

建設中ロックフィルダム地震時の沈下再現解析における飽和・不飽和条件の影響

独立行政法人土木研究所 正会員 ○吉田 諭司
財団法人ダム技術センター 正会員 山口 嘉一
独立行政法人土木研究所 正会員 佐藤 弘行

1. はじめに

盛立段階であった中央土質遮水壁型ロックフィル型式の A ダムでは、2008 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震により、すべりを伴わない比較的大きな沈下が発生した。本論文においては、岩手・宮城内陸地震時の挙動の再現解析において累積ひずみ特性の飽和・不飽和条件の違いによる挙動の変化を考察する。

2. 累積損傷解析による再現解析

2.1 解析方法

解析方法は、築堤解析により堤体内の静的応力分布を求め、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。築堤解析は Duncan-Chang モデルによる盛立過程を考慮した非線形弾性解析とした。動的解析には複素応答法による等価線形解析を用いた。累積損傷解析は、地震によるフィルダムの永久変位が、繰返し応力により発生する築堤材料の残留ひずみに起因するという考え方に基づいている¹⁾。累積損傷解析における繰返しせん断応力比 SR_d は、動的解析による増加分の応力を用いた次式により算出する。

$$SR_d = \{(\sigma_{1d} - \sigma_{3d})/2\} / \sigma'_m \quad (1)$$

ここに、 σ_{1d} および σ_{3d} : 動的解析による増分応力、 σ'_m : 静的解析の平均有効主応力である。

2.2 解析モデルおよび物性値

(1) 解析モデル

解析モデルは地震発生時における最大断面の形状を再現した 2 次元断面とした。築堤解析では、堤体および基礎をモデル化し、動的解析では堤体のみをモデル化し底面を固定境界とした。図-1 に解析モデルを示す。

(2) 解析物性値

表-1 に築堤解析に用いた物性値を示す。物性値は、A ダムの設計値および試験結果を初期値とし、盛立中の層別沈下計実測値より同定した値を用いた。

動的解析に用いる物性値は、A ダムの各材料に関する動的変形試験結果より表-2 に示すとおりとした。な

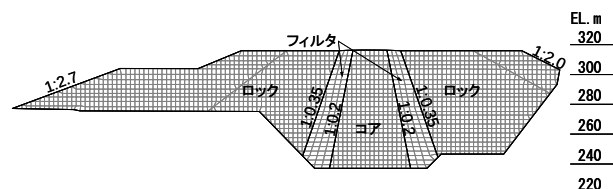


図-1 解析モデル（堤体部）

表-1 築堤解析に用いた物性値

ゾーン名	密度 (g/cm ³)		弾性係数			ポアソン比			強度	
	湿潤	飽和	k	n	R _f	G	F	D	c (kN/m ²)	φ (°)
コア	2.07	2.10	281.6	0.564	0.785	0.342	0.100	8.30	15.2	36.0
フィルタ	2.08	2.15	947.2	0.317	1.042	0.303	0.344	7.21	23.5	37.0
ロック	2.01	2.11	1073.5	0.131	0.744	0.240	0.183	10.68	64.7	41.5
基礎岩盤	-	-	4315MPa			0.25			-	-

表-2 等価線形解析に用いた物性値

ゾーン名	飽和 条件	初期せん断剛性 G ₀ (MPa) ^{*1)}	ひずみ依存特性 ^{*2)}		ポアソン比 ν ^{*3)}
			γ _r	h _{max} (%)	
コア	不飽和	294.879 σ _m ^{0.444}	1.06 × 10 ⁻³	18.0	沢田式
フィルタ	不飽和	628.347 σ _m ^{0.665}	4.74 × 10 ⁻⁴	15.6	
ロック	不飽和	737.070 σ _m ^{0.680}	4.80 × 10 ⁻⁴	14.0	

*1) σ_m : 盛立時の平均有効主応力 σ_m = (1 + ν) · (σ₁ + σ₃) / 3

*2) G/G₀ = 1 / (1 + γ / γ_r), h = h_{max} (1 - G/G₀)

*3) ν = 0.450 - 0.006 Z^{0.60} : コア材料、ν = 0.375 - 0.006 Z^{0.58} : フィルタ・ロック材料
Z : 堤体表面からの深度(m)

表-3 累積ひずみ特性

ゾーン名	飽和 条件	SR _d ~ N _c 関係式
コア	不飽和	SR _d = 2.15 ε ^{0.90} · N _c ^{-0.51} ε ^{0.08} + 0.19 ε ^{0.25}
	飽和	SR _d = 0.23 ε ^{0.60} · N _c ^{-0.40} ε ^{0.33} + 0.19 ε ^{0.21}
フィルタ	不飽和	SR _d = 0.44 ε ^{0.07} · N _c ^{-0.17} + 0.06 ε ^{1.46}
	飽和	SR _d = 0.22 ε ^{0.87} · N _c ^{-0.45} ε ^{0.09} + 0.21 ε ^{0.15}
ロック	不飽和	SR _d = 0.47 ε ^{0.07} · N _c ^{-0.17} + 0.37 ε ^{1.46}
	飽和	SR _d = 0.57 ε ^{2.01} · N _c ^{-0.96} ε ^{0.17} + 0.38 ε ^{0.03}

*1) SR_d : 繰返しせん断応力比, N_c : 繰返し回数,

ε : 累積軸ひずみ(%)

お、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 15% を上乘せした。

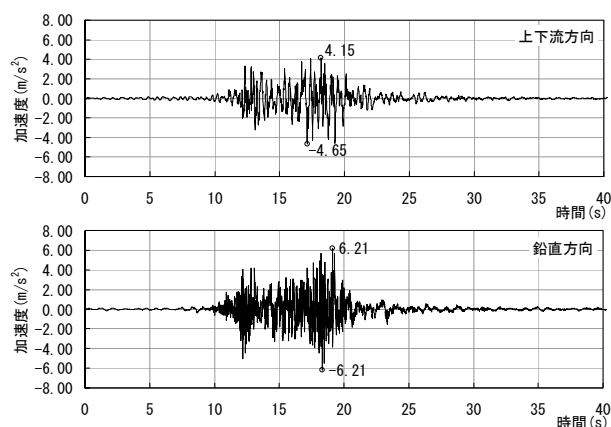
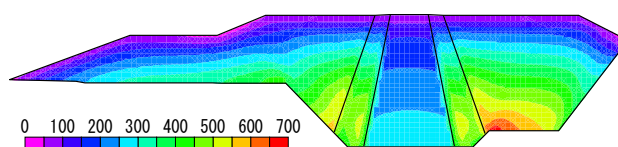
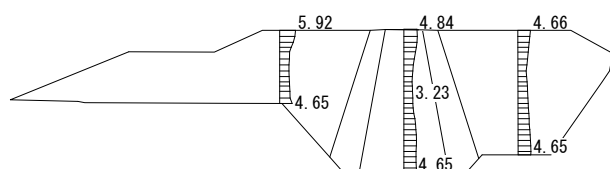
累積損傷解析に用いる累積ひずみ特性は、表-3 に示した A ダムの各材料に関する試験値を用いた。

(3) 入力地震動

入力地震動は、岩手・宮城内陸地震時に A ダムには地震計が設置されておらず、A ダム基礎部の地震記録が得られていないため、A ダム近傍の既設のロックフィルダムにおいて推定された基礎部の加速度時刻歴²⁾

キーワード ロックフィルダム、累積損傷解析、沈下、耐震

連絡先 305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6 独立行政法人土木研究所 TEL : 029-879-6781 E-mail : yoshida44@pwri.go.jp

図-2 入力地震動(下流, 上方が正)²⁾図-3 初期せん断剛性の分布 G_0 (単位: MPa)図-4 最大上下流方向加速度 (単位: m/s^2)

を用いた。図-2 に入力地震動を示す。

2.3 解析ケース

解析ケースは累積ひずみ特性の飽和・不飽和条件による変形挙動の違いをみるため、飽和・不飽和条件を変化させた表-4 に示す 3 ケースを設定し、実測沈下量と比較した。

2.4 動的解析結果

図-3 に初期せん断剛性 G_0 を示す。 G_0 は堤体表面からの深度に応じて大きく、コアゾーンでは他のゾーンに比べ小さい。図-4 に上下流方向最大加速度の鉛直分布を示す。 G_0 が小さい堤体表面付近で応答加速度が大きくなり、入力 of 最大値加速度 $4.65m/s^2$ に対して、天端では $4.66 \sim 5.92m/s^2$ となっており、応答倍率は $1.0 \sim 1.3$ 倍程度となった。

2.5 累積損傷解析結果

図-5 に沈下量の鉛直分布を示す。すべて不飽和条件としたケース 1 ではコアゾーンでの剛性低下が小さいため、層別沈下計実測値と一致しない。逆にすべて飽和条件としたケース 2 ではすべてのゾーンで大きく剛性が低下するため、ロック、コアのどちらも実測値より沈下量が大きくなった。コアのみを飽和条件としたケース 3 では下流ロックゾーンでやや実測値と一致し

表-4 解析ケース

	累積ひずみ特性条件		
	コア	フィルタ	ロック
ケース 1	不飽和	不飽和	不飽和
ケース 2	飽和	飽和	飽和
ケース 3	飽和	不飽和	不飽和

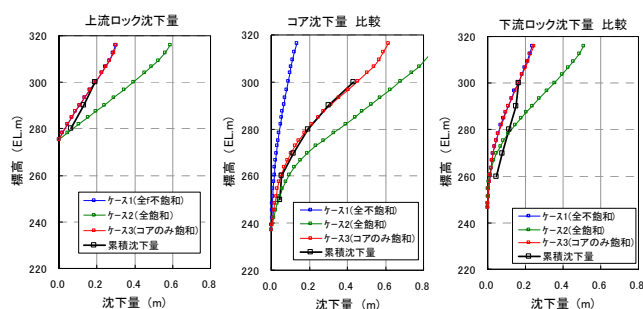
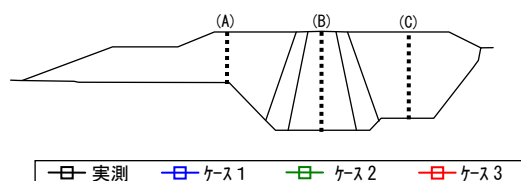


図-5 層別沈下計測値と解析値の比較

ないものの比較的高い精度で実測値と一致した。これらのことからロックゾーンで大きな沈下が生じるとフィルタおよびコアもこれに追従し沈下量が大きくなることがわかる。また、ケース 3 で最も再現性が良かった要因は、地震時に一時的にコア内の間隙水圧が上昇したことが確認されており³⁾、それを反映したかたちとなるケース 3 が最も実現象と近くなったためと考えられる。

3. まとめ

本論文では、岩手・宮城内陸地震によりすべりを伴わない沈下が発生したロックフィルダムの再現解析を行った。結果的にコア材料のみ累積ひずみ特性を飽和条件とした方が高い再現性が得られた。

今後は、本手法を適用して湛水時における大規模地震に対する完成ダムの耐震性能を検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三石真也, 大谷知樹, 末久正樹, 山口嘉一, 岩下友也, 林直良, 佐々木晋: 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 土木研究所資料, 第 4120 号, pp.90-137, 2008.12.
- 3) 渡邊重広, 榊原純: 岩手・宮城内陸地震による胆沢ダム堤体コアのクラック発生について, ダム技術, No.292, pp.54-63, 2011.1.