

## 非排水繰返しによる強度低下の諸モデルを用いた Newmark 法解析例

斜面の安定解析、耐震設計、ニューマーク法

複合技術研究所 正会員 ○矢崎澄雄 正会員 DUTTINE, Antoine  
東京理科大学 国際会員 龍岡文夫  
農村工学研究所 正会員 毛利栄征 正会員 上野和広

## 1. はじめに

堤体内に水位面を有するため池堤体の地震時残留変形解析法として、非排水条件あるいはそれに近い状態での繰返しせん断による損傷 (Damage) によって生じる強度低下を考慮した Newmark-D 法の開発を行ってきた<sup>1), 2), 3)</sup>。

今回、実際の代表的なため池堤体材料を用いて、3 種類の締固め度 ( $D_c = 85, 90, 95\%$ ) で各種強度試験を実施した結果による強度特性モデル<sup>4)</sup>に基づいて、Newmark-D 法および従来から標準的に行われている標準ニューマーク法を実施し、解析法および締固め度の違いが結果に与える影響を検討した。また、従来のレベル 1 地震に対する設計法である円弧すべり極限釣合ひ法 (安全率計算) も実施し、締固めの効果の評価が妥当に行えるのかを検討した。

## 2. 解析概要

3 種類の標準プロクター(1Ee)による締固め度  $D_c = 85, 90, 95\%$  で締固めた場合に対して、以下の解析を実施した。

① レベル 1 地震に対する円弧すべり安定解析：従来から行われている円弧すべり極限釣合ひ法 (震度法) により、レベル 1 設計地震動として水平震度  $k_h = 0.15$  を用いて、円弧すべり安全率の比較を行った。堤体の強度特性は、締固め度によって異なる値である排水残留せん断強度 ( $c', \phi'$ ) を適用した。

② レベル 2 地震に対する円弧すべり滑動変形解析 (Newmark-D 法, 標準 Newmark 法)：レベル 2 地震に対する残留変位に基づく安定解析法としては、地震時の非排水繰返し载荷による損傷で強度が低下すること考慮しない従来からの標準 Newmark 法と、これを考慮する Newmark-D 法の 2 種類で解析を実施し、解析法および締固め度の影響を検討した (表 1)。標準 Newmark 法では、応答解析実施の有無の場合を比較した。

## 3. 解析条件と解析結果

解析対象を図 1 に、応答解析モデルを図 2 に示す。FEM 動的応答解析は等価線型化法で行い、地盤底面は粘性境界、側面はエネルギー伝達境界とした。 $D_c = 95\%$  での非排水繰返し三軸試験によって求めた堤体材料の剛性と減衰率のひずみ依存性を図 3 に、南海トラフ基盤表面波を図 4 に示す。 $D_c = 85\%$  と  $90\%$  の場合でも同様な室内試験と応答解析を行ったが、今回は強度モデルの影響を直接比較するために、全ての Newmark 法の解析で  $D_c = 95\%$  の応答値を用いた。試験結果に基づいて設定した各解析に用いる各  $D_c$  での土質特性を表 2 に示す。Newmark-D 法に用いる「強度低下率の繰返し両振幅ひずみに対する関係」は、実験結果に基づき  $D_c$  の違いによらず図 5 に示す曲線でモデル化した。

等価線型化法による解析で得られた堤体の最大応答加速度および最大せん断ひずみの分布を図 6, 7 に示す。堤体の応答加速度は、堤体上位ほど増加して天端で最大値 376.6gal を示した。堤体底面での最大値は 251.1gal であり、堤体天端では 1.5 倍程度に増幅している。最大せん断ひずみは、コア下部付近で最大を示し 0.05% 程度と小さい値であった。地震応答解析の結果から、標準詳細 Newmark 法で用いる応答加速度およびせん断応力の時刻歴を抽出して、せん断応力の時刻歴から堤体材料のせん断強度低下の時刻歴を算出した。

表 1 実施した各 Newmark 法の概要

解析手法	名称	Newmark 法の 入力波	応答解析の入力波	堤体の強度特性
標準 Newmark 法	標準 Newmark 法	南海トラフ基盤 表面波	—	強度一定, 排水残留強度 ( $c', \phi'$ )
	標準詳細 Newmark 法	応答解析結果 による波	南海トラフ基盤 表面波	
Newmark-D 法	詳細 Newmark-D 法	応答解析結果 による波	南海トラフ基盤 表面波	非排水繰返し载荷によって強度が 低下してゆく非排水ピーク せん断強度 ( $c_u, \phi_u$ )

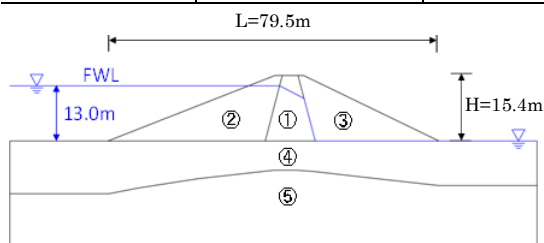


図 1 円弧すべり解析モデル図

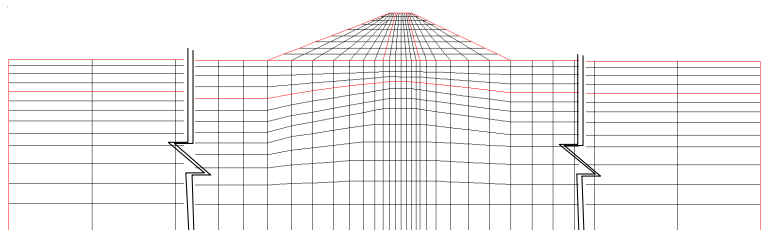


図 2 応答解析用モデル図 (幅 5L × 高 4H)

レベル 1 とレベル 2 設計地震動に対する各解析の結果を表 3 に、各ニューマーク法の解析結果図を図 8 に示す。 $D_c$  が小さいほど、レベル 1 地震に対する安全率は小さくなりレベル 2 地震に対する各手法による変位量変位量が大きくなっており、締固めにより堤体の安定性が向上することが分かる。標準 Newmark 法によるレベル 2 地震動に対する残

“Examples of analysis by Newmark method based on different models of strength degradation by cyclic undrained loading”

S. Yazaki & A. Duttin (Integrated Geotechnology Institute, IGI); F. Tatsuoka (Tokyo University of Science); Y. Mohri & K. Ueno (National Institute for Rural Engineering)

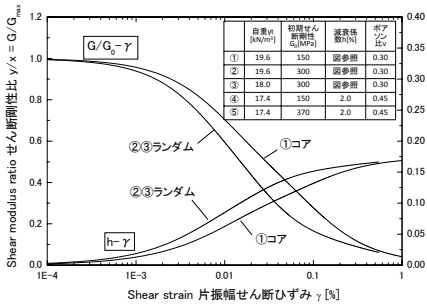


図3 堤体材料の変形特性

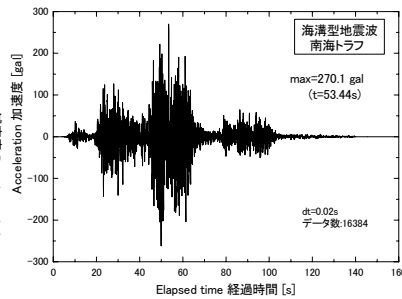


図4 南海トラフ基盤表面波

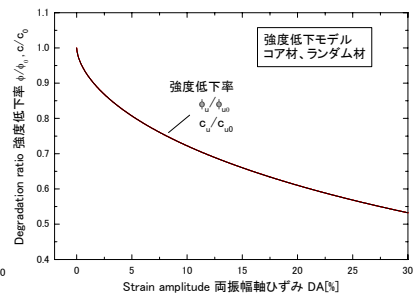


図5 D法に用いる強度低下率

表2 各試験結果により設定した解析に用いる土質特性

地層 No.名称	\$D_c\$	単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> )		排水せん断強度		非排水せん断強度	
		湿潤 \$\gamma_t\$	飽和 \$\gamma_{sat}\$	\$c'\$ (kPa)	\$\phi'\$ (deg)	\$c_{u0}\$ (kPa)	\$\phi_{u0}\$ (deg)
① コア	95%	18.5	19.6	15	22	30	20
②③ランダム		18.0	19.6	8	40	30	30
① コア	90%	18.0	19.1	12	19	18	13
②③ランダム		17.0	19.1	6	35	10	28
① コア	85%	16.5	18.5	10	15	15	10
②③ランダム		16.0	18.5	4	30	5	25
④ 地盤N20		17.0	17.4	37	31.5	37	31.5

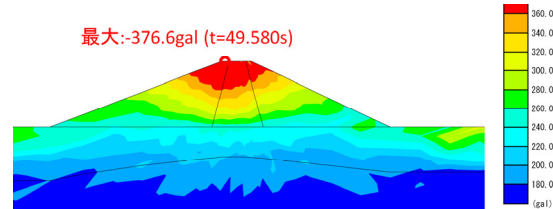


図6 応答解析による最大応答加速度分布

表3 各解析法による解析結果

	レベル1 地震時 安全率 \$F_s\$	レベル2 地震時 Newmark 法 による変位量 \$\delta\$ (mm)		
		標準法	標準詳細法	詳細D法
\$D_c=95\%\$	1.466	0.0	2.5	0.0
\$D_c=90\%\$	1.200	2.0	33.4	112.9
\$D_c=85\%\$	0.954	31.2	158.6	3804.6

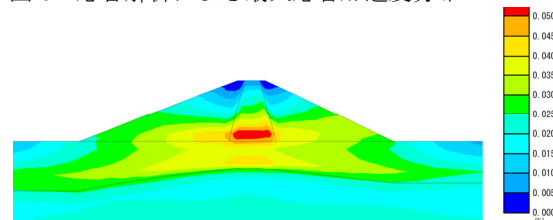


図7 応答解析による最大せん断ひずみ分布

留変位量は、FEM による応答加速度を用いたほうが大きい。これは、堤体内での加速度の増幅のためであり、本解析では応答を考慮した方が安全側の評価となる。Newmark - D 法では地震の影響で堤体土の強度が低下して降伏震度が低下してゆく。\$D\_c = 95\%\$ (図 9a) では、初期降伏震度 \$k\_y = 0.400\$ と高くその後の降伏震度の低下も小さいため、残留変位は発生していない。\$D\_c = 85\%\$ (図 9b) では、初期降伏震度が \$k\_y = 0.124\$ と低くその後の降伏震度の低下も大きいために、最終的に 3804.6mm と非常に大きな残留変位が発生した。

#### 4. まとめ

堤体内に水位面を有しており非排水条件あるいはそれに近い条件で、地震の影響により繰返しせん断による土の損傷 (Damage) が発生する場合には、従来の標準 Newmark 法では堤体の安定性の十分な評価ができない。特に、堤体の締固めの効果を過小評価する。一方、非排水繰返し載荷による累積損傷によって生じる堤体土の強度低下を考慮できる Newmark-D 法の方が、遥かに妥当な結果を与える。

参考文献：1) Duttine, A.・龍岡文夫・堀井克巳・矢崎澄雄・毛利栄征 (2013): ひずみ軟化と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による地震時斜面変位推定、第 48 回地盤工学研究発表会、富山、1589-1590. 2) 矢崎澄雄・Duttine, A.・龍岡文夫・毛利栄征 (2013): 載荷中の強度低下を考慮したニューマーク法による地震時斜面変位の解析例、第 48 回地盤工学研究発表会、富山、1591-1592. 3) Duttine, A.・龍岡文夫・矢崎澄雄・毛利栄征 (2014): 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、本地盤工学研究発表会. 4) 上野和広・毛利栄征(2014): 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、本地盤工学研究発表会.

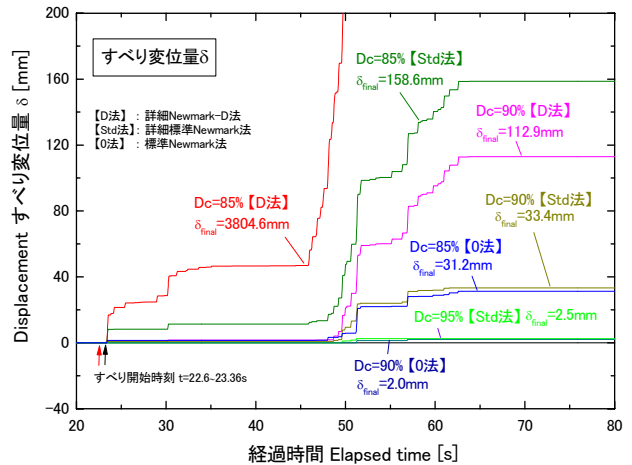


図8 各 Newmark 解析結果

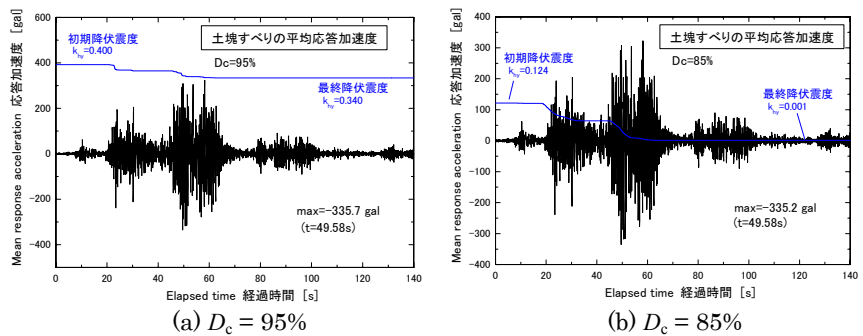


図9 詳細 Newmark-D 法による解析結果