

既設ダム耐震補強工事の情報化施工 ー堤体挙動予測解析ー

鹿島建設(株) 正会員 ○小林孝彰 奥田喬一 大野進太郎 中島悠介 藤崎勝利

1. はじめに

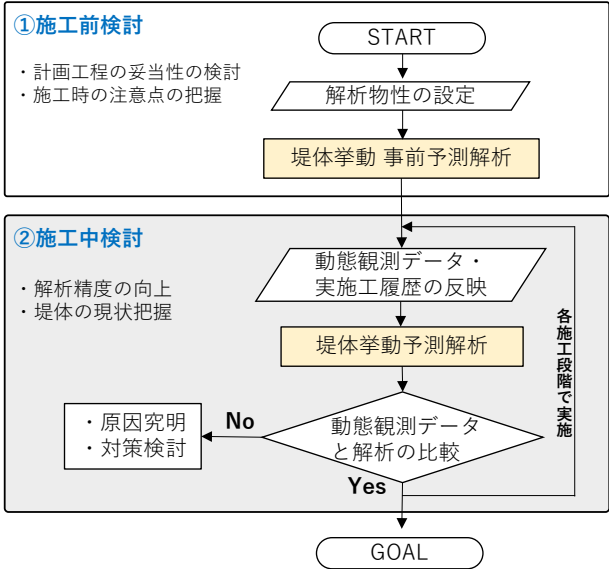
関東大震災の翌年である大正 13 年（1924 年）に完成した村山上貯水池では、その堤体の耐震性向上を目的とした補強工事中である。工事では、堤体下流側の約 11 万 m³の抑え盛土を撤去後、約 20 万 m³の強化盛土を新たに施工した。堤体の天端道路を供用しながら盛立施工するため、堤体の変形による影響が懸念された。本稿では、情報化施工の一環として実施した、土水連成弾塑性 FEM による堤体挙動予測解析について述べる。解析による予測と動態観測結果を比較し、工事中の堤体の状態を常に把握することで、安全な施工を実現した。

2. 堤体挙動予測解析を用いた情報化施工

堤体挙動予測解析を用いた情報化施工（藤崎ら，2005）のフローを図－1 に示す。①施工前検討では、事前に得られる情報に基づいて解析物性を設定し、計画工程を反映した予測解析を行う。施工計画の妥当性を判断し、施工中の管理項目とその基準値を明確にする。本工事では、既設堤体の新たな材料試験が難しいことから、過去の試験・文献を参考に物性を設定した。そこで、特に確度の低い物性や解析結果への影響が大きい物性については、上限値と下限値を定めて幅付きの評価を実施した（堤体の圧縮性と透水性）。また、解析結果を基に別途実施した堤体のすべり安定性の評価により、実際の挙動が事前予測の範疇であれば、堤体の安定性に問題がないことを確認した。②施工中検討では、解析による予測と動態観測結果を比較し、堤体の状況を把握する。また、施工中に得られる動態観測結果に基づいて解析条件を更新し、予測精度の向上を図る。解析物性については、事前に設定した範囲内で動態観測結果を最も再現する値を絞り込む。本工事では効率と客観性の観点から、データ同化を用いた逆解析を活用して、これを実現した（後編で詳述）。

3. 土水連成弾塑性 FEM の概要

堤体挙動の予測には、二次元土水連成弾塑性 FEM を用いた。解析モデルを図－2 に示す。解析上で新設堤体の施工を模擬するため、要素を一層ずつ発生させ、盛土の自重と等価な節点外力を与えた。既設堤体と新設堤体には関口太田モデル（修正カムクレイ型）を、基礎岩盤には線形弾性モデルを用いた。現実では堤体内部に水位面が存在するが、解析上は保守的な設定として、堤体表面を水位面とした。施工中の検討で最終的に用いた物性を表－1 に示す。表中に黄色で示す物性は、後述のデータ同化による推定の対象としたものである。



表－1 既設・新設堤体の物性値
関口太田モデル（修正カムクレイ型）
黄色：データ同化による推定の対象物性

物 性 名		単位	既設堤体			新設堤体		
			上流 さや土	心壁	下流 さや土	ローム材	芋壱 礫層材	抑え盛土 流用材
飽和単位 体積重量	γ_{sat}	kN/m ³	16.5	17.5	16.5	21.0	21.5	20.4
圧縮指数	λ	-	0.2626	0.2148	0.2148	0.0716	0.0751	0.0751
膨潤指数	κ	-	0.0460	0.0134	0.0134	0.0125	0.0109	0.0109
降伏時間隙比	e_0	-	1.590	1.450	1.450	0.582	0.520	0.550
圧密降伏応力	P_c	kPa	664	780	780	300	250	250
限界応力比	M	-	1.235	0.898	1.235	1.510	1.471	0.890
ポアソン比	ν	-	0.328	0.378	0.328	0.284	0.290	0.380
透水係数	k	cm/s	5.86×10^{-6}	5.86×10^{-6}	5.86×10^{-6}	3.59×10^{-7}	4.76×10^{-6}	1.14×10^{-5}

図－1 堤体挙動予測解析を用いた情報化施工のフロー

キーワード 情報化施工，土水連成弾塑性 FEM，弾塑性構成則，既設ダム耐震補強，盛立

連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株)土木設計本部 TEL 03-6735-3466

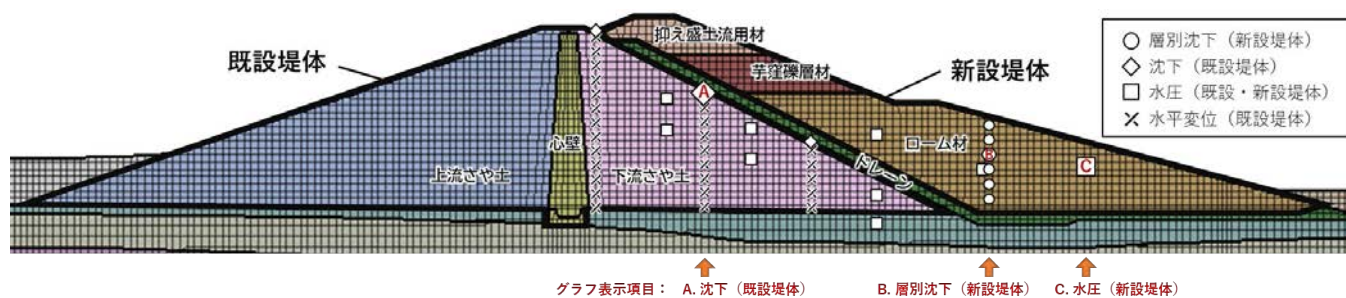


図-2 解析モデル(堤体部拡大)と動態観測のセンサー位置(赤字アルファベットは図-3のグラフ表示項目)

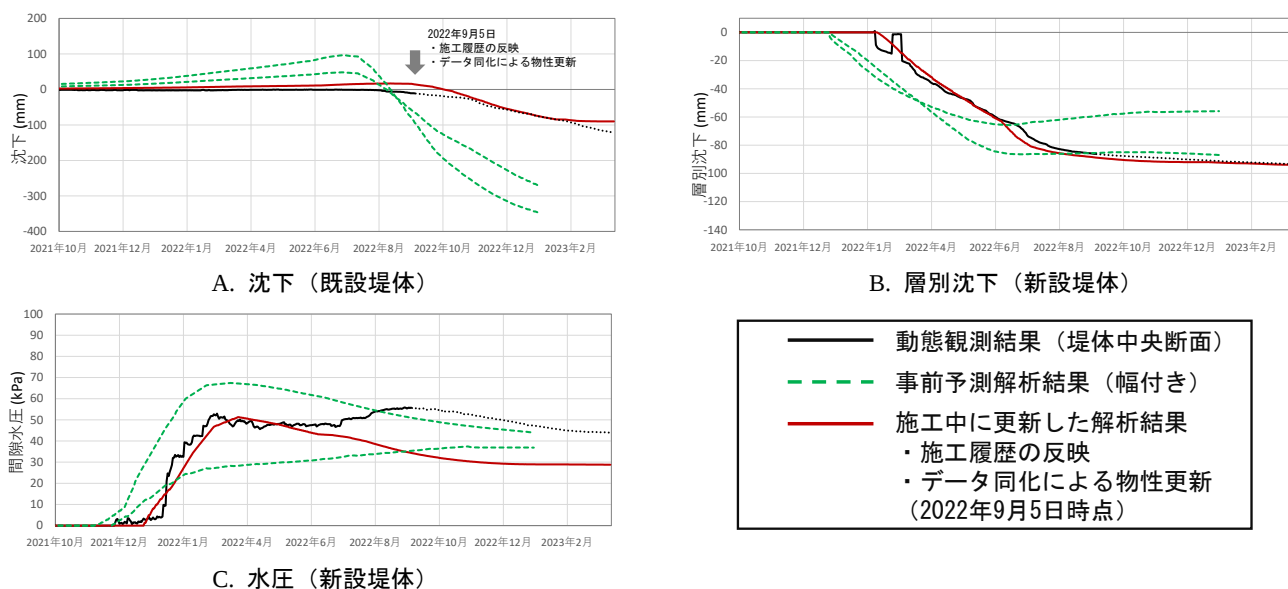


図-3 解析結果と動態観測結果の比較

4. 解析結果と動態観測結果の比較

代表的な結果を図-3に示す。動態観測位置は、図-2にアルファベットで示す通りである。図中の緑色の破線は、事前解析による幅付きの予測結果である。赤色の実線は、施工中の動態観測結果を反映して条件を更新した最終的な解析結果である。2022年9月5日時点で、実際の現場施工履歴を解析に反映し、それまでの動態観測結果(黒色の実線)に対するデータ同化によって物性を更新した。全てのグラフにおいて、動態観測結果を概ね再現する解析結果となっている。A.沈下(既設堤体)では、文献に基づく事前の想定より既設堤体の剛性が高く、沈下が少ない結果となった。B.層別沈下(新設堤体)は、事前の予測と同程度の沈下となった。材料の圧密試験から物性を設定できたため、高精度な予測になったと考えられる。C.水圧(新設堤体)は、事前に想定した範囲の中央に収まる程度となった。なおローム層の透水係数については、データ同化で推定した値をそのまま用いず、工学的判断を加えて値を設定した。具体的には、水圧の初期の上昇過程を重視して、施工中に得た各種透水試験結果の範囲内で設定した。

本工事では、施工を通じて堤体の変形、間隙水圧が事前に設定した閾値を超えなかった。上記の情報を施工関係者間で共有することにより、堤体の状況を常に把握し、安全な施工を実現した。

5. まとめ

本論文では、村山上貯水池堤体の耐震補強工事を対象に情報化施工の一環として実施した堤体挙動予測解析について述べた。土水連成弾塑性FEMにデータ同化手法と技術者の工学的判断を組み合わせることで、効率的かつ客観的な予測が実現できた。今後は同手法の他工種への展開へ向けて、知見を蓄積する予定である。

参考文献

[1] 藤崎ら.(2005). 既設アースフィルダムの安定性に着目した情報化施工管理事例, 土木学会論文集, No784/VI-66, pp 45-64