

フィルダム堤体材料を用いた繰返し荷重による強度低下に関する試験および解析

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○藤川 祥 正会員 藤田 将司 正会員 榎村 康史
国土交通省国土技術政策総合研究所 正会員 佐藤 弘行

1. はじめに

フィルダムの耐震性能照査においては、せん断強度にピーク強度を用いて実施している。これは、フィルダムの施工は締固め度により品質管理しており、十分な転圧を実施することで繰返し荷重による強度低下の損傷は小さいと考えられているからである。しかしながら、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、ため池が越流により破堤しており、継続時間の長い地震による強度低下による堤体すべりが原因の一つであると考えられている¹⁾。そのため、フィルダムの築堤材料であるロック材やコア材を用いて繰返し荷重による強度低下特性を把握しておくことは重要であると考えられる。そこで、本稿では、実施工中のロックフィルダムの堤体材料を用いて品質管理の平均値程度に相当する締固め度を用いた室内試験による強度低下特性と、室内試験結果を用いたニューマークD法による解析結果を報告する。

2. 試験材料

試験材料には、ロックフィルダムの堤体材料のうちロック材とコア材を用いた。搬入粒度（ロック材は63mmでオーバーカットされたもの）と試験用に粒度調整した調整粒度の粒度分布を図-1に示す。コア材は締固め度Dcを、ロック材は相対密度Drを指標とし、表-1に示す条件で供試体（φ50mm×H100mm）を製作した。ここで、締固めエネルギー1E_cを基準とした管理値（最低管理値）相当として、コア材の締固め度Dc=95%、ロック材の相対密度Dr=85%を設定した。実際の施工条件ではこれ以上の締固め条件となると考えられるため、コア材ではDc=98, 100%を、ロック材ではDr=90, 95%を繰返し強度低下の検討に用いた。なお、コア材のDc=95%、ロック材のDr=85%の供試体による室内試験結果は、後述する解析モデルの勾配設定に用いた。

3. 試験方法

フィルダム材料の非排水繰返し荷重による強度低下を算出するため、図-2、表-2に示す通り圧密非排水繰返し三軸試験（JGS0541）により繰返し荷重を与えた後に、非排水状態を保ったまま直ちに単調載荷試験（JGS0523）を実施した^{2),3)}。繰返し荷重時の荷重周波数は0.1Hz、背圧を200kN/m²、圧密応力は100kN/m²とした。ロック材では、両振幅軸ひずみDAが10%まで進行する前にゴムスリーブが破れ、試験が継続できない場合が見受けられた。そのため、破壊直前で単調載荷に移行し、その時のDAにより損傷内部摩擦角を整理した。

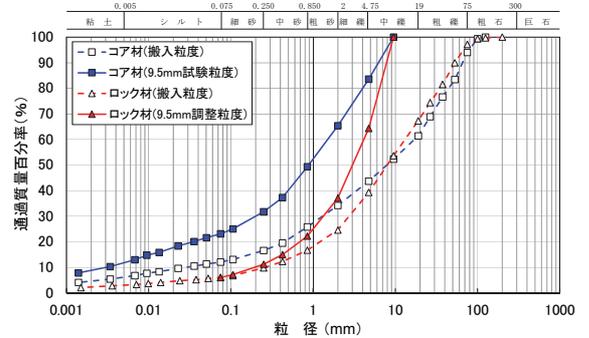


図-1 粒度分布(フィルダム堤体材料)

表-1 供試体条件

材料	締固め度D _c (%) 相対密度D _r (%)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	含水比 w(%)	湿潤密度 ρ _w (g/cm ³)	飽和密度 ρ _{sat} (g/cm ³)	実施試験	結果の 使用目的
コア材	95	1.888	11.8	2.110	2.196	CU試験	解析モデル勾配設定
	98	1.947	11.8	2.177	2.233	繰返し+単調 載荷試験	強度低下特 性の把握
	100	1.987	11.8	2.221	2.259		
ロック材	85	1.876	4.0	1.951	2.176	CD試験	解析モデル勾配設定
	90	1.940	4.0	2.018	2.216	繰返し+単調 載荷試験	強度低下特 性の把握
	95	2.009	4.0	2.089	2.259		

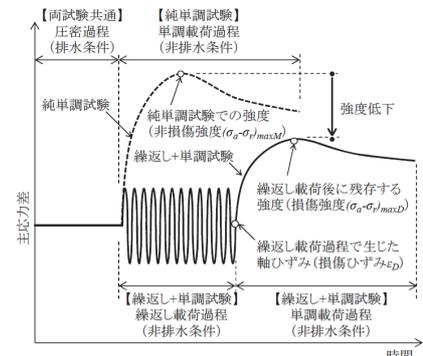


図-2 繰返し+単調載荷試験の概略図²⁾

表-2 繰返し+単調載荷試験一覧

試験概要	試験No.	供試体 締固めケース	繰返し応力振 幅比SR [*] 1	繰返し載荷から単調 載荷へ移行する際の 両振幅軸ひずみDA
DA=10%で繰返し 載荷から単調載 荷へ移行する試 験(試験1)	1	各試験No.において コア材 D _c 98, 100% ロック材 D _r 90, 95% の計4ケースを実施	SR1~5	10%
	2			
	3			
	4			
	5			
DA=1.3, 5.7%で繰 返し載荷から単調 載荷へ移行する 試験(試験2)	6		SR ₂₀ (SR1~5の結果 から算出)	7%
	7			5%
	8			3%
	9			1%

*1 繰返し応力振幅比(SR)のSR1~5は、DA=10%に達するまでの繰返し回数が1~200回程度となるように設定した。また、SR₂₀は20回の繰返し載荷でDA=5%となる時の応力振幅比を表す。

キーワード フィルダム, 非排水繰返し三軸試験, 強度低下, ニューマークD法, すべり変形量

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 国立研究開発法人土木研究所研究企画課 TEL:029-879-6751

4. 試験結果

損傷内部摩擦角 ϕ_{cuD} (繰返し載荷後に残存する強度) と損傷ひずみ ϵ_D (繰返し載荷過程で生じた軸ひずみ) の関係を図-3 に示す. 全試料とも, 繰返し載荷に伴う強度低下が確認され, 損傷ひずみ ϵ_D が 10% で 20~30%程度強度が低下することが分かった. ロック材 (Dr=95%) は, 損傷ひずみが小さい間は比較的大きな強度低下が生じるが, 損傷ひずみが大きくなると強度低下が小さくなる傾向が見られた. ロック材については, 密度が高いほど, 損傷ひずみの増加に伴う損傷内部摩擦角の低下率が小さくなる傾向が見られた. コア材については, 密度と損傷内部摩擦角の低下率に顕著な差は見られなかった.

5. 試験結果を用いたニューマーク D 法による解析

試験結果を用いて, ニューマーク D 法³⁾による堤高 100m のロックフィルダムモデルのすべり変形量を算出した. 解析モデルは図-4 を用い, 上下流面勾配は, コア材は Dc=95%, ロック材は Dr=85%の供試体を用いた内部摩擦角から震度法 (強震帯) により設定した. 表-3 に室内試験結果から設定したニューマーク D 法に用いるせん断強度定数を示す. 解析には 2 ケースの締固め条件を設定した. 入力地震動には, 1995 年の兵庫県南部地震において箕面川ダムで観測された継続時間の短い地震動 (水平方向最大加速度 $\alpha_{hmax}=135gal$, 鉛直方向最大加速度 $\alpha_{vmax}=80gal$) と 2011 年の東北地方太平洋沖地震において七ヶ宿ダムで観測された継続時間の長い地震動 ($\alpha_{hmax}=96gal$,

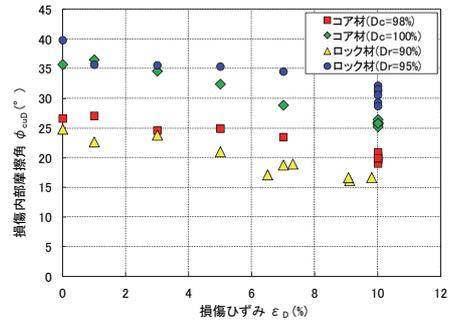
$\alpha_{vmax}=87gal$) の水平方向最大加速度を 1000gal に振幅調整した波形を用いた. その結果, ケース 1 とケース 2 とともに, どちらの入力地震動でもすべりは発生しなかった. しかし, 図-5 に示す通り, 降伏加速度の低下は認められ, 継続時間の長い七ヶ宿波は継続時間の短い箕面川波よりも低下割合が大きいことがわかる.

6. まとめ

フィルダム堤体試料は, 繰返し載荷に伴う強度低下が確認され, DA=10%で 20~30%程度強度が低下した. ロック材は, 密度が高いほど強度低下率が小さくなったが, コア材には差が見られなかった. 実施工の品質管理における平均値程度の密度で行った室内試験結果を用いてニューマーク D 法を実施した結果, 振幅調整により最大加速度 1000gal の地震動を用いてもすべりは発生しなかった. これにより十分な転圧により締固めが行われたロックフィルダムについては, 繰返し荷重による強度低下がすべりの発生に及ぼす影響は小さいと考えられる. また, 同程度の加速度の場合, 継続時間の長い地震動は, 短い地震動と比べて強度低下は大きい.

参考文献

- 1) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会: 藤沼湖の決壊原因調査 報告書 (要旨), 2012.1.25
- 2) 上野和弘, 毛利栄征, 田中忠治, 龍岡文夫: 飽和土の非排水繰返し載荷による強度低下に対する締固め度の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, 1395-1396, 2014
- 3) 上野和弘, 毛利栄征, 田中忠治, 龍岡文夫: 非排水繰返し載荷による強度低下とひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定, 地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-, 2014



※ $\epsilon_D=0\%$ の値は純単調載荷試験の結果であり, $\epsilon_D=10\%$ の値は試験 1 による結果を含む.

図-3 損傷内部摩擦角と損傷ひずみの関係

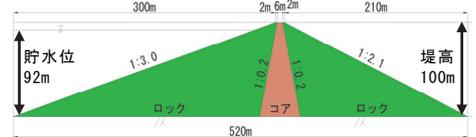
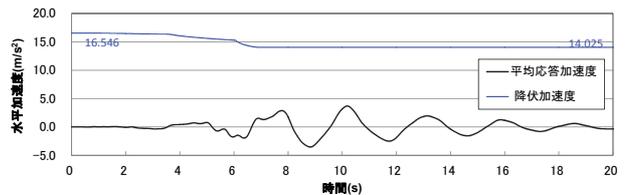


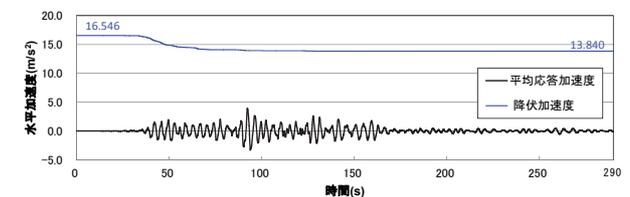
図-4 解析モデル

表-3 設定したせん断強度定数

解析ケース	材料	強度定数			
		粘着力 $c_v(kN/m^2)$	内部摩擦角 $\phi_u(度)$	粘着力 $c'(kN/m^2)$	内部摩擦角 $\phi'(度)$
ケース1	コア材(Dc=98%)	82.0	26.7	2.3	39.1
	ロック材(Dr=90%)	537.1	24.9	38.8	39.6
ケース2	コア材(Dc=100%)	134.2	35.8	6.4	39.3
	ロック材(Dr=95%)	765.1	39.9	156.5	36.5
備考		全応力(三笠の考え方) 飽和部:強度低下あり		有効応力 不飽和部:強度低下なし	



a) 箕面川波 (振幅調整 1000gal)



b) 七ヶ宿波 (振幅調整 1000gal)

図-5 ニューマーク D 法による平均応答加速度と降伏加速度の一例 (ケース 1, 上流側すべり円弧)