

苫田鞍部ダム (CFRD) の築堤・湛水時における変形挙動の再現解析

独立行政法人土木研究所 正会員 山口嘉一・○池澤市郎・小堀俊秀
 国土交通省中国地方整備局苫田ダム管理所 本多卓志・吉持淳榮

1. はじめに

近年のコンクリート表面遮水型ロックフィルダム (Concrete Face Rockfill Dam : 以下 CFRD と称す) は, 施工技術の発展により近代的な工法が定着したことから, 世界的に多くの堤高の高い近代的 CFRD が建設されるようになってきた¹⁾. 我が国で初めて本設構造物として建設された近代的 CFRD は, 2003 年完成の苫田鞍部ダムである. この現在運用している苫田鞍部ダムの挙動について詳細に分析するとともに, 数値解析による挙動再現を図ることは, 今後の我が国における CFRD の大規模化や安全管理の高度化において必要である.

本論文では, 苫田鞍部ダムにおける築堤時および試験湛水時の変形挙動に着目し, 2次元 FEM (有限要素法) 解析を用いて再現性を検証した.

2. 苫田鞍部ダムの概要

苫田ダムは, 国土交通省中国地方整備局が, 吉井川の河口から約 92km の地点に建設した多目的ダムである. ダムは, 堤高 74m の重力式コンクリートダム形式の本ダムと, 本ダムの左岸直上流の地山標高が本ダムの天端標高より低いために建設された堤高 25m の CFRD 形式の鞍部ダムにより構成されている. 苫田鞍部ダムでは, 多くの計測機器を設置しており, 特に変形に関する計測機器として, 堤体及び基礎の変形量を計測する層別沈下計と水平鉛直変位計とメインスラブ (コンクリート遮水壁) の変形量を計測するスライド式挿入型傾斜計がある²⁾. 測定機器の設置位置を図-1 に示す.

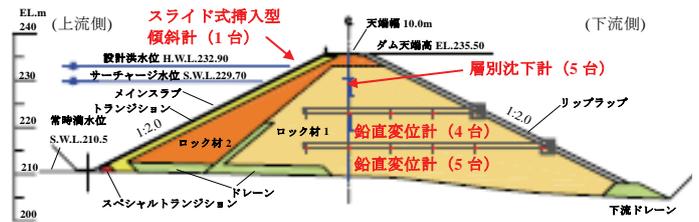


図-1 測定機器の設置位置 (苫田鞍部ダム標準断面)

3. 築堤・湛水解析の解析条件

2次元 FEM 解析方法は, 荷重漸増法による非線形弾性解析とし, 堤体内の応力 σ - ひずみ ϵ 関係を双曲線で近似する Duncan-Chang モデルを用いた. 解析モデルは, 図-2 に示すように苫田鞍部ダムの形状に基づき, 堤高 25m, 上下流面勾配 1 : 2.0 とした. 要素分割の大きさは 1.0m とし, 境界条件は底面を固定境界とした. 使用する要素は, メインスラブを梁要素, 堤体を平面ひずみ要素, メインスラブと堤体間の結合はジョイント要素でモデル化した. 今回の解析モデルでは簡易化のため, 図-1 に示すような堤体内のドレーンやトランジションおよびロック材 1,2 などのゾーニングは行わず, 堤体をロック材のみによる均一材料構成とした. 解析に用いる堤体 (ロック材) とメインスラブおよびジョイント要素の物性値を表-1 に示す. 堤体 (ロック材) の物性値は, 現地のロック材を採取して実施した三軸圧縮試験結果より設定した. 堤体の弾性係数は, 式 (1) ~ 式 (4) に示す Duncan-Chang モデルの構成式より定義した. メインスラブの物性値は, 苫田鞍部ダムで使用したコンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ を踏まえて, 一般的な値³⁾を設定した. ジョイント部の物性値は, 基礎の地盤反力係数⁴⁾を参考に設定した. なお, 鉛直剛性はメインスラブが水圧により堤体表面より内側に変形することを防ぐため, 極めて大きい値に設定した.

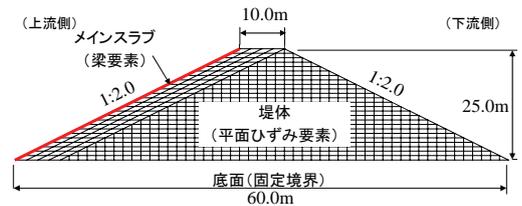


図-2 解析モデル

表-1 解析に用いる物性値

堤体の物性値			設計時	修正後
単位体積重量	γ_t	kN/m ³	20.7	22.1
Duncan-Changの式に用いるパラメータ	K		791	1600
	n		0.34	0.34
	Rf		0.76	0.76
ポアソン比	ν	-	0.3	0.3
粘着力	c	N/mm ²	0.032	0.032
内部摩擦角	ϕ	°	41.51	41.51
メインスラブの物性値				
コンクリートの単位体積重量	γ	kN/m ³	24.5	
コンクリートの弾性係数	E_c	N/mm ²	2.5×10^4	
ポアソン比	ν	-	0.2	
厚さ	H	m	0.35	
メインスラブと堤体の結合部 (ジョイント要素)				
鉛直剛性	Kv	kN/m ³	極大	
せん断剛性	Kh	kN/m ³	980	

$$E_t = E_i [De]^n \quad \cdot \cdot (1) \quad De = \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \phi)}{2 \sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right] \quad \cdot \cdot (2) \quad E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad \cdot \cdot (3) \quad R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad \cdot \cdot (4)$$

ここに, E_t : 接線弾性係数 (N/mm²), E_i : 初期接線弾性係数 (N/mm²), R_f : 破壊比, c : 粘着力 (N/mm²), ϕ : 内部摩擦角 (°), σ_1 : 最大主応力 (N/mm²), σ_3 : 最小主応力 (N/mm²), K, n : $\sigma - \epsilon$ 関係を表す定数, P_a : 大気圧 (N/mm²), $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 破壊時の軸差応力 (N/mm²), $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: 軸差応力の極限值 (N/mm²).

キーワード 苫田鞍部ダム, CFRD, 築堤解析, 湛水解析, Duncan-Chang モデル

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 独立行政法人土木研究所 TEL029-879-6781 E-mail : yamaguti@pwri.go.jp

4. 築堤・湛水時挙動の再現解析

4.1 築堤解析

表-1 に示す設計時の物性値を用いて築堤解析を行った結果、図-3 に示す堤体の弾性係数分布において、比較的堤高の低い部分で局所的に弾性係数が低下する部分が確認された。いま、台形状である堤体は底部から天端に向かって断面幅が減少するため、側方からの最小主応力 σ_3 の鉛直方向分布が鉛直方向の最大主応力 σ_1 の鉛直方向分布より低減率大きい。そのため、堤体内において式 (2) の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) が大きくなり弾性係数が小さくなったと考えられる。本研究では、これは双曲線近似モデルによる解析上の問題点と考え、式 (2) の De に下限値を設けることとした。この下限値は、中村ら⁵⁾によると、築堤時のロック部および中央コア部における主応力比 (σ_1 / σ_3) の実測値が2程度であったこと、弾性体として考えた場合に静止土圧係数の逆数が $1/K_0 (= (1-\nu)/\nu) = 2.3$ であることなどを考慮して、本解析では今回の弾性係数低下部付近に着目し、 De の下限値を0.86に設定した。つぎに、解析結果と計測値の変形量による比較では、図-5、図-6の×印に示すように、最大変形量は計測結果(●印)の2倍程度となった。このため、物性値のうち単位体積重量 γ_t と定数 K を見直した。単位体積重量 γ_t は、建設時の定期的な管理試験として実施したロック材の密度試験結果の平均値より設定した。定数 K は、式 (3) に示すように初期接線弾性係数 E_t に比例する定数である。実際の堤体は設計値より締め固まった状態であると考えられるため、定数 K を100刻みで上げていき、計測値の変形量と合致するまで繰り返し計算を行った。修正後の物性値を表-1に示す。これより修正後の解析結果は、図-4に示すように堤体で確認された弾性係数の低下現象は解消し、変形量の比較では、図-5と図-6の○印に示すように、層別沈下量と鉛直変位の分布は計測値と同程度の結果を得ることができた。

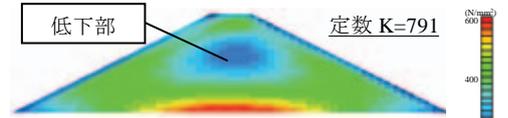


図-3 堤体の弾性係数分布(設計時)

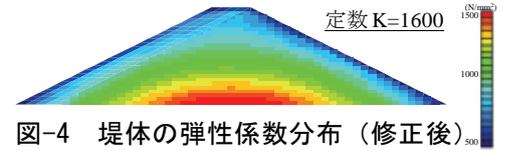


図-4 堤体の弾性係数分布(修正後)

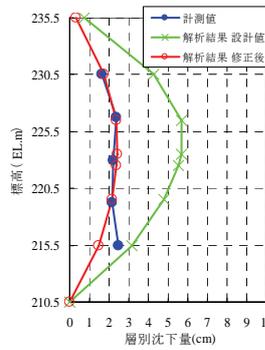


図-5 層別沈下量

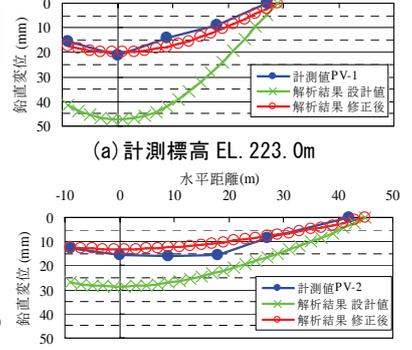


図-6 鉛直変位分布

4.2 湛水解析

湛水解析では、築堤解析終了時の応力状態を初期応力として設定し、メインスラブ(梁要素)を上流側斜面に設けた後に、サーチャージ水位(EL.229.7m)による静水圧を作用させた。解析の結果、スラブの法面直角方向の変位量は、図-7に示すように、計測値に対して解析結果は最大値で概ね2倍(7.3mm/3.4mm)大きい結果となった。そこで、コンクリートの物性値のうち変形係数を2倍($E_c = 5.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$)にして再度解析を実施したが、解析結果(変形量)に大きな変化はなかった。また、堤体とメインスラブを結合するジョイント要素のせん断剛性 Kh についても剛性を変えてみたが変形量に影響がないことを確認した。したがって、変形量に影響する要因は堤体の物性値と考えられる。今回の解析では、堤体を均一材料でモデル化したが、実際は図-1に示すようにゾーニングされている。ロック材1(下流側)の盛立厚は100cmで転圧回数は6回、ロック材2(上流側)の盛立厚は50cmで転圧回数は4回である。このことから、ロック材2はロック材1より締め固まった状態にある可能性がある。築堤解析による変形挙動の再現はロック材1の範囲であり、今後は、湛水解析については、堤体のゾーニングをモデル化した解析を行う必要がある。

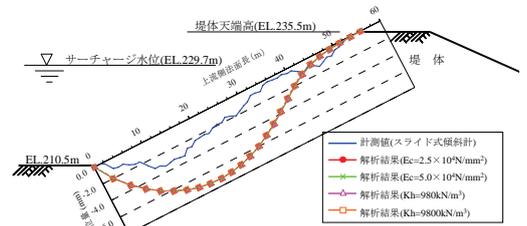


図-7 メインスラブの変位分布

5. おわりに

本研究では、CFRD型式である苦田鞍部ダムの築堤時および湛水時の変形挙動について、2次元FEM解析による再現解析を実施した。その結果、築堤時の変形挙動については概ね再現することができた。湛水時のメインスラブにおける変形挙動は、解析結果が計測値を上回っており、これは堤体のモデル化において、実際のゾーニングに合わせることで計測値に近づくと考えられる。今後は、湛水時における変形挙動の詳細検討や基礎地盤をモデル化した変形挙動解析の検討、さらに、CFRDの大規模化に向けた検討についても研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 坂本忠彦,松本徳久,福永和久: 海外のCFRDの動向,ダム技術, No.162, pp8-21, 2000.
- 2) 山口嘉一,小堀俊秀,本多卓志,吉持淳栄: 苦田鞍部ダム(CFRD)の浸透/漏水と外部変形に関する安全管理,地盤と建設, Vol.24, No.1, pp.27-34, 2006.
- 3) (社)土木学会: コンクリート標準示方書・同解説,構造性能照査編, pp.28-29, 2002.
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, IV下部構造編, pp.254-257, 2002.
- 5) 中村昭,小嶋光博,藤澤侃彦,安田成夫,伊藤基博: フィルダムの挙動解析(その3)-土圧,間隙水圧-,土木研究所資料,第3422号, pp.22-23, 1996.