

非排水繰返し載荷による強度低下の評価法および 強度低下を考慮したため池堤体の滑動変位量解析例

上野和広¹, 毛利栄征¹, 田中忠次², 龍岡文夫³

- 1 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所
- 2 社団法人地域環境資源センター
- 3 東京理科大学・土木工学科

概 要

地震時にため池堤体で発生するすべり・孕み出しなどの被害は、下流斜面と比較して貯水のある上流斜面で多い。これは、堤体上流側に存在する飽和部分が地震時に強度低下を生じることが関連しており、ため池堤体の地震被害の主要な原因の一つとなっている。ため池堤体の耐震性を上記を考慮して診断・評価するには、地震動に伴う強度低下を考慮して堤体の変形量を推定する必要がある。滑動変位量計算の際に必要な「堤体材料の非排水繰返し載荷に伴う強度低下特性」を得るための実験方法とそれに基づく累積損傷度による強度低下モデルの策定法、ニューマーク法による地震時におけるため池堤体のすべり変形を簡便に推定する手法を開発した（修正ニューマーク-D法）。本論文では、これらを紹介するとともに、修正ニューマーク-D法の解析例を報告する。

キーワード：強度低下，非排水繰返し載荷，修正ニューマーク-D法

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では、東北地方を中心に多数のため池が被災した。著者らが現地調査を行った福島県では、最大震度6強の地震によって3730基のため池・ダムのうち745基のため池に被害が生じた¹⁾。ため池堤体の被害形態としては、堤体天端の縦断方向のクラック、上流斜面保護工の変形や波除工の転倒、上流斜面のすべり・孕みだしが多く、上流側での被害が多数を占めていた²⁾。過去の地震においても、ため池堤体に発生するすべり・孕み出しなどの被害は下流斜面と比較して貯水のある上流斜面で多いことが報告されている³⁾⁴⁾。

佐々木ら⁵⁾は実際のフィルダム材料（礫質土）を対象として、繰返し載荷を行った後に引き続き単調載荷を行う大型三軸試験を不飽和排水排気条件および飽和非排水条件で実施している。その結果から、不飽和排水排気条件では供試体に繰返し載荷を与えてもその後の単調載荷過程で発揮する強度はほとんど変化しないこと、飽和非排水条件では繰返し載荷を受けた後の単調載荷過程で発揮する強度が供試体の締固め度が低いほど小さくなることを示した。繰返し載荷に伴う強度低下と排水条件の関係は、地震時にため池堤体の被害が上流側で多く発生するという調査結果と整合している。したがって、堤体上流側に存在する浸潤線下方の飽和した盛土部分が地震時に強度低下を生じることがため池被害の主要な原因の一つと考えられ

る。

この背景から、筆者らは塑性すべり解析の一つであるニューマーク法による滑動変位量の計算に非排水繰返し載荷に伴う強度低下を取り入れ、地震時におけるため池堤体のすべり変形を簡便に推定する手法を開発した（修正ニューマーク-D法）⁶⁾⁷⁾⁸⁾。修正ニューマーク-D法による滑動変位量計算を行うためには、「堤体材料の非排水繰返し載荷に伴う強度低下特性」を実験によって得る必要がある。本論文では、このための実験法を述べるとともに、得られたデータから強度低下モデルを策定する方法を示す。また、実際の実験結果に基づいて設定した強度低下モデルによる解析例を報告する。

2. 修正ニューマーク-D法に必要な強度低下モデル

修正ニューマーク-D法によるすべり変位計算過程の概略を図1に示す。修正ニューマーク-D法では、土が地震動による非排水繰返し載荷を受けた時（図1(a)）、繰返し載荷に伴って損傷ひずみ ϵ_D が累積し（図1(b)）、その損傷ひずみの値に応じて土の非排水強度が継続的に低下する（図1(c)）と言う考え方である⁶⁾⁷⁾⁸⁾。損傷ひずみとは、非排水繰返し載荷に伴う強度低下の指標であり、非排水繰返し載荷で生じるひずみで定義される。損傷ひずみとしては、ため池堤体土に作用している初期せん断応力の大きさに応じて、繰返し載荷過程で生じる「最大ひずみ」あるい

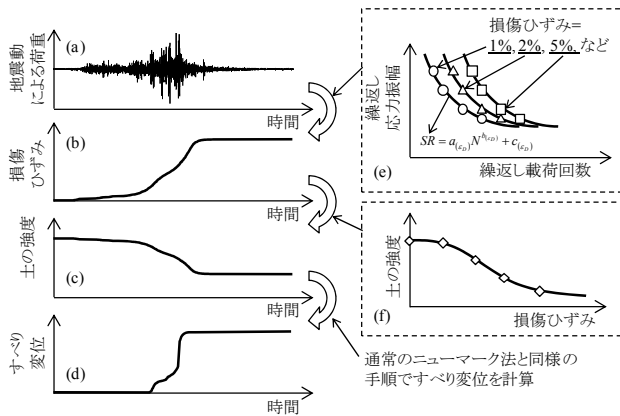


図 1 修正ニューマーク-D法によるすべり変位計算過程の概略

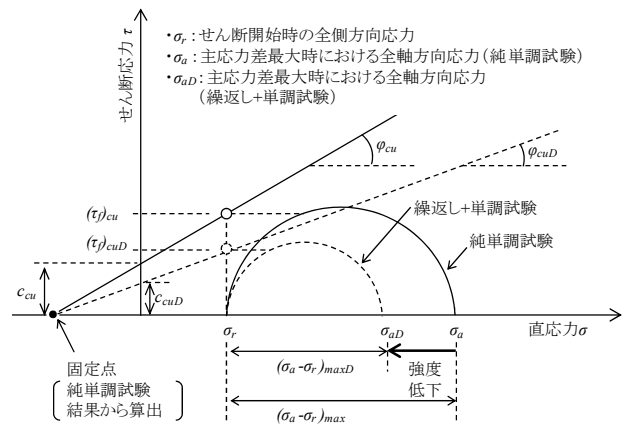


図 3 損傷内部摩擦角の算出方法

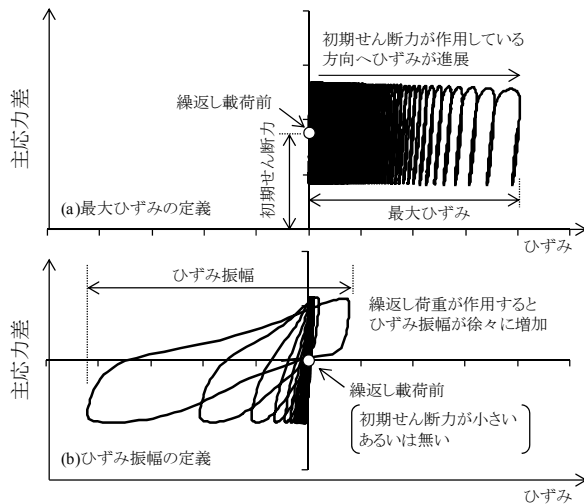


図 2 損傷ひずみの定義

は「ひずみ振幅」が用いられる (図 2)。土に大きな初期せん断応力が作用している場合、繰返し荷重が作用するとひずみは初期せん断応力が作用している方向へ進展するため最大ひずみによって損傷ひずみを評価する方が適切であると考えられる (図 2(a))。一方、土に作用する初期せん断応力が小さいあるいは無い場合、繰返し荷重が作用するとひずみ振幅が徐々に増加することから、ひずみ振幅を損傷ひずみとして採用するのが適切であると考えられる (図 2(b))。以後、繰返し载荷による影響を表す指標として最大ひずみおよびひずみ振幅を併せて損傷ひずみ ϵ_D と称する。この指標として非排水繰返し载荷で生じる過剰間隙水圧を用いない理由は、文献 8) で詳細に説明されている。

地震動による不規則な繰返し荷重履歴が作用した時に生じる損傷ひずみ ϵ_D の値は、繰返し応力振幅比 SR 、繰返し载荷回数 N および損傷ひずみの関係 (図 1(e)) に累積損傷度理論を適用して算出される⁶⁾⁷⁾⁸⁾。したがって、修正ニューマーク-D法による解析を実施するには、繰返し応力の振幅を変化させた一連の非排水繰返し载荷試験の結果から、図 1(e)に示す関係を得る必要がある。

次に、土が非排水繰返し载荷を受けた後に残存する非排水単調载荷強度は、「非排水繰返し载荷によって生じた損

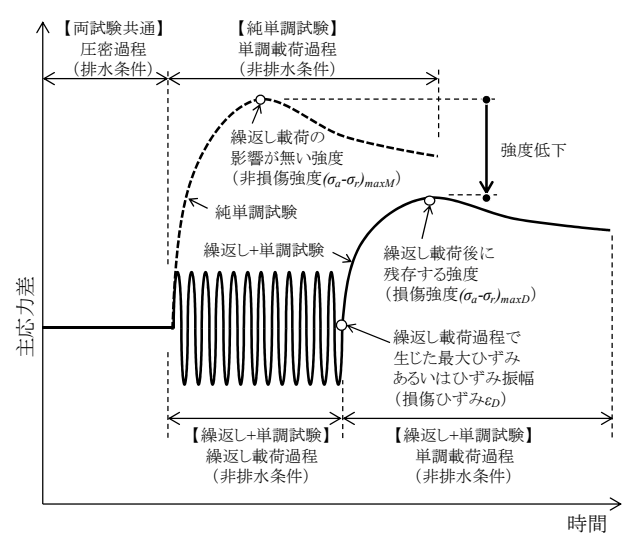


図 4 繰返し+単調試験および純単調試験の概略

傷ひずみ ϵ_D 」と「非排水繰返し载荷を受けた後に発揮する非排水単調载荷強度」との関係 (図 1(f)) から算出される。

図 3 を参照して、損傷前の非排水単調载荷強度 $(\tau_f)_{cu}$ は式(1)で表現する。

$$(\tau_f)_{cu} = c_{cu} + \sigma'_c \cdot \tan \phi_{cu} \quad (1)$$

σ'_c はせん断開始時の有効直応力、 c_{cu} と ϕ_{cu} は見掛けの粘着力係数と内部摩擦角である。損傷後の非排水単調载荷強度 $(\tau_f)_{cuD}$ は、式(2)で表現する。

$$(\tau_f)_{cuD} = c_{cuD} + \sigma'_c \cdot \tan \phi_{cuD} \quad (2)$$

c_{cuD} と ϕ_{cuD} は見掛けの粘着力係数と内部摩擦角であり、損傷によって低下していく。

したがって、修正ニューマーク-D法による解析を実施するには、圧密供試体に対して非排水状態で繰返し载荷 (応力振幅一定) を行った後、非排水状態を保ったまま引き続き非排水単調载荷を行う試験 (繰返し+単調試験 (図 4)) を複数の損傷ひずみ ϵ_D に対して行い、損傷ひずみと損傷内部摩擦角 ϕ_{cuD} の関係 (図 1(f)) を得る必要がある。

非排水繰返し载荷によって低下した強度を算出した後、通常のニューマーク法による計算と同様に、各地震動パル

スによって生じるすべり変位増分を計算し、それを積分してすべり量の時刻歴を求める (図 1(d))。

3. 強度低下モデルを得るための実験方法

表 1 に図 1(e)と図 1(f)に示す関係を得るための一連の実験の例を示す。実験 No.01-03 は圧密非排水で単調荷重を行う実験であり、JGS 0523「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」に準じて実施する (図 4; 以後この実験を「純単調試験」と称する)。実験 No.04-11 は非排水条件で繰返し荷重を与えた後に単調荷重を実施する実験である (図 4; 以後この実験を「繰返し+単調試験」と称する)。なお、実験 No.04-11 は取得したデータの主要な利用方法によって実験 No.04-07 と実験 No.08-11 に区分される。

3.1 実験 No.01-03

JGS 0523「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」に準じた試験である。飽和 (B 値>0.95) した供試体に対して有効圧密応力が異なる複数の試験 (表 1 の例では合計 3 試験) を実施することによって、繰返し荷重の影響が無い状態の強度定数 (内部摩擦角および粘着力) を求める。なお、修正ニューマーク-D 法では非排水繰返し荷重による過剰間隙水圧の変化は参照しないため、全応力表示の強度定数 (内部摩擦角 ϕ_{cu} および粘着力 c_{cu}) を算出する。有効圧密応力の値は、ため池堤体の堤高および堤体土の密度から算出される有効上載圧を参考に決定する。

3.2 実験 No.04-07

各損傷ひずみ ε_D に対する繰返し応力振幅比 SR と繰返し荷重回数 N の関係 (図 1(e)) を求めるため、繰返し荷重過程での繰返し応力振幅比に複数の値を設定して行う一連の繰返し+単調試験である。幅広い損傷ひずみに対して繰返し応力振幅比と繰返し荷重回数の関係を得るため、繰返し荷重過程は 10%程度の大い損傷ひずみが生じるまで継続する。具体的な実験手順を以下に示す。

- 1) 「3-1. 実験 No.01-03」で採用した複数の有効圧密応力の中から代表的な値を 1 つ選定し、JGS 0523「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」に準じて供試体を飽和 (B 値>0.95) および圧密する。
- 2) 圧密後、非排水条件で一定振幅の繰返し応力を供試体に作用させる。
- 3) 繰返し荷重過程で 10%程度の大い損傷ひずみが生じた後、非排水条件を保ったままで直ちに単調荷重を実施する。
- 4) 手順 2)での繰返し応力振幅として異なる値を設定し、手順 1)-3)の実験を複数 (表 1 の例では合計 4 回) 実施する (繰返し応力振幅の値は、損傷ひずみ 10%に達するまでの繰返し荷重回数が 1-200 回程度となるように設定する)。

表 1 強度低下モデルを得るための実験一覧

| 実験 No. | 試験概要 | σ'_c | SR | ε_D | 取得する強度低下特性 |
|--|----------|---|------------------------------|--|---|
| 01 02 03 | 純単調試験 | σ'_c-1 σ'_c-2 σ'_c-3 | - - - | - - - | ϕ_{cu}, c_{cu} |
| 04 05 06 07 08 09 10 11 | 繰返し+単調試験 | σ'_c-1 or σ'_c-2 or σ'_c-3 | SR-1 SR-2 SR-3 SR-4 | 10% 程度 | SR-N 関係 (図 1(e)) |
| | | | SR ₂₀ | ε_{D-1} ε_{D-2} ε_{D-3} ε_{D-4} | $\phi_{cuD}-\varepsilon_D$ 関係 (図 1(f)) |

※ σ'_c :有効圧密応力, SR:繰返し応力振幅比, SR₂₀:20 回の繰返し荷重で損傷ひずみ 5%を生じる繰返し応力振幅比, ε_D :損傷ひずみ, N:繰返し荷重回数, ϕ_{cuD} :損傷内部摩擦角

3.3 実験 No.08-11

非排水繰返し荷重によって生じる損傷ひずみ ε_D と損傷内部摩擦角 ϕ_{cuD} の関係 (図 1(f)) を求めるため、繰返し荷重過程で生じる損傷ひずみに複数の値を設定して行う一連の繰返し+単調試験である。具体的な実験手順を以下に示す。

- 1) 「3-2. 実験 No.04-07」で採用した有効圧密応力で、JGS 0523「土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験方法」に準じて供試体を飽和 (B 値>0.95) および圧密する。
 - 2) 「3-2. 実験 No.04-07」で得た各損傷ひずみ ε_D に対する繰返し応力振幅比 SR と繰返し荷重回数 N の関係 (図 1(e)) から、20 回の繰返し荷重で損傷ひずみ 5%を生じる繰返し応力振幅比 SR_{20} を読み取る。
 - 3) 圧密後、非排水条件で SR_{20} に対応した一定振幅の繰返し応力を供試体に作用させる。
 - 4) 繰返し荷重過程で所定の損傷ひずみが生じた後、非排水条件を保ったままで直ちに単調荷重を実施する。
 - 5) 手順 4)での損傷ひずみとして異なる値を設定し、手順 1)-4)の実験を複数 (表 1 の例では合計 4 回) 実施する (損傷ひずみの値は、損傷ひずみと損傷内部摩擦角の関係 (図 1(f)) を滑らかに近似できるように設定する)。
- なお、「3-2. 実験 No.04-07」の単調荷重過程のデータは図 1(f)に示す関係を得るための実験として、「3-3. 実験 No.08-11」の繰返し荷重過程のデータは図 1(e)に示す関係を得るための実験として利用できる。

上述したように、強度低下モデルを得るための実験には繰返し荷重と単調荷重を連続して行うことのできる荷重装置が必要である。これまで著者らが行った実験では、パソコンから荷重条件を制御可能なひずみ制御方式の荷重装置⁹⁾あるいは繰返し荷重用のペロフラムシリンダと単調荷重用の荷重台を同一鉛直軸上に設置した荷重装置を用いた。ひずみ制御方式の荷重装置は、一定応力振幅で繰返し荷重中に最大ひずみあるいはひずみ振幅が所定の値に達した後、直ちに単調荷重試験へ移行できるようプログラムされており、繰返し荷重から単調荷重まで連続的に試験を実施することができる。なお、繰返し荷重時と単調荷重時でひずみ速度を変更することも可能であり、繰返し荷重

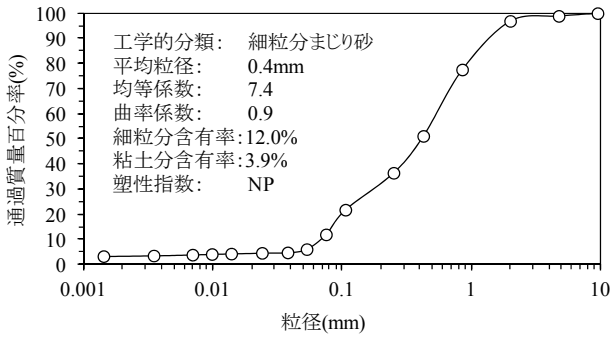


図 5 使用した試料の粒度分布および物性

時には 1%/min, 単調載荷時には 0.1%/min の載荷速度を採用している。一方, ペロフラムシリンダと載荷台を用いた載荷装置では, 供試体のひずみをモニタリングしながら周波数 0.1Hz の sin 波で繰返し載荷を行い, 所定の損傷ひずみが生じた時に手で載荷を停止した後, ペロフラムシリンダのロッドを固定し, 載荷台によって単調載荷(載荷速度: 0.1%/min)を実施した。

4. 強度低下モデルの策定方法

強度低下モデルの策定法を, 実際のため池堤体材料のデータを用いて具体的に説明する。以下に示すデータは実際のため池から採取した堤体材料に対するものである。試料の粒度分布および物理試験結果を図 5 に示す。供試体は, 含水比 w を 21.0% に調整した試料を直径 5cm × 高さ 10cm のモールド内で 3 層に突固めて作製した。供試体の乾燥密度 ρ_d は, 1.49g/cm³ である。この乾燥密度は, JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験 (B-c 法: 標準プロクター)」による最大乾燥密度 ρ_{dmax} に対して締固め度 (D_c 値) 95% である。なお, ため池堤体内の潜在すべり面に沿った初期せん断応力が作用している状態を想定し, 圧密は圧密応力比 $\sigma'_r/\sigma'_a=0.5$ の異方圧密としている。ここで, σ'_r : 有効側方向応力 (kN/m²), σ'_a : 有効軸方向応力 (kN/m²) である。また, 純単調試験結果から求めた式(1)による強度定数は, $\phi_{cu}=20.4^\circ$, $c_{cu}=43.6\text{kN/m}^2$ である。

表 1 の「実験 No.04-07」に該当する繰返し+単調試験結果の一例を純単調試験結果と共に図 6 に示す。繰返し+単調試験の試験条件は, 繰返し応力振幅比 $SR=0.449$, 繰返し載荷から単調載荷へ移行する損傷ひずみ(最大ひずみ) $\varepsilon_D=10\%$ であり, 繰返し載荷回数 $N=33$ 回で単調載荷へ移行した。図 6 から分かるように, 繰返し載荷過程において間隙水圧の上昇に伴う供試体の軟化が進行し, ひずみが累積している。また, 単調載荷過程で発揮した最大主応力差 $(\sigma_a-\sigma_r)_{maxD}$ は非排水繰返し載荷によって純単調試験よりも小さくなっている。以下で, このようなデータから強度低下モデルを策定する具体的な手順を説明する。

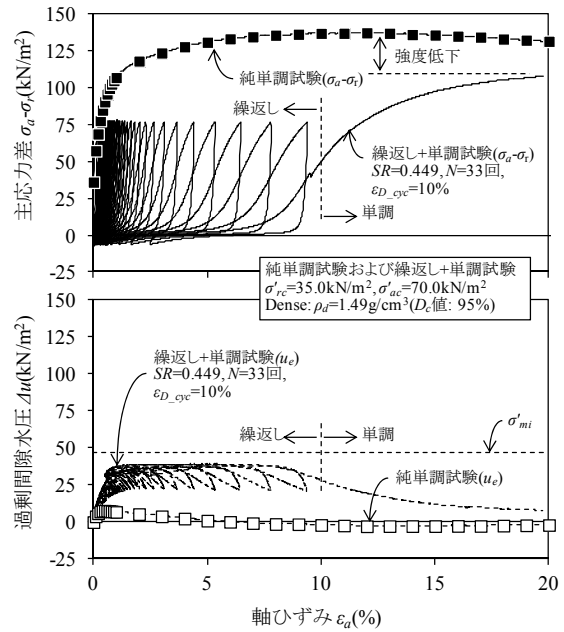


図 6 繰返し+単調試験結果 ($SR=0.449$, $\varepsilon_D=10\%$, $N=33$ 回)

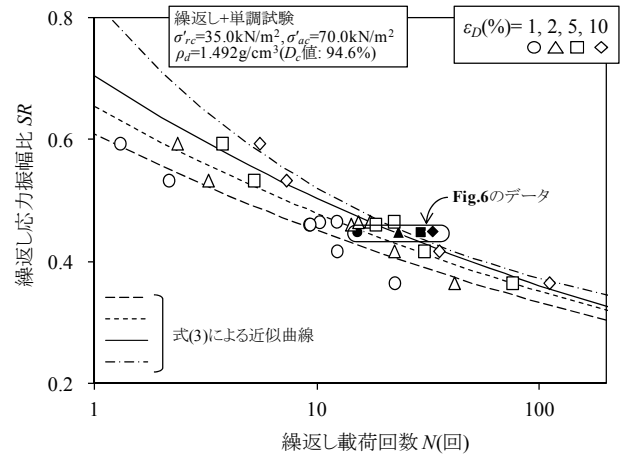


図 7 損傷ひずみ 1, 2, 5, 10% に対する繰返し応力振幅比と繰返し回数
の関係

4.1 各損傷ひずみに対する繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数の関係に関するパラメータ算出

図 6 の繰返し載荷過程のデータから, 損傷ひずみ $\varepsilon_D=1, 2, 5, 10\%$ に達するまでに要する繰返し載荷回数 N を読み取ると, それぞれ 15, 23, 29, 33 回となる。これらを繰返し応力振幅比 $SR=0.449$ に対してプロットすると図 7 の黒塗りデータポイントになる。すなわち, 1 回の試験で同一繰返し応力振幅比における異なる損傷ひずみに対するプロットが得られる。表 1 の「実験 No.04-07」に示すように, 異なる繰返し応力振幅比を用いた一連の繰返し+単調試験を実施し, 同様の手順で繰返し応力振幅比と繰返し載荷回数をプロットすると白抜きのデータポイント群となる。

図 7 での○および●のデータポイント群は損傷ひずみ $\varepsilon_D=1\%$ に対する繰返し応力振幅比 SR と繰返し載荷回数 N の関係である。この関係を式(3)で近似することにより, 任意の大きさの繰返し応力振幅比で 1% の損傷ひずみが生じるまでに要する繰返し載荷回数を推定できる。

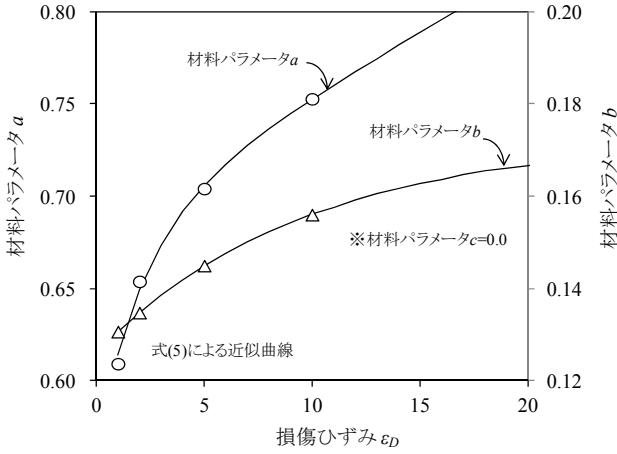


図 8 式(3)による材料パラメータ a, b, c と損傷ひずみの関係の近似

$$SR = a_{(\varepsilon_D)} \cdot N^{-b_{(\varepsilon_D)}} + c_{(\varepsilon_D)} \quad (3)$$

SR : 繰返し応力振幅比 ($SR = \tau / (\sigma'_{mi})$), τ : せん断応力 (kN/m^2), σ'_{mi} : せん断開始時の平均有効主応力 (kN/m^2), N : 繰返し回数 (回), $a_{(\varepsilon_D)}$, $b_{(\varepsilon_D)}$ および $c_{(\varepsilon_D)}$: 損傷ひずみ ε_D 毎に求まる材料パラメータ, である。

図 7 に損傷ひずみ $\varepsilon_D = 1, 2, 5, 10\%$ に対する式(3)による近似曲線を示す。

次に, 式(3)による近似から得られた材料パラメータ $a_{(\varepsilon_D)}$, $b_{(\varepsilon_D)}$ および $c_{(\varepsilon_D)}$ を損傷ひずみ $\varepsilon_D = 1, 2, 5, 10\%$ に対してプロットする (図 8)。損傷ひずみは繰返し载荷に伴って連続的に増加することから, 材料パラメータ $a_{(\varepsilon_D)}$, $b_{(\varepsilon_D)}$ および $c_{(\varepsilon_D)}$ と損傷ひずみの関係を式(4)-(7)のいずれかの関数で近似し, 任意の損傷ひずみに対して材料パラメータ a, b, c を推定できるようにする。

$$a_{or} b_{or} c = A_0 + \sum_{i=1}^7 A_i \cdot (\varepsilon_D)^i \quad (4)$$

$$a_{or} b_{or} c = A_0 + A_1 \cdot [1 - e^{-\varepsilon_D / A_2}] + A_3 \cdot [1 - e^{-\varepsilon_D / A_4}] \quad (5)$$

$$a_{or} b_{or} c = A_0 + A_1 \cdot [1 - e^{-(\varepsilon_D / A_2)^{A_3}}] + A_4 \cdot [1 - e^{-(\varepsilon_D / A_5)^{A_6}}] \quad (6)$$

$$a_{or} b_{or} c = A_0 + A_1 \cdot e^{A_2 \cdot (\varepsilon_D)^{A_3}} \quad (7)$$

ここに, A_0-A_7 : 材料パラメータである。

地震動による不規則な繰返し荷重が作用した時に発生する損傷ひずみ ε_D の大きさは, 図 8 に示した材料パラメータ a, b, c と損傷ひずみの関係に累積損傷度理論を適用して求められる。すなわち,

- 1) 繰返し応力振幅比 SR_i の一様振幅繰返し载荷によって, 繰返し回数が N_i である損傷ひずみ ε_D^* が生じたとする。
- 2) 任意の不規則繰返し载荷履歴の途中の任意のパルスによって生じる ε_D^* に対する損傷度 D_i は, そのパルスの前の繰返し载荷履歴の不規則性に関わらず, $1/N_i$ である。
- 3) SR_i が異なるパルスの N_i は, 同一の「一様振幅繰返し载荷によって得られた $SR \sim N$ 関係」によって得られる。
- 4) その不規則繰返し载荷で時刻 t の時点における累積損

傷度 $D(t)$:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n D_i \quad (8)$$

が 1.0 になったとき, 損傷ひずみ ε_D^* が生じる。図 7 に示す関係を式(3)で表した場合, 式(8)は式(9)となる。

$$D(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{SR_i - c_{(\varepsilon_D)}}{a_{(\varepsilon_D)}} \right]^{\frac{1}{b_{(\varepsilon_D)}}} \quad (9)$$

n : 時刻 t までに生じる不規則な繰返し荷重履歴のパルス数 (回), SR_i : i 番目に生じるパルスの繰返し応力振幅比, $a_{(\varepsilon_D)}$, $b_{(\varepsilon_D)}$ および $c_{(\varepsilon_D)}$: 図 8 から得られる材料パラメータ, である。

したがって, 時刻 t の時点における損傷ひずみ ε_D の値は, 時刻 t に $D(t) = 1.0$ を満足する損傷ひずみを探索することによって求められる。

修正ニューマーク-D 法の解析プログラムには, 式(3)の材料パラメータ a, b, c と損傷ひずみ ε_D の関係を式(4)-(7)のいずれかで近似した際の材料パラメータ A_0-A_7 を入力する。

4.2 非排水繰返し载荷によって生じる損傷ひずみと損傷強度の関係に関するパラメータ算出

図 6 の例では, 繰返し载荷過程で生じた損傷ひずみ ε_D の値は 10%, 単調载荷過程で発揮した最大主応力差 ($\sigma_a - \sigma_r$) $_{maxD}$ は 107.4 kN/m^2 であった。この最大主応力差を図 3 に示す考え方による式(2)によって損傷内部摩擦角 φ_{cuD} に変換する。図 3 では, $c_{cuD}/c_{cu} = \tan \varphi_{cuD} / \tan \varphi_{cu}$ (c_{cu} と φ_{cu} は初期値) と仮定している。なお, 図 6 に示す非排水繰返し载荷で生じる過剰間隙水圧 Δu ~ 時間関係の包絡関係での値を Δu_d として, 損傷後の非排水単調载荷強度 (τ_f) $_{cuD}$ を式(10)で求めると著しく過小評価する。

$$(\tau_f)_{cuD} = c' + (\sigma'_c - \Delta u_d) \cdot \tan \varphi' \quad (10)$$

c' と φ' は有効応力で表した粘着力係数と内部摩擦角である。

図 9 での●データポイントは, 損傷ひずみ ε_D に対してプロットした損傷内部摩擦角 φ_{cuD} である。1 回の試験で損傷内部摩擦角と損傷ひずみのプロットが 1 つ得られる。繰返し载荷過程で生じる損傷ひずみを変化させた一連の繰返し+単調試験 (表 1 の「実験 No.08-11」) によって得られたのが□のデータポイントである。なお, 表 1 の「実験 No.04-07」では同じ損傷ひずみ 10% が生じているので, その損傷ひずみで複数のプロットが得られる (図 9 の▲, ■, ◆)。また, 損傷ひずみ 0% のプロットは純単調試験から求めた内部摩擦角 φ_{cu} である。この関係を式(11)で近似することにより, 非排水繰返し载荷に伴って増加してゆく任意の損傷ひずみの値に対する損傷内部摩擦角 φ_{cuD} ($^\circ$) を推定できる。

$$\varphi_{cuD} = C_1 \cdot e^{-(\varepsilon_D / t_1)^{d_1}} + C_2 \cdot e^{-(\varepsilon_D / t_2)^{d_2}} \quad (11)$$

$C_1, C_2, t_1, t_2, d_1, d_2$: 材料パラメータである。

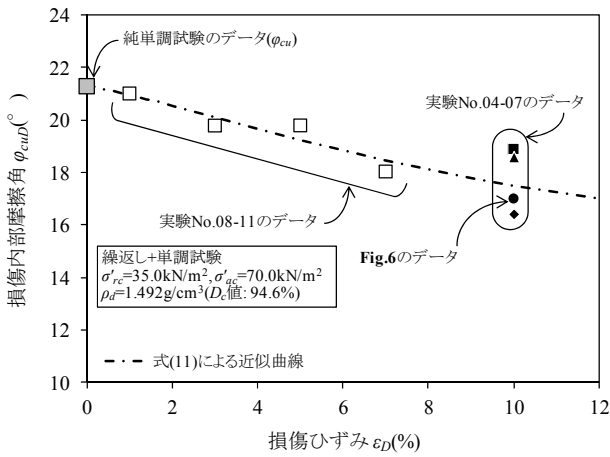


図 9 損傷内部摩擦角と損傷ひずみの関係

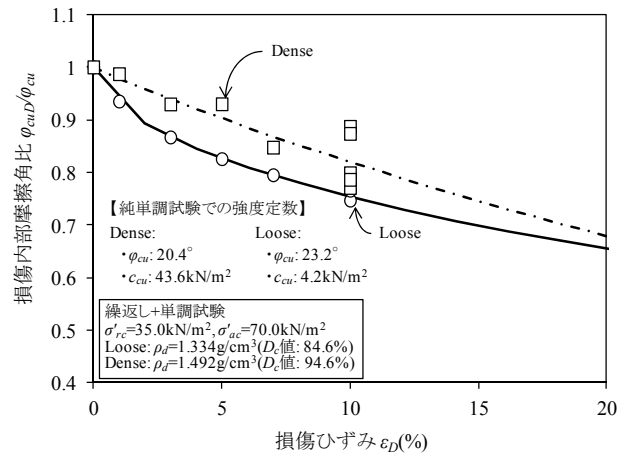


図 12 解析に用いた損傷内部摩擦角と損傷ひずみの関係

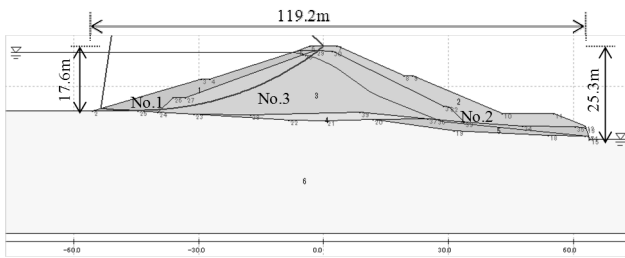


図 10 解析を行ったため池堤体断面図

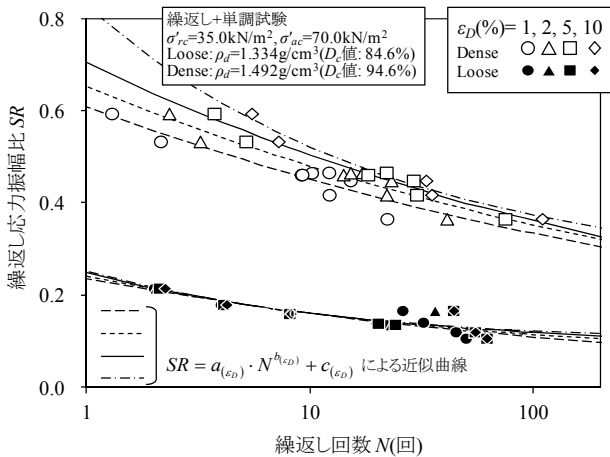


図 11 解析に用いた各損傷ひずみに対する繰返し応力振幅比と繰返し回数の関係

修正ニューマーク-D 法の解析プログラムには、損傷内部摩擦角 ϕ_{cud} と損傷ひずみ ϵ_D の関係を式(11)で近似した際の材料パラメータ $C_1, C_2, t_1, t_2, d_1, d_2$ を入力する。

5. 修正ニューマーク-D 法による解析例

図 10 に示す実際のため池堤体の断面を対象とした修正ニューマーク-D 法による解析例を以下に示す。解析は砂質土の緩詰め (Loose) および密詰め (Dense) 供試体から求めた強度定数 (内部摩擦角 ϕ_{cu} および粘着力 c_{cu}) および強度低下モデル (材料パラメータ A_0-A_7 および材料パラメータ $C_1, C_2, t_1, t_2, d_1, d_2$) を用いて実施した。図 11 に各損

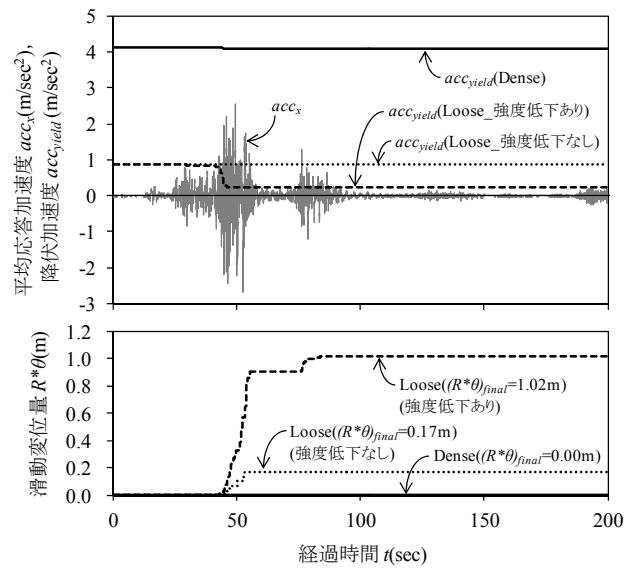


図 13 修正ニューマーク-D 法による解析結果

傷ひずみ ϵ_D に対する繰返し応力振幅比 SR と繰返し回数 N の関係を、図 12 に損傷内部摩擦角 ϕ_{cud} と損傷ひずみの関係を示す (ϕ_{cud} は純単調試験での内部摩擦角 ϕ_{cu} に対する比で表している)。なお、本解析例では強度定数および強度低下モデルと滑動変位量の関係を明確に示すために、図 10 の地層 No.1, 2, 3 に同一の強度定数および強度低下モデルを適用している。

図 13 に緩詰め (Loose) および密詰め (Dense) に対する滑動変位量の解析結果を示す。密詰めの場合は強度低下を生じる前の強度が高いことに加え、非排水繰返し载荷を受けてもほとんど強度低下を生じていない。そのため、降伏加速度は非常に高い値のまま維持されており、滑動変位量は 0.00m であった。一方、緩詰めの場合は強度低下を生じる前の強度が小さいことに加え、40 秒付近の主要動によって大きく強度低下を生じている。そのため、主要動付近で大きな滑動変位量が生じるとともに、70 秒付近の比較的小さな地震動によっても滑動変位量が増大し、最終的には約 1.02m に達している。密詰めと比較して緩詰めの滑

動変位量は非常に大きいことから、ため池の地震時安定性に対する締固めの効果は非常に高いことが分かる。

なお、図 13 には緩詰めに対して強度低下を生じないとした解析結果も併せて示している。強度が低下しない場合、全解析時間を通して初期強度を維持することから、70 秒付近の比較的小さな地震動による滑動変位量の増加はほとんどない。その結果、最終的な滑動変位量は約 0.17m であり、強度が低下する場合と比較して非常に小さくなっている。このように、強度低下の有無によって滑動変位量には大きな相違が生じることから、堤体材料が非排水繰返し载荷によって強度低下を生じる場合、滑動変位量の適切な算定には修正ニューマーク-D 法のように強度低下を考慮可能な手法を適用する必要がある。

6. まとめ

本報告では、筆者らが開発した修正ニューマーク-D 法による滑動変位量計算の際に必要な「堤体材料の非排水繰返し载荷に伴う強度低下特性」を得るための実験方法および強度低下モデルの策定法を説明した。また、緩詰めおよび密詰め供試体の強度低下モデルを用いた解析例を示した。

今回想定した条件での滑動変位量は、密詰めでは 0.00m、緩詰めでは 1.02m であった。このことから、締固めによる乾燥密度の増加はため池の地震時安定性に極めて有効であると言える。また、緩詰めに対して強度が低下しない場合でも解析を実施して、滑動変位量を比較した。その結果、強度低下を考慮しない場合の滑動変位量は考慮した場合と比較して非常に小さくなった。このことは、堤体材料が

非排水繰返し载荷によって強度低下を生じる場合、ため池の滑動変位量を適切に評価するには修正ニューマーク-D 法のように強度低下を考慮可能な手法を適用する必要があることを示している。

参考文献

- 1) 福島県農林水産部 (2013) (参照2013.12.26) : 農林水産分野における東日本大震災の記録 (発災から平成23年度末まで) (第1版), (オンライン), 入手先<http://www.cms.pref.fukushima.jp/download/1/99_ikkatsu.pdf>
- 2) 堀 俊和, 上野和広, 松島健一 (2012) : 平成23年度 (2011年) 東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策, 農村工学研究所技報, 第213号, 175-199.
- 3) 秋葉満寿次, 仙波秀男 (1941) : 秋田県男鹿地震とため池被害, 農業土木研究, 13(1), 31-59.
- 4) 谷 茂, 堀 俊和 (1998) : 日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究, 農業工学研究所報告, 37, 51-90.
- 5) 佐々木朋子, 島峰徹夫, 野澤伸一郎, 木村 勝, 長谷川浩夫, 龍岡文夫, 平川大貴 (2008) : 種々の条件での繰返し及び単調载荷における粗粒材の変形強度特性, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, 209-225.
- 6) DUTTINE Antoine, 龍岡文夫, 堀井克己, 毛利栄征 (2013) : ひずみ軟化と非排水繰返し载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, 1589-1590.
- 7) 矢崎澄雄, DUTTINE Antoine, 龍岡文夫, 毛利栄征 (2013) : 载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, 1591-1592.
- 8) 龍岡文夫, DUTTINE Antoine, 矢崎澄雄, 毛利栄征 (2014) : 非排水繰返し载荷による強度低下と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, 地盤工学会特別シンポジウム—東日本大震災を乗り越えて—, 5月14-15日.
- 9) 東京大学生産技術研究所 (1992) : 土の精密平面ひずみ変形・強度実験装置, 生研リーフレット, No.215.

Evaluation method of soil strength reduction by undrained cyclic loading and analysis of seismic sliding displacement by Newmark - D method

Kazuhiro UENO¹, Yoshiyuki MOHRI¹, Tadatsugu TANAKA², Fumio TATSUOKA³

1 National Institute for Rural Engineering

2 The Japan Association of Rural Solutions for Environmental Conservation and Resource Recycling

3 Department of Civil Engineering, Tokyo University of Science

Abstract

Seismic damage of irrigation pond dikes, such as sliding failure, occurs in upstream slopes more frequently than in downstream slopes, due largely to a large reduction of undrained strength of saturated soil by undrained cyclic loading. As this strength reduction is one of the main factors for serious seismic damage of irrigation pond dikes, to take into account this factor when evaluating the deformation by seismic loading, the authors developed Newmark - D method. In this paper, experimental procedures and modeling method of the strength reduction characteristics that are used in the evaluation of the sliding displacement by Newmark - D method are described. In addition, an example of analysis the sliding displacement of a typical irrigation pond dike by Newmark - D method is presented.

Key words: strength reduction, undrained cyclic loading, Newmark - D method