

非排水繰返し载荷による土の剛性・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

耐震設計 Newmark-D 有限要素法 FEM

(株) 複合技術研究所 国際会員 ○DUTTINE, Antoine
 五大開発 (株) 国際会員 新保泰輝
 東京理科大学土木工学科 国際会員 龍岡文夫
 (株) 複合技術研究所 正会員 矢崎澄雄

1. はじめに

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震では、岩手県、宮城県、福島県の3県で約12500 箇所のため池の内、1951 箇所に被害が生じ、被害率は15.6%である。この主因は、堤体材料の締固めが悪く、砂質であり非排水繰返し载荷を受けて剛性・強度が著しく低下したためである。全国のため池の数は非常に多く(約20万箇所)、このような被害例は古くから多数があり、上記の現象を再現できる実務的な地震時安定解析法が必要になっている。非線形弾塑性FEMによる有効応力解析は原理的には優れているが、ある程度以上締固まった盛土が崩壊する時はすべり面(せん断層)が形成されるため、せん断層厚の粒径依存性、せん断層内のダイレイタンスによる局所的浸透等を考慮できる必要となる。しかし、このような高度なFEM解析は実務の耐震設計では実施されていない。現在の段階では、1)せん断層の形成を伴わない残留変形を非排水繰返し载荷による剛性低下を考慮した非線形FEMで、2)すべり面に沿った残留変位は円弧すべり安定計算に基づくNewmark法で別途計算し、両者を一定のルールで合算する近似法(図-1)が実務的と思われる。以下、その解析法と試計算を紹介し、その結果から残留変形に対する締固めの影響は非常に重要であることを示す。

2. 解析手法と試計算例

実際の代表的ため池堤体材料を用いて3種の締固め度(1E_cによるD_c=85, 90, 95%)で締固めた場合を解析して、D_cの影響を検討した。解析は以下の3過程で構成される。

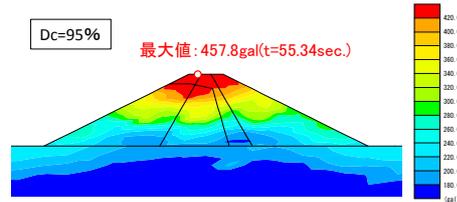


図4 地震応答解析による最大加速度分布

①地震応答解析: 図-2に今回の解析対象を示す。2次元FEMでの初期静的有効応力解析、地震中に劣化しないがひずみ依存性の剛性と減衰(図-3)を考慮した等価線形化による動的応答解析の順で行い、応答加速度、応力の時刻歴を求める。図-2に基盤表面波を示す。D_c=95%での解析では、堤体内の上位ほど応答加速度は増加して天端で最大値457.8gal(増幅度1.5)となった(図-4)。D_c=85%; 90%の場合も同様な結果が得られた。

②詳細Newmark-D法解析²⁾: 地震時非排水繰返し载荷による強度低下を考慮するNewmark-D法解析を行う。具体的には、まず試行円弧に対して全応力法で求めた非排水せん断強度($\tau_f = c_u + \sigma'_0 \cdot \tan \phi_u$)を用いて極限約り合い安定解析(Fellenius法)を行う。「Step①のFEM応答解析で求めた各分割スライス底面での不規則作用せん断応力 τ_w の時刻歴」と「実験で求めた繰返し载荷強度(図-5)に累積損傷度理論を適用して、各スライスで生じる損傷度・ひずみ振幅DAの時刻歴を求める。その結果を非排水繰返し载荷の直後に行った非排水単調载荷試験によって得た「強度低下率~ひずみDA関係」に適用して、各スライスの τ_f の時刻歴を得る。異なるD_cで求めた強度低下率~ひずみDA関係³⁾を図-6に示す。以上のように求めた地震中に低下していく τ_f の時刻歴および土塊すべり内の平均応答加速度を用いて、Newmark法の原理に従ってすべり変位量を求める。出来るだけ多くの試行円弧で上記の計算を繰返し、すべり変位が最大となる臨界円を最終的に探索する。図-10は解析結果であり、後で説明する。

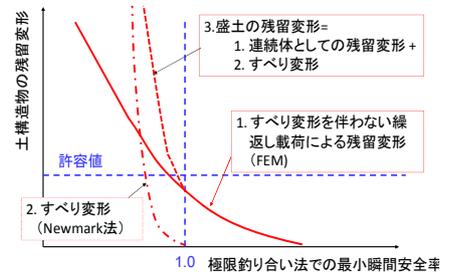


図1 残留変形とすべり変形の関係²⁾

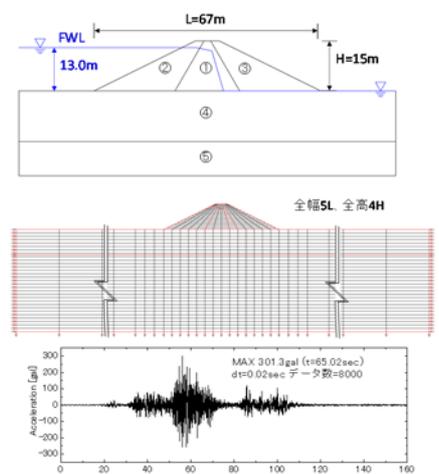


図2 解析対象および基盤表面波

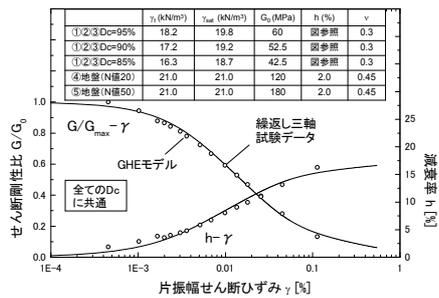


図3 応答解析に用いる材料変形特性

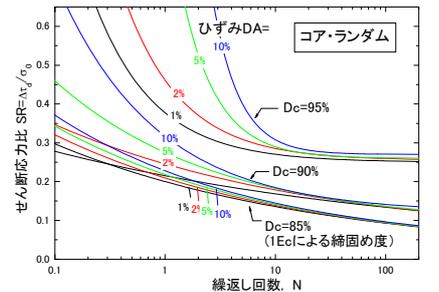


図5 実験より求めた繰返し強度曲線³⁾

③準静的 FEM 解析⁴⁾: Newmark-D 法と同じ累積損傷理論の枠組で非排水繰返し載荷によって劣化する応力・ひずみ関係を求め、準静的 FEM 解析を行う。具体的には、Step①で算出した応答応力の時刻歴を用いて要素毎に損傷度とひずみ振幅 DA の時刻歴を求め、Step②で参照した非排水繰返し載荷後の非排水単調載荷試験によって得た「応力・ひずみ関係～ひずみ DA 関係」に適用して、各要素での劣化した応力・ひずみ関係を得る。各時刻での「応力・ひずみ関係～ひずみ DA 関係」は正規化した応力～ひずみ関係 (図-7) とせん断強度低下率 (図-6) を組み合わせて求める。FEM では、離散化された準静的な力の釣り合いの弱形式の式：

$$\mathbf{F}^{int}(\mathbf{d}) - \mathbf{F}^{ext}(t) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}^{int}(\mathbf{d}) := \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega; \mathbf{F}^{ext}(t) := \int_{\Omega} \rho \mathbf{N}^T \{ \mathbf{g} - \mathbf{a}(t) \} d\Omega \quad (2)$$

を解く。外力項 \mathbf{F}^{ext} 内の重力加速度 \mathbf{g} は、要素内で一定である。 $\mathbf{a}(t)$ は Step①で得られた時刻 t での節点鉛直・水平応答加速度である。また、図-7 に従う非線形弾性の構成式は $\boldsymbol{\sigma} = -K\varepsilon_v \cdot \mathbf{1} + 2\tau(\mathbf{e})/e \cdot \mathbf{e}$; $K = K_s + K_w/n$ となる。 K_s , K_w は粒子骨格と水の体積弾性係数 (= 2.15 GPa)、 \mathbf{e} は相当偏差ひずみである。最後に、地震中の異なる時点 t で、各要素での劣化した応力～ひずみ関係に基づいて自重および応答加速度による慣性力を用いた準静的非線形解析を行い、 $t=0$, $DA=0$ で慣性力無しの初期状態での値を 0 とした残留変位増分 $\mathbf{d}(t)$ を求める。

図-8 は計算された堤頂残留沈下の時刻歴である。これは天端応答加速度最大時付近で最大となり $D_c=85\%$ の場合は 3.8m である。図-7 に示す劣化後の応力・ひずみ関係のひずみゼロの原点は常に地震開始時であり、それを用いて図-9 のように計算された各時点での残留変形はその後に回復しない。従って、各時点での実際の残留変形は「その時点までに計算された残留変形の最大値」である。一方、応力・ひずみ関係が最も劣化している地震終了時に慣性力 0 で計算した天端沈下は $D_c=85\%$ で約 2m である。つまり、残留沈下量に対する慣性力の影響は大きく、この例では地震終了時の解析だけでは残留変形を過小評価する。最後に、盛土の残留変形を①Newmark 法による最終すべり変形と②FEM による最大変形を合算して求めた (図-10)。ただし、②に含まれる「①によって評価されたすべり変形」を取り除くために、合算する②を「臨界すべり開始前の全領域の変形とすべり開始後のすべり面より下の領域の変形の合計」としている。堤頂残留沈下量と D_c の関係を図-11 に示す。 D_c が高いほど 1) 初期非排水せん断強度・剛性が高く、2)繰返し載荷強度が高くなり (図-5) 損傷度 (DA) が低下し、3)非排水せん断強度・剛性低下率が小さくなる (図-6) という三重の効果によって、 D_c の影響は非常に大きい。

3. まとめ

実務的な近似法として、Newmark-D 法ですべり面に沿った残留すべり変形と準静的 FEM 解析で残留変形を別途求めて、両者を一定のルールで合算して盛土の残留すべり変形を求める方法を提案した。両解析は、同一の物性データに基づき同じ累積損傷理論と全応力法の枠組で「地震中に劣化して行く非排水強度と応力～ひずみ関係」を定式化しており、一連の作業として実施できる。また、残留変形に対する締固めの影響は非常に大きく、設計でこの要因を考慮することは必須であることを示した。

参考文献: 1) 食料農業農村政策審議会 技術小委員会資料 4: 土地改良事業設計指針「ため池整備」の改定の考え方, 13p., 2012 (<http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/>). 2) 龍岡文夫・Duttine,A.・矢崎澄雄・毛利栄征: 非排水繰返し載荷による強度低下およびひずみ軟化を考慮したニューマーク法による地震時斜面残留変位推定, JGS シンポジウム No.180, 394-403, 2014. 3) 上野和広・毛利栄征・田中次次・龍岡文夫: 飽和度の非排水繰返し載荷による強度低下率に対する締固め度の影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, 1395-1396, 2014. 4) 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準静的 FEM による盛土の残留変形解析: 第 12 回地盤工学会関東支部発表会, 2015.

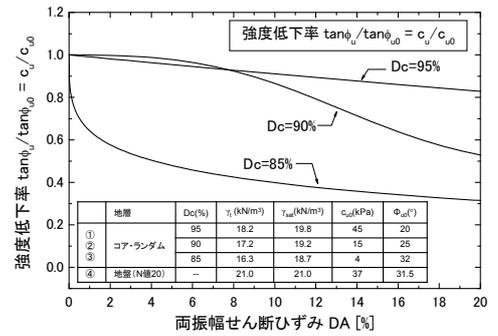


図 6 D 法で用いた強度低下率 DA 関係

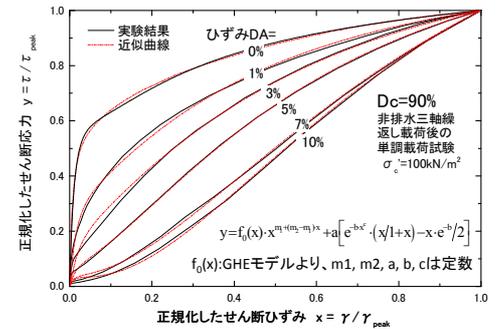


図 7 繰返し載荷後の正規化応力-ひずみ関係

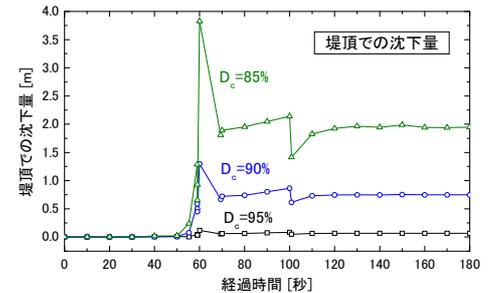


図 8 準静的 FEM による天端沈下の時刻歴

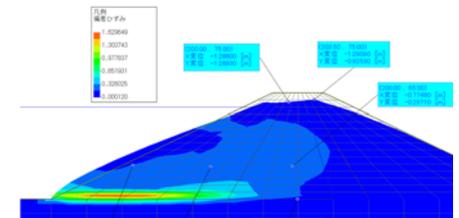


図 9 準静的 FEM による変形図(Dc=90%)

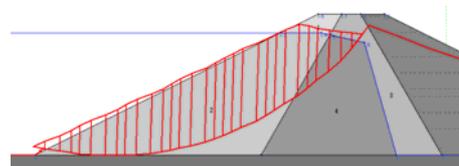


図 10 変形の合算(Dc=90%での例)

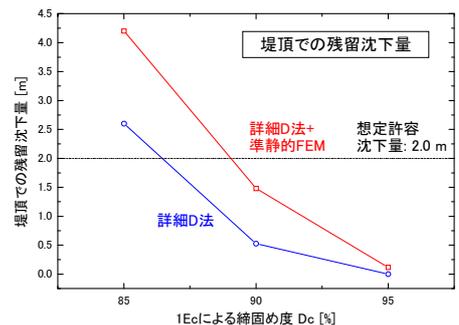


図 11 Newmark 法・準静的 FEM による沈下量