連続地震によって生じるため池堤体天端沈下量に及ぼす締固め度の影響

石川工業高等専門学校　正会員　○新保　泰輝
石川工業高等専門学校　中村　達也
株式会社複合技術研究所　Duttine Antoine
株式会社複合技術研究所　矢崎　澄雄
五大開発株式会社　三谷　浩司

1．はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により，福島県須賀川市の藤沼湖の提体が決壊し，これにより死者行方不明者計 8 人を出す災害となった．その後の調査により，堤体崩壊の原因は，堤体の締固め度が低く，地震の揺れで崩壊しやすかったことが判明した [1]．これにより，土地改良事業設計指針「ため池整備」の改訂が行われ，全国的にため池の耐震性能照査が実施されている [2]．ただし，「ため池整備」に記載されている剛体解析手法であるニューマーク D 法では堤体自体の変形は考慮できない．そこで，A.Duttine ら [3]は繰り返し載荷による地盤の剛性低下と応答加速度による慣性力と自重を考慮した非線形準静的解析手法（劣化自重解析：解析コード SENPS）を提案しており，ニューマーク D 法で求めたすべり変形量と劣化自重解析で求めた堤体の変形量を合算して残留変形量を求めている．その結果，締固め度の高い堤体は地震時の繰り返し載荷に対して損傷が小さく，天端沈下量も小さいことを示している．一方，2016 年に生じた熊本地震ではこれまで予想されていなかった前震と本震が同規模の連続的な地震が発生している．このような地震に対するため池堤体の耐震検討は現在までに実施されておらず，その変形解析もまた行われていない．そこで，本稿では，熊本地震のような連続地震を受けた際に，堤体の締固め度の違いが天端沈下量にどのように影響するかについて検討した．

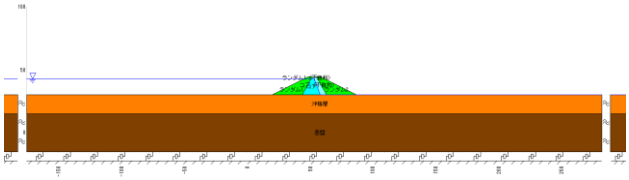


図-1　解析モデル

表-1　モデルの物性値一覧

地層名	湿潤重量	飽和重量	初期剛性	ポアソン比	静止土圧係数	初期剛性	減衰係数	動的ポアソン比
	γt (kN/m3)	γsat (kN/m3)	G50 (MN/m2)	ν	K0	G0 (MN/m2)	h (%)	ν
ランダム1（不飽和）	18.2	19.8	4.5	0.3	0.5	60	GHE	0.3
ランダム1	18.2	19.8	4.5	0.3	0.5	60	GHE	0.45
コア（不飽和）	18.2	19.8	4.5	0.3	0.5	60	GHE	0.3
コア	18.2	19.8	4.5	0.3	0.5	60	GHE	0.45
ランダム2	18.2	19.8	4.5	0.3	0.5	60	GHE	0.3
沖積層	21	21	9.7	0.3	0.5	120	2	0.45
基盤	21	21	53.8	0.3	0.5	180	2	0.45

表-2　モデルの GHE モデルパラメーター一覧

地層名	C1(0)	C1(∞)	C2(0)	C2(∞)	α	β	hmax [%]	βh	c[kPa]	Φ[°]
ランダム1,2	1	0.42	0.4	1.06	0.733828	0.244312	23.52868	1.151806	45	20
コア	1	0.42	0.4	1.06	0.733828	0.244312	23.52868	1.151806	45	20

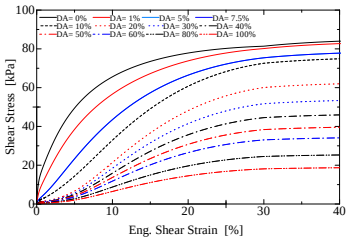


図-2　解析に用いた剛性低下モデル（Dr=95%）

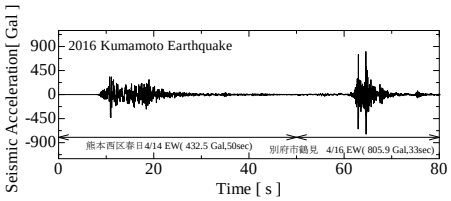


図-3　解析波形（2016 年熊本地震，熊本西区春日 4/14 EW 成分＋別府市鶴見 4/16 EW 成分）

2．解析モデル

解析に用いたため池堤体モデルを図-1 に示す．モデル全体の高さが 115m，幅が 457m，堤体部は高さが 15m，天端の幅が 10m，底面の幅が 67m，堤体天端から水位線までの高さ（余裕高）は 2m である．締固め度 Dr=95%の解析モデル各層の物性値を表-1，表-2 に示す．また，劣化自重解析 [3]に用いた構成関係を図-2 に示す．Dr=95%以外の締固め度として 85%，90%を用いている．なお，95%以外の構成関係ならびに強度低下曲線，SR-N 関係図は紙面の都合上割愛する．また，解析に用いた地震波形を図-3 に示す．図-3 は熊本西区春日 4 月 14 日観測 EW 成分と別府市鶴見 4 月 16 日観測 EW 成分を繋ぎ合わせた地震波形である．本稿では，各々の地震波形

キーワード　ため池，剛性低下，残留変形，連続地震
連絡先　〒929-0342 石川県河北郡津幡町北中条　石川工業高等専門学校　ＴＥＬ076-288-8166

を2回作用させたケースと図-3の地震波形を作用させたケースについて検討した．なお，本稿では議論を簡単にするために，劣化自重解析から得られる天端沈下量についてのみ言及しており，すべり変形量は考慮していない．

３．剛性低下を考慮した残留変形解析

劣化自重解析によって得られた経過時間[sec]と天端沈下量[m]の関係を図-4，図-5，図-6 に示す．これらの図のピーク値が天端沈下（残留変形）量を意味する．Dr=85%の場合には図-4 では 1 回目，図-5 では 2 回目の地震で余裕高を超えている．Dr=90%の場合，図-4 は 1 回目の地震で余裕高を超えている．ただし，図-5 では 2 回地震を受けても余裕高は超えておらず，また Dr=85%に比べて沈下量は小さい．Dr=85%，Dr=90%の場合，両者共図-6 では先行する熊本西区春日波形において余裕高を超えている．一方，Dr=95%の場合，他の締固め度に比較して，地震回数や地震種類によらず堤体天端の沈下量は非常に小さい．ただし，損傷が小さいため，単に慣性力の大きい図-4 の方が沈下量は大きい．

図-7，図-8 に図-4，図-5 の地震 1 回目のピーク沈下時と 1 回目の地震終了後の堤体の DA 分布（Dr=95%，85%）を示す．図-7，図-8 に示すように Dr=85%の場合，熊本西区春日波形ではピーク時にコア部分まで損傷が進行しており，これにより余裕高を超える沈下を生じた．また，別府市鶴見波形ではピーク時の損傷は小さいが，1 回目終了時には損傷がコア近傍まで進行している．これにより 2 回目の地震で余裕高を超える沈下を生じた．一方，Dr=95%の場合には初期有効拘束圧の低い前法面付近以外はほとんど損傷を受けておらず，締固め度の高い堤体は連続する地震に対しても耐震性が高いことが分かる．

４．おわりに

本稿では，連続する地震が生じた場合のため池堤体の残留変形解析を実施した．その結果，以下のことが判明した．

- 締固め度 Dr が低い堤体は 1 回目の地震で蓄積された損傷によって，2 回目の地震時に余裕高を超える変形を生じる可能性がある．
- 締固め度 Dr が高い堤体は Dr の低い材料に比べて沈下量は非常に小さく，連続する地震に対する耐震性は高い．

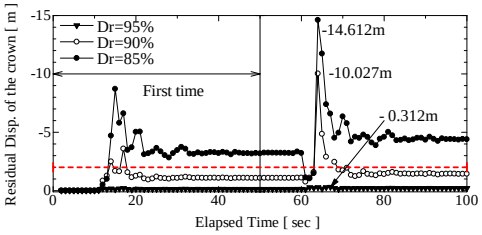


図-4　解析結果（熊本西区春日　50 秒×2 回）

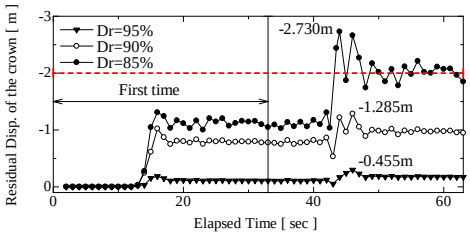


図-5　解析結果（別府市鶴見　33 秒×2 回）

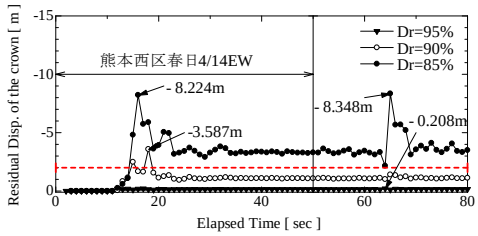
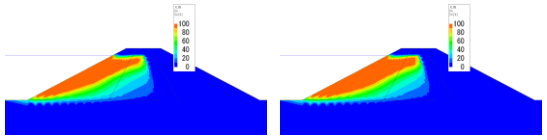
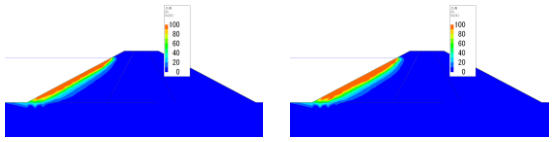


図-6　解析結果（熊本西区春日＋別府市鶴見）

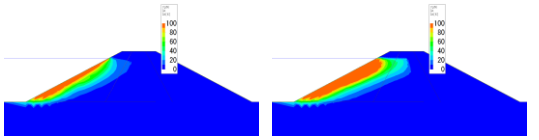


Dr=85% 1 回目ピーク時　Dr=85% 1 回目終了後

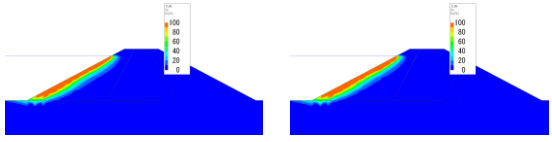


Dr=95% 1 回目ピーク時　Dr=95% 1 回目終了後

図-7　DA 分布図（熊本西区春日）



Dr=85% 1 回目ピーク時　Dr=85% 1 回目終了後



Dr=95% 1 回目ピーク時　Dr=95% 1 回目終了後

図-8　DA 分布図（別府市鶴見）

参考文献

1) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会，藤沼湖の決壊原因調査報告書（要旨），2012．2) SERID 研究会，ため池等土構造物の耐震診断マニュアル（案），2016. 3) A.Duttine, F.Tatsuoka, T.Shimbo, Y.Mohri: A new simplified seismic stability analysis taking into account degradation of soil undrained stress-strain properties and effects of compaction, International Symposium on Qualification of dynamic analyses of dams and their equipment and of probabilistic assessment of seismic hazard in Europe, 2016.