

### 3.9 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（治水勘定）

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、小堀俊秀、  
佐々木晋

#### 【要旨】

大規模地震がコンクリートダム近傍で発生することを想定した場合、亀裂が上下流面に連続して貫通あるいは貫通分断に近い状態まで生じる可能性がある。そのため、亀裂貫通分断後の上部分断ブロックの転倒、滑動といった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を評価する方法の開発が必要である。これは、2005年に通知された「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」においても今後の検討課題としていた。本課題は、コンクリートダム地震による亀裂が貫通し、分断した後の堤体上部分断ブロックの動的挙動を模型実験により把握し、数値解析による挙動再現を通して、コンクリートダム地震時終局耐力の評価手法を提案するものである。平成 19 年度は、亀裂が貫通し、分断した後の堤体分断ブロックの要素を模擬した模型振動実験を行い、分断ブロックの動的挙動を把握した。その上部分断ブロックの動的挙動を個別要素解析により再現解析を実施した。さらに、堤体が分断した重力式コンクリートダムモデルを用いた個別要素解析を実施した。

キーワード：重力式コンクリートダム、大規模地震、個別要素解析、終局耐力、耐震性

#### 1. はじめに

コンクリートダムの主たる地震時損傷形態は引張等による亀裂の発生・進展である。2005 年 3 月に通知され、現在試行が実施されている「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）」<sup>1)</sup>（以下、指針（案）という）では、照査上安全側の観点から、亀裂が堤体を上下流に貫通分断しないことをもって、ダムの耐震性能を評価することとされている。しかし、大規模地震がダム近傍で発生することを想定した場合、亀裂が上下流面に連続して貫通あるいは貫通分断に近い状態まで生じる可能性があり、このような状況を想定した、貫通亀裂上のコンクリート部の安定性評価手法の検討が指針（案）試行時の重要な課題となっている。そのため、亀裂の発生現象及び亀裂貫通後の上部コンクリート分断ブロックの転倒、滑動といった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を評価する方法の開発が必要である。

本課題は、地震動によるコンクリートダム堤体の亀裂進展及び亀裂貫通後の堤体ブロックの動的挙動を模型実験により把握し、数値解析による挙動再現を通して、大規模地震による終局状態を明確にし、コンクリートダム地震時終局耐力の評価手法を提案するものである。

平成 19 年度は、亀裂が貫通し、分断した重力式コ

ンクリートダムの分断部分の要素を模擬したコンクリート供試体による分断ブロックの模型振動実験を実施し、その再現解析を個別要素解析により実施した。また、重力式コンクリートダム形状モデルを用いて、そのフィレット取付部付近から生じた亀裂により堤体が分断したケースについて、個別要素解析により、分断面の摩擦角等の影響についてパラメータ解析を実施した。

#### 2. コンクリート分断ブロックの模型振動実験

##### 2.1 実験目的

コンクリートダム堤体に大規模地震により亀裂が生じ、それが上下流方向に貫通して堤体が分断した状態を想定すると、その後の地震動により分断ブロックの安定性を評価するためには、その分断ブロックの動的挙動を実現現象として把握し、解明していく必要がある。そこで、堤体が分断した場合の分断面付近の抽出要素を想定したコンクリート分断ブロックの模型を製作し、振動台を用いた模型振動実験を実施した。

また、分断面沿いの摩擦抵抗力を把握するために、振動実験用供試体と同じコンクリート配合、同じ分断面の処理方法で静的一面せん断試験を実施した。

##### 2.2 供試体作製

###### 2.2.1 供試体の配合

供試体は一般的な重力式コンクリートダムの内部コンクリートの圧縮強度 ( $20\text{N/mm}^2$ ) を目標として、粗骨材最大寸法  $40\text{mm}$  の無筋コンクリートで作製した。供試体の配合は、圧縮強度  $20\text{N/mm}^2$  が得られる水セメント比を選定し、圧縮強度試験用供試体及び一面せん断試験用供試体、振動実験用供試体を作製した。コンクリートの配合を表-1 に示す。

使用した材料は、セメント（太平洋セメント(株)製普通ポルトランドセメント）、細骨材（陸砂、表乾密度  $=2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $=1.10\%$ 、 $\text{FM}=2.79$ ）、粗骨材（堅固な砂岩砕石、 $40\sim 20\text{mm}$ （表乾密度  $=2.67\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $=0.98\%$ ）及び  $20\sim 5\text{mm}$ （表乾密度  $=2.66\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $=0.98\%$ ）、混和剤（(株)エヌエムビー製 AE 減水剤ポゾリス No.70 及び AE 剤マイクロエア 303A）である。

作製した供試体と同配合のコンクリートで作製した一軸圧縮試験用供試体（直径  $150\text{mm}$ 、高さ  $300\text{mm}$  の円柱形）の試験結果を表-2 に示す。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	目標圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	セメント ( $\text{kg/m}^3$ )	細骨材率 S/a (%)	粗骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )	
						G1 40~20 (mm)	G2 20~5 (mm)
40	20	8	4.5	207	43.5	552	552

表-2 圧縮強度試験結果

No.	材齢 (日)	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )				単位容積質量 ( $\text{t/m}^3$ )				静弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
		①	②	③	平均	①	②	③	平均	
1	7	7.86	8.00	6.88	7.58	2.340	2.326	2.333	2.333	1589
2	14	14.4	15.0	15.8	15.1	2.321	2.323	2.327	2.324	16467
3	28	21.2	19.4	22.0	20.9	2.315	2.328	2.325	2.323	21883
4	35	22.0	21.0	21.5	21.5	2.317	2.320	2.329	2.322	22071

## 2.2.2 供試体の作製方法

模型振動実験で使用した供試体の寸法は高さ  $500\text{mm}$  × 幅  $500\text{mm}$  × 奥行  $300\text{mm}$ （供試体高さの半分の高さ  $250\text{mm}$  の位置に供試体分断面を水平に形成するためのノッチを作製）、静的一面せん断試験に使用した供試体は高さ  $200\text{mm}$  × 幅  $200\text{mm}$  × 奥行  $200\text{mm}$ （供試体高さの半分の高さ  $100\text{mm}$  の位置に供試体分断面を水平に形成するためのノッチを作製）である。

写真-1 に示すように供試体にノッチを作製し、ノッチに円柱鋼棒を挿入して線状の圧縮载荷をすることにより、供試体を割裂分断させて分断面を形成した。

供試体は、以下の3つの分断面を想定して作製した。それぞれの作製方法とともに以下に示す。

- a) 地震動により堤体コンクリートの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)

- b) 水平打継目より亀裂が発生し貫通したと想定したモデルで、打継面処理としてグリーンカットを施したもの（以下、「打継モデル」と呼ぶ）  
 c) 水平打継目より亀裂が発生し貫通したと想定したモデルで、打継面処理としてグリーンカット後にモルタルを敷いたもの（以下、「打継+モルタルモデル」と呼ぶ）

割裂モデルについては、作製した一体のコンクリート供試体を材齢 28 日で分断した（写真-2 a）、写真-3 a）参照）。

打継モデルについては、供試体を 2 層に分けて打設し、打継面から分断させた。1 層目（層厚  $250\text{mm}$ ）を打設し、ワイヤーブラシにより表面に浮いたレイタンスを除去（グリーンカットに相当）して、表面を粗にする。1 層目打設から 3 日後に表面に剥離剤を塗布し、2 層目（層厚  $250\text{mm}$ ）を打設し、2 層目打設から 28 日後に供試体を分断した（写真-2 b）、写真-3 b）参照）。

打継+モルタルモデルは、打継モデルと同様の作製方法であるが、1 層目（層厚  $250\text{mm}$ ）打設後に表-3 に示す配合のモルタルを  $10\text{mm}$  敷いてから 2 層目（層厚  $240\text{mm}$ ）を打設して分断させた（写真-2 c）、写真-3 c）参照）。モルタル分は上部ブロックの分断面に位置しているため、相対的に富配合となった上部ブロックの分断面付近は、その他の部分より強度が大きくなっている。

なお、打継モデル、打継+モルタルモデルの打継面に塗布した剥離剤は(株)ノックス製コンクリート用剥離剤である。

作製した供試体の数量を表-4 に示す。

割裂モデルでは写真-2 a）、写真-3 a）に示すように、分断面に粗骨材が出現し、分断面の凹凸が顕著となった。

打継モデルと打継+モルタルモデルは、1 層目打設時にワイヤーブラシで表面に出現していた一部の骨材を押さえてコンクリート内部に沈めたため、写真-2 b）、c）、写真-3 b）、c）に示すように、粗骨材は分断面には出現せず、細骨材が出現する程度の分断面となった。

各分断面の形状を定量的に把握するために、分断面の凹凸測定を行った。図-1 に示す、振動実験用供試体では供試体の中心線の位置、静的一面せん断試験用供試体では  $40\text{mm}$  間隔で断面形状を測定し、図-2 に示す基準線上下の網掛け部分の面積を計測長で除した値を分断面の粗さを示す指標として用いた。なお、静的一

面せん断試験の各供試体の凹凸面積はL1～L5の5断面の面積を計測長で除した値の平均値を用いた。各供試体の単位計測長あたり凹凸面積を表-5に示す。割裂モデルは粗骨材が分断面に出現しているため、打継モデルと打継+モルタルモデルよりも凹凸面積が大きく、打継モデルと打継+モルタルモデルは同程度となった。また、振動実験用供試体と静的一面せん断試験用供試体の、同じ作製法での供試体は同程度の単位計測長あたりの凹凸面積となった。

ただし、目視による観察では、振動実験用供試体分断面の打継モデル3個と打継+モルタルモデルの3-A、3-Bの分断面の凹凸は同程度であり、それらよりも3-Cの凹凸は粗く、3-Dは3-Cよりも凹凸が粗い分断面となった。また、静的一面せん断試験用供試体分断面では、打継モデルと打継+モルタルモデルの分断面の凹凸は同程度で、振動実験用供試体打継モデル及び打継+モルタルモデルの3-A、3-Bと同程度の凹凸度合いの分断面であった。

図-3に振動実験用供試体の単位分断面当りの割裂時載荷荷重を示す。分断面が粗い割裂モデルでは、他のモデルより割裂時載荷荷重は大きくなっていることから、分断面の粗ければ割裂時載荷荷重が大きくなる関係にあることがわかる。割裂時載荷荷重は、3-Aと3-Bは同程度で、3-Cはそれより大きく、3-Dはさらに大きい値となった。これは、目視の観察による粗さの評価と一致する。

表-3 敷きモルタルの配合

水・結合材比 (%)	セメント (g)	水 (g)	細骨材 (g)
60.0	500	300	1381

表-4 供試体数量

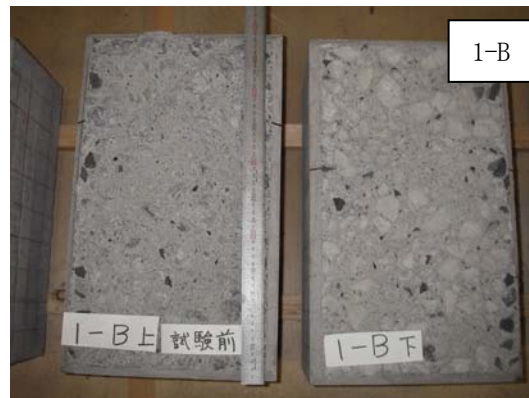
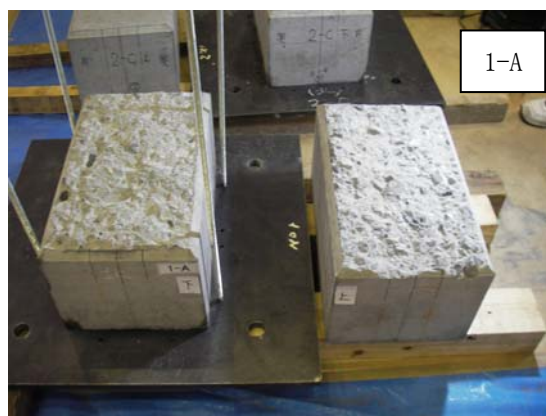
モデル	振動実験		静的一面せん断試験数量 (個)
	数量 (個)	呼称	
割裂	2	1-A, 1-B	4
打継	3	2-A, 2-B, 2-C	4
打継+モルタル	4	3-A, 3-B, 3-C, 3-D	4



a) 振動実験用供試体

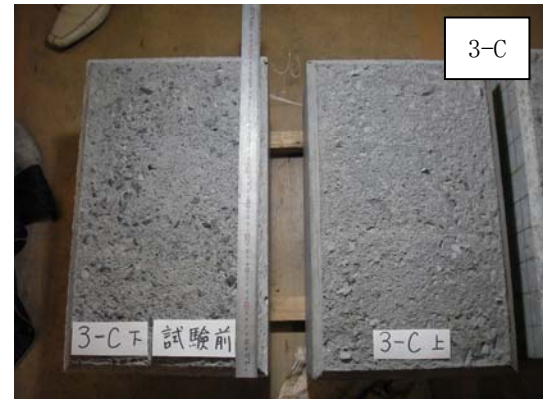
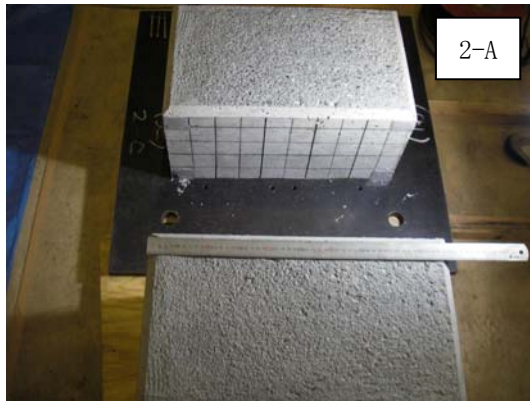


b) 静的一面せん断試験用供試体  
写真-1 供試体割裂分断面状況

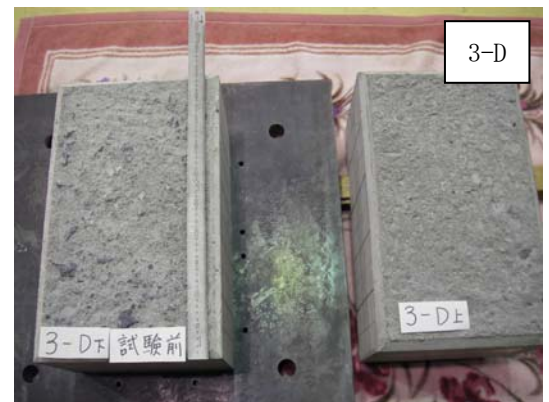


a) 割裂モデル

写真-2 (1) 振動振動実験供試体写真



b) 打継モデル



c) 打継+モルタルモデル

写真-2 (2) 振動振動実験供試体写真



a) 割裂モデル b) 打継モデル c) 打継+モルタルモデル

写真-3 一面せん断試験供試体写真

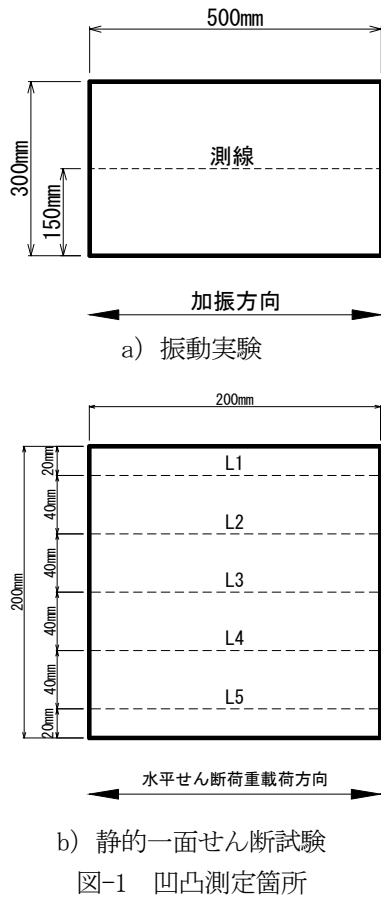


表-5 供試体分断面の単位計測長あたりの凹凸面積

目的	分断面	供試体	単位計測長あたりの凹凸面積 (mm <sup>2</sup> /mm)	平均 (mm <sup>2</sup> /mm)
振動実験	割裂	1-A	8.75	6.89
		1-B	5.03	
	打継	2-A	3.03	2.51
		2-B	3.01	
		2-C	1.50	
	打継 + モルタル	3-A	3.18	2.41
		3-B	2.35	
3-C		1.74		
3-D		2.37		
静的一面せん断試験	割裂	1-1	5.79	5.48
		1-2	5.18	
		1-3	4.06	
		1-4	6.91	
	打継	2-1	3.33	2.35
		2-2	2.15	
		2-3	1.95	
		2-4	1.99	
	打継 + モルタル	3-1	1.59	2.37
		3-2	1.79	
		3-3	4.02	
		3-4	2.10	

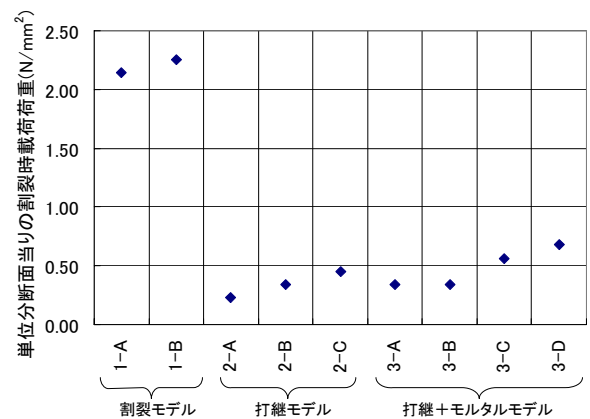
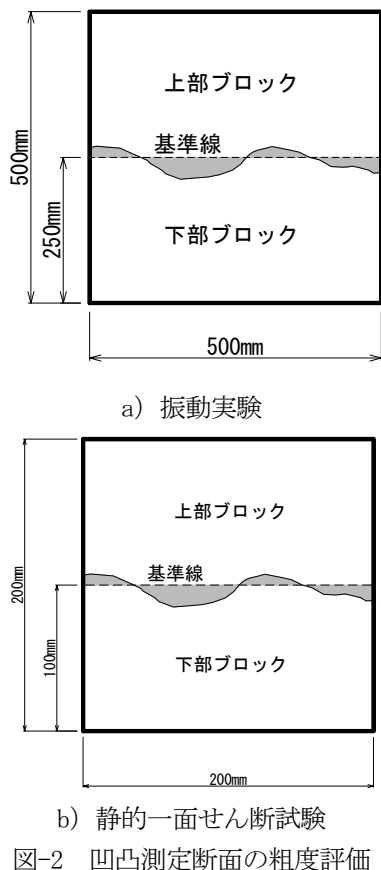


図-3 各供試体単位分断面当りの割裂時載荷荷重

### 2.3 静的一面せん断試験

試験供試体分断面の摩擦抵抗の違いをみるため静的一面せん断試験を行った。静的一面せん断試験の概要を図-4に示す。試験ケース一覧を表-6に示す。垂直圧縮荷重  $P_v$  は、試験機の性能の下限値である荷重を載荷させた場合の垂直圧縮応力  $0.5\text{N/mm}^2$  と、後述する4章でのダムモデルの上部分断ブロック程度の荷重が分断面に作用した場合の垂直圧縮応力として  $1.0\text{N/mm}^2$  とした。試験は水平せん断荷重が降伏点（ピーク値）を越え、残留強度状態になるまで水平せん断荷重  $P_H$  を載

荷させた。

図-5、表-7 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  $68.9^\circ$ 、打継モデルのせん断摩擦角は  $54.4^\circ$ 、打継+モルタルモデルのせん断摩擦角は  $67.0^\circ$  となった。割裂モデルと打継+モルタルモデルのせん断摩擦角には大きな差が見られず、打継モデルのせん断摩擦角は、他のモデルに比べてせん断摩擦角が小さくなり、純せん断強度は他のモデルに比べて大きな値となった。

表-7 一面せん断試験結果一覧

分断面性状	粗骨材最大寸法 (mm)	目標圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単位計測長あたりの凹凸面積 (mm <sup>2</sup> /mm)	純せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断摩擦角 (°)
割裂	40	20	5.48	0.26	68.9
打継			2.35	1.15	54.4
打継+モルタル			2.37	0.34	67.0

## 2.4 振動実験

### 2.4.1 実験方法と条件

振動実験は、図-6 に示す概要図のように、2.2 で作製方法を記述した、あらかじめ分断させたコンクリートブロックを分断面の凹凸が重なるように設置し、振動台で正弦波を入力して加速度振幅を徐々に増加させるステップ加振方式により振動加振することにより、供試体の上部ブロックの変位を生じさせた。実際のコンクリートダムでは堤体上流面の貯水による水圧が作用していることから、供試体の上部ブロックには、上部ブロックの重心の高さに水平荷重が作用するように、滑車とワイヤーを介しておもりを載荷した。供試体とワイヤーは、上部ブロックの挙動を妨げないように、鉛直方向には自由になるように接続した。おもりの振動台までのクリアランスは 60mm~80mm 程度であり、上部ブロックの水平変位はそこまでしか計測していない。

加振には独立行政法人土木研究所所有の 3 次元大型振動台(テーブル寸法 8m×8m)を使用した。供試体は、下部ブロックに埋め込んだボルト穴により、振動台と剛結させ、振動台と下部ブロックが一体となって挙動するようにした。

計測器配置は図-6 に合わせて示した。加速度については、入力加速度(水平鉛直二方向)、下部ブロック応答加速度(水平鉛直二方向)、上部ブロック応答加速度(水平鉛直二方向)を計測した。また、上部ブロックの下部ブロックに対する相対的な変位を測定するために、上部ブロックの水平変位と下部ブロックの水平変位をワイヤー式変位計で計測した。供試体は奥行があるため、Z 軸方向 40mm の位置に設置した DH03 と DH01 の相対変位と、Z 軸方向 260mm の位置に設置した DH04 と DH02 の相対変位を計測した。上部ブロックと下部ブロックの開口変位計測には、分断面の X 軸方向 50mm (表面と裏面の 2 箇所) と 450mm の位置に設置したレーザー変位計を使用した。また、水平荷重を荷重計で計測した。加振中は、分離ブロックの挙動を高速度カメラ(200 コマ/s) で撮影した。

実験模型の設置状況の写真を写真-4 に示す。

入力振動加振は正弦波を使用し、振動数は 5Hz で継

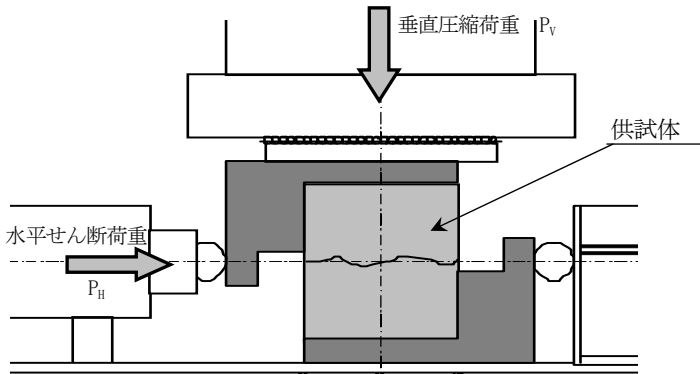


図-4 一面せん断試験の概要

表-6 試験ケース一覧

分断面性状	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	垂直圧縮応力 (N/mm <sup>2</sup> )	数量 (個)
割裂	40	20	1.0	2
			0.5	2
打継			1.0	2
			0.5	2
打継+モルタル			1.0	2
			0.5	2

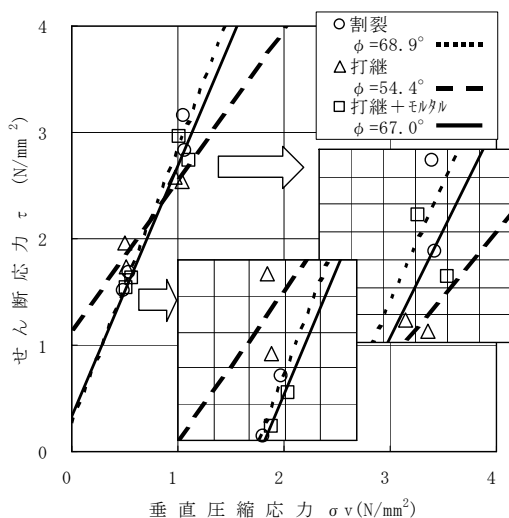


図-5 一面せん断試験結果

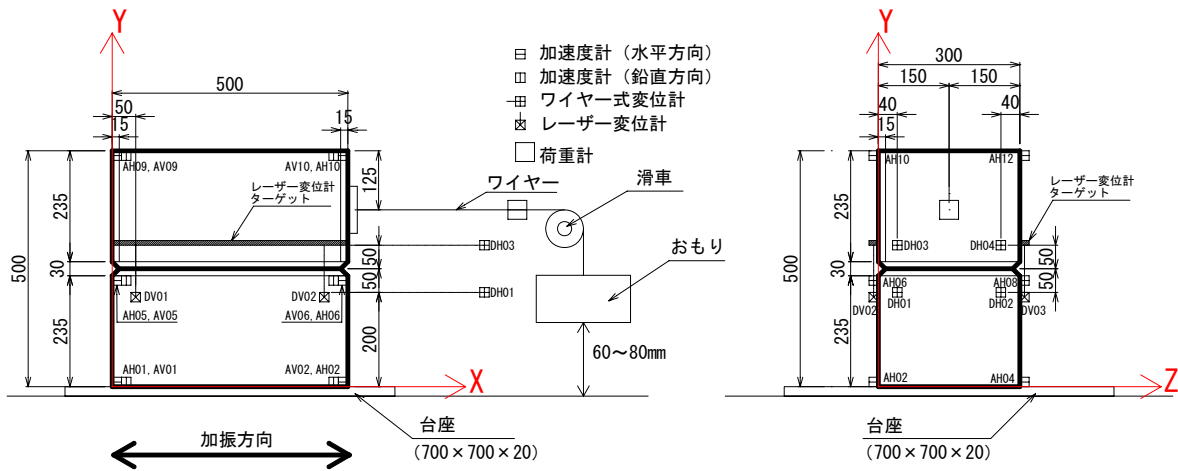


図-6 振動実験概要図 (単位: mm)

続時間はピーク値 20 秒と前後のテーパ-5 秒を含む合計 30 秒である。入力振動数として設定した 5Hz は、数種の振動数の事前加振実験で開口変位が顕著に見られた振動数である。加振はステップ加振とし、ステップ毎に入力波の振幅を増加させていった。ステップ加振は上部ブロックの滑動が生じ、変位が 60~80mm 程度に達するまで続けた。入力の方向は水平一方向で制御したが、使用した振動台は 3 次元振動台であるため水平入力加速度の 5~10% 程度の鉛直加速度が計測された。図-7 に実験に使用した入力水平加速度の例を示す。なお、入力水平加速度は下部ブロック底面の 4 箇所 (AH01~AH04) で測定しているが、4 箇所の加速度記録はほぼ等しい波形が得られていることから、4 箇所の平均値を使用した。

表-8 に実験ケースの一覧を示す。実験では、60~80mm 程度しか滑動の可動変位が確保できなかったため、一度 60~80mm 程度滑動した後、上部ブロックを元の位置に再設置して、再度加速度を徐々に増加させた正弦波を入力した。表中では 1 回目の滑動が発生した加振ステップを①、上部ブロックを元の位置に設置して再度加振を行い滑動が発生した加振ステップを②とした。

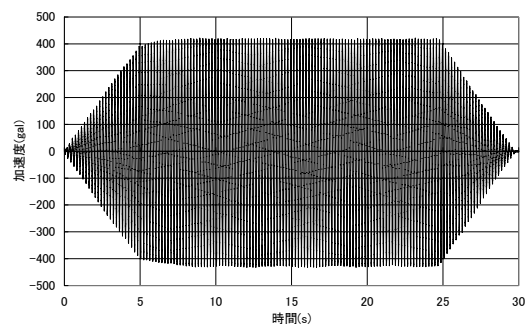


図-7 入力加速度時刻歴の一例 (実測値)

表-8 実験ケース一覧

断面	供試体名称	滑動ステップ ※1)	水平荷重用おもり質量 (kg)	備考
割裂	1-A	①	80	元位置から 20mm <sup>※2)</sup> 程度ずらして設置
		②		
	1-B	①	80	元位置から 60mm <sup>※2)</sup> 程度ずらして設置
		②		
打継	2-A	①	60	滑動後再設置
		②		
	2-B	①	80	滑動後再設置
		②		
	2-C	①	80	滑動後再設置
		②		
打継 + モルタル	3-A	①	80	滑動後再設置
		②		
	3-B	①	60	滑動後再設置
		②		
	3-C	①	80	滑動後再設置
		②		
	3-D	①	80	滑動後再設置
		②		

※1) ①: 最初 (1 回目) の滑動 ②: 再設置後 (2 回目) の滑動

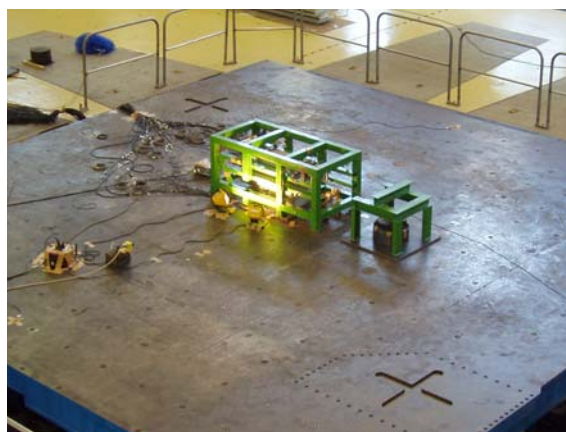
※2) 上部ブロック断面の凹凸の山と下部ブロック断面の凹凸の山が接するように設置



a) 供試体設置状況



b) 落下防止フレーム及び水平荷重用おもり設置状況



c) 振動実験全景

写真-4 振動実験及び模型の設置状況

がら滑動している (写真-5 c))。そこで、ステップ加振ごとの入力水平加速度と発生した開口変位及び水平変位の関係を整理した。ここでは、大きな滑動が発生したステップで比較の入力波形が安定していた 3-A①と 3-B① (打継+モルタルモデル) を例に、整理した図を図-8、図-9 に示す。ここで、入力水平加速度とは、下部ブロックの底面の位置に設置した加速度計で計測した値である。開口変位は加振中に計測された最大値であり、値がプラスを示せば開口を示している。また、水平変位は、上部ブロックと下部ブロックの相対変位で、値がプラスを示せば、上部ブロックが下部ブロックに対して右側 (水平荷重の作用方向) に滑動が発生したことを示す。入力水平加速度の増加に伴い、開口変位は増加しており、上部ブロックは下部ブロックに対して右側に少しずつ変位している。3-A①は、加速度振幅 800gal、3-B①は加速度振幅 1,200gal の加振ステップで、上部ブロックは大きく滑動した。

図-10 に滑動したステップの入力水平加速度と水平滑動変位の時刻歴の例を示す。実験では、ピーク値が 20 秒間継続する正弦波を入力したが、図-10 b) に示すステップのように、振動台の制御が不安定となり、入力波形が乱れて非常に大きな加速度が入力されて上部ブロックが滑動したステップもあった。

各供試体の滑動時の加速度を図-11 に示す。入力波形が乱れて非常に大きな加速度 (3,000gal 以上) が入力されて滑動が発生した 2-A①と 3-C①も合わせて示している。割裂モデルは、入力加速度振幅 1,500gal 程度まで加振を行ったが、大きな滑動は発生しなかった。これは、分断面が大きな凹凸を有していたためである。打継モデルと打継+モルタルモデルでは、滑動時加速度には明瞭な差がみられなかった。これは、打継+モルタルモデルの上部ブロックの分断面付近は富配合のコンクリートとなっているが、打継モデルの分断面の凹凸に大きな差が無かったためと考えられる。

## 2.4.2 実験結果

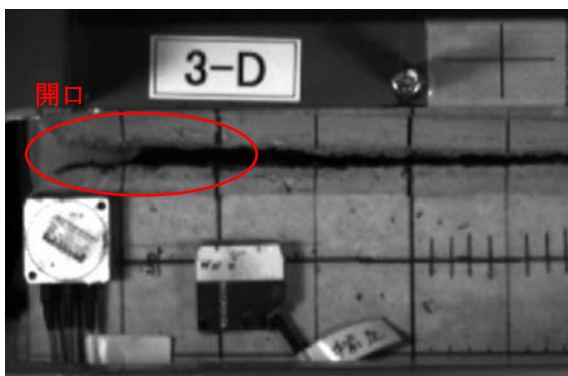
### 1) 実験結果概要

実験は、大きな滑動が発生するまで徐々に加速度を増加させてステップ加振を行った。加振中の上部ブロックは高速度カメラ (200 コマ/s) で撮影した写真-5 (開口が顕著にみられた 3-D①) に示すように、水平変位が無い状態で開口し (写真-5 b))、開口を生じな

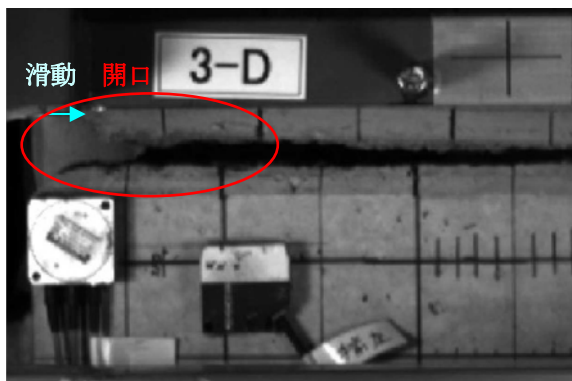




a) 実験開始時 (0.00 秒)



b) 水平変位なしで開口 (16.11 秒)



c) 開口しながら滑動 (21.12 秒)



d) 実験 (滑動) 終了時 (28.05 秒)  
写真-5 加振中の開口状況 (3-D①)

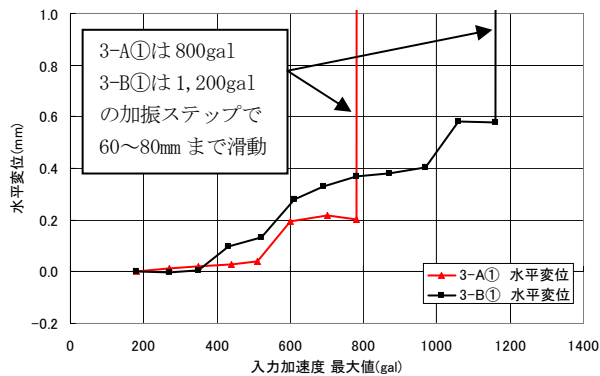


図-8 入力加速度と滑動水平変位の関係

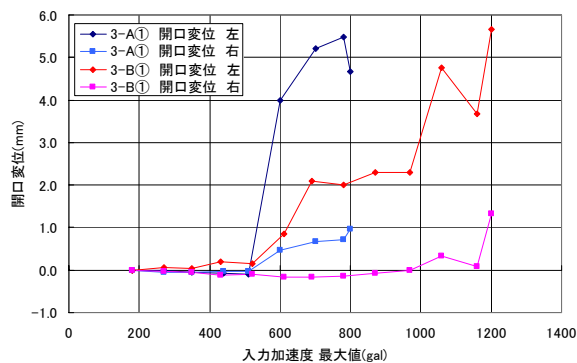
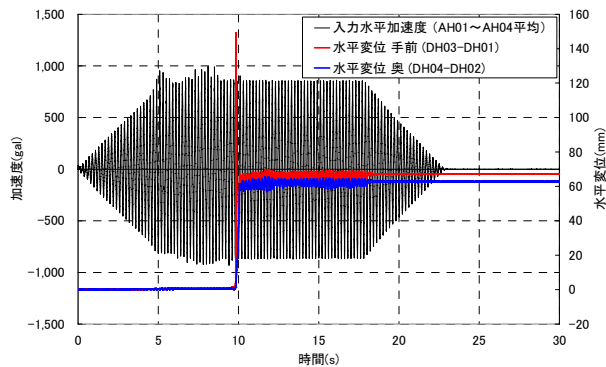
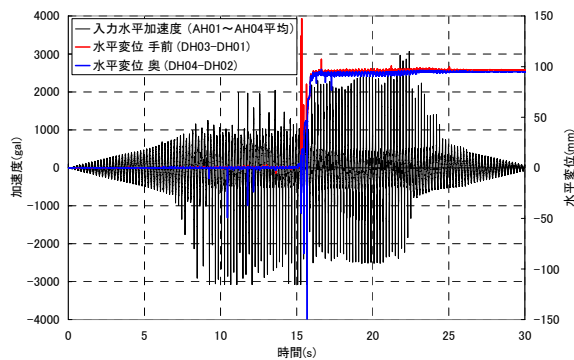


図-9 入力加速度と開口変位の関係



a) 3-A①



b) 2-A① (入力波が乱れた実験)

図-10 水平入力加速度と上部ブロック水平変位

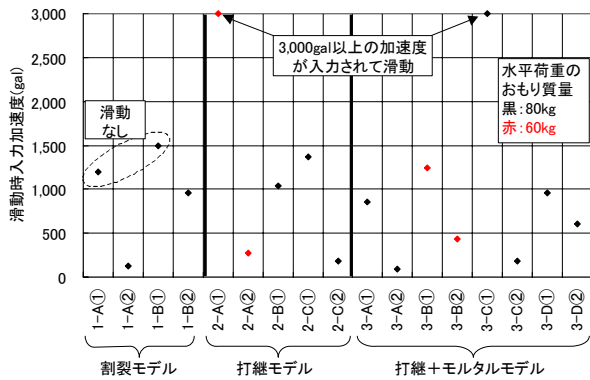


図-11 各供試体滑動時加速度

## 2) 滑動時の挙動

振動実験の分断ブロックの滑動時の挙動から、滑動が発生したときに発生している現象を計測データから考察した。以降は、水平入力波形に図-10 b) のような乱れがなかった 3-A①、3-A②、3-B① (打継+モルタルモデル) で考察した。それぞれの入力水平加速度と上部ブロックの水平滑動変位の時刻歴を図-12 に示す。

## a) 水平荷重の有無による上部ブロックの挙動の違い

滑動が発生するまでは上部ブロックに水平荷重が作用している。上部ブロックの変位が 60~80mm となると、水平荷重用のおもりが振動台に落下して、上部ブロックに作用する水平荷重はほぼゼロとなる。上部ブロックに水平荷重が作用している場合の上部ブロックの挙動と、作用していない場合の上部ブロックの挙動を考察する。

図-13 に上部ブロックの水平滑動変位と供試体左右の開口変位の時刻歴を示す。また、滑動が発生した時間に着目して拡大した図を図-14 に示す。なお、開口変位に関しては、水平変位 60~80mm に達した後の値は、レーザー変位計のターゲットが外れたため、値としての評価はできない。

供試体右側の開口変位と左側の開口変位を比較すると、左側の開口変位が大きく発生している。これは、上部ブロックに設置した水平荷重用のおもりは鉛直方向に自由に可動する状態とはいえ、供試体上部ブロックの右側に載荷しているために、左側が開口しやすく、右側が開口しにくくなっているためである。

大きな滑動が発生する前の水平荷重が作用している状態 (3-A①では 9.8 秒まで、3-B①では 22.5 秒まで) では、左右の開口変位の位相は同位相となっており、ロッキングは発生していないことがわかる。これは、供試体分断面の凹凸を上部ブロック全体が乗り越えよ

うとする挙動である。

一方、滑動が終了し水平荷重が作用していない状態では、右側と左側の開口変位は逆位相となり、上部ブロックがロッキングしていることがわかる。

実際のコンクリートダムでは、分断後に滑動変位が生じた後も貯水による水平荷重は常時作用するため、上部ブロックの挙動の傾向としては、振動実験の滑動が開始する前の挙動に近いと考えられる。

## b) 最初 (1 回目) の滑動と再設置後 (2 回目) の滑動の挙動の違い

実際のダムでは分断面はある程度長さを有しているが、実験では徐々に入力加速度を上げたステップ加振をして 60~80mm 程度の滑動を発生させた後、上部ブロックを元の位置に設置して再度加速度を上げて滑動させている。実際のダムの上部ブロックが 1 度変位して、さらに変位を生じることを、実験での 1 回目の滑動と 2 回目の滑動として扱う。

図-15 に 3-A の 1 回目滑動時 (3-A①) の開口変位と 2 回目滑動時 (3-A②) の開口変位を示す。1 回目の滑動前では、大きく開口しているが、2 回目の滑動前では、開口変位はほとんど発生せずに滑動に至っている。これは、1 回目の滑動により分断面の凹凸が削られたことや、再設置時に 1 回目の滑動によるコンクリート破砕片が分断面にあったことで、分断面の抵抗が低下したため開口変位に差が生じたと考えられる。

実際のコンクリートダムにおいても、せん断により凹凸が減少することが想定されるため、ダムの分断ブロックは相対変位が生じた後は、相対変位が生じる前までより開口が小さくなると予想される。

## 3) 各供試体の滑動時加速度の比較

上部ブロックが滑動した加速度について、各供試体での条件ごとに整理する。

図-16 に、1 回目の滑動時と 2 回目の滑動時の入力水平加速度に着目した図を示す。

割裂モデルでは、入力加速度振幅 1,200gal を超える程度まで加振を行ったが滑動が発生しなかったため、上部ブロックを元位置からずらして設置して、加振を行う実験を行った。1-A①では、入力加速度振幅 1,200gal まで滑動が発生しなかったが、上部ブロックを 20mm 程度ずらして設置した後の加振 1-A②では滑動を開始した入力加速度振幅は 100gal 程度に低下し、1-B①では、入力加速度振幅 1,500gal が、60mm 程度ずらして設置した 1-B②では 1,000gal 程度まで低下した。分断面の噛み合わせがずれると、小さな加速度レベルの入力でも、滑動が発生する可能性があることがわか

った。

打継モデルと打継+モルタルモデルの実験では、滑動がある程度進行したら、再度上部ブロックを元の位置に戻して再加振して滑動させた。その滑動時の加速度は、1回目の滑動よりも2回目の滑動のほうが小さい。これは、1回目の滑動により、分断面の凹凸が削れたことや、再設置時に1回目の滑動によるコンクリート破砕片が分断面にあったことで、分断面の抵抗が低下したためと考えられる。

図-17 に示すように、水平荷重に着目すると、2-A②（水平荷重用おもり質量 60kg）と 2-C②（水平荷重用おもり質量 80kg）や、3-A①②（水平荷重用おもり質量 80kg）と 3-B①②（水平荷重用おもり質量 60kg）のように、水平荷重が大きいと、滑動時の入力加速度は小さくなっている。

また、図-18 に示すように、同様の分断面作製方法であっても、3-A①と 3-D①、3-A②と 3-C②と 3-D②のように（観察による凹凸の度合い：3-A<3-C<3-D）、分断面の粗さが粗ければ滑動時入力加速度は大きくなっている。

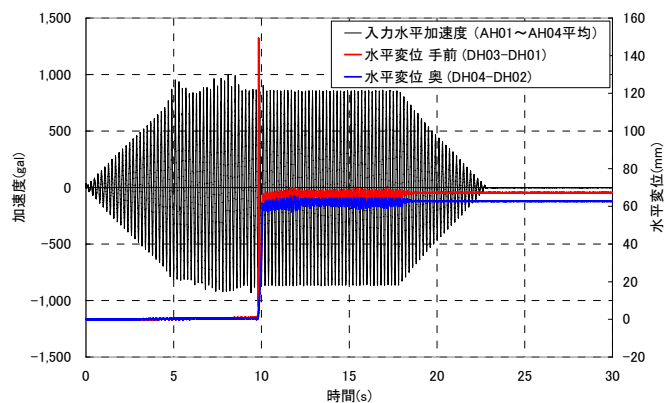
#### 2.4.3 上部ブロックの滑動挙動

振動実験を行った結果、上部ブロックの滑動現象をまとめると以下の通りである。

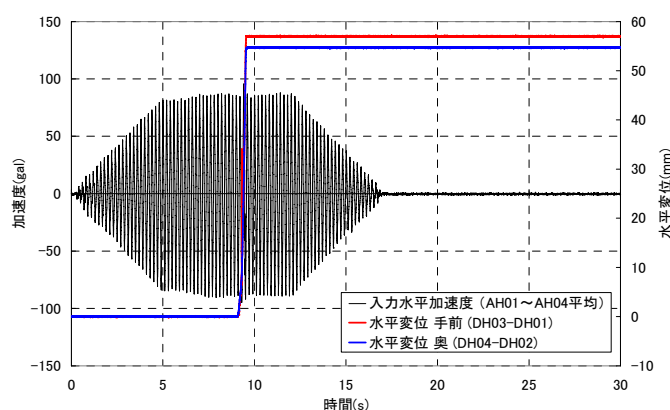
水平動が入力されてブロックが加振されると、上部ブロックと下部ブロックは分断面の凹凸が噛み合っただけの挙動を示す。水平動の入力レベルが大きくなると分断面で開口が発生する。ただし、この開口は常時水平荷重が上部ブロックに作用する場合、ロッキングではなく分断面の凹凸に上部ブロックが乗り上げるような挙動を示す。また、開口変位は水平荷重を作用させているため、左右端（ダムで言えば上下流端）で大きさが異なる。さらに入力加速度のレベルが増加すると、左側が大きく開き、右側の端部でのみ上部ブロックと下部ブロックが接している状態となり、右側端部の分断面の凹凸を削りながら乗り越えて変位が生じる。

また、その変位が生じる入力加速度のレベルは、分断面の性状に寄与している。

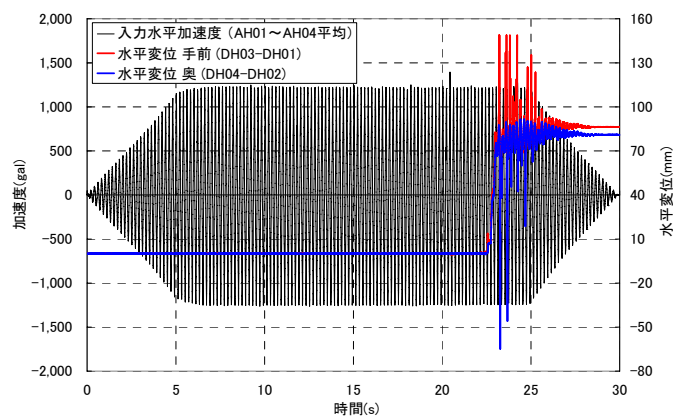
今回の模型振動実験では、実際のダムのような上載荷重が設定できなかったこと、水平荷重としておもり荷重を載荷したが、おもり自体の振動荷重の影響もあったこと、分断面に浸水した貯水による揚圧力の考慮をしていないことなど、今後の検討事項もある。



a) 3-A①（入力水平加速度 800gal）

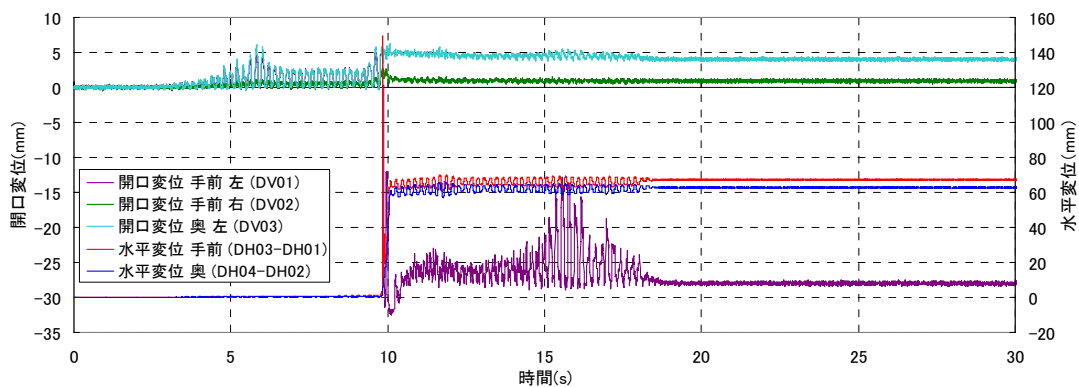


b) 3-A②（入力水平加速度 80gal）

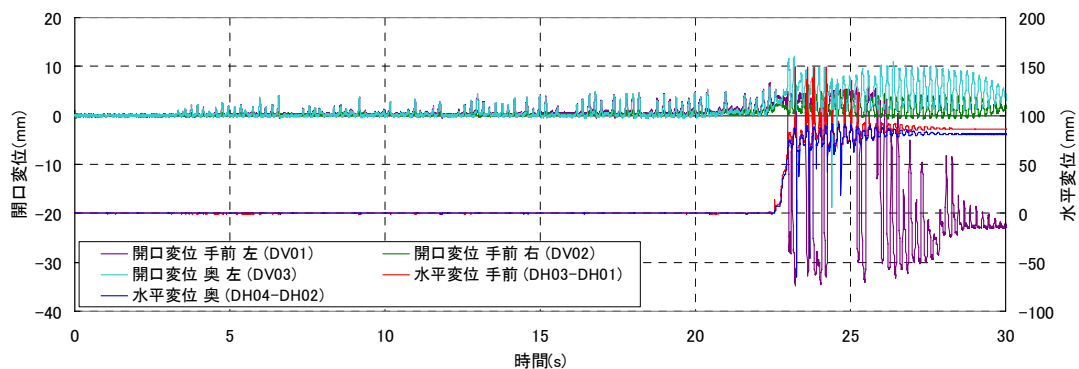


c) 3-B①（入力水平加速度 1,200gal）

図-12 入力水平加速度と上部ブロック水平変位

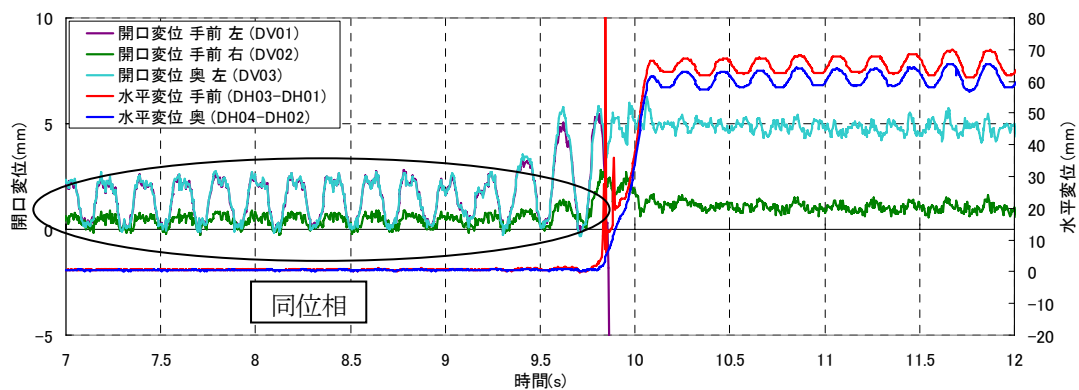


a) 3-A① (入力水平加速度 800gal)

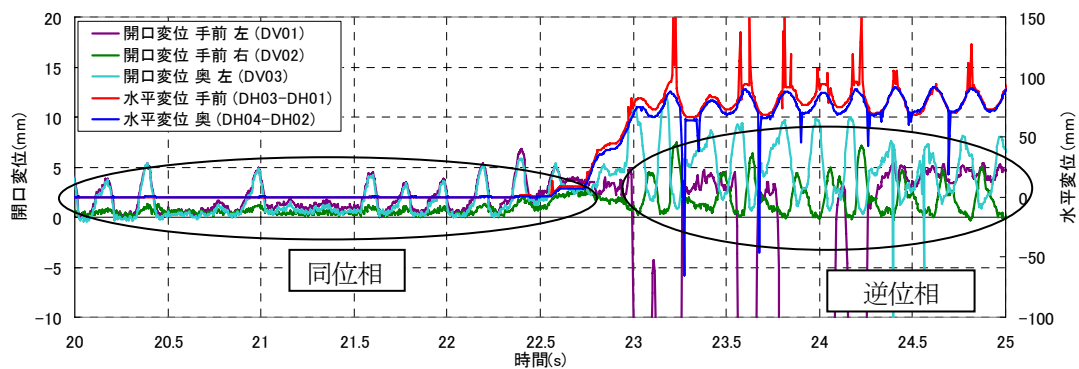


b) 3-B① (入力水平加速度 1,200gal)

図-13 上部ブロック水平変位と開口変位 (1)

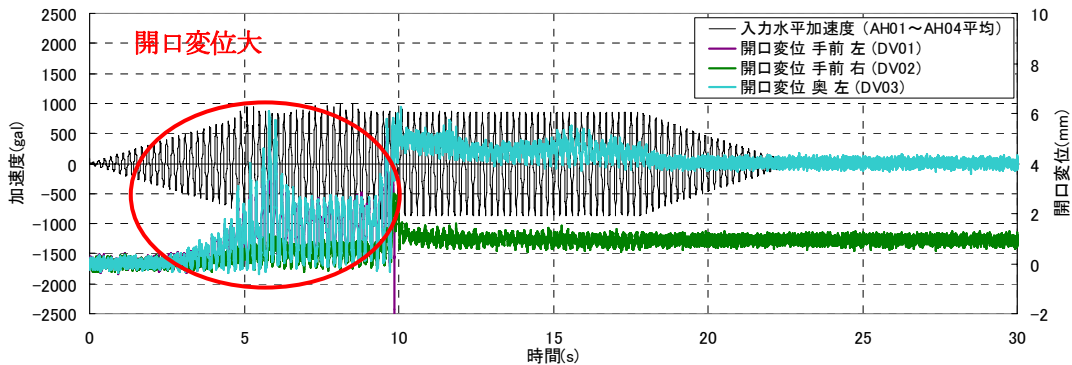


a) 3-A① (入力水平加速度 800gal)

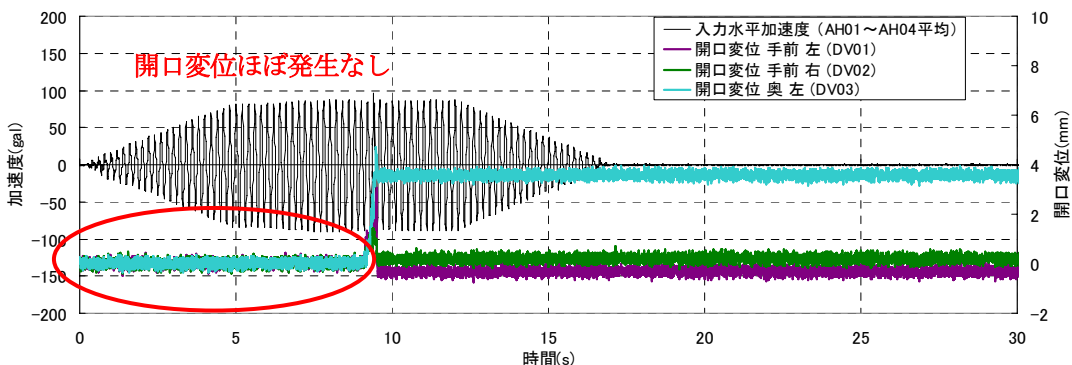


b) 3-B① (入力水平加速度 1,200gal)

図-14 上部ブロック水平変位と開口変位 (2) (図 2.4.8 を拡大)



a) 3-A① (入力水平加速度 800gal)



b) 3-A② (入力水平加速度 100gal)

図-15 入力加速度と開口変位

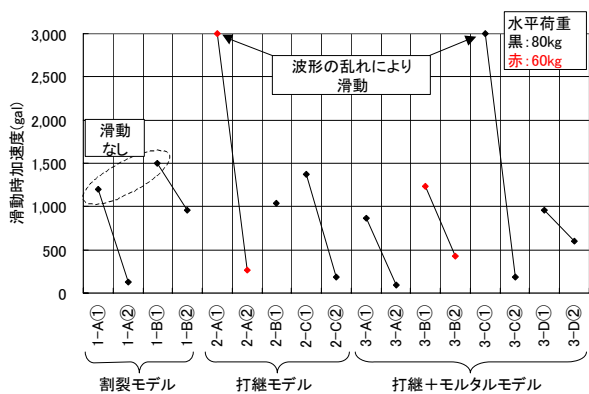


図-16 各供試体滑動時加速度  
(1回目の滑動と2回目の滑動の比較)

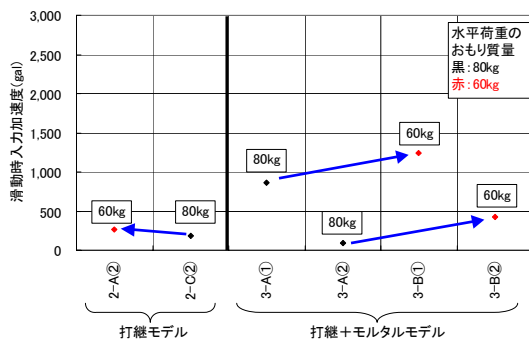


図-17 各供試体滑動時加速度 (おもり質量の違い)

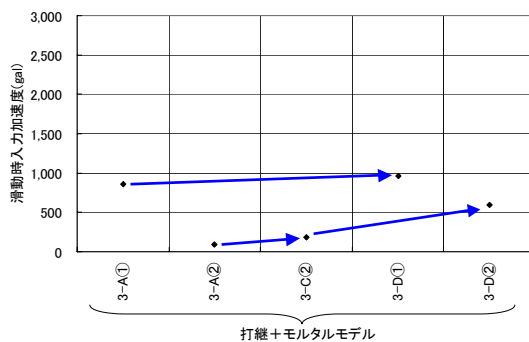


図-18 各供試体滑動時加速度 (分断面粗さに着目)

### 3. 個別要素法による振動実験再現解析

2章では、引張亀裂が貫通し分断したダム堤体の地震時の安定性を検討するため、コンクリートダムの亀裂が入った部位を抽出した要素を想定して振動実験を行った。分断したコンクリートダムの挙動をシミュレートする解析手法を提案することを目的として、振動実験による上部ブロックの挙動再現解析を実施した。本年度は、滑動時の挙動が比較的複雑でないと想定できる2回目の滑動の振動実験ケースについて、再現解析を試みた。

#### 3.1 解析方法

##### 1) 解析方法

再現解析は個別要素解析 (UDEC (ITASCA 社)<sup>2)</sup>) により行った。解析モデルを図-19 に示す。解析では実験のような分断面の凹凸を表現することが困難なため、分断面はモデル形状として水平な面としている。

入力速度は図-6 に示した下部ブロック下端に設置した4箇所の加速度計の記録がほぼ同程度であることから平均値として速度記録に変換して実測の水平速度とした。ここで、速度記録に変換したのは、UDEC では入力地震動を速度記録で与えるためである。なお、入力は、解析モデル底面の全節点に同一の水平速度時刻歴を入力した。

また、実験ではダム上流側に作用する貯水の水压荷重の代用として、供試体上部ブロックの重心の高さに水平荷重 (おもり) を作用させ、上部ブロックにおもりをつなぐワイヤーに荷重計を設置して、その荷重の時刻歴を測定した。解析においても、実験で計測された水平荷重の時刻歴を入力した。

本解析における解析物性値を表-9 に示す。弾性係数は振動実験供試体作製時に行った一軸圧縮試験結果 (表-2) の、最も実験実施の材齢に近い35日の値を使用した。

また、動的解析に用いる減衰は、周波数領域に依存しない UDEC の以下の式で定義されるグローバル減衰 (Adaptive Global Damping)<sup>2)</sup> を用いた。

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

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。

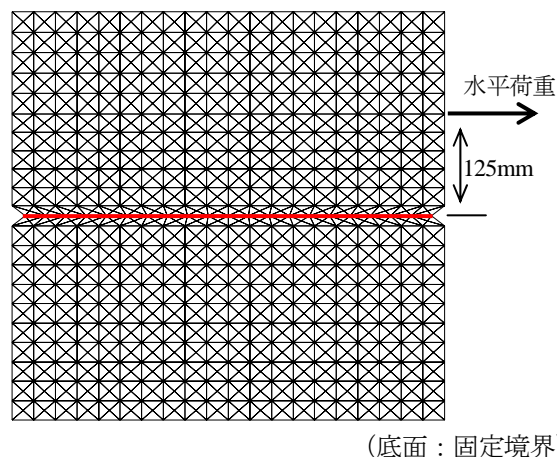


図-19 解析メッシュ図

表-9 解析物性値

項目	記号	ブロック 材料物性値
単位容積質量	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,300
弾性係数	E (N/mm <sup>2</sup> )	22,000
ポアソン比	$\nu$	0.2
グローバル減衰	R (%)	10
分断面 垂直方向ばね定数	$K_n$	22,000 (弾性係数相当)
分断面 せん断方向ばね定数	$K_s$	9,167 (せん断弾性係数相当)
分断面せん断摩擦角	$\phi$ (°)	パラメータ
分断面純せん断強度	(N/mm <sup>2</sup> )	パラメータ

注：せん断弾性係数 =  $E/2(1+\nu)$

##### 2) 再現解析に使用した実験ケースの選定

振動実験の再現解析で、再現の対象とする物理現象として、以下の項目が挙げられる。

- ・ 上部ブロック及び下部ブロックの応答加速度
- ・ 上部ブロックの振動特性
- ・ 上部ブロックの滑動水平変位
- ・ 開口変位

ただし、解析モデルの分断面は平坦な面として設定しており、実験供試体のような凹凸はモデル化していない。このことから、実験と解析において応答レベル及び変位量の厳密で定量的な再現は難しいと考えられるため、定性的に、入力加振レベルに応じて大きな滑動が発生するかを対象に各種パラメータを設定して解析を行うこととした。解析でパラメータとした物性値は、表-9 に示した分断面のせん断摩擦角と純せん断強度である。

再現解析に使用した実験ケースは、比較の入力波形が安定しており、一度大きく滑動が発生して凹凸があ

る程度削れて分断面がなめらかになって、滑動時挙動が凹凸の影響が少なく比較的複雑でない想定できる打継+モルタルモデルの3-B②のステップと、その加振ステップ以前に加振した滑動が発生しなかったステップとした。この2つの加振で、大きな滑動の発生状況を再現することとした。3-Bの実験条件を表-10に示す。その実験の水平入力加速度と上部ブロック水平変位を図-20に示す。

表-11に解析ケースを示す。せん断摩擦角と純せん断強度は打継+モルタルモデルの一面せん断試験結果(表-7:せん断摩擦角 67°、純せん断強度 0.34(N/mm<sup>2</sup>))を目安とし、せん断摩擦角は 45°、60°、70°の3ケース、純せん断強度は0.034~0.34(N/mm<sup>2</sup>)とした。1つの解析ケースで上部ブロックの滑動が発生しなかった実験ステップの再現解析(記号 i)と、滑動が発生した実験ステップの再現解析(記号 ii)を行った。

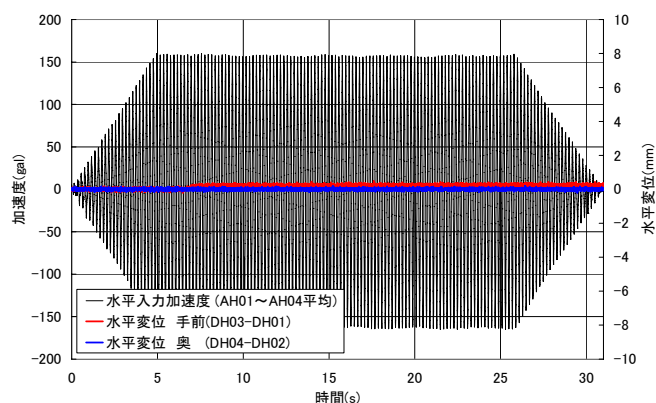
図-21、図-22に解析に入力として使用した水平速度、水平荷重の時刻歴を示す。図-21は大きな滑動が発生しなかったステップ(i)、図-22は大きな滑動が発生したステップ(ii)を示している。水平荷重については、実験では供試体の奥行が300mmであるため、単位面積あたりに換算してある。水平荷重は22秒付近で、ゼロに近づいている。これは、上部ブロックの滑動により、水平荷重用に設置したおもりが振動台に落下したためである。

表-10 再現に使用した実験ケース

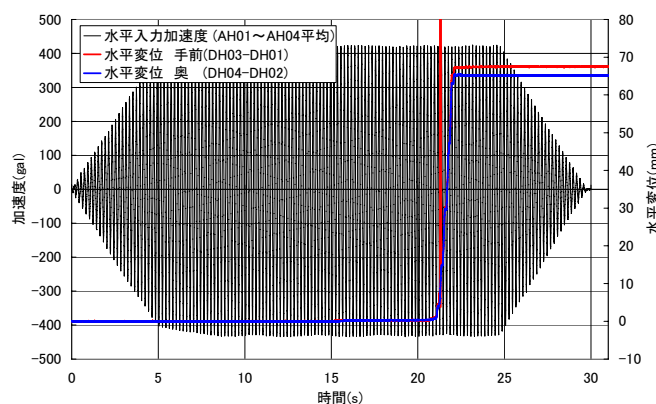
供試体	分断面	ステップ	水平入力最大加速度 (gal)	水平入力最大速度 (cm/s)	入力振動数 (Hz)	水平荷重用おもり質量 (kg)	備考
3-B	打継+モルタル	i	165.4	5.0	5	60	滑動発生なし
		ii	434.3	12.9	5	60	滑動発生あり

表-11 解析ケース

No.	せん断摩擦角 $\phi$ (°)	純せん断強度 $\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	備考
1-i	60	0.34	滑動なし
1-ii			滑動あり
2-i	60	0.26	滑動なし
2-ii			滑動あり
3-i	60	0.17	滑動なし
3-ii			滑動あり
4-i	60	0.14	滑動なし
4-ii			滑動あり
5-i	60	0.10	滑動なし
5-ii			滑動あり
6-i	60	0.034	滑動なし
6-ii			滑動あり
7-i	45	0.17	滑動なし
7-ii			滑動あり
8-i	70	0.17	滑動なし
8-ii			滑動あり



a) 3-B (i) 滑動なし (入力水平加速度 160gal)



b) 3-B (ii) 滑動あり (入力水平加速度 440gal)

図-20 入力水平加速度と上部ブロック水平変位

3.2 解析結果

図-23、図-24 に、分断面のせん断摩擦角を  $60^\circ$  で固定し、純せん断強度を変化させた解析から算出された、上部ブロックの水平変位を示す。図-23 は上部ブロックの滑動が発生しなかった実験の再現結果、図-24 は滑動が発生した実験の再現結果である。

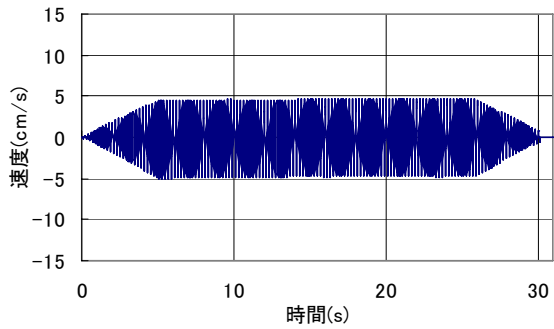
両図ともに純せん断強度が小さいケースでは水平変位が大きくなっている。図-23 では、どのケースも水平変位は小さな値となっている。図-24 では、純せん断強度が小さいと加振の早い時間段階で変位が生じている。入力波のテーパは 5 秒間であるため、5 秒までに大きく変位が現れると実験結果と整合が取れなくなる。そのため、純せん断強度の値は、入力波形のテーパ 5 秒まで大きな変位が発生せず、テーパが終了してから大きな変位を示したケース 3 の  $0.17 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  として、次にせん断摩擦角に関する検討を行った。

図-25、図-26 に、分断面の純せん断強度を  $0.17 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  に固定し、せん断摩擦角を変化させた解析から算出された、上部ブロックの水平変位を示す。図-25 は上部ブロックの滑動が発生しなかった実験の再現結果、図-26 は滑動が発生した実験の再現結果である。

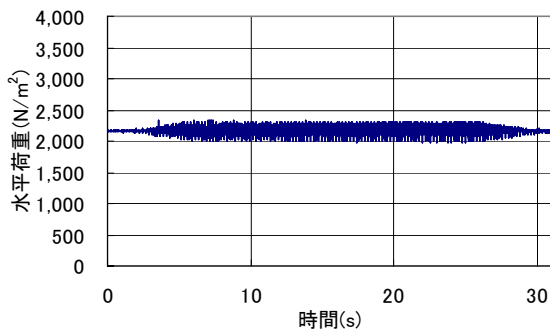
図-25 では、せん断摩擦角を  $45^\circ$  にしたケース 7 は、入力波のテーパが終わる 5 秒までに大きな変位を開始している。せん断摩擦角  $60^\circ$  と  $70^\circ$  の場合はほぼ同じ結果となっている。図-26 では、せん断摩擦角を  $45^\circ$  にしたケース 7 は図-25 と同様に、入力波のテーパが終わる 5 秒までに大きな変位を開始している。せん断摩擦角を  $70^\circ$  にしたケース 8 では、摩擦による抵抗が過剰となり、プラス方向に水平荷重を作用させているにもかかわらず、マイナス方向に上部ブロックが変位する結果となった。

以上のように、分断面の純せん断強度とせん断摩擦角は、その設定により大きく解析結果が異なった。

今回の検討では、せん断摩擦角と純せん断強度は、打継ぎモルタルモデルの静的一面せん断試験の結果を参考にパラメータとして検討した。その結果、せん断摩擦係数は静的一面せん断試験結果の 7 割程度、純せん断強度は 5 割程度で、静的一面せん断試験の結果より低い物性を設定することで再現性の良いものとなった。今後は、再設置 (2 回目) 滑動の他の実験ケースや最初の滑動 (1 回目) のケースについても個別要素法による再現解析を実施し、適切なパラメータ設定について検討していく。

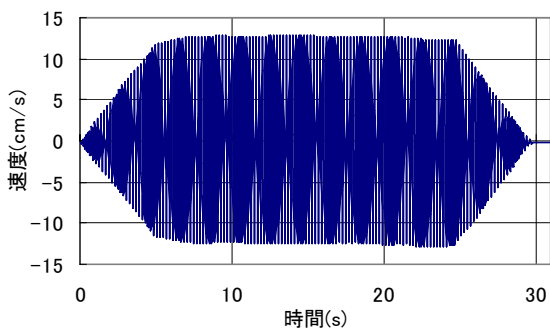


a) 水平速度

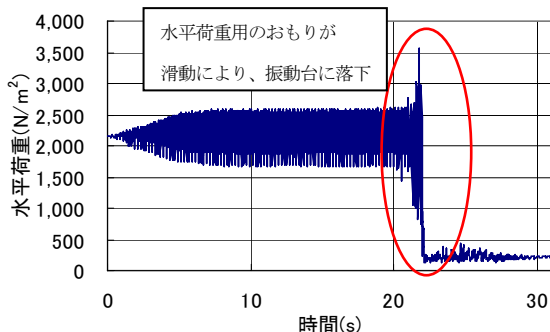


b) 水平荷重

図-21 入力波形一覧 (3-B (i) 滑動発生なし)



a) 水平速度



b) 水平荷重

図-22 入力波形一覧 (3-B (ii) 滑動発生あり)



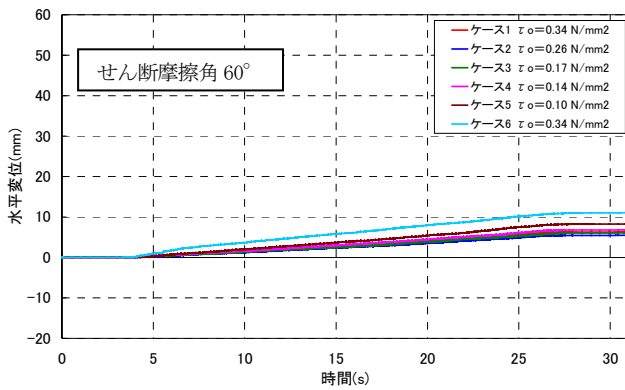


図-23 3-B (i) の上部ブロック水平変位

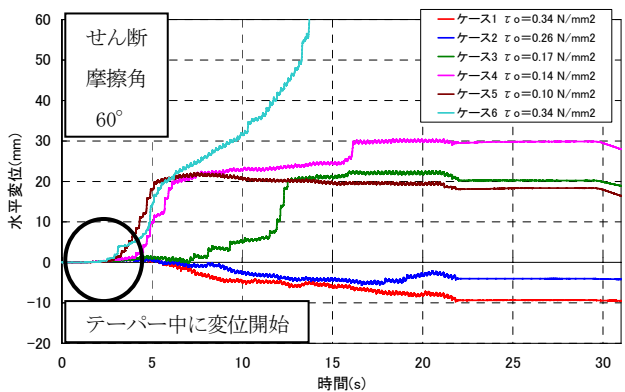


図-24 3-B (ii) の上部ブロック水平変位

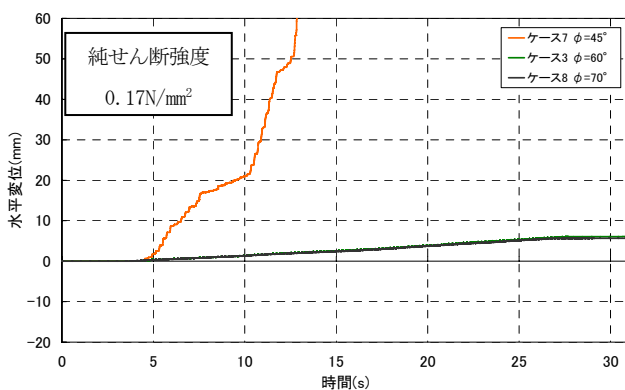


図-25 3-B (i) の上部ブロック水平変位

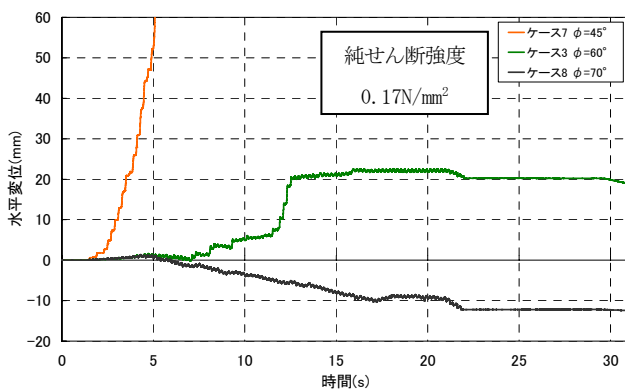


図-26 3-B (ii) の上部ブロック水平変位

#### 4. 個別要素法によるダムモデルの解析

重力式コンクリートダムモデルに対し、クラックが上下流面間に連続し、堤体が分断されたダムモデルの地震時の安定性の解析的検討を行った。ここでは、個別要素解析により分断ブロックの地震時挙動への影響因子について、特に、3章の振動実験再現解析では分断面のせん断摩擦角の影響が大きかったことも鑑み、せん断摩擦角に着目して解析を行った。

##### 4.1 解析方法

亀裂貫通による分断後の堤体の挙動を検討するために、ダムモデル形状で、ダム中位標高部の上流面の勾配変化点（フィレット部）から下流へ進展する亀裂が貫通し分断された分断ブロックを対象として検討した。なお、個別要素解析には3章と同じく UDEC (ITASCA 社)<sup>2)</sup>を使用した。

個別要素解析に用いる実ダムを想定した解析モデルを図-27に、メッシュ分割図を図-28に示す。個別要素解析に用いる物性値は表-12に示すとおりである。分断面のせん断摩擦角をパラメータとして  $30^\circ \sim 70^\circ$  で変化させ、その影響度を確認する。なお、せん断摩擦角のみの影響を確認するために、分断面の純せん断強度はゼロと仮定した。

入力地震動は2000年鳥取県西部地震で賀祥ダムの監査廊で観測された加速度時刻歴を使用する。加速度時刻歴は東西、南北方向で観測されており、それをダム軸、上下流方向に修正した加速度記録のうち、最大加速度の大きいダム軸方向の加速度時刻歴を使用した。修正したダム軸方向の加速度最大値は570galである。加速度時刻歴は図-29に示すとおりである。また、UDECでは速度時刻歴で入力を行うことから、速度時刻歴も示している。

また、本解析では貯水を設定せず、ダム上流面に作用する静水圧や動水圧、またクラックに浸透する水による揚圧力は考慮していない。

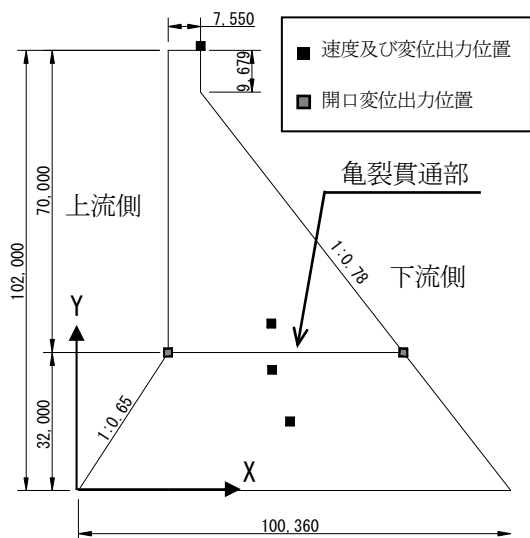


図-27 解析モデルの概要 (単位: mm)

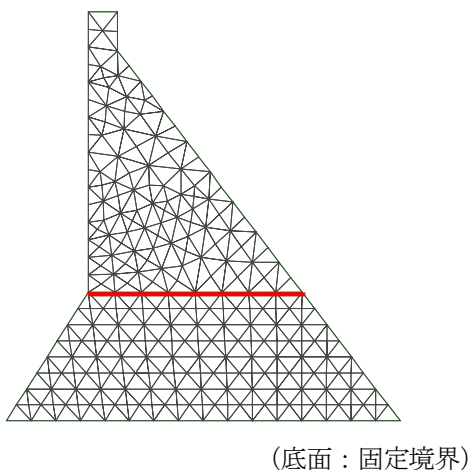
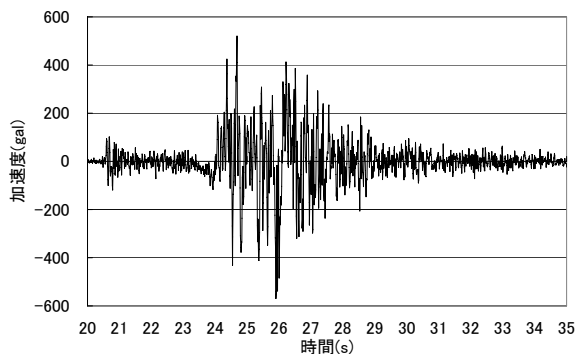


図-28 解析モデルのメッシュ分割

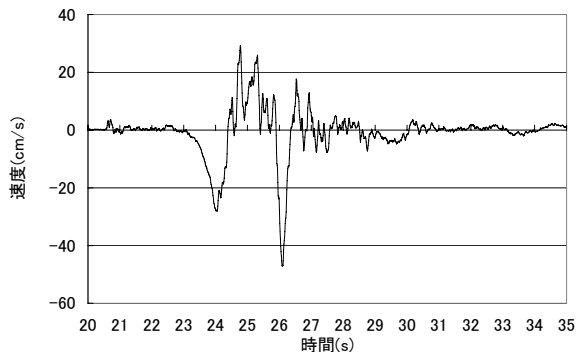
表-12 堤体の材料物性

項目	記号	堤体コンクリート材料物性値
単位容積質量	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,300
弾性係数	E (N/mm <sup>2</sup> )	29,000
ポアソン比	$\nu$	0.2
グローバル減衰	R (%)	10
垂直方向ばね定数	kn	10K
せん断方向ばね係数	ks	10K
せん断摩擦角	$\phi$ (°)	30~70
純せん断強度	(N/mm <sup>2</sup> )	0

注: K は堤体の体積弾性係数  $K=E/3(1-2\nu)$



(a) 加速度時刻歴



(b) 速度時刻歴

図-29 入力地震動

#### 4.2 解析結果

図-30 に解析モデルの天端位置での水平応答速度時刻歴を示す。どのケースもほぼ同じ挙動を示しているが、せん断摩擦角が大きいケースでは応答速度が大きくなる傾向となっている。これは、せん断摩擦角が大きいと上部ブロックが滑動等に抵抗する力が大きくなり、上部ブロックと下部ブロックが一体として挙動しようとしたためと考えられる。

図-31 に分断面の上流端と下流端の鉛直方向の開口変位時刻歴を示す。開口変位は上部ブロック分断面上流端の点と下部ブロック分断面上流端の点（解析前はこの2点は同位置）の、鉛直方向の乖離距離とした。下流端も同様である。開口変位がプラスの値になると開口し、ゼロは閉じた状態である。上流側の点よりも下流側の点で鉛直開口変位は大きくなっている。これは、解析モデルをダム形状とし、上部ブロックの重心の位置が上流側にあるため、上流側は開きにくく、下流側が開きやすくなっているためである。また、上流側と下流側の点で鉛直開口変位が逆位相となっていることから、上部ブロックはロッキング挙動を示していることがわかる。また、大きなせん断摩擦角を分断面に作用させると、上部ブロックと下部ブロックの間の分断面の抵抗が大きくなるため、鉛直開口変位が大き

くなる結果となった。

分断面に与えた各せん断摩擦角の上部ブロックの水平方向移動距離を図-32 に示す。図では、上部ブロックが下流側に移動するとプラスの値となる。せん断摩擦角  $30^\circ$  の場合は、分断面上部ブロックが下流方向へ移動し残留変位が発生している。それに対して、せん断摩擦角  $40, 50, 70^\circ$  の場合は上流方向へ移動し残留変位が生じている。25 秒後半まではそれぞれの変位挙動の傾向は似ており、26 秒付近でせん断摩擦角  $30^\circ$  のケースが大きくプラス方向（下流方向）に移動している。入力速度波形では、26 秒付近に大きなパルス的な波があり、その波が入力されたため、上部ブロックが下流方向に移動する力が作用したが、他のケースではせん断摩擦角が大きかったため、上部ブロックは下流方向にあまり変位しなかったと考えられる。そのため、入力波の振幅レベルがさらに大きくなれば、せん断摩擦角の大きなケースでも  $30^\circ$  の変位挙動に近くなると想定される。

以上のように、設定したせん断摩擦角によって残留変位に差が生じるため、ダム分断後の地震時安定性を検討する場合には、分断亀裂面のせん断摩擦角の設定検討が重要となる。今後、模型振動実験の再現解析におけるパラメータ設定等についての知見も加えながら、コンクリートダムモデルの挙動解析の精度向上を図っていく。

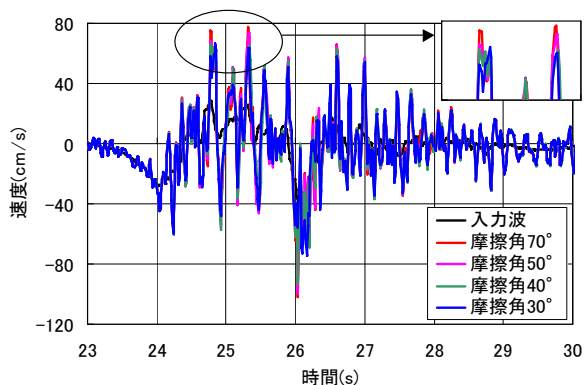
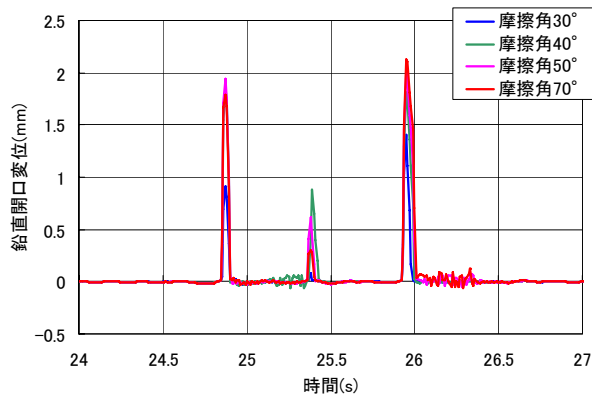
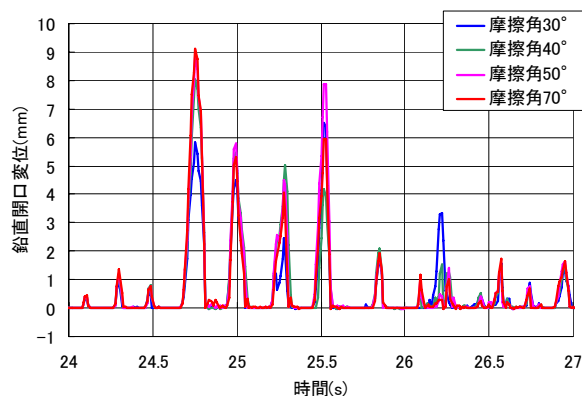


図-30 各摩擦角でのダム天端における水平応答速度



a) 上流側



b) 下流側

図-31 分断面上下流端での鉛直開口変位

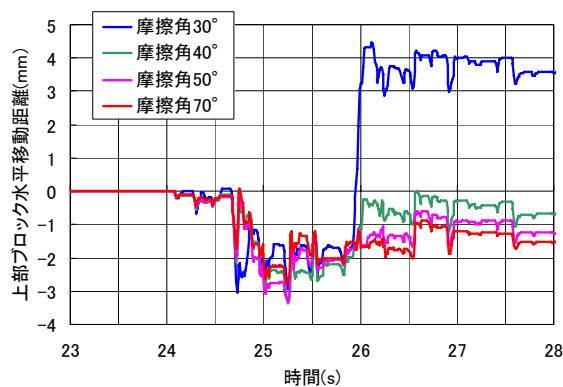


図-32 各摩擦角での上部ブロック水平移動距離

## 5. まとめ

本研究では、振動実験により、コンクリート供試体による分断ブロックの挙動の把握を試み、その再現解析を個別要素解析により実施した。また、個別要素解析による実ダムモデルの地震時挙動の検討を実施した。

振動実験では、重力式コンクリートダム堤体がクラックの進展により分断した場合の分断面付近の抽出要素を想定したコンクリート分断ブロックの模型を作製して、模型振動実験を実施し、その分断ブロックの動

的挙動を実現象として把握し、挙動の解明を試みた。その際に、供試体の作製方法により異なった分断面や、水平荷重等の条件による挙動の違いを確認した。その結果、加振時の分断ブロックの挙動については、水平動が入力されると分断面で開口が発生して、分断面端部でのみ上部ブロックと下部ブロックが接している状態となり、その端部の凹凸を削りながら乗り越えて変位が生じることがわかった。また、分断面が粗い場合、上部ブロックが変位する入力加速度レベルが大きくなり、水平荷重が小さい場合、上部ブロックが変位する入力加速度レベルが大きくなった。加えて、上部ブロックが一度変位すると、滑動により分断面の凹凸が削られたり、コンクリート破砕片が分断面に挟まったりすることで、分断面の抵抗が低下することがわかった。

分断ブロックの振動実験再現解析では、個別要素解析により、分断面のせん断摩擦角と純せん断強度をパラメータとして解析を実施した。分断面のせん断摩擦角と純せん断強度を、静的一面せん断試験の結果より得られるせん断強度を基本として設定することにより、入力加振レベルに応じた大きな滑動の発生の有無を再現した。今後さらに、種々の条件（分断面性状、水平荷重等）での再現解析で、その精度及び適切なパラメータの設定方法を検討する。

また、重力式コンクリートダムモデルで、クラックが上下流面間に連続し、堤体が分断されたダムモデルの地震時の安定性の解析的検討を、振動実験再現解析で影響が大きかったせん断摩擦角に着目してパラメトリックに解析を行い、その影響度を確認した。

今後、分断ブロックの挙動については、静水圧、動水圧、分断面に作用する揚圧力といった貯水位の影響についての検討も進めていく必要がある。あわせて、重力式コンクリートダムの分断ブロックの挙動の個別要素解析による再現の精度及び適切なパラメータの設定手法を確立させていくことが必要である。それらを通じて地震によって亀裂が貫通分断した重力式コンクリートダムの大規模地震時の終局的な安定性評価手法を検討する。

#### 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, 2005.3.
- 2) Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC Theory and Background, pp.1-26 - 1-27, 2004.

【英文要旨】

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

**Abstract** : The seismic safety of concrete dams is a major concern due to the catastrophic consequences of a sudden release of the reservoir if the dam fails under strong earthquake motions. The seismic safety of concrete dams should be periodically evaluated considering the latest assessment of their strengths and the ground motion intensity to which they might be subjected.

The purpose of this research is to establish an evaluation method of ultimate limit resistance of concrete gravity dams against large earthquakes considering dynamic rocking and sliding behaviors of concrete block separated by dynamic tensile cracking.

In this fiscal year, we conducted a shaking table tests and shear tests on concrete specimens with a tensile crack in order to make an observation of dynamic behaviors of separated concrete specimens. And we analyzed the simulation of the shaking tests using distinct element method. In addition, we performed numerical simulation of a 100-m high concrete dam using the above-mentioned input physical properties to show its seismic behavior.

**Key words** : concrete gravity dam, large earthquake, distinct element method, ultimate limit resistance, earthquake-proof performance