

## 繰返し载荷履歴が密な粒状地盤材料の微小変形特性に及ぼす影響

Effects of cyclic loading history on small strain deformation properties of dense granular geomaterials

古 関 潤 一\*・レグワン アンダン\*\*

Junichi KOSEKI and LeQuang ANHDAN

## 1. は じ め に

鉄道や道路施設としての盛土や擁壁の裏込め土は、砂や礫などの粒状地盤材料をよく締め固めて建設される。これらの土構造物の維持管理を効率的に行ううえで、非破壊検査手法の一つである弾性波速度測定の利用が考えられる。しかしながら、交通荷重や降雨、地震などの影響を経時的に受けた場合に弾性波速度がどのように変化していくかは、必ずしも明らかになっていない。

そこで、上記のうち交通荷重の影響について基礎的な検討を行うために、室内で作成した大型三軸供試体に交通荷重に相当する多数回の繰返し载荷履歴を与えて、微小ひずみレベルでの弾性的な変形特性の変化を調べた。

## 2. 試 験 方 法

含水比5.5%に調整した千葉レキ(最大粒径40mm, 均等係数9)と気乾状態の豊浦砂(平均粒径0.2mm, 均等係数2以下)を用いて、高さ50cm, 断面23×23cmの供試体を作成した。千葉レキはよく締め固めて、また、豊浦砂は空中落下法を用いて、表1に示すように密な状態に作成した。

試験は背圧を加えない状態で排水条件下で実施した。まず拘束圧490kPaまで等方圧密し、水平応力を一定に保ったまま鉛直応力を1960kPaまで载荷して、繰返し応力履歴を受けない状態での応力ひずみ関係を測定した。次に、水平応力490kPa, 鉛直応力1140kPaを中立応力状態として、表1に示す鉛直応力振幅で5000～10000回の繰返し载荷を行った後で、上記と同様に鉛直応力を1960kPaまで载荷して、繰返し応力履歴を受けた状態での応力ひずみ関係を測定した。繰返し载荷の振幅を増加させながらこの手順を繰り返した。

上記の試験中、いくつかの応力状態においてひずみレベル0.001%程度の微小な振幅で鉛直方向に除荷・再载荷を行った。この際の応力ひずみ関係は図1に示すようにほぼ

表1 試験条件

| 試験番号                      | test 1                                                          | test 2                                                          | test 3                                                          | test 4                                                          |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 材料                        | 千葉レキ                                                            |                                                                 |                                                                 | 豊浦砂                                                             |
| 拘束圧 30 kPa での初期乾燥密度と間隙比   | 2.01 g/cm <sup>3</sup> , 0.30                                   | 2.18 g/cm <sup>3</sup> , 0.20                                   | 2.09 g/cm <sup>3</sup> , 0.26                                   | 1.61 g/cm <sup>3</sup> , 0.624                                  |
| 大ひずみレベルにおける鉛直応力の载荷条件と载荷回数 | cycle 6 まで, $\sigma_z=490 \rightarrow 1862 \rightarrow 490$ kPa | cycle 4 まで, $\sigma_z=490 \rightarrow 1960 \rightarrow 490$ kPa | cycle 4 まで, $\sigma_z=490 \rightarrow 1862 \rightarrow 490$ kPa | cycle 6 まで, $\sigma_z=490 \rightarrow 1960 \rightarrow 490$ kPa |
| cycle 1 と 2 の間の多数回繰返し载荷   | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=78$ kPa                            | $N_c=5000$ , $\sigma_{d,DA}=196$ kPa                            | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=570$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=132$ kPa                           |
| Cycle 2 と 3 の間の多数回繰返し载荷   | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=157$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=392$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=570$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=265$ kPa                           |
| cycle 3 と 4 の間の多数回繰返し载荷   | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=294$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=490$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=700$ kPa                           | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=353$ kPa                           |
| cycle 4 と 5 の間の多数回繰返し载荷   | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=353$ kPa                           |                                                                 |                                                                 | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=470$ kPa                           |
| cycle 5 と 6 の間の多数回繰返し载荷   | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=402$ kPa                           |                                                                 |                                                                 | $N_c=10000$ , $\sigma_{d,DA}=549$ kPa                           |

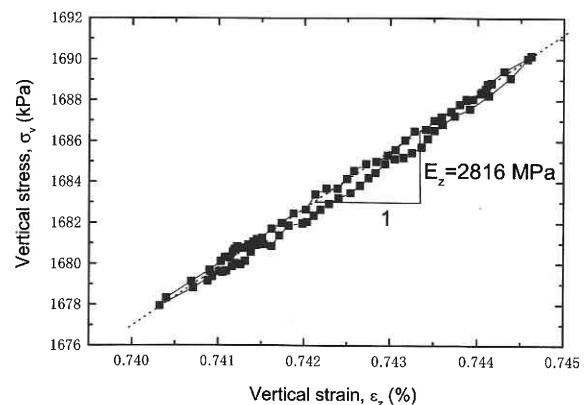
\* 鉛直応力载荷時の拘束圧  $\sigma_{y0}$  は 490 kPa で一定。\*\* 多数回繰返し载荷は  $\sigma_{z0}=1140$  kPa,  $\sigma_{y0}=490$  kPa の応力状態から鉛直応力の両振幅  $\sigma_{d,DA}$  で  $N_c$  回実施。

図1 微小ひずみレベルでの除荷・再载荷の例

可逆的で線形であり、その傾きから鉛直ヤング率  $E_z$  を求めた。

## 3. 試験結果および考察

## 3.1 ひずみレベルが大きい範囲での変形特性

千葉レキの test 3 の結果を図2に示す。多数回の繰返し载荷履歴を与えることにより鉛直ひずみが1%程度まで累

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

\*\*米国ノートルダム大学 (元 博士研究員)

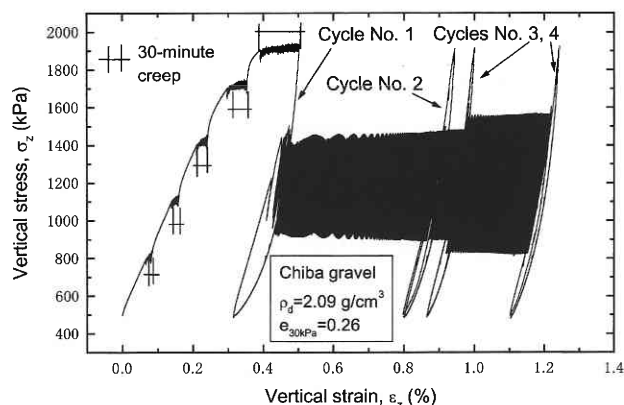


図2 千葉レキ (test 3) の応力ひずみ関係

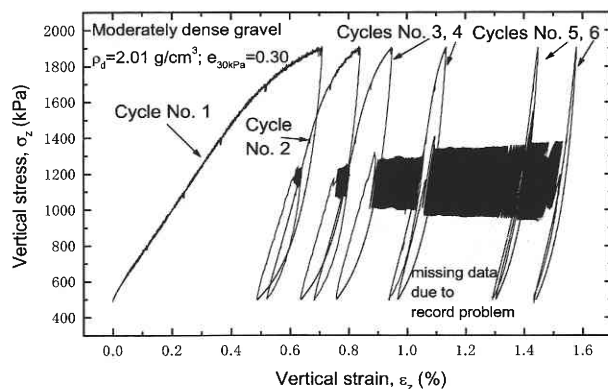


図4 千葉レキ (test 1) の応力ひずみ関係

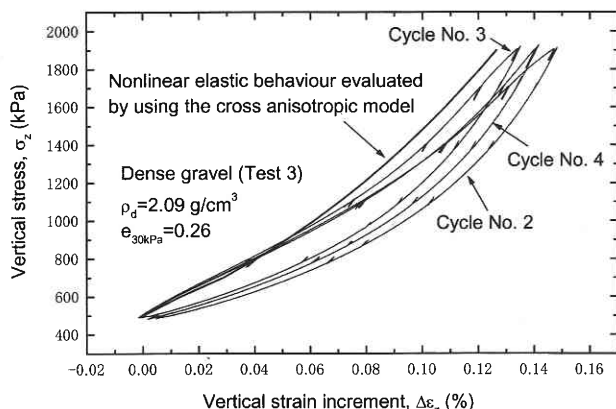


図3 千葉レキ (test 3) の履歴ループの比較

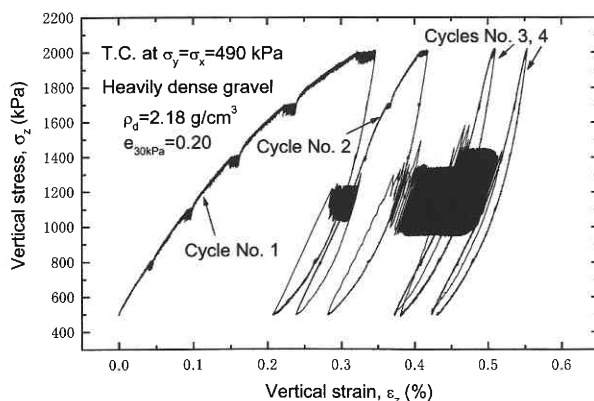


図5 千葉レキ (test 2) の応力ひずみ関係

積した。繰返し載荷履歴のない初期載荷時（図中の cycle 1）と比較すると、繰返し載荷履歴を与えた後（cycle 2～4）は除荷・再載荷による大ひずみレベルでの履歴ループが小さくなったことがわかる。

上記の試験における cycle 2～4 の履歴ループだけを取り出して比較したものを図3に示す。図中には、後述する非線形弾性モデルを用いて算定した弾性ひずみ成分も合わせて示したが、cycle 3 および 4 の実測値はこの弾性的な挙動に近いことがわかる。

上記の試験よりも低い供試体密度で実施した test 1 の結果を図4に示す。図2と比較すると、繰返し載荷履歴を与えることによる大ひずみレベルでの履歴ループの改善が、より顕著に見られることがわかる。

供試体密度を高くした test 2 の結果を図5に示す。この場合には、繰返し載荷履歴を与えた際に生じる累積鉛直ひずみが 0.5 % 程度にまで低下し、その後の履歴ループも、図6に示すように弾性的な挙動との間に差が見られた。この理由として、多数回の繰返し載荷を行った際の振幅が前述した test 3 よりも小さかった（表1参照）ために、履歴ループの改善効果が十分には得られなかったことが考えられる。

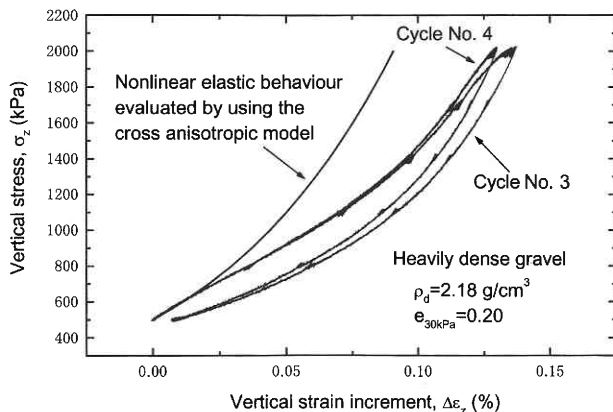


図6 千葉レキ (test 2) の履歴ループの比較

豊浦砂の試験結果（test 4）を図7に示す。この場合にも、繰返し載荷履歴を与えることによる履歴ループの変化は比較的小さかった。繰返し応力振幅とその載荷回数の影響の生じかたは、対象とする粒状体地盤材料の粒度と初期密度に応じて変化すると考えられ、この点について今後の詳細な検討が必要である。

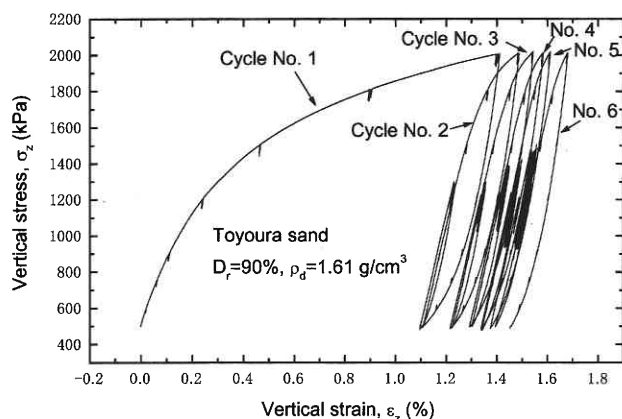


図7 豊浦砂 (test 4) の応力ひずみ関係

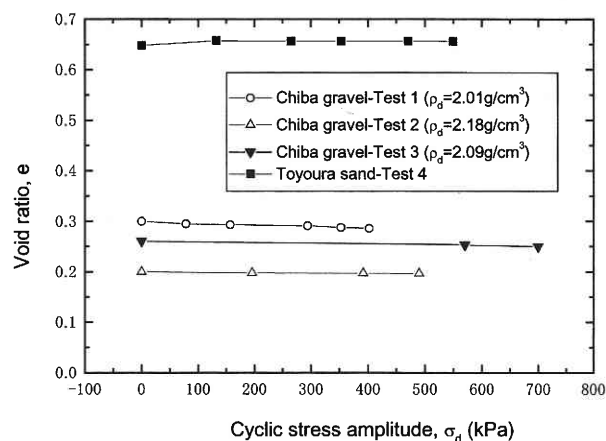


図9 試験中の各供試体の間隙比の変化

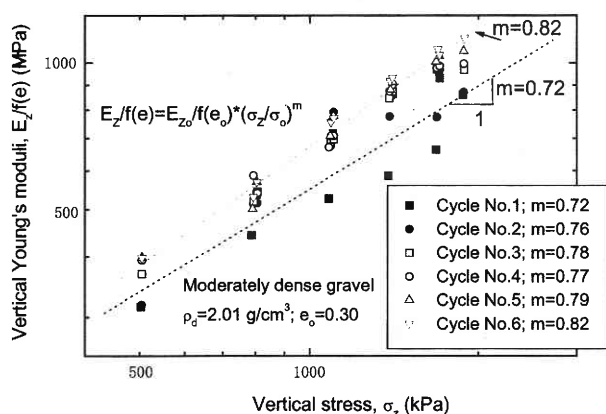


図8 千葉レキ (test 1) の鉛直ヤング率

### 3.2 微小ひずみレベルでの弾性的な変形特性

繰返し載荷履歴を与えることによる大ひずみレベルでの履歴ループの改善がより顕著に見られた test 1 において、各 cycle 中のいくつかの応力状態で微小ひずみレベルでの鉛直方向除荷・再載荷を行って求めた鉛直ヤング率を図8に示す。なお、次式による間隙比  $e$  の関数  $f(e)$ <sup>1)</sup> でヤング率を除すことにより、試験中の供試体の密度変化による影響を補正したが、実際には図9に示すように  $e$  の変化は極めて小さかった。

$$f(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \dots\dots\dots (1)$$

図8より、繰返し載荷履歴がない場合 (cycle 1, 図4参照) は、繰返し載荷履歴を与えた後 (cycle 2~6) よりも全般的にヤング率が小さいことがわかる。この理由として、繰返し載荷履歴がない場合には微小な除荷・再載荷中もクリープ変形が進行するために、ヤング率が適切に求められていないことが考えられた。そこで、以降の他の試験では各応力状態を30分間保持してから微小な除荷・再載荷を行うことにより、クリープ変形の影響を低減するようにし

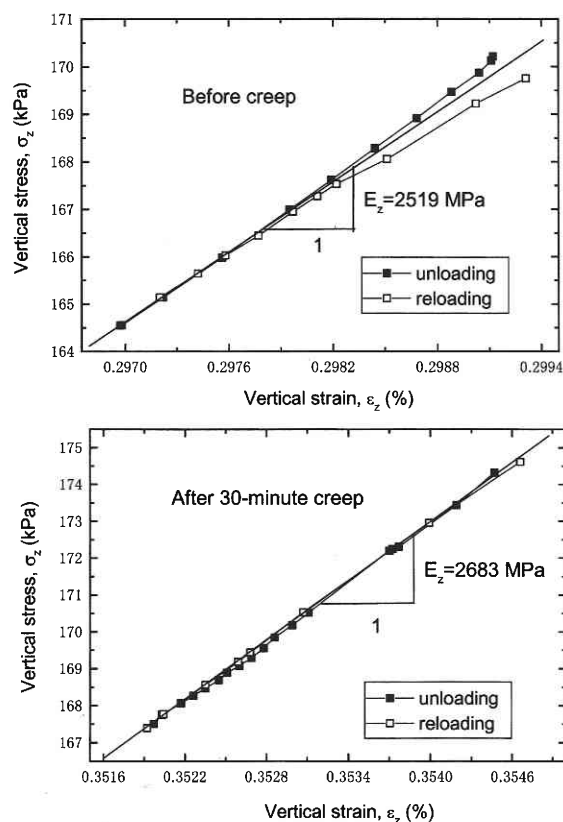


図10 応力状態を30分間保持する前後での鉛直ヤング率の比較

た。図10は30分間の応力保持の前後で行った微小な除荷・再載荷試験結果の比較例であるが、応力保持前のデータにはクリープ変形の影響が明らかに見られ、また、除荷・再載荷時の平均的な傾きから算定したヤング率は応力保持後よりも小さいことがわかる。

以上によりクリープ変形の影響を低減した後の test 2~4 における鉛直ヤング率は、図11~13に示すように繰返し載荷履歴を与えてもあまり変化しなかった。より詳細に

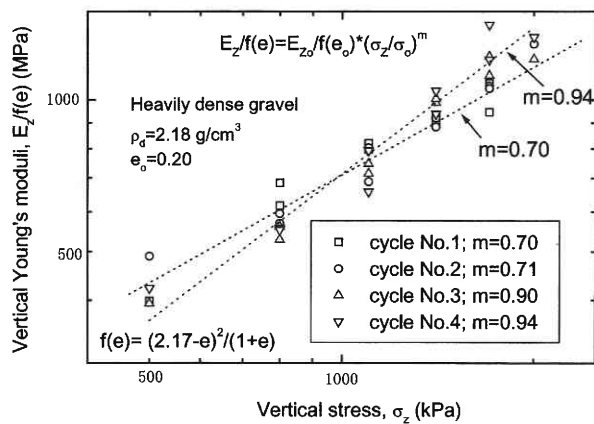


図 11 千葉レキ (test 2) の鉛直ヤング率

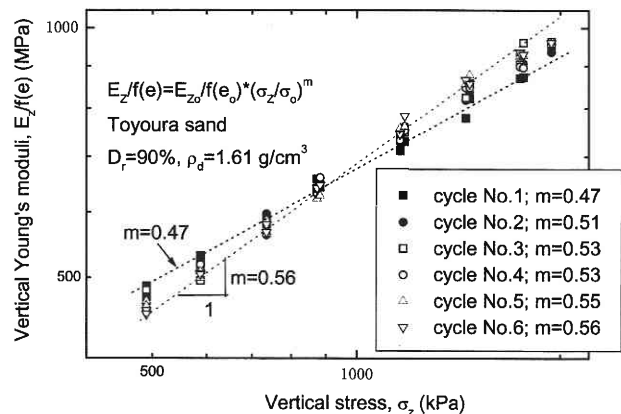


図 13 豊浦砂 (test 4) の鉛直ヤング率

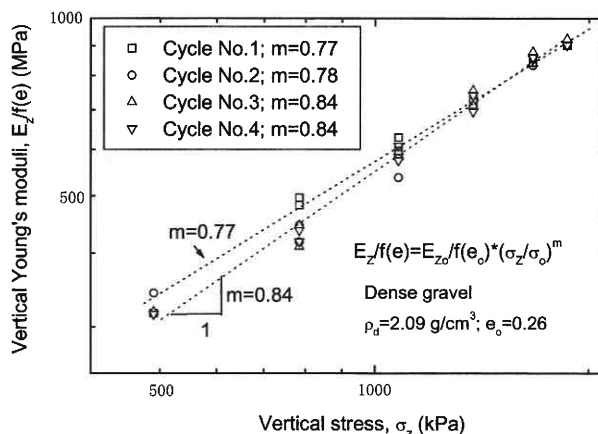


図 12 千葉レキ (test 3) の鉛直ヤング率

比較するために、鉛直ヤング率  $E_z$  を鉛直応力  $\sigma_z$  の関数として次式<sup>1)</sup>によりモデル化した場合の応力状態依存性を示すパラメーター  $m$  の値を比較したところ、上記の各図中に示したように、繰返し載荷履歴とともに若干増加する傾向を示した。

$$\frac{E_z}{f(e)} = \frac{E_{z0}}{f(e_0)} \left( \frac{\sigma_z}{\sigma_0} \right)^m \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\sigma_0$  および  $e_0$  は基準応力と基準間隙比で、 $E_{z0}$  は  $\sigma_z = \sigma_0$  および  $e = e_0$  のときの鉛直ヤング率である。なお、図 3 に示した弾性的ひずみ成分は、上記のモデルを用いて算定した。

#### 4. ま と め

密な砂と礫の大型供試体を用いた三軸試験を実施した。

列車などの交通荷重に相当するような多数回の繰返し載荷を十分な振幅で与えることにより、ひずみレベルが大きい範囲での変形特性が、供試体の初期密度が低いほど改善された。

一方、微小ひずみレベルでの弾性的な変形特性は、繰返し載荷履歴を与えてもあまり変化しなかった。これは、盛土や擁壁裏込め地盤の強度変形特性の経時変化を推測するうえで、弾性波速度や固有振動数の測定などにより微小ひずみレベルでの変形特性を求めても、その適用には限界があることを示唆している。より有効な測定方法について今後の検討が必要である。

#### 謝 辞

本研究に用いた試験システムを整備するにあたり、東京大学生産技術研究所 平成 14 年度「選定研究」の援助を受けた。また、試験の実施に際しては、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 平成 15 年度「運輸分野における基礎的研究推進制度」による援助を受けた。ここに記して深謝の意を表す。

(2004 年 1 月 8 日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) Hardin, B.O. and Richart, F.E.: Elastic wave velocities in granular material, *Proc. of ASCE*, 89 (SM 1), 33-65, 1963.
- 2) 例えば Tatsuoka, F. and Kohata, Y.: Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, 生産技術研究所報告, 第 38 巻, 第 5 号, 135-274, 1995.