岩手・宮城内陸地震における建設中ロックフィルダムの被害および変形挙動の再現

独立行政法人土木研究所	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
独立行政法人土木研究所	正会員	〇吉田	諭司

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、2008年6 月14日に発生した岩手・宮城内陸地震では、地震発 生時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、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 城内陸地震によるAダムの被害の概要を示すととも に、すべり変形解析および累積損傷理論を用いた再 現解析を行った。

2. 岩手・宮城内陸地震における建設中ダムの被害

A ダムは、堤高 132m、堤頂長 723m、堤体積 13,500,000m³の中央土質遮水壁型ロックフィルダム であり、地震が発生した 2008 年 6 月 14 日の盛立進 捗率は 65.6%であった。A ダム堤体の標準断面図と 地震時の盛立面を図-1 に示す。

最大断面である標準断面のゾーン間沈下量を図-2 に示す。図-2 によるとロック部およびフィルタ部は 地震による大きな沈下は確認されなかったが、コア 部では、最大約 20cm 程度の地震による沈下が確認さ れ、特に中央(ダム軸)に向かうほど沈下が大きく なる傾向が見られた。

また、コア部およびフィルタ部の盛立面において は両者の境界付近に写真-1 に示すようなダム軸に平 行な亀裂が確認された³⁾。その中でもフィルタ側で は亀裂幅10cm~20cm程度の広いものが確認された。 これは、地震によるコアの沈下量がフィルタの沈下 量よりも大きいため、その両者のゆすり込み沈下量







図-2 最大断面のゾーン間沈下量の推移



写真-1 堤体盛立面に発生した亀裂

の違いにより、特にフィルタ部に引張側のひずみが 集中し、深い亀裂が生じたと推察される⁴⁾。

3. 累積損傷解析による再現解析

3.1 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、

キーワード ロックフィルダム、累積損傷解析、沈下、耐震、すべり変形解析
 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

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⁵⁾。図-3に累積損傷解析の流れを示 す。なお、累積損傷解析における繰返しせん断応力 比*SR*d の算出方法は、動的解析による応力増分を用 いた次式により算出する。

 $SR_{d} = \{ (\sigma_{1d} - \sigma_{3d})/2 \} / \sigma_{m}^{'}$ (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応力である。

3.2 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-4 に解析モデ ルを示す。

(2)解析物性值

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基本として、盛立 中の層別沈下計実測値に合致するように調整したも のを用いた。基礎岩盤の弾性係数は、類似地質の CM 級の弾性係数^のを参考とした上で、盛立中の岩盤変 位計の計測値も踏まえて設定した。

動的解析に用いる物性値は、表-2 に示した A ダム における各材料の物性値のうち、不飽和条件に関す るものを採用した。なお、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 上乗せした。

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。こ のとき、フィルタおよびロック材料については不飽 和材料に関する物性値を採用した。コア材料につい ては、地震時に A ダムのコアゾーンにおいて間隙水 圧の上昇が見られた³⁾ため、不飽和条件に加えて、 飽和条件についての物性も採用した。

(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



図−3 累積損傷解析の流れ 5)



凶-4 胜机モナル(堤14部)

表-1 築堤解析に用いた物性値

	密 (g/c	度 m ³)	弹性係数		ポアソン比			強度		
ゾーン名	湿潤	飽和	k	n	\mathbf{R}_{f}	G	F	D	c (kN/m²)	ф (°)
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	-	-	4	315MP	a		0.25		-	-

表-2 等価線形解析に用いた物性値

	飽和	初期せん断剛性	ひずみ依存特性*2)		ポアソン比
/ /1	条件	$G_0 ({ m MPa})^{*_{1)}}$	γr	h_{\max} (%)	v *3)
コア	不飽和	$294.879\sigma\ {\rm m'}^{0.444}$	$1.06 \times 10^{.3}$	18.0	沢田式
	飽和	$334.891\sigma_{\rm m}{}^{\prime 0.496}$	$6.52 imes 10^{-4}$	15.6	
フィルタ	不飽和	$628.347 \ \sigma \ {\rm m'}^{0.665}$	4.74×10^{-4}	15.6	
	飽和	$523.434 \ \sigma \ {\rm m'}^{0.580}$	4.20×10^{-4}	16.4	
ロック	不飽和	$737.070 \; \sigma \; {\rm m'}^{0.680}$	4.80×10^{-4}	14.0	
	飽和	$474.474 \sigma {\rm m'}^{0.479}$	4.45×10^{-4}	13.9	

*1) σ_m': 湛水時の平均有効応力 σ_m'=(1+ν)・(σ₁+σ₃)/3

*2) $G/G_0=1/(1+\gamma/\gamma_r), h=h_{max}(1-G/G_0)$

*3) v=0.450-0.006Z^{0.60}:コア材料、

ν=0.375-0.006Z^{0.58}:フィルタ・ロック材料(浸潤面以浅)、 ν=0.490-0.001Z^{0.95}フィルタ・ロック材料(浸潤面以深)、

7-0.450 0.0012 mm / 1/2 「ロック村村(夜間面以休

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	$SR_{ m d}$ =2.15 ϵ ^{0.90} · $N_{ m c}$ ^(-0.51 ϵ ^{0.08})+0.19 ϵ ^{0.25}
コア	飽和	$SR_{ m d}$ =0.23 ϵ ^{0.60} · $N_{ m c}$ ^(-0.40 ϵ ^{0.33})+0.19 ϵ ^{0.21}
フィルタ	不飽和	$SR_{ m d}$ =0.44 ϵ ^{0.07} \cdot $N_{ m c}$ ^{-0.17} +0.06 ϵ ^{1.46}
ロック	不飽和	$SR_{ m d}$ =0.47 ϵ ^{0.07} \cdot $N_{ m c}$ ^{-0.17} +0.37 ϵ ^{1.46}

*) SRa: 繰返しせん断応力比, Na: 繰返し回数,

ε:累積軸ひずみ(%)

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⁴⁾を用いた。図-5に入力地震動を示す。

3.3 静的解析および動的解析結果

図-6に初期せん断弾性係数G₀および等価線形解析 における収束剛性 G の分布を示す。G0 および G は堤 体表面からの深度に応じて大きくなる。また、アー チ作用により、コアゾーンの G₀は他のゾーンよりも 小さい。図-7 に上下流方向最大加速度の鉛直分布を 示す。GoおよびGが小さい堤体表面付近で応答加速 度が大きくなり、入力の最大値加速度 4.65m/s² に対 して、天端では 4.66~5.92m/s²となっており、応答倍 率は1.0~1.3 倍程度となった。

3.4 累積損傷解析結果

図-8 に累積損傷解析による残留変形図を示す。コ ア材料を不飽和条件とした Casel では、コアゾーン の沈下量がフィルタ、ロックゾーンの沈下量よりも 小さくなる結果となった。一方、コア材料を飽和条 件とした Case2は、コアゾーンの沈下量がフィルタ、 ロックゾーンよりも大きく、フィルタゾーンがコア 方向に傾く実現象の変形形状と合致する結果となっ た。表-4 に層別沈下計設置位置近傍における天端の 沈下量と層別沈下計最上部の沈下量、図-9 に沈下量 の鉛直分布を示す。Case2の解析結果と層別沈下計実 測値の鉛直分布を比較すると、上流ロック部および コア部では、解析結果と実測値の分布形状はよく一 致している。下流ロック部では、層別沈下計最上段 の沈下量は解析結果と実測値でほぼ同値となったが、 深部においては解析結果が実測値に比べて沈下量が やや小さくなる傾向が見られた。







表-4 層別沈下計最上段部の沈下量

Case	コア材料	沈下量 (m)				
Case	の条件	上流ロック	コア中央	下流ロック		
1	不的和	0.193	0.089	0.161		
1	小民國不同	(0.290)	(0.135)	(0.238)		
9	約五日	0.194	0.454	0.163		
2	民國有中	(0.295)	(0.614)	(0.245)		
実測値	直(EL.300m)	0.182	0.432	0.164		
*) 括弧内は同位置における天端の沈下量						

--- 実測 - Case 1 Case2 -(A) 上流ロック (B) コア (C)下流ロック 320 320 320 300 300 300 E. E E (H) 280 280 280 E E Ē 恒 260 260 _恒 260 账 高 뾑 240 240 240 220 220 220 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 沈下量 (m) 沈下量 (m) 沈下量 (m)

図-9 層別沈下計計測値と解析値の比較

岩手・宮城内陸地震時において、A ダムでは明瞭 なすべりを伴う変形は確認されなかった。そこで、 本研究において、代表的なケースを選定してすべり 変形解析を行った。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^{7),8),9),}により基づきすべり変形量 を算出する方法を用いた。

4.1 解析方法

すべり解析に用いたせん断強度については、三軸 圧縮試験より以下の式で定めた。せん断強度定数に ついては表-5 に示すとおりである。

<C, \phi 法>

 $\tau_f = \sigma_n \cdot \tan \phi + C$ (2)

<Ab 法>

 $\tau_{c} = A \cdot \sigma_{a}^{b}$

ここに、τ_f: せん断強度(N/mm²)、σ_n: 垂直応力(N/mm²)、 φ:内部摩擦角(°)、C:粘着力(N/mm²)である。すべ り変形解析に用いる想定すべり円弧は、図-10に示す 上流側の計7円弧を対象とした。

(3)

4.2 解析結果

Newmark 法によるすべり解析結果を表-6 示す。い ずれの円弧も安全率は1以上で土塊のすべりは発生

\ <u>`</u> _`_`	С, с	り法	ab法(MPa)		
	С	ϕ (°)	А	b	
ロック	_	_	0.977	0.827	
フィルタ	—	—	1.059	0.902	
コア	0.0	36.0	_	_	





図-10 すべり計算に用いたすべり円弧

衣⁻0 9 へり胜忉栢未							
円弧 半径 y/H No 半径 (x/L)		y/H	動的解	折	すべり計算結果		
		(x/L)	最大応答加速度	発生時刻	最小すべり	変位量	
110.	R (m)		(m/s^2)	(sec)	安全率(min)	δ	
1	21.38	0.2	0.594	17.54	4.164	0	
2	42.76	0.4	0.481	17.51	2.953	0	
3	64.15	0.6	0.381	17.49	2.644	0	
(4)	85.53	0.8	0.313	17.46	2.518	0	
5	106.67	1.0	0.302	13.66	2.285	0	
6	35.64	0.5	0.433	17.64	4.022	0	
\overline{O}	42.55	1.0	0.306	17.63	2.937	0	

しない結果となり、実現象と合致している。安全率 は y/H,x/L が大きくなるほど小さくなり、最小安全率 は No. ⑤の SF=2.285 である。

5. 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。累積損傷解析によって岩手宮城内陸地 震時の沈下挙動を再現することが出来た。再現解析 ではコア材料の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。Newmark 法によるすべり 解析では、最小安全率はSF=2.285 であり土塊のすべ りは発生せず、本研究において揺すり込み沈下現象 が再現できたと考える。

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) 国土交通省河川局: 大規模地震に対するダム耐震性能照 查指針(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) 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.
- 4) 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 震被害調查報告, 土木研究所資料, 第 4120 号, pp.90-137, 2008.12.
- 5) 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.
- 6) 建設省土木研究所:ダム基礎岩盤の原位置試験に関する 諸検討と考察, pp.7-24, 1983.1
- 7) 舘山 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.
- 8) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準·同 解説 耐震設計, 丸善株式会社, pp.317-329, 1999.10.
- 9) 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.