

土質試験による地盤材料の減衰特性

Damping Characteristics of Geomaterials in Laboratory Soil Tests

木 幡 行 宏*・龍 岡 文 夫*

スポット ティチャフォラスィンスクン**・董

軍***

Yukihiro KOHATA, Fumio TATSUOKA, Supot TEACHAVORASINSKUN and Joung DONG

一般に、地盤材料の減衰特性を表す履歴減衰係数 h にはひずみレベル依存性がみられる。また、室内土質試験で得られる h は、原地盤の地震の地震時応答から逆解析された値よりも大きすぎる場合があるとされている。本解説では、従来発表されてきた室内土質試験による減衰は、実験技術上に由来する測定誤差・精度の問題と地盤材料の本来の性質に関連した実験方法の問題から、原地盤の値を過大評価している可能性があることを示す。

1. はじめに

一般に、地盤材料は、0.001%以下の非常に微小なひずみレベルではきわめて弾性に近い挙動を示す (Tatsuoka and Shibuya, 1992, 龍岡ら, 1992)。しかし、厳密に言うとは完全な弾性体ではないので、繰返し載荷のもとでは、非常に小さな内部エネルギーが消費され、履歴減衰係数 h (図1) はゼロにはならない (Kim et al., 1991)。 h は、ひずみレベルが増加して応力-ひずみ関係が非線形になるに従って着実に大きくなる。このようなひずみレベル依存性がある h は、地盤・構造物の地震応答解析に必要な基本的パラメータである。室内土質試験による h の研究の歴史は非常に長いが、一般的に室内試験で求めた値は、原地盤の地震時の応答から逆解析された値よりも、大きすぎる場合があるとされて

いる (Tokimatsu et al., 1989)。

本解説では、従来発表されてきた繰返し三軸試験等の静的な繰返し載荷試験による減衰は、いくつかの理由によって原地盤の値を過大評価している可能性があることを示す。すなわち、実験技術上に由来する測定誤差・精度の問題と地盤材料の本来の性質に関連した実験方法の問題に分けて地盤材料の減衰特性について論じる。

2. 実験技術上の問題

2.1 三軸試験での測定システムの例と測定例

図2(a), (b)に、微小ひずみレベルからの地盤材料の変形特性を測定する目的で開発された小型および大型三軸試験機の模式図を示す。軸受けの微小な摩擦力でも測定された変形係数と履歴減衰係数 h (特に h) に誤差をおよぼすので、軸応力を測定するロードセルを三軸セル内

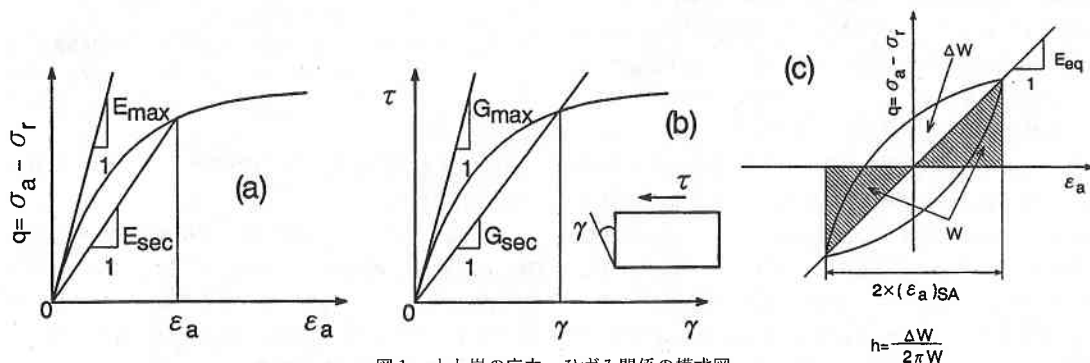


図1 土と岩の応力-ひずみ関係の模式図

*東京大学生産技術研究所 第5部

**大成建設技術研究所

***東急建設技術研究所

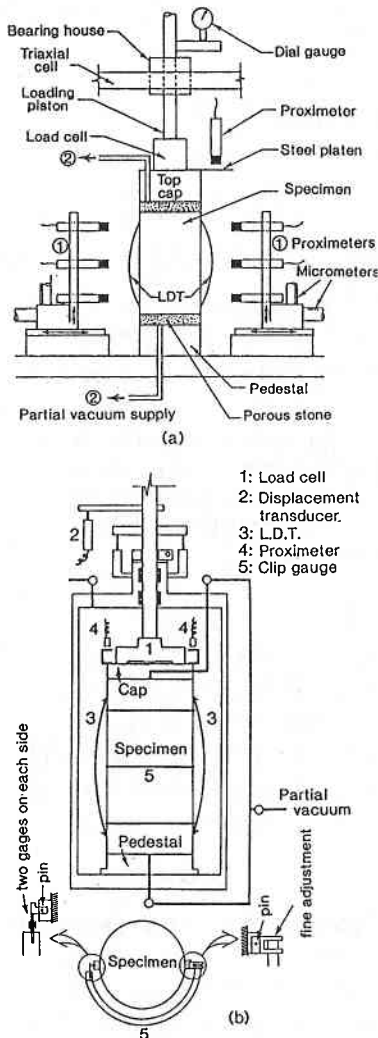


図 2(a), (b) 小型および大型三軸試験機の模式図

に設置するのは必須である (Kokusho, 1980)。また、供試体とキャップ・ペDESTALとの接触が完全でないと、キャップの動きから測定された軸ひずみは過大評価される。この誤差をベディングエラーと呼ぶが、ヤング率に対する影響が大きいことが知られている。本装置では、後藤 (Goto et al., 1991) が開発した局所変形測定装置 (Local Deformation Transducer, LDT) を用いて供試体側面で局所的に軸ひずみを測定する。キャップの軸変位を測定するのに用いているギャップセンサーは、大きな載荷速度に対する応答性が非常によい。図 3 は、ダミーサンプルを用いたベディングエラーが無い状態での LDT とギャップセンサーによる変位測定と比較であるが、これによると LDT もこの程度の載荷周波数での繰り返し載荷での測定にはまったく問題ないことがわかる。なお、この二つの装置では側圧一定の試験で供試体の半

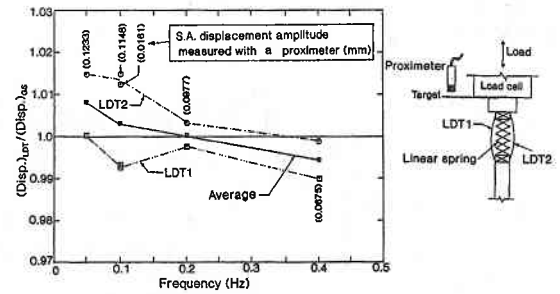


図 3 LDT とギャップセンサーによる変位測定と比較

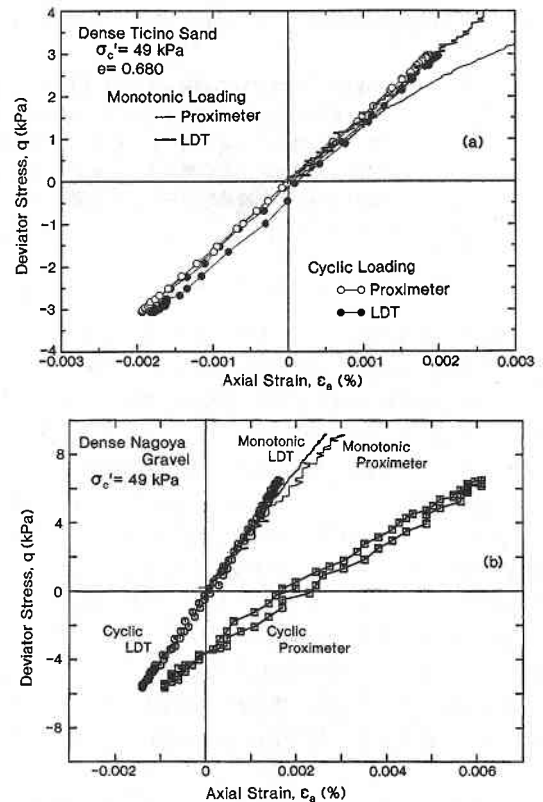


図 4(a), (b) 単調載荷三軸圧縮試験と繰り返し三軸試験による砂と礫の微小ひずみレベルでの応力-ひずみ関係の代表的結果

径の変化を厳密に測定する方法を用いているが、本解説ではこれには触れない。

図 4(a), (b) は、この装置を用いた単調載荷三軸圧縮試験と繰り返し三軸試験による砂と礫の微小ひずみレベルでの応力-ひずみ関係の代表的結果である。図 5 に、本解説で示す試験に用いた材料の粒径加積曲線を示す。

2.2 測定時の時間誤差の影響

応力とひずみの同時測定ができない場合は、正確な履歴減衰係数 h とは異なる見かけ上の値が得られる。このことを説明したのが図 6 である。図に示すように、今

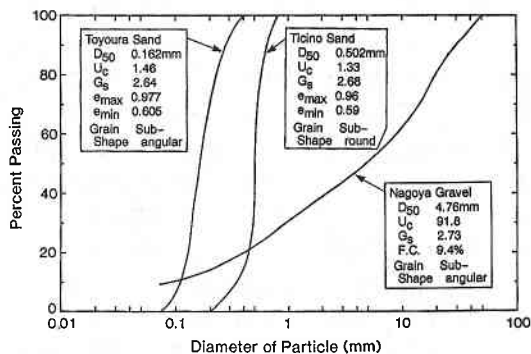


図5 試験で用いた試料の粒径加積曲線

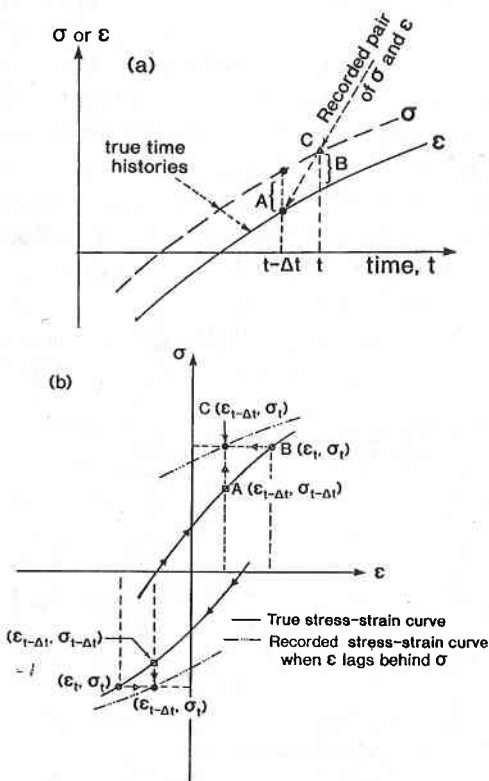


図6 ひずみが応力より遅れて記録された場合の、(a)応力 (or ひずみ)～時間関係 (b)応力～ひずみ関係

ひずみが応力に対して Δt だけ遅れて記録された時の時刻 $t - \Delta t$ (A点) と t (B点) の応力とひずみの組み合わせを考えると、その応力・ひずみは $\Delta \cdot \bullet$ (C点) となる。したがって、この場合には真の履歴ループに比べて膨らんだ形状となり、見かけの減衰率は大きくなる。すなわち、正確な履歴減衰係数 h を求めるためには、試験を実施する前に必ず測定系の時間誤差の検定を実施し、見かけの h の補正をする必要がある。図6より、ひずみが応力 (いずれも正弦波) に対して Δt だけ遅れ

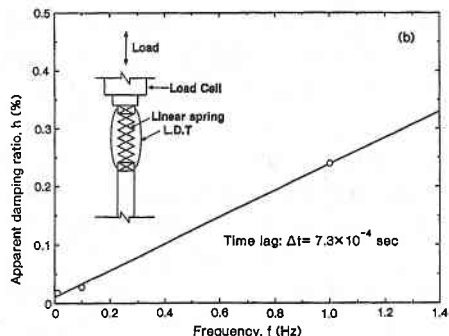
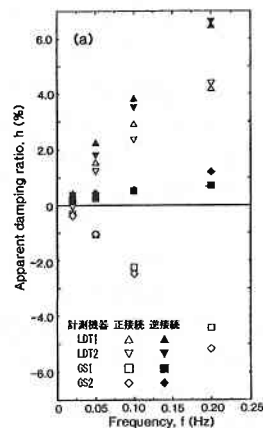


図7 履歴減衰係数～載荷周波数関係 (繰返し三軸試験)

(a)通常の A/D 変換ボードを用いた検定結果 (b)同時サンプリング A/D 変換ボードを用いた検定結果

て記録された場合の減衰率の補正式として次式が得られる。

$$h = h_{ap} - 1/2 \sin(2\pi f \cdot \Delta t)$$

ここで、 h : 真の履歴減衰係数、 h_{ap} : 実測の見かけの履歴減衰係数、 f : 載荷周波数

ここに示す実験では、ロードセル・ダイヤルゲージ・ギャップセンサーおよび LDT の各々の出力電圧をアンプによって増幅した後、パーソナルコンピュータ内の A/D 変換ボードによりデータを取り込んでいる。検定の際には、実際の試験とまったく同じ測定システム構成を用いて、同一のアンプの感度設定値 (減衰値, ATT 値), ローパスフィルター値, 載荷周波数を設定しなければならない。繰返し三軸試験装置の検定では、ダミー供試体として線形バネを用い、ねじりせん断試験装置の検定では減衰率がほとんどゼロと見せる直径 10～15mm のジュラルミン丸棒を使用する。入力波形は正弦波で、載荷周波数は最小二乗法によって検定直線を求めるため、少なくとも 3 種類以上 (たとえば, 0.01 Hz, 0.1 Hz, 1 Hz) を選択し、 h を求める。図 7(a), (b) に三軸試験における載荷周波数と測定された減衰率 h の関

係を示す。図 7(a)は、通常の A/D 変換ボードを、図 7(b)は同時サンプリング A/D 変換ボードを用いた結果である。図に示すように、載荷周波数の増加とともに減衰率も変化している。なお、図 7(a)において、正接続は CH. 1 にロードセル、それ以降に各種変位計を接続し、逆接続は各種変位計の後にロードセルを接続したことを示している。この測定システムでは、 $f=0.2\text{Hz}$ の実験では最大約 5% の補正が必要であることがわかる。この値は、土の減衰率からみると許容できない誤差である。図 7(b)の検定結果では、荷重と変位の時間誤差がわずか 0.00073 秒であるにもかかわらず、1 Hz で 0.23% の補正が必要であることがわかる。

2.3 ベディングエラー

図 8(a), (b)は、密および緩い豊浦砂に対して実施した繰り返し三軸試験による等価ヤング率 E_{eq} ・履歴減衰係数 h と軸ひずみ片振幅 $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係をそれぞれ示している（供試体上下端面はポーラスストーン）。図中、○・●は LDT, □・■はギャップセンサーによる測定から得られた結果である。通常、供試体の上下端面の不完全な接触のために、キャップの動きから測定された軸ひずみにはベディングエラーによる誤差が含まれ過大評価される。図に示すように、ベディングエラーの影響によりギャップセンサーで測定された E_{eq} (以下 $(E_{eq})_{GS}$) は LDT で測定された E_{eq} (以下 $(E_{eq})_{LDT}$)

より小さい。さらに、その差は密な豊浦砂の場合に顕著である。また、 h に対するベディングエラーの影響は、緩い豊浦砂では顕著な差は見られないが、密な豊浦砂ではギャップセンサーによる h (以下 h_{GS}) が LDT による h (以下 h_{LDT}) より大きな値を示している。図 9(a), (b)には、図中の ↓ で示すひずみレベルで 1200 回の繰り返し載荷履歴を与えた後に繰り返し三軸試験を実施した結果を図 8 と同様な関係で示した。この試験結果についても、 $(E_{eq})_{LDT}$ に比べて $(E_{eq})_{GS}$ は、ベディングエラーの影響により小さい値を示している。また、 h におよぼすベディングエラーの影響は、密な場合に顕著であり、ひずみレベルが 10^{-4} (0.01%) 付近で h_{GS} は h_{LDT} の約 2 倍程度大きな値を示している。さらに、緩い豊浦砂の場合でも 10^{-4} (0.01%) 以下では、 h_{LDT} に比べて h_{GS} は大きい。すなわち、この試験結果は、微小ひずみ領域においてはベディングエラーの影響により h が過大評価されることを示している。図 10 にはおのおのの試験に対して得られた h_{GS} と h_{LDT} の比較を示した。図中、virgin は圧密後に繰り返し三軸試験を、prestrained は圧密後にひずみ履歴を与え、その後に繰り返し三軸試験を実施した結果をそれぞれ示している。緩い砂ではベディングエラーの影響が明確ではないが、密な砂では明らかにベディングエラーの影響により $h_{GS} > h_{LDT}$ となっている。また、ひずみ履歴を与えるとさらにその影

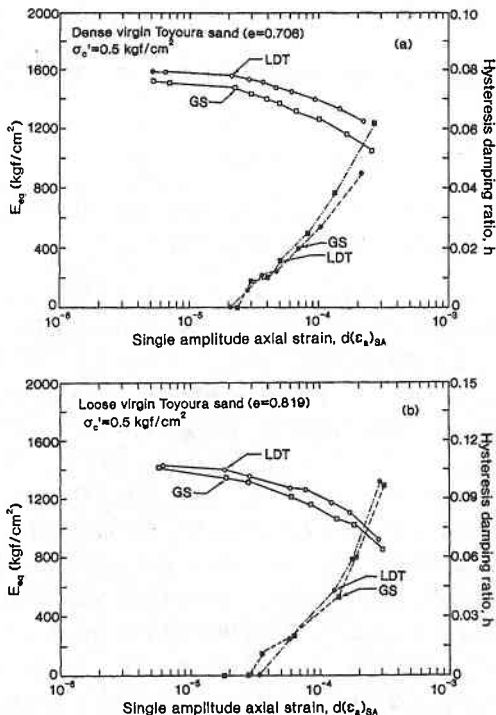


図 8 処女供試体の繰り返し三軸試験による E_{eq} および $h \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 (a)密な豊浦砂, (b)緩い豊浦砂

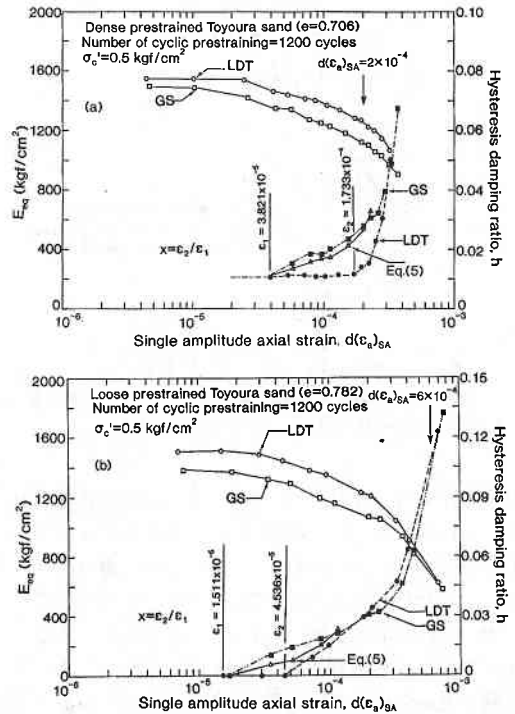


図 9 繰り返し載荷履歴を与えた供試体の E_{eq} および $h \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 (a)密な豊浦砂, (b)緩い豊浦砂

響は顕著になっている。

以下に、ベディングエラーの影響により $h_{GS} > h_{LDT}$ となることを理論的に検討する。いま、図11に示すような緩みがない部分を上下端面の緩み層で挟まれた二層系の供試体を考える（ただし、供試体高さを h 、上端面緩み層および下端面緩み層の高さをそれぞれ $ah/2$ とする）。この供試体で繰り返し三軸試験を実施すると、図12に示すような3つの異なる応力～ひずみループが得られると仮定する。すなわち、1) 緩み層の応力～ひずみループ A（測定できない）、2) 緩みがない部分の応力～ひずみループ B（LDT により測定）、3) 供試体全体の平均としての応力～ひずみループ C（ギャップセンサーにより測定）である。いま、供試体全体の平均として軸ひずみ片振幅を $\bar{\epsilon}_a$ 、偏差応力片振幅を q とすると、等価ヤング率は次式となる。

$$\bar{E}_{eq} (= (E_{eq})_{GS}) = q / \bar{\epsilon}_a \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\epsilon}_a$ は緩み層と緩みがない部分でのひずみから構成されているので、

$$\bar{\epsilon}_a = a(\epsilon_A) + (1-a)(\epsilon_B) = a(q/E_A) + (1-a)(q/E_B) \quad (2)$$

となる ($E_B = (E_{eq})_{LDT}$)。 (1), (2) 式より

$$\bar{E}_{eq} = E_B (1 / (aX + (1-a))) \quad (3)$$

を得る。ここで、 $X = E_B / E_A = \epsilon_A / \epsilon_B$

さらに、供試体全体としての減衰エネルギー $\Delta \bar{W}$ は、

$$\Delta \bar{W} = a \Delta W_A + (1-a) \Delta W_B \quad (4)$$

となる。定義より、 $h_A = \Delta W_A / (2\pi W_A)$ 、 $h_B = \Delta W_B / (2\pi W_B)$ 、 $W_A = \epsilon_A \cdot q$ 、 $W_B = \epsilon_B \cdot q$ であり、さらに、 $\bar{W} = aW_A + (1-a)W_B$ であるので、供試体全体の平均としての履歴減衰係数 \bar{h} は、

$$\begin{aligned} \bar{h} (= h_{GS}) &= \Delta \bar{W} / (2\pi \bar{W}) \\ &= (a \cdot 2\pi W_A h_A + (1-a) \cdot 2\pi W_B h_B) / (2\pi \{a \cdot W_A + (1-a) W_B\}) \\ &= (aX h_A + (1-a) h_B) / (aX + (1-a) h_B) \end{aligned} \quad (5)$$

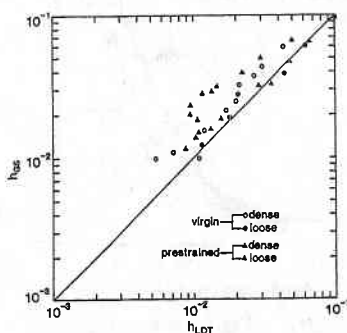


図10 砂の h_{GS} と h_{LDT} の比較

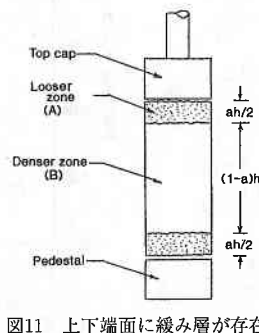


図11 上下端面に緩み層が存在する供試体の模式図

となる ($h_B = h_{LDT}$)。 (5) 式中、未知のパラメータは、 a 、 h_A 、および X である。

図9によれば $h_{LDT} (= h_B)$ は ϵ_2 から、 $h_{GS} (= \bar{h})$ は ϵ_1 から増加している。言い換えると ϵ_1 を測定した時点での緩み層でのひずみレベルは ϵ_2 であり、緩みがない部分でのひずみレベルは ϵ_B である。よって、次式が得られる。

$$\epsilon_1 = a(\epsilon_2) + (1-a)(\epsilon_B)$$

この測定時点では $\epsilon_A = \epsilon_2$ なので、

$$X = \epsilon_A / \epsilon_B = (\epsilon_2(1-a)) / (\epsilon_1 - a\epsilon_2) \quad (6)$$

となる。ここで、 a は非常に小さいと考えると、

$$X \approx \epsilon_2 / \epsilon_1$$

が得られる。ここで、 X はひずみレベルに依存せず一定であると仮定する。

また、(3) 式よりある応力レベルに対して、

$$a = ((E_B / \bar{E}_{eq}) - 1) / (X - 1)$$

を得る。図9(a), (b) に示す例では、それぞれ $a = 0.023$ 、 0.051 である。さらに、 ϵ_B が測定された時の h_A は $\epsilon_A (= X \cdot \epsilon_B)$ での h_{LDT} の値に等しい。

以上より、(5) 式によって $\epsilon_B = d(\epsilon_{AB})_{SA}$ 、 $h_B = h_{LDT}$ が測定された時の履歴減衰係数 $h_{GS} = \bar{h}$ の理論値が求められる。図9に(5) 式で求められる \bar{h} を Δ で示した。 \bar{h} は h_{GS} の測定値によく一致している。したがって、一般的に、ベディングエラーの影響により履歴減衰係数は過大評価されることがわかる。

3. 実験方法

3.1 繰り返し載荷履歴の影響

従来、減衰に及ぼす繰り返し載荷履歴の影響は主に共振法土質試験によって行われてきた (Drnevich et al., 1970, Thomann et al., 1992.)。Drnevich らは、数千回の繰り返し載荷履歴を与えた後のオタワ砂のせん断剛性率および履歴減衰係数は増加する傾向にあることを示し

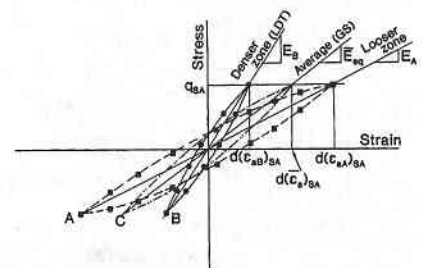


図12 図11に示す供試体から得られる応力～ひずみ関係の模式図

た。一方, Thomann らは繰り返し載荷履歴を与えた後の砂のせん断剛性率はわずかに減少することを示している。このように, 減衰に及ぼす繰り返し載荷履歴の影響に関する研究は未解明な部分が多い。本節では, 等方圧密後の繰り返し三軸試験 (VR 試験) 結果と, 等方圧密後に載荷周波数 0.5Hz, 軸ひずみ片振幅 (ϵ_a)_{SA} = 0.04% の繰り返し載荷履歴を 500 および 68,000 回与えた後の繰り返し三軸試験 (CP 試験) の結果を示す。なお, 繰り返し三軸試験は載荷周波数 0.1Hz で, 一定の偏差応力片振幅を 15 波与えるステージ試験で行った。図 13(a), (b) は, 密な豊浦砂と Ticino 砂に対して実施した VR, CP 試験の 15 波目の履歴ループを示している。繰り返し載荷履歴を与えると履歴曲線のピークとピークとの傾きはあまり変わらないが, 履歴ループの面積は大きく減少していくことがわかる。図 14(a)~(c) には, 軸ひずみ片振幅 (LDT による) と履歴減衰係数の関係を示した。図 13(a), (b) での履歴曲線に対応するデータポイントを記号 a~f で示した。密な豊浦砂および Ticino 砂で繰り返し載荷履歴の増加とともに h は減少していることがわかる。さらに, VR 試験結果では 0.001% (10^{-5}) 程度のひずみレベルから h が増加しているのに対して, 与えられる繰り返し載荷履歴の増加につれて, h が増加するひずみレベルも増加している (密な豊浦砂の場合,

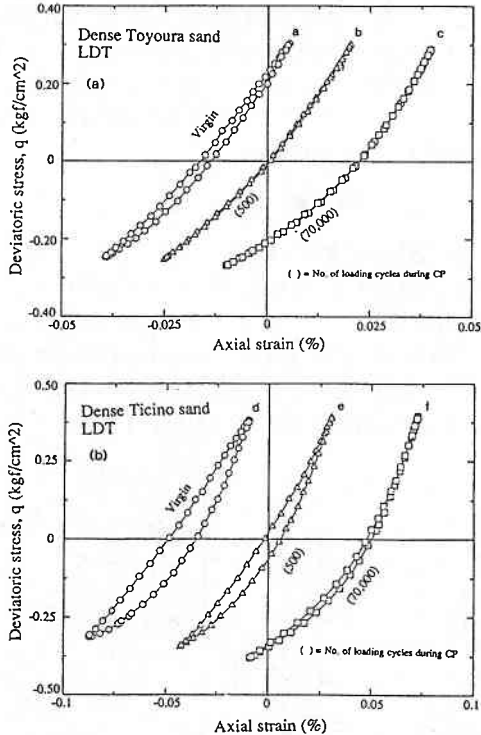


図13 VR 試験および CP 試験での履歴曲線 (a)密な豊浦砂, (b)密な Ticino 砂

CP 500 回後では約 0.015%, CP 70,000 回後では約 0.02%)。このことは, 砂に与えられる繰り返し載荷履歴の増加につれ, 弾性的なひずみレベルも増加することを示している。したがって, 減衰に及ぼす繰り返し載荷履歴の影響は大きいと言える。

図 15 に VR 試験と他の CP 試験で得られた初期ヤング率の比較を示した。初期ヤング率は間隙比の影響を考慮して正規化している。CP 試験から得られた初期ヤング率 (E_{max})_{PRE} と VR 試験から得られた初期ヤング率

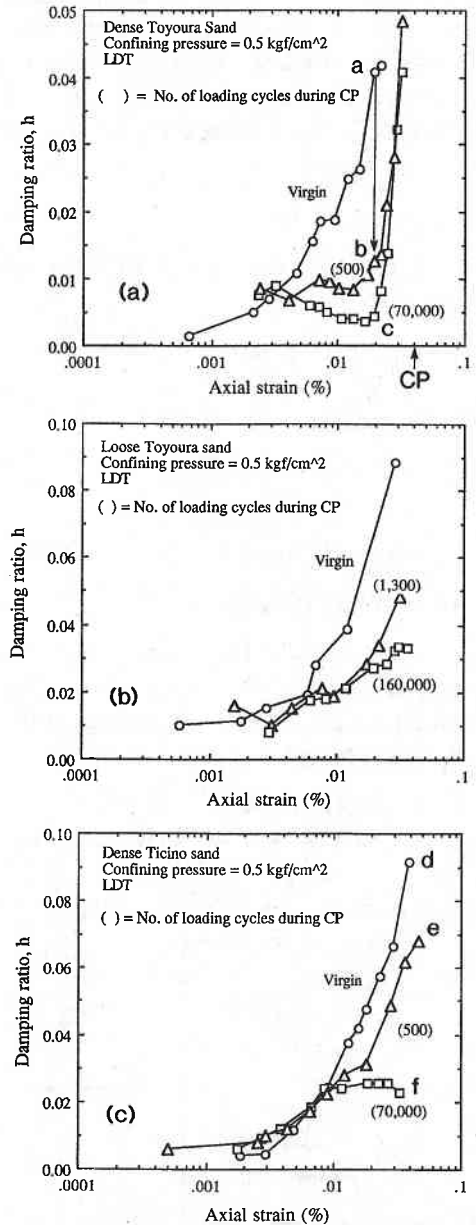
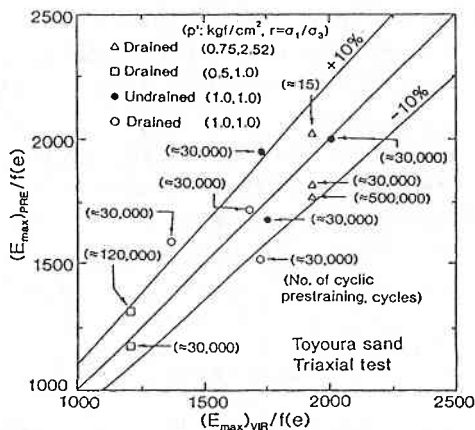


図14 繰り返し載荷履歴による履歴減衰係数の減少 (a)密な豊浦砂, (b)緩い豊浦砂, (c)密な Ticino 砂

図15 砂のVR試験とCP試験での $(E_{\max})/F(e)$ の比較

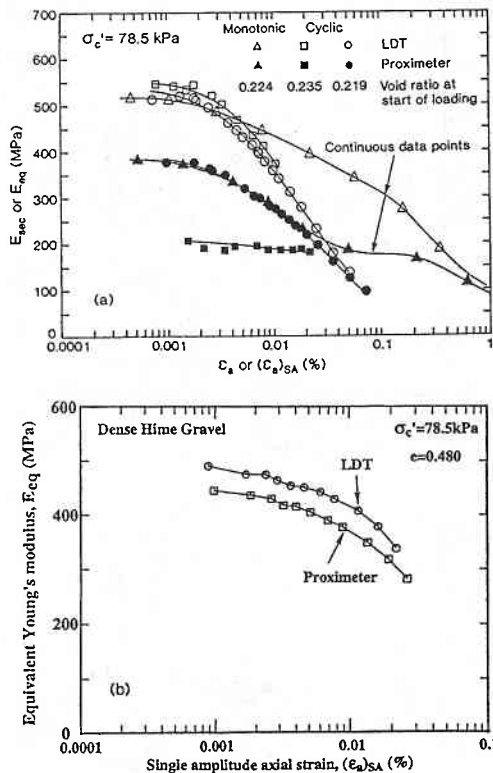
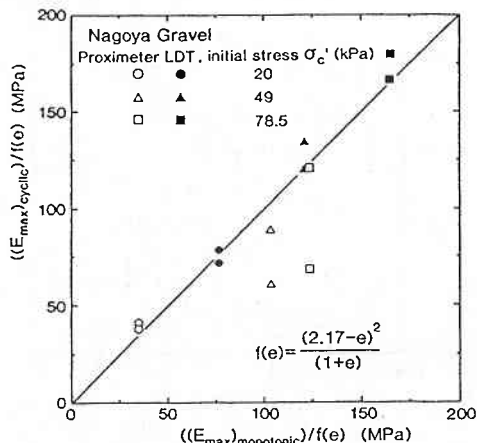
$(E_{\max})_{\text{VR}}$ の差異は $\pm 10\%$ 以内の範囲にある。すなわち、初期ヤング率に及ぼす繰返し載荷履歴の影響は、小さいと言える。

3.2 載荷波形・載荷速度の影響

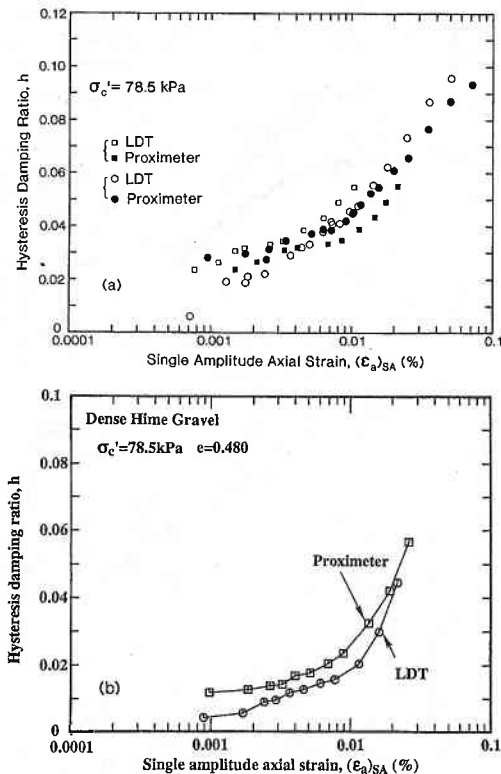
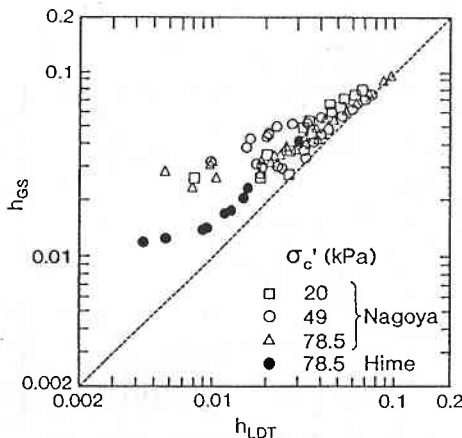
砂の実験では、同一の繰返し回数で共振法土質試験と静的繰返し試験での減衰はほぼ同一であり、載荷速度の影響はないことが示されている (Kim et al., 1991)。しかし、粘性土では載荷周波数が10Hzを越えると減衰が大きくなることが示されている。これは、共振法土質試験では載荷周波数が大きくなることによる水の粘性抵抗の影響によると考えられる。一方、澁谷ら (Shibuya et al., 1994, 澁谷ら, 1993) は、正規圧密粘性土に対して繰返しねじりせん断試験を実施し、載荷周波数および載荷波形がせん断剛性率および減衰に及ぼす影響を報告している。澁谷らによれば、繰返し載荷周波数がせん断剛性率に与える影響は小さいが、繰返し載荷周波数 ($f=0.005\sim 0.083\text{Hz}$ の範囲) が大きいほど減衰は小さくなっている。これはクリープの影響によるものと考えられる。したがって、粘性土の減衰に及ぼす載荷速度の影響については、未解明な部分が多く、微小な載荷周波数領域から大きな載荷周波数領域に至る広範囲な領域での系統的な研究が必要とされる。さらに、載荷波形としてサイン波と三角波の影響について検討しているが、せん断剛性率および減衰特性に顕著な差は見られないとしている。

4. 密な礫の減衰特性

図16(a), (b)に密な礫に対して実施した静的単調載荷 (ML試験) および繰返し三軸試験 (CL試験) の試験結果の例を示した。図16(a)によれば、拘束圧に依存せず ML試験と CL試験の初期弾性ヤング率は一致している (図17参照)。また、ギャップセンサーを用いてキャップ上部の測定から得られた $E_{\text{sec}} \cdot E_{\text{eq}}$ は、LDT

図16 礫の E_{sec} および $E_{\text{eq}} \sim e_a$ および $(e_a)_{\text{SA}}$ 関係
(a)密な名古屋礫, (b)密な姫礫図17 礫のVR試験とCP試験での $(E_{\max})/F(e)$ の比較

による測定から得られた $E_{\text{sec}} \cdot E_{\text{eq}}$ より小さい。これは、砂の場合と同様、ベディングエラーによるものである。図18(a), (b)は、CL試験から得られた履歴減衰係数 h と軸ひずみ片振幅 $(e_a)_{\text{SA}}$ 関係の例を示している。図19には、ギャップセンサーによって得られた h_{GS} と LDTによって得られた h_{LDT} の比較を示した。図より、ベディングエラーの影響により h_{GS} は過大評価されることが

図18 礫の $h \sim (\epsilon_a)_{SA}$ 関係 (a)密な名古屋礫, (b)密な姫礫図19 礫の h_{GS} と h_{LDT} の比較

わかる。

5. ま と め

以上をまとめると以下ようになる。

- 1) 正確な履歴減衰係数 h を求めるためには、試験を実施する前に必ず測定系の時間誤差の検定を実施し、見かけの h の補正をする必要がある。

- 2) キャップの動きから測定された軸ひずみにはベディングエラーによる誤差が含まれ過大評価される。すなわち、従来の方法で測定された等価ヤング率は過小評価されている。
- 3) 従来の方法で測定された履歴減衰係数 h は、ベディングエラーの影響により過大評価されている。
- 4) 地盤材料に繰り返し載荷履歴を加えると、等価ヤング率は変化しないが、履歴減衰係数は減少する。さらに、 h が急増しはじめるひずみレベルは大きくなる。

(1993年 5 月12日受理)

参 考 文 献

- 1) Drnevich, V. P. and Richart Jr, F. E. (1970): Dynamic prestraining of dry sands, Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, SM2, pp. 451-469.
- 2) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.-S., and Sato, T. (1991): A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and Foundations, 31-1, pp. 169-180.
- 3) Kim, D. S., Stokoe, K. H. II, and Roesset, J. M. (1991): Characterization of Material Damping of Soils Using Resonant Column and Torsional Shear Tests, Proc. 5th Int. Conf. on SDEE, Univ. of Karlsruhe, Germany, Spt.
- 4) Kokusho, T. (1980): Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 3, pp. 46-60.
- 5) Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T. (1994): Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay, ASTM STP1213, Dynamic Geotechnical Testing, in print.
- 6) 瀧谷啓・荒川哲一・細野高康・井口弘・中島雅之・田中洋行 (1994): いくつかの沖積粘性土地盤のせん断剛性率 (その2) 室内繰り返し試験による測定, 第28回土質工学研究発表会講演集
- 7) Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1992): Deformation characteristics of soil and rocks from field and laboratory tests, Keynote Lecture for Session 1, Proc. 9th Asina Regional Conference, Bangkok, Vol. II, pp. 101-170 (reprinted as Report of the Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Vol. 37, No. 1).
- 8) 龍岡文夫・木幡行宏・金有性・瀧谷啓 (1992): 原位置調査・室内試験・逆解析による土と岩の変形係数 (その1, その2), 生産研究 Vol. 44, No. 10, 36-42頁.
- 9) Thomann, T. G. and Hryciw, R. D. (1992): Stiffness and strength changes in cohesionless soils due to disturbance, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, pp. 853-861.
- 10) Tokimatsu, K., Midorikawa, S. and Yoshimi, Y. (1989): Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proc. of The 12th Int. Conf. on SMFE, Vol. 3, pp. 2015-2018.