで作製した試験体の材料

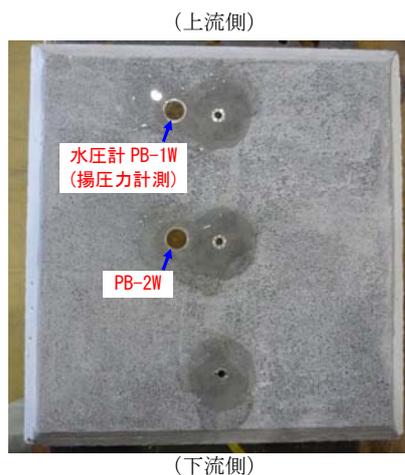


写真-1 分断面の状況 (下部ブロック)

-3)、動水圧や分断面に作用する揚圧力の計測については、小型間隙水圧計を試験体下部ブロックに埋設設置した。

2.3 実験の方法

2.3.1 実験ケース

実験は、試験体分断面への貯水の浸水を許容した条件で2ケース (Case-UPL-a, b) と、貯水の浸水を防いだ条件で1ケース (Case-N-UPL) 実施した (表-4)。Case-N-UPL については、分断面に作用する揚圧力の有無による上部ブロックへの影響をみるために実施した対照実験ケースであり、分断面の上流面側にシートをたるませた状態で貼付け、加振中の上流分断面からの貯水の浸水を防いだ。

2.3.2 加振条件

加振は振動数 50Hz の正弦波を入力した。継続時間は 0.5 秒間で目標振幅にまで直線的に増幅させ、5 秒間の一定振幅の振動で加振した。図-2 に入力水平加速度時刻歴の一例を示す。

加振はステップ加振とし、加振ステップ毎に入力波の正弦波振幅をほぼ 100gal ずつ段階的に増加させていった。

本実験の加振条件を相似則に基づいて実ダム規模に換算したものを表-5 に示す。入力加速度レベルは、実ダム規模において最大 1000gal 程度となるが、これは通常のダム基礎のレベル 2 地震動のダム固有周波数領域における加速度応答スペクトルと同程度である。振動数は、相似則に基づいて実ダム規模の大きさに換算すると 3.5~9.1Hz 程度となり、実ダムサイト岩盤で観測される地震動の振動数相当である。また、入力の継続時間は実ダム規模に換算すると 30~87 秒である。

表-4 試験ケース

ケース	分断面に作用する揚圧力	加振振動数 (正弦波)
Case-UPL-a	揚圧力あり	50Hz
Case-UPL-b		
Case-N-UPL	揚圧力なし	

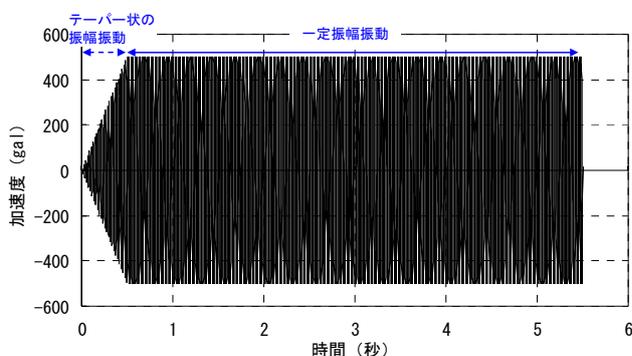


図-2 入力水平加速度時刻歴の一例

2.4 実験結果

2.4.1 各加振ステップの滑動変位

上部ブロックの滑動前と滑動後における高速度カメラの映像写真を図-4 に示す。各実験ケースにおける加振ステップ毎の試験体下部ブロックの入力正弦波加速度振幅と下部ブロックに対する上部ブロックの残留水平相対変位の関係を図-5 に示す。Case-UPL-a と Case-UPL-b は、下部ブロック加速度振幅が 700gal~800gal 程度で、上部ブロックが下流側に大きく滑動変位している。一方、分断面への貯水の浸水を極力防いだ Case-N-UPL は、上部ブロックが滑動する際の下部ブロック加速度は 900gal 程度と若干大きい。これは、後述のとおり、Case-N-UPL では上部ブロックが下流に滑動する際に、分断面に作用する貯水からの揚圧力が小さいため、上部ブロックが滑動しにくいことを示している。Case-UPL-b が 200gal 程度の低加速度振動で数mm 滑動している。これは、上部ブロック設置時に分断面の凹凸が正確にかみ合っていなかったものが、低加速度の振動により分断面凹凸のかみ合わせが安定した際に変位したものと考えられる。仮に 200gal 加振時の残留変位量分を差引くと、Case-UPL-a の変位曲線は Case-UPL-b と同様の変位曲線となり、同条件の Case-UPL の両ケースは、滑動変位に大きな違いはないと考えられる。

2.4.2 上部ブロックの挙動メカニズム

上部ブロックの挙動については、Case-UPL-b (最終加振ステップ：入力加速度最大振幅約 970gal) の

表-5 本実験の入力加振条件と相似則に基づいて実ダム規模に換算した値

加振条件 (正弦波)	相似則 ($\lambda=30\sim 200$)	本実験での 入力加振条件	相似則に基づいて実ダム (堤高 15~100m) 規模に換算した値
	c	d	d/c
加速度振幅	1	100~1000 gal	100~1000 gal
振動数	$\lambda^{1/2}$	50 Hz	3.5~9.1 Hz
継続時間	$(1/\lambda)^{1/2}$	5.5 秒	30~78 秒

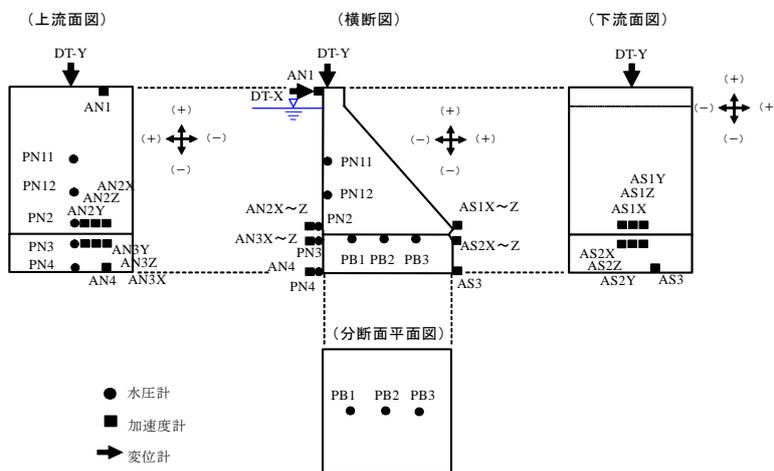


図-3 計測センサー配置図

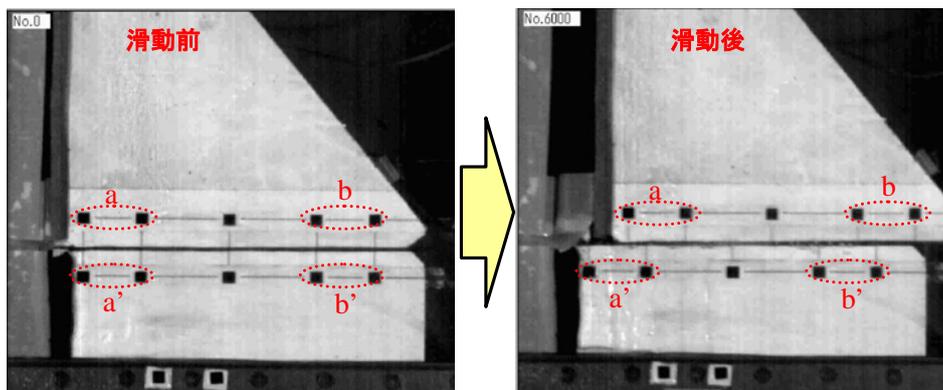


図-4 上部ブロックの滑動前及び滑動後の高速度カメラの映像写真

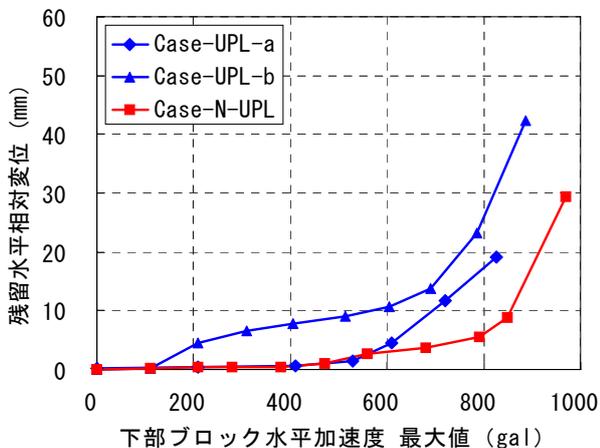


図-5 各加振ステップの入力水平加速度振幅と残留水平相対変位

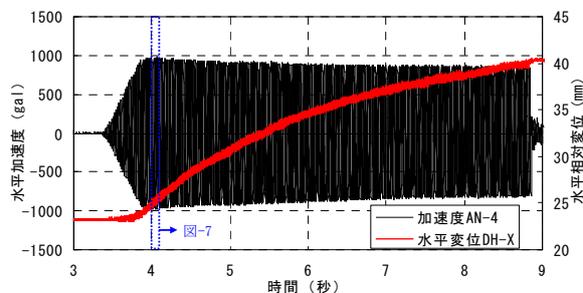


図-6 下部ブロック水平加速度時刻歴 (Case-UPL-b 最終加振ステップ時)

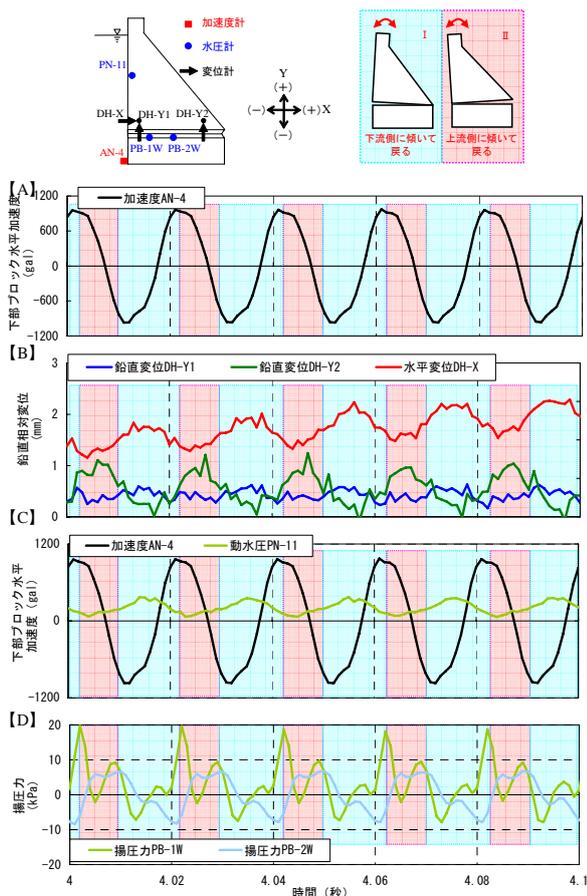


図-7 上部ブロック挙動の計測値の時刻歴 (Case-UPL-b 最終加振ステップ)

挙動について分析した。

図-6 に、Case-UPL-b の下部ブロック水平加速度時刻歴 (AN-4) と、上部ブロックの下部ブロックに対する水平相対変位時刻歴 (DH-X) を示す。AN-4 の加速度時刻歴が一定振幅振動時に上部ブロックが徐々に下流方向に滑動している。

図-6 のうち、4.0~4.1sec (0.1 秒間) の区間を抽出したものを図-7 に示す。上部ブロックの剛体挙動を 3 標点 DH-X、DH-Y1、DH-Y2 (図-4) の高速度カメラ映像 (1000 コマ/s) の追跡解析により、下部ブロックに対する上部ブロックの相対変位として算定した。DH-X は上流側の水平相対変位 (図-4 a-a'), DH-Y1 は上流側の鉛直相対変位 (図-4 a-a'), DH-Y2 は下流側の鉛直相対変位 (図-4 b-b') を示す。

ここで、図-7 において DH-Y1 と DH-Y2 の大小関係から、上部ブロックのロッキング状態によって色分けした。上部ブロックが下流側に傾いたあとと元に戻るまでの動きを挙動「I」(水色ハッチング部)、上部ブロックが上流側に傾いたあとと元に戻るまでの動きを挙動「II」(赤色ハッチング部) とした。また、

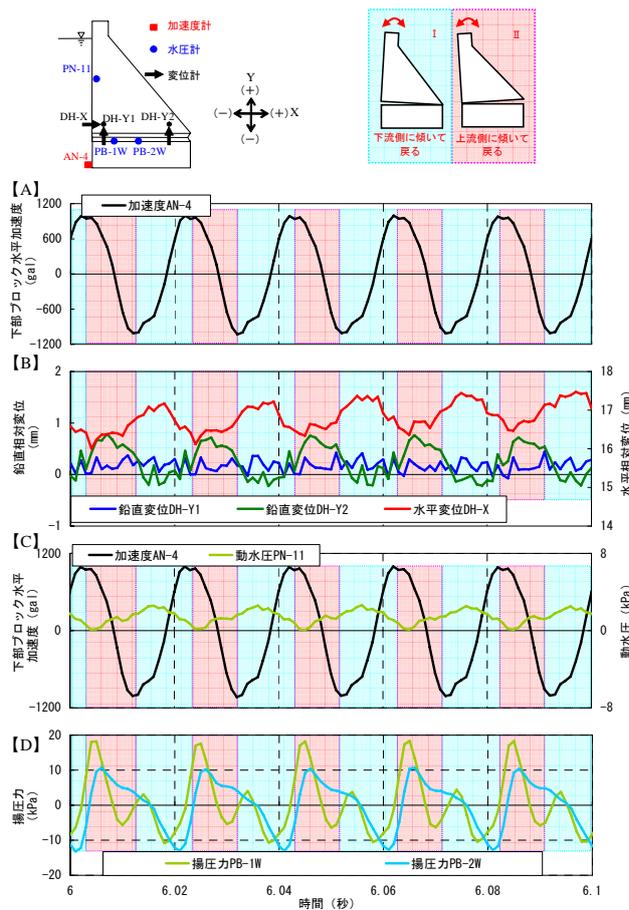


図-8 上部ブロック挙動の計測値の時刻歴 (Case-N-UPL 最終加振ステップ)

断面面に貯水を浸水させない条件での実験結果について、同様に色分けしたものを図-8 に示す。

上部ブロックの鉛直相対変位をみると、試験体上流側における鉛直相対変位 DH-Y1 と、試験体下流側の鉛直相対変位 DH-Y2 は、位相が逆転している。このことから、上部ブロックが上下流に傾くロッキング挙動を起こしながら、DH-X の挙動からも明らかのように少しずつ下流方向に滑動することが分かる。上流面に作用する動水圧が大きくなったときに、上部ブロックが下流側に傾き、下流方向に滑動する。

断面面に作用する揚圧力について、断面面に貯水を浸水させる条件 (Case-UPL-b) では、上部ブロックが上流側に傾いた状態 (挙動「II」) から元に戻り、断面面が閉じられる時に、PB-1、PB-2 で瞬間的に 8~10kPa 程度の揚圧力が作用する。この揚圧力の作用により、断面面の摩擦抵抗が小さくなることから、上部ブロックが下流方向へ滑動しやすくなると考えられる。一方で、断面面への貯水の浸水を防いだ条件 (Case-N-UPL) では、上流側に傾いていた上部ブロックが元に戻る際、貯水圧の影響を受けないため、

表-6 再現解析モデルの物性値

物性		値
上部ブロック 下部ブロック	密度 ρ	2,090 kg/m ³
	動弾性係数 E	6,700 N/mm ²
	ポアソン比 ν	0.2
	減衰定数 R	50 %
分断面	純せん断強度 τ_0	0.0304 N/mm ²
	摩擦係数 $\tan \phi$	0.82

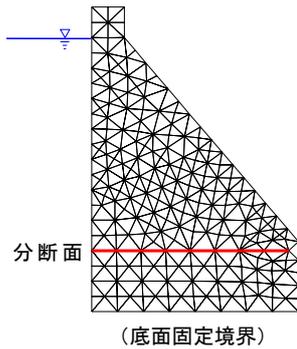


図-9 再現解析モデルのメッシュ図

大きな揚圧力値は作用せず、下流方向への滑動変位量は揚圧力が作用する場合に比べて小さい (図-5)。

表-7 解析ケース

Case	揚圧力の条件	垂直方向ばね定数 kn (MPa/m)	接線方向ばね定数 ks (MPa/m)
Case N-1	揚圧力なし	6,700 (E)	6,700 (E)
Case N-2		6,700 (E)	3,350 (E/2)
Case N-3		6,700 (E)	670 (E/10)
Case U-1	揚圧力あり	6,700 (E)	6,700 (E)
Case U-2		6,700 (E)	3,350 (E/2)

3. 再現解析

3.1 解析方法

振動実験における上部ブロックの挙動について、個別要素法を用いた再現解析を行った。解析コードは UDEC⁴⁾ を用いた。解析モデルを図-9 に示す。

解析モデルの物性値を表-6 に示す。動弾性係数 E、密度 ρ 、及び分断面の純せん断強度 τ_0 と摩擦係数 $\tan \phi$ は、実験で用いた模型試験体と同配合で作製した供試体の試験値を与えた。なお、 τ_0 と $\tan \phi$ は、模型の分断面に作用する上載圧を考慮した一面せん断試験によって求めた。

解析モデルにおける分断面には、垂直方向と接線方向に仮想のばねを設定している。上下ブロックが接している時、上下ブロック間に作用する垂直方向の応力は垂直方向ばね定数 kn を介して伝達し、せん断抵抗特性の関係式(1)より、せん断強度 τ が算出される。上下ブロックが接触していない時には垂直方向の応力は作用しない。一方、接線方向の応力に関しては、接線方向ばね定数 ks と上下ブロックの水平相対変位量の関係から求められる。

解析に用いる減衰は、グローバル減衰 R で以下の式で定義される。

$$R = \Sigma P / \Sigma \dot{E}_k \quad (2)$$

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。

加振入力波は、振動実験と同様、振動数 50Hz の正弦波とし、全ステップを連続して加振入力した。実験では入力加速度 100gal からステップ加振を開始したが、低加速度の振動では上部ブロックの滑動に対する影響は小さいと考え、解析では入力加速度 300gal からのステップ加振とした。上部ブロック上

流面に作用する動水圧は、Westergaard 式に基づく付加質量を与えた。

解析を実施するケースは、分断面に揚圧力が作用しない条件 (Case-N-UPL) と、分断面に揚圧力が作用する条件 (Case-UPL-a, b) の 2 ケースを実施した。また、分断面のばね定数 kn と ks の値の妥当性を確認するために、揚圧力を作用させない条件下で Case N-1~3 の 3 ケース実施した (表-7)。CaseU-1, 2 は分断面に揚圧力が作用する条件で実施したケースであり、模型実験において無振動状態における実測揚圧力分布を与えた。

3.2.1 ロッキング挙動

図-10 は、揚圧力を作用させない条件下で行った解析結果と実験結果 (Case-N-UPL) である。実験では、下部ブロックに作用する加速度と同じ周期で上部ブロックがロッキングすることが確認された (図-10(1))。また、図-10(1)から、上部ブロックが下流に変位するときは、上流側へ傾いていた上部ブロックが元に戻り下流側の分断面開口が閉じ、そして下流側へ傾き、上流側の分断面開口が開く過程のロッキング挙動をともなっている。ロッキング挙動では、上部ブロックの下流側の開口開きの方が上流側開口開きよりも大きくなっている。解析結果である図-10(2)~(4)では、実験よりも分断面開口量は小さいが、これらを比較すると、(4)の ks を小さくした Case N-3 は上流側の開口開きが大きくなっており、実験と異なっているが、(2)(3)の Case N-1, 2 では実験と同様に上下流側の開口開きはほぼ同等に開いたロッキング挙動となっており、再現性が高いといえる。

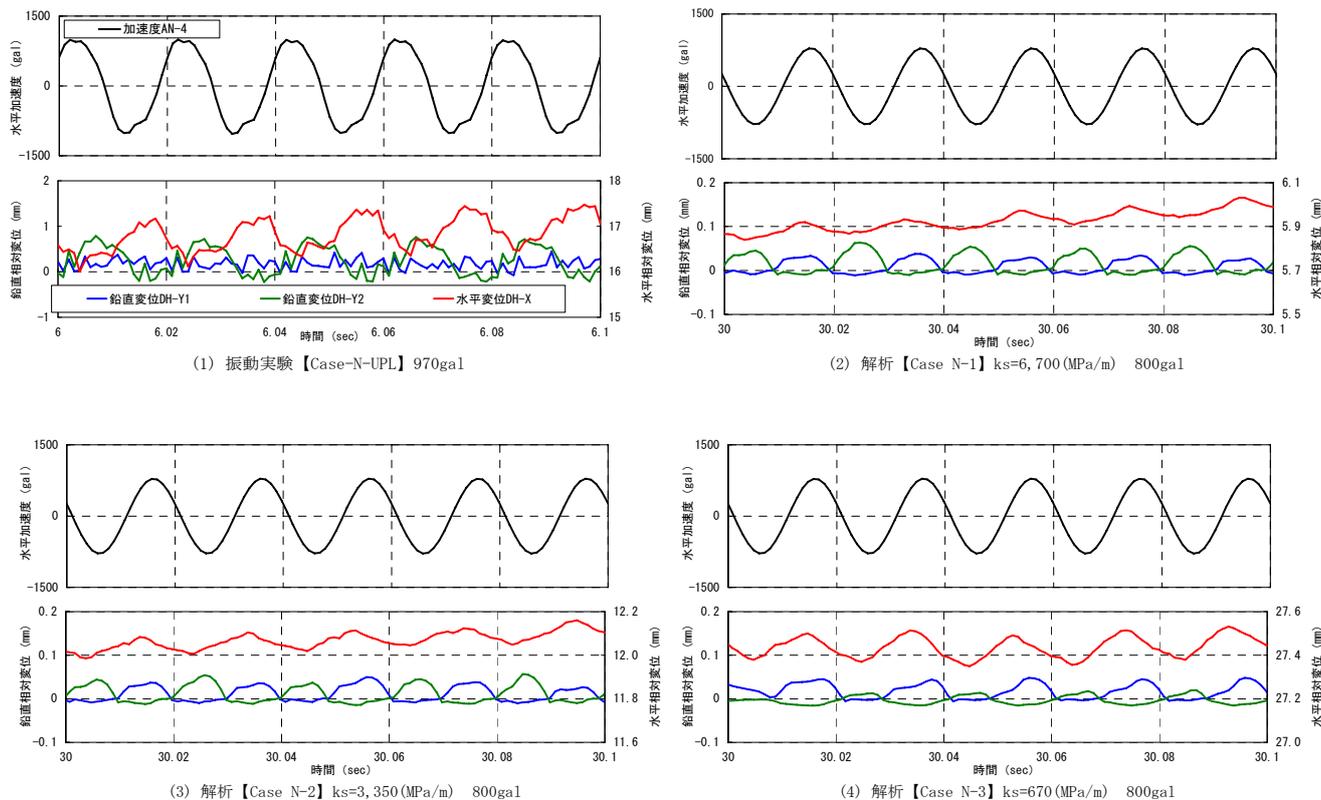


図-10 上部ブロックの挙動

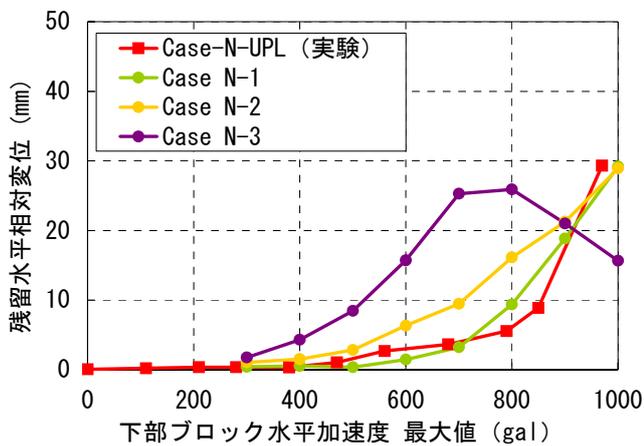


図-11 各加振ステップの残留水平相対変位 (揚圧力なし)

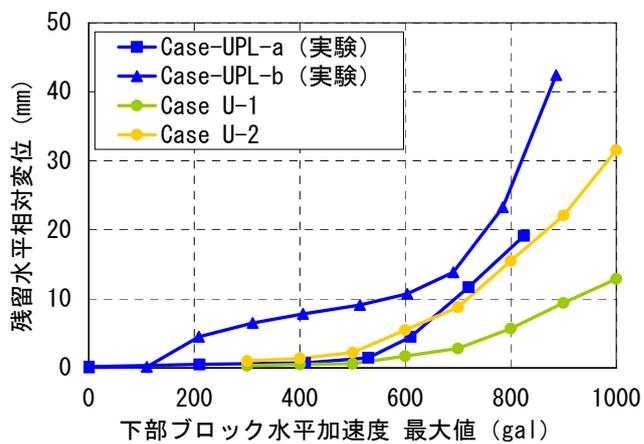


図-12 各加振ステップの残留水平相対変位 (揚圧力あり)

3.2.2 水平変位

図-10(2)～(4)における Case N-1～3 の水平相対変位の時刻歴振幅は実験のもの(図-10(1))より小さい。

Case N-1～3 について、各加振ステップの残留水平滑動相対変位を図-11 に示す。解析結果 Case-N-1, 2 が入力加速度振幅 500～600gal で滑動開始し、揚圧力なし条件の実験結果 Case-N-UPL と同様となった。その後の加振ステップでも残留水平変位は実験とほぼ同様の傾向となった。一方、解析結果 Case-N-3 は加速度振幅 300～400gal で滑動開始し、その後の加振ステップでも実験より残留水平変位が大きくなった。

次に、Case N-1, 2 と分断面のばね定数 k_n , k_s を同条件として、分断面に揚圧力を作用させた Case U-1, 2 の解析結果を図-12 に示す。解析結果 Case U-1, 2 は、実験結果 Case-UPL-a, b よりも残留水平変位は小さい。揚圧力が作用すると分断面の摩擦抵抗が小さくなる。解析では、無加振状態の静的な揚圧力 (3kPa 程度) を作用させたが、実験では 900gal 加振時には下流に滑動時には 10kPa 程度の揚圧力が瞬時には作用していることも、解析による残留水平変位が実験よりも小さい理由の1つと考えられる。

今後、解析における揚圧力の作用方法や分断面における摩擦特性について工夫していく必要がある。

4. まとめ

大地震により、重力式コンクリートダムの水平打継面に亀裂が貫通し、分断したことを想定し、分断後のダムの終局的な地震時安定性を評価するため、ダム形状の小型モルタル試験体模型を用いた振動実験を行った。さらに、個別要素解析により実験の再現解析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 振動実験から、加振中の上部ブロックの動的挙動を計測し分析した。下部ブロックに上流方向の加速度が作用すると、上部ブロックに下流方向の慣性力が作用するため、上部ブロックは上流への傾きから下流側に傾き、わずかに下流方向に滑動する。逆に、上部ブロックの慣性力が上流方向に作用するときは、上部ブロックが下流側への傾きから元の水平状態に戻ったあとに、上流側に傾き、わずかに上流方向に滑動する。上部ブロックは上述のサイクルの挙動を繰

返ししながら、加振継続中は徐々に下流方向に滑動変位している。

- 分断面に作用する揚圧力の有無の条件での比較実験をした。揚圧力が作用する条件では、上部ブロックに下流向きの慣性力が働く時で、揚圧力が大きくなっている時があり、分断面の摩擦抵抗が一時的に小さくなり、上部ブロックの滑動が生じやすい。
- 個別要素法による振動実験の再現解析では、分断面のモデル化や、揚圧力荷重など簡便な手法を用いたにもかかわらず、振動実験の上部ブロックのロッキング挙動や、残留水平変位について、今後の改善の余地はあるが、大まかには再現できた。

5. おわりに

次年度は、模型振動実験の再現解析手法の実ダムモデルへの適用を図り、大地震時の終局的な挙動を解析的に検討する。また、変位挙動の許容量を検討した上で終局的な安定性について検討を進める予定である。

参考文献

- 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. 3.
- 岩下友也，藤塚佳晃，佐々木晋，山口嘉一：亀裂分断を想定した重力式コンクリートダムの模型振動実験，土木学会地震工学論文集 第30巻，pp. 507-520，2009. 12
- 財団法人ダム技術センター編：多目的ダムの建設(平成17年度版) 第5巻，設計編Ⅱ，p. 16，2005. 6.
- Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC Theory and Background, 2004.

EVALUATION OF ULTIMATE LIMIT RESISTANCE OF CONCRETE GRAVITY DAMS AGAINST LARGE EARTHQUAKES

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Hydraulic Engineering Research Group
(Dam Structure)

Author : YAMAGUCHI Yoshikazu
IWASHITA Tomoya
KIRINASHIZAWA Toru

Abstract : Concerning the seismic performance evaluation of concrete gravity dams for Level 2 earthquake motions, that is equivalent to Maximum Credible Earthquake, when continuous tensile cracks between the upstream and downstream faces are assumed, further studies on ultimate seismic resistance of the dam need to be conducted. The purpose of this research is to establish an evaluation method of ultimate limit resistance of concrete gravity dams. The studies include analyses to confirm the stability of the upper block of the concrete dam body separated. The shaking table tests for the test models, the shape of which is that of a concrete dam, were conducted in order to make an observation of dynamic behaviors of the upper block of a concrete dam. Effects of uplift acting on the separated surface of the model and dynamic water pressure acting on the face of the model on the behavior of the upper block were analyzed. Especially, effects of uplift were evaluated by the comparison of the shaking table tests of the models with two types of the separated surface layer condition: one condition is filled with water from the reservoir and the other is dry without filling water through the separate cracks. In addition, the dynamic behavior of the upper block of the dam model was analyzed using distinct element method (DEM).

Key words : concrete gravity dam, large earthquake, shaking table test, seismic performance, distinct element method(DEM)