

令和元年6月14日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21610

研究課題名(和文) ため池堤体の被災履歴を考慮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 capacity for earth dam considering loading history

研究代表者

上野 和広 (UENO, Kazuhiro)

島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教

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は、供用期間中に経験する地震の被災履歴に伴って低下・回復を繰り返しながら変動する可能性が高い。本研究では、地震動を模擬した繰返し載荷履歴と、土の動的強度の変化特性の関係を室内試験により求めた。その結果、過去の繰返し載荷履歴で生じたひずみと、直前の繰返し載荷で生じたひずみの大小関係によって、動的強度が増加あるいは低下することが示された。また、この変動する動的強度とせん断波速度の相関関係を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、複数の繰返し載荷履歴の経験が土の動的強度に与える影響や、再圧密中の動的強度の変化傾向など、被災履歴に伴うため池堤体の耐震性の変化に影響を与える要因を明確化したことである。また、繰返し載荷履歴に伴って変化する動的強度と、ため池現地で観測可能なせん断波速度の相関関係を示した。これにより、せん断波速度を指標としたため池堤体の耐震性評価の高度化が期待でき、安全な農村環境の構築へ貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Seismic capacity of earth dams would be varied due to effects of loading histories such as damage to soil structure by earthquakes. To evaluate how multiple loading histories of pre-shearing strain of various magnitudes affect resistance against undrained cyclic loading of soil, multistage cyclic triaxial tests under undrained conditions were performed. When pre-shearing strain is less than 1%, the resistance increased as the loading stage progresses, whereas a large pre-shearing strain decreased the resistance. However, even upon imposing a large pre-shearing strain on a specimen, the resistance did not decrease if the specimen has already experienced a similar pre-shearing strain in a previous loading stage. On the other hand, it was confirmed that shear wave velocity of soil could be an index to evaluate the resistance of soil varying according to loading histories.

研究分野：地域環境工学・計画学

キーワード：繰返し載荷履歴 動的強度 ひずみ履歴 せん断波速度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 地震によるため池の被害と課題

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人的被害を含む甚大な被害が生じた。我が国に存在するため池の多くは老朽化が進行しており、大規模地震時に決壊などの被害を生じる危険性がある。近い将来、南海・東南海地震など大きな地震の発生が懸念されており、ため池堤体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。

(2) ため池堤体の耐震性評価

ため池堤体の耐震性には、堤体土の地震動に対する抵抗性（動的強度）が大きく影響する。動的強度は、ボーリングなどによりため池から採取した堤体土の非排水繰返し載荷試験から求められ、この値は堤体土を採取した時点の動的強度を示している。したがって、ため池が供用期間中に地震による被災履歴（複数の地震による地震荷重の大きさや、地震の発生間隔など。）を経験して堤体土の動的強度が変化したとしても、その影響を耐震性評価に取り入れることは困難である。

(3) 被災履歴を考慮することの重要性

非排水繰返し載荷試験を用いた既往の研究により、土質材料の動的強度はその乾燥密度が高いほど高くなることが明らかにされている¹⁾。しかしながら、土質材料が大きなひずみ履歴を受けた場合、その後の再圧密で乾燥密度が上昇するにも拘わらず、土の骨格構造の損傷によって動的強度は低下する²⁾。このことは、ため池堤体が供用期間中に地震動による損傷を経験した場合、堤体土の動的強度が小さくなり、その後の地震に対する耐震性が低下することを示唆している。一方、土質材料は堆積あるいは盛立後、継続する一定応力条件下で圧密によるクリープひずみが進行し、動的強度が継時的に増加することが確認されている³⁾。したがって、ため池堤体の耐震性は地震時の損傷による低下と、その後の再圧密過程での回復を繰返ししながら供用期間を通して変動する可能性が高い。しかしながら、一旦低下した動的強度の回復特性および複数の地震動の経験が動的強度に与える影響は明らかになっていないため、ため池堤体の耐震性の継時的な変動を把握することは困難である。ため池堤体の耐震性を精度良く評価するには、地震時の損傷およびその後の再圧密が堤体土の動的強度に与える影響を明らかにし（「被災履歴に応じた動的強度の変動推定モデル」の開発）、ため池の被災履歴を耐震性評価に取り入れる必要がある。

2. 研究の目的

土質材料の地震動に対する抵抗性（動的強度）が過去に経験したひずみ・応力履歴の影響を受けて増減することに着目し、ため池堤体の被災履歴を考慮した耐震性評価手法を開発する。土質材料を用いて築造されるため池堤体の耐震性は、供用期間中に経験する地震の被災履歴に伴って低下・回復を繰返ししながら変動する可能性が高い。この影響を考慮することで、ため池堤体の耐震性評価手法の信頼性が向上する。本研究では、室内試験により地震の被災履歴（複数の地震による地震荷重の大きさや、地震の発生間隔など。）と動的強度の低下・回復特性の関係を詳細に求める。それにより、「被災履歴に応じた動的強度の変動推定モデル」を開発し、供用期間中に変動するため池堤体土の動的強度に基づく耐震性評価手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 室内試験による被災履歴の付与方法

ため池堤体の被災履歴を考慮した耐震性評価手法を開発するには、被災履歴とため池堤体土の動的強度に関するデータを取得し、それらの相関関係を明確にする必要がある。複数の地震による被災履歴を模擬するため、多くの「繰返し載荷→再圧密」サイクルを供試体に与える非排水繰返し載荷試験（図1参照）を実施し、繰返し荷重の大きさや再圧密の継続時間が動的強度の低下・回復特性に与える影響を明らかにする。また、被災間隔（再圧密の継続時間）が長期に渡る条件で試験を実施する際には、浸潤線以下に存在するため池堤体土の状況を長期間保持できるように試験機の改良を行った上で試験を行う。

(2) 拘束圧依存性の解明

盛土構造物であるため池は堤体内の位置によって拘束圧が異なる。拘束圧が被災履歴に伴う動的強度の低下・回復特性に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成した供試体の試験を実施する。その結果から、被災履歴がため池堤体土の動的強度へ与える影響の拘束圧依存性を明らかにする。

(3) ため池堤体土の物性と密度による影響の

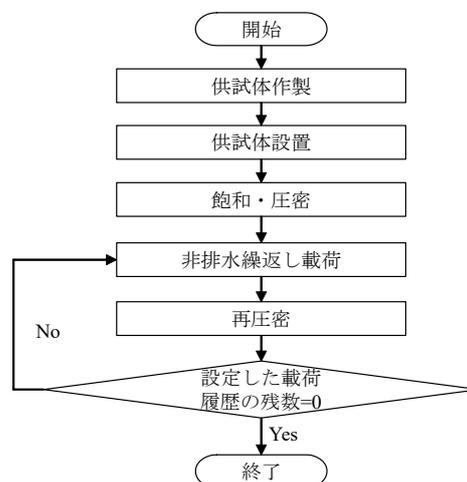


図-1 実験手順

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土質材料を複数（砂質土および粘性土）選定する。それらの土質材料を用いた非排水繰返し載荷試験を実施し、土質材料の物性の相違が被災履歴に伴う動的強度の低下・回復特性に与える影響を明らかにする。また、上記の土質材料を異なる密度に締固めた供試体を用いて非排水繰返し載荷試験を実施し、密度の相違が被災履歴に伴う動的強度の低下・回復特性に与える影響を明らかにする。

(4) 地震による被災の間隔による影響の解明

ため池が供用期間中に経験する複数の地震の時間間隔は一定でない。地震による被災の間隔が動的強度の低下・回復特性に与える影響を明らかにするため、非排水繰返し載荷後に行う再圧密で異なる継続時間を設定した試験を実施する。その結果から、地震時の損傷によって低下した土の動的強度がその後の再圧密過程で回復する際の時間依存性を明らかにする。

(5) 被災履歴に応じた動的強度の変動推定モデルの開発

土質材料の物性、密度および被災履歴を考慮した非排水繰返し載荷試験結果を分析し、地震動による損傷の履歴が動的強度の低下・回復特性に与える影響を明らかにする。この分析結果に基づき、供用期間中に変動する動的強度を推定するための「被災履歴に応じた動的強度の変動推定モデル」を開発する。

4. 研究成果

(1) 被災履歴に伴う動的強度の低下・回復特性に与える拘束圧、物性および密度の影響

図2に粒度分布を示す試料（鉾田砂および笠間土）を用い、被災履歴を考慮した非排水繰返し載荷試験を実施した。供試体は、最適含水比に調整した試料を直径5cm×高さ10cmのモールド内で所定の乾燥密度 ρ_d になるよう突固めて作製した。供試体をCO₂置換および脱気水の通水によって飽和を行い、背圧200kN/m²を作用させて飽和度を高めた後（B値0.95以上を確認）、拘束圧 $\sigma'_m=100\text{kN/m}^2$ で等方圧密を行った。圧密後に非排水条件にし、繰返し軸差応力 q を与えて非排水繰返し載荷を行った。繰返し軸差応力 q は、図3に示すように1波目の10kN/m²から徐々に応力振幅を増加させた。所定の両振幅軸ひずみ DA を生じるまで繰返し載荷を行った後、排水状態にして再圧密を行った。再圧密を6分間継続した後、再び非排水状態にして繰返し載荷を行った。この繰返し載荷→再圧密のサイクルを両振幅軸ひずみ $DA=0.1, 0.1, 0.5, 0.5, 1, 1, 2, 2, 5, 5, 10, 10\%$ に対して順に実施し、供試体へ繰返し載荷履歴を与えた。試験条件の一覧を表1に示す。

図4(a)および(b)に、圧密および繰返し載荷に伴う間隙比 e の変化を示す。圧密中の間隙比 e の変化は拘束圧 σ'_m に対して、繰返し載荷中の間隙比 e の変化は「過去の繰返し載荷で生じた最大両振幅軸ひずみ DA_h 」に対してプロットしている。繰返し載荷履歴を受けることによって供試体の間隙比 e は一貫して減少し、乾燥密度 ρ_d が高くなった。

図5に、繰返し載荷によって両振幅軸ひずみ $DA=0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10\%$ が生じるまでの繰返し載荷回数 N_{cyc} と間隙比 e の関係の一例（H85_100）を示す。なお、図5には繰返し載荷履歴を与えずに繰返し載荷を行った試験（NLH）の結果も併せて示す。既往の研究¹⁾と同様に、繰返し載荷履歴がない場合（NLH）の N_{cyc} は間隙比の減少とともに著しく大きくなった。しかしながら、繰返し載荷履歴がある場合（HL）は、ない場合（NHL）と比較して N_{cyc} の値が小さい。これは、土が繰返し載荷履歴を受けたことで、乾燥密度が高くなるにも拘わらず、土の骨格構造に損傷が生じ、動的強度が低下したためと考えられる。

次に、過去の繰返し載荷で生じ

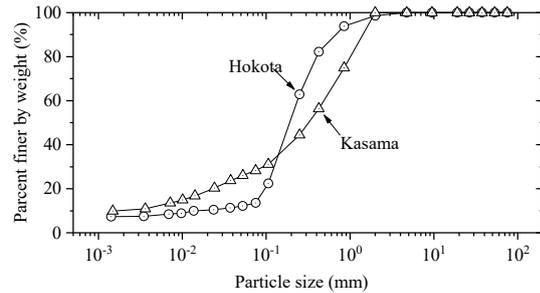


図2 試料の粒度分布

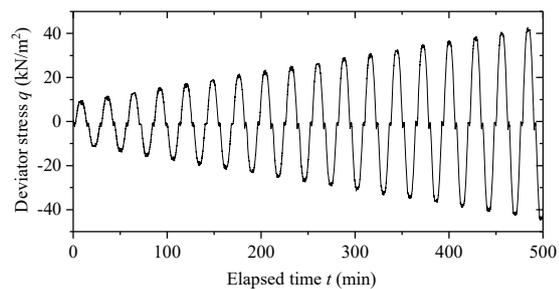


図3 繰返し軸差応力の経時変化

表1 実験条件

| 試験名 | 試料名 | 乾燥密度 ρ_d g/cm ³ | 締固め度* D_c (%) | 拘束圧 σ'_m kN/m ² |
|---------|-----|------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| H85_50 | 鉾田砂 | 1.45 | 85 | 50 |
| H85_100 | | | | 100 |
| H85_200 | | | | 200 |
| H95_100 | | 1.62 | 95 | 100 |
| K85_100 | 笠間土 | 1.29 | 85 | |
| K95_100 | | 1.44 | 95 | |

* 標準プロクターに対する締固め度

たひずみ履歴の大きさと、その経験回数による影響を評価するため、ある大きさの両振幅軸ひずみの履歴 DA_h の経験回数がゼロ ($N_h=0$) の時の N_{cyc} に対する、 $N_h=1, 2$ の時の N_{cyc} の比率 ($(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$) を求めた。図 6 に、 $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ と DA_h の関係を示す。なお、図 6 の $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ は、繰返し載荷で両振幅軸ひずみ $DA=0.5\%$ が生じるまでに要する繰返し載荷回数 N_{cyc} を用いて求めた。図 6 より、以下のことが分かる。

- ① DA_h が小さい (約 0.5%以下) 場合、繰返し載荷履歴を受けることで $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ が増加し、非排水繰返し載荷に対する抵抗性が上昇した。この上昇効果は、乾燥密度 ρ_d および拘束圧 σ'_m が大きいほど高い傾向にある。
- ② $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ は DA_h の増加とともに低下し、 $DA_h=1 \sim 2\%$ から $N_h=0$ での値を下回った。これは、大きなひずみ履歴により、土の骨格構造の損傷が大きくなり、非排水繰返し載荷に対する抵抗性が低下したためと考えられる。
- ③ $N_h=2$ の $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ は $N_h=1$ よりも大きく、この傾向は乾燥密度 ρ_d が小さいほど顕著である。これは、直前の繰返し載荷で生じたひずみが、過去に受けたひずみ履歴よりも小さい場合、土の骨格構造はほとんど損傷を受けないことを示している。
- ④ DA_h の増加に伴う $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ の低下は、乾燥密度 ρ_d が大きいほど大きくなる傾向にある。
- ⑤ 本研究の実験条件の範囲では、銚田砂と笠間土の $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0} \sim DA_h$ 関係に大きな相違は認められない。

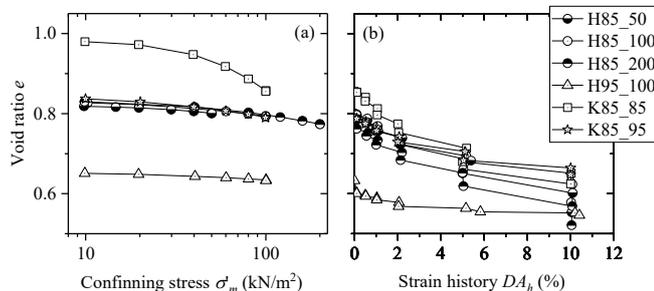
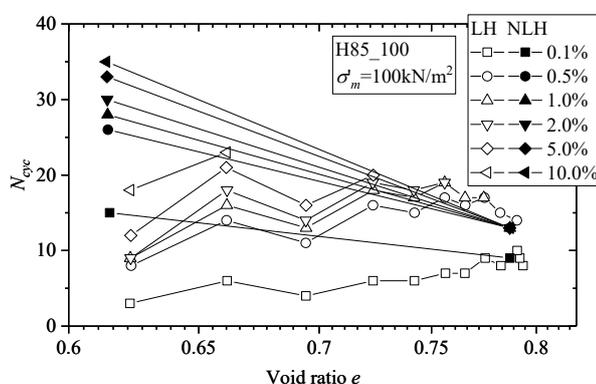


図 4 実験中の間隙比 e の変化



*繰返し載荷履歴：あり (LH)、なし (NLH)

図 5 N_{cyc} と間隙比 e の関係

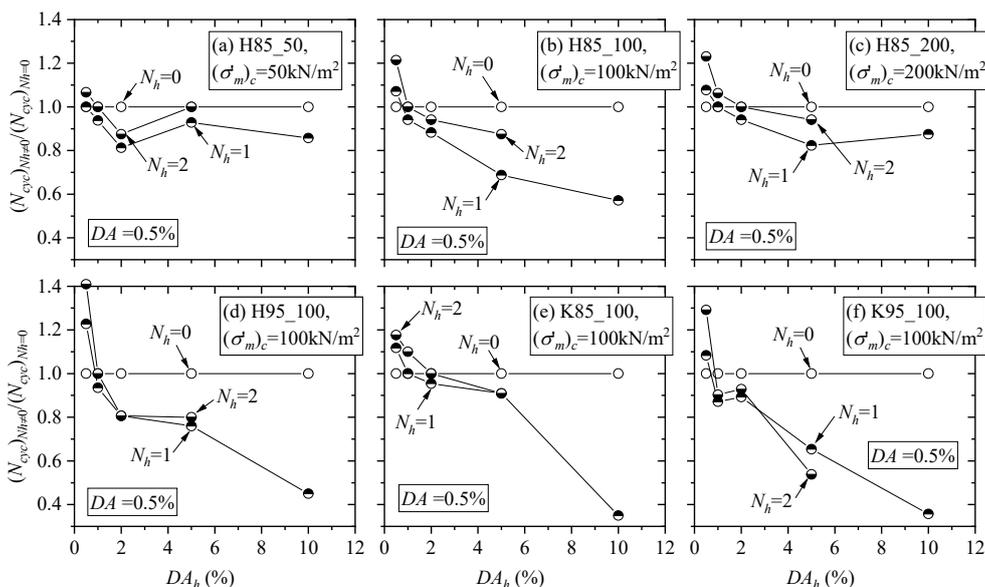


図 6 $(N_{cyc})_{N_h \neq 0} / (N_{cyc})_{N_h=0}$ と DA_h の関係

(2) 被災間隔による影響の解明と被災履歴に応じた動的強度の変動推定手法の開発

前節の検討により、過去の繰返し載荷履歴で生じたひずみと、直前の繰返し載荷で生じたひずみの大小関係によって、動的強度が増加あるいは低下することが示された。しかしながら、実際のため池堤体で過去に生じたひずみ履歴を把握することは不可能に近いので、この特性を

ため池堤体の耐震性評価へ組み込むのは困難である。本節では、実際のため池堤体で観測可能なせん断波速度に着目し、被災履歴に応じた動的強度の変動推定手法の開発について検討を行った。また、検討を行う際には、再圧密の継続時間に異なる条件を設定し、被災間隔の相違が動的強度の変動に与える影響についても検討した。

実験にはベンダーエレメント (BE) を備えた繰返し三軸試験機を用いた。供試体は最適含水比に調整した試料 (銚田砂) (粒度分布は図 2 を参照) を直径 5cm×高さ 10cm のモールド内で締め固め度が 95% となるように突固めて作製した。最適含水比と最大乾燥密度は標準プロクターに対する値である。供試体の乾燥密度 ρ_d を表 2 に示す。予備圧 10kPa の条件下で供試体を二重負圧法によって飽和し、背圧 200kPa を作用させて飽和度を高めた後 (B 値 0.95 以上を確認)、拘束圧 $\sigma'_m=100\text{kPa}$ で等方圧密を行った。3t 法による打ち切り時間を超過するまで等方圧密を継続した後、BE によるせん断波速度 V_s の測定を行った。せん断波速度を計測する際の印加電圧の周波数は 10kHz である。圧密後に非排水条件にし、載荷速度 1mm/min で繰返し軸差応力 q を与えて非排水繰返し載荷を行った。繰返し軸差応力 q は、図 7(a) に示すように 1 波目の 5kPa から徐々に応力振幅を増加させた。表 2 の Cyc_1 欄に示す値の両振幅軸ひずみ DA が生じるまで繰返し載荷を継続した後、排水状態にして表 2 の t_1 欄に示す時間が経過するまで再圧密を行った。再圧密が完了した後、再び非排水状態にしてせん断波速度の計測と 2 度目の繰返し載荷 (表 2 の Cyc_2 欄に示す値の DA が生じるまで継続) を行った。この繰返し載荷→再圧密のサイクルを表 2 の Cyc_3 が終了するまで実施し、供試体へ複数のひずみ履歴を与えた。なお、表 2 中の「-」は、その工程を省略したことを意味する。

図 7 に、圧密後の供試体へひずみ履歴を与えることなく繰返し載荷を実施した試験 (No.01) の繰返し軸差応力 q 、過剰間隙水圧比 $\Delta u/(\sigma'_m)_i$ および軸ひずみ ε_a の経時変化を示す。繰返し載荷を継続するに伴い、 $\Delta u/(\sigma'_m)_i$ と ε_a が増加し、最終的には両振幅軸ひずみ DA が 20% に達して試験を終了した。一連の実験では、全ての試験で同一の繰返し軸差応力 q を供試体へ与えたことから、所定の両振幅軸ひずみ DA が生じるまでの繰返し載荷回数 N_{cyc} が多いほど非排水繰返し載荷に対する抵抗性 (動的強度) が高いと評価した。

試験 No.20、40、80 は、 Cyc_1 の繰返し載荷で 2% のひずみ履歴を与えた供試体に対し、表 2 の t_1 の期間が経過するまで再圧密を行った後に繰返し載荷 (Cyc_2) を実施した試験である。図 8 に、繰返し載荷 (Cyc_2) で 5% の両振幅軸ひずみ DA を生じるまでに要した繰返し載荷回数 (N_{cyc})_{5%} と t_1 の関係を示す。図 8 には Cyc_2 の繰返し載荷を実施する直前に計測したせん断波速度 V_s の値も併せて示す。再圧密期間 t_1 が 1 日までの間、(N_{cyc})_{5%} は 66.5 回で変化しなかったの

表 2 実験条件

| No. | 圧密応力 (kPa) | 乾燥密度 (g/cm ³) | Cyc_1 (%) | t_1 (day) | Cyc_2 (%) | t_2 (day) | Cyc_3 (%) |
|-----|------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 01 | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 | - | - | - | - | 0.5 | - | - |
| 18 | - | - | - | 0.01 | 1.0 | 0.01 | - |
| 19 | - | - | - | - | 2.0 | - | - |
| 20 | - | - | - | - | 5.0 | - | - |
| 36 | - | - | - | - | - | - | - |
| 37 | 10, 20, | - | - | - | 0.5 | - | - |
| 38 | 40, 60, | 1.62 | 2.0 | 1 | 1.0 | 0.01 | 20 |
| 39 | 80, 100 | - | - | - | 2.0 | - | - |
| 40 | - | - | - | - | 5.0 | - | - |
| 76 | - | - | - | - | - | - | - |
| 77 | - | - | - | - | 0.5 | - | - |
| 78 | - | - | - | 20 | 1.0 | 0.01 | - |
| 79 | - | - | - | - | 2.0 | - | - |
| 80 | - | - | - | - | 5.0 | - | - |

* Cyc 欄：繰返し載荷で生じさせる両振幅軸ひずみ DA の値

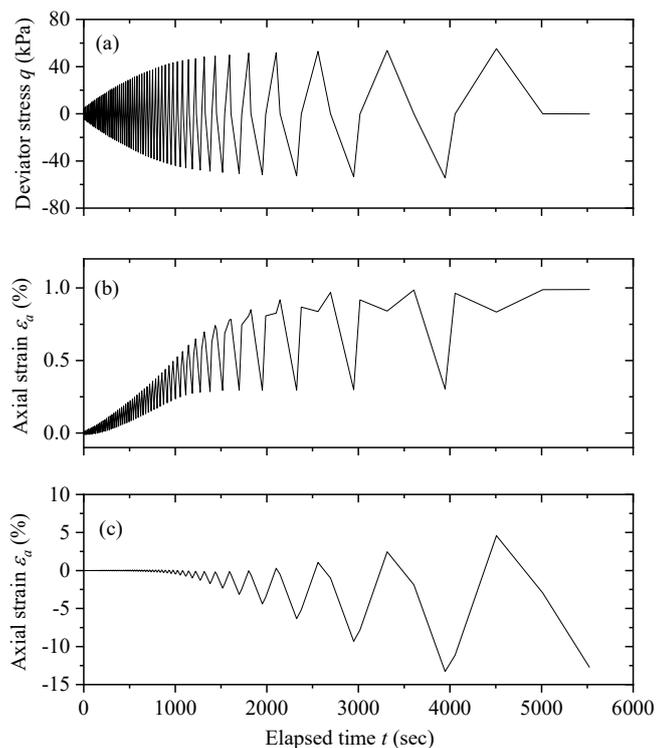


図 7 繰返し載荷中の q 、 $\Delta u/(\sigma'_m)_i$ 、 ε_a の経時変化

に対し、再圧密を 20 日間継続すると $(N_{cyc})_{5\%}$ は 71.5 回に増加した。これは、既往の研究³⁾で示されたように、圧密中にクリープひずみが進行し、動的強度が増加したためと考えられる。また、図 8 ではせん断波速度 V_s も再圧密時間の経過に伴って増加することを確認できる。

図 9 に、今回実施した試験で取得した $(N_{cyc})_{5\%}$ とせん断波速度 V_s の関係を示す。両者の間には多少のバラツキはあるものの、 V_s が大きいほど $(N_{cyc})_{5\%}$ が大きくなるのが分かる。このことは、ため池堤体土が地震動によって繰返し载荷を受けた時、発生したひずみ履歴に応じて変化する土の動的強度をせん断波速度 V_s から推定し、耐震性評価へ活用することの可能性を示している。

<引用文献>

- 1) Tatsuoka, F., Muramatsu, M. and Sasaki, T. (1982): Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear tests, *Soils and Foundation*, 22(2), 55-70.
- 2) Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J. (1970): Effect of strain history on liquefaction of sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.96, No.SM6, 1917-1934.
- 3) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. and T. B. S. Pradhan (1988): Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, 28(1), 119-131.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) Kazuhiro Ueno, Seiichiro Kuroda, Toshikazu Hori, Fumio Tatsuoka, Elastic shear modulus variations during undrained cyclic loading and subsequent reconsolidation of saturated sandy soil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 査読有, 116, 2019, 476-489.
- 2) F. Tatsuoka, T. Tanaka, K. Ueno, A. Duttine, Y. Mohri, Soil properties and seismic stability of old and new Fujinuma dams, *Validation of Dynamic Analyses of Dams and Their Equipment*, 査読有, 2018, 119-170.

[学会発表] (計 4 件)

- 1) 上野和広, 複数の繰返し载荷履歴を受けた土の動的強度とせん断波速度の関係, 第 73 回 農業農村工学会中国四国支部講演会, 2018.
- 2) 上野和広, 繰返し载荷履歴が土の非排水繰返し強度に与える影響, 第 72 回 農業農村工学会中国四国支部講演会, 2017.
- 3) 上野和広, 繰返し载荷履歴が砂質土の非排水繰返し強度に与える影響, 平成 28 年度 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2016.
- 4) Fumio TATSUOKA, Tadatsugu TANAKA, Kazuhiro UENO, Antoine DUTTINE, Yoshiyuki MOHRI, Soil properties and seismic stability of old and new Fujinuma dams, *JCOLD-CFBR Workshop, JFWS*, 2016.

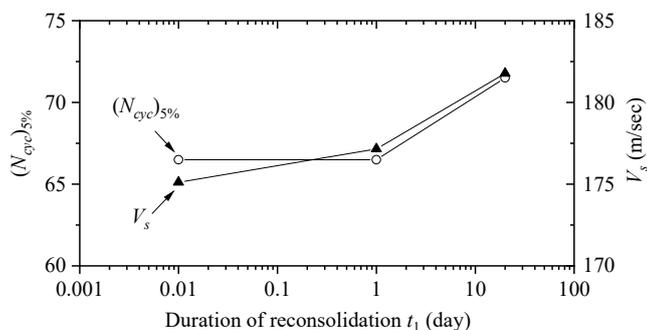


図 8 $(N_{cyc})_{5\%}$ および V_s と t_1 の関係

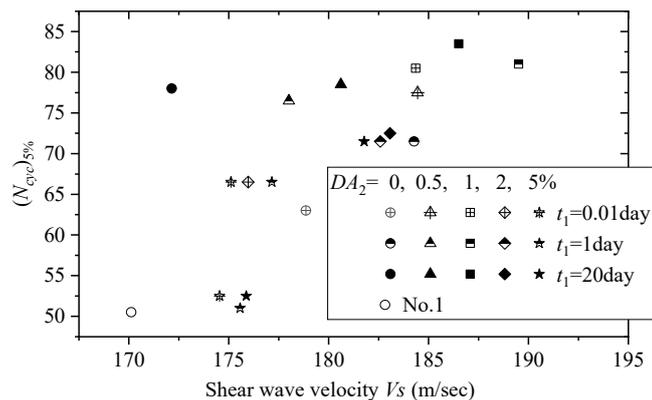


図 9 $(N_{cyc})_{5\%}$ と V_s の関係