

平成 21 年 4 月 9 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760323

研究課題名（和文）砂礫材料の微小変形特性に及ぼす諸要因

研究課題名（英文） Various effects on small strain characteristics of gravelly materials

研究代表者

清田 隆（KIYOTA TAKASHI）

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：70431814

研究成果の概要：室内試験による供試体の微小変形特性（ひずみレベル 10^{-5} 程度）の計測は、実地盤の弾性的挙動の把握や地震時の応答解析、液状化特性の検討などに用いられている。本研究では、高品質な不攪乱試料を含む礫質土試料の微小変形特性（静的鉛直ヤング率・動的せん断剛性率）について実験的に検討した。使用した大型三軸試験機（供試体高さ 60cm、直径 30cm）は、我が国の試験機でも最大級である。結果より、礫質土の微小変形特性に及ぼす応力状態依存性は概ね砂質土の値と同等であった。また、動的に計測された微小変形特性の方が静的なものよりも高い値が得られた。微小変形特性の値は礫質土の締め固め度だけでなく、締め固め時の含水比にも影響することを示した。更に、小型三軸試験機による液状化試験中に礫混じり砂質土の動的せん断剛性率を計測したが、液状化による洪積試料と沖積試料の年代効果の喪失を動的せん断剛性率の変化により表現できることを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	1,600,000	0	1,600,000
20年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	240,000	2,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土質力学・地盤工学・三軸試験・微小変形特性・年代効果・礫質土・不攪乱試料

1. 研究開始当初の背景

地盤工学の分野においても性能設計が必要になってきた今日、適切な原位置試験や不攪乱試料を用いた室内試験による結果が尊重されるようになってきた。地盤の弾性的挙動の把握や、地震時の地盤応答解析や交通荷重などの動的外力を対象とした解析には微小変形特性が重要となる。また、微小変形特性は地盤の密度や年代効果とも密接な関係があると言われており、現場で静的・動的に

計測した微小変形特性を用いて、その地盤の液状化強度特性や地盤反力を推定することができる。しかし、これまでの礫材料の室内試験による微小変形特性は、静的計測手法のみにより計測されることが多く、動的計測手法による微小変形特性に及ぼす様々な要因について、静的計測手法と比較しながら統一的かつ実証的に研究した例はほとんどない。従って、特に礫材料において、室内試験で既知の応力条件下における微小変形特性

を動的に精度よく計測し、その結果に及ぼす影響を把握することは、基礎的研究としても実務的にも非常に重要である。

2. 研究の目的

礫地盤においては、動的微小変形特性に及ぼす様々な要因について、静的微小変形特性と比較しながら実証的に研究した例は非常に少ない。この主な原因は、礫材料のように粒径が大きく、硬質な試料への従来の動的計測手法の適用が難しいこと、およびこの研究には様々な応力状態、ひずみレベルで、静的・動的微小変形特性を精密計測する必要があるが、この種の実験は容易でないことが挙げられる。本研究では、原位置から採取した不攪乱試料、および静岡空港盛土材として利用された円礫を主体とする礫質土を用い、大型三軸試験装置を用いて微小変形特性を計測した。微小変形特性は、申請者らが開発・改良を加えてきた局所変位計 (LDT) による精度の高い静的計測手法と、礫質土の供試体に対し適切な計測手法と考えられる加速度計を用いた動的計測手法により計測し、その計測値に影響を及ぼす諸要因について総合的に解明した。

また、微小変形特性は土粒子骨格の安定性を示すと言われることから、地盤の年代効果を反映する可能性も考えられる。本研究では動的計測手法による微小変形特性により、洪積層の年代効果について検討した。

3. 研究の方法

試験機は大型三軸試験機 (供試体サイズ: 高さ 60 cm, 直径 30 cm) を用いた。これは現在我が国で用いられている室内試験試料としては、最大級の大きさである。大型三軸試験に用いた礫質土試料は、新しい技術でもある水溶性ポリマー溶液を用いて採取した高品質な不攪乱試料、および実際に静岡空港盛土材として利用された試料である。

微小変形特性の計測手法としては、土質試験特有の誤差であるベディングエラーの影響を受けない加速度計を用いた動的計測と、局所変位計 (LDT) を用いた静的計測を採用した。なお、動的計測についてはアクチュエーター起振によるせん断弾性波の速度を加速度計で計測することで、せん断剛利率を算出している。

また、微小変形特性に及ぼす年代効果の影響を検討するため、洪積地盤から凍結サンプリング手法により採取された礫混じり砂質土、およびその再構成試料を用い、小型三軸試験機により液状化試験を実施した。液状化中に変化する微小変形特性を詳細に計測し、年代効果の喪失について検討した。

4. 研究成果

(1) 不攪乱試料を用いた大型三軸試験

①実験の概要

第二魚津トンネル建設現場の近傍において採取された不攪乱試料を用いた。飽和後、所定の有効拘束圧 (80, 200, 400 kPa) まで等方圧縮し、排水三軸圧縮を行った。この等方圧密・三軸圧縮過程において、微小変形特性 (静的鉛直ヤング率 E_v 、動的せん断剛性率 G_d) を計測した。

②試験結果と考察

図1は、微小繰返し载荷を行った時の鉛直有効応力 σ'_v と静的鉛直ヤング率 E_v の関係である。図中には、 E_v の拘束圧依存性 m_1 (グラフの傾き) を表記している。同図から、不攪乱礫質土の係数 m_1 は多くの砂質土で観察される $m_1 = 0.5$ 程度の値となっていることが分かる。また、 $\sigma'_3 = 80$ kPaの場合における E_v は、試験時の応力範囲 $\sigma'_v = 50 \sim 1000$ kPaにおいて $\sigma'_3 = 200, 400$ kPaの場合の E_v と比べて大きい。これは、図1において、相対的に小さいひずみ領域で $\sigma'_3 = 80$ kPaの供試体の強度が大きいことに対応している。

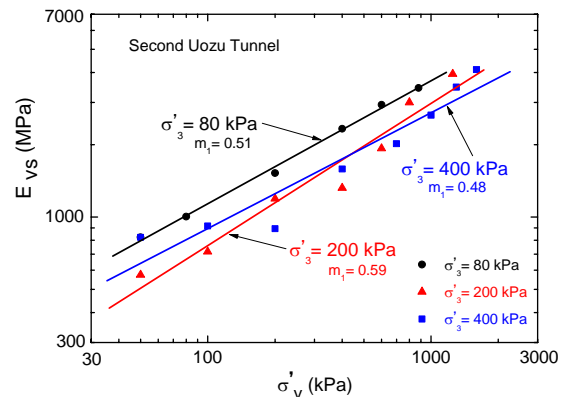


図1 静的計測による鉛直ヤング率と鉛直有効応力の関係

次に、動的なせん断剛性率 G_d に関して検討する。図2は、供試体内を鉛直方向に伝播するS波速度を測定することで得た動的せん断弾性係数 G_d とその時の応力状態パラメータ $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h}$ との関係である。同図より、 G_d と $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h}$ の関係は両対数軸上でほとんど直線的となる事が分かる。図中に各試料の G_d の拘束圧依存性 m_2 を表記した。また、 $\sigma'_3 = 80$ kPaの場合における G_d は、試験時の応力範囲 $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h} = 50 \sim 300$ kPaにおいて $\sigma'_3 = 200, 400$ kPaの場合の G_d と比べて大きい。これは、図1において、 $\sigma'_3 = 80$ kPaの場合の E_v は、 $\sigma'_3 = 200, 400$ kPaの場合の E_v と比べて大きいことに対応している。図2には、試料採取位置の近傍で行ったPS検層によるS波速度から求めた G_d の値も示した。PS検層結果は、比較的低い応力状態では室内動的 G_d よりもかなり小さいが、応力状態が高くなると概ね一致する傾向にある。

さらに、図2には、図1で得られた静的鉛直弾性ヤング率 E_v から、初期構造異方性と剛性の応力レベル依存性を考慮して導かれた静的せん断剛性率 G_s も併記してある。最も重要な考察として、全てのケースにおいて動的せん断剛性率 G_d は静的せん断剛性率 G_s よりも大きい。本試験における供試体は大きな礫を多数含んでいたことから、計測されるS波速度が相対的に硬い部分(大礫)を通過したS波を反映しているという弾性波測定における古典的な問題が原因であると思われる。

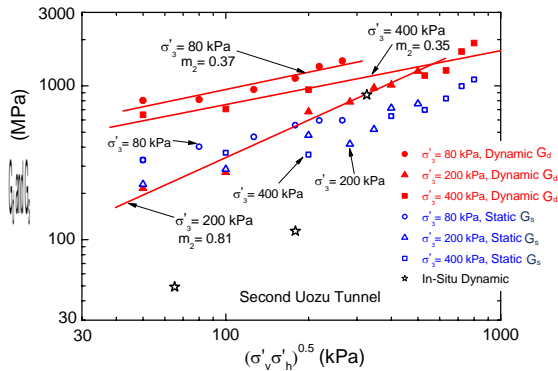


図2 静的・動的計測によるせん断剛性率の比較

(2) 締め固めた盛土材を用いた大型三軸試験

① 試料の概要

実際に盛土で使用された礫質土(静岡空港盛土材)を用いて実験を実施した。各試料にばらつきが出ないように、所定の最大粒径、平均粒径、均等係数および細粒分含有率となるように粒度調節を行った。なお、本研究で用いた礫質土は、円礫を主体とするものであった。供試体を所定の締め固め度 D_c となるよう調整した後、飽和化した。その後有効拘束圧が50 kPa、鉛直応力 $\sigma'_v = 100$ kPaになるまで異方圧密($K = \sigma'_h / \sigma'_v = 0.5$)し、単調排水三軸圧縮を実施した。LDTおよび加速度計による静的・動的微小変形特性は、異方圧密の途中で計測した。

② 試験結果と考察

図3に締め固め時の含水比を3.6%とした試料の静的測定によるせん断剛性率 G_s と応力パラメータ $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h}$ の関係を示す。締め固め度 D_c が増加すると、 G_s も増加し、一般的な理解と整合する結果が得られている。また、今回の微小変形特性は、異方圧密状態で計測されたが、前述の不攪乱試料を用いた等方応力状態の計測時と同様、応力パラメータ $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h}$ とせん断剛性率との関係は比較的に良いと言える。しかし、 $D_c = 93\%$ と 98% の供試体の G_s の値の差はそれほど大きくなく、ある程度まで締め固め度が高くなると、剛性の増分は低下する可能性が考えられる。

図4に締め固め時の含水比を1.8%とした試料の静的・動的測定によるせん断剛性率と $\sqrt{\sigma'_v \cdot \sigma'_h}$ の関係を示す。図3の $D_c = 93\%$ と図4

の96%の結果とを比較すると、締め固め時の含水比が低下することで静的せん断剛性率 G_s は若干低下した。この原因としては、比較的高い締め固め度を低い含水比で実現するためには大きなエネルギーが必要であり、そのため後者の試料には粒子破砕などのダメージが生じた可能性が考えられる。

また、図4に示すように、動的測定によるせん断剛性率 G_d の値は、静的計測による G_s よりも5割程度上回る結果が得られた。この傾向は不攪乱試料を用いた実験でも観測されている。

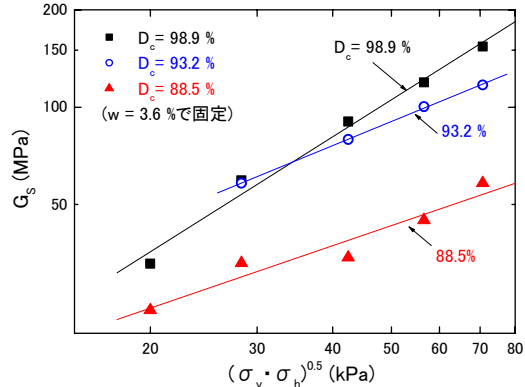


図3 締め固め度の異なる礫質土の静的計測によるせん断剛性率(締め固め時含水比 $w = 3.6\%$)

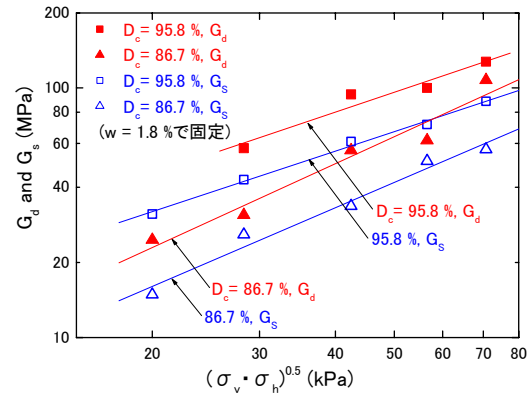


図4 締め固め度の異なる礫質土の静的・動的計測によるせん断剛性率(締め固め時含水比 $w = 1.8\%$)

(3) 礫混じり砂質土の年代効果と微小変形特性

① 試料の概要

試験試料は高品質な凍結サンプリングによって洪積地盤から採取された不攪乱試料およびその再構成試料を用いた。不攪乱試料については、試験開始までの試料の乱れを防ぐため、試料の整形は -20°C の冷凍庫の中で行い、拘束圧を試料採取深度の有効土被り圧相当(100 kPa)として融解させた。供試体飽和後、応力振幅一定の液状化試験を実施したが、その過程において微小変形特性を動的に計測し、礫混じり砂質土の液状化による年代効果の喪失を検討した。

② 試験結果と考察

液状化試験中に計測された凍結不攪乱試料と再構成試料の動的計測による微小変形特性 G_d を図5に示す。圧密後、液状化開始前の各試料の相対密度は同程度であるにもかかわらず、凍結不攪乱試料の G_d は再構成試料のものよりも大きくなっている。これは、再構成試料にはセメンテーションのような年代効果はないが、凍結不攪乱試料にはその効果が現われていると考えられる。

今回の結果からは、 G_d は液状化に伴う有効応力の低下とともに徐々に低下し、軸ひずみ両振幅が約3~4%となった時に両者のせん断剛性率が同程度となった。一方、別途実施した沖積試料の結果では、比較的早い段階で凍結不攪乱試料と再構成試料の G_d は同程度となった。動的計測によるせん断剛性率 G_d の値が、供試体の年代効果の程度を表すと仮定すれば、凍結不攪乱試料の G_d が再構成試料の値と一致すると、年代効果が失われたと考えることができる。これらの結果から、動的計測によるせん断剛性率 G_d は、試料のセメンテーションによる年代効果を表現できたと考えることができる。また、沖積と洪積地盤の年代効果の違いも表現できた。

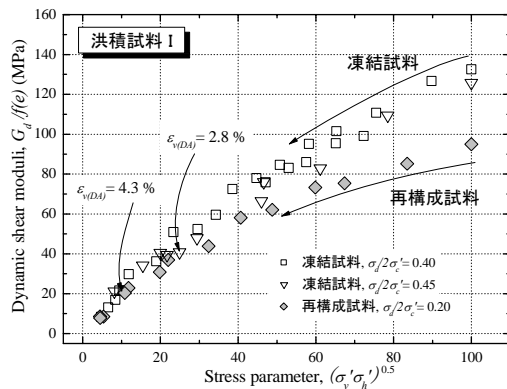


図5 礫混じり洪積砂質土の液状化中における動的せん断剛性率の変化（凍結不攪乱試料と再構成試料の比較）

(4) まとめ

不攪乱試料を含む様々な礫質土の微小変形特性を、大型・小型三軸試験を用いて精度良く計測した。動的計測による微小変形特性は、強度・液状化特性、および沖積・洪積地盤の年代効果の違いも反映することを示した。これらの成果はトンネル掘削地盤や道路、鉄道盛土などの強度品質管理や、第四紀の堆積平野での液状化の被害予測の一助とすることができる。

今後は、動的変形特性に及ぼす地盤の破碎性・土粒子間のインターロッキング・サクシオン効果を検討する。これは、高いエネルギーで締め固められた地盤や、降雨時の斜面安定性の検討に有効となる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計12件）

- ① Kiyota, T., Koseki, J., Sato, T. and Kuwano, R., Aging effects on small strain shear moduli and liquefaction properties of in-situ frozen and reconstituted sandy soils, *Soils and Foundations*, **49** (2), in print, 2009. 査読有.
- ② De Silva, L.I.N., Koseki, J., Sato, T., Kiyota, T. and Honda, T., Quasi-elastic bulk modulus of sand based on volume change and local deformation measurement of hollow cylindrical specimen, *Deformation Characteristics of Geomaterials, Proc. of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials* (Burns, S.E. et al. eds.), Atlanta, USA, 775-781, 2008, 査読有.
- ③ Kiyota, T., Koseki, J. and Sato, T., Interpreting natural aging effects on liquefaction properties of sands based on small strain characteristics, *Deformation Characteristics of Geomaterials, Proc. of the 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials* (Burns, S.E. et al. eds.), Atlanta, USA, 489-494, 2008, 査読有.

〔学会発表〕（計8件）

- ① 望月一宏, 円礫を主体とする礫質土の変形強度特性に及ぼす締め固め条件の影響, 第5回地盤工学会関東支部発表会, 2008年10月31日, 千葉.
- ② 清田隆: 沖積・洪積試料の非排水繰返し載荷に伴う年代効果の消失とせん断剛性率の関係, 第5回地盤工学会関東支部発表会, 2008年10月31日, 千葉.
- ③ 榎本忠夫, トンネル建設現場から採取した不攪乱礫質土の微小変形特性, 第43回地盤工学研究発表会, 2008年7月9日, 広島.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清田 隆 (KIYOTA TAKASHI)
東京理科大学・理工学部・助教
研究者番号：70431814