

有限要素法による堤防の液状化時安全性評価法の提案

液状化, 堤防, 有限要素法

株式会社フォーラムエイト 正会員 ○ 高橋千明
 群馬大学建設工学科 正会員 蔡 飛
 群馬大学建設工学科 正会員 鶴飼恵三

1. はじめに

河川堤防やため池の堤体などの盛土構造物について、震度法を用いた円弧すべり計算による耐震設計法が適用されてきた。地震時に液状化する恐れがある場合には円弧すべり計算時に地震時の過剰間隙水圧を考慮する Δu 法が用いられてきたが、有限要素法による解析技術の向上により動的有効応力解析を適用する精査が次第に設計の中に取り入れられるようになってきた。

動的有効応力解析による精査では主に堤体の沈下量で安全性の評価を行う。一方、液状化による被災状況として沈下の他にクラックやすべり破壊などの可能性も考えられ、地震動終了後のすべり破壊の被災事例も多く報告されていることから、安定計算によるすべり面の推定と安全率の算出を行うことにも十分な意義があると考えられる。そこで本研究では、堤体および基礎地盤について、浸透流解析により定常浸透時の水圧分布を把握するとともに動的有効応力解析により堤体の変形量と過剰間隙水圧を算出し、それらの解析から得られる水圧を用いてせん断強度低減法によるすべり面の推定と安全率の算出を行うことを試みた。

2. 検討内容

1971年2月9日のSan Fernando地震により堤体が決壊したLower San Fernandoダムの上流側斜面を検討対象とした。検討の流れを図-1に、本研究で使用した有限要素解析コードを表-1に示す。当該ダムでは、地震動発生からおよそ60秒後にすべり破壊が発生したことが報告されている。したがって、せん断強度低減法によるすべり面の推定と安全率の算出は、定常浸透時の水圧と動的有効応力解析における時刻 $t=60$ 秒の過剰間隙水圧を考慮して実施した。

表-1 使用解析コード

解析内容	目的
浸透流解析 (VGFlow)	定常浸透時の水圧分布状況の把握
動的有効応力解析 (UWLC)	地震時液状化による変形量と過剰間隙水圧の算出
弾塑性解析 (GeoFEAS)	せん断強度低減法によるすべり面の推定と安全率の算出

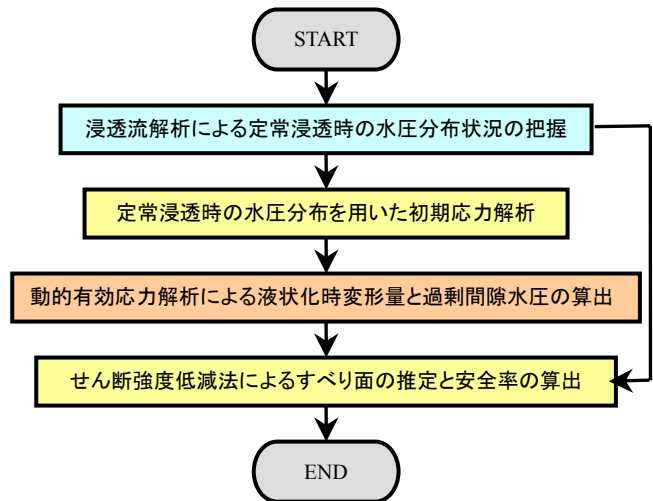


図-1 検討の流れ

3. 解析モデルおよび材料パラメータ

Lower San Fernandoダムの断面図を図-2に、解析に用いた有限要素メッシュを図-3に示す。ここでは、解析モデル全領域を8節点4角形要素でメッシュ分割した。

初期応力解析およびせん断強度低減法によるすべり面の推定と安全率の算出では、全ての材料に対しMohr-Coulomb方式による弾・完全塑性モデルを適用した。動的有効応力解析では、全ての材料に対して砂のPastor-Zienkiewiczモデルを適用した。本研究で用いた主な材料定数を表-2に示す。

なお、Pastor-Zienkiewiczモデルのパラメータは、既往の文献を参考に決定した。入力地震動波形は、当該ダム地点の近傍で観測された修正Pacoima Recordを用い、解析時間は主要動を含め100秒間とした。

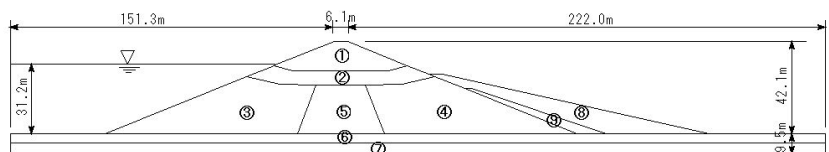


図-2 Lower San Fernandoダムの検討断面

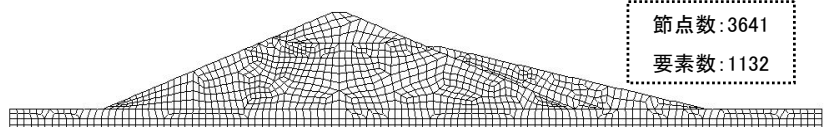


図-3 有限要素メッシュ

表-2 材料パラメータ

番号	材料名	基本パラメータ							Pastor-Zienkiewicz モデルのパラメータ								
		E (kN/m ²)	γ (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ ($^{\circ}$)	μ	k_x (m/s)	k_y (m/s)	K_0	G_0	M_g	M_f	α_g α_f	β_0	β_1	H_0	γ γ_u
①	Rolled fill	1.02e+5	22.0	124.50	25	0.2857	5.00E-6	2.00E-6	80	120	1.375	1.032	0.45	4.2	0.2	467.0	2.0
②	Hydraulic fill	1.02e+5	22.0	124.50	25	0.2857	5.00E-6	2.00E-6	80	120	1.375	1.032	0.45	4.2	0.2	467.0	2.0
③	Hydraulic fill	0.89e+5	19.2	0.00	37	0.2857	1.00E-4	4.00E-5	70	105	1.375	0.570	0.45	4.2	0.2	408.3	2.0
④	Hydraulic fill	0.98e+5	19.2	0.00	37	0.2857	1.00E-4	4.00E-5	75	112	1.375	0.825	0.45	4.2	0.2	408.3	2.0
⑤	Clay Core	1.53e+5	19.2	57.45	0	0.2857	5.00E-6	2.00E-6	120	180	1.375	1.242	0.45	4.2	0.2	700.0	2.0
⑥	Upper Alluvium	1.53e+5	20.3	0.00	37	0.2857	1.00E-5	4.00E-6	120	180	1.375	1.242	0.45	4.2	0.2	700.0	2.0
⑦	Lower Alluvium	1.53e+5	20.3	0.00	37	0.2857	1.00E-5	4.00E-6	120	180	1.375	1.242	0.45	4.2	0.2	700.0	2.0
⑧	Rolled fill	1.02e+5	22.0	124.50	25	0.2857	1.00E-5	2.00E-6	80	120	1.032	1.375	0.45	4.2	0.2	467.0	2.0
⑨	Rolled fill	1.02e+5	22.0	124.50	25	0.2857	1.00E-5	2.00E-6	80	120	1.032	1.375	0.45	4.2	0.2	467.0	2.0

4. 解析結果

定常浸透時の水圧分布状況を図-4に、地震後のダムの変形を図-5に示す。図-5より上流側に破壊とも言える大きな変位が生じたことが分かる。これは、地震による水締め材料③に大きな過剰間隙水圧が生じ液状化に至ったことが原因であると考えられる。地震開始後 t=10 秒のときの過剰間隙水圧比を図-6に示す。上流側の水締め材料の底部においては、過剰間隙水圧比が 0.7 程度になっていることがわかる。これにより、水締め材料の強度が著しく低減した。図-7より、地震開始後 60 秒後も上流側の水締め材料の底部に高い過剰間隙水圧が残留していることがわかる。動的有効応力解析により計算した過剰間隙水圧を定常浸透時の水圧と足し合わせ全水圧を計算した上で、せん断強度低減法により安全率を計算した。地震前の安全率が 1.54 であることに対して、地震開始後 100 秒での安全率は 0.88 しかない。これより、本論文で提案した手法が Lower San Fernando ダムの地震時液状化による崩壊を良く再現したということが言えよう。

5. おわりに

数値解析手法を用いる堤防の地震時安定性評価手法を提案した。つまり、堤体および基礎地盤について、浸透流解析により定常浸透時の水圧分布状況を把握するとともに動的有効応力解析により堤体の変形量と過剰間隙水圧を算出し、それらの解析から得られる水圧を用いてせん断強度低減法によるすべり面の推定と安全率を算出する。提案した手法は地震による堤防の残留変形、堤防および基礎地盤の液状化による堤防の安全率の低下を計算できる。提案した手法を地震時崩壊が生じた Lower San Fernando ダムに適用し、崩壊を良く再現できることを示した。

参考文献

- 1) Khoei, A.R., Azami, A.R., Haeri, S.M.: Implementation of plasticity based models in dynamic analysis of earth and rockfill dams: A comparison of Pastor-Zienkiewicz and cap models, Computers and Geotechnics, 31:385-410, 2004.
- 2) Seed, H.B., Idriss, M.I., Lee, K.L., Makdisi, F.I.: Dynamic analysis of the slide in the lower San Fernando dam during the earthquake of February 9, 1971, JOURNAL OF THE GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION, 1975:889-911, 1975
- 3) Seed, H.B., Lee, K.L., Idriss, M.I., Makdisi, F.I.: The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971, JOURNAL OF THE GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION:651-688, 1975

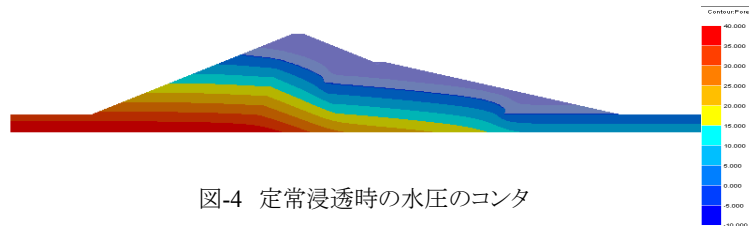


図-4 定常浸透時の水圧のコンタ

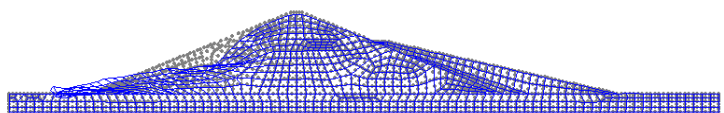


図-5 動的有効応力解析における残留変形(t=100 秒)

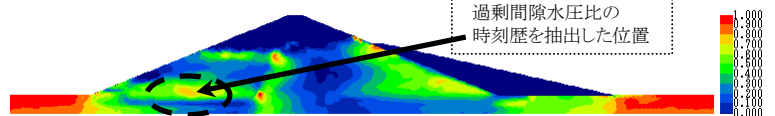


図-6 動的有効応力解析における過剰間隙水圧比のコンタ(t=10 秒)

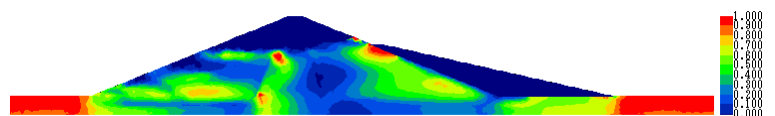


図-7 動的有効応力解析における過剰間隙水圧比のコンタ(t=60 秒)

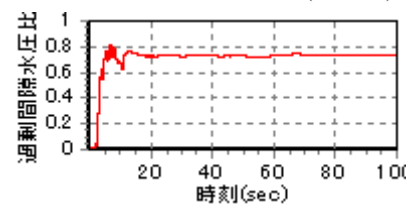


図-8 水締め材料③の過剰間隙水圧比の時刻歴