

3.2 アースフィルダムにおける液状化を考慮した有効応力解析

研究年度：平成30年度～令和元年度

研究分野：ダム構造・設計に関する調査研究

調査研究名：アースフィルダムにおける液状化を考慮した有効応力解析

研究者：川崎秀明*、長野航兵

【要約】

当該ダムにおける既往の耐震照査結果より、堤体に対する等価線形化法による地震応答解析およびその結果を用いた FL 値法による液状化判定の結果、堤体のコア材及びランダム材において FL 値が 1.0 を下回り、液状化による堤体の強度低下の可能性が指摘されていた。これを受けて、対象ダムについては堤体の液状化による強度低下を考慮した有効応力解析を実施し、液状化後におけるアースフィルダムの挙動及び残留変形に対する照査を実施した。本報告では、その内、有効応力解析による再現解析について報告する。

【キーワード】

アースダム、耐震性能照査、液状化、有効応力解析、LIQCA、再現解析

【背景・目的】

当該ダムは過去に耐震性能照査を行っている。検討条件として、レベル2地震動の設定のうち想定地震から加速度応答スペクトルを算出する過程におけるダム距離減衰式に H20 年式を使用した。また、耐震性能照査は、等価線形化法による動的解析を行い、ダム堤体の FL 値による液状化判定、すべり面を円弧としたすべり安定解析及び残留変形量によって評価を実施していた。このうち、ダム堤体の FL 値による液状化判定結果を図-1 に示す。ランダム材及びコア材の広範囲に液状化が懸念される箇所 (FL 値 1 以下) が分布しているが、すべり安定解析結果では、大きな変位量は見られておらず、液状化による変位を反映できていないと考えられる。従って、今回、堤体の液状化による強度低下を考慮した有効応力解析を実施し、液状化後におけるアースフィルダムの挙動及び残留変形に対する照査を実施した。本報告では、そのうち、解析モデル構築から実際の地震時の堤体変異を考慮した再現解析結果までを示す。

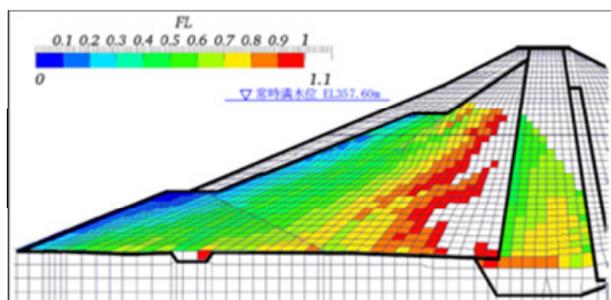


図-1 FL 値による液状化判定結果

【研究経緯】

平成 25 年度：等価線形化法による動的解析での耐震性能照査の実施

【令和元年度の研究内容】

(1) 液状化を考慮した解析コードの選定

地震時の液状化による変位挙動を把握できる解析コードの選定を行った。比較する解析コードとして、実務レベルで一般に用いられている地震時変形予測手法として詳細動的解析<LIQCA(弾塑性モデル)、FLIP(弾塑性定式化による履歴モデル)>、詳細動的解析<UWLC(弾塑性モデル)>、簡易動的解析<ニューマーク法>を選定した。各モデルの比較表を表-1 に示す。当該ダムの地震時変形予測手法として、アースフィルダムでの実績があり、液状化後の過剰間隙水圧の消散過程を一連の解析の中で追跡が可能な手法である LIQCA を最適手法として選定した。

LIQCA (Coupled Analysis of LIquefaction) は、有限要素法に基づく地震応答解析プログラムであり、過剰間隙水圧の発生に伴う地盤物性値の変化を取り扱うことができる有効応力解析が可能なプログラムである。本プログラムは、京都大学、岐阜大学、NKK、(株)日建設計および(株)鴻池組によって 1992 年に開発された。以後改良が重ねられ現在に至っている

(2) 現地ボーリング調査と解析用物性値の設定

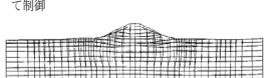
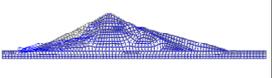
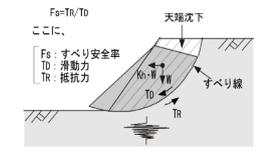
① 現地ボーリング調査・室内試験

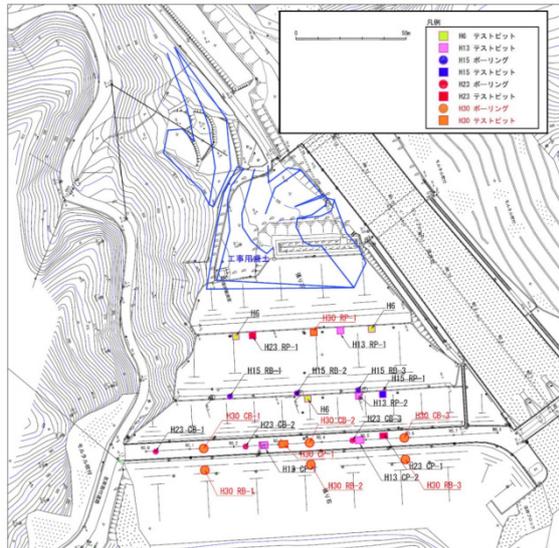
解析用物性値を設定するため、現地ボーリング調査及び室内試験結果を参照した。図-2 に既往のものを含むボーリング箇所位置図、参照した現地ボーリング及び室内試験項目と数量を示す。

② 解析用物性値の設定

LIQCA における解析用の物性値を下記に沿って設定した。また、図-3 に解析モデル図、表-2 に最終的に設定した解析用物性値一覧、図-4、図-5 にコア材及びランダム材の要素シミュレーション結果をそれぞれに示す。

表-1 解析モデル比較表

	詳細的解析(LIQA)	詳細的解析(FLIP)	詳細的解析(UPL)	簡易動的解析(ニューマーク法)
解析手法概要	<ul style="list-style-type: none"> 有限要素法に基づく動的解析法(地盤の透水を考慮) 計算での土の応力-ひずみ関係は、10~15%以下のひずみレベルでの妥当性は概ね検証されている。 過剰間隙水圧の上昇・消散過程を考慮 土の構成式は有効応力に基づく弾塑性理論 地震後の地盤の圧密に伴う沈下量の計算が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 有限要素法に基づく動的解析法(地盤の透水を考慮しない) 計算での土の応力-ひずみ関係は、10~15%以下のひずみレベルでの妥当性は概ね検証されている。 土の構成式は双曲線型「σのα対ϵ」の「σ」ϵ」を用いて制御 	<ul style="list-style-type: none"> 有限要素法に基づく動的解析法(地盤の透水を考慮) 過剰間隙水圧の上昇・消散過程を考慮 土の構成式は全応力と有効応力に基づく弾塑性理論が可能 	<ul style="list-style-type: none"> すべり面法を動的問題に拡張 すべりブロックは剛体すべりする単純化したモデル 
解析モデルの構成	弾塑性モデル	弾塑性定式化による履歴モデル	弾塑性モデル	剛塑性モデルに累積損傷度理論
手法の特徴	<p>本手法は連続体力学、特に弾塑性論に基づく構成則や弾塑性定式化による履歴モデルを用いた数値解析手法である。土の力学的性質を弾塑性論で精度よく記述することで精度の高い数値解析結果が得られる。レベル2地震動による土構造物の残留変形量を定量的に予測するには、土構造物内の地震動の増幅特性と土の変形・破壊挙動の双方をバランスよく考慮する必要がある。土構造物の地震動の残留変形を生じる要因である「せん断による塑性変形」、「塑性化による自重沈下」「ダイラテンションによる体積圧縮」のいずれの現象に対しても適正なモデル化を採用することで精度よく再現が可能である。不可能でないが「すべり面を伴う破壊」についての精度は劣る。</p>			<p>剛塑性論に基づくすべり計算法を適用した方法である。すなわち「すべり面を伴う破壊」現象を残留変位量の発生原因として取り扱った予測法である。「すべり面を伴う破壊」現象のみを対象としており、他の解析手法に比べ簡便である最大の特徴を持っている。既往の事例解析によっても、すべり線の形成が明確な砂質土の実験結果などは十分に説明できる結果が得られているが、すべり面の形成が不明確な場合や液状化に伴う流動的な変形は十分な再現まで至っておらず、予測精度が劣ることが指摘されている。</p>
入力物性と設定の容易さ	<p>構成則において変形に関する定数、破壊に関する定数、繰り返し履歴特性に関する定数、透水や荷重速度に関する定数などが必要になる。入力パラメータの数はLIQAに較べると少ない。必要なパラメータは室内試験結果に基づいて決定することが推奨されている。結果に強い影響を与えるパラメータを信頼できる室内試験結果に基づいて決定し、残りのパラメータについては既往の資料を参照し、経験的に設定することが多い。</p>	<p>解析パラメータは変形に関する定数、破壊に関する定数、繰り返し履歴特性に関する定数が必要になる。入力パラメータの数はLIQAに較べると少ない。必要なパラメータは室内試験結果に基づいて決定することが推奨されている。結果に強い影響を与えるパラメータを信頼できる室内試験結果に基づいて決定し、残りのパラメータについては既往の資料を参照し、経験的に設定することが多い。</p>	<p>構成則において変形に関する定数、破壊に関する定数、繰り返し履歴特性に関する定数、透水特性に関する定数などが必要になる。液状化の土のモデルは弾塑性モデル、Pastor-Zienkiewiczモデルを用い、N値からパラメータを推定することが可能となっているが、フィルダム堤体のような材料については適用事例が少ない。</p>	<p>本手法はすべり計算法を適用することから、入力物性は単位体積重量(γ)、地盤のせん断強度(C, ϕ)の3つである。せん断強度については計算結果の精度向上を図る目的から、ピーク強度と残留強度を求めておくことが望ましい液状化のような地盤材料の非排水繰返し荷重に伴う強度低下を考慮したニューマーク法の改良版が開発されている。(Serid研究会)</p>
地震中・地震後の沈下・変形	<p>地震中・地震後を含め、解析中のいかなる時刻でも過剰間隙水圧消散による圧密に伴う土の体積変化が考慮されている。</p>	<p>非排水条件での解析であり、過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下は考慮されない。液状化層厚の3%程度の圧密沈下が生じるものと仮定し、この沈下を加えたものを最終的な沈下量にするなどの別途対処が必要である。</p>	<p>地震動発生から終了後には、過剰間隙水圧の上昇・消散過程における土の有効応力の変化を表現することができる。</p>	<p>全応力解析であり、地震中のせん断変形に伴う変形は算定出来るが、過剰間隙水圧消散に伴う体積変化は考慮できないため別途手法で対処する必要がある。</p>
適用事例	<ul style="list-style-type: none"> 河川堤防、道路盛土、フィルダムでの実績多い 大規模地震に対するダム耐震性能照査に対する資料(国総研資料第244号)ではアースダムの解析事例として示されている。 水資源機構では初立池、三好池(フィルダム)の耐震補強対策の解析手法として適用されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 港湾施設の解析手法として確立された手法である。 河川堤防被災事例の再現解析の事例は多くある。 フィルダムでの事例は少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 河川堤防・宅地盛土での実績がある 地盤と構造物の動的相互作用(地中構造物の浮上りや杭基礎)での検討事例がある Lower San Fernando ダムでの再現解析事例 	<ul style="list-style-type: none"> 高速道路高盛土や宅地盛土の解析手法として確立されている。 ため池整備指針において液状化による地盤材料の非排水繰返し荷重に伴う強度低下を考慮したニューマーク法の改良版が開発され、AA種のため池の照査手法として用いられている
評価	○	△	△	△



解析用物性値の設定における考え方は下記の通りである。

- 今回の室内試験結果および平成25年に実施した動的解析時に設定した物性値を基本とし、値が不明確なものについては、既往の文献や一般値を採用した。
- コア材および上流側ランダム材の液状化パラメータは、今回実施した繰り返し非排水三軸試験結果と整合が取れるように設定した。
- 液状化強度曲線は、これまでに実施された飽和条件での試験結果を基本とした。
- コア材は、攪乱試料、不攪乱試料ともに既往の繰り返し三軸試験結果より得られる液状化強度と概ね同程度の傾向が確認できる。一方でランダム材は、既往の繰り返し三軸試験結果において攪乱試料での液状化強度が一部非常に高い数値を示していることから、この数値については特異値と判断

して要素シミュレーションを行った。

- 有効応力経路は、繰り返し回数が概ね20回前後における液状化強度 RL(コア材:0.333、ランダム材:0.370)に対する試験結果に対して要素シミュレーションを行った。試験結果より1波目の载荷による平均有効主応力の減少率、平均有効主応力が変相域に入るまでの繰り返し回数、平均有効主応力の下限値が試験値と合うように設定した。
- 有効応力経路確認時の応力振幅比における応力ひずみ曲線、軸ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴を各図の右側に示す。液状化強度が比較的高い材料の場合、過剰間隙水圧の上昇に伴ってひずみ量が漸増する傾向をLIQCAの弾塑性モデルで再現することは困難である。このため、土質試験において500秒の载荷時間内に発生する軸ひずみ量の最大値が解析値と概ね整合する様にパラメータを設定した。

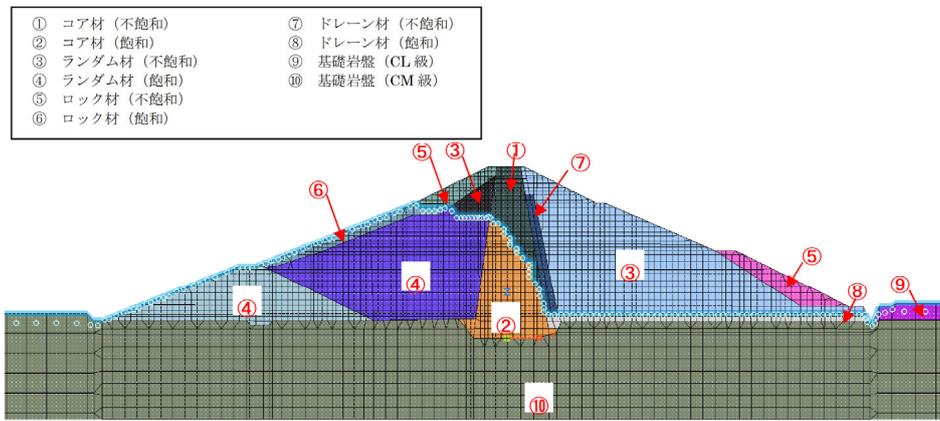


図-3 解析モデル図

表-2 設定した解析用物性値一覧

	弾塑性モデル										弾性モデル		設定根拠
	コア (不飽和)	コア (飽和)	ランダム (不飽和)	ランダム (飽和)	ドレーン (飽和, 不飽和)	ロック (飽和, 不飽和)	岩盤 (CL)	岩盤 (CM)					
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	21.05	21.05	20.91	20.91	20.19	20.29	21.85	22.83			コア、ランダム材:平成30年度不攪乱試験結果より その他:平成25年度解析物性値より		
透水係数 k_v (m/s)	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-07	5.00E-07	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-10	1.00E-10			平成25年度解析物性値より		
初期間隙比 e_0	0.552	0.552	0.555	0.555	0.260	0.300	0.111	0.053			コア、ランダム材:平成30年度不攪乱試験結果より ドレーン、ロック材:平成25年度解析物性値より 岩盤:既往文献よりCL級の間隙率10%、CM級の間隙率5%として算出		
細粒含有率 F_c (%)	26.4~62.8		17.8~48.4		-	-	-	-			試験値		
V_s (m/s)	300	300	354	354	413	412	480	1240			コア、ランダム材:平成30年度PS検層結果の平均値 ドレーン、ロック材:平成25年度解析物性値より初期せん断剛性 G_{max} より逆算 岩盤:平成25年度解析物性値より		
動的ポアソン比 ν_d	0.378	0.378	0.355	0.355	0.339	0.365	0.3	0.3			コア、ランダム材:平成30年度PS検層結果の平均値 ドレーン、ロック材:平成25年度解析物性値より 岩盤:平成25年度解析物性値より		
V_p (m/s)	680	680	750	750	840	890	900	2320			V_s および ν_d より算出		
σ_v (kN/m ²)	452.6	452.6	271.9	271.9	434.1	200.0	-	-			コア:GL-21.5m、ランダム材:GL-13.0m(PS検層中央) ドレーン材:GL-21.5m(コア材と同等) ロック材:GL-2.5m(ロック部中央)		
σ_m (kN/m ²)	301.72	301.72	181.25	181.25	289.39	133.33	-	-			$\sigma_m = 2/3 \sigma_v$		
G_{max} (kN/m ²)	2.080E+05	2.080E+05	3.330E+05	3.330E+05	3.518E+05	3.514E+05	5.242E+05	3.655E+06			コア、ランダム材:平成30年度PS検層結果の平均値 ドレーン、ロック材:平成25年度解析物性値より 岩盤:平成25年度解析物性値より		
ポアソン比 ν	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.300	0.300			一般値		
粘着力 c (kN/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			平成25年度解析物性値より		
内部摩擦角 ϕ (°)	40.00	40.00	43.00	43.00	38.00	43.00	-	-			平成25年度解析物性値より		
水の体積弾性係数 K_f (kN/m ²)	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000			一般値		
圧縮指数 λ	8.47E-03	8.47E-03	3.18E-03	3.18E-03	3.98E-03	3.98E-03	-	-			$\lambda = \kappa / 10$		
膨張指数 κ	8.47E-04	8.47E-04	3.18E-04	3.18E-04	3.98E-04	3.98E-04	-	-			LIQCA公開版資料p. II-9 式 II.2.2)から逆算		
弾性ポアソン比	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	-	-			一般値		
擬似過圧密比 OCR^*	1.200	1.200	1.400	1.400	1.000	1.000	-	-			LIQCA公開版資料p. II-9 (2)簡易な方法(不明な場合)一般値		
初期せん断係数比 G_0 / σ'_m	689	689	1837	1837	1215	2635	-	-			-		
変相応力比 M_m	1.122	1.122	1.158	1.158	0.909	0.909	-	-			LIQCA公開版資料p. II-10 (2)簡易な方法($\phi_m = 28^\circ$)		
破壊応力比 MF	1.336	1.336	1.441	1.441	1.265	1.441	-	-			LIQCA公開版資料p. II-10 式 II.2.5)		
硬化関数 β	4000	4000	9000	9000	3842	7312	-	-			LIQCA公開版資料p. II-9 式 II.2.9) / II.2.10)から逆算		
B1	150	150	140	140	38	73	-	-			B1=B0/100		
Cf		0.00	0.00	0.00	-	-	-	-			要素シミュレーションより設定		
規準(ひずみ/塑性)		0.0010	0.0020	0.0020	-	-	-	-			要素シミュレーションより設定		
規準(ひずみ/弾性)		0.006	0.004	0.004	-	-	-	-			要素シミュレーションより設定		
ダクタリティ係数 D_0		0.400	0.500	0.500	-	-	-	-			要素シミュレーションより設定		
n		20.0	10.0	10.0	-	-	-	-			要素シミュレーションより設定		
Lame定数 λ					7.008E+05	7.863E+05	5.483E+06	$\lambda = 2G_v / (1-2\nu)$			-		
Lame定数 μ					3.514E+05	5.242E+05	3.655E+06	$\mu = G_0$			-		
変形係数 E (kN/m ²)					9.367E+05	1.363E+06	9.503E+06	$E = G_0 * 2 * (1 + \nu)$			-		

青字:平成30年度調査結果を反映
赤字:要素シミュレーションにより設定

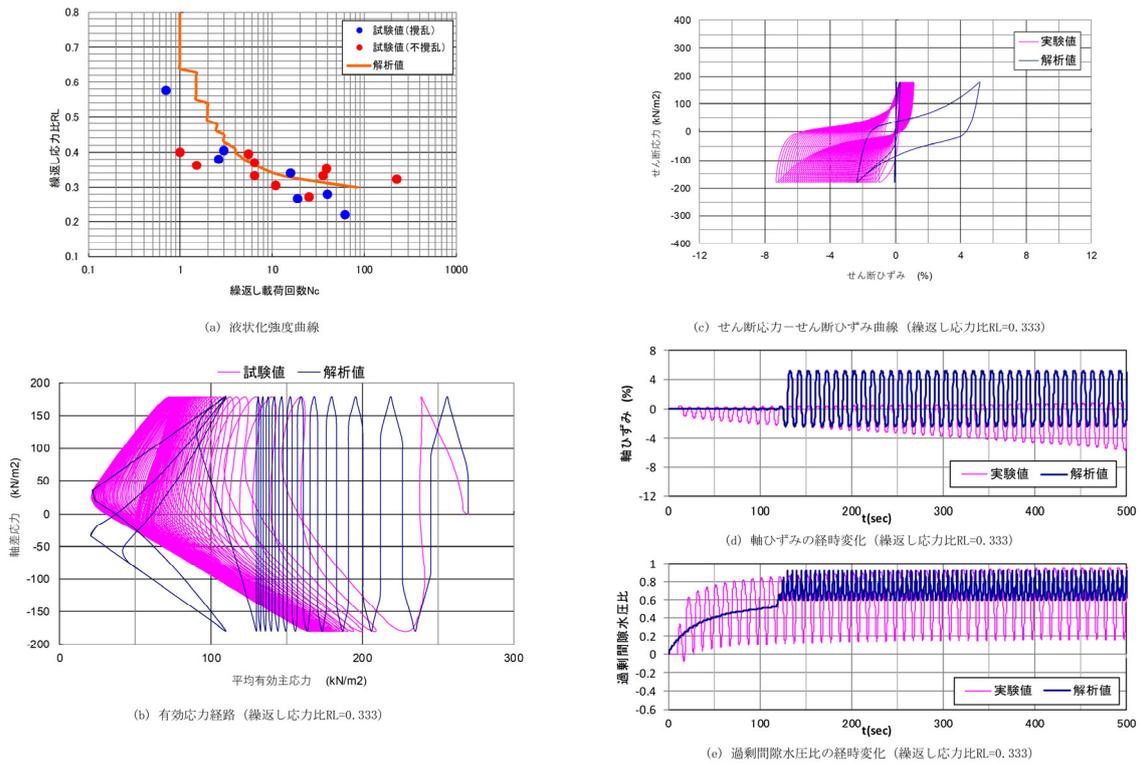


図-4 コア材要素シミュレーション

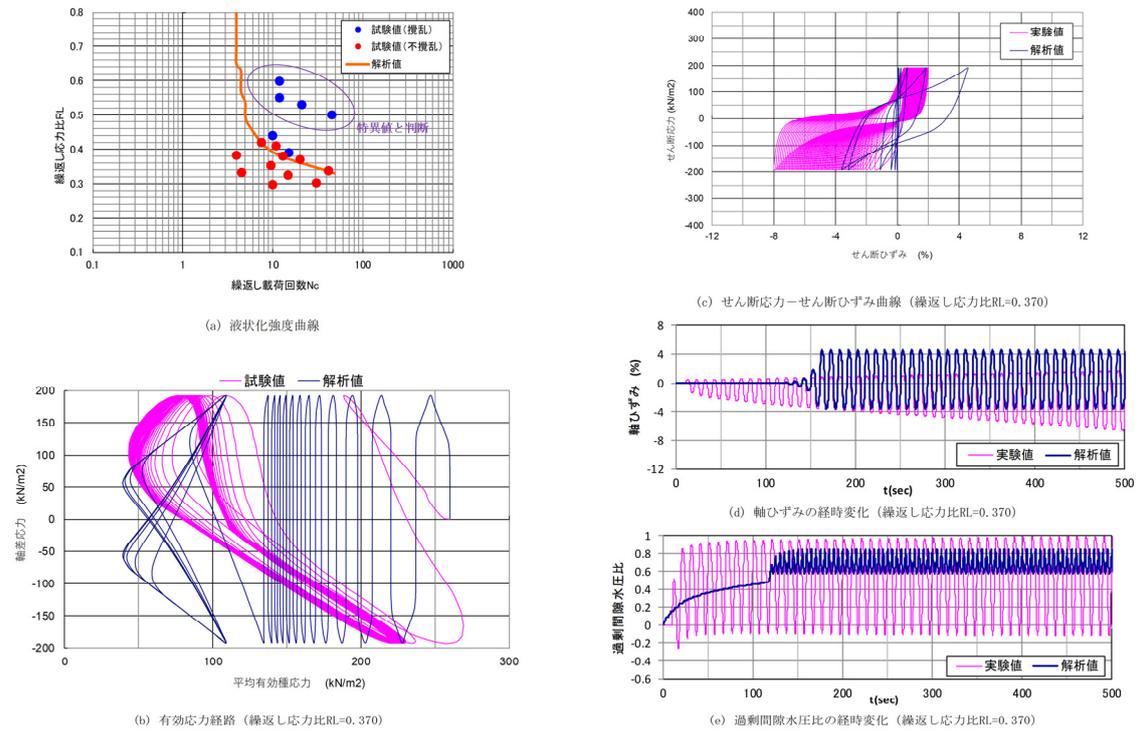


図-5 ランダム材要素シミュレーション

(3) LIQCA による再現解析

① 解析条件

LIQCA の再現解析として、当該ダムで観測された観測波の再現を実施した。入力地震動を図-6 に示す。地震後の天端における実測沈下量は最大で 5.2cm であり、天端アスファルトには最大で 9mm のクラックが確認されている。

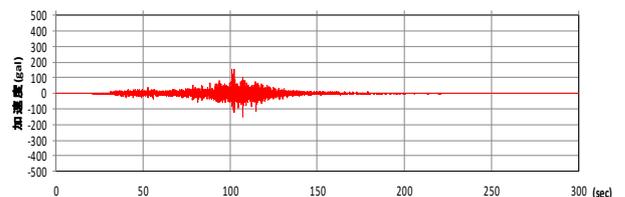


図-6 再現解析入力地震動 (当該ダム観測波)

② 解析結果図

解析結果として、図-7~11に各結果を示す。

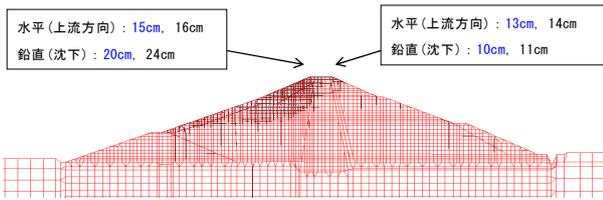


図-7 残留変形図

(青字：地震終了時、黒字：過剰間隙水圧消散時)

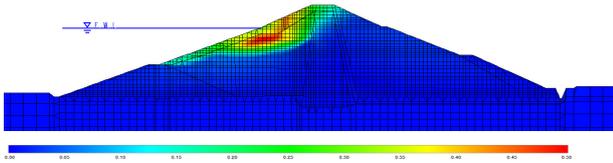


図-8 合成変位コンター図（過剰間隙水圧消散時）

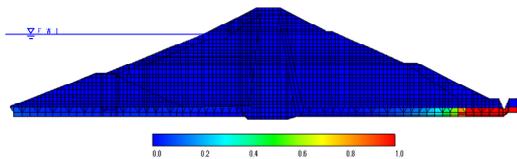
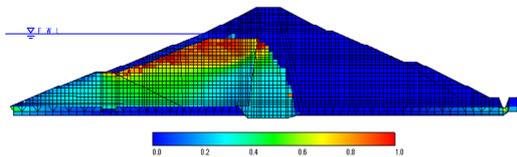


図-9 残留過剰間隙水圧比コンター図

(上：地震終了時、下：過剰間隙水圧消散時)

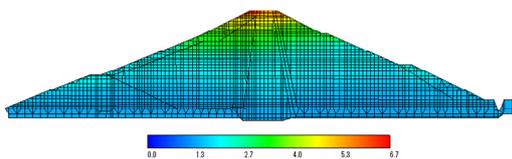


図-10 最大応答加速度コンター図（単位：m/sec²）

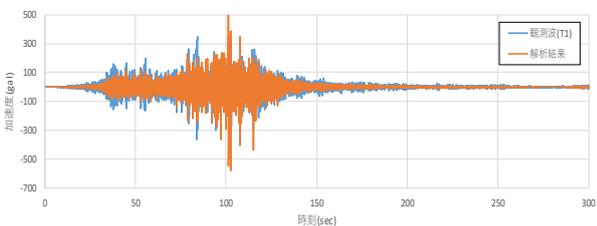


図-11 堤体天端加速度応答時刻歴

③ 解析結果まとめ

再現解析結果より得られた堤体天端の沈下量は、過剰間隙水圧消散後で11cm~24cmであった。地震後の天端における実測沈下量は最大で5.2cmであり、再現解析結果の方が10cm~20cm程度大きい沈下量となっている。また、天端アスファルトには最大で9mmのクラックが確認されている。なお、

堤体の法面には解析結果でも目立ったはらみ出し等の変形は見られていない。

代表断面を2次元FEMでモデル化した解析は、実被害に対して安全側の解析（変形が生じやすい解析）である。また、動的変形特性や液状化特性は室内試験結果を踏まえて安全側の数値（堤体強度が小さくなる）に合わせて解析物性値を設定している箇所もあるため、解析物性値には見直しの余地もあることを勘案すると、耐震性能照査における有効応力解析結果は、実際に堤体に発生する変形に比べて大きいものになると考えられる。

その一方で、堤体天端および下流地山での応答加速度は、時刻歴波形及びフーリエスペクトルの重ね合わせ図（図-12）より、実際に観測された波形と概ね整合が取れている。堤体基部については、解析モデルの特性上堤体基部は地山とほぼ固定された状態にあり、実際は堤体変位が観測波に影響するため、解析結果と観測波では整合は取りにくいといえる。以上から、過年度の調査結果に基づき設定した解析物性値を用いた有効応力解析結果より得られる堤体の応答加速度は、実被害および観測記録と概ね整合が取れていることが確認された。堤体の変形については、解析物性値等の見直しの余地はあるが、実被害に対して安全側の解析が実施できているものと判断できる。

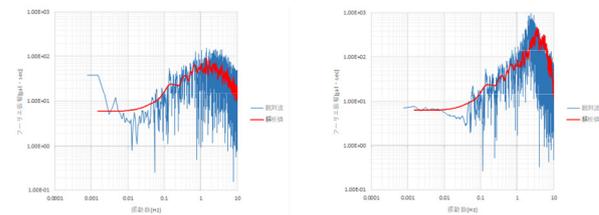


図-12 観測波と再現解析結果におけるフーリエスペクトル（左：下流地山、右：堤体天端）

【結果とりまとめ】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ①アースフィルダムにおいて、液状化を考慮した有効応力解析モデルを構築できた。
- ②実際の観測波を入力した場合、再現性が高いことを確認できた。
- ③なお、本報告では紙面の都合上、解析条件の詳細や有効応力解析による耐震性能照査結果について記述できなかったが、レベル2地震動に対する耐震性能を満足していることを確認している。

【今後の課題】

今後の課題として、以下のことが考えられる。

- ①液状化を考慮した有効応力解析事例の増加
- ②対策工を反映した解析の実施