

3.7 大規模地震時におけるフィルダムの沈下量の評価方法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～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、佐藤弘行、林 直良

【要旨】

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）（2005年3月、国土交通省河川局）」では、フィルダムの耐震性能はすべり変形量をもとに評価することを基本としている。これは、地震動による揺すり込み沈下は圧密沈下量の先取り程度であり、すべり変形量に対して小さく、問題とならないとの判断に基づいている。しかし近年、地震時においてすべりを伴わない大きな沈下の発生が確認されており、地震時における揺すり込み沈下に対する検討の必要性が高まっている。本研究では、種々の条件下におけるフィルダム材料の動的強度特性を室内試験結果より明らかにするとともに、その結果を踏まえたフィルダムのすべり変形解析・累積損傷解析を実施し、実際のダムの挙動を再現することにより、大規模地震時におけるフィルダム沈下量の評価方法について提案することを目的とする。

平成 21 年度は、平均有効応力や飽和・不飽和条件を変化させて行われた動的強度試験結果を整理し、それらの条件が動的強度特性に与える影響を評価した。また、試験結果から得られた動的強度特性を用いて揺すり込み沈下量を算出し、各条件が揺すり込み沈下量に与える影響について考察した。さらに、密度のばらつきは強度や変形性のばらつきに影響を与えることから、まずは密度のばらつきを把握するため、現在建設中の中央コア型ロックフィルダムにおいて締固め層内の上層と下層の原位置密度試験を行い、密度のばらつきについての検討を行った。

キーワード：ロックフィルダム、大規模地震、耐震性能評価、すべり変形、累積損傷理論、原位置密度試験

1. はじめに

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）（2005年3月、国土交通省河川局）¹⁾」（以下、指針（案）と呼ぶ）では、フィルダムの耐震性能はすべり変形量をもとに評価することを基本としている。これは、大規模地震時の揺すり込み沈下量は圧密沈下量の先取り程度であり²⁾、すべり変形量よりも小さいという判断に基づいている。しかし、2004年の新潟県中越地震時に被害を受けたロックフィルダムの事後調査により、すべりを伴わない大きな沈下の発生した事例が明らかとなった³⁾。そのため、現在指針（案）で基本としているすべり変形解析以外の揺すり込み沈下解析などについても、その入力物性の設定や解析方法について検討を行い、より精度の高いフィルダムの耐震性能照査手法を確立する必要がある。本研究では、フィルダム堤体材料を用いて締固め度や飽和・不飽和条件等を変化させた動的強度試験を行い、それら諸条件が動的強度特性に与える影響を明らかにする。また、それらの結果を踏まえ、フィルダムのすべり変形解析や累積損傷解析を実施するとともに、実際のダムの大規模地震

時における沈下挙動を再現することで、大規模地震時におけるフィルダムの沈下量の評価方法について提案を行う。

平成 21 年度は、平均有効応力や飽和・不飽和条件を変化させて行われた動的強度試験結果を整理し、それらの条件が動的強度特性に与える影響を評価した。また、試験結果から得られた動的強度特性を用いて揺すり込み沈下量を算出し、各条件が揺すり込み沈下量に与える影響について考察した。さらに、密度のばらつきは強度や変形性のばらつきに影響を与えることから、まずは密度のばらつきを把握するため、現在建設中の中央コア型ロックフィルダムにおいて締固め層内の上層と下層の原位置密度試験を行い、密度のばらつきについての考察を行った。

2. 種々の条件が動的強度特性に与える影響

湛水時のロックフィルダムにおいて、堤体内には飽和・不飽和領域が混在しており、さらに、湛水時の堤体内の有効拘束圧は、表面からの深度に応じて変化する。堤体材料の動的強度特性は、飽和・不飽和条件や有効拘束圧に影響を受けるものと考えられる。

本章では、ロックフィルダムの堤体材料に対して飽和・不飽和条件や有効拘束圧を変化させて実施された動的強度試験結果を整理し、それらの条件が動的強度特性に与える影響を評価する。さらに、建設中のロックフィルダムのロック材料を用いて飽和・不飽和条件下における動的強度試験を実施する。

2.1 拘束圧の影響

松本らは、三国川ダムのロック材料を対象に、数種の平均有効応力 σ'_m に対して繰返し三軸試験を実施した⁴⁾。表-1 に試験材料の概要を、表-2 に試験条件を示す。図-1 に σ'_m ごとの累積ひずみ特性を示す。 σ'_m が小さいほど、同一繰返し回数において、同じひずみを発生させるためのせん断応力比は大きくなる。これより、動的強度は拘束圧が小さいほど大きくなるのがわかる。

2.2 飽和・不飽和条件の影響

佐藤・山口は、建設中のAダム（中央土質遮水壁型ロックフィルダム）のコア材料を対象に飽和・不飽和条件で繰返し三軸試験を実施しており⁵⁾、表-3 に試験材料の概要を、表-4 に試験条件を示す。図-2 に飽和・不飽和両条件における累積ひずみ特性を示す。不飽和条件では、1つの供試体についてせん断応力比を変化させた試験のため、試験精度に問題は残るものの、発生するひずみは、飽和条件に対してかなり小さいことがわかる。

2.3 飽和・不飽和条件におけるロック材料の動的強度試験

Aダムのロック材料を対象に、飽和・不飽和条件下において繰返し三軸試験を実施した。

(1) 試験材料

使用した材料は、Aダムのロック材料である石英安山岩である。材料の粒度特性を図-3に、物理特性を表-5に示す。ロック材料は、相対密度 $Dr=85\%$ となるように締固めた材料を用いた。

表-1 試験材料（三国川ダムのロック材料）の概要

材料	ロック
材質	斑れい岩
最大粒径 (mm)	63.5
作製条件	$Dr=85\%$
間隙比 e	0.206
乾燥密度 (g/cm ³)	2.430

表-2 三国川ダムのロック材料の繰返し三軸試験の条件

材料	ロック
供試体寸法 (cm)	直径30×高さ60
飽和状態	飽和
主応力比 σ_1/σ_3	2.0
平均有効応力 σ'_m (N/mm ²)	0.098, 0.196, 0.392, 0.588
排水条件	非排水

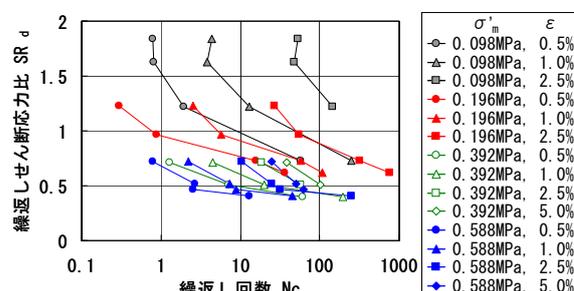


図-1 三国川ダムのロック材料の累積ひずみ特性

表-3 試験材料（Aダムのコア材料）の概要

材料	コア
材質	細粒材：段丘堆積物 粗粒材：ダムサイト掘削材
最大粒径 (mm)	19
作製条件	D値=95%
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.685
最適含水比 w_{opt} (%)	18.3

表-4 Aダムのコア材料の繰返し三軸試験の条件

材料	コア	
供試体寸法 (cm)	直径15×高さ30	
飽和状態	飽和	不飽和
主応力比 σ_1/σ_3	2.0	2.0
平均有効応力 σ'_m (N/mm ²)	0.261	0.261
排水条件	非排水	排気

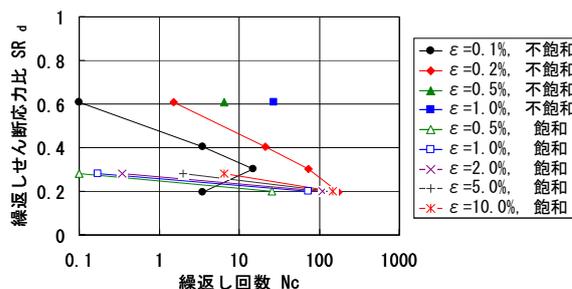


図-2 Aダムのコア材料の累積ひずみ特性

(2) 試験条件

飽和・不飽和それぞれの試験条件を表-6 に示す。

飽和条件での側方応力 σ_1 は、堤高 100m のロックフィルダムモデルの上流側ロックゾーンの湛水時における平均的な最小主応力をもとに、不飽和条件の側方応力 σ_1 は、下流側ロックゾーンの湛水時における平均的な最小主応力をもとに設定した。圧密応力比 σ_1/σ_3 は 2.0 とした。

(3) 試験結果

図-4 に飽和条件における軸差応力、軸ひずみおよび

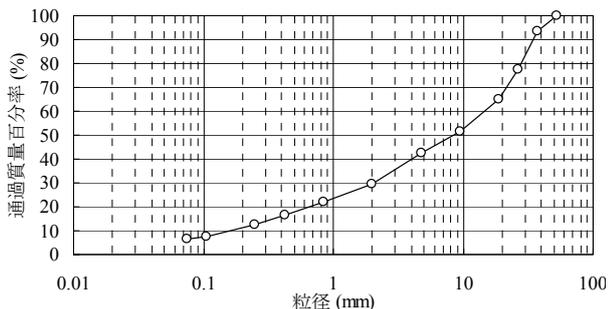


図-3 ロック材料の粒度特性 (試験粒度)

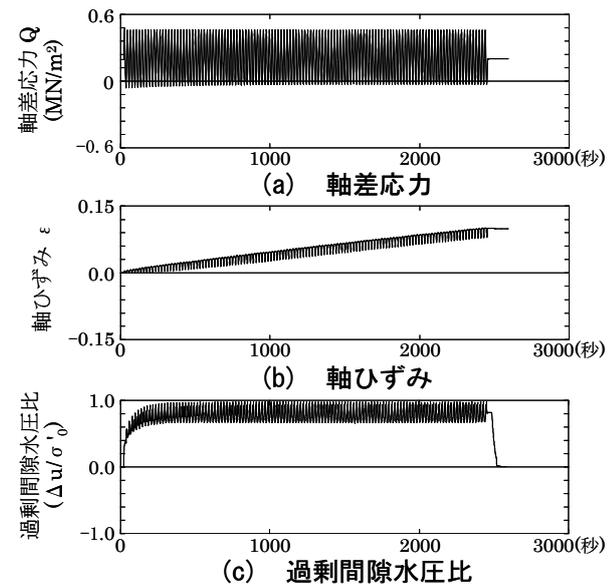


図-4 繰返し試験結果の時刻歴
($\sigma'_m = 0.262 \text{ MPa}$, $SR_d = 0.490$)

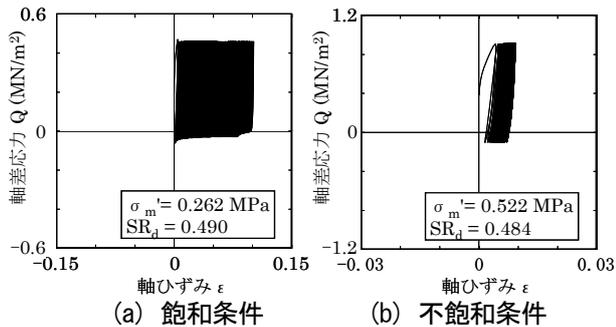


図-6 応力-ひずみ関係

過剰間隙水圧比の時系列の一例を示す。

図-5 に不飽和条件における軸差応力、軸ひずみおよび過剰間隙水圧比の時系列の一例を示す。

表-5 試験材料 (A ダムロック材料) の物理特性

材料		ロック
材質		石英安山岩
最大粒径 (mm)		53
絶乾比重	9.5mm以上	2.396
	9.5mm以下	2.596
最大乾燥密度 (g/cm³)		2.133
最小乾燥密度 (g/cm³)		1.642
供試体作製条件		Dr=85%
乾燥密度 (g/cm³)		2.041

表-6 A ダムロック材料の繰返し三軸試験の条件

材料	ロック	
供試体寸法 (cm)	直径30×高さ60	
飽和状態	飽和	不飽和
側方応力 σ_1 (N/mm²)	0.196	0.392
主応力比 σ_1/σ_3	2.0	2.0
平均有効応力 σ'_m (N/mm²)	0.262	0.522
排水条件	非排水	非排気
せん断応力比 SR_d	0.393, 0.490, 0.698, 0.942	0.484, 0.603, 0.637

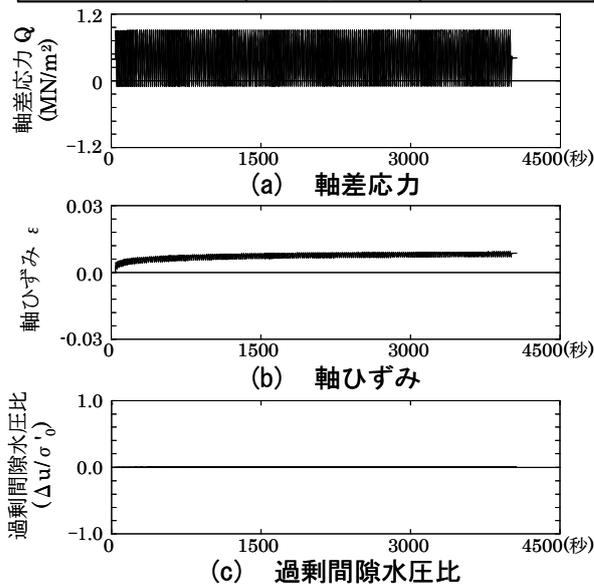


図-5 繰返し試験結果の時刻歴
($\sigma'_m = 0.522 \text{ MPa}$, $SR_d = 0.484$)

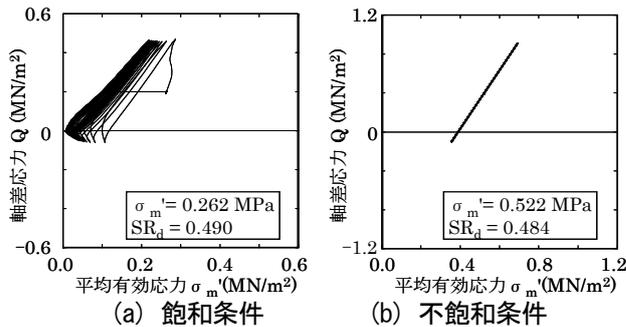


図-7 応力経路

図-6には飽和・不飽和の各条件における応力-ひずみ関係を、図-7には軸差応力と平均有効応力の関係を示す。

飽和材料においては、繰返し载荷回数増加に伴い軸ひずみが圧縮側へ累積しており、繰返し回数121回で累積ひずみが10%に達した。一方、不飽和材料においては、载荷回数増加しても累積ひずみはあまり増加しない。繰返し回数200回での累積ひずみは約0.93%と非常に小さな値となった。

飽和材料の応力経路は、繰返し载荷に伴い有効応力が減少するが、不飽和材料では過剰間隙水圧が発生しないため、繰返し载荷回数に関わらず応力経路は変化しない。

図-8に飽和・不飽和両条件における累積ひずみ特性を示す。不飽和条件で発生するひずみは、飽和条件に対してかなり小さく、繰返し载荷に伴うひずみの増加もあまり見られない。

3. 中央土質遮水壁型ロックフィルダム (ECRD) の地震変形解析

2章の実験的検討結果を基に、湛水時の有効拘束圧や飽和・不飽和条件を考慮した堤体材料の動的強度特性を設定し、累積損傷解析を実施することでそれらの条件がECRDの揺すり込み沈下量に与える影響を検討した。

3.1 検討手法の概要

本研究では、築堤解析および湛水解析により堤体内の静的応力分布を算出し、これを初期応力とした動的解析を行い、地震時の堤体応答を求めた⁶⁾。築堤解析は、Duncan-Changモデルによる非線形弾性解析とした。湛水解析はコアゾーンのみを対象とした浸透流解析を行い、その結果と築堤解析の結果を組み合わせることで湛水時の応力を求める方法とした。動的解析には等価線形化法による複素応答解析を用いており、堤体のみをモデル化し底面境界を固定境界としている。累積損傷解析は、地震による永久変位が繰返し応力の作用により発生する残留ひずみに起因するという考え方に基づいている。解析フロー⁷⁾を図-9に示す。

3.2 解析条件

3.2.1 解析モデル

解析モデルを図-10に示す。モデルダムは堤高100m、天端幅10mのECRDであり、コアゾーンの上下流面勾配は1:0.2、フィルタゾーンの上流面勾配は1:0.35と

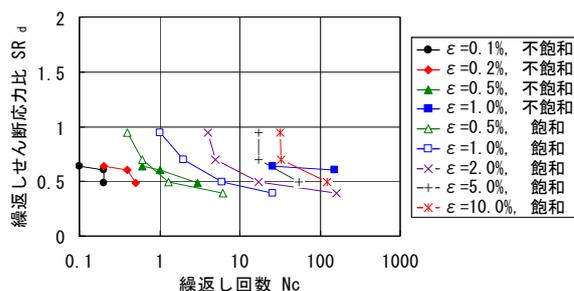


図-8 Aダムのロック材料の累積ひずみ特性

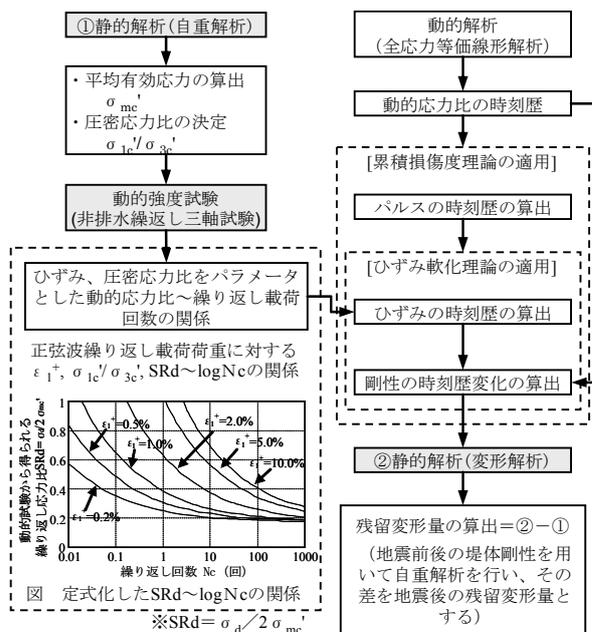


図-9 累積損傷解析の流れ⁷⁾

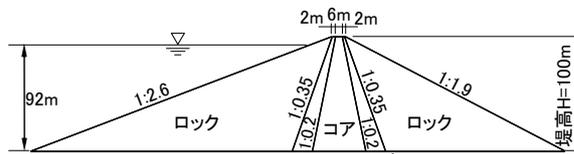


図-10 解析モデル

した。ロックゾーンは上流面勾配を1:2.6、下流面勾配を1:1.9とした。貯水位は、一般的なロックフィルダムの常時満水位を想定し、92mとした。

3.2.2 解析物性値

本検討では、平成20年度の研究において使用した物性T^{4),8)}および物性S^{9),10)}の組合せの内、最も揺すり込み沈下量が大きかったケース2(物性の組合せ2)の動的解析結果を用い、得られた動的応力に対して動的強度特性を種々に変化させた累積損傷解析を実施し、揺すり込み沈下量に与える影響を検討した。

さらに、2章の試験に使用したAダムの堤体材料に対する試験結果より、物性Aを設定した。ただし、密度については、その解析結果に与える影響は小さいと

表-7 築堤解析に用いる物性値

物性	層	湿潤密度 ρ_s (g/cm ³)	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	弾性係数			ポアソン比			c (MPa)	ϕ (°)
				K	n	R_r	G	F	D		
物性T	コア	1.99	2.06	502	0.471	1.148	0.288	0.134	10.91	0.030	34.5
	フィルタ	2.06	2.23	1758	0.193	0.796	0.355	0.079	10.69	0.090	40.0
	ロック	2.07	2.36	2200	0.400	1.060	0.472	0.360	11.50	0.000	43.0
物性S	コア	1.99	2.06	141	0.941	1.039	0.397	0.098	7.96	0.030	36.0
	フィルタ	2.06	2.23	608	0.419	0.998	0.252	0.173	11.16	0.043	37.0
	ロック	2.07	2.36	1086	0.218	0.767	0.221	0.200	14.50	0.150	44.0
物性A	コア	1.99	2.06	256	0.564	0.785	0.228	0.100	8.30	0.02	36.0
	フィルタ	2.06	2.23	997	0.317	1.042	0.433	0.344	7.21	0.02	37.0
	ロック	2.07	2.36	1130	0.131	0.744	0.343	0.183	10.68	0.06	41.5
基礎地盤		—	—	1255(MPa)			0.2			—	—

表-8 動的解析に用いる物性値

物性	層	初期せん断剛性 G_0 (MPa) ^{注1)}	ポアソン比	逸散減衰 (%)
物性T	コア	$632 \sigma_m^{0.60}$	澤田式 ^{注2)}	10
	フィルタ	$678 \sigma_m^{0.63}$		
	ロック	$783 \sigma_m^{0.50}$ (不飽和) $790 \sigma_m^{0.60}$ (飽和)		
物性S	コア	$\{299(2.17-e)^2/(1+e)\} \sigma_m^{0.7}$	澤田式 ^{注2)}	10
	フィルタ	$\{367(2.17-e)^2/(1+e)\} \sigma_m^{0.6}$		
	ロック	$294.879 \sigma_m^{0.444}$ (不飽和) $334.891 \sigma_m^{0.496}$ (飽和)		
物性A	コア	$628.347 \sigma_m^{0.665}$ (不飽和) $523.434 \sigma_m^{0.580}$ (飽和)	澤田式 ^{注2)}	10
	フィルタ	$737.070 \sigma_m^{0.680}$ (不飽和) $474.474 \sigma_m^{0.479}$ (飽和)		
	ロック	$737.070 \sigma_m^{0.680}$ (不飽和) $474.474 \sigma_m^{0.479}$ (飽和)		

注1) σ_m : 平均有効主応力, $\sigma_m = \{\sigma_1 + \sigma_3 + \nu(\sigma_1 + \sigma_3)\}/3$; e: 間隙比
e = 0.345: コア材, e = 0.164: フィルタ材, e = 0.284: ロック材

注2) ポアソン比(澤田式)

$\nu = 0.375 - 0.006Z^{0.58}$: フィルタ、ロック材(浸潤面以浅)

$\nu = 0.490 - 0.001Z^{0.95}$: フィルタ、ロック材(浸潤面以深)

$\nu = 0.450 - 0.006Z^{0.60}$: コア材

ここに、Z(m)は堤体表面からの深度である。

考え、物性Tのそれを物性Aにも与えている。

(1) 築堤・湛水解析

表-7に築堤解析に用いる物性値を示す。物性Aの弾性係数は、コア、フィルタ材料では物性Tと物性Sの中間的な値、ロック材料は物性Sよりもわずかに小さい。物性Aのポアソン比は、コア材料は物性T、物性Sよりも小さく、フィルタ材料は物性Tおよび物性Sよりも拘束圧の影響が大きい。ロック材料は物性Tおよび物性Sよりも拘束圧の影響が小さい。基礎地盤の弾性係数およびポアソン比は、C_M級岩盤を想定して設定した。浸透流解析に用いるコア材料の透水係数は1.0 × 10⁻⁶cm/sとした。

(2) 動的解析

表-8および図-11に等価線形化法による動的解析に用いる物性値を示す。物性AおよびTは、物性S物性Sに比べて初期せん断剛性が小さく、動的変形特性における大ひずみ領域の剛性も小さい。なお、本研究の等価線形化法による動的解析は堤体のみをモデル化しているため、基礎地盤でのエネルギー逸散を等価逸散減衰率として、材料減衰率に一律10%を上乗せした。

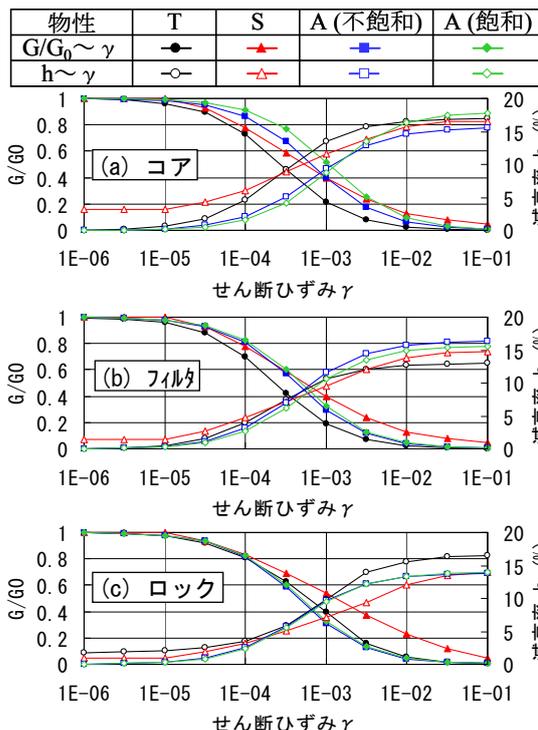


図-11 $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ の関係

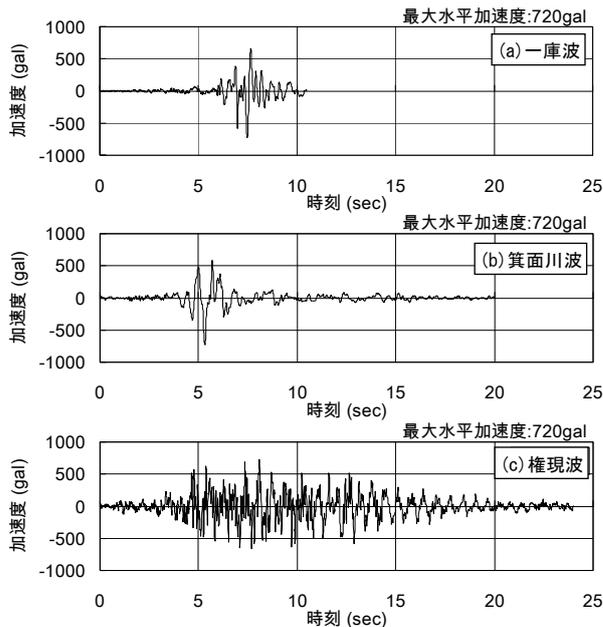


図-12 入力地震動の加速度時刻歴 (水平(上下流)方向, 720gal 引伸ばし)

入力地震動については、波形の周波数特性の影響を検討するために兵庫県南部地震時に観測された一庫波、箕面川波および権現波の3波を原波とし、その上下流方向の加速度の最大値が720gal¹¹⁾となるように振幅のみを引き伸ばし、鉛直方向も上下流方向の倍率に合わせて振幅のみを引き伸ばしたものをを用いた。さらに、入力地震動の最大水平加速度の影響を検討するために、最大水平加速度を500、1000galに引き伸ばしたケースについても検討を行った。図-12に、最大水平加速度を720galに引き伸ばした入力地震動の3波形の上下流方向の加速度時刻歴を、図-13にそれら3波形の加速度応答スペクトルを示す。

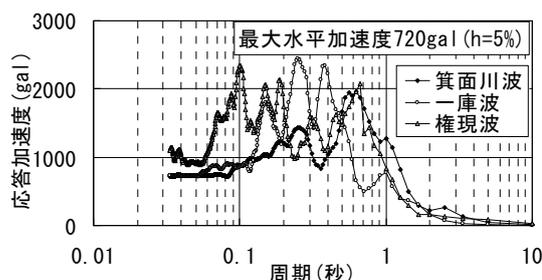


図-13 加速度応答スペクトル
(水平(上下流)方向)

(3) 累積損傷解析

累積損傷解析では、拘束圧の影響については物性 T を用いて検討し、飽和・不飽和条件の影響については物性 A を用いて検討する。

物性 T のコア材料およびフィルタ材料は、米崎ら⁸⁾が ECRD のコア材料および砂礫フィルタ材料に対して行った非排水繰返し三軸試験結果を用いる。ロック材料は、2章において松本ら⁴⁾が ECRD のロック材料に対して平均有効応力を変化させて行った繰返し非排水三軸試験結果のうち、平均有効応力 $\sigma'_m = 0.098, 0.196, 0.588\text{MPa}$ の試験結果を用いて設定した。図-14に物性 T の累積ひずみ特性を示す。

物性 A は、A ダムの堤体材料に対して実施した繰返し三軸試験結果より作成した。ただし、A ダムのフィルタ材料に対しては、不飽和条件での繰返し三軸試験を実施していないため、フィルタ材料の不飽和条件での累積ひずみ特性は、飽和条件でのロック材料とフィルタ材料の累積ひずみの比を、不飽和ロック材料の累積ひずみに乗ることにより推定した。図-15に物性 A の累積ひずみ特性を示す。

表-9に、各材料における動的強度特性として、定式化した累積ひずみ特性の関係式を示す。

3.2.3 解析ケース

解析ケースを表-10に示す。解析ケースは、平成20年度の検討において累積損傷解析による沈下量が最も大きくなったケース2(物性の組合せ2)に対する動的解析結果に対して、湛水時の平均有効応力および飽和・不飽和条件が揺すり込み沈下量に与える影響を評価することを目的に設定した。Case2 i および ii は、湛水時の平均有効応力の影響を検討するケースであり、Case2 i は、物性 T の $\sigma'_m = 0.588\text{MPa}$ の物性をロックゾ

表-9 累積ひずみ特性

物性	ゾーン	近似式	
T	コア	$SR_d = 0.43 \epsilon^{0.50} \times Nc^{-0.33} + 0.16$	
	フィルタ	$SR_d = 0.59 \epsilon^{0.47} \times Nc^{-0.33} + 0.16$	
	ロック①	$\sigma'_m > 0.196\text{MPa}$ $SR_d = 0.65 \epsilon^{0.50} \times Nc^{(-0.34 \epsilon^{0.01})} + 0.20$	
	ロック②	$0.098 < \sigma'_m \leq 0.196\text{MPa}$ $SR_d = 1.05 \epsilon^{0.70} \times Nc^{(-0.25 \epsilon^{0.01})} + 0.25$	
	ロック③	$\sigma'_m \leq 0.098\text{MPa}$ $SR_d = 2.00 \epsilon^{0.80} \times Nc^{(-0.28 \epsilon^{0.01})} + 0.26$	
A	コア	不飽和	$SR_d = 2.15 \epsilon^{0.90} \times Nc^{(-0.51 \epsilon^{0.08})} + 0.19 \epsilon^{0.25}$
		飽和	$SR_d = 0.23 \epsilon^{0.60} \times Nc^{(-0.40 \epsilon^{0.35})} + 0.19 \epsilon^{0.21}$
	フィルタ	不飽和	$SR_d = 0.44 \epsilon^{0.07} \times Nc^{-0.17} + 0.06 \epsilon^{1.46}$
		飽和	$SR_d = 0.22 \epsilon^{0.87} \times Nc^{(-0.45 \epsilon^{0.09})} + 0.21 \epsilon^{0.15}$
	ロック	不飽和	$SR_d = 0.47 \epsilon^{0.07} \times Nc^{-0.17} + 0.37 \epsilon^{1.46}$
		飽和	$SR_d = 0.57 \epsilon^{2.01} \times Nc^{(-0.96 \epsilon^{0.17})} + 0.38 \epsilon^{0.03}$

注) ϵ : 軸ひずみ(%)

ーン全域に適用したケースであり、Case2 ii は、ロックゾーンの累積ひずみ特性を、図-16に示す初期平均有効応力に応じて割り当てたケースである。Case2 iii および iv は飽和・不飽和条件の影響を検討するケースであり、物性 A の飽和物性値のみを用いた Case2 iii と、飽和・不飽和それぞれに対応する物性値を割り当てた Case2 iv を設定した。

また、静的・動的解析および累積損傷解析の物性値を全て物性 A としたケースについても Case4 として設定した。

なお、それぞれのケースにおいて、入力地震動を3波設定しており、さらに、平成20年度において累積損傷解析による沈下量が大きくなった権現波については、最大加速度の影響を検討するケースを追加している。

3.3 解析結果

解析結果の一覧を表-11に示す。収束剛性による固有周期は、物性の組合せ2で0.78~0.99秒、物性の組合せ4で1.37~2.05秒であり、応答特性が物性の組合せに影響を受けていることがわかる。天端最大上下流方向加速度は、物性の組合せ2の805~1394galに対し、物性の組合せ4では354~528galとかなり小さな値となり、物性の組合せの影響を受けていることがわかる。

累積損傷解析による最大沈下量は、Case4の下流側を除き、一庫波<箕面川波<権現波の順に大きくなる。権現波における最大加速度の影響は、Case2 i ~ Case2 iv では、最大加速度が大きいほど沈下量も大きくなる。

Case4 については、最大加速度に関わらず最大沈下量にはあまり差は見られない。

累積損傷解析による最大水平変量は、全てのケースで上流側への変位となっており、Case2 ii の天端を除き、一庫波<箕面川波<権現波の順に大きくなる。権現波における最大加速度の影響は、Case2 i ~Case2iv では、最大加速度が大きいほど水平変位量も大きくなる。Case4 については、最大加速度に関わらず水平変位量にはあまり差は見られない。

次に、拘束圧、飽和・不飽和条件および物性の組合せが沈下量および水平変位量に与える影響を調べるため、横軸に、各条件を考慮しない物性を与えたケース（拘束圧の影響：Case2 i、飽和・不飽和の影響：Case2 iii、物性の組合せの影響：Case2iv）、縦軸に、各条件を考慮した物性を与えたケース（拘束圧の影響：Case2

ii、飽和・不飽和の影響：Case2iv、物性の組合せの影響：Case4）の変形量をプロットした。

図-17 に最大沈下量に関する比較図を示す。最大沈下量は初期平均有効応力や飽和・不飽和条件に影響を受ける。初期平均有効応力を考慮した Case2 ii の沈下量は、初期平均有効応力を考慮しない Case2 i に比べて全ての入力波形において小さく、Case2 i の 68~79% となった。飽和・不飽和条件を考慮した Case2iv の沈下量は、飽和条件のみによる物性を用いた Case2iii に比べて全ての波形において小さく、Case2 iii の 77~88% となった。Case4 の最大沈下量は非常に小さく、Case2iv の 30%以下となった。これは、Case4 に用いた物性 A のせん断剛性が、物性 S に比べてかなり小さいため、動的解析において発生する応力が小さくなったことが要因と考えられる。

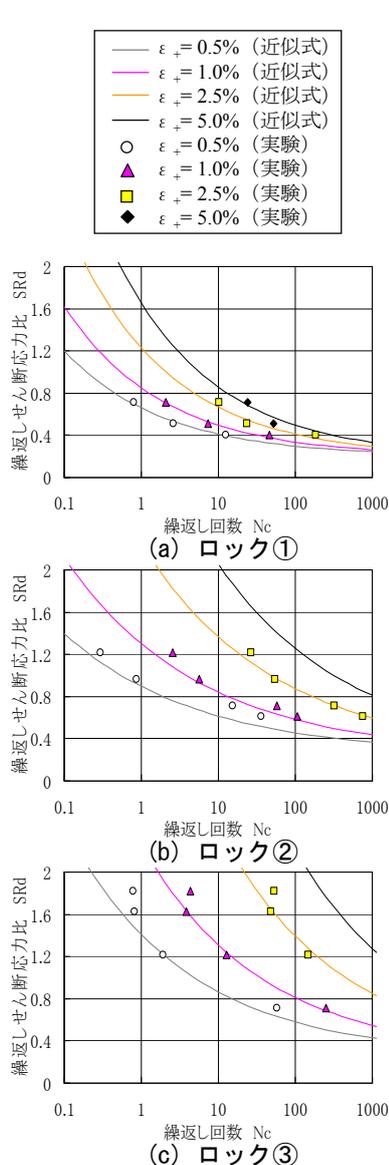


図-14 物性Tの累積ひずみ特性 (ロック材料)

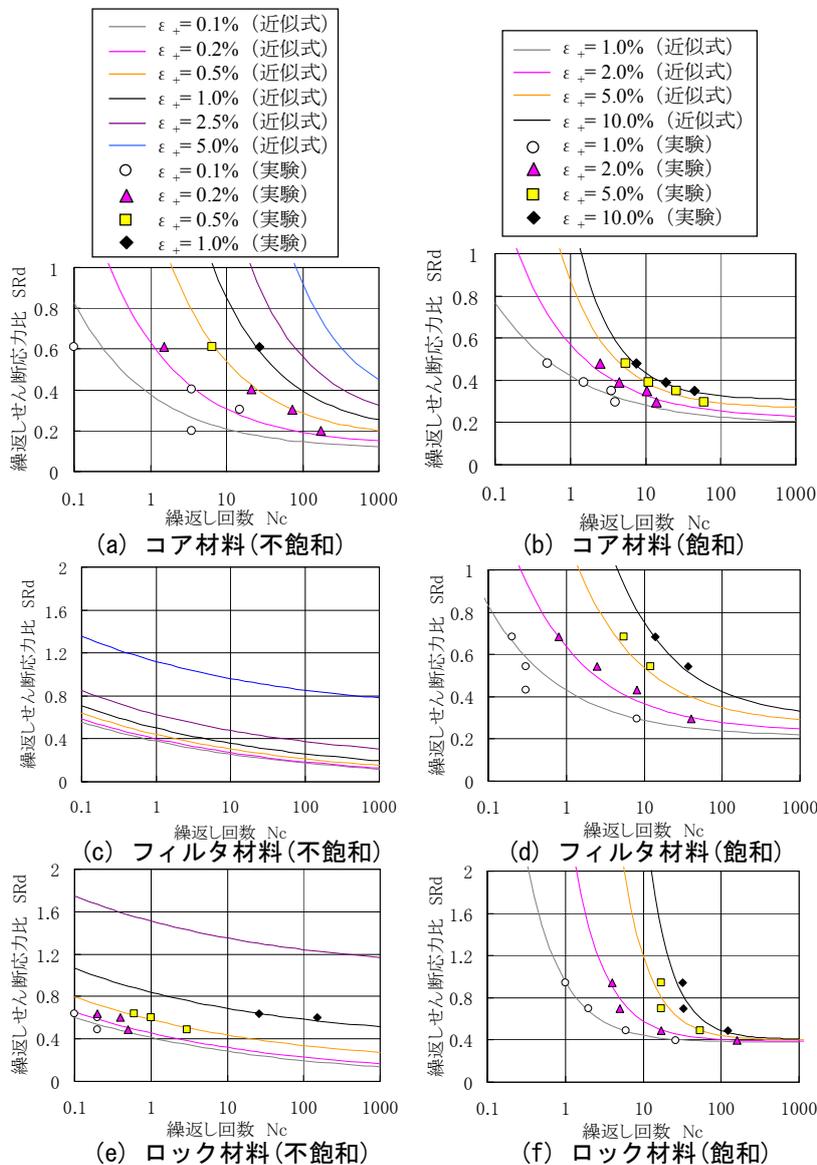


図-15 物性Aの累積ひずみ特性

表-10 解析ケース一覧

ケース	物性の組合せ	密度	ダンカン チャン パラメータ	初期 剛性 G ₀	G/G ₀ ~γ, h~γ	入力 波形	最大 加速度 (gal)	動的 強度 特性	動的強度特性の 与え方			備考
									コア	フィルタ	ロック	
2-0 i	2	T	S	S	S	一庫波	720	T	物性T	全て ロック①	拘束圧の影響	
2-1 i		T	S	S	S	箕面川波	720	T				
2-2 i		T	S	S	S	権現波	720	T				
2-5 i		T	S	S	S	権現波	500	T				
2-8 i		T	S	S	S	権現波	1000	T				
2-0 ii	2	T	S	S	S	一庫波	720	T	物性T	拘束圧に 応じて設定		
2-1 ii		T	S	S	S	箕面川波	720	T				
2-2 ii		T	S	S	S	権現波	720	T				
2-5 ii		T	S	S	S	権現波	500	T				
2-8 ii		T	S	S	S	権現波	1000	T				
2-0 iii	2	T	S	S	S	一庫波	720	A	全領域に飽和物性値 を適用	飽和・不飽和の影響		
2-1 iii		T	S	S	S	箕面川波	720	A				
2-2 iii		T	S	S	S	権現波	720	A				
2-5 iii		T	S	S	S	権現波	500	A				
2-8 iii		T	S	S	S	権現波	1000	A				
2-0 iv	2	T	S	S	S	一庫波	720	A	飽和・不飽和を 区別して設定			
2-1 iv		T	S	S	S	箕面川波	720	A				
2-2 iv		T	S	S	S	権現波	720	A				
2-5 iv		T	S	S	S	権現波	500	A				
2-8 iv		T	S	S	S	権現波	1000	A				
4-0	4	T	A	A	A	一庫波	720	A	飽和・不飽和を 区別して設定	材料特性の影響		
4-1		T	A	A	A	箕面川波	720	A				
4-2		T	A	A	A	権現波	720	A				
4-5		T	A	A	A	権現波	500	A				
4-8		T	A	A	A	権現波	1000	A				

表-11 解析結果一覧

ケース	物性の 組合せ	波形	最大 加速度	固有周期 (秒)		天端最大 加速度(gal)		累積損傷解析結果*1)					
				初期 剛性	収束 剛性	上下流 方向	鉛直 方向	最大沈下量			最大水平変位*2)		
								上流側 (cm)	天端 (cm)	下流側 (cm)	上流側 (cm)	天端 (cm)	下流側 (cm)
2-0 i	2	一庫	720	0.572	0.838	1351	1168	75.6	72.4	36.7	-107.7	-38.0	-13.9
2-1 i		箕面川	720	〃	0.908	1394	1003	142.3	139.1	98.6	-144.7	-47.4	-21.0
2-2 i		権現	720	〃	0.851	1057	636	226.7	212.8	123.4	-275.4	-101.1	-49.9
2-5 i		権現	500	〃	0.803	805	452	138.2	126.7	66.6	-187.0	-63.0	-24.8
2-8 i		権現	1000	〃	0.907	1331	935	322.8	299.7	181.9	-356.6	-145.5	-79.1
2-0 ii	2	一庫	720	0.572	0.838	1351	1168	50.8	55.4	30.5	-35.0	-16.0	-10.4
2-1 ii		箕面川	720	〃	0.908	1394	1003	109.1	112.8	85.5	-47.3	-14.7	-12.0
2-2 ii		権現	720	〃	0.851	1057	636	157.6	161.7	105.4	-76.9	-31.3	-24.4
2-5 ii		権現	500	〃	0.803	805	452	91.6	94.5	55.7	-48.2	-18.1	-9.4
2-8 ii		権現	1000	〃	0.907	1331	935	225.7	230.7	157.3	-109.4	-51.5	-43.4
2-0 iii	2	一庫	720	0.572	0.838	1351	1168	117.4	122.3	86.8	-68.7	-31.8	-27.3
2-1 iii		箕面川	720	〃	0.908	1394	1003	189.3	193.8	159.6	-75.0	-49.4	-48.0
2-2 iii		権現	720	〃	0.851	1057	636	368.3	377.5	243.4	-169.8	-120.5	-107.7
2-5 iii		権現	500	〃	0.803	805	452	227.3	228.7	135.5	-137.5	-83.5	-71.9
2-8 iii		権現	1000	〃	0.907	1331	935	489.3	498.7	341.1	-210.8	-157.8	-146.5
2-0 iv	2	一庫	720	0.572	0.838	1351	1168	100.6	96.6	69.6	-69.7	-44.9	-38.6
2-1 iv		箕面川	720	〃	0.908	1394	1003	171.4	171.0	145.8	-75.8	-57.6	-56.1
2-2 iv		権現	720	〃	0.851	1057	636	295.0	273.2	190.4	-173.0	-148.7	-142.2
2-5 iv		権現	500	〃	0.803	805	452	196.6	175.9	120.8	-139.6	-90.6	-79.5
2-8 iv		権現	1000	〃	0.907	1331	935	381.9	351.2	246.0	-213.8	-205.4	-197.5
4-0	4	一庫	720	0.750	1.883	354	434	29.2	25.6	10.2	-18.8	-19.6	-14.7
4-1		箕面川	720	〃	2.049	370	773	41.5	42.5	31.4	-33.1	-21.2	-16.5
4-2		権現	720	〃	1.572	528	698	48.2	46.5	29.9	-58.8	-29.9	-22.4
4-5		権現	500	〃	1.374	450	535	42.9	40.1	21.2	-42.6	-30.8	-24.0
4-8		権現	1000	〃	1.965	523	684	39.4	40.4	29.4	-59.1	-19.5	-13.6

*1) 天端：天端10m区間, 上流：天端を除く上流法面全面, 下流：天端を除く下流法面全面

*2) 下流方向を正とする

図-18 に最大水平変位量に関する比較図を示す。初期平均有効応力を考慮した Case2 ii の水平変位量は、初期平均有効応力を考慮しない Case2 i に比べて全ての入力波形において小さく、Case2 i の 26~33%となった。飽和・不飽和条件を考慮した Case2 iv の水平変位量は、飽和条件のみによる物性を適用した Case2 iii の水平変位量よりもわずかに大きい。Case4 の水平変位量は、沈下量と同様に Case2 iv の 28~44%となった。次に、沈下量および水平変位量が最も大きくなった

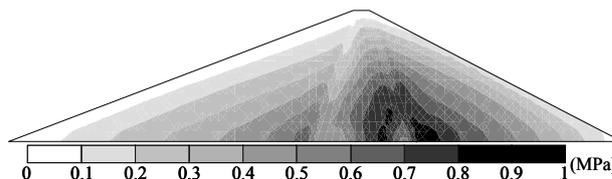


図-16 初期平均有効応力 (物性の組合せ 2)

権現波の解析結果について、初期平均有効主応力 (拘束圧) や飽和・不飽和条件が堤体の変形状状に与える影響を詳細に検討する。図-19、20 に各比較条件における堤体変位量の分布を示す。各図において、上段は堤

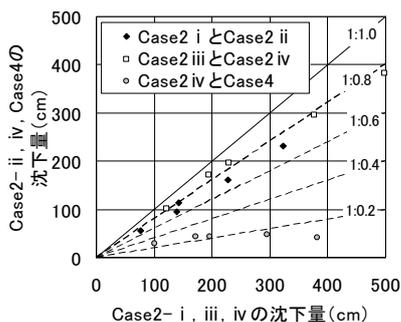


図-17 揺すり込み沈下量の比較

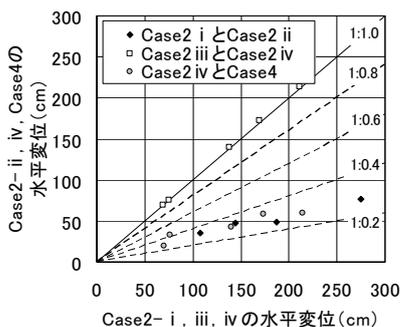


図-18 水平変位量の比較

体表面の変形量分布、中段は沈下量の鉛直分布、下段は水平変位の鉛直分布である。

(1) 拘束圧の影響 (図-19)

堤体表面の水平変位量および沈下量は、拘束圧を考慮した物性を与えることで全体的に小さくなる。特に上流面における変形量の減少の割合が大きい(図-19 上段)。

図-19 中段の沈下量の鉛直分布より、Case2-2 i と 2-2 ii の沈下量は、拘束圧の大きな深部ではほぼ同じであるが、拘束圧の小さな表層付近では、沈下量の差が大きくなっている。特に、湛水による有効応力の低下により、拘束圧が相対的に小さな上流ロックゾーンにおける表層付近の沈下量の差が大きい。

図-19 下段の水平変位の鉛直分布についても、沈下量と同様に、拘束圧の大きな深部では両ケースの水平変位はほぼ同一であり、表層の拘束圧の小さな領域で水平変位の差が大きい。

(2) 飽和・不飽和条件の影響 (図-20)

堤体表面の水平変位量および沈下量は、貯水位以下の領域では Case2-2 iii と Case2-2 iv の差はほとんどない。貯水位よりも上方の不飽和となる領域では、不飽和条件を考慮した Case2-2 iv の水平変位量の分布には、図-20 下段に示す水平変位の鉛直分布からもわかるように、Case2-2 iii に比べて下流ロックの下流側へのはらみ出しが小さいことの影響が見られる。また、この部分

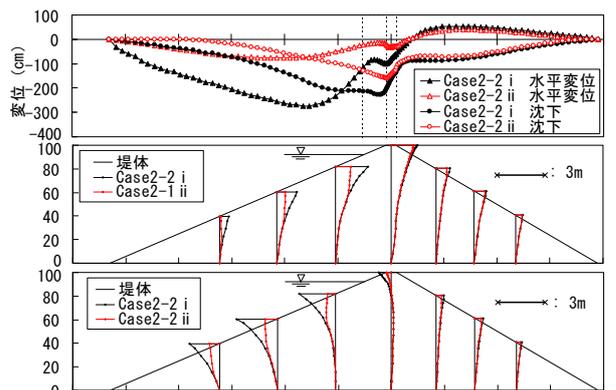


図-19 変形量に与える平均有効応力(拘束圧)の影響 (上段：堤体表面の変位、中段：沈下量の鉛直分布、下段、水平変位の鉛直分布)

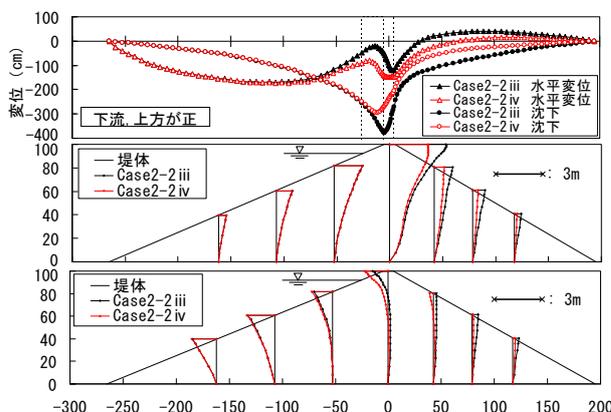


図-20 変形量に与える飽和・不飽和条件の影響 (上段：堤体表面の変位、中段：沈下量の鉛直分布、下段、水平変位の鉛直分布)

の沈下量は Case2-2 iii に比べて小さくなっている(図-20 上段)。

図-20 中段より、Case2-2 iii と Case2-2 iv を比較した結果、飽和領域の沈下量はほぼ同一であるが、不飽和となる水位 (EL.92m) 以上および下流ゾーンでは、不飽和条件を考慮した Case2-2 iv の沈下量が Case2-2 iii に比べてかなり小さいことがわかる。

4. 締固め層内の上層と下層の原位置密度試験

ロックフィルダムの築堤材料は、通常重機による締固めにより盛り立てられる。重機による締固めエネルギーは遠方には伝達しにくいこと、締固め層内の材料の粒度や空隙にはばらつきがあるため締固めエネルギーの伝達には不均一性があると考えられること、などの理由により、締固められた築堤材料の密度などの物性値には、統計的あるいは空間的なばらつきが存在すると考えられる。一次元変形理論によれば、変形係数にばらつきがあれば、一定値の変形係数よりも、変形量が大きくなることを証明できる¹²⁾。ロックフィルダ

ムの変形や沈下量を精度よく評価することは、湛水時や地震時のロックフィルダムの安全性を確保する上で重要であり、そのためにはロックフィルダムの築堤材料の締固めにおける物性のばらつきを評価する必要がある。

ロックフィルダムの築堤材料は、施工時の品質管理試験において、ある一定施工量ごとに原位置密度試験が行われ、管理値を満足する確認が行われる。しかし、ロックフィルダムの築堤材料の締固め層内においては、下層の方が上層よりも締固めエネルギーが伝わりにくいため、下層の密度が上層の密度よりも小さくなると考えられており、通常原位置密度試験では評価されない締固め層内の密度分布を評価する必要がある。

そこで本章では、現在建設中のロックフィルダムにおいて、その築堤材料であるコア、フィルタ、ロック材料の締固め層内の上層と下層における原位置密度試験を行い、締固め層内の上層と下層の密度の差異について検討した。

4.1 試験方法

試験対象としたロックフィルダムの各築堤材料の締固め諸元を表-12に示す。

表-12 締固め諸元

材料	コア	フィルタ	ロック
最大粒径(cm)	15	20	100
締固め層厚(cm)	30	40	100
管理密度(g/cm ³)	1.76	2.00	1.92
重機	11t振動ローラ	11t振動ローラ	19t振動ローラ
転圧回数	8	6	6

コアゾーンにおける試験方法は次のとおりである。

①コアの盛立後、盛立面に直径30cm、深さ15cmの試験孔を手作業により掘削する(写真-1)。②砂置換法により密度を求め、上層の密度とする。③①の試験孔をさらに15cm掘削し、砂置換法により試験孔全体の密度を求める。④全体の密度と上層の密度の差分により、下層の密度を求める。



写真-1 コアの原位置密度試験の状況

フィルタゾーンにおける試験方法は次のとおりである。①盛立後、盛立面に、直径60cm程度、深さ20cm程度の試験孔を手作業により掘削する(写真-2)。②掘削孔にビニールシートを張り、水を注入して掘削された試験孔の体積を計測し、築堤材料の重さを計量し、密度を求める。これを上層の密度とする。③①の試験孔をさらに20cm程度掘削し、水置換法により試験孔全体の密度を求める。④全体の密度と上層の密度の差分により、下層の密度を求める。



写真-2 フィルタの原位置密度試験の状況

ロックゾーンにおける試験方法は次のとおりである。

①盛立後、盛立面に、直径1m程度、深さ50cm程度の試験孔を重機により掘削する(写真-3)。②掘削孔にビニールシートを張り、水を注入して掘削された試験孔の体積を計測し、築堤材料の重さを計量し、密度を求める。これを上層の密度とする。③①の試験孔をさらに50cm程度掘削し、水置換法により試験孔全体の密度を求める。④全体の密度と上層の密度の差分により、下層の密度を求める。

また、ロックゾーンにおいては、原位置にて、63mm以上のふるいわけ試験を行った。コア、フィルタ、ロックそれぞれ10地点において試験を行った。



写真-3 ロックの原位置密度試験の状況

表-13 原位置密度試験結果 (密度の単位は g/cm³) (※赤いセルは管理値未満のデータ)

	コア						フィルタ						ロック					
	上層		下層		全層		上層		下層		全層		上層		下層		全層	
	湿潤密度	乾燥密度																
1	2.075	1.803	2.249	2.011	2.162	1.907	2.415	2.270	2.371	2.212	2.393	2.241	1.814	1.719	2.368	2.253	2.091	1.986
2	2.179	1.916	2.155	1.886	2.167	1.901	2.497	2.320	2.365	2.190	2.431	2.255	2.381	2.251	1.993	1.885	2.187	2.068
3	2.133	1.839	2.135	1.869	2.134	1.854	2.460	2.296	2.336	2.172	2.398	2.234	2.423	2.279	2.015	1.919	2.219	2.099
4	2.244	1.995	2.144	1.855	2.194	1.925	2.423	2.232	2.301	2.128	2.362	2.180	2.374	2.259	2.058	1.899	2.216	2.079
5	2.105	1.840	2.175	1.924	2.140	1.882	2.543	2.336	2.375	2.182	2.459	2.259	2.035	1.951	2.109	2.003	2.072	1.977
6	2.031	1.765	2.281	2.099	2.156	1.932	2.449	2.264	2.293	2.136	2.371	2.200	2.105	1.998	2.185	2.064	2.145	2.031
7	2.055	1.790	2.263	2.004	2.159	1.897	2.392	2.213	2.218	2.051	2.305	2.132	2.395	2.244	2.141	2.006	2.268	2.125
8	2.107	1.823	2.183	1.895	2.145	1.859	2.451	2.285	2.399	2.219	2.425	2.252	2.255	2.178	1.949	1.870	2.102	2.024
9	2.263	2.026	2.161	1.886	2.212	1.956	2.403	2.252	2.367	2.210	2.385	2.231	1.929	1.852	2.371	2.250	2.150	2.041
10	2.040	1.793	2.260	1.995	2.150	1.894	2.406	2.264	2.304	2.152	2.355	2.208	2.458	2.312	1.874	1.772	2.166	2.042
平均	2.123	1.859	2.201	1.942	2.162	1.901	2.444	2.273	2.333	2.165	2.388	2.219	2.217	2.102	2.106	1.992	2.162	2.047
標準偏差	0.0819	0.0899	0.0561	0.0801	0.0243	0.0316	0.0472	0.0376	0.0542	0.0511	0.0439	0.0400	0.2300	0.2112	0.1661	0.1595	0.0626	0.0468

4.2 試験結果

表-13 に、各築堤材料の原位置密度試験の湿潤密度と乾燥密度、およびそれらの平均値と標準偏差を示す。また、図-21 から図-23 に、各築堤材料の上層、下層、全体の乾燥密度とその平均値、管理値 (赤実線) を示す。

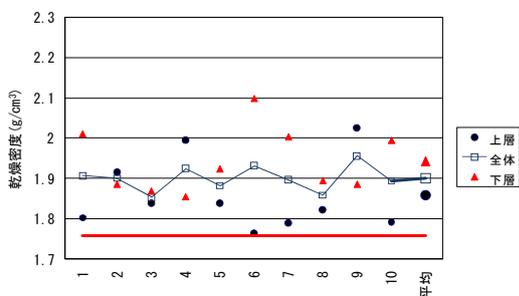


図-21 コアの上層、下層、全体の乾燥密度 (赤い実線は管理値)

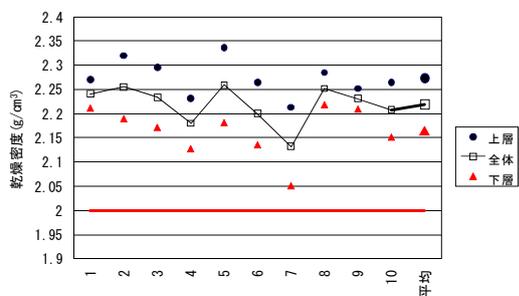


図-22 フィルタの上層、下層、全体の乾燥密度 (赤い実線は管理値)

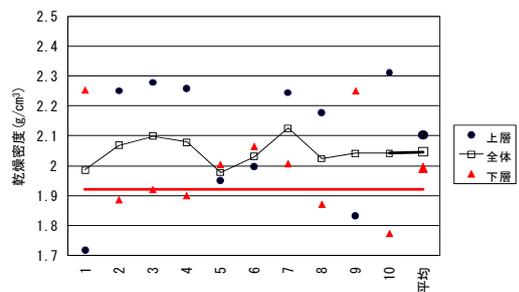


図-23 ロックの上層、下層、全体の乾燥密度 (赤い実線は管理値)

表-13 を見ると、コアとフィルタでは上層、下層の乾燥密度は全て管理値を満足しているが、ロックでは上層 2 カ所、下層 5 カ所において管理値を満足していないが、ロックの全層はいずれも管理値を満足している。図-21 から図-23 を見ると、フィルタにおいては、10 カ所ともに下層の乾燥密度の方が小さくなっている。コアにおいて下層の密度が小さくなっている箇所は 3 カ所、ロックにおいて下層の密度が小さくなっている箇所は 7 カ所となっている。また、フィルタの上層と下層の密度の標準偏差は小さいが、コアと、特にロックの上層と下層の標準偏差が大きい傾向にある。

図-24 に、ロック材の 300mm 粒径以上の割合と乾燥密度の関係を示す。大粒径の礫が多く存在する方が密度が大きくなると予想していたが、今回の試験においては、大粒径の割合と乾燥密度に明確な相関は見られなかった。ただし、図-25 に示すとおり、管理値以下の乾燥密度となる試験箇所においては 300mm 粒径以上の割合が 40%以下と相対的に小さな値となっており、ロックにおける密度と大粒径の含有割合には多少の関係はあると考えられる。

5. まとめ

5.1 種々の条件が動的強度特性に与える影響

平均有効応力や、飽和・不飽和条件を変化させて行われた繰返し三軸試験結果を整理し、それらの条件が堤体材料の動的強度特性に与える影響を検討した。その結果、堤体材料の動的強度は、平均有効応力が小さいほど大きくなることがわかった。また、不飽和条件における動的強度は、飽和条件に比べて大きくなることが分かった。

5.2 種々の条件が揺すり込み沈下量に与える影響

5.1 節で得られた動的強度特性を用いて堤高 100m の ECRD に対して累積損傷解析を実施した。その結果、初期平均有効応力や、飽和・不飽和条件が揺すり込み

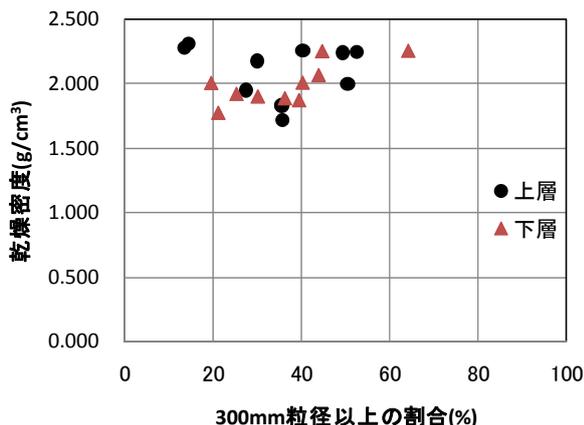


図-24 ロックの300mm粒径以上の割合と乾燥密度

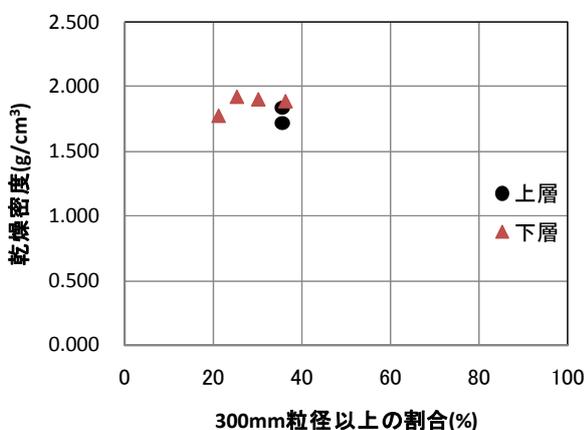


図-25 乾燥密度が管理値以下のロックの300mm粒径以上の割合と乾燥密度

沈下量に与える影響は大きいことがわかった。

5.3 締固め層内の上層と下層の密度のばらつき

現在建設中の中央コア型ロックフィルダムにおいて、締固め層内の上層と下層の密度試験を行った。フィルタの上層密度は下層密度よりも大きくなっているが、コアとロックにおいては明瞭な傾向は得られなかった。

今後は、締固め度や飽和・不飽和条件等を変化させて動的強度試験を継続し、それら諸条件がフィルダム材料の動的強度物性に与える影響を明らかにする。また、それらの試験結果を踏まえて、すべり変形解析や累積損傷解析などを行うとともに、実際のダムの大規模地震時における沈下挙動を再現することにより、大規模地震時におけるフィルダムの沈下量の評価方法について提案を行う。

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）ダム技術センター：フィルダム設計合理化検討分科会報告書，ダム構造・設計等検討委員会，2001.3.
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社：信濃川発電所復旧工事技術専門委員会，委員会報告書，pp.69-101，2006.5.
- 4) 松本徳久，安田成夫，大久保雅彦，芳岡良一：ロック材料の単調載荷試験と繰返し載荷試験，建設省土木研究所資料，第2996号，1991.3.
- 5) 佐藤弘行，山口嘉一：コア材料の締固め度と動的強度，ダム技術，No.252，pp.42-53，2007.9.
- 6) 猪股，永山ら：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料，国土技術政策総合研究所資料 No.244／土木研究所資料，第3965号，2005.3.
- 7) 島本和仁，山口嘉一，佐藤弘行，安田成夫，佐野貴之：フィルダムの累積損傷に伴う変形予測手法，ダム技術，No.244，pp.15-31，2007.1.
- 8) 米崎文夫，佐藤信光，染矢武彦：構造物の耐震設計手法の研究－徳山ダムのレベル2地震動による耐震検討－，水資源開発公団試験研究所材料試験研究室，試験研究所報告書，第99213号，2000.3.
- 9) 松本徳久，安田成夫，大久保雅彦，境野典夫：セッケ宿ダムの動的解析，土木研究所資料，第2480号，1987.3.
- 10) 藤澤侃彦，永山 功，吉田 等，佐々木隆，岩下友也：地震時におけるダムの安全性に関する検討，土木技術資料，Vol.39，No.3，pp.26-31，1997.3.
- 11) 大本家正，安養寺 学，長瀬 修，新屋敷 隆：長野県西部地震における牧尾ダムの挙動解析の試み，水資源開発公団，第19回技術研究発表会資料.
- 12) 山口嘉一，赤松利之：確率論的変形解析によるフィルダム基礎設計の基礎的研究，土木研究所資料，第3869号，p.81，2002.6.

EVALUATION METHOD OF EARTHQUAKE-INDUCED SETTLEMENT OF ROCKFILL DAMS DUE TO LARGE EARTHQUAKE MOTIONS

Abstract : According to “*Guidelines for Seismic Safety Evaluation of Dams (Draft)*” (MLIT, 2005), the seismic safety of rockfill dam should be evaluated based on the amount of sliding displacement due to large earthquake motions. But, during the Niigata-ken Chuetsu Earthquake in 2004, a large settlement without sliding was observed at a rockfill dam at which consolidation settlement had almost finished before the earthquake. Thus, to accurately estimate the settlement due to large earthquake motions, the settlement should be reproduced by other method, such as deformation analysis based on cumulative damage theory. The purpose of this research is to clarify the dynamic strength of construction materials from the results of cyclic triaxial tests under various conditions, to execute an earthquake-induced deformation analysis, and to propose an appropriate evaluation method of earthquake-induced settlement.

In this fiscal year, we summarize and analysis past dynamic laboratory test results for construction materials and evaluate differences of dynamic properties due to the confining pressure and the saturated-unsaturated conditions. We calculate displacements induced by large earthquake motions using cumulative damage theory and evaluate differences of displacements due to the confining pressure, and saturated-unsaturated conditions. We also conduct in-situ density tests to evaluate differences between upper part and lower part in a compacted layer.

Key words : Rockfill dam, Large earthquake, Seismic performance evaluation, Sliding displacement, Cumulative damage theory, In-situ density test