

農業用フィルダムの地震時安定性に対する締固めの効果の評価例

耐震設計 締固め度 フィルダム

(株) 複合技術研究所 国際会員 ODUUTTINE, ANTOINE
東京理科大学土木工学科 名誉会員 龍岡文夫
地域環境資源センター 国際会員 田中忠次
茨城大学農業学部 国際会員 毛利栄征
福島県中農林事務所, NTCコンサルタンツ (株) 正会員 石本敏樹、三浦亨

1. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震によって福島県農業用貯水池藤沼湖の本堤と副堤が崩壊した。本堤(堤高18.5m, 堤頂長133.2m, 図-1)は3層で構成され、下部盛土はシルト分を含む礫混り粗細粒砂、中部盛土は褐灰色の砂質シルト、戦後に建設された上部盛土は灰白色の粗粒砂が主体である。実測締固め度は非常に低く、1.0Ecに対する締固め度(Dc)IEcは中部盛土は84.5%、上部盛土は87.9%、下部盛土は90.1%である。従って、全般的に初期非排水せん断強度は相当低い上に、上部盛土では地震中に剛性・強度が著しく低下して図-1に示すようにすべり1が最初に生じ、引き続き上部盛土と中部盛土を貫くすべり2が生じ、その後すべり1, 3, 4等が複数生じて越流が開始して崩壊した、と推定される。藤沼湖の復旧工事は、2013年10月に着工され2017年3月に竣工した。復旧堤体(堤高31.4m, 堤頂長149.2m, 図-2)は、中心遮水型で主にコアゾーン(礫混り粘性土)とランダムゾーン(現地掘削土と碎石)で構成されている。復旧工事では、従来の締固め度と含水比の管理に加えて締固め土の飽和度を管理した。その結果、ランダムゾーンとコアゾーンでの(Dc)IEcの実測値の平均値はそれぞれ99.6%、99.2%と高い値を実現した。

本報では、崩壊した旧堤体と復旧した新堤体に対して、同じ手法で実施した土質試験および地震時変形解析の結果を示し、十分な締固めによってフィルダムの地震時安定性は著しく向上することを示す。

2. 解析に用いた土質試験結果

藤沼湖旧本堤の上部、中部、下部盛土の残存部から試料を採取し、原位置の推定締固め度(Dc)IEcで締固めて供試体を作成して一連の非排水三軸圧縮試験を行っている。図-3は、上部盛土材での非排水繰返し三軸試験で異なるひずみを発生させた後に行った非排水三軸圧縮試験による偏差応力q=σa-σr-軸ひずみεa関係の例である。非排水繰返し载荷で生じた最大ひずみ(損傷ひずみεD)が大きくなるほど、ピーク強度の低下が大きくなる。図-4は、上部、中部、下部盛土材の強度低下率と損傷ひずみεDの関係である。上部盛土は、原位置での締固め度が低く初期非排水せん断強度が低い上に砂質であるため、非排水繰返し载荷による強度低下率が最も大きい。図-5に、非排水繰返し载荷で求めた応力比振幅と繰返し回数の関係(疲労曲線)を示す。非排水繰返し载荷に対する抵抗力(例えば繰返し回数N=20回での応力比振幅)は、締固め度が最も低い中部盛土(高塑性)で最も低い。上部盛土(砂質)は、中部盛土より締固め度がやや大きいため抵抗力がやや大きい、締固め度は高くなく抵抗力は高くない。下部盛土(塑性は中部・下部盛土の間)は、締固め度がやや高く抵抗力が最も高い。

完成後の復旧堤体から採取した試料を原位置締固め度(Dc)IEcの平均値で締固めて供試体を作成し、旧堤体と同様に一連の非排水三軸圧縮試験を行った結果を図-6~8に示す。旧堤体上部盛土の結果と比べると、ランダム材では、①ピーク強度は10倍程度になり(図-3, 6の比較)、②同じ損傷ひずみεDでの強度低下率は半分程度小さくなり(図-4, 7の比較)、③非排水繰返し载荷に対する抵抗力は倍程度大きくなっている(図-5, 8の比較)。これらから、盛土材

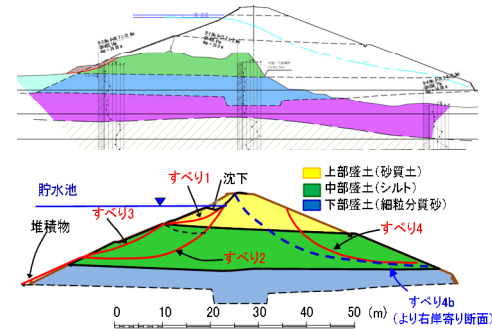


図1 決壊前後の堤体断面と推定すべり面

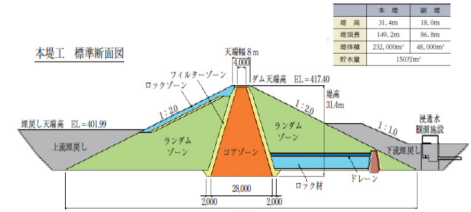


図2 復旧した藤沼ダムの主断面と諸元

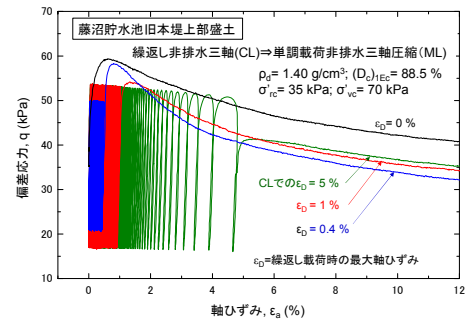


図3 非排水三軸試験結果(旧堤体)

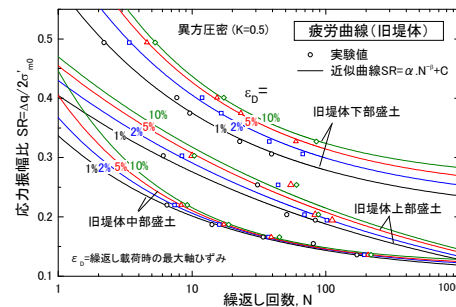


図5 疲労曲線(繰返し载荷強度、旧堤体)

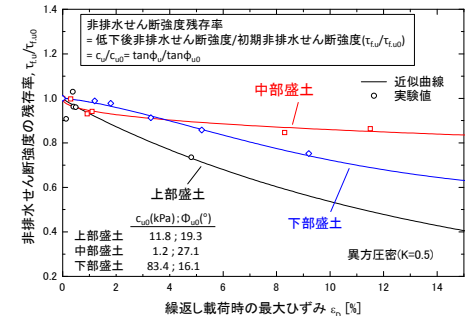


図4 非排水せん断強度低下特性(旧堤体)

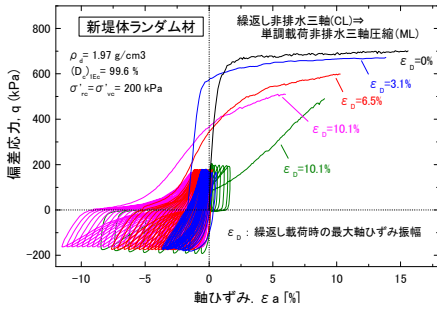


図6 非排水三軸試験結果（復旧堤体）

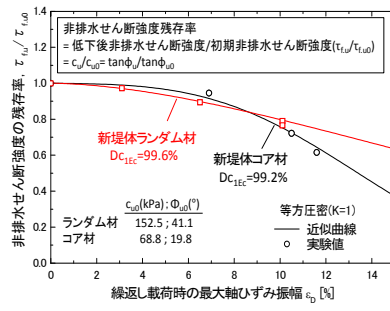


図7 せん断強度低下特性（復旧堤体）

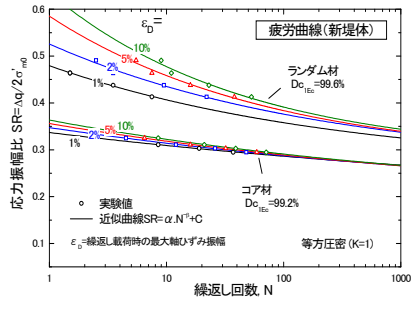


図8 疲労曲線（復旧堤体）

の土質と拘束圧の違いを考慮しても締固め度の効果は非常に大きいことがわかる。

### 3. 地震荷重による残留変形解析

旧堤体と復旧堤体を対象として、累積損傷理論と全応力法の枠組みで構成された同様な手法で、下記の三つの解析を行った<sup>3)</sup>。

- ① 等価線形化法による2次元FEM地震応答解析（次に説明する②と③に用いる応答加速度や応答応力の時刻歴を求めるための解析）
- ② 飽和土の非排水繰返し載荷による非排水せん断強度の経時的低下を考慮したNewmark-D法による剛体円弧すべり解析
- ③ 飽和土の非排水繰返し載荷による剛性・強度の経時的低下を考慮した2次元準静的FEMによる剛体すべり以外の残留変形解析

最終残留変形は、②と③で算定した残留変形を合算して求めた。入力地震動は、藤沼貯水池の北西3kmのFKSH08長沼で3/11に観測された地表水平地震動の時刻歴から算出した基盤面での地震動である。

図-9に、旧本堤の②Newmark-D法による解析の結果を示す。すべり円弧C2、C4bは、上流斜面と下流斜面での全ての試行すべり円弧の中ですべり変位が最大となったものであり、すべり円弧C1は、上部盛土内に限定した試行すべり円弧の中ですべり変位が最大となったものである。これらの臨界円弧すべり面は、図-1に示す実際のすべり面と整合している。それぞれの円弧の降伏震度は堤体が地震荷重を受けると急速に低下して、最終すべり変位量δは0.786~5.35 mと非常に大きい。図10a, b, cに、円弧C1・C2・C4bが独立に生じたとした場合の、夫々での②と③で算定した残留変形を合算した結果を示す。実際にはこれらのすべりが複合的に生じたことから、図10a, b, cに示す残留変形を足し合わせる必要がある。足し合わせた変形量は、実際に生じた越流による崩壊（図-1）と整合する。

図-10dに、同じ手法で求めた復旧堤体の残留変形を示す。②Newmark-D法解析によるすべりは発生せず、③準静的FEM解析による残留変形だけが生じて、最終堤頂沈下は7cmと非常に小さい。

図-11に、旧堤体と復旧堤体内での②の解析による類似な円弧すべり面に沿って動員された非排水せん断強度と排水せん断強度の初期値と地震時の値（平均値）を比較した。締固めが悪くなると非排水せん断強度は著しく低下して排水せん断強度より低くなり、この傾向は非排水繰返し載荷による強度低下によって増幅する。一方、締固めが良いと非排水せん断強度は非排水繰返し載荷で低下しても排水強度よりはるかに高い値を保っている。

### 4. まとめ

2011年東日本大地震で崩壊した福島県藤沼湖本堤の地震時安定解析を行い、同じ手法で構造形式と締固め管理を抜本的に改善して復旧したダム地震時安定性を実際の盛土施工の結果に基づいて行った。これらの解析結果を総合して、フィルダムの地震時安定性は締固めによって著しく向上することを定量的に示した。

参考文献: 1) 渡邊浩樹・田中忠次・龍岡文夫・毛利栄征・Duttine A.・矢崎澄夫・三浦亨 (2018): 福島県藤沼旧堤体の崩壊解析を踏まえた新堤体の設計, 雑誌基礎工, 46-No.3, 79-84. 2) 三浦亨・龍岡文夫・田中忠次・毛利栄征・石本敏樹・三反畑勇(2019): フィルダムでの飽和度管理を重視した締固め実施例, 第54回地盤工学研究発表会, 大宮. 3) Duttine, A.・新保泰輝・龍岡文夫・矢崎澄雄: 非排水繰返し載荷による土の剛性・強度の劣化を考慮したNewmark法と準静的FEMによる盛土の残留変形解析, 第51回地盤工学研究発表会, 1039-1040, 2016

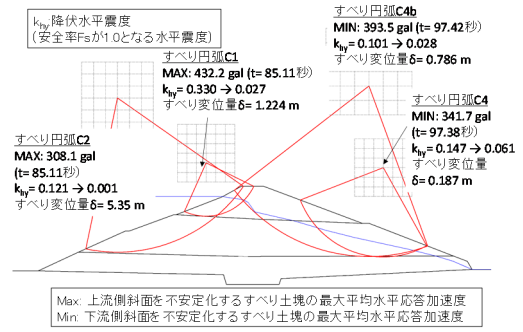


図9 Newmark-D法による臨界円弧すべり面

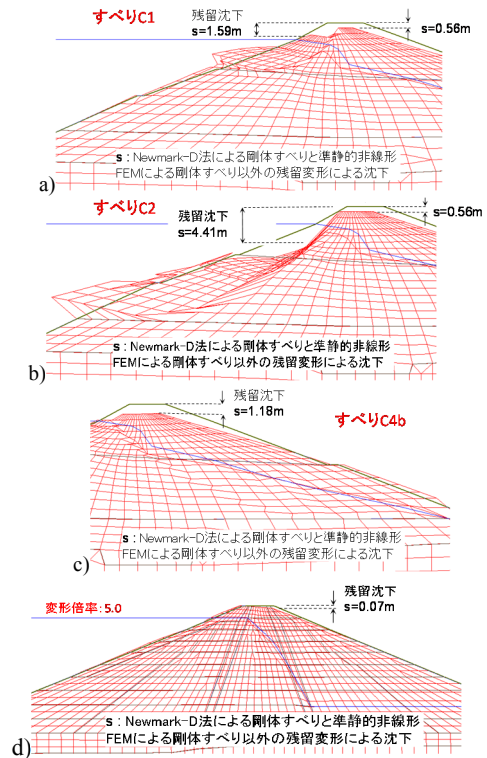


図10 旧堤体(a. b. c.)と新堤体(d)の合算変形

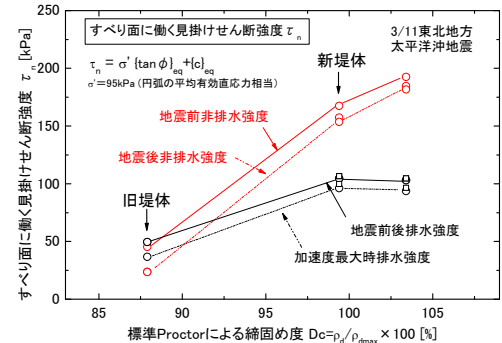


図11 すべり面上の動員せん断強度（平均値）比較