

3.8 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、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 20 年度は、堤高 100m の中央土質遮水壁型ロックフィルダムおよびコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムについて、種々の条件下における地震時のすべり変形および揺すり込み沈下を求めるとともに、累積損傷解析による変形形状が、実際のダムの大規模地震時の変形形状をよく再現できていることを確認した。

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

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 20 年度は、種々の条件下において、中央土質遮水壁型ロックフィルダム（以下、ECRD と呼ぶ）およびコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム（以下、CFRD と呼ぶ）のすべり変形解析と累積損傷解析を実施し、それぞれの条件がすべり変形量や揺すり込み沈下量に与える影響を検討するとともに、累積損傷解析による変形形状が、実際のダムの大規模地震時の変形形状をよく再現できていることを確認した。

2. 中央土質遮水壁型ロックフィルダム（ECRD）の地震変形解析

種々の条件下において ECRD のすべり変形解析と累積損傷解析を実施し、種々の条件が揺すり込み沈下量に与える影響を検討するとともに、すべり変形量との比較を行った。

2.1 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⁴⁾。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

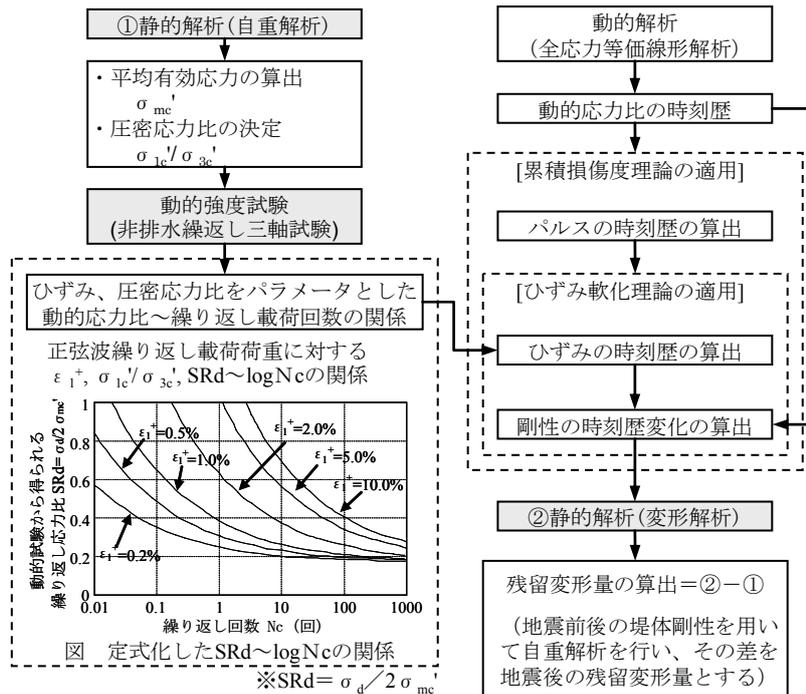


図-1 累積損傷解析の流れ⁷⁾

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。すべり変形解析は、動的解析の結果から想定すべり土塊の平均応答加速度の時刻歴を求め、Newmark 法^{5),6)}の考え方にに基づきすべり変形量を算出した。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。今回用いた解析フロー⁷⁾を図-1に示す。

2.2 解析条件

2.2.1 解析モデル

解析モデルを図-2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下流面勾配は1:0.35とした。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。

2.2.2 解析物性値

解析に用いる物性値は、国内の大規模 ECRD の標準的な堤体材料と判断した3ダムの設計値ないしは試験値を基本として設定した、物性 T^{8),9)}および物性 S^{10),11)}の2物性を与えた。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考え、物性 T のそれを物性 S にも与えている。

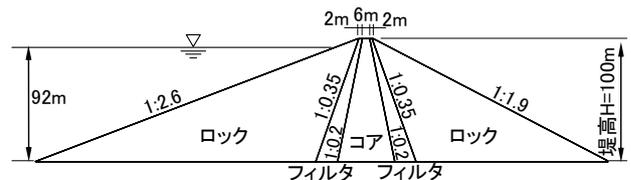


図-2 解析モデル

(1) 築堤・湛水解析

表-1に築堤解析に用いる物性値を示す。弾性係数は、コア、フィルタ、ロックともに物性 T は物性 S よりも大きい。ポアソン比については、コアは物性 T が物性 S よりも小さく、フィルタ、ロックは物性 T が物性 S よりも大きい。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の透水係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ とした。

(2) 動的解析

表-2および図-3に等価線形化法による動的解析に用いる物性値を示す。T および S の2物性の間には、物性 T は物性 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という違いがある。また、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。

表-1 築堤解析に用いる物性値

	湿潤密度 ρ_w (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
基礎地盤	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				1255(MPa)			0.2				

表-2 動的解析に用いる物性値

物性		初期せん断剛性 G_0 (MPa)注1)	ポアソン比 澤田式注2)	逸散減衰 (%)
物性T	コア	$632 \sigma_m^{0.60}$		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	$\{299(2.17-e)^2/(1+e)\} \sigma_m^{0.7}$		
	フィルタ	$\{299(2.17-e)^2/(1+e)\} \sigma_m^{0.7}$		
	ロック	$\{367(2.17-e)^2/(1+e)\} \sigma_m^{0.6}$		

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。

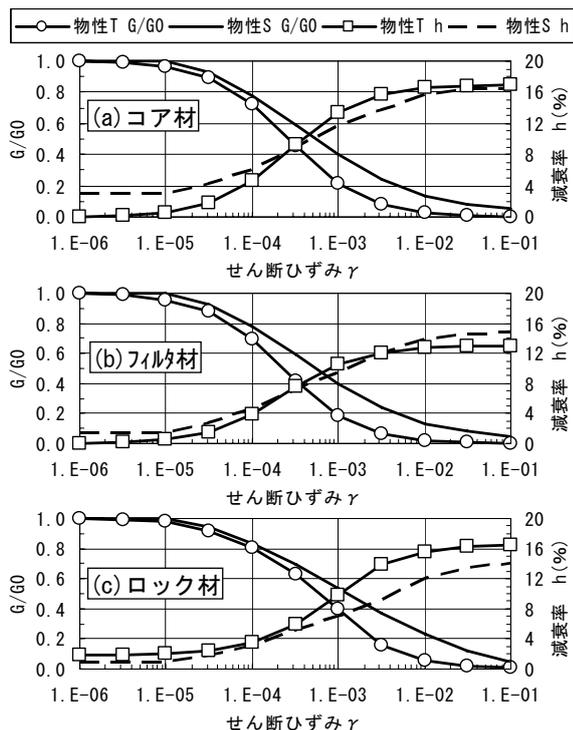


図-3 $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ の関係

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 720gal¹²⁾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、

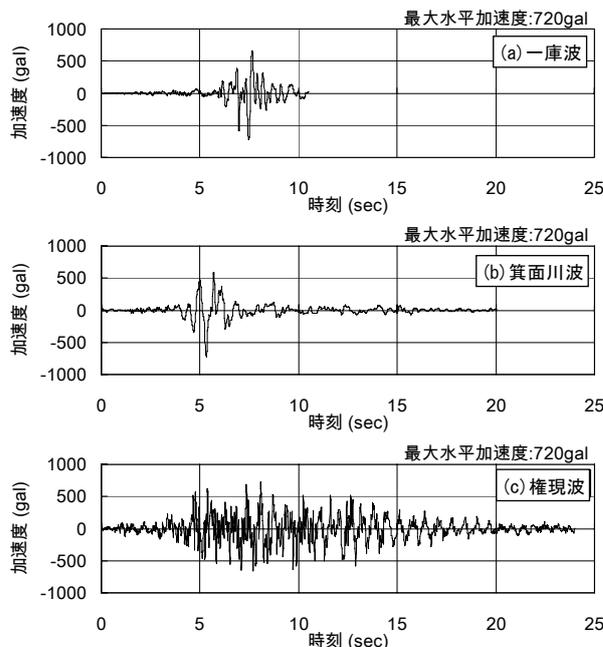


図-4 入力地震動の加速度時刻歴 (水平(上下流)方向, 720gal引伸ばし)

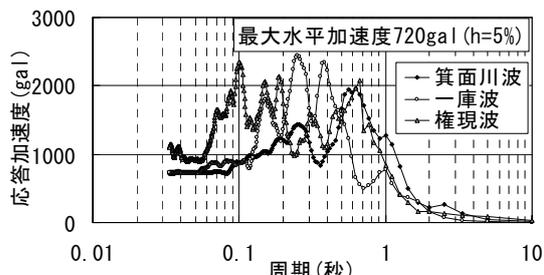


図-5 加速度応答スペクトル (水平(上下流)方向)

表-3 すべり変形解析に用いる強度定数

		直線型 $\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$		指数型 $\tau_f = A \sigma_n^b$	
		粘着力c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	A (kN,m系)	b (kN,m系)
物性T	コア	0.0	34.5	—	—
	フィルタ	—	—	5.176	0.740
	ロック	—	—	6.670	0.741
物性S	コア	0.0	35.0	—	—
	フィルタ	—	—	1.567	0.902
	ロック	—	—	4.368	0.804

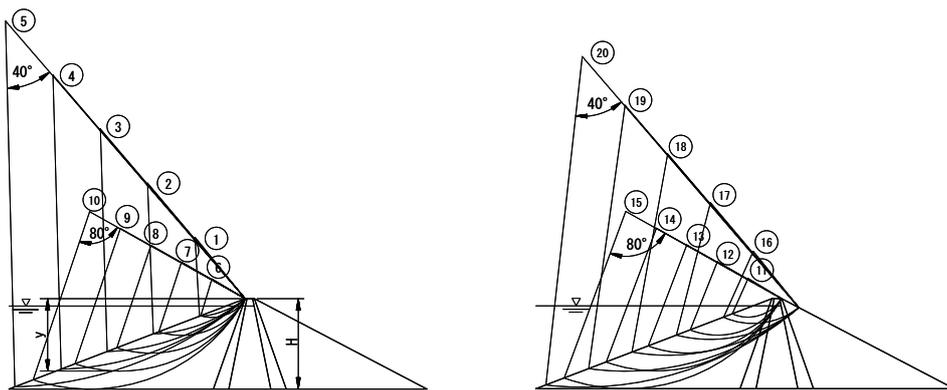


図-6 すべり変形解析に用いるすべり円弧 (ECRD、上流方向のみ設定)

表-4 非排水繰返し三軸試験の材料

材料	コア	フィルタ	ロック
材質	—	砂礫	斑れい岩
最大粒径 (mm)	16	63	63.5
作製条件	2Ec	振動締固め	Dr=85%
間隙比 e	0.467	0.129	0.206
乾燥密度 (g/cm ³)	1.934	2.188	2.430

注) 表中“—”は、文献に詳細な記載なし

表-5 非排水繰返し三軸試験の条件

材料	コア	フィルタ	ロック
供試体寸法 (cm)	直径10×高さ20	直径30×高さ60	直径30×高さ60
飽和状態	飽和	飽和	飽和
有効拘束圧 σ_{mc}' (N/mm ²)	0.327	0.327	0.588
主応力比 σ_1/σ_3	2.0	2.0	2.0
排水条件	非排水	非排水	非排水
せん断応力比 SR_d	0.60, 0.40, 0.30	0.53, 0.38, 0.30	0.712, 0.509, 0.405

表-6 累積ひずみ特性 (物性T)

ゾーン	回帰式
コア	$SR_d = 0.43\epsilon^{0.50} N_c^{-0.33} + 0.16$
フィルタ	$SR_d = 0.59\epsilon^{0.47} N_c^{-0.33} + 0.16$
ロック	$SR_d = 1.373\epsilon^{2.809} N_c^{-1.612} e^{0.064} + 0.402e^{0.076}$

SR_d : 繰返しせん断応力比, N_c : 繰返し回数
 ϵ : ひずみ (%)

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-4 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-5 にそれら 3 波形の加速度応答スペクトルを示す。

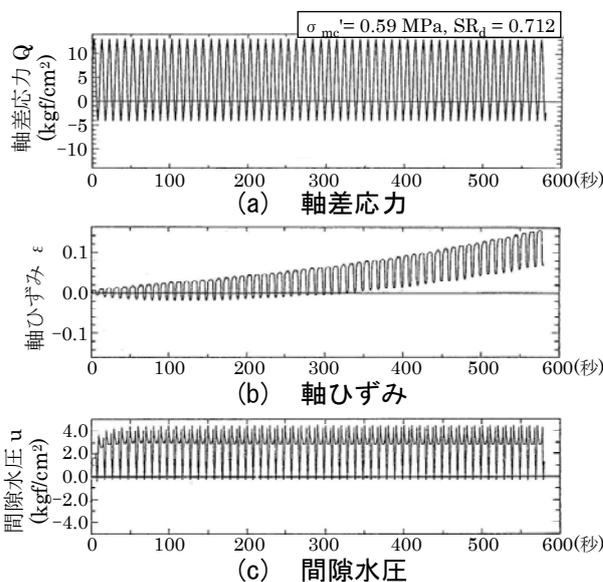


図-7 繰返し試験結果の時刻歴

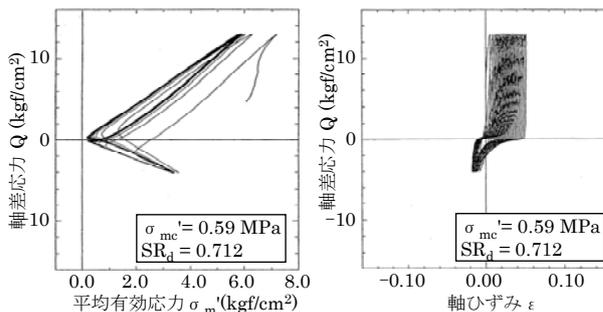


図-8 応力経路

図-9 応力-ひずみ関係

(3) すべり変形解析

表-3 にすべり変形解析に用いる強度定数を示す。前述したように、強度特性は国内の大規模 ECRD の標準的な堤体材料と判断した 3 ダムの設計値ないしは試験値を基本として設定した、物性 T^(8),9)および物性 S^(10),11)の 2 物性を与えた。図-6 にすべり変形解析に用いるすべり円弧を示す。すべり円弧の設定に際して、ECRD

では、現行設計方法に従って同程度のすべり安全率になるように設計した断面に対して、大規模地震動を入力した場合、下流側に比べて上流側のすべり変形量が大きくなる¹³⁾ため、本検討では上流 20 円弧を対象とした。なお、すべり変形解析に用いる強度はピーク強度とし、ひずみ軟化¹⁴⁾は考慮していない。

(4) 累積損傷解析

累積損傷解析で用いる堤体材料の繰返し回数 N_c と繰返しせん断応力比 SR_d の関係は、堤体材料の非排水繰返し強度試験結果から得られる。しかし、この試験が実施されているダムが少ないため、物性 T における関係を物性 S にも用いることとした。

コア・フィルタ材については、米崎ら⁸⁾が ECRD のコア材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、ロック材については松本ら⁹⁾が ECRD のロック材に対して行った繰返し非排水三軸試験結果を用いた。非排水繰返し三軸試験に用いた各材料の特性を表-4 に、試験条件を表-5 に示す。試験条件は、全て飽和・非排水状態であり、主応力比は 2.0 である。

図-7 にロック材の非排水繰返し試験結果の時刻歴（せん断応力比 $SR_d=0.712$ ）を、図-8 に同試験における応力経路を、図-9 に同試験における応力-ひずみ関係を示す。図-7(b)に示すように、繰返し载荷に伴い、軸ひずみは緩やかに増加していることがわかる。繰返し回数 24 回程度で軸ひずみは 5% となった。繰返し回数 30 回程度までは、軸ひずみ振幅は増加傾向にあるが、それ以降は、振幅はほぼ一定で圧縮側へ進行している。図-9 からわかるように、軸差応力が正のとき圧縮側、軸差応力が負のとき伸張側のひずみを生じながら、荷重の繰返しにともなって徐々に軸ひずみが圧縮側へ進行している。応力経路（図-8）は、間隙水圧の上昇に伴い左側に移動し、最終的に破壊線に沿ってループを描いている。

物性 T のコア、フィルタ、ロックそれぞれの材料の繰返し回数 N_c と繰返しせん断応力比 SR_d の関係を図-10 に示す。また、各材料において、図-10 の関係を定式化した累積ひずみ特性の関係式を表-6 に示す。

2.2.3 解析ケース

解析ケースを表-7 に示す。解析ケースは、物性の組合せ（3 種類）および入力地震動（3 波形）が、すべり変形量および揺すり込み沈下量に与える影響評価を目的に設定した。さらに、累積損傷解析結果において、

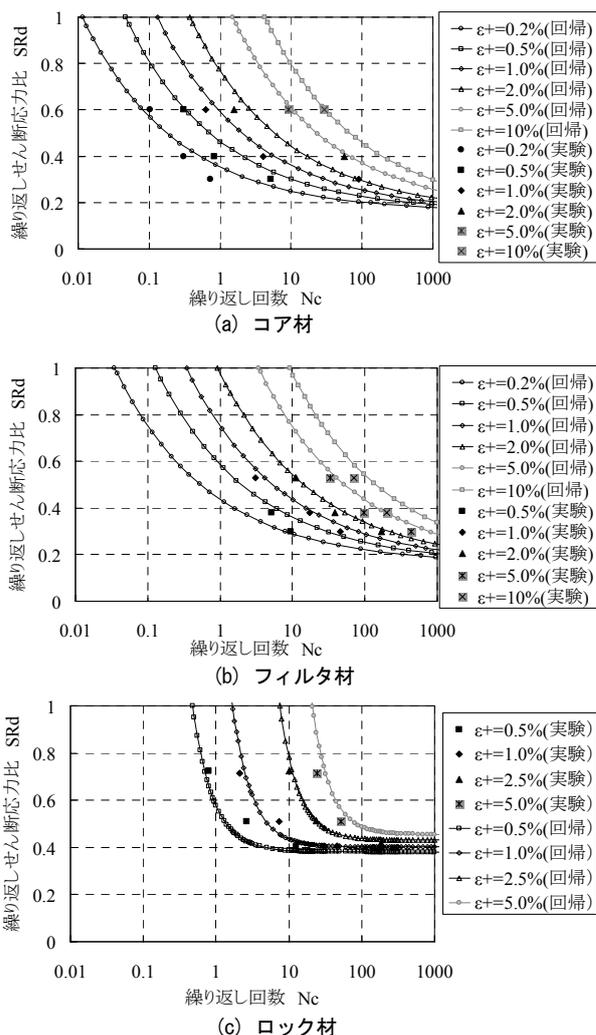


図-10 累積ひずみ特性（物性T）

表-7 解析ケース一覧（ECRD）

ケース	物性の組合せ	密度	ガンコン チャク パラメータ	初期 剛性 G_0	動的変形特性 G/G_0 h $\sim \gamma$		動的 強度 特性	強度 定数 (すべり)	入力 波形	最大 加速度 (gal)
1-0	1	T	T	T	T	T	T	T	一庫波	720
1-1		T	T	T	T	T	T	T	箕面川波	720
1-2		T	T	T	T	T	T	T	権現波	720
1-5		T	T	T	T	T	T	T	権現波	500
1-8		T	T	T	T	T	T	T	権現波	1000
2-0	2	T	S	S	S	S	T	S	一庫波	720
2-1		T	S	S	S	S	T	S	箕面川波	720
2-2		T	S	S	S	S	T	S	権現波	720
2-3		T	S	S	S	S	T	S	一庫波	500
2-4		T	S	S	S	S	T	S	箕面川波	500
2-5		T	S	S	S	S	T	S	権現波	500
2-6		T	S	S	S	S	T	S	一庫波	1000
2-7		T	S	S	S	S	T	S	箕面川波	1000
2-8	T	S	S	S	S	T	S	権現波	1000	
3-0	3	T	T	T	S	S	T	T	一庫波	720
3-1		T	T	T	S	S	T	T	箕面川波	720
3-2		T	T	T	S	S	T	T	権現波	720
3-5		T	T	T	S	S	T	T	権現波	500
3-8		T	T	T	S	S	T	T	権現波	1000

表-8 解析結果一覧 (ECRD)

ケース	物性の組合せ	入力波形	最大水平加速度 (gal)	固有周期 (秒)		天端最大水平加速度 (gal)	最大すべり変形量 (cm)	累積損傷解析					
				初期剛性	収束剛性			最大沈下*1)			最大水平変位*2)		
								上流 (cm)	天端 (cm)	下流 (cm)	上流 (cm)	天端 (cm)	下流 (cm)
1-0	1	一庫	720	0.633	1.493	1186	0.0	22.7	17.4	12.9	-28.3	-10.7	9.1
1-1		箕面川	720		1.672	1089	0.0	40.8	23.2	23.6	-39.1	10.1	15.7
1-2		権現	720		1.333	1305	0.0	57.2	31.4	29.0	-80.2	-18.3	20.3
1-5		権現	500		1.185	953	0.0	42.6	25.1	23.0	-61.7	-16.0	11.9
1-8		権現	1000		1.531	1329	0.1	67.6	35.7	38.2	-88.1	-18.7	26.1
2-0	2	一庫	720	0.572	0.838	1351	22.0	68.4	69.9	41.2	-58.7	-22.2	17.1
2-1		箕面川	720		0.908	1394	67.6	118.3	119.3	91.1	-64.7	-25.3	19.7
2-2		権現	720		0.851	1057	50.0	193.9	192.4	126.3	-140.3	-54.2	46.6
2-3		一庫	500		0.781	1051	6.6	39.4	40.2	22.8	-45.7	-14.7	11.5
2-4		箕面川	500		0.845	1030	17.4	85.9	86.4	61.9	-56.2	-17.1	20.2
2-5		権現	500		0.803	805	7.0	132.8	125.6	72.2	-116.5	-47.6	38.7
2-6		一庫	1000		0.906	1684	51.8	95.3	98.1	60.6	-75.1	-32.3	19.9
2-7		箕面川	1000		0.984	1781	201.0	142.4	145.4	117.4	-67.8	-18.4	24.8
2-8		権現	1000		0.907	1331	156.8	247.0	247.6	174.0	-165.0	-61.1	51.6
3-0	3	一庫	720	0.633	0.967	1123	13.4	58.0	61.0	36.9	-55.3	-24.1	14.7
3-1		箕面川	720		1.037	1261	28.6	99.4	102.7	79.4	-48.5	-16.0	20.2
3-2		権現	720		0.957	927	11.4	131.2	129.8	71.8	-119.1	-60.0	33.5
3-5		権現	500		0.899	721	0.0	90.4	82.2	40.3	-97.4	-50.2	22.8
3-8		権現	1000		1.018	1205	56.6	179.6	181.4	113.7	-140.1	-63.1	40.7

*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

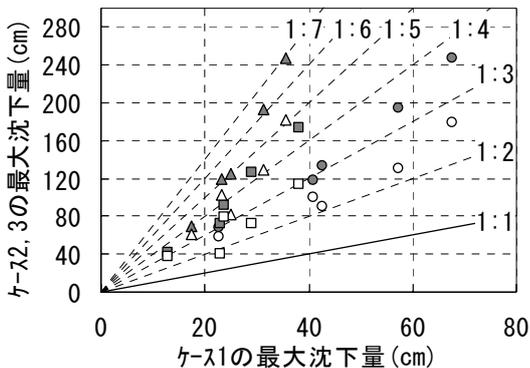


図-11 沈下量の物性の組合せ1と2, 3の関係 (ECRD)

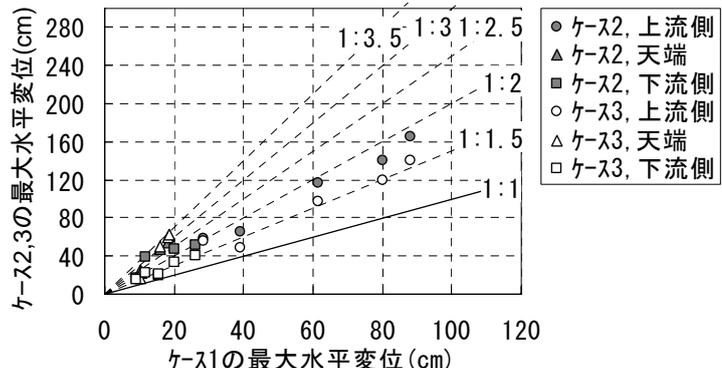


図-12 水平変位量の物性の組合せ1と2, 3の関係 (ECRD)

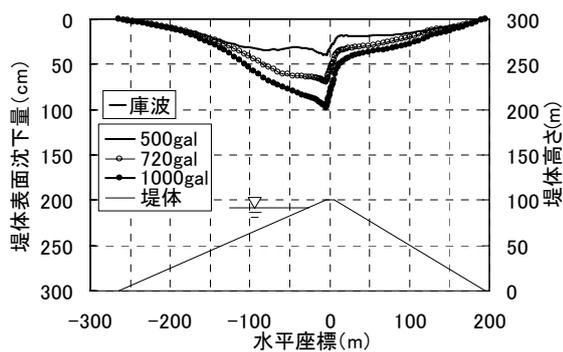
沈下量が最も大きくなる物性の組合せ2については全波形を対象に、物性の組合せ1, 3については、累積損傷解析結果において3波形のうち沈下量が最も大きくなる権現波を対象に、最大水平加速度(3種類)の影響評価を行を行うためのケースを設定した。

2.3 解析結果

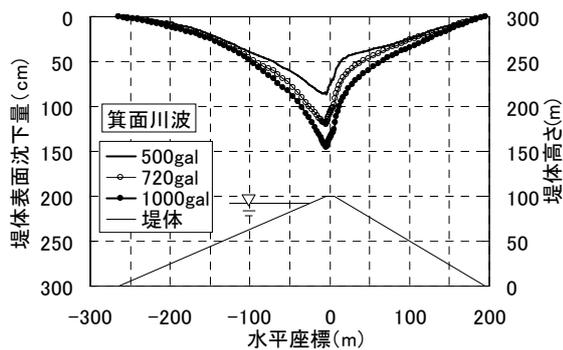
解析結果の一覧を表-8に示す。収束剛性による固有周期は、物性の組合せ1で1.18~1.68秒、物性の組合せ2で0.78~0.99秒、物性の組合せ3で0.89~1.04秒であり、応答特性が物性の組合せに影響を受けていることがわかる。天端最大上下流方向加速度は、物性の組合せごとに波形による大小関係が異なる。同一入力波形であれば、入力最大水平加速度が大きいほど、天端最大水平加速度は大きくなる。

累積損傷解析による最大沈下量は入力波形に影響

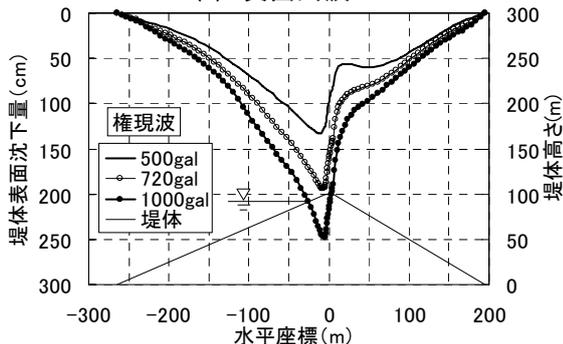
を受け、物性の組合せ3の下流側を除いて一庫波<箕面川波<権現波の順に大きくなる。同一入力波形では、入力最大水平加速度が大きいほど沈下量も大きくなる。最大水平変位量は、物性の組合せや入力最大水平加速度に関わらず、権現波が最も大きい。一庫波と箕面川波では、ケースによって水平変位が大きくなる波形が異なる。同一入力波形では、物性の組合せ2の箕面川波を除き、入力最大水平加速度が大きいほど水平変位量は大きくなる。物性の組合せの影響については、組合せ1の沈下量および水平変位量が最も小さい。物性の組合せ1に対する2および3の比の関係をそれぞれ図-11, 12に示す。沈下量は、物性の組合せ2が1の約2.9~6.9倍、物性の組合せ3が1の約1.8~5.1倍程度になる。水平変位量は、物性の組合せ2が1の約1.3~3.3倍、物性の組合せ3が1の約1.2~3.4倍程度になる。これより、動的変形特性が堤体変形に及ぼす影響



(a) 一庫波

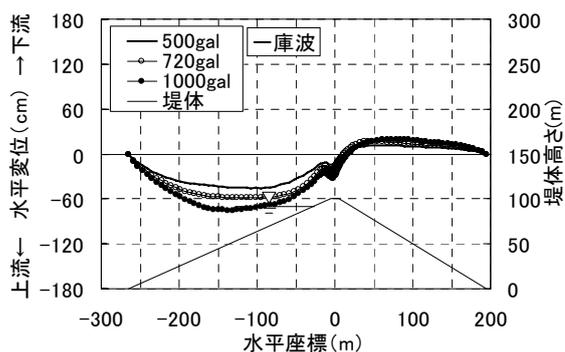


(b) 箕面川波

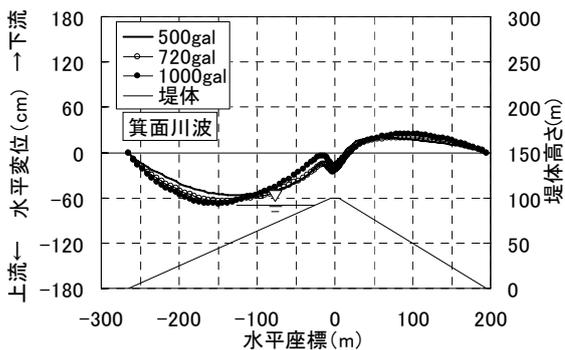


(c) 権現波

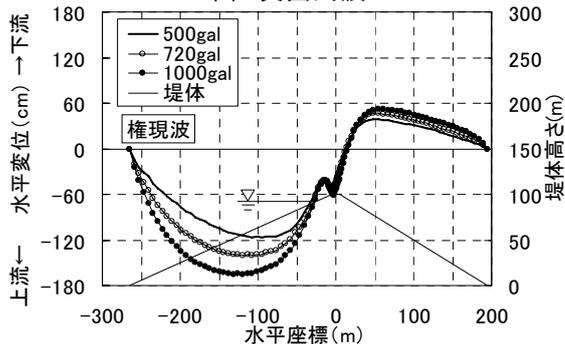
図-13 堤体表面沈下量 (ECRD)



(a) 一庫波



(b) 箕面川波



(c) 権現波

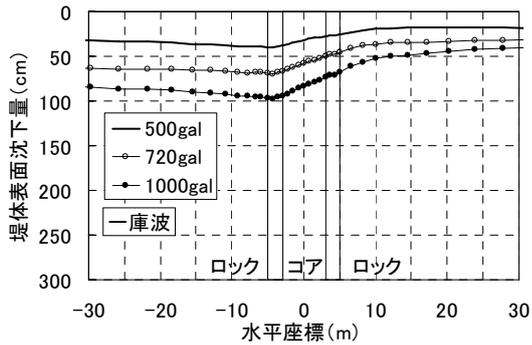
図-14 堤体表面水平変位 (ECRD)

は非常に大きいことがわかる。

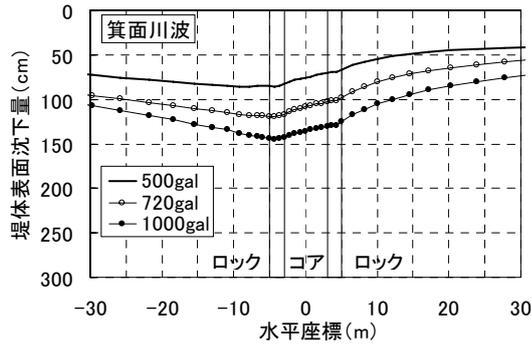
次に、沈下量および水平変位量は、物性の組合せ 2 が最も大きいため、堤体全体の変形について、物性の組合せ 2 を代表として検討した。累積損傷解析による堤体表面の沈下量および水平変位量の分布をそれぞれ図-13、14 に、その図における天端付近の拡大図をそれぞれ図-15、16 に示す。沈下量および水平変位量は、下流側よりも上流側が大きい。この傾向は権現波で最も顕著である。また、コアは上流側に倒れ込む傾向にあり、新潟県中越地震で被災した新山本調整池堤体の天端が、概ねダム全長に渡り上流側に傾斜していることと合致する³⁾。上流側への倒れ込みは、一庫波<箕面川波<権現波の順に大きくなり、権現波で最も顕著

である。同一入力波形においては、入力最大水平加速度が大きいほど沈下量、水平変位ともに大きくなる。

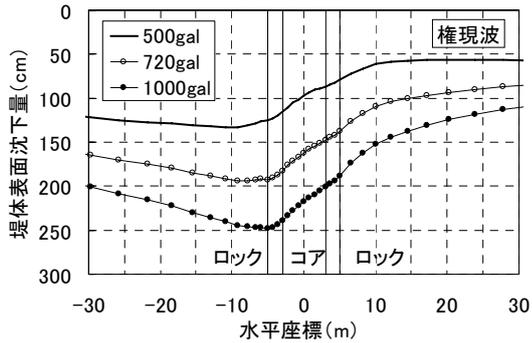
揺すり込み沈下量とすべり変形量の比較として、天端の最大沈下量と最大すべり変形量の関係を図-17 に示す。最大すべり変形量は標高の高い円弧で発生しており、すべりがほとんど発生しない物性の組合せ 1 を除いて、箕面川波が最も大きい。揺すり込み沈下量に対するすべり変形量の比は、1:0.1~1:1.4 の範囲で幅広く分布しているが、一般的に揺すり込み沈下量の方が大きい。同一入力波形においては、入力最大水平加速度が大きくなるほど揺すり込み沈下量に対するすべり変形量の比率が大きくなる。



(a) 一庫波

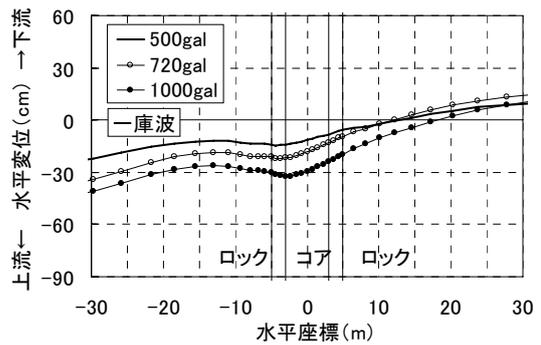


(b) 箕面川波

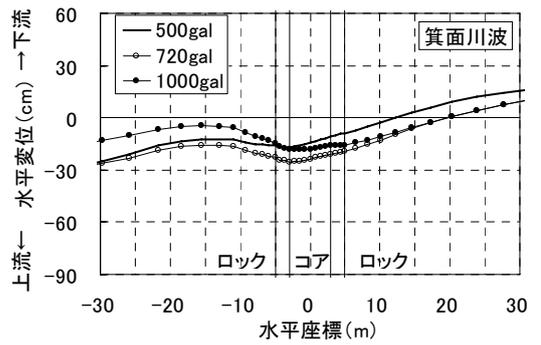


(c) 権現波

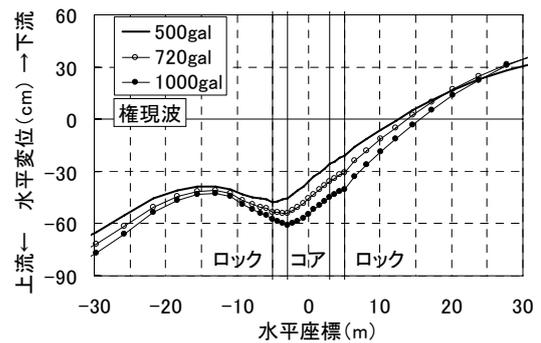
図-15 堤体表面沈下量 (拡大図) (ECRD)



(a) 一庫波



(b) 箕面川波



(c) 権現波

図-16 堤体表面水平変位 (拡大図) (ECRD)

3. コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム (CFRD) の地震変形解析

平成 20 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震により被災した石淵ダム (堤高 53m、1953 年完成) では、ダムの安全上問題となる被害は見られなかったが、天端において最大 55cm 程度の沈下が発生した¹⁵⁾。石淵ダムは我が国では実績の少ない CFRD であるため、CFRD の耐震性を検討するために、堤高 100m の CFRD を想定したモデルダムに対して地震応答解析を行い、その結果を用いたすべり変形解析および累積損傷解析を実施した。

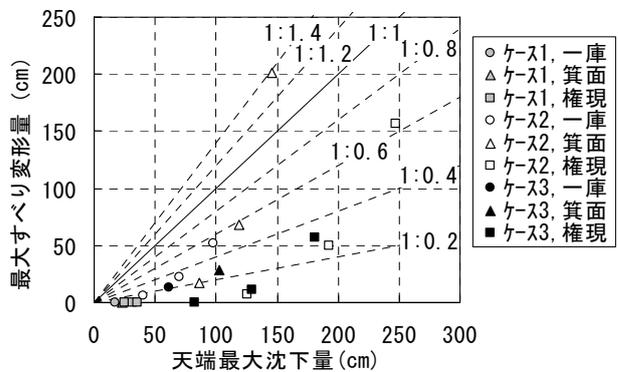


図-17 天端最大沈下量と最大すべり変形量の関係

3.1 検討手法の概要

築堤解析は Duncan-Chang モデルを用いた盛立解析とし、湛水解析では、静水圧を堤体上流面に節点荷重として载荷した。地震応答解析は、等価線形化法による複素応答解析とした。境界条件は、堤体底面を固定境界とし、ECRD モデルと同様に逸散減衰は 10%とした。

すべり変形解析および累積損傷解析は、前章において ECRD モデルに適用した方法を用い、入力地震動についても同一の 3 波形を用いた。

3.2 解析条件

3.2.1 解析モデルおよび物性値

図-18 に解析モデルを示す。CFRD モデルは堤高 100m、天端幅 10m とした。上下流面勾配は、諸外国における一般的な CFRD や石淵ダムを参考に 1:1.4 とした。いま、ECRD モデルの下流面勾配が 1:1.9 であることと比較すると、CFRD モデルの上下流面、特に下流面勾配は相対的にすべりに対する安全性が低い設定になっていることに注意されたい。また、貯水位は 92m とした。堤体材料はロック材のみとし、解析には、前章の検討において、すべり変形量、揺すり込み沈下量ともに最も大きくなった「物性の組合せ 2」におけるロック材料の物性値を用いた。なお、本検討では基礎地盤およびフェイススラブはモデル化していない。

すべり変形解析に用いるすべり円弧は上流側 20、下流側 20 の計 40 円弧とした。図-19 に、水圧荷重による押えがないためにすべり変形量が相対的に大きくなる下流側 20 円弧を示す。なお、前述したとおり、すべり変形解析に用いる強度はピーク強度とし、ひずみ軟化¹⁴⁾は考慮していない。

3.2.2 解析ケース

表-9 に解析ケースを示す。解析は、入力地震動および最大水平加速度を変化させて、すべり変形量や揺すり込み沈下量に与える影響を検討した。さらに、すべり変形量と揺すり込み沈下量が大きくなった権現波については、比較対象として、上下流面勾配を 1:1.6 および 1:1.8 としたモデルについても検討を行った。

3.3 解析結果

表-10 に解析結果一覧を示す。地震応答解析における収束剛性でのモデルダムの固有周期は 0.66~0.81 秒程度となった。図-5 に示した加速度応答スペクトルより、箕面川波、権現波においては、堤体の固有周期付

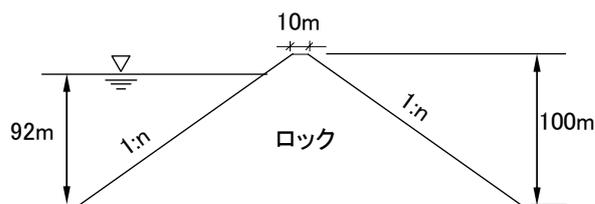


図-18 解析モデル

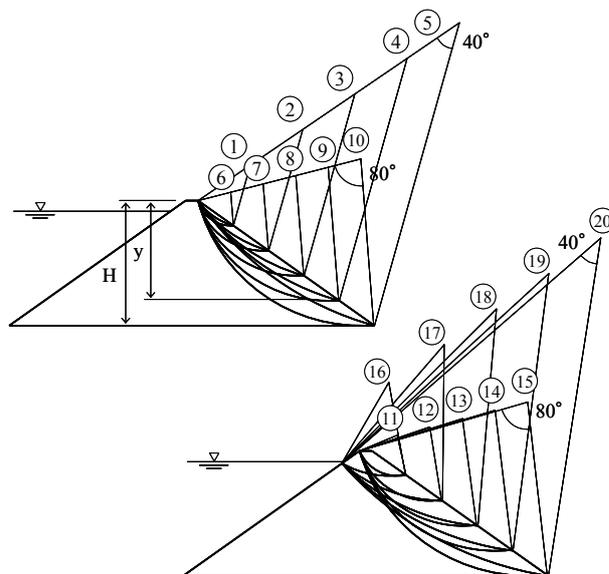


図-19 すべり変形解析に用いるすべり円弧 (CFRD, 下流方向のみを表示)

表-9 解析ケース (CFRD)

上下流面勾配	入力波形	最大水平加速度 (gal)
1:1.4	箕面川波	500, 720, 1000
	一庫波	500, 720, 1000
	権現波	500, 720, 1000
1:1.6	権現波	500, 720, 1000
1:1.8	権現波	500, 720, 1000

近の応答加速度が大きくなっており、一庫波においては、固有周期付近の応答加速度は他の 2 波よりも小さくなっている。また、天端最大水平加速度は、入力波の 2~3 倍程度となった。

(1) すべり変形量

Newmark 法による最大すべり変形量は、勾配が急なほど大きくなる。また、同一波形では、最大水平加速度が大きいくほど大きくなる。同一最大加速度に対しては、すべり変形量は一庫波<箕面川波<権現波の順に大きくなる。これは、箕面川波と一庫波は、最大加速度に近い加速度に着目すると、単一のパルスにより構成されるのに対し、権現波は連続したパルスで構成さ

表-10 解析結果一覧(CFRD)

勾配	入力波形	入力最大水平加速度 (gal)	固有周期(秒)		天端最大水平加速度 (gal)	最大すべり変形量 (cm)	累積損傷解析による変形量(cm)			
			初期剛性	収束剛性			沈下量*1)			水平変位*2)
							上流	天端	下流	
1:1.4	箕面川	500	0.525	0.721	1499	13.6	60.4	65.0	64.4	30.2
		720		0.762	2131	35.1	74.7	81.5	81.1	33.1
		1000		0.809	2936	73.3	92.9	103.3	102.0	43.1
	一庫	500		0.668	1678	1.7	23.4	31.5	32.1	23.4
		720		0.699	2220	7.4	41.4	51.5	50.8	37.5
		1000		0.736	2772	18.2	65.2	74.5	74.2	42.6
	権現	500		0.699	1210	9.4	82.6	103.4	110.5	91.1
		720		0.732	1663	58.1	138.8	169.7	168.5	132.6
		1000		0.768	2164	171.1	205.5	232.3	229.7	140.7
1:1.6	権現	500	0.522	0.695	1260	4.6	77.3	94.0	101.1	75.2
		720	0.727	1716	38.9	130.0	157.3	156.2	111.7	
		1000	0.763	2206	135.6	197.3	221.5	219.0	119.8	
1:1.8	権現	500	0.520	0.693	1254	2.7	72.6	86.1	93.9	63.8
		720	0.725	1702	26.6	122.7	146.7	146.8	96.8	
		1000	0.761	2187	108.6	189.1	210.5	208.9	103.5	

*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

れるため、最大加速度が大きくなると、権現波は臨界加速度を越える回数が多くなるためと考えられる。一庫波においては、入力波の卓越周期とダムの固有周期が一致しないため、すべり変形量が小さくなったものと考えられる。

(2) 累積損傷解析

累積損傷解析による沈下量は、同一波形に対しては、最大水平加速度が大きいほど大きくなる。同一最大加速度に対しては、一庫波、箕面川波、権現波の順に大きくなる。天端の水平変位は、全てのケースにおいて、下流側への変位となった。また、上流法面の沈下量は、下流法面の沈下量に比べて小さいが、これは、上流法面が、湛水時の水圧により、拘束圧が大きくなったためである。また、勾配の影響については、勾配がゆるいほど沈下量がわずかに小さくなる。

図-20に累積損傷解析による堤体変形状の一例(勾配=1:1.4、入力波形=権現波、最大加速度=1000gal)を、図-21に天端付近の変形状(勾配1:1.4)を示す。これらの図から、ダム天端は下流下方へ変位していることがわかる。

図-22に岩手・宮城内陸地震時に石淵ダムにおいて測量された変形状¹⁶⁾を示す。石淵ダムの天端は地震時に約55cm沈下するとともに、天端が下流側へ変位しており、累積損傷解析による変形状と、石淵ダムにおいて観測された地震時の変形状は、同様の傾向を示していることがわかる。

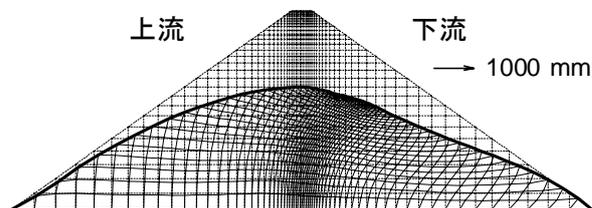


図-20 累積損傷解析による変形状 (CFRD、勾配: 1:1.4、権現波、1000gal)

(3) すべり変形量と揺すり込み沈下量の比較

図-23に、累積損傷解析による天端最大沈下量とすべり変形量の関係を示す。揺すり込み沈下量に対するすべり変形量の比率は0~80%の間で分布している。同一波形であれば、最大水平加速度が大きいほど比率が大きくなる。入力地震動の条件によっては、すべりがほとんど発生せず、揺すり込み沈下量が卓越する場合がある。

(4) ECRD との比較

図-24に ECRD と CFRD の天端最大沈下量の関係を、図-25に ECRD と CFRD のすべり変形量の関係を示す。CFRD の天端沈下量は ECRD の 70~90%程度であった。

CFRD のすべり変形量は、ECRD の 25~125%程度と幅広く分布している。入力波形が箕面川波と一庫波の場合は、CFRD のすべり変形量は ECRD よりもかなり小さくなり、ECRD の半分程度である。入力波形が権現波の場合、CFRD のすべり変形量は ECRD と同程度もしくはわずかに大きく、勾配が急であるほど CFRD のすべり変形量は大きい。

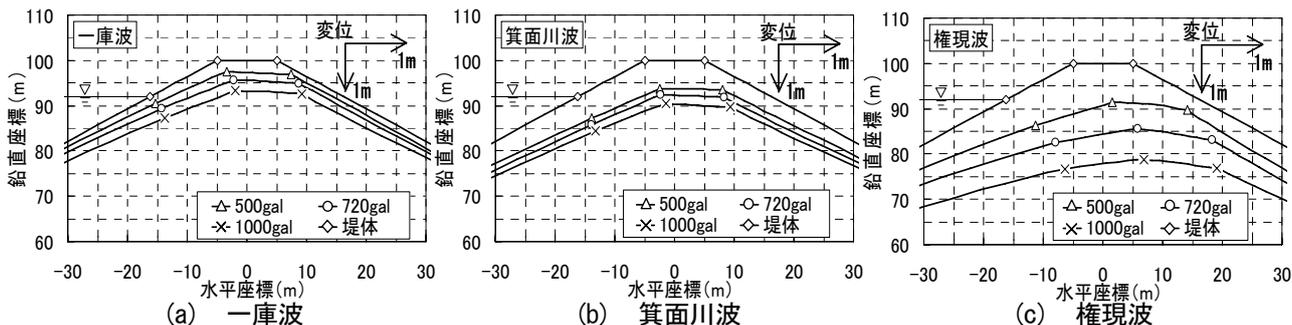


図-21 天端周辺の変形計状 (CFRD、勾配1:1.4)

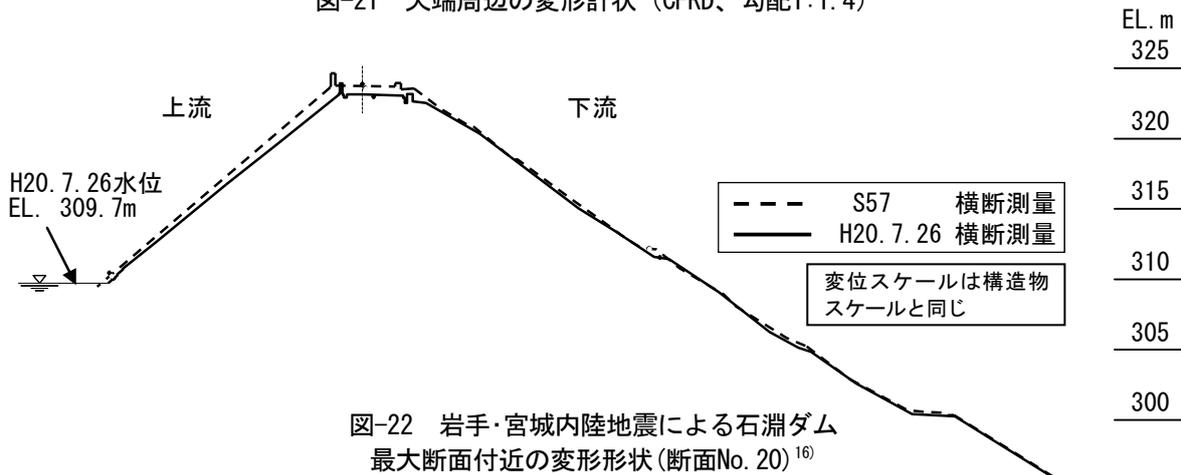


図-22 岩手・宮城内陸地震による石淵ダム
最大断面付近の変形形状 (断面No. 20)¹⁶⁾

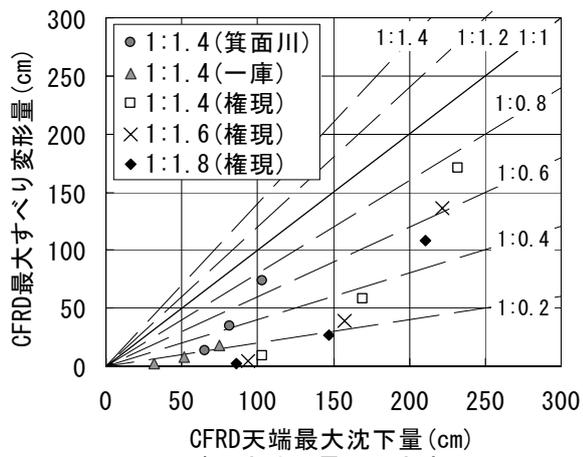


図-23 天端最大沈下量と最大すべり
変形量の関係

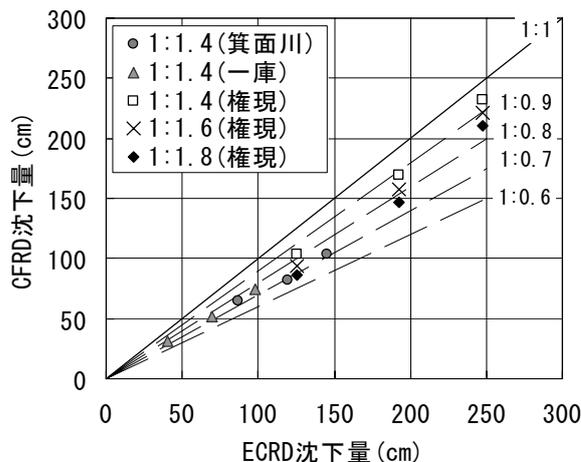


図-24 ECRD と CFRD の天端最大沈下量の比較

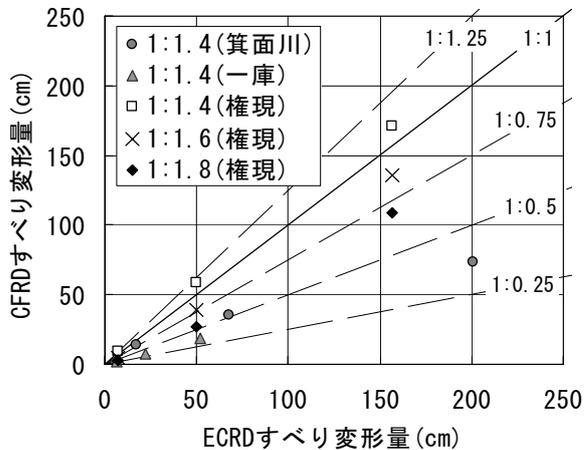


図-25 ECRD と CFRD のすべり変形量の比較

4. まとめ

各種条件下において ECRD と CFRD のモデルに対するすべり変形解析と累積損傷解析を行い、すべり変形量や揺すり込み沈下量への影響分析を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 堤高 100m の ECRD に対する累積損傷解析は、近年の地震で確認されたすべりを伴わない沈下の現象を良く再現しており、その沈下量は入力地震動の波形や最大水平加速度の大きさ、動的変形特性などの物性に大きな影響を受ける。また、物性や入力地震動によっては、揺すり込み沈下量はすべ

り変形量よりもかなり大きくなる場合があった。

- (2) 堤高 100m の CFRD のすべり変形量および揺すり込み沈下量は、入力地震動の最大水平加速度が大きいほど大きくなるが、それらの変形量は、同一最大加速度においても入力波形の特性に大きく影響を受けることがわかった。また、本検討における解析条件では、すべり変形量よりも揺すり込み沈下量のほうが大きくなった。また、累積損傷解析により得られた CFRD の変形形状は、地震によりすべりを伴わず比較的大きな沈下の発生した実際の CFRD の変形形状を、定性的ではあるが再現できていることがわかった。

- (3) ECRD と CFRD の変形量を比較した結果、揺すり込み沈下量は CFRD がわずかに小さく、すべり変形量は、条件によって大小関係がことなることが分かった。

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) 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.
- 5) 館山 勝，龍岡文夫，古関潤一，堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.12，No.4，pp.7-12，1998.4.
- 6) （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計・同解説耐震設計，1998.11.
- 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，芳岡良一：ロック材料の単調載荷試験と繰返し載荷試験，土木研究所資料第 2996 号，1991.3.
- 10) 松本徳久，安田成夫，大久保雅彦，境野典夫：七ヶ宿ダムの動的解析，土木研究所資料第 2480 号，1987.3.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 山口嘉一，富田尚樹，水原道法：ロックフィルダムの地震時すべり変形量に関する検討，ダム工学 Vol.15，No.2，pp.120-136，2005.6.
- 14) 山口嘉一，佐藤弘行，林 直良，三笠真吾：ロック材料のひずみ軟化特性を考慮したロックフィルダムの地震時すべり変形量，第 42 回地盤工学研究発表会講演集，2007.7.
- 15) Yoshikazu Yamaguchi，Tomoya Iwashita and Shinya Mitsuishi：Preliminary Investigation of Dams Stricken By The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008，Proc. The 5th EADC International Symposium on Co-existence of Environment and Dams，2008.10.
- 16) 国土交通省東北地方整備局北上川ダム統合管理事務所：石淵ダム機能評価調査検討会，現地調査打合せ資料，2008.8.

RESEARCH ON 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 calculated sliding deformation and settlement based on cumulative damage theory of earth core rockfill dam (ECRD) and concrete face rockfill dam (CFRD) under various conditions. Then we confirmed that the deformation pattern of an actual dam due to large earthquakes could be reproduced by deformation analysis method based on cumulative damage theory.

Key words : Rockfill dam, Large earthquake, Seismic performance evaluation, Sliding displacement, Cumulative damage theory