

3.3 コンクリートダムの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（水工構造物）

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、ダム本体の損傷過程を考慮した地震応答解析により、堤体に生じた引張亀裂が上下流面に連続するものとなる場合、ダムの貯水機能が維持されることを確認するため、堤体の上部分断ブロックの安定性の詳細な検討が必要となる。このため、本研究では、コンクリートダム堤体の亀裂分断後における終局的な耐震安定性の評価手法の開発を目的として、まず、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ために、ダム形状の分断堤体模型による振動実験を実施した。そして、振動実験結果の再現解析を個別要素解析モデルにより行い、再現方法を提案した。また、提案した解析手法を用い、亀裂貫通した実ダムモデル解析を実施することにより、堤体分断ブロックの大地震時における変位挙動を把握した。さらに、解析により得られた変位量を基に終局状態におけるダムの耐力評価指標を提案した。

キーワード：重力式コンクリートダム、レベル2地震動、耐震性能、評価手法、振動実験、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）」¹⁾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、当該ダム地点において想定される最大級の強さの地震動（レベル2地震動）に対しても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。このうち上記①に関しては、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ものとされている。同指針（案）解説において、一般に引張破壊に対する条件が最も厳しくなる重力式コンクリートダムでは、引張破壊について、上下流面間に連続する亀裂の発生によって堤体の分断が生じなければ①の条件は満足すると考えてよいとしている。しかし、引張亀裂が堤体を上下流面間に連続すると考えられる場合でも、その上部の堤体ブロック全体が不安定化しなければ、①の条件は満足できると考えられる。指針（案）解説では、このような場合には、より詳細な検討が必要としているが、その具体的な方法や判断基準は示されていない。このため、レベル2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耐震安定性の評価手法の開発が

必要となっている。

このようなことから、本研究では、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による振動実験を実施し、貯水による亀裂内揚圧力、動水圧の影響等を明らかにするとともに、個別要素モデルを用いた再現解析を実施し、数値解析による堤体分断ブロックの地震時挙動の再現方法を考案した。さらに、考案した解析手法を用い、レベル2地震動に相当する実地震波等を入力地震動として、亀裂貫通を想定した実ダムモデル解析を実施することにより、堤体分断ブロックの変位挙動を把握した。そして、これらの結果に基づき、堤体ブロックの分断を想定した地震応答解析により得られる変位量を基に終局状態におけるコンクリートダムの耐力評価方法を提案した。

2. 模型振動実験

2.1 実験概要

地震動によるコンクリートダムの分断ブロックの動的挙動を実現現象として解明するため、相似則を考慮した強度の小さい模型試験体（モルタル製、堤高515mm）を作製し、振動台を用いた模型振動実験を実施した。

振動実験には、3次元大型振動台施設（テーブル寸法：8m×8m）（写真-1）を使用した。振動台の上に

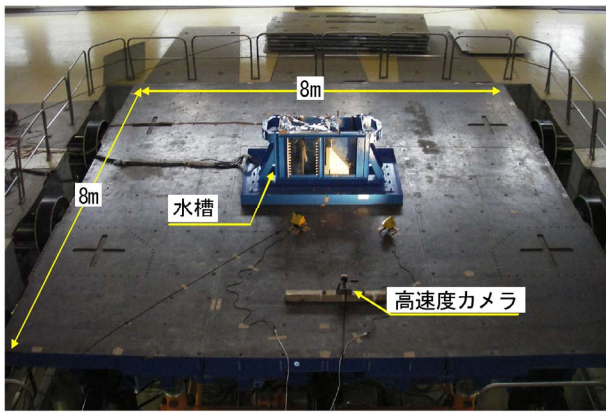


写真-1 振動実験全景



写真-2 試験体を設置した水槽

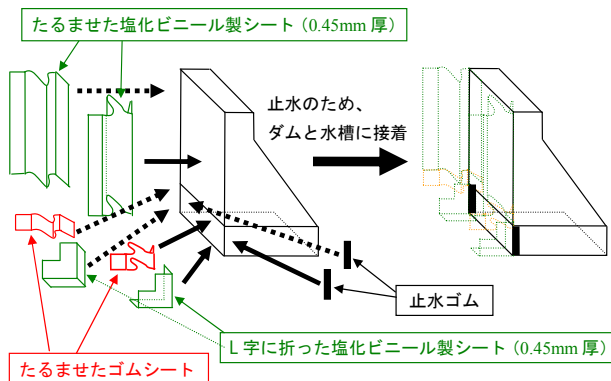


図-1 止水方法

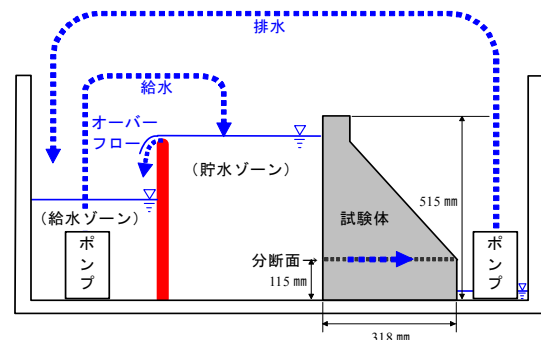


図-2 水槽内模式図

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模型試験体を分断面の凹凸が重なるように設置した（写真-2）。試験体の下部ブロックは水槽に固定し、上部ブロックについては分断面以外の場所で拘束がない状態にするため、試験体側面と水槽との間に片側 5mm 程度の隙間を設けた。また、試験体側面からの漏水を出来る限り防ぐ対策として、0.45mm 厚の塩化ビニール製シートを試験体上流面から水槽にかけて、試験体上部ブロックの挙動を阻害することのないよう弛みをもたせて貼付けた。さらに、分断面隅角部には天然ゴム製のシートをたるませた状態で貼付け、試験体側面からの止水と上部ブロックの自由な挙動性を兼ね備えるようにした。なお、下部ブロックには発泡性の止水ゴムを貼り、分断面以外の箇所からの試験体側面からの漏水を出来る限り抑えるようにした（図-1）。上流側の貯水については、図-2 に示すように貯水が試験体の分断面を通じて下流に流れ漏れるため、給水ゾーンから貯水ゾーンに加振中も常にポンプ給水をし、給水ゾーンと貯水ゾーンの隔壁から常にオーバーフローさせることにより、貯水水位を一定（貯水深 465mm）に保つようにした。

2.2 模型試験体

2.2.1 諸元

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。試験体の上流面勾配は鉛直、下流面勾配は 1:0.8 とした。

実験では、地震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、材料物性値を表-2 に示す。表-2 は実験を実施する材令 14 日の試験値を示した。

2.2.2 作製方法

試験体は、次の方法により作製した。

まず、下部ブロックを打設し、1 日後にワイヤーブラシでレイタンスを除去（グリーンカットに相当）した後、打継面に剥離剤を塗布した。その後、上部ブロックを打設し、上部ブロック打設から 7 日後に上部ブロックと下部ブロックの間の打継面を割裂分断した後、振動実験を実施した。割裂分断の方法は、試験体を横に倒した状態で、打継面の上流面及び下流面に鋼棒を沿わして置いて载荷をすることにより

表-1 試験体配合

単位量 (kg/m ³)			
水	セメント ^{※1)}	細骨材 ^{※2)}	石灰石微粉末
W	C	S	
354	118	822	806

※1) 早強ポルトランドセメント

※2) 笠間産砕砂

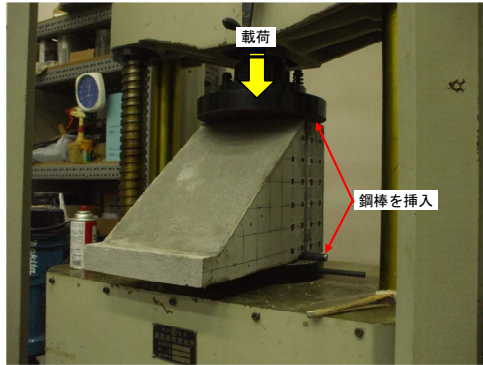


写真-3 試験体の分断方法

試験体を割裂した(写真-3)。写真-4は、試験体を割裂した後の下部ブロックの分断面である。

ここで、実験で使用する試験体(堤高 515mm)を実ダム(堤高 15~100m相当)と比較すると、その縮尺(1/λ)は 1/30~1/200となる。相似則に基づいたモデルスケールでの実ダムの物性と、本実験で使った試験体物性を比較したものを表-3に示す。試験体の弾性係数は相似則から求まる物性値より大きな値であるが、本実験において上部ブロックは、振動台と固定された下部ブロックと分断されており、挙動としては剛体挙動に近いと考えられるため、その影響は小さいと考えられる。

分断面のせん断抵抗特性については、そのせん断強度τは、式(1)より算定することとした。

$$\tau = C + \sigma n \tan \phi \quad (1)$$

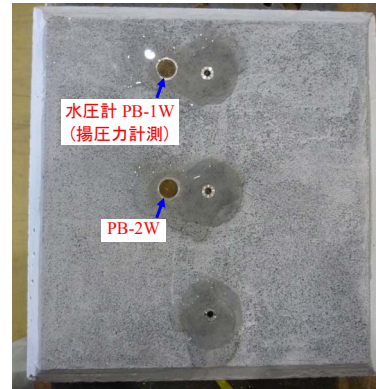
ここに、Cは粘着力、φは内部摩擦角、σnは分断面に作用する垂直応力である。

実ダムの設計において、一般的なコンクリートダ

表-2 試験体の材料物性値

材齢 (日)	密度 (t/m ³)	動弾性係数 (N/mm ²)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)
14	2.089	6,676	3.94

(上流側)



(下流側)

写真-4 分断面の状況(下部ブロック)

ムの水平打継面に用いられるせん断強度から、相似則に基づいたモデルスケールでの実ダムのせん断強度を求めると 0.013~0.147N/mm²の範囲となる。本実験で使用する試験体の分断面におけるせん断強度は、前述した試験体作製方法と同様な打継面処理を行い割裂分断させた供試体を用いた一面せん断試験の結果、C=0.012N/mm²、φ=43°であった。上部ブロック(高さ 400mm)による平均上載圧が分断面に作用する条件下ではせん断強度 0.017N/mm²となり、実際のコンクリートダムをモデルスケールとした場合に相似則により算出されるせん断強度よりも若干下回る程度である。

2.3 実験方法

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ケース(Case-UPL)と、貯水の浸水を防いだケース(Case-N-UPL)で実施した(表-4)。

Case-N-UPLについては、分断面に作用する揚圧力

表-3 相似則と本実験で用いた試験体物性値

	実ダムで想定される物性値 (堤高 15~100m)	相似則 (λ=30~200)	実際のコンクリートダムをモデルスケールとした場合に相似則により算出される物性値 (堤高約 0.5m)	本実験の試験体 (堤高約 0.5m)
	a	b	a×b	
堤高	15~100 m	1/λ	--	約 0.5 m
弾性係数	20,000~30,000 N/mm ²	1/λ	100~1,000 N/mm ²	6,675 N/mm ²
圧縮強度	20~30 N/mm ²	1/λ	0.1~1.0 N/mm ²	3.94 N/mm ²
打継ぎ面のせん断強度	2.5~4.4 N/mm ² ※1)	1/λ	0.013~0.147 N/mm ²	0.034 N/mm ² ※2)

※1) 一般的なダムコンクリートの打継ぎ面におけるせん断強度定数(C=圧縮強度の1/7~1/10倍、tan φ=0.65~0.8) 2) より算定

※2) モデル試験体と同一配合の供試体による一面せん断試験結果(C=0.0304N/mm²、tan φ=0.82)より算定

表-4 実験ケース

ケース	貯水深	分断面に作用する揚圧力の有無	加振周波数 (正弦波)	設置回数
Case-UPL-a	465mm	揚圧力あり	50Hz	1回目
Case-UPL-b(1)				1回目
Case-UPL-b(2)				2回目
Case-N-UPL	0mm	揚圧力なし		1回目

表-5 本実験での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 ($\lambda=30\sim200$)	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
	a	b	b/a
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

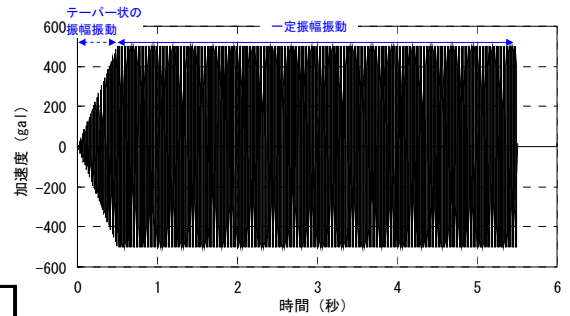


図-3 入力水平加速度時刻歴の一例

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、分断部の上流側面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。

また、Case-UPLについては、一連の振動実験が終了した後に、上部ブロックをもとの位置に設置なおし、再度加振するケース (Case-UPL-b(2)) についても実施し、分断面の摩擦特性の変化による上部ブロックの挙動への影響もみることにした。

2.3.2 加振条件

加振波形は正弦波とした。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-3 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。

2.3.3 計測方法

計測機器の配置と計測項目を図-4 に示す。

加速度については、分断面周辺において 3 方向 (上下流方向、ダム軸方向、鉛直方向) 計測した。

水中における試験体の変位計測については、防水型の変位計ではないため、水の影響が比較的少ない天端部のみに標準タイプの変位計 (計測可能範囲：水平方向 (DT-X) 20mm、鉛直方向 (DT-Y) 2mm) を設

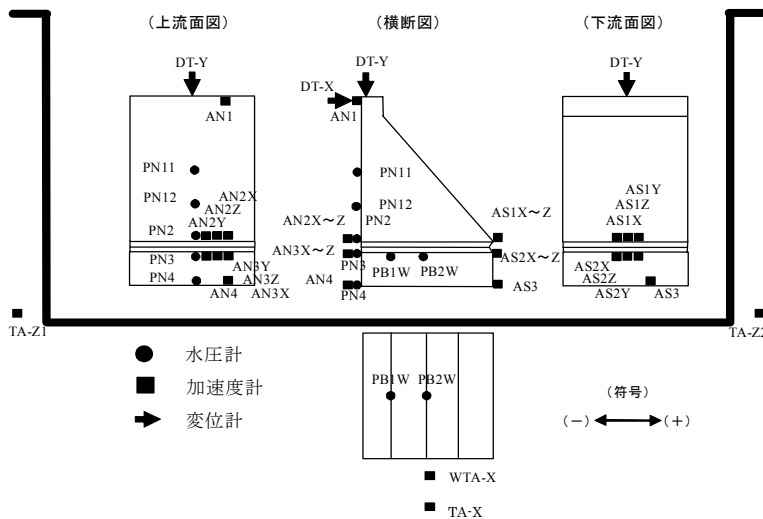


図-4 計測機器配置図

計測項目	名称	方向	設置位置
加速度	TA-X	上下流	振動台 (中央)
加速度	WTA-X	上下流	水槽底盤 (中央)
加速度	TA-Z1	鉛直	振動台 (上流側)
加速度	TA-Z2	鉛直	振動台 (下流側)
加速度	AN-4	上下流	下部ブロック上流面下部
加速度	AS-3	上下流	下部ブロック下流面下部
加速度	AN-1	上下流	上部ブロック上流面天端
加速度	AN-2X AN-2Y AN-2Z	上下流 ダム軸 鉛直	上部ブロック上流面 分断面周辺
加速度	AN-3X AN-3Y AN-3Z	上下流 ダム軸 鉛直	下部ブロック上流面 分断面周辺
加速度	AS-1X AS-1Y AS-1Z	上下流 ダム軸 鉛直	上部ブロック下流面 分断面周辺
加速度	AS-2X AS-2Y AS-2Z	上下流 ダム軸 鉛直	下部ブロック下流面 分断面周辺
水平変位	DT-X	上下流	上部ブロック上流面天端
鉛直変位	DT-Y	鉛直	上部ブロック上流面天端
静水圧	PN-2	ダム軸	上部ブロック上流面分断部
静水圧	PN-3	ダム軸	下部ブロック上流面分断部
静水圧	PN-4	ダム軸	下部ブロック上流面下部
動水圧	PN-11	上下流	上部ブロック上流面中央部
動水圧	PN-12	上下流	上部ブロック上流面下部
揚圧力	PB-1W	鉛直	分断面上流部
揚圧力	PB-2W	鉛直	分断面中央部

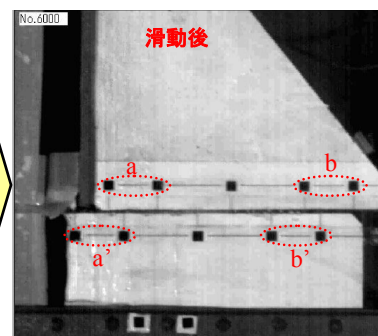
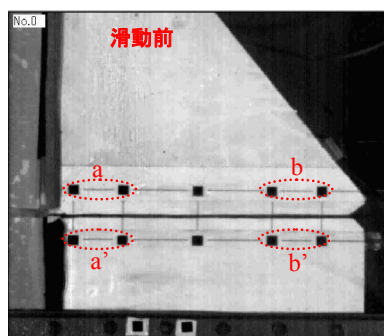
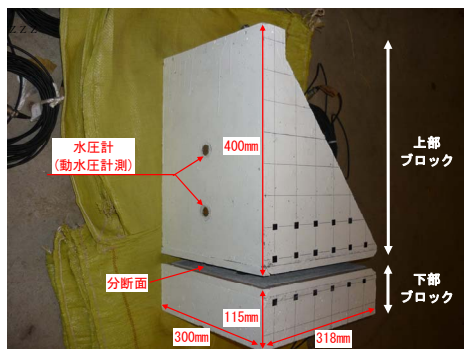


写真-5 ダム形状のモルタル模型試験体 写真-6 上部ブロックの滑動前及び滑動後の高速度カメラの映像写真

置した。また、分断面周辺部の変位は、標点（「■」マーク：写真-5）を高速度カメラの映像を追跡解析することにより測定した。高速度カメラは、水槽から約2m離れた位置に設置（写真-1）し、1秒あたり240コマで撮影した。

静水圧及び動水圧を計測するために、供試体上流面に水圧計を5ヶ所に設置した。また、分断面に作用する揚圧力を計測するために、下部ブロックの分断面に水圧計を2ヶ所設置した。なお、水圧計については、定格容量50kPa（水深5m相当）の間隙水圧計を使用した。

2.4 実験結果

2.4.1 各加振ステップの残留水平相対変位

上部ブロックの変位前と変位後における高速度カメラの映像写真を写真-6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量の関係を図-5に示す。

試験体分断面への貯水の浸水を許容したケースであるCase-UPL-aとCase-UPL-b(1)は、下部ブロック加速度が700～800gal程度で、上部ブロックが下流側に大きく変位している。一方、分断面への貯水の浸水を極力防いだケースであるCase-N-UPLは、上部

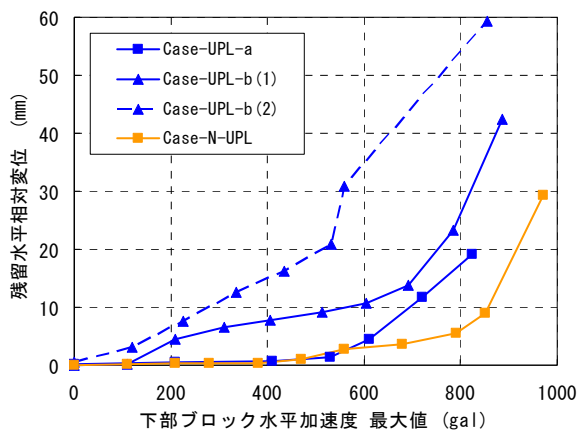


図-5 各加振ステップの入力水平加速度振幅と残留水平相対変位

ブロックが変位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変位する際に、分断面に作用する貯水からの揚圧力が小さいため、上部ブロックが変位しにくいことを示している。なお、Case-UPL-b(1)が200gal程度の低加速度で数mm変位している。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加振時の残留水平相対変位量分を差引くと、Case-UPL-b(1)の変位量曲線はCase-UPL-aと同様の変位量曲線となり、同条件のCase-UPLの両ケースは、残留水平相対変位量に大きな違いはないと考えられる。

再設置実験ケースのCase-UPL-b(2)は、設置1回目実験ケースのCase-UPL-aとCase-UPL-b(1)に比べ、低加速度でも上部ブロックが下流側に変位し、また、全加振ステップを通して残留水平相対変位量が大きい。これは、設置1回目実験において分断面の凹凸が削れたことで、再設置実験では分断面の凹凸がより平坦になり、分断面の摩擦抵抗が減少したことが理由と考えられる。

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）の挙動について分析した。

図-6に、Case-UPL-b(1)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（DT-X）を示す。AN-4の加速度時刻歴が最大加振に達し、一定振幅振動となる頃より上部ブロックが徐々に下流方向に変位している。

図-6のうち、4.0～4.1sec（0.1秒間）の区間を拡大したものを図-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の高速度カメラ映像

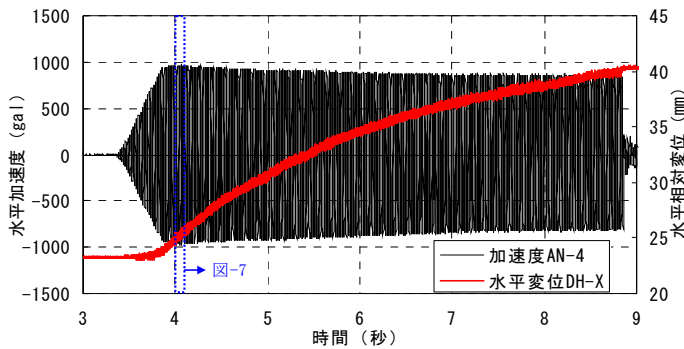


図-6 下部ブロック水平加速度時刻歴
(Case-UPL-b(1) 最終加振ステップ時)

(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 (写真-6 a-a'), DH-Y1 は上流側の鉛直相対変位 (写真-6 a-a'), DH-Y2 は下流側の鉛直相対変位 (写真-6 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、上部ブロックの変位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。

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。

また、この間、水平相対変位 DH-X は、鉛直相対変位と同じ周期で変動しながら徐々に大きくなっていることがわかる。

これらのことから、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、少しずつ下流方向に変位していることが分かる。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、下流方向に変位する。

2.4.3 揚圧力の影響

分断面に貯水を浸水させない条件での実験結果について、図-7 と同様に上部ブロックの変位状態によって色分けしたものを図-8 に示す。

分断面に作用する揚圧力について、分断面に貯水を浸水させる条件 (Case-UPL-b(1)) 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、分断面が閉じる時に、PB-1、PB-2 で瞬間的に 8 ~ 10kPa 程度の揚圧力が計測された。この揚圧力の作用により、分断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変位しやすくなると考えられる。一方で、分断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、大きな揚圧力の発生は計

測されず、貯水圧の影響を受けないため、下流方向への変位量は揚圧力が作用する場合に比べて小さい (図-5)。

2.4.4 設置回数 (摩擦特性の変化) の影響

再設置条件での実験結果について、図-7 と同様に上部ブロックのロッキング状態によって色分けしたものを図-9 に示す。

再設置実験ケースの Case-UPL-b(2) についても、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ている。水平相対変位 DH-X の振幅についてみると、Case-UPL-b(2) の振幅が、Case-UPL-b(1) の振幅の 2 倍程度となっている。これは、設置 1 回目実験において分断面の凹凸が削れたことで、再設置実験では分断面の凹凸がより平坦になり、分断面の摩擦抵抗が減少したことが理由と考えられる。

2.4.5 分断面に発生する動的揚圧力

模型振動実験より、分断面には、時々刻々変化する動的揚圧力が発生することを把握した (図-7~9)。そこで、PB-1W (分断面上流部)、PB-2W (分断面中央部) における、動的揚圧力の発生サイクル、および動的揚圧力の算出式の検討を行うこととした。分析は、Case-UPL-b(1) における 300gal 加振時の実験結果について行うこととした。

(1) 動的揚圧力の発生サイクル

動的揚圧力は上部ブロックのロッキング挙動に起因するものと推定し、そのうえで、動的揚圧力の大きさは上部ブロックの開口量または開口速度に応じて変化すると考え、これらを説明変数とする算出式の導出を試みることにした。

まず、上部ブロックのロッキング挙動 1 サイクルを抽出し、上部ブロックの開口量または開口速度と分断面に発生する揚圧力の相関図 (図-10) を作成したところ、動的揚圧力の発生サイクルには、上部ブロックの開口状況によって以下に述べる傾向があることを把握した。

なお、上部ブロックの開口量は高速度カメラ映像の追跡解析により算定し、分断面開口速度は開口量を時間微分することで算出した。

① 上部ブロック上流側が開く状況 (図-10 赤色線)

PB-1W は、開口量および開口速度に関わらずほぼ一定の値であり、上流側が開くと静水圧 (実験時では 3.4kPa) 程度の値が発生していた。

PB-2W は、開口量および開口速度に関わらず、ほ

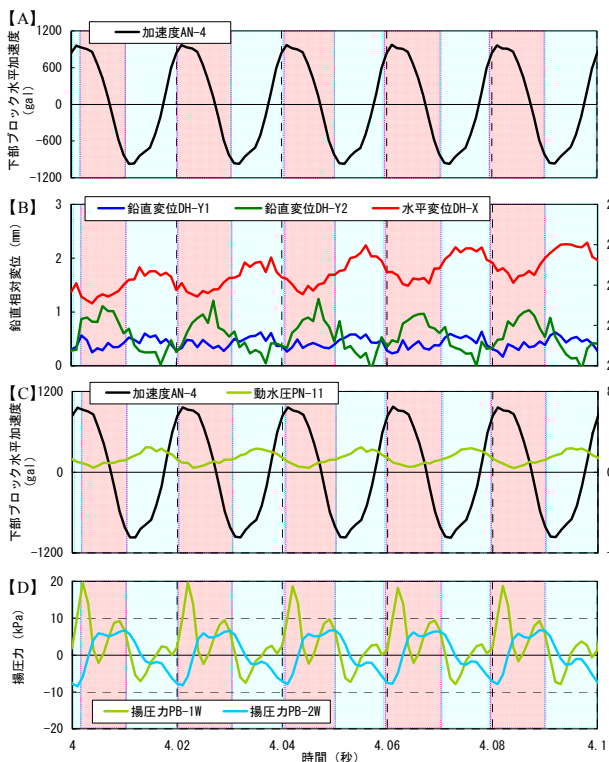


図-7 上部ブロック挙動の計測値の時刻歴 (Case-UPL-b(1) 最終加振ステップ時)

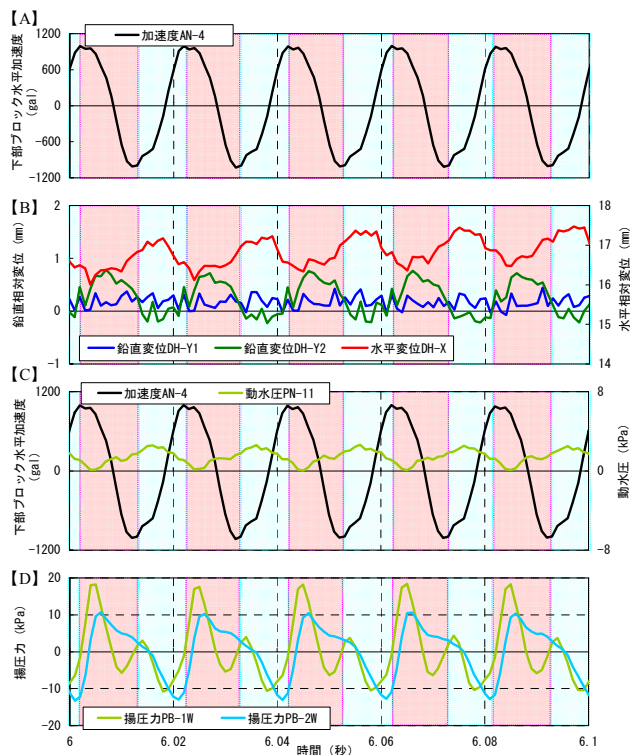


図-8 上部ブロック挙動の計測値の時刻歴 (Case-N-UPL 最終加振ステップ時)

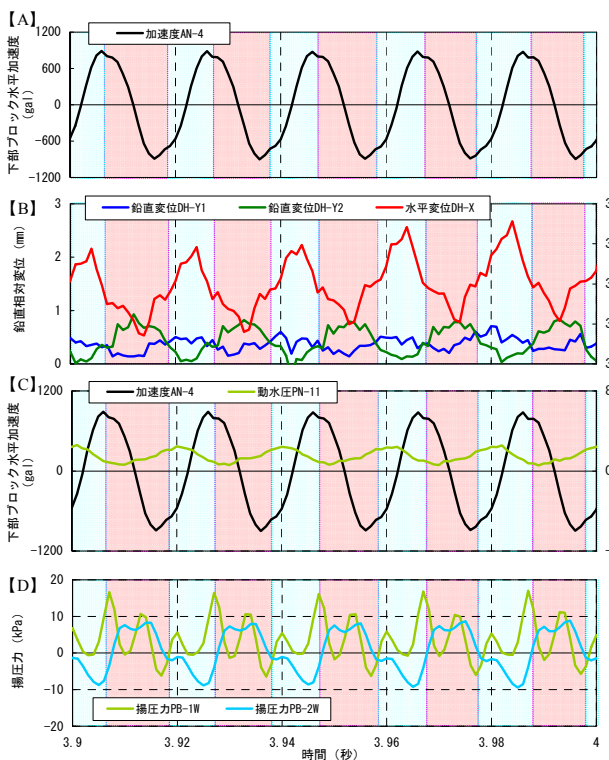
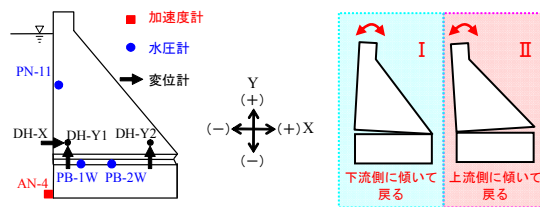


図-9 上部ブロック挙動の計測値の時刻歴 (Case-UPL-b(2) 最終加振ステップ時)



ば 0kPa であった。

②上部ブロック上流側が閉じる状況 (図-10 桃色線)

PB-1W, PB-2W とともに、開口速度との相関がみられ、上流側が閉じる状況では、その閉じる速度の増加とともにより大きな揚圧力が発生し、閉じる瞬間に大きな揚圧力が発生していた。

③上部ブロック下流側が開く状況 (図-10 青色線)

PB-1W は、開口量との相関がみられ、下流側が開く状況では、その開口量の増加とともに揚圧力が減少し、開口量が最大となったときには負圧が発生していた。

PB-2W は、開口量との相関がみられ、下流側が開く状況では、その開口量の増加とともに揚圧力が減少し、開口量が最大となったときにはほぼ 0kPa であった。

④上部ブロック下流側が閉じる状況 (図-10 水色線)

PB-1W は、開口速度との相関がみられ、下流側が閉じる状況では、その閉じる速度の増加とともに揚圧力が上昇し、閉じる瞬間にはほぼ 0kPa であった。

PB-2W は、開口量および開口速度に関わらず、ほぼ 0kPa であった。

以上は、200～400gal 加振時に共通してみられる傾向であることを確認した。

ただし、加速度が 100gal 程度になると、分断面には静水圧程度以下の揚圧力しか発生しないことを確認した。これは、低加速度の条件下では、上部ブロックのロッキング挙動がほぼ生じないことによるものと考えられる。

また、加速度が 500gal 程度以上になると、上部ブロックの開口量、開口速度と分断面に発生する揚圧力の間に明瞭な関係性がみえなくなることを確認した。これは、高加速度の条件下では、動的揚圧力が上部ブロックの開口量、開口速度以外の要因により受ける影響が大きくなるためと考えられる。

ここでは、上部ブロックの開口量、開口速度と分断面に発生する揚圧力の間に関係性がみられる 300～400gal 加振時の実験結果を用いて動的揚圧力の算出式を作成することとした。

(2) 動的揚圧力の算出式

前述の動的揚圧力の発生サイクルより、動的揚圧力の説明変数を上部ブロックの開口量または開口速度と考え、動的揚圧力の算出式を作成した (表-6)。算出式のもとになった上部ブロックの開口量、開口速度と分断面に発生する揚圧力の相関図を図-11 に示す。

(3) 算出式の妥当性

動的揚圧力の算出式の妥当性を確認するため、実験時の上部ブロックの開口量または開口速度を前述の算出式に与えることで動的揚圧力を算出し、それを実験時の揚圧力と比較した (図-12)。比較は、Case-UPL-b(1)における 300gal 加振時、および 600gal 加振時のケースについて行うこととした。

その結果、300gal 加振時のケースでは、算出式から求めた動的揚圧力は実験時の揚圧力とほぼ一致した。600gal 加振時のケースについても、算出式は 300～400gal 加振時の実験結果より作成したものではあるが、算出式から求めた動的揚圧力は実験時の揚圧力と概ね一致した。

以上より、動的揚圧力の算出式は簡易的なものではあるが、ある程度の妥当性を有していることを確認した。また、今後、解析において、本算出式を導入することで、分断面に動的揚圧力を作用させることができる可能性があるものと考えられる。

3. 静的一面せん断試験

3.1 概要

模型振動実験再現解析 (4 章) で用いるダム模型試験体 (モルタル製) の分断面物性、および実ダムモデル解析 (5 章) で用いる亀裂貫通したダムの分断面物性について、実験的検討を行うため、亀裂貫通した状態の供試体に対する静的一面せん断試験をモルタル供試体、およびコンクリート供試体により実施した。一面せん断試験の概要を図-13 に示す。

本章で実験的検討を行う分断面物性とは、粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ 、せん断方向ばね定数 k_s である。粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ は、モール・クーロンの破壊基準に基づき、一面せん断試験におけるピーク応力とそのときの垂直応力の関係から求めた。せん断方向ばね定数 k_s は、一面せん断試験におけるせん断応力～せん断方向変位曲線の初期勾配から求めた。

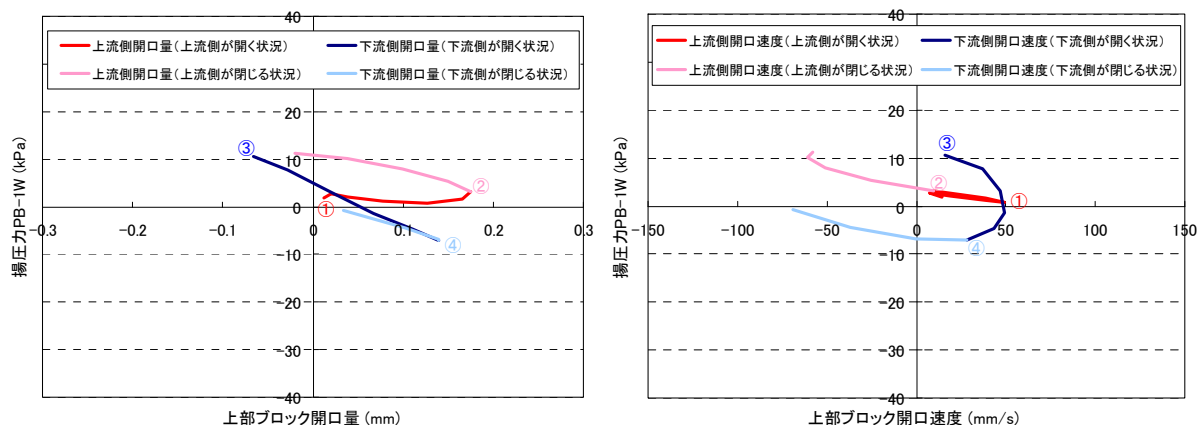
3.2 モルタル供試体による試験

3.2.1 試験方法

供試体の寸法は、200mm×200mm×200mm (立方体) とした。あらかじめ高さ 100mm の位置で圧縮強度試験機により割裂分断させてせん断面を形成した。

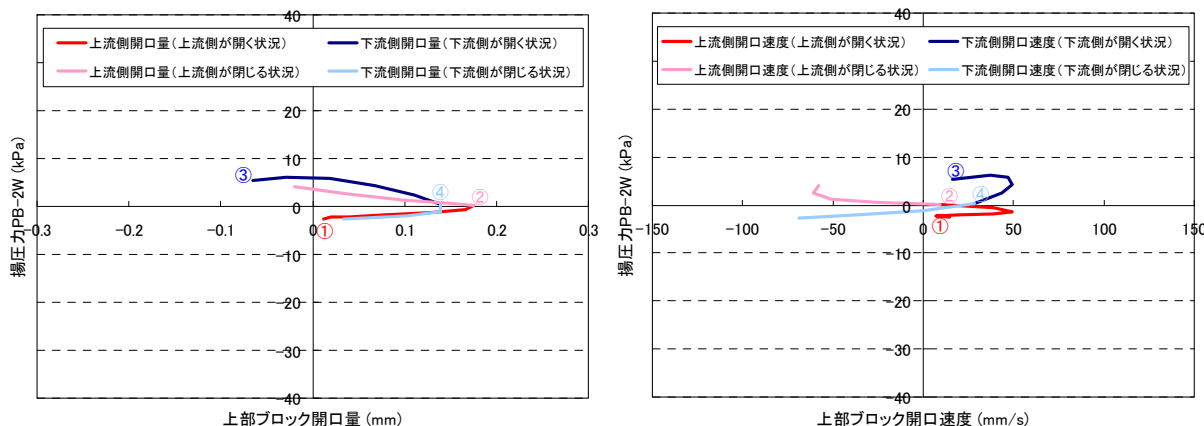
供試体作製材料は、模型振動実験 (2 章) に用いた試験体と同様、最大骨材寸法 0.75mm のモルタルを使用した。その配合を表-7 に、材料物性値を表-8 にそれぞれ示す。

供試体作製方法も、模型振動実験 (2 章) に用いた試験体の作製方法と同様であり、下部ブロックを



(1) 上部ブロック開口量と PB-1W の揚圧力の相関図

(2) 上部ブロック開口速度と PB-1W の揚圧力の相関図



(3) 上部ブロック開口量と PB-2W の揚圧力の相関図

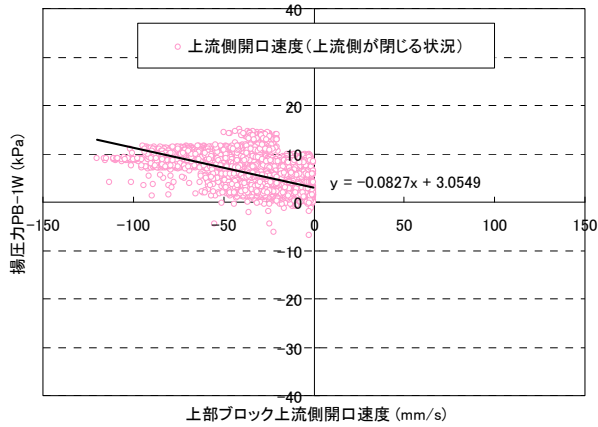
(4) 上部ブロック開口速度と PB-2W の揚圧力の相関図

図-10 上部ブロックの開口量，開口速度と分断面揚圧力の相関図（1 サイクル抽出）
（実験ケース Case-UPL-b(1) の 300gal 加振時の実験結果より作成）

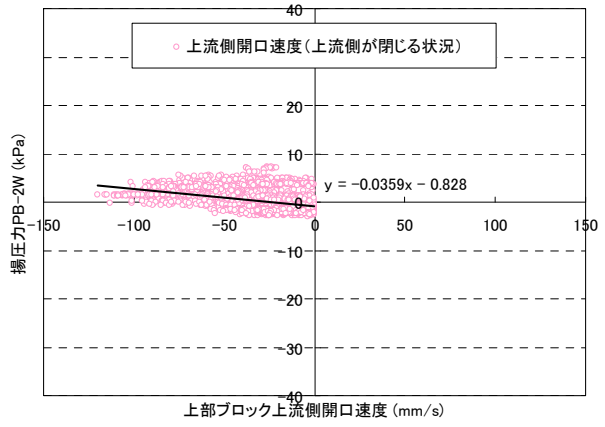
表-6 動的揚圧力の算出式

上部ブロックの開口状況	PB-1W 算出式 および導出理由	PB-2W 算出式 および導出理由
① 上部ブロック上流側が開く状況	$p1 = \text{静水圧}$ ⇒ 静水圧が発生するものと考えられる	$p2 = 0$ ⇒ ほぼ 0kPa になるものと考えられる
② 上部ブロック上流側が閉じる状況	$p1 = -0.0827 \times v1 + 3.0549$ ⇒ 上流側開口速度が説明変数になるものと考えられる	$p2 = -0.0359 \times v1 - 0.8280$ ⇒ 上流側開口速度が説明変数になるものと考えられる
③ 上部ブロック下流側が開く状況	$p1 = -56.774 \times u2 + 11.725$ ⇒ 下流側開口量が説明変数になるものと考えられる	$p2 = -9.1353 \times u2 + 6.1508$ ⇒ 下流側開口量が説明変数になるものと考えられる
④ 上部ブロック下流側が閉じる状況	$p1 = -0.0513 \times v2 - 5.7222$ ⇒ 下流側開口速度が説明変数になるものと考えられる	$p2 = 0$ ⇒ ほぼ 0kPa になるものと考えられる

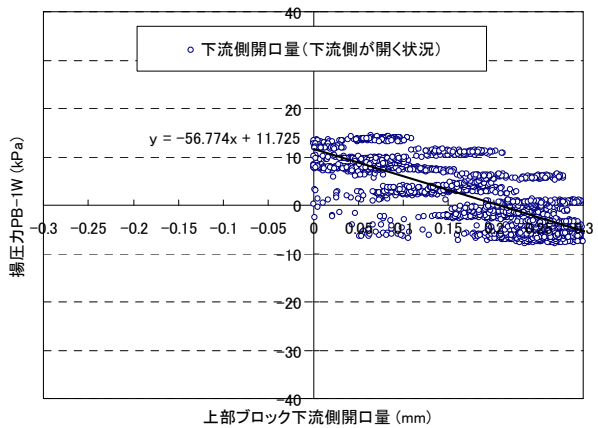
※ p1 は PB-1W（分断面上流側箇所）の揚圧力[kPa]、p2 は PB-2W（分断面中間箇所）の揚圧力[kPa]を示す。
v1 は上部ブロック上流側開口速度[mm/s]、v2 は上部ブロック下流側開口速度[mm/s]を示す。
u2 は上部ブロック下流側開口量[mm]を示す。



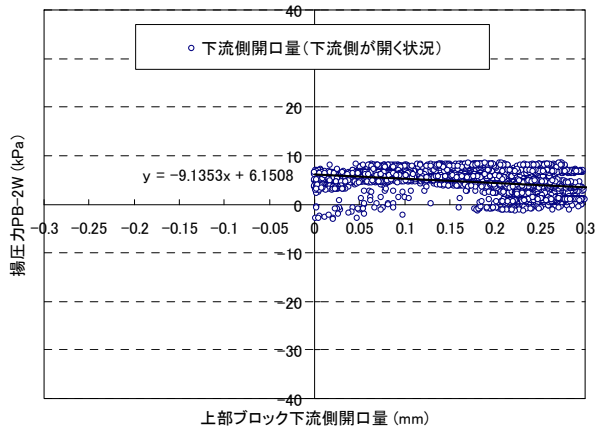
(1) 上部ブロック上流側が閉じる状況における上流側開口速度と PB-1W の揚圧力の関係



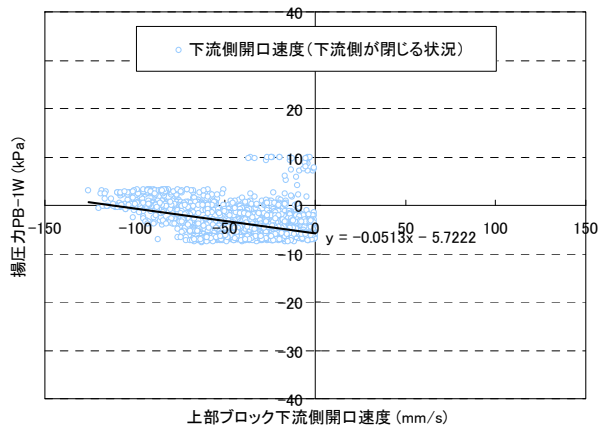
(2) 上部ブロック上流側が閉じる状況における上流側開口速度と PB-2W の揚圧力の関係



(3) 上部ブロック下流側が開く状況における下流側開口量と PB-1W の揚圧力の関係

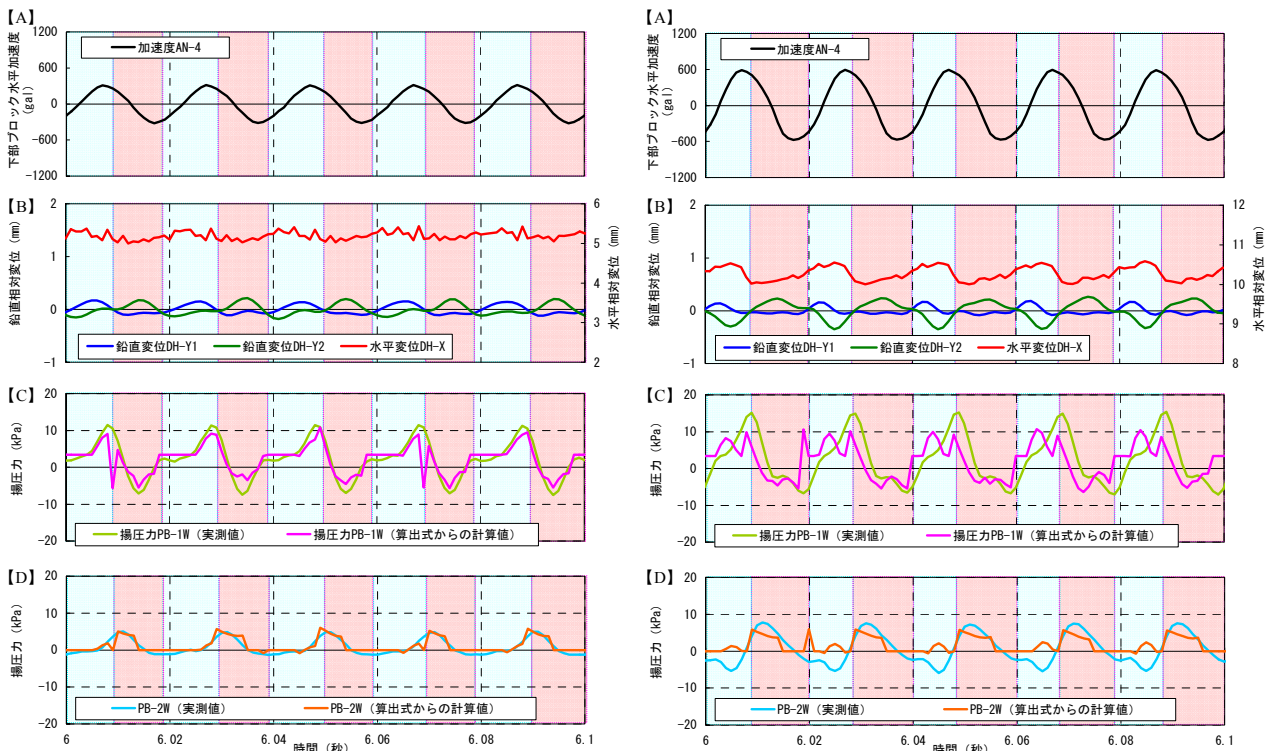


(4) 上部ブロック下流側が開く状況における下流側開口量と PB-2W の揚圧力の関係



(5) 上部ブロック下流側が閉じる状況における下流側開口速度と PB-1W の揚圧力の関係

図-11 上部ブロックの開口量，開口速度と分断面揚圧力の相関図
(実験ケース Case-UPL-b(1) の 300～400gal 加振時の実験結果より作成)



(1) 300gal 加振時のケース

(2) 600gal 加振時のケース

図-12 算出式から求めた動的揚圧力と実験時の揚圧力
(実験ケース Case-UPL-b(1))

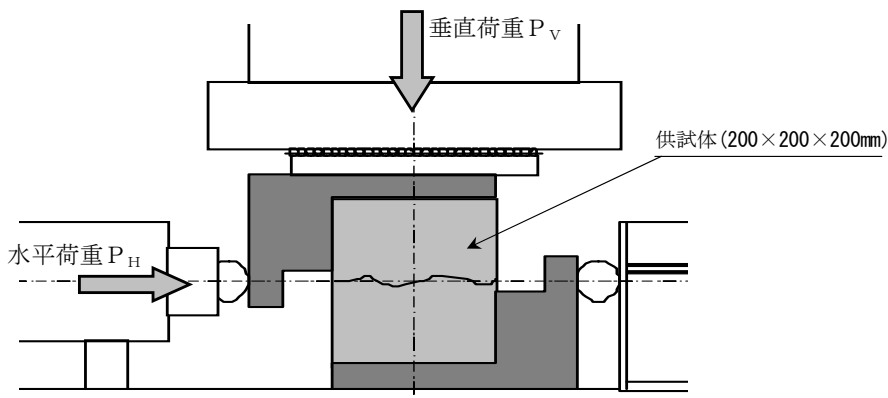


図-13 一面せん断試験の概要

表-7 モルタル供試体配合

ケース名	単位量 (kg/m ³)			
	水 W	セメント ^{※1} C	細骨材 ^{※2} S	石灰石 微粉末
A-1~8 B-1~9	354	118	822	806

※1) 早強ポルトランドセメント

※2) 笠間産砕砂

表-8 モルタル供試体の材料物性値

ケース名	材齢 (日)	密度 (t/m ³)	動弾性係数 (N/mm ²)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)
A-1~8	14	2.089	6,676	3.94
B-1~9	32	1.789	5,917	4.05

表-9 モルタル供試体による試験ケース一覧

ケース名	骨材最大寸法 (mm)	目標圧縮強度 (N/mm ²)	垂直圧縮応力 (N/mm ²)
A-1,2 B-1,2	0.75	4	1.0
A-3,4 B-3,4			0.5
B-5~7			0.2
A-5,6			0.05
B-8,9			0.02
A-7,8			0.005

表-10 モルタル供試体による一面せん断試験結果

ケース名	粘着力 C (N/mm ²)	内部摩擦角 φ (°)	せん断方向ばね定数 ks [*] (N/mm ² /mm)	
			ケース A	ケース B
A-1,2 B-1,2	0.012	41.3	0.901	1.079
A-3,4 B-3,4			0.575	0.535
B-5~7				0.263
A-5,6			0.017	
B-8,9				0.025
A-7,8			0.009	

※一面せん断試験におけるせん断応力～せん断方向変位曲線の初期勾配（せん断方向変位 0.5mm 時の勾配）から求めた。

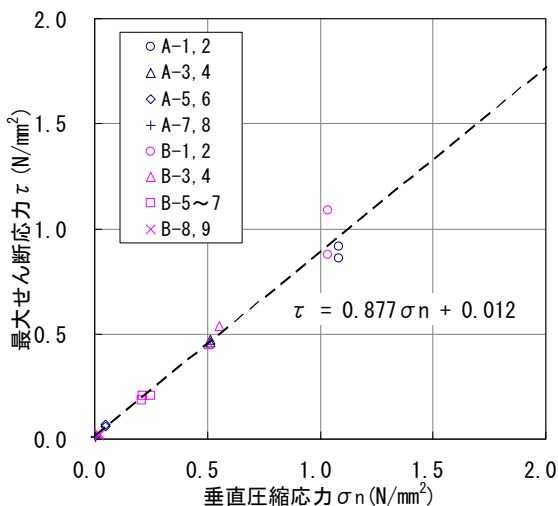


図-14 モルタル供試体による一面せん断試験結果 (最大せん断応力 τ ~ 垂直圧縮応力 σn)

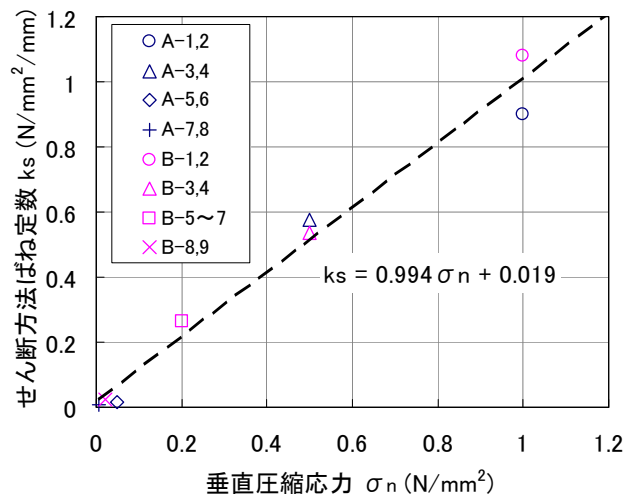


図-15 モルタル供試体による一面せん断試験結果 (せん断方向ばね定数 ks ~ 垂直圧縮応力 σn)

打設し、1 日後にワイヤーブラシでレイタンスを除去（グリーンカットに相当）した後、打継面に剥離剤を塗布した。その後、上部ブロックを打設し、上部ブロック打設から 7 日後に上部ブロックと下部ブロックの間の打継面を割裂分断した。割裂分断の方法は、試験体を横に倒した状態で、打継面の上流面及び下流面に鋼棒を沿わして置いて载荷をすることにより試験体を割裂させた。

試験ケースを表-9 に示す。垂直圧縮応力は、模型試験体の分断面における上載圧程度である 0.005N/mm² から、1.0N/mm² までの計 6 载荷パターンで実施した。

試験は、上部ブロックの材令 14 日目に実施し、せん断応力が降伏点を超え、残留強度状態になるまでせん断荷重を载荷した。

3.2.2 試験結果

一面せん断試験結果を表-10、図-14 に示す。

粘着力 C はおよそ 0.012N/mm²、内部摩擦角 φ はおよそ 41.3° となった。

せん断方向ばね定数 ks と垂直圧縮応力 σn との値は、試験結果より ks の回帰式を求め（図-15）、模型試験体の分断面における上載圧（約 0.005N/mm²）を

考慮して算出した（ks=0.028N/mm²/mm）。

3.3 コンクリート供試体による試験

3.3.1 試験方法

供試体の寸法は、200mm×200mm×200mm（立方体）とした。あらかじめ高さ 100mm の位置で圧縮強度試験機により割裂分断させてせん断面を形成した。

供試体は最大骨材寸法 40mm のコンクリートを使用した。供試体の配合を表-11 に、材料物性値を表-12 に示す。

供試体作製方法は、下部ブロックを打設し、1 日後にワイヤーブラシでレイタンスを除去（グリーンカットに相当）した後、打継面に剥離剤を塗布した。その後、上部ブロックを打設し、上部ブロック打設から 22 日後に上部ブロックと下部ブロックの間の打継面を割裂分断した。割裂分断の方法は、試験体を横に倒した状態で、打継面の上流面及び下流面に鋼棒を沿わして置いて载荷をすることにより試験体を割裂した。

試験ケースを表-13 に示す。垂直圧縮応力は、実ダムモデルの分断面における上載圧程度である 1.0N/mm²、および試験機器の性能を勘案した 0.2N/mm²、0.5N/mm²、2.0N/mm² の計 4 载荷パターンで

表-11 コンクリート供試体配合

ケース名	単位量(kg/m ³)					水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材			
				40~20	20~5		
C-1~6	155	207	826	619	506	75	43.5
D-1~4	139	207	850	552	552	67	43.5
E-1~9	139	207	893	552	552	67	47.1

表-12 コンクリート供試体の材料物性値

ケース名	材齢 (日)	密度 (t/m ³)	静弾性係数 (N/mm ²)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)
C-1~6	28	—*	—*	21.2
D-1~4	28	2.323	21,883	—*
E-1~9	28	2.271	23,273	18.7

表-13 コンクリート供試体による試験ケース一覧

ケース名	骨材最大寸法 (mm)	目標圧縮強度 (N/mm ²)	垂直圧縮応力 (N/mm ²)
C-1~3	40	20	2.0
C-4~6 D-1,2 E-1~3			1.0
D-3,4 E-4~6			0.5
E-7~9			0.2

※未測定

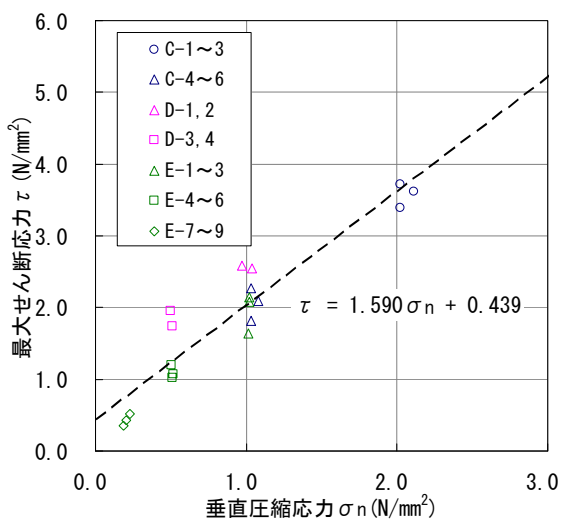


図-16 コンクリート供試体による一面せん断試験結果 (最大せん断応力τ~垂直圧縮応力σn)

実施した。

試験は、上部ブロックの材令28日で実施し、せん断応力が降伏点を超え、残留強度状態になるまでせん断荷重を載荷させた。

3.3.2 試験結果

一面せん断試験結果を図-16に示す。

粘着力Cはおよそ0.439N/mm²、内部摩擦角φはおよそ57.8°となった。

4. 模型振動実験再現解析

4.1 解析手法

再現解析は、不連続面を有する要素集合体の大変形問題を取り扱うことが可能である個別要素法により行うことにした。再現解析で用いた解析コードは、UDEEC (ver. 4.0)³⁾である。

本解析コードでは、分断面における上下ブロック間の応力の伝達は、上下ブロック間の分断面に配置

された仮想ばね(垂直方向ばね、せん断方向ばね)を介して行われる。上下ブロック間の垂直方向およびせん断方向の応力の計算は以下のようにして行われる。

上下ブロックが接している条件で、垂直応力σnは垂直方向ばね定数knを介して算出される(式(2))。

$$\Delta\sigma_n = -kn\Delta u_n \quad (2)$$

ここに、Δunは分断面の垂直方向相対変位増分である。

上下ブロックが接している条件で、せん断応力τsは、分断面の粘着力Cおよび内部摩擦角φより求まる分断面のせん断強度τf(=C+σntanφ)との関係に応じ、せん断方向ばね定数ksを用いて算出される(式(3.1)、(3.2))。

$$\Delta\tau_s = \begin{cases} -ks\Delta u^s & (\tau_s < \tau_f) \\ \tau_f & (\tau_s \geq \tau_f) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\tau_f \quad (\tau_s \geq \tau_f) \quad (3.2)$$

ここに、Δu^sは弾性領域における分断面におけるせん断方向相対変位増分である。

4.2 解析条件

4.2.1 解析モデル

再現解析モデルを図-17に示す。モデルは、堤体のみモデルとし、堤体底面を固定境界とした。解析では、模型試験体と同様な分断面の凹凸形状を表現することが困難なため、分断面のモデル形状は水平面とした。

貯水深は、模型振動実験時と同水深(465mm)とし、動水圧は、Westergaard式に基づく付加質量により考慮した。

再現解析は、分断面への貯水の浸水を防いだ実験ケース(Case-N-UPL(1))の結果をもとに実施した。従って、本解析では、分断面間における動的揚圧力

の発生は考慮していない。

4.2.2 解析パラメータの推定

(1) 垂直方向ばね定数 k_n , せん断方向ばね定数 k_s

垂直方向ばね定数 k_n については、式(2)に示されるように、上下ブロック間の食い込み易さを表現するパラメータと解することができる。

ここで、実験においては、分断面は凹凸形状であることから、上部ブロックが開口した状態でも、上部ブロックと下部ブロックは面的接触をしているものと思われる。一方、解析においては分断面は水平面であるため、垂直方向ばね定数 k_n を過大に設定したならば、上下ブロック間の食い込みを生じ難くすることになり、上部ブロックが開口した状態での上部ブロックと下部ブロックの面的接触の再現が困難になると思われる。一方、垂直方向ばね定数 k_n を過小に設定したならば、上下ブロック間の食い込みを生じ易くすることになり、上部ブロックの開口（ロッキング挙動）の再現が困難になると思われる。

以上を鑑み、垂直方向ばね定数 k_n は模型試験体の弾性係数を参考に設定することとした。

せん断方向ばね定数 k_s については、式(3.1), (3.2)に示されるように、上下ブロック間のせん断方向相対変位が微小な領域における、せん断応力の算出に関わるパラメータである。その値については、静的一面せん断試験結果(3章)から設定することとした。

(2) 粘着力 C , 内部摩擦角 ϕ

分断面の粘着力 C , 内部摩擦角 ϕ については、式(3.1), (3.2)に示されるように、上下ブロック間のせん断方向相対変位が増大した領域における、せん断応力の算出に関わるパラメータである。その値については、静的一面せん断試験結果(3章)から設定することとした。

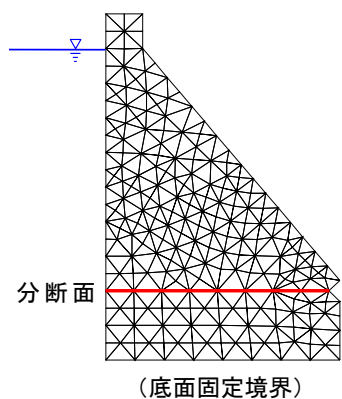


図-17 再現解析モデルのメッシュ図

(3) 減衰

減衰は、レイリー減衰および剛性減衰力を組み合わせて用いることとした。

レイリー減衰は、模型振動実験時に上部ブロックが卓越した応答となった入力振動数である 50Hz で、 $h=10\%$ となるよう設定することとした。 $h=10\%$ としたのは、既往の重力ダムの再現解析における知見を参考にしたものである。

剛性減衰力は、実験時の分断面の凹凸における上下ブロック間の垂直方向の摩擦効果の創出、すなわち、ロッキング挙動を含む上部ブロックが跳ね上がる挙動の再現に対して調整効果があるものと考えられ、下式で定義される。

$$f = -\beta \times k_n \times l \times \Delta v \quad (4)$$

ここに、 f は剛性減衰力、 β は剛性減衰係数、 k_n は分断面における垂直方向ばね定数、 l は分断面における接触長、 Δv は速度変化量である。

剛性減衰係数 β の値については、実験結果と適合するよう試行的に設定することとした。

4.2.3 解析パラメータの初期条件

再現解析モデルの解析パラメータの初期条件を表-14に示す。このうち、堤体物性である単位体積質量、弾性係数については、模型振動実験で用いた試験体と同配合、同材齢で作製した供試体の試験値を参考にして設定した。分断面パラメータ、減衰については、前述のとおりである。

4.2.4 入力波

加振入力波は、振動模型実験時と同様、振動数 50Hz の正弦波とした。解析は、入力加速度 300gal からのステップ加振とした。

4.3 再現解析結果

再現解析においては、以下の挙動について解析結果と模型振動実験結果を比較し、妥当な解析パラメータの選定を行うものとした。

表-14 解析パラメータの初期条件

解析パラメータ		初期条件
堤体物性	単位体積重量 ρ (kg/m^3)	2,090 kg/m^3
	弾性係数 E (N/mm^2)	6,700 N/mm^2
	ポアソン比 ν	0.2
分断面パラメータ	鉛直方向ばね定数 k_n (N/mm^3)	6,700 N/mm^3
	せん断方向ばね定数 k_s (N/mm^3)	28 N/mm^3
	粘着力 C (N/mm^2)	0.012 N/mm^2
	せん断摩擦角 ϕ ($^\circ$)	41.3 $^\circ$
減衰	レイリー減衰 (%)	10%
	剛性減衰係数	-*

※実験結果と適合するよう試行的に設定

表-15 再現解析実施ケースおよび解析パラメータ

解析パラメータ		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7	Case-8
堤体物性	単位体積重量 ρ (kg/m ³)	2,090							
	弾性係数 E (N/mm ²)	6,700							
	ポアソン比 ν	0.2							
分断面パラメータ	鉛直方向ばね定数 k_n (N/mm ³)	6,700							
	せん断方向ばね定数 k_s (N/mm ³)	28	2.8	28	28	6,700	6,700	6,700	6,700
	粘着力 C (N/mm ²)	0.012	0.012	0.006	0.050	0.012	0.012	0.012	0.012
	せん断摩擦角 ϕ (°)	41.3	41.3	30.0	60.0	41.3	41.3	41.3	41.3
減衰	レイリー減衰 (%)	10	10	10	10	10	20	20	20
	剛性減衰係数	-	-	-	-	-	-	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}

- ・上部ブロックの残留水平相対変位量
- ・上部ブロックのロッキング挙動

表-15 に再現解析の実施ケースを示し、以下に各ケースの解析結果と解析パラメータ設定理由を述べる。

Case-1～3

初期条件ケース (Case-1) では、入力加速度が 600gal と大きくなっても残留水平相対変位量が僅かであった (図-18(1))。

この理由として、分断面の摩擦抵抗を過大としていることも考えられるため、分断面の摩擦抵抗を小さくした場合の状況を確認することとし、初期条件ケース (Case-1) よりもせん断方向ばね定数 k_s を小さくしたケース (Case-2)、および粘着力 C, 内部摩擦角 ϕ を小さくしたケース (Case-3) を設定した。しかし、Case-2, 3 は入力加速度が 600gal と大きくなっても残留水平相対変位量は僅かであった (図-18(1))。

ここで、Case-1～3 の鉛直相対変位時刻歴をみると、時系列的な変動は実験と調和的であるが、その値はごく僅かであり、明瞭なロッキング挙動が発生していない (図-19(1)～(3))。そこで、ロッキング

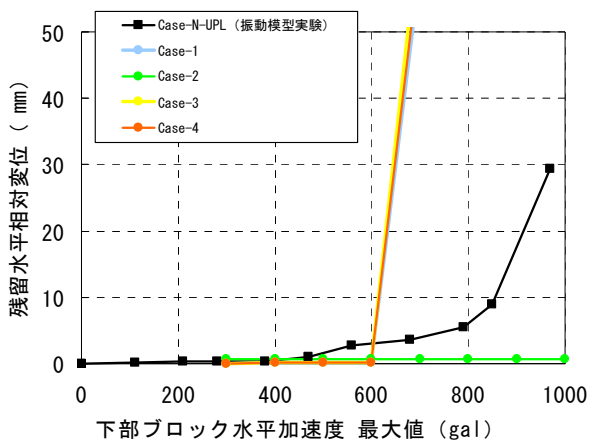
挙動の発生が水平相対変位の発生に関するものと推定した。

Case-4～5

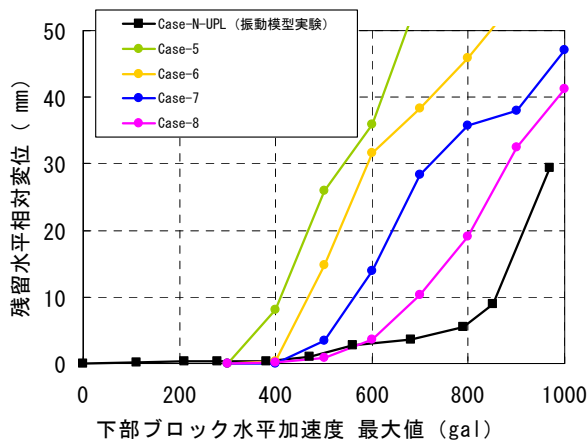
ロッキング挙動の発生に分断面の摩擦抵抗が関係しているものと考え、初期条件ケース (Case-1) より粘着力 C, 内部摩擦角 ϕ を大きくしたケース (Case-4)、およびせん断方向ばね定数 k_s を大きく (一般的なダムコンクリートの弾性係数を参考にして設定) したケース (Case-5) を設定した。

その結果、粘着力 C, 内部摩擦角 ϕ を大きくしたケース (Case-4) では、入力加速度が 600gal と大きくなっても鉛直相対変位量はごく僅かで明瞭なロッキング挙動は発生せず、また、水平相対変位についてもほとんど発生しなかった (図-18(1), 図-19(4))。一方、せん断方向ばね定数 k_s を一般的なダムコンクリートの弾性係数を参考にして設定したケース (Case-5) では、ロッキング挙動が発生し、また、水平相対変位についても発生した (図-18(2), 図-19(5))。

これより、ロッキング挙動の発生が水平相対変位の発生に関することを確認した。また、ロッキング挙動の発生にはせん断方向ばね定数 k_s を一面せん

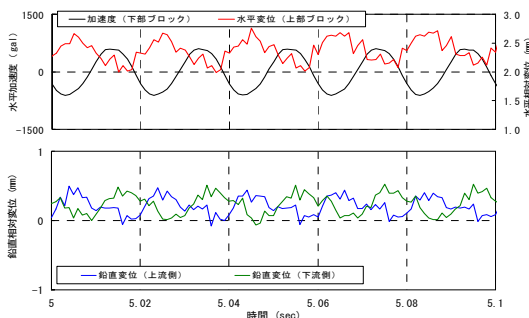


(1) Case-1～4

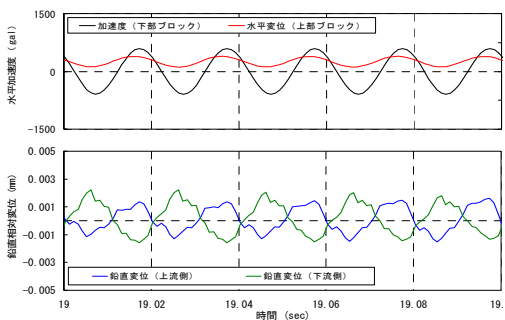


(2) Case-5～8

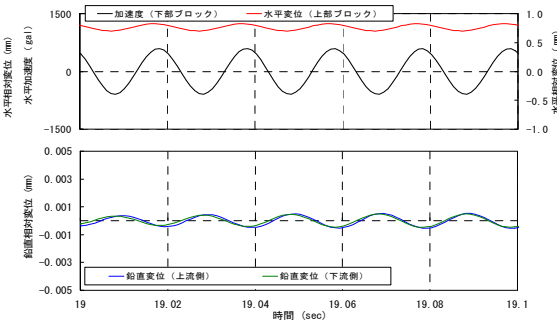
図-18 再現解析結果 (残留水平変位量)



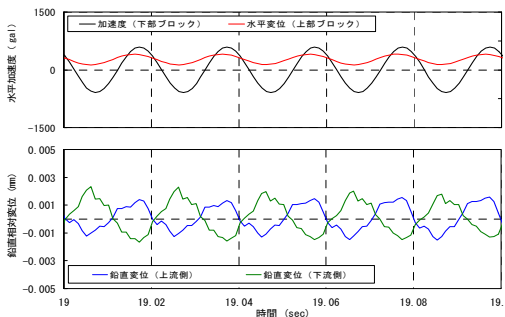
(0) 模型振動実験結果 入力加速度 600gal



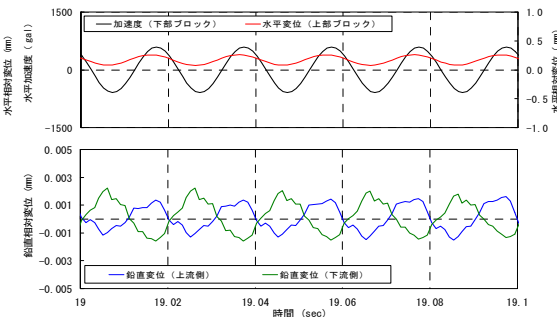
(1) 再現解析結果 (Case-1) 入力加速度 600gal



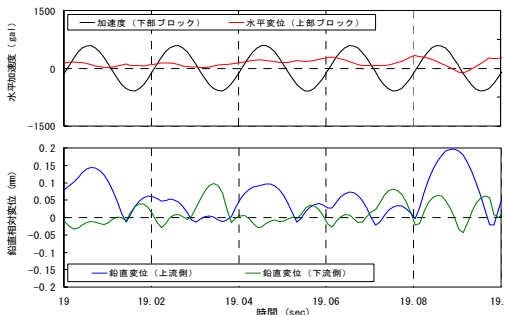
(2) 再現解析結果 (Case-2) 入力加速度 600gal



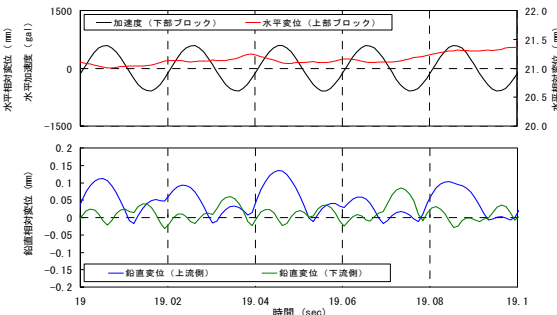
(3) 再現解析結果 (Case-3) 入力加速度 600gal



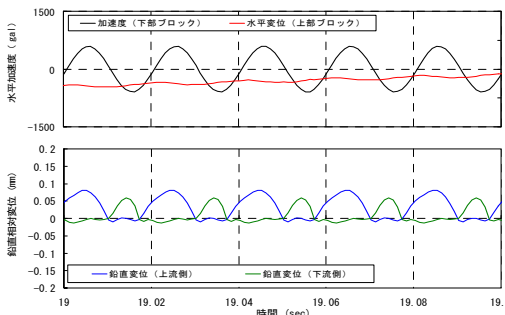
(4) 再現解析結果 (Case-4) 入力加速度 600gal



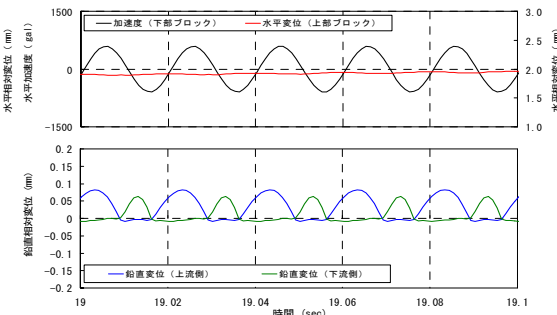
(5) 再現解析結果 (Case-5) 入力加速度 600gal



(6) 再現解析結果 (Case-6) 入力加速度 600gal



(7) 再現解析結果 (Case-7) 入力加速度 600gal



(8) 再現解析結果 (Case-8) 入力加速度 600gal

図-19 再現解析結果 (水平振幅および鉛直開口量)

断試験から設定される値よりも大きくする必要のあることがわかった。

これは、実験で用いた模型試験体の分断面は凹凸形状であり上部ブロックが開口する際の引っ掛かり部分があると考えられるが、解析モデルの分断面は水平でありそのような引っ掛かり部分がないことによるものと考えられる。このため、せん断方向ばね定数 k_s を一面せん断試験から設定される値よりも大きめに設定することで、上部ブロックのせん断方向相対変位が微小な領域において、摩擦抵抗が増加し、実験結果への適合性が向上したものと考えられる。

Case-6~8

前述のCase-5は、実験結果に比べ残留水平相対変位量が大い結果となった。そこで、Case-5よりもレイリー減衰を大きくしたケース(Case-6)、さらに上部ブロックのロッキング挙動に対して調整効果のある剛性減衰力を併用したケース(Case-7,8)を設定した。

その結果、残留水平相対変位量については、入力加速度レベルが小さい(～300gal)とCase-5～8で再現性がみられ、入力加速度レベルが大きくなる(400gal～)とレイリー減衰を20%まで大きくしさらに剛性減衰力を併用したCase-8で最も高い再現性がみられた(図-18(2))。また、上部ブロックの水平振幅およびロッキング挙動についても再現性がみられた(図-19(6)～(8))。

4.4 まとめ

模型振動実験における上部ブロック挙動についての再現解析結果より把握された妥当な解析パラメータ、および設定法を表-16に示す。

再現解析では、上部ブロックの残留水平相対変位量について、分断面のせん断方向ばね定数 k_s を一面せん断試験結果から得られる値よりも大きく設定することにより、再現性を高めることができることがわかった。また、上部ブロックのロッキング挙動に

についても同様のことがわかったが、再現解析における上部ブロックの水平振幅および鉛直相対変位量は、実験結果に比べ小さな値であった。ロッキング挙動をより精緻に一致できる解析の実施には、分断面の凹凸形状をより精緻に表現できる解析パラメータの設定法の開発が必要になるものと考えられる。

5. 実ダムモデル解析

5.1 解析手法

実ダムモデル解析は、再現解析と同様、不連続面を有する要素集合体の大変形問題を取り扱うことが可能である個別要素法(解析コード:UDEC(ver. 4.0))により行うことにした。

5.2 解析条件

5.2.1 解析モデル

重力式コンクリートダムが、地震動をうけることにより発生する損傷である亀裂面の形状としては、①実際の地震動により被害を受けたKoynaダム⁴⁾のように堤体高標高部の下流面における勾配変化点から水平方向に亀裂が進展する場合(図-20)や、②大規模地震動に対する亀裂進展解析結果¹⁾⁴⁾⁵⁾に見られるように、上流側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点から亀裂が発生し下流側へと亀裂が進展する場合(図-21)などが考えられる。

ここでは、上記のうち堤体断面形状として一般的な②のケースを想定して解析を実施することとした。なお、既往の亀裂進展解析結果をみると、上流フィレットから伸びる亀裂が上下流に貫通する場合でも、水平に貫通するよりも、上下流からの亀裂がV字型に形成されるものと考えられる(図-21(2))。いま、V字型に亀裂が貫通した場合、上部ブロックの変位は発生しにくいと考えられる。そこで、本研究では、重力式コンクリートダムの地震動による変位を、照査上安全側の立場から行うため、フィレットによる勾配変化点から水平に貫通した亀裂を対象に検討を行うこととした。

表-16 解析パラメータの設定値および設定法

解析パラメータ		設定値	設定法
堤体物性	単位体積重量 ρ (kg/m ³)	2,090 kg/m ³	試験値等から設定
	弾性係数 E (N/mm ²)	6,700 N/mm ²	
	ポアソン比 ν	0.2	
分断面パラメータ	鉛直方向ばね定数 k_n (N/mm ³)	6,700 N/mm ³	弾性係数を参考に設定
	せん断方向ばね定数 k_s (N/mm ³)	6,700 N/mm ³	
	粘着力 C (N/mm ²)	0.012 N/mm ²	一面せん断試験から設定
	せん断摩擦角 ϕ (°)	41.3°	
減衰	レイリー減衰 (%)	10%~20%	左記の幅を持たせ設定
	剛性減衰力	0~2.0×10 ⁻⁴	

再現解析モデルを図-22 に示す。モデルは、堤体のみモデルとし、堤体底面を固定境界とした。解析では、模型試験体と同様な分断面の凹凸形状を表現することが困難なため、分断面のモデル形状は水平面とした。貯水深は、9割水深(90m)とし、動水圧は、Westergaard 式に基づく付加質量により考慮した。なお、分断面に揚圧力を作用させないものとして解析を行った。

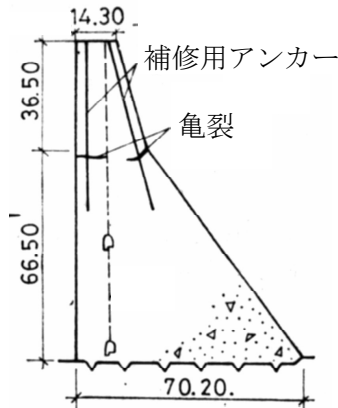


図-20 Koyana ダムの被害概要⁴⁾

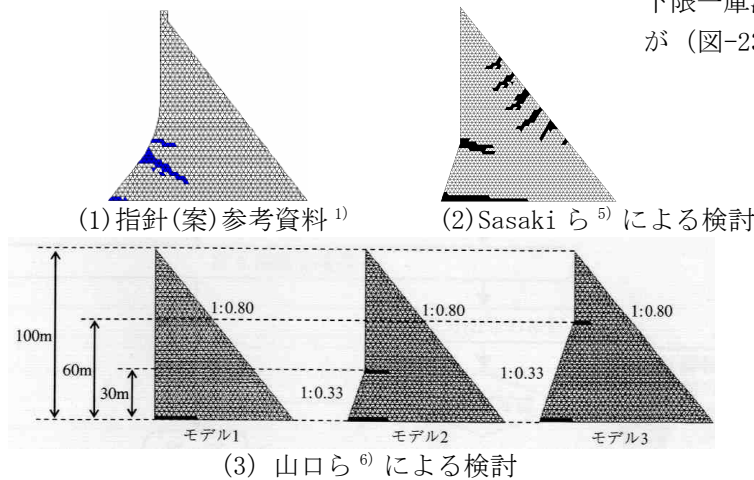


図-21 亀裂進展解析結果の例 (網掛け部：引張亀裂発生要素)

5.2.2 解析パラメータ

実ダムモデルの解析パラメータを表-17 に示す。これらの解析パラメータは、模型振動実験再現解析(4章)で把握した設定法に基づき設定した。このうち、減衰 h はレイリー減衰とし、模型実験再現解析の結果や重力式ダムの再現解析で用いられる値を参考に、上部ブロックを自由振動させたときの卓越振動数(5Hz)で $h=10\sim 20\%$ となるように設定し、さらに、ロッキング挙動を含む上部ブロックが跳ね上がる挙動に対して調整効果がある剛性減衰力を併用した。粘着力 C 、内部摩擦角 ϕ については、コンクリート供試体を用いた一面せん断試験結果(3章)を用いた。

5.2.3 入力地震動

入力地震動は、1995年兵庫県南部地震時に一庫ダムで観測された上下流方向の地震動、および2000年鳥取県西部地震時に賀祥ダムで観測された上下流方向の時刻歴波形をもとに、その振幅特性をダムの照査用下限加速度応答スペクトルに適合するよう調整を行ったものを用いた(以下、「下限一庫波」、「下限賀祥波」と表記)。両波は、位相と継続時間が異なる。下限一庫波は主要動が短く大きな振幅が1つであるが(図-23)、下限賀祥波は下限一庫波に比べ主要動

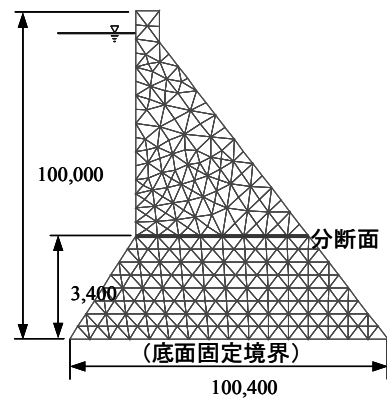


図-22 実ダムモデルのメッシュ図

表-17 実ダム解析パラメータ

解析パラメータ		設定値	設定法
堤体物性	単位体積重量 ρ	(kg/m^3)	$2,300 \text{ kg}/\text{m}^3$
	弾性係数 E	(N/mm^2)	$25,000 \text{ N}/\text{mm}^2$
	ポアソン比 ν		0.2
分断面パラメータ	鉛直方向ばね定数 kn	(N/mm^3)	$25,000 \text{ N}/\text{mm}^3$
	せん断方向ばね定数 ks	(N/mm^3)	$25,000 \text{ N}/\text{mm}^3$
	粘着力 C	(N/mm^2)	$0.439 \text{ N}/\text{mm}^2$
	せん断摩擦角 ϕ	($^\circ$)	57.8°
減衰	レイリー減衰	(%)	$10\sim 20\%$
	剛性減衰力		$0\sim 2.0 \times 10^{-4}$

一般的な値
弾性係数を参考に設定
一面せん断試験から設定
左記の幅を持たせ設定

3.3 コンクリートダム地震時終局耐力評価に関する研究

表-18 加速度応答倍率（入力地震動：下限一庫）

	レイリー減衰 h=10%			レイリー減衰 h=20%		
	振幅 1.0 倍	振幅 1.3 倍	振幅 1.6 倍	振幅 1.0 倍	振幅 1.3 倍	振幅 1.6 倍
ダム天端 最大加速度	1,842gal	1,713gal	2,934gal	1,224gal	1,985gal	2,342gal
ダム基礎 最大加速度	376gal	489gal	602gal	376gal	489gal	602gal
応答倍率 (天端/基礎)	4.9	3.5	4.9	3.3	4.1	3.9

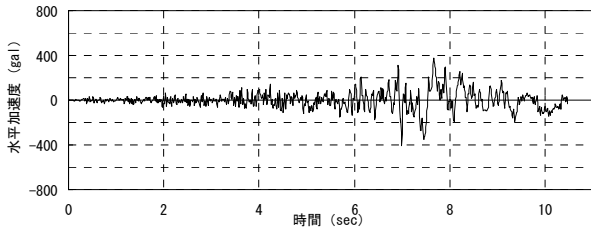
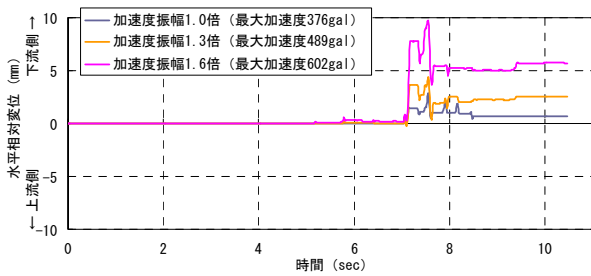
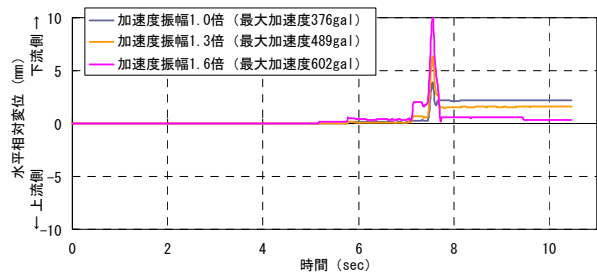


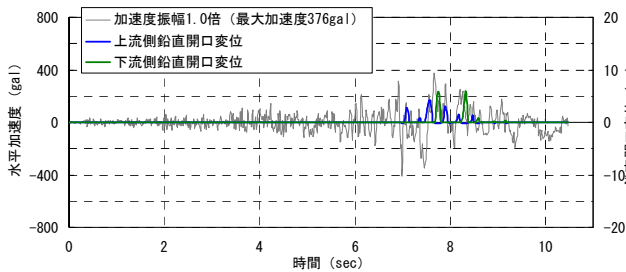
図-23 入力地震動（下限一庫 加速度振幅 1.0 倍）



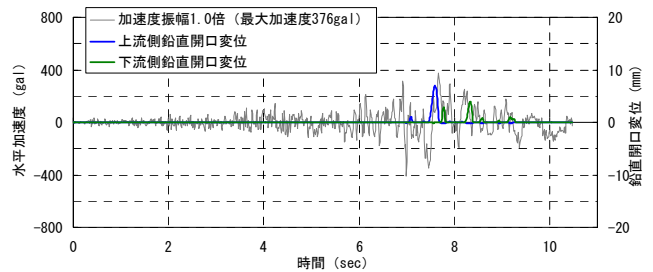
(1) 上部ブロック残留水平変位



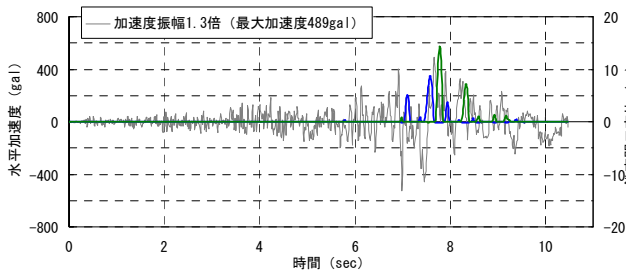
(1) 上部ブロック残留水平変位



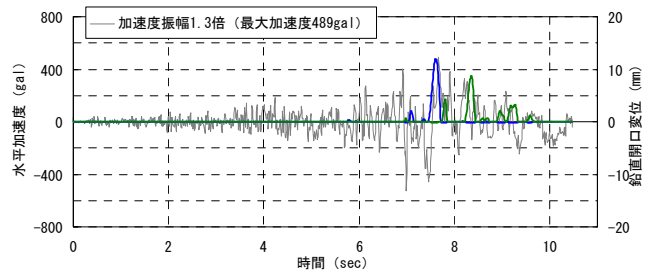
(2) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.0 倍）



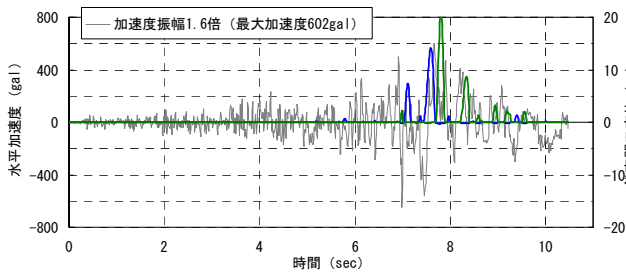
(2) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.0 倍）



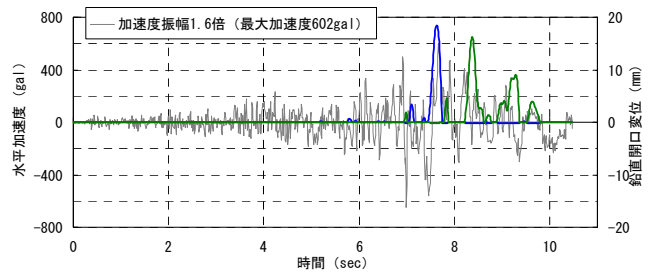
(3) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.3 倍）



(3) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.3 倍）



(4) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.6 倍）



(4) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.6 倍）

図-24 実ダムモデル解析結果
(入力地震動：下限一庫 レイリー減衰 h=10%)

図-25 実ダムモデル解析結果
(入力地震動：下限一庫 レイリー減衰 h=20%)

表-19 加速度応答倍率（入力地震動：下限賀祥）

	レイリー減衰 h=10%			レイリー減衰 h=20%		
	振幅 1.0 倍	振幅 1.4 倍	振幅 1.7 倍	振幅 1.0 倍	振幅 1.4 倍	振幅 1.7 倍
ダム天端 最大加速度	1,256gal	2,268gal	3,432gal	722gal	863gal	1,221gal
ダム基礎 最大加速度	351gal	492gal	597gal	351gal	492gal	597gal
応答倍率 (天端/基礎)	3.6	4.6	5.7	2.1	1.8	2.0

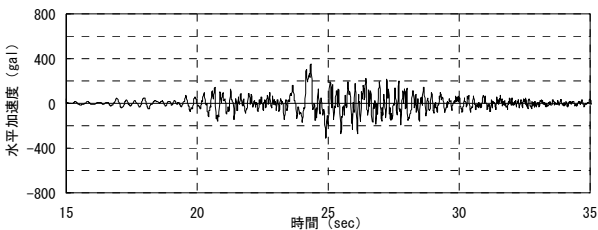
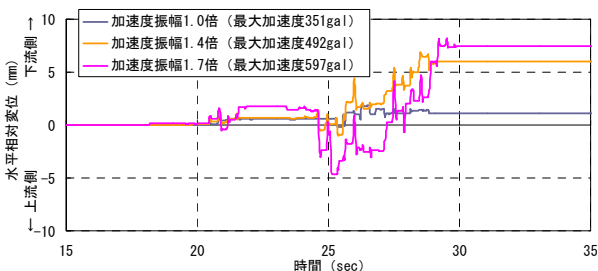
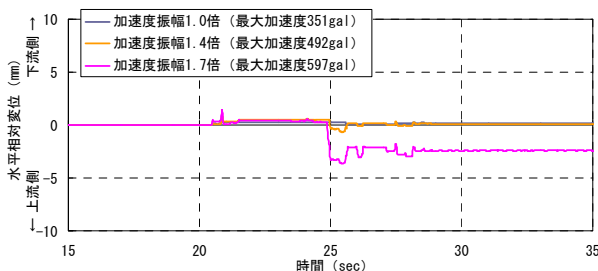


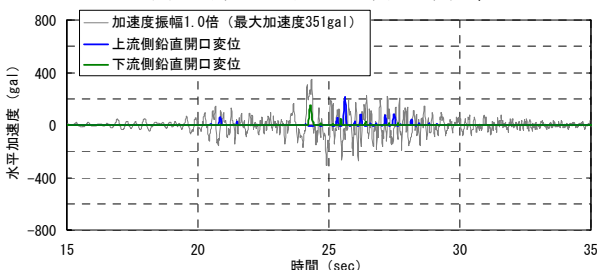
図-26 入力地震動（下限賀祥 加速度振幅 1.0 倍）



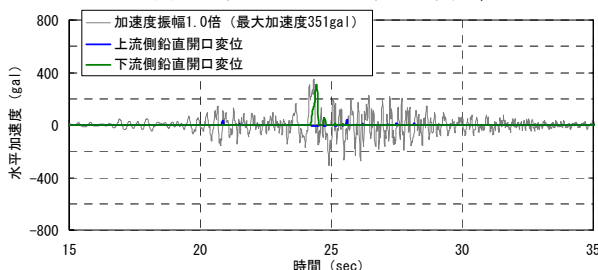
(1) 上部ブロック残留水平変位



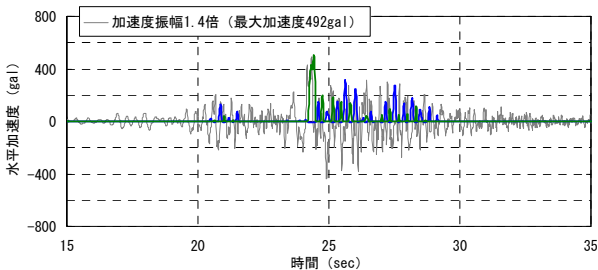
(1) 上部ブロック残留水平変位



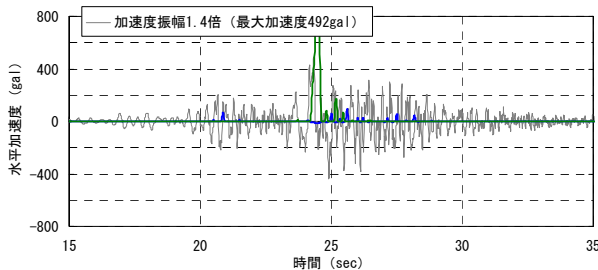
(2) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.0 倍）



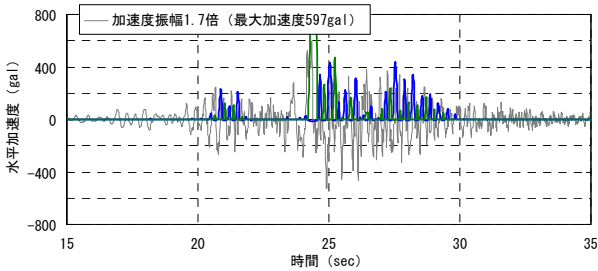
(2) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.0 倍）



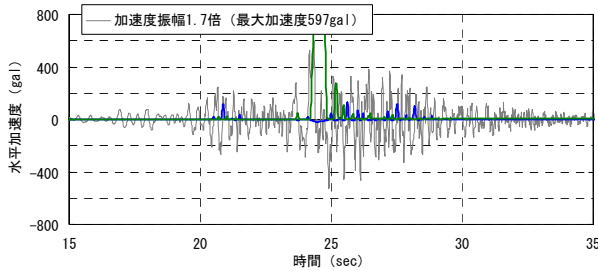
(3) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.4 倍）



(3) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.4 倍）



(4) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.7 倍）



(4) 上部ブロック鉛直開口変位（加速度振幅 1.7 倍）

図-27 実ダムモデル解析結果
（入力地震動：下限賀祥 レイリー減衰 h=10%）

図-28 実ダムモデル解析結果
（入力地震動：下限賀祥 レイリー減衰 h=20%）

が長く同規模の振幅が連続する(図-26)。なお、本解析では、これらの波形のほか、振幅倍率を下限一庫波で1.3倍、および1.6倍、下限賀祥波で1.4倍、および1.7倍に変化させたケースについても実施した。

5.3 解析結果

入力地震動を下限一庫波、レイリー減衰 $h=10\%$ としたときの解析結果(図-24)をみると、加速度振幅が概ね 400gal 程度となる波形がパルス的に入力(7sec, 7.5sec)されたときに、上部ブロックのロッキング挙動、および水平相対変位が発生した。

また、入力地震動を下限賀祥波、レイリー減衰 $h=10\%$ としたときの解析結果(図-27)をみると、加速度振幅が概ね 200gal 程度となる波形が連続的に入力(25sec 以降)されたときに、上部ブロックのロッキング挙動、および水平相対変位が発生した。また、加速度振幅が大きくなると、上部ブロックの鉛直相対変位量、および水平相対変位量が大きくなった。

また、レイリー減衰 $h=20\%$ としたときの解析結果(図-25, 28)をみると、減衰定数を $h=10\%$ から $h=20\%$ と大きくしたことにより、上部ブロックの鉛直相対変位量、および、水平相対変位量が小さくなった。また、上部ブロック天端の加速度応答倍率についても小さくなった(表-18, 19)。

ここで、レイリー減衰については、模型振動実験再現解析の結果、 $h=20\%$ 程度が概ね妥当と考えられた。ただ、模型振動実験時の上部ブロックはロッキング挙動が卓越していたため、再現解析で同定された $h=20\%$ 程度を実ダムモデル解析で用いることは、過大な減衰を考慮していることも考えられる。

なお、再現解析で上部ブロックのロッキング挙動に対して調整効果がみられた剛性減衰力 ($\beta=2.0 \times$

10^{-4}) をレイリー減衰と併用して解析を行ったところ、レイリー減衰のみの場合に比べ、上部ブロックの鉛直相対変位量、および水平相対変位量に違いはみられなかった。これは、本ケースの入力地震動による実ダムモデル解析では、ロッキング挙動がほとんど卓越しなかったことによるものと考えられる。

6. 地震時終局耐力の評価指標

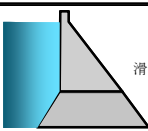
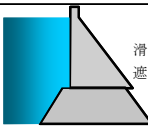
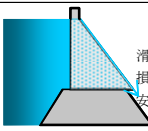
実ダムモデル解析(5章)より、亀裂貫通したダムにレベル2地震動に相当する地震波を入力した場合には、分離堤体ブロックが徐々に変位することが把握された。

分断ブロックの変位による上下ブロック間の水平相対変位量が上部ブロックが不安定化する程大きくなれば、制御できない貯水の流出が生じることとなる。これは、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)」において、レベル2地震動に対して求める耐震性能(貯水機能の維持)が確保されなくなる終局的な限界状態である。

なお、水平相対変位量が上部ブロックが不安定化する程大きくなり、ダムの貯水機能は維持される場合でも、上下ブロック間のずれにより堤体内に埋設されている止水板が損傷すれば、漏水量が大きく増加し、堤体の止水機能に支障をきたし、また、上下ブロックをアンカー工法により一体化させる対策工の実施も難しくなると考えられる。

これらのことから、本研究で着目した水平相対変位量を評価指標として、大規模地震により堤体の分断が生じる場合における重力式コンクリートダムの限界状態は、さらに、①修復可能性限界、②止水機能維持限界、③堤体の安定性限界(貯水機能維持限界)に分けて考えることができると考えられる(表-20)。また、終局時のダムの限界状態と水平相対変

表-20 終局時のダムの限界状態および評価指標

限界状態	評価指標 (設定理由)	上部ブロック挙動
① 修復可能性限界	堤体分断ブロックの残留変位がほぼゼロである ⇒ 亀裂面に相対変位がなければ補修可能であるとの判断	 滑动が起こらない状態
② 止水機能維持限界	堤体分断ブロックの最大変位(水平変位)が止水板(伸び能力)の許容変位量以内である ⇒ 堤体ブロックが相対的に変位したとしても止水板が機能を保つ範囲内ならば止水機能は維持されるとの判断	 滑动は起こるが遮水性は保たれる状態
③ 堤体の安定性限界 (貯水機能維持限界)	堤体分断ブロックの許容変位量(地震後の安定性を確保)以内である ⇒ 堤体ブロックの不安定化、下流への制御不能な貯水流出は生じないものとの判断	 滑动により止水性が損なわれるが安定性は保たれる状態

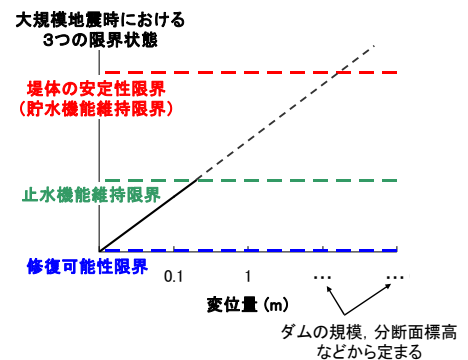


図-29 終局時のダムの限界状態と滑動変位量の関係

位置の関係を図-29 に示す。

7. まとめ

本研究では、コンクリートダム堤体の亀裂分断後における終局的な耐震安定性の評価手法の開発を目的として、まず、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、亀裂貫通後の堤体分断ブロックの地震時における変位挙動・メカニズムを把握した。そして、振動実験結果の再現解析を個別要素解析モデルにより行い、堤体分断ブロックの地震時挙動の再現方法を考案した。また、考案した解析手法を用い、レベル 2 地震動に相当する実地震波等を入力地震動として、亀裂貫通した実ダムモデル解析を実施することにより、堤体分断ブロックの大地震時における変位挙動を把握した。また、解析により得られた変位量を基に終局状態におけるダムの耐力評価指標の提案を行った。以下に結果をまとめる。

亀裂貫通後の堤体分断ブロックの地震時における変位挙動・メカニズムについては、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。その結果、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変位することがわかった。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変位することがわかった。上部ブロックは上述のサイクルの挙動を繰返しながら、加振継続中は徐々に下流方向に変位することがわかった。また、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。その結果、分断面には動的揚圧力が発生しており、上部ブロックに下流向きの慣性力が働く際に上部ブロックに作用する揚圧力が大きくなり、これにより分断面の摩擦抵抗が一時的に小さくなることで、上部ブロックの変位が生じやすくなることがわかった。さらに、動的揚圧力の大きさは上部ブロックの開口量または開口速度に応じて変化することを把握し、これらを説明変数とする動的揚圧力の算出式を作成した。その結果、動的揚圧力の算出式は簡易的なものではあるが、ある程度の妥当性を有していることを確認した。また、今後、解析において、本算出式を導入することで、分断面に動的揚圧力を作用させることができる可能性があるものと考えられた。

振動実験結果の再現解析については、分断面をモデル化した個別要素解析により行った。その結果、振動実験の上部ブロックの残留水平相対変位量やロッキング挙動をある程度再現できることがわかった。ただし、分断面の凹凸形状を考慮しないモデルでは、解析上、分断面のせん断剛性を一面せん断試験から得られる値より大きく設定する必要があることを把握した。

亀裂貫通した実ダムモデル解析については、再現解析により把握した解析手法を用いて行った。その結果、極めて強い地震動を受けた場合、堤体分離ブロックがロッキングを伴いながら徐々に滑動する結果が得られた。

以上の実験・解析結果を踏まえ、地震時終局耐力の評価指標として、3つの限界状態（修復可能性限界、止水機能維持限界、堤体の安定性限界（貯水機能維持限界））を提案した。

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），2005.3.
- 2) 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.
- 3) Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC Theory and Background, 2004.
- 4) Martin WIELAND and R. Peter BRENNER: EARTHQUAKE RESILIENCY OF LARGE CONCRETE DAMS: DAMAGE, REPAIR, AND STRENGTHENING CONCEPTS, 国際大ダム会議、2003年モントリオール大会、2003.
- 5) Takashi SASAKI, Ken-ichi KANENAWA, Yoshikazu YAMAGUCHI and Junya CHIBA: Effect of Ground Motion Level and Dam Shape on Damage in Concrete Gravity Dam during Earthquakes, 73rd Annual Meeting of ICOLD, Paper No.:093-W4, 2005.5.
- 6) 山口嘉一，佐々木隆，金縄健一，佐野貴之：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照査の考え方と方法，ダム技術，No. 227, pp. 30-38, 2005.8.

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 : Dam and Appurtenant Structures
Research Team, Hydraulic Engineering
Research Group

Author : YAMAGUCHI Yoshikazu
IWASHITA Tomoya
KIRINASHIZAWA Toru

Abstract: To evaluate the seismic performance of concrete gravity dams subjected to strong earthquakes such as the maximum credible earthquake, it is necessary to evaluate the seismic stability of the detached block of the dam body when tensile cracks in the dam body are predicted to penetrate from the upstream face to the downstream face.

Therefore, the purpose of this research is to establish an evaluation method of ultimate limit resistance of concrete gravity dams subjected to strong earthquakes considering dynamic behaviors of concrete block separated by dynamic tensile cracking.

First, shaking table tests of a dam-shaped model specimen with penetrated cracks were performed considering hydraulic loading from the reservoir.

Next, numerical simulations of the dynamic behavior of the detached block during the shaking table tests were performed based on the distinct element method (DEM).

Then, we performed numerical simulation of a 100-m concrete gravity dam separated by dynamic tensile cracking using the above-mentioned input physical properties for DEM to reproduce its seismic behavior.

Finally, we proposed the evaluation index of ultimate limit resistance of concrete gravity dams based on the earthquake-induced sliding of the detached block of the dam body obtained from the DEM analysis.

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