

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25871097

研究課題名(和文) ため池堤体の弾性波速度モニタリングを活用した耐震性評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation technique of seismic resistance for earth fill dam using elastic wave velocity monitoring

研究代表者

上野 和広 (UENO, Kazuhiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門施設工学研究領域・研究員

研究者番号：60560167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ため池堤体の耐震性評価を精度よく実施するには、小・中規模地震時における対象ため池の挙動をフィードバックし、大規模地震時の挙動を推測することが有効である。本研究では、ため池が地震動を受けた際に生じる堤体の弾性波速度変化に着目し、ため池堤体土が非排水繰返し載荷を受けた時の弾性波速度変化を詳細に求めた。その結果、同じ地震動を受けた場合、ため池堤体土の密度が低いほど弾性波速度の低下率が大きくなることが分かった。また、累積損傷度理論を用いて不規則な地震荷重が作用した時の弾性波速度の推定を試みた。

研究成果の概要(英文)：Considering the behavior of earth fill dams observed during small and medium scale earth quakes is effective to evaluate the seismic resistance of earth fill dams during large scale earth quakes with a high degree of accuracy. This study aimed to clarify the detail characteristics of change in the elastic wave velocity during undrained cyclic loading. As a result, it was clarified that the reduction ratio of elastic wave velocity become larger with a decrease in density of specimen. Furthermore, prediction of change in the elastic wave velocity during undrained cyclic loading when specimens subjected to irregular loading was attempted by using the cumulative damage concept.

研究分野：地盤工学

キーワード：非排水繰返し載荷 弾性波速度 乾燥密度 細粒分 不規則荷重 累積損傷度理論

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震によるため池の被害と耐震性

過去に生じた地震時には、天端の縦断クラックや上流側斜面のすべりなど、ため池の被害が報告されている。特に、2011年の東北地方太平洋沖地震では、福島県の藤沼貯水池が強大な地震動を受けて決壊し、多量の貯水が下流域に流出したことで甚大な被害を生じた。近い将来、南海・東南海地震の発生が懸念されており、ため池の耐震性評価および耐震性が不足するため池への対策は喫緊の課題となっている。我が国に存在するため池の多くは築造年代が古く、老朽化が進行しているため地震時に被害を生じる可能性が高い。また、築造あるいは改修に関するデータが残っていないため、その耐震性が明らかになっていない状況にある。

(2) ため池の耐震性評価法

2000年に土地改良事業設計指針「ため池整備」が制定されて以降、ため池の改修および築造時における耐震性評価は震度法により行われている。この方法は、堤体材料の強度定数を用いた円形すべり面スライス法による安定計算の際に、設計震度から算出した地震慣性力を作用させて安全率を算出するものである。強度定数はボーリングにより採取した材料の三軸試験から求めるのが一般的であり、その値はボーリングを行った時点および位置での強度定数を示している。したがって、小・中規模地震時にため池堤体の挙動が観測されたとしても、そのデータを耐震性評価へ活用することは困難であり、ため池堤体内での強度定数の分布を考慮することも不可能である。

(3) 弾性波速度を用いたため池の耐震性評価法

弾性波探査は、弾性波の波動を用いて地下構造を推定するものである。探査から得られる弾性波速度は、地盤の強度やせん断弾性係数などと密接な関係があり、ダム基礎地盤の評価などに用いられている。ため池堤体への適用事例も多く、堤体のN値分布の評価へ適用した結果が報告されている。弾性波探査の利点には、非破壊(微小ひずみ)状態で弾性波速度を求めるため、同一のため池に対して繰返し計測が可能(モニタリング)手法によってはボーリングを実施せずに堤体内の弾性波速度分布を計測可能(低コスト、物性値の分布を観測)が挙げられる。しかしながら、弾性波速度は微小ひずみ状態で求めた物性値であるため、破壊時には大ひずみにまで至る地震時挙動を弾性波速度から推定することは困難であるとの見方がある。

一方、近年ダムにおいて地震後に基礎-堤頂間の弾性波伝達速度が変化する観測結果が得られている。この現象は、耐震性評価の対象となる堤体そのものが、実際の地震動を受けて弾性波速度変化を生じたと捉えること

ができ、そうしたデータをフィードバックすることによって弾性波探査を用いたため池の耐震性評価が可能になると考えられる。そのためには、地震荷重の載荷に伴う堤体材料の弾性波速度変化を予め室内試験で詳細に求めておき、小・中規模地震の際に実際のため池で観測された弾性波速度の変化から、大規模地震時における弾性波速度の変化を推定する手法を構築する必要がある。

2. 研究の目的

ため池堤体の耐震性評価を精度よく実施するには、小・中規模地震時における対象ため池の挙動をフィードバックし、大規模地震時の挙動を推測することが有効である。

本研究では、ため池が地震動を受けた際に堤体の弾性波速度変化を生じることに着目する。室内試験により、地震荷重とため池堤体土の弾性波速度変化の関係を詳細に求める。それにより、対象ため池が地震動を受けた際に生じる堤体の弾性波速度変化を活用した耐震性評価手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 弾性波速度を測定する頻度および応力状態の設定

繰返し載荷試験中に弾性波速度を測定する試験の予備試験を実施し、繰返し載荷中における弾性波速度の変化傾向を把握する。その結果から、繰返し載荷に伴う弾性波速度変化を詳細に示すのに十分な弾性波速度の測定頻度を設定する。また、既往の研究では繰返し載荷試験中における弾性波速度は、荷重が圧縮側、伸張側、ゼロの時で異なることが示されている。そのため、予備試験の際には各種応力状態において弾性波速度を測定し、その結果から弾性波速度を測定する応力状態を設定する。

(2) 拘束圧依存性の解明

弾性波速度には拘束圧依存性があることが明らかにされている。拘束圧が繰返し載荷中における弾性波速度変化へ与える影響を明らかにするため、異なる拘束圧条件下において同一条件で作製した供試体の試験を実施し、その結果から試験で使用する拘束圧条件を設定する。

(3) 載荷速度依存性の解明

粘性土へ繰返し載荷を与える試験では、載荷速度が繰返し強度へ与える影響が明らかにされている。載荷速度が繰返し載荷中における弾性波速度変化へ与える影響を明らかにするため、異なる載荷速度条件下において同一条件で作製した供試体の試験を実施し、その結果から試験で使用する載荷速度を設定する。

(4) ため池堤体土の密度および物性が弾性波速度変化へ与える影響の解明

ため池堤体土の物性調査結果に基づき、堤体土として想定される材料を複数選定する。それらの材料を用いた繰返し載荷試験を実施し、材料の密度および物性の相違が繰返し載荷に伴う弾性波速度変化へ与える影響を明らかにする。

(5) 不規則荷重が弾性波速度変化へ与える影響の解明

実際のため池で観測された地震動および堤体の弾性波速度変化データを耐震性評価へフィードバックするため、地震動のような不規則荷重を与える繰返し載荷試験を実施する。その結果を規則的な荷重を与えた試験結果と比較することで、不規則な荷重が弾性波速度変化へ与える影響を解明する。

(6) 弾性波速度変化の観測データを活用した耐震性評価手法の開発

繰返し載荷試験結果を整理し、ため池堤体材料の物性および密度から繰返し載荷に伴う弾性波速度変化を推定する標準劣化モデルを作成する。それにより、実際のため池における地震動および弾性波速度変化の観測データを活用したため池の耐震性評価手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 弾性波速度を測定する頻度および応力状態について

図1に予備試験で実施した非排水繰返しせん断試験の結果の例を示す。図中の SR ($=\sigma_d/(2\sigma'_{mi})$): 繰返し応力振幅比、 $\Delta u/\sigma'_{mi}$: 過剰間隙水圧比、 ε_a : 軸ひずみ、 G ($=\rho_s \cdot V_s^2/1000$): せん断弾性係数、 V_s : せん断波速度(弾性波速度)であり、せん断波速度(弾性波速度)を G に変換して表示している。また、 σ_d : 繰返し軸差応力の片振幅、 σ'_{mi} : 繰返し載荷直前の平均有効主応力、 Δu : 過剰間隙水圧である。予備試験の結果から以下のことが分かった。

非排水繰返し載荷回数が増加するに伴って負のダイラタンスに起因した $\Delta u/\sigma'_{mi}$ の上昇が生じ、有効拘束圧が減少する。非排水繰返し載荷中の G の値は $\Delta u/\sigma'_{mi}$ の変化に対応し、増減を繰返しながら低下する。

繰返し載荷初期の G の低下は等方応力状態よりもせん断力が作用している圧縮および伸張状態で大きくなる。

繰返し載荷1波につき8回のせん断波速度(弾性波速度)の計測を行うことにより、繰返し載荷中のせん断波速度(弾性波速度)の変化を詳細に把握することができる。

(2) 拘束圧依存性について

図2に拘束圧(繰返し載荷直前の平均有効主応力 σ'_{mi}) が異なる試験の G と σ'_{mi} の関係を示す。 G は間隙比の関数 $f(e)$ で正規化してい

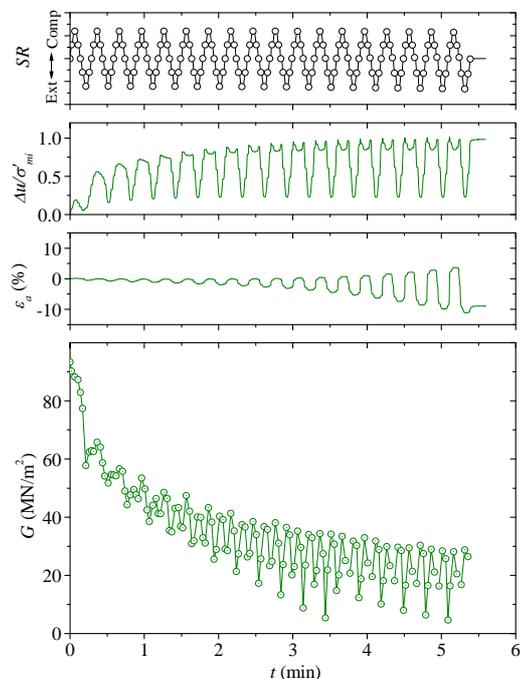


図1 非排水繰返し載荷中の SR 、 $\Delta u/\sigma'_{mi}$ 、 ε_a および G の変化

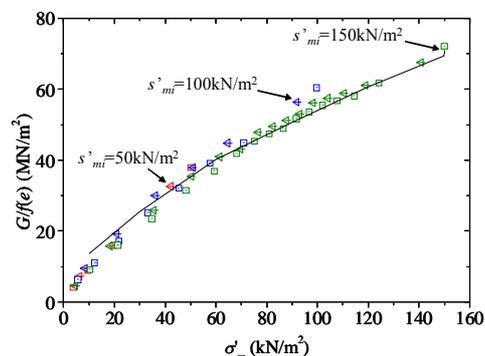


図2 非排水繰返し載荷中の G と σ'_{mi} の関係 (等方応力状態)

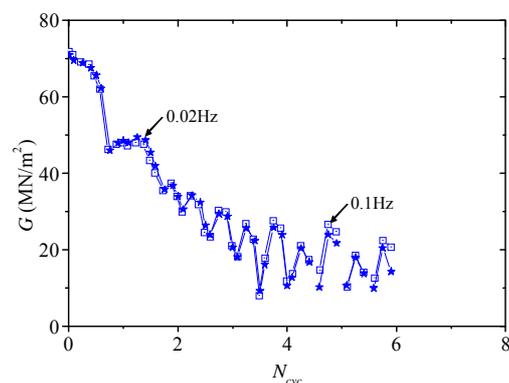


図3 載荷速度が異なる試験の G と N_{cyc} の関係

る。圧密時と同じ等方応力状態の場合、 σ'_{mi} が異なっても σ'_{mi} と G の関係はほぼ同一であることが分かった。ただし、せん断力が作用している圧縮および伸張応力状態では、後述するように等方応力状態より G は小さ

くなった。

(3) 荷重速度依存性について

図 3 に荷重速度が異なる試験 (荷重周波数 = 0.1Hz および 0.02Hz) の G と繰返し荷重回数 N_{cyc} の関係を示す。荷重周波数が 5 倍異なる場合でも、繰返し荷重に伴う G の低下傾向は同一であった。これにより、非排水繰返し荷重中における G の低下に対する荷重速度依存性が小さいことが分かった。

上記(1)~(3)の予備試験の結果により、本試験で実施する試験条件を以下のように定めた。

非排水繰返し荷重中のせん断波速度 (弾性波速度) の測定頻度 : 繰返し荷重 1 波中 8 回の計測。

拘束圧 : $\sigma'_m = 100 \text{ kN/m}^2$ 。

荷重速度 (荷重周波数) : 0.1Hz

(4) ため池堤体土の密度および物性が弾性波速度変化へ与える影響について

図 4 に密度が異なる (Loose ~ Dense) 試験の G の継時変化を示す。この結果から以下のことが分かった。

繰返し荷重中の G の値は密度によらず繰返し荷重に伴って減少する。

密度が小さな Loose では、小さな増減を繰返しながら緩やかに低下し、その後急激に減少する。 G が急減する直前の値は約 29 MN/m^2 であり、繰返し荷重直前の値 ($G_{ln} = 58.5 \text{ MN/m}^2$) に対して約 50% の減少率であった。

密度が大きな Dense の場合は、 G は繰返し荷重直後に大きく (約 35%) 減少した後、大きな増減を繰返しながら徐々に減少し、Loose で見られたような G の急激な低下は生じない。 G が $G_{ln} = 93.3 \text{ MN/m}^2$ に対して約 50% の減少率に達した後も大きな増減を繰返しながら緩やかに減少した。

この G の変化は $\Delta u / \sigma'_{mi}$ の変化に対応していたことから、密度が大きな Dense では荷重に伴って間隙水圧が減少して有効拘束圧が回復する現象 (Cyclic mobility) が顕著になり、 G が緩やかに減少したと考えられる。

図 5 に G が 50% 低下するのに要する SR と N_{cyc} の関係を示す。同じ SR で同じ G の低下を生じるのに要する N_{cyc} は密度が大きくなるほど多くなった。これより、同じ地震動を受けた時、ため池堤体土の密度が低いほど G の低下率が大きくなり、より不安定になることが分かった。

図 6 に試料の細粒含有率 F_c が異なる ($F_c = 13.6\%$ 、 23.1%) 試料を用いた試験の G の継時変化を示す。両試料の G の低下傾向は類似している。本研究で用いた試料の物性の範囲では、物性が繰返し荷重中の G の変化に与える明確な影響は確認されなかった。

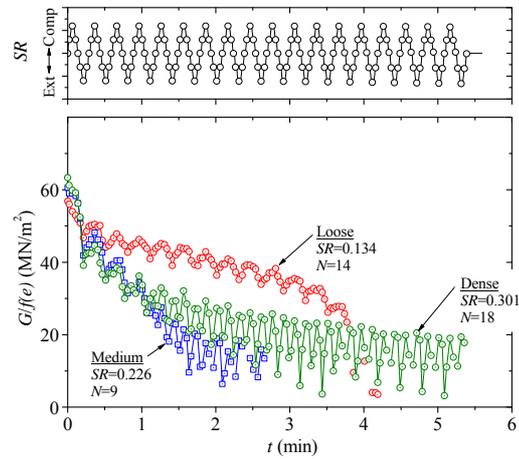


図 4 非排水繰返し荷重中の G の継時変化 (Loose ~ Dense)

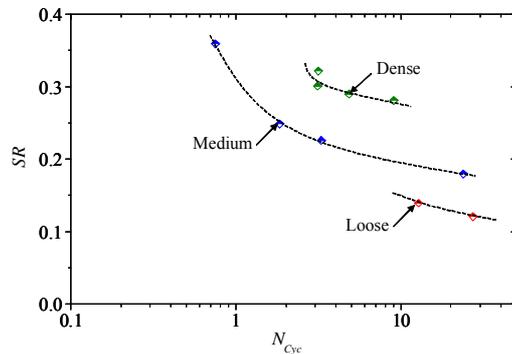


図 5 G が 50% 低下するのに要する SR と N_{cyc} の関係

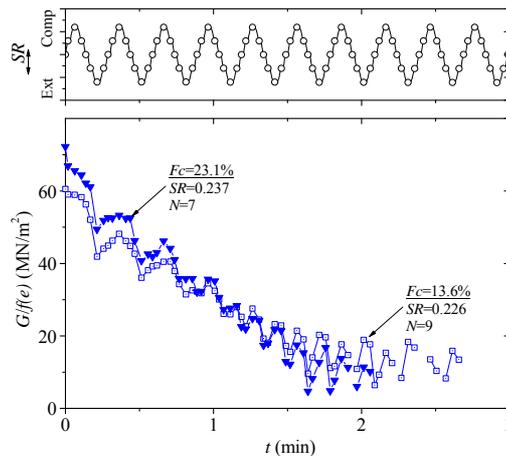


図 6 非排水繰返し荷重中の G の継時変化 ($F_c = 13.6\%$ 、 23.1%)

(5) 不規則荷重が弾性波速度変化へ与える影響について

図 7 に阪神・淡路大震災で観測された不規則な地震波形を対象に実施した試験の G の継時変化を示す (図 7 の Observed)。図 7 の SR の波形では、 G は試験開始から約 0.5 秒後の比較的大きな SR によって大きく低下した後、1.5 秒経過するまでの間に徐々に低下し、その後は横ばいであった。実験により得られた G の変化と、規則的な sin 波を用いた試験結果 (図 1 ~ 6) に累積損傷度理論を適用

して計算した G の変化 (図 7 の Calculated) を比較すると、繰返し荷回数に累積に伴う G の変化傾向は類似したものとなった。しかしながら、実験により得られた値 (Observed) と累積損傷度理論による計算値 (Calculated) の値そのものを比較すると、両者には差が残されたため、精度の高い推定のためには更なる検討が必要である。

(6) 弾性波速度変化の観測データを活用した耐震性評価手法について

当初の目標では、非排水繰返し荷による G の変化傾向をため池堤体土の密度や物性で類型化し、地震時の G の変化を推定するモデルを作成することとしていた。しかしながら、繰返し荷に伴う G の変化傾向が想定していたよりも複雑であったため、本研究期間中にモデルを作成するまでには至らなかった。ただし、密度と物性に応じた G の変化傾向に関する基本的な傾向は把握することができたため、今後のデータの蓄積と分析によりモデルを作成できると考えられる。

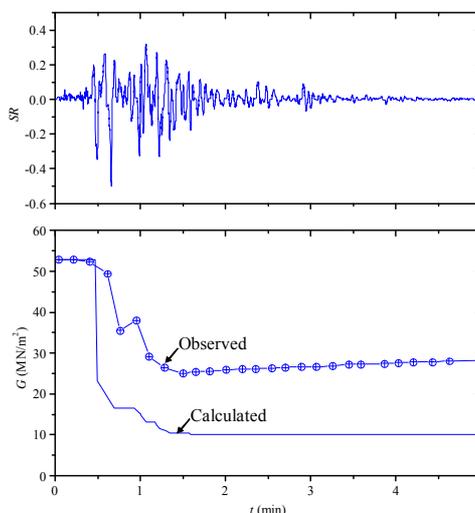


図 7 不規則な荷重を用いた非排水繰返し荷中の G の継時変化

5 . 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

上野 和広、非排水繰返し荷による土の損傷とせん断波伝播速度の変化の関係、第 12 回地盤工学会関東支部発表会、2015.10.09、日本科学未来館 (東京都江東区)

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

上野 和広 (UENO, Kazuhiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門施設工学研究領域・研究員

研究者番号 : 60560167