

小石原川ダムを対象とした土水連成弾塑性 FEM 解析（その 1）
ー情報化施工への適用ー

鹿島建設(株) 正会員 ○宇津野衛 大野進太郎 藤崎勝利 小林弘明
リテックエンジニアリング 正会員 澤田叔宏
(独)水資源機構 正会員 坂本博紀 曾田英揮

1. はじめに

現在、(独)水資源機構が福岡県朝倉市に建設中の小石原川ダムは、堤高 139 m、堤頂長 550 m、総貯水容量約 4,000 万 m³ の中央コア型ロックフィルダムである。堤体の盛立は、22.5 ヶ月という極めて短期間で施工することが計画されており、高速盛立のため、盛立期間中における間隙水圧の消散が不十分となることで、堤体の安定性に影響を及ぼす可能性のあることが懸念された。そこで、施工前あるいは施工中に、計画されている盛立速度に対して間隙水圧の発生量及び堤体の力学挙動を予測・評価し、事前に堤体の品質・安定性を確認することを目的として、土水連成弾塑性 FEM 解析を用いた情報化施工（以下、FEM 情報化施工）を行うこととした。

2. 小石原川ダムにおける FEM 情報化施工の概要

小石原川ダムでは FEM 情報化施工を、①盛立前検討、②盛立中管理、③盛立後検討の 3 段階で実施する。図-1 に FEM 情報化施工のフローを示す。①盛立前検討では、施工中に発生する間隙水圧や堤体の力学挙動を予測し、堤体の安定性が確保されていることを確認した上で、盛立工程を決定する。②盛立中管理では、動態観測結果と盛立前検討での予測結果を比較・分析し、その時点での堤体安定性評価、対策要否、盛立継続判断を実施する。さらに施工済の盛立工程を忠実に再現した上で分析結果により物性等を再評価することで予測精度を向上させ、その後の盛立工程の妥当性及び堤体安定性を確認する。③盛立後検討では、②同様に比較・分析し、物性等を再評価することにより、予測精度を向上させ、盛立後の堤体安定性を確認した上で、盛立中に発生した間隙水圧の消散による残留沈下量を予測する。

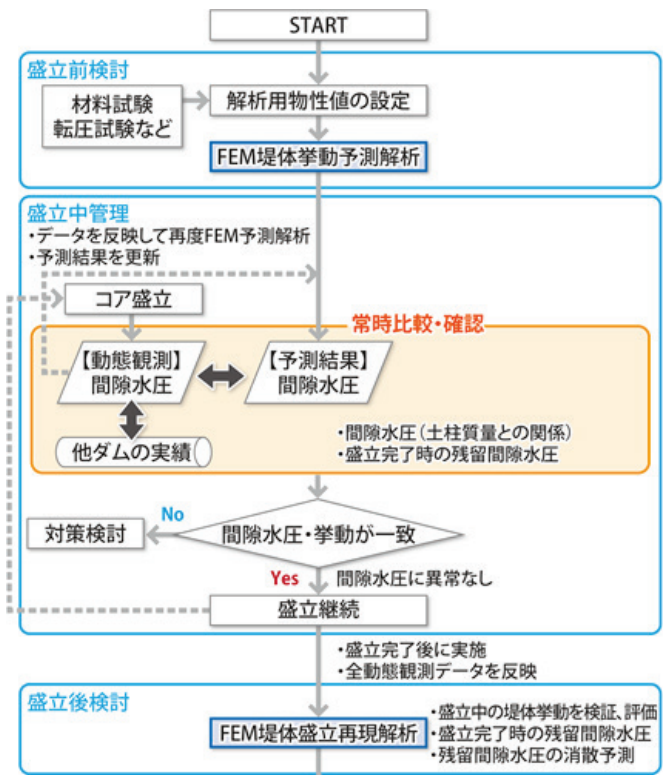


図-1 FEM 情報化施工フロー図

表-1 解析物性値（②盛立中管理時）

物性名	単位	コア※		フィルタ	内部 ロック	外部 ロック	設定根拠	
		1st	2nd				コア	フィルタ・ロック
湿潤密度 ρ_t	t/m ³	2.24	2.26	2.36	2.26	2.29	品質管理試験結果	
降伏時間隙比 e_0	-	0.437	0.496	0.193	0.203	0.203	圧密試験結果	動態観測結果
内部摩擦角 ϕ'	deg	33.9	34.6	39.4	43.3	43.3	三軸圧縮試験結果	M=6sin ϕ' /(3-sin ϕ')より
圧縮指数 λ	-	0.0417	0.0386	0.0249	0.0239	0.0239	圧密試験結果 $\lambda=0.434C_c$	動態観測結果
膨潤指数 κ	-	0.0078	0.0065	0.0043	0.0074	0.0074	圧密試験結果 $\kappa=0.434C_s$	動態観測結果
鉛直降伏応力 σ_{v0}'	kPa	300	300	450	500	500	圧密試験結果	動態観測結果
ポアソン比 ν'	-	0.307	0.302	0.412	0.412	0.412	$\nu=K_0/(1+K_0)$	徳山ダム設定値 ⁴⁾
静止土圧係数 K_0	-	0.442	0.432	0.700	0.700	0.700	$K_0=1-\sin\phi'$	徳山ダム設定値 ⁴⁾
透水係数 k	cm/sec	6.60E-07	1.40E-06	3.70E-02	2.60E-01	5.30E-01	品質管理試験結果	
透水係数の変化率 λ_k	-	0.0319	0.03472	0.0061	0.03732	0.03732	圧密試験結果	徳山ダム設定値 ⁴⁾

※コアは物性は材料の混合割合（1stブレンド、2ndブレンド）の変更による物性区分を考慮⁵⁾

キーワード ロックフィルダム、土水連成弾塑性 FEM、情報化施工
連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株) 土木設計本部 TEL 03-6229-6684

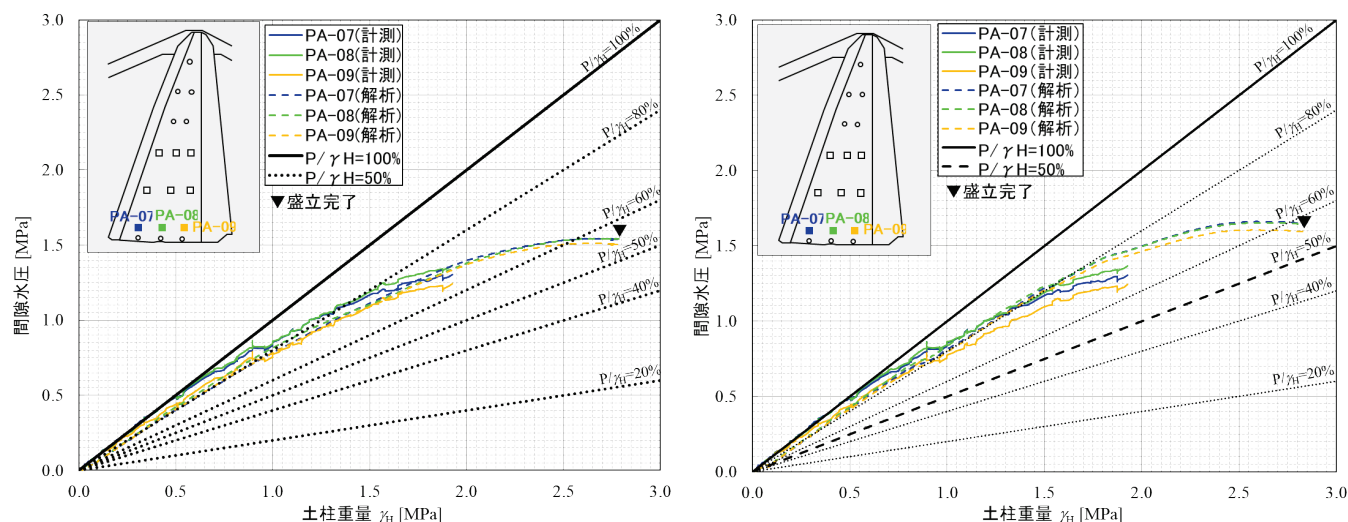


図-2 土柱重量－間隙水圧関係（左：①盛立前検討，右：②盛立中管理）

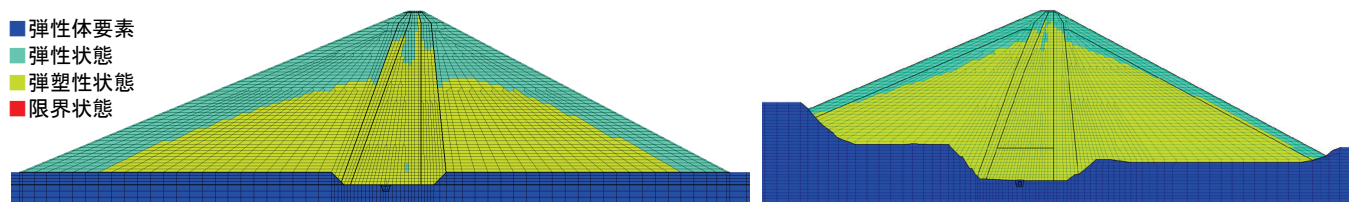


図-3 要素状態図（盛立完了時，左：①盛立前検討，右：②盛立中管理）

3. FEM 情報化施工の実施状況

FEM 情報化施工で用いる土水連成弾塑性 FEM 解析は，文献¹⁻³⁾に示されている手法を使用した．①盛立前検討における解析では，コア物性は室内試験等から設定し，フィルタ及びロック物性は徳山ダムの値⁴⁾を用いた．②盛立中管理では，コア物性は①盛立前検討同様に室内試験等から設定し，フィルタ及びロック物性は予測精度向上のため動態観測結果に基づいて圧縮特性を設定した⁵⁾．表-1 に②盛立中管理で用いた各堤体材料の物性を示す．図-2 に①盛立前及び②盛立中で実施した解析結果と 2019 年 1 月時点での動態観測結果の間隙水圧－土柱重量関係を示す．盛立前解析から，盛立初期には 100% 近い高い間隙水圧発生率を示しているが，盛立の進行とともに発生率は低下し，完了時には 60% を下回ることが予測された．また，動態観測結果との比較において，間隙水圧については盛立前，盛立中ともに解析結果は良く一致しており，盛立前検討の段階で非常に高い予測精度が実現できていたことがわかる．ただし，本稿では示していないが，盛立前検討ではフィルタ及びロック物性として徳山ダムの値を用いているため，土圧や変形は動態観測と解析は一致しない結果となった．盛立中検討においては動態観測結果を用いて解析の精度向上を図り，動態観測と解析が一致する結果を得ている．詳細については文献⁵⁾を参照されたい．図-3 に盛立完了時の要素状態図を示す．限界状態に至る要素は見られず，堤体の安定性は確保されていることが確認できる．盛立前と盛立中検討での断面形状の違いは，盛立前検討では小石原川ダムの標準断面を検討対象としていたのに対し，盛立中検討では精度向上のために動態観測結果と比較を行う主計測断面を検討対象としたためである．また，盛立完了時におけるコアの鉛直全土圧分布が湛水時のサーチャージ水位での静水圧分布を上回り，湛水に対しても安定性が確保されていることを確認している．以上のように，各施工段階において盛立速度に対する間隙水圧及び堤体の力学挙動を予測解析し堤体の安定性を評価することで，その後の盛立工程の妥当性を確認した．

4. おわりに

現在建設中の小石原川ダムを対象に，盛立中の堤体品質や安定性確保を目的として，土水連成弾塑性 FEM 解析による情報化施工を実施した．盛立前～盛立中における解析検証を通してコア内の間隙水圧挙動に対し非常に高い予測精度を実現し，堤体の盛立速度の決定に貢献した．今後も，情報化施工の 3 段階目である③盛立後検討を行い，堤体挙動の定量的評価を実施する．

参考文献 1)大野ら：ロックフィルダムを対象とした土水連成弾粘塑性 FEM 解析，第 72 回土木学会年次学術講演会，III-305, 2017.

2)大野ら：土水連成弾粘塑性 FEM による大分川ダムの築堤解析，第 73 回土木学会年次学術講演会，III-093, 2018. 3)宇津野ら：締固め管理方法の違いがフィルダム力学挙動に与える影響の解析的評価，第 54 回地盤工学研究発表会，2019. (投稿中) 4)富田ら：弾塑性圧密連成モデルを用いた中央土質遮水壁型ロックフィルダムの湛水挙動の評価，大ダム，No.216, pp.55-60, 2011. 5)澤田ら：小石原川ダムを対象とした土水連成弾塑性 FEM 解析（その 2）－計測データに基づく精度向上－，第 74 回土木学会年次学術講演会，2019. (投稿中)