

ニューマーク法による地震時残留すべり解析に適用する非排水繰返しによる強度低下モデルについて

斜面安定、耐震設計、ニューマーク法

複合技術研究所 正会員 DUTTINE, Antoine
 東京理科大学土木工学科 国際会員 龍岡文夫
 複合技術研究所 正会員 矢崎澄雄
 茨城大学農業部地域環境科学科 正会員 毛利栄征

1. はじめに

2011年東日本大震災では、ため池堤体が多数被災し崩壊例もあった。この主原因は、堤体材料の締固めが悪く初期非排水強度が小さい上に、砂質であるため非排水繰返し荷重を受けて強度が著しく低下した（極端な場合は液状化に近い状態になった）ためである。ため池の数は非常に多く、堤体のこのような被害は古くから多数ある。一方で、良く締固めた場合はこのような被害を防げる。これらの現象を考慮できる実務的な安定解析法が必要とされている。一定程度締固めた盛土構造物の崩壊では明確なすべり面が形成されることから、すべり面の形成を前提とした円弧すべり極限釣合い安定解析とそれに基づき残留変位を算定する Newmark 法には一定の合理性がある。本研究では、ため池堤体やフィルダム等の盛土構造物の地震時安定性を評価において非排水繰返し荷重による強度低下と締固めの効果を適切に考慮できるように Newmark 法を修正した。本報文中では、これらの要因の非常性を示す。

2. 全応力法と有効応力法による強度低下モデル

飽和軟弱粘性土の非排水せん断強度 τ_f の推定法として、いわゆる有効応力法と全応力法がある。これに平行して、非排水繰返し荷重過程での非排水せん断強度 τ_f も、次の二つの方法で表現できる。

有効応力法： τ_f を有効応力で定義した粘着力 c' と摩擦角 ϕ' を用いて表現する。

$$\tau_f = c' + (\sigma_c' + \Delta\sigma - \Delta u_d) \cdot \tan \phi' \quad (1)$$

τ_f は圧密時有効直応力 σ_c' の関数なので、圧密時有効応力法とも呼べる。 Δu_d は、本来は τ_f が発揮される時の過剰間隙水圧である。しかし、通常は非排水繰返し三軸試験で得られる Δu -時間関係の上限包絡線から得られる Δu の上限値（すなわち、初期液状化時の Δu ）を用いている。また、 $\Delta\sigma$ は地震荷重による直応力の増分であるがゼロとすることが多い。この方法は、 Δu 法と呼ばれている。 Δu 法は、緩い飽和土では一定程度有効であるが、締固めの効果を著しく過小評価する²⁾。まず、荷重開始時は $\Delta u_d = 0$ なので式 1 による τ_f は排水強度となるが、実際は非排水強度であり密な飽和土ほどダイレイタンシー効果により排水強度よりも大きくなる。また、密な土ほど τ_f 発揮時の Δu_f は、初期液状化時の作用せん断応力がゼロに近い状態で測定される Δu よりも小さくなり負にもなる（Cyclic mobility）。従って、初期液状化時の Δu を式 1 での Δu_d として用いる、実際の τ_f を大幅に過小評価する。

全応力法： 非排水繰返し荷重中に低下してゆく非排水せん断強度 τ_f を、 Δu_d を参照せず、式 2 で求める。

$$\tau_f = c_u + \sigma_c' \cdot \tan \phi_u \quad (2)$$

c_u と ϕ_u は、非排水繰返し荷重で生じるひずみに応じて低下する見掛けの物性値であり、実験によって求める。

以下、非排水せん断強度 τ_f を有効応力法（式 1）及び全応力法（式 2）によって求めた上で Newmark 法に基づいてすべり変位を算定し、締固め効果を比較する。

3. 解析手法と解析結果

図 1 に、全応力法（式 2）に基づく修正 Newmark 法（Newmark-D 法^{2,3)}）による解析フローを示す。

Step 1 - FEM 動的応答解析： 2次元 FEM で初期静的有効応力解析、剛性と減衰のひずみ依存性を考慮した等価線形化（又は非線形直接積分法）による動的応答解析の順で行い、初期有効応力状態、応答加速度の時刻歴、せん断応力の時刻歴を求める。

Step 2 - 初期臨界円弧すべり面の探索： 各スライス底面でのせん断強度 τ_f を式 2 で求め、極限釣合法(Fellenius 法)によって一様一定水平震度 k_h が作用した場合における臨界円弧すべり面 C_0 を探索し、 C_0 に対する最も低い降伏開始震度 $(k_{y0})_0$ を求める。

Step 3 - 臨界すべり面でのせん断強度低下過程の計算： 臨界円 C_0 の各分割スライス底面での作用せん断応力 τ_w の時刻歴

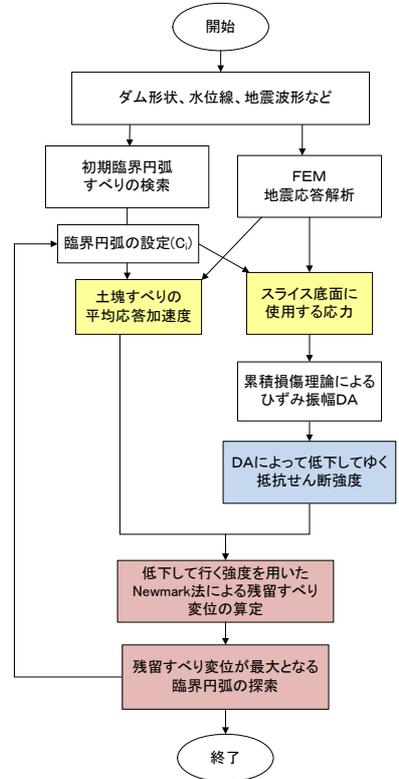


図-1 Newmark-D 法の解析フロー

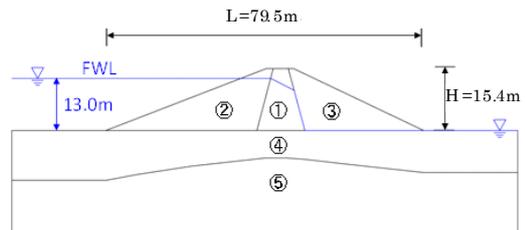


図-2 解析対象

表-1 各強度試験に基づいて設定した解析に用いる土質特性

地層	単位体積重量 (kN/m ³)	排水せん断強度		非排水せん断強度			
		湿潤 γ_t	飽和 γ_{sat}	c' (kPa)	ϕ' (度)	c_{u0} (kPa)	ϕ_{u0} (度)
① コア	95%	18.5	19.6	15	22	30	20
②③ランダム		18.0	19.6	1	50	45	20
① コア	90%	18.0	19.1	12	19	18	13
②③ランダム		17.0	19.1	7	40	15	20
① コア	85%	16.5	18.5	10	15	15	10
②③ランダム		16.0	18.5	5	35	4	30
④ 地盤 N20	17.0	17.4	37	31.5	37	31.5	

“On the models of strength-reduction by undrained cyclic loading used in residual sliding displacement analysis by the Newmark method”

A.Duttine (Integrated Geotechnology Institute, IGI); F. Tatsuoka (Tokyo University of Science); S. Yazaki (IGS); and Y. Mohri (National Institute for Rural Engineering)

を Step 1 の FEM 応答解析から求め、非排水条件での τ_w の繰返し載荷によって低下してゆく τ_f の時刻歴 (即ち c_u , ϕ_u の時刻歴) を求める。各スライスの τ_w の時刻歴から生じるひずみ振幅 DA の時刻歴を累積損傷度理論によって求めて、それを非排水繰返し載荷の直後に行った非排水単調載荷試験より強度低下率とひずみ DA の関係に代入して各スライスの τ_f の時刻歴を算定する³⁾。

Step 4 - すべり変位の計算に用いる応答加速度の計算: Step 1 の FEM 動的解析によって求めた応答加速度に基づいて、初期臨界面 C_0 に沿って土塊すべり内での節点の応答加速度を平均して求める。

Step 5 - すべり変位の計算: 初期臨界面 C_0 に沿って、Newmark 法の理論に基づいて回転加速度 $\ddot{\theta}$ の時刻歴を求め、これを二回時間積分してそのパルスによって生じるすべり変位量 $\delta = R \cdot \theta$ の増分 $\Delta\delta$ を求める。

Step 6 - すべり変位が最大となる臨界面の探索: 上記の Step3~5 を繰り返して、すべり変位が最大となる臨界面を探索する。

有効応力法に基づく Newmark 法は、 τ_f を求める方法以外は上記と同一である。 Δu 法に用いる Δu_d (式 1) は、図-5 に示す非排水繰返し三軸試験例での Δu -DA 関係の上限包絡関係に Step 3 で求めた DA を代入して求めた Δu である。実際の代表的なため池堤体材料を標準プロクターで締固め度 $D_c=85, 90, 95\%$ に締固めた場合での D_c の影響を検討した。表-1 には、土質試験によるそれぞれの D_c での各種物性値を示す。

解析対象を図-2 に、図-3 に等価線形応答解析モデルおよび使用した南海トラフ基盤表面波を示す。強度モデルの影響を直接比較するため、 $D_c=95\%$ での非排水繰返し三軸試験によって求めた剛性と減衰率のひずみ依存性を全ての解析で用いた。実験結果に基づいて決定した強度低下特性を図-6 に示す。

地震応答解析より堤体天端での最大応答加速度は 376.6gal であり、堤体底面に対して 1.5 倍程度増幅している (図-7)。応答加速度およびせん断応力 τ_w の時刻歴を抽出してひずみ DA の時刻歴を求め、DA から Δu 法で用いる Δu_d の値と Newmark-D 法で用いるせん断強度 τ_f の時刻歴を算出した。解析結果を図-8 に示す。この図に、震動中に一定の値を保つ排水強度を用いる従来の Newmark 法 (O 法) の結果も示す。

Newmark-D 法 (詳細 D 法) では、締固め度 D_c が低下すると初期非排水強度が低下して降伏震度の初期値が低下することに加えて、地震中の DA に増加によって降伏震度の低下率が大きくなるため、残留変位は非常に大きくなる。逆に、 D_c が増加すると堤体の安定性が著しく向上する。従って、締固めの効果を適切に評価することが可能になる。

一方、他の二つの方法では、すべり変位に対する D_c の影響は Newmark-D 法と比較すると非常に小さくなる。すなわち、Newmark-詳細 O 法では緩詰めでの変位が著しく小さくなり、緩詰めの場合の滑り崩壊の危険を過小評価している。また、 Δu 法では密詰めでの変位が著しく大きくなり、締固めの効果を著しく過小評価している。

4. まとめ

締固めが悪いと初期非排水強度が低くなる上に非排水繰返し載荷による強度低下率が大きくなる。この二重の効果によって、地震中に強度が著しく低下して大きなすべり変位を生じる可能性が高くなる。締固めが良いと、逆に強度が高い値に維持されて大きなすべり変位は生じない。Newmark-D 法は飽和非排水状態でのすべり変形の近似的解析法であるが、非排水せん断強度を累積損傷度理論に基づいて全応力法で定式化することによって、締固めの効果を考慮できる。

参考文献: 1) 地震時における地盤災害の課題と対策—2011 年東日本大震災の教訓と提言, 地盤工学会 H23 学会提言の検証と評価に関する委員会, 2011, 2012. 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, 地盤工学会委員会主催シンポジウム No.180, 394-403, 2014. 3) Duttine, A.・龍岡文夫・矢崎澄雄・毛利栄征: 非排水繰返し載荷による強度低下を考慮したニューマーク法解析の諸仮定の検討, 北九州, 第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, 1397-1398, 2014. 4) 上野和広・毛利栄征・田中忠次・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.

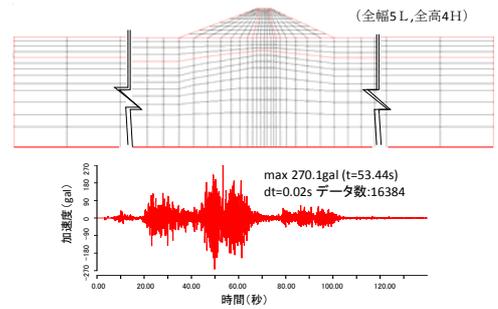


図-3 応答解析用モデルおよび基盤表面波

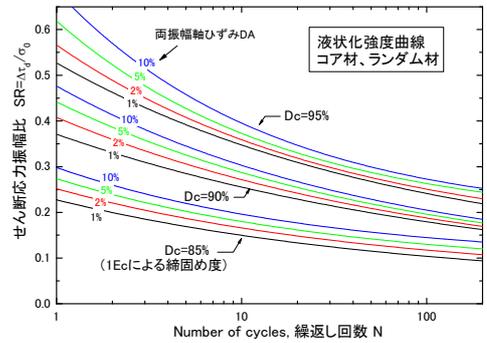


図-4 実験より求めた繰返し強度曲線

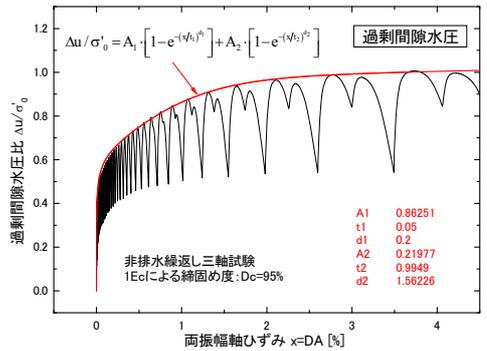


図-5 Δu 法に適用した Δu -DA 関係 ($D_c=95\%$)⁴⁾

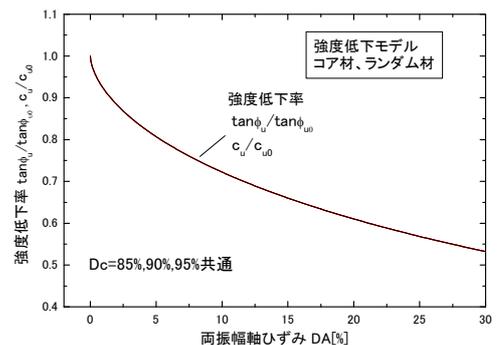


図-6 D 法に用いた強度低下率-DA 関係

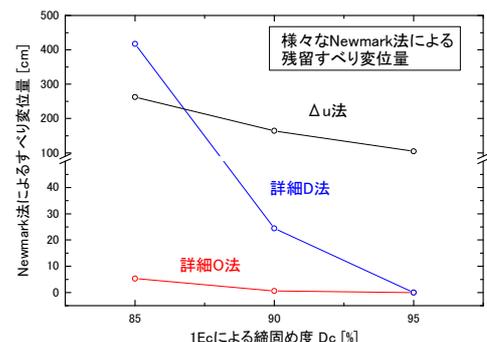


図-8 最終残留すべり量- D_c 関係の比較