U.D.C 624.13

現場と室内で締め固めた非一様な砂質土供試体の三軸圧縮試験による局所変形特性評価

冨田　佑一*

要　約： 締め固めた土の強度変形特性は，通常室内で変形が拘束されたモールド内で比較的一様に突き固めて作製された供試体の三軸圧縮試験により評価される。実現場の振動ローラーで締め固めた土は，接触面から伝わる荷重の分散により各締固め層で深さ方向に乾燥密度と飽和度に大きな勾配が生じ，鉛直深度方向に非一様である。施工盛土の品質管理では従来の現場密度管理に加え，地盤剛性等の非破壊試験による評価が検討されているが，これは締固め後の非一様な層１つの平均値に対する評価を仮定している。一方で，このような鉛直深度方向に非一様な供試体の変形特性評価には画像解析による方法が用いられるが，小さいひずみレベルの変形特性の評価例は殆ど確認されていない。そこで実大締固め実験で作製した試験盛土から採取した現場締固め供試体と，同じ土質を用いた室内締固め供試体を作製し，不飽和状態の供試体それぞれに鉛直深度別の局所変位計を設置し，供試体全体平均の初期ヤング率に対する局所変形の影響を比較検討した。その結果，室内締固め供試体の初期ヤング率は全体平均に対する局所変形の影響が小さく，現場締固め供試体は局所的な低剛性部の影響が大きいことを示した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ： 砂質土，締固め，非一様性，局所変形

目　次：

1. はじめに
2. 現場締固めと室内締固め供試体の作製
3. 局所変位計の設置と三軸圧縮試験方法
4. 三軸圧縮試験の結果と考察
5. まとめ

1. はじめに

盛土構造物に高い性能を付与するためには，設計時に使用する盛土材料の締固め後の密度や強度・剛性に関する設計定数を，室内三軸試験等で適切に設定し，施工時にはそれらを満足させる品質管理が必要となる。この品質管理は従来の現場密度試験に加え，近年ではCBRや地盤反力係数，振動ローラーの加速度応答，初期せん断剛性率などによる比較的小さいひずみレベルでの地盤剛性指標を用いた評価手法の適用が多く検討・提案されている[1)-3)]。

一方で，筆者らは施工現場で測定・評価する不飽和状態で締め固めた土の間接的な物性値と三軸圧縮試験などで湿潤・飽和化した設計条件で測定した強度変形特性の相関を調べる事を目的に，現場締固め後の不飽和状態の盛土から採取した供試体と同一試料を用いた室内締固め土供試体を比較してきた[4), 5)]。

その結果，不飽和状態及び飽和化・湿潤化した状態の締固め土の強度変形特性はともに乾燥密度ρ_dに加えて締固め時の飽和度S_rに強く影響されることから，現場締固め土の強度特性から設計定数を推定するには，締固め時のS_rとρ_dの影響の考慮が必要である事を示した。また，現場締固め施工は所定の厚さで撒き出した土の上を締固め機械を走行させる為，締固め層の上方から下方にかけて荷重が分散し，鉛直深度方向の密度分布が生じて非一様となり（図1），この影響の考慮が必要であることを示した。

通常，設計定数を定める三軸圧縮試験は室内で比較的一様に締め固めて作製し，供試体全体平均の強度変形特性を評価することになる。その一方で，現場で締め固めた土の地盤剛性指標評価は非一様な各締固め層の平均値を評価していることを仮定すると，現場で地盤剛性指標を用いた詳細な評価手法を確立するには非一様な供試体の供試体全体平均の地盤剛性指標に与える局所変形の影響を評価しておく必要がある。

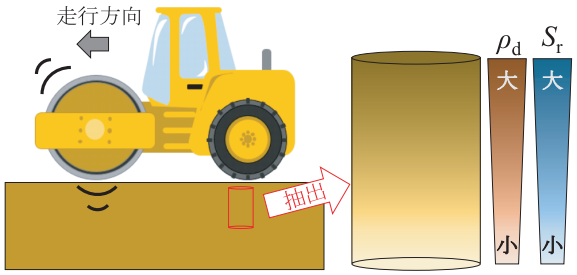
非一様な供試体を室内締固めにより作製した研究として，三軸圧縮試験とその供試体に付与した標点を追跡する粒子画像流速測定（PIV）解析を実施して液状化特性に与える影響を評価した例[6), 7)]や，三軸圧縮・伸張試験の非排水せん断中の間隙比や断面変化をX線CTで局所変形を評価した例[8)]が挙げられる。これらの研究例はまだ少ない上に，画像解析による評価手法は，先述した小さいひずみレベルの変形特性評価には適用されにくい。

そこで本論文では現場と室内で締め固めた供試体それぞれに鉛直深度別の局所変位計を設置し，三軸圧縮試験により得られる供試体全体平均の初期ヤング率E_0($\Delta\varepsilon_v \approx 0.001\%$)に与える局所変形の影響を検討した。

2. 現場締固めと室内締固め供試体の作製

盛土材は最大粒径$D_{max}=2.0$ mm，平均粒径$D_{50}=0.25$ mm，細粒分含有率$F_c=8.4\%$の砂質土（稲城砂）である。締固め試験（A-c法）により求めた最適含水比は$w_{opt}=14.2\%$，最大乾燥密度$\rho_{dmax}=1.684$ g/cm^3，最適飽和度

*技術研究所　土木材料グループ



非一様：締固め方法の影響で乾燥密度ρ_dや飽和度S_rが鉛直深度方向に異なる状態

図 1　非一様な現場締固め土の概念図

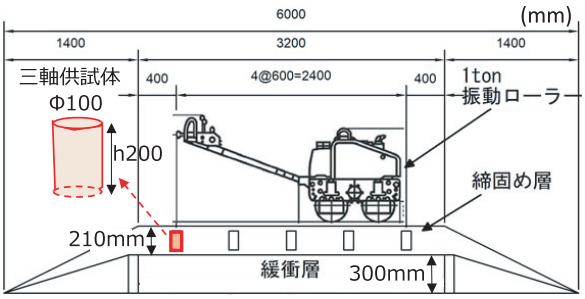


図 2　試験盛土概要と盛土供試体の採取位置

$(S_r)_{opt}$＝64.1% である。

現場で締め固めた供試体[4] は実大締固め試験による試験盛土を作製し，押切式ブロックサンプリング（JGS1231）により乱れの少ない試料（φ100 mm×h200 mm）を採取した。試験盛土は幅 2.0 m×延長 3.2 m の鋼製土槽内に盛土材を 1 層（転圧後の層厚 t=0.21 m 程度）で撒き出し，起振力 11.8 kN，質量 605 kg，幅 0.7 m のハンドガイドタイプの 1 ton 平滑振動ローラーを均等に通過させて作製した（図 2）。

室内で締め固めた供試体[4] は鋼製モールド（φ100 mm×h200 mm）内に 5 層に分けて重量調整した試験盛土と同じ盛土材を投入して均等に突き固めて作製した。締固めエネルギーレベルは 0.2E_c，1.0E_c，4.5E_c の 3 種類である。

図 3 に三軸圧縮試験の供試体の締固め状態（ρ_d～w 関係）を示す。試験盛土から採取した現場締固め供試体と締固めエネルギーレベル別の室内締固め供試体と A-c 法で実施した締固め曲線を示す。図中の各供試体のプロット（w，ρ_d）は作製後に測定した供試体の全体平均（ave）である。同図中には供試体の全体平均の各プロットに対して，上部（upper）と下部（lower）の局所的な土の状態（w，ρ_d）を示している。局所的な乾燥密度 ρ_d は別途作製した供試体を上部と下部の 2 分割にして得た供試体上部の乾燥密度 $(\rho_d)_{upper}$ と下部の乾燥密度 $(\rho_d)_{lower}$ の測定試験結果[4] から，表 1 に示す各締固め方法の $(\rho_d)_{ave}$ に対する ρ_d の密度比率［$\rho_d/(\rho_d)_{ave}-1$］を求めている。三軸圧縮試験時には各供試体上部と下部の ρ_d は測定できないため，全体平均 $(\rho_d)_{ave}$ に対する密度比率［$\rho_d/(\rho_d)_{ave}-1$］から求めた ρ_d の推定値を用いた。また，供試体の上部と下部の w は，全体平均と同じであることを仮定している。

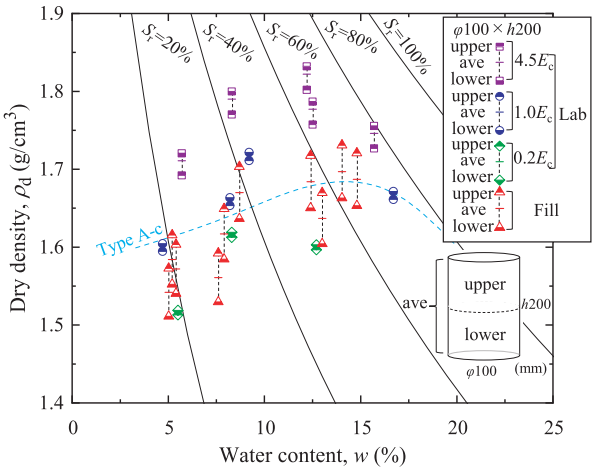


図 3　三軸圧縮試験の供試体の締固め状態（ρ_d～w 関係）

表 1　平均乾燥密度に対する上部と下部の密度比率

締固め方法		室内締固め			現場締固め
締固めエネルギーレベル		4.5E_c	1.0E_c	0.2E_c	—
密度比率	供試体上部	-1.1%	-0.46%	-0.33%	2.0%
	供試体下部	0.55%	0.15%	0.06%	-2.0%

※密度比率：$[\rho_d / (\rho_d)_{ave} - 1]\times100$ (%)

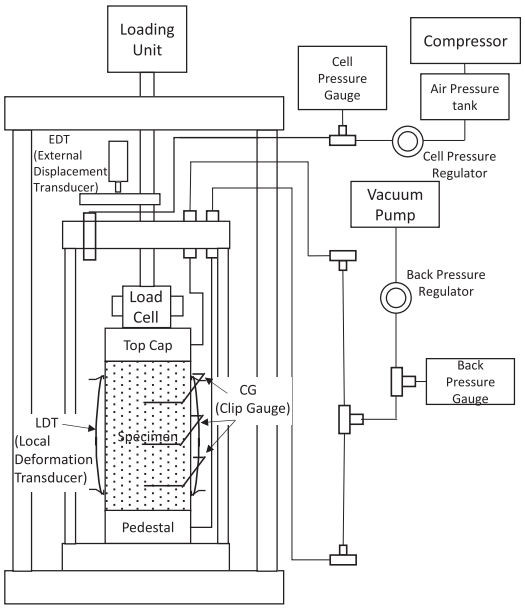


図 4　三軸圧縮試験装置

3. 局所変位計の設置と三軸圧縮試験方法

図 4 に，三軸圧縮試験装置を示す。供試体を不飽和状態で自立させてから，基底応力 $p_{net}=(\sigma_{v\,net}+2\sigma_{h\,net})/3$＝10 kPa から 50 kPa まで 1 kPa/min 以下の速度で等方圧密し，基底水平応力 $\sigma_{h\,net}$ を保持したまま鉛直ひずみ速度 ε_v＝

0.02%/min で排気・排水条件で単調鉛直載荷した。鉛直方向の局所鉛直ひずみ ε_v は供試体の直径両端に配置した 2 つの局所変位計（LDT_{ave}：$L=170$ mm）[9] で通常のベディングエラーを排除した供試体の平均ひずみを測定した。さらに，供試体上部と下部の変形特性の違いを調べることを目的に，別個の小型局所変位計（LDT_{upper}，LDT_{lower}：$L=80$ mm）を上半部と下半部に供試体端面を避けて 2 つずつ設置した（図 5）。

4. 三軸圧縮試験の結果と考察

以下では図 3 に示した ρ_d，S_r 条件の供試体の三軸圧縮試験結果を，供試体上部，下部および平均に対応する部位別の局所変位計のデータに基づき考察する。軸差応力 q は共通するロードセルから得られた値である。

4.1 応力～ひずみ関係

図 6 に室内締固め供試体の q～ε_v 関係例を示す。明確なピークまでは測定できなかったが，$\varepsilon_v=1.5\%$ 付近で q が一致する。ピーク前の割線剛性は供試体上部より下部が大きいことがわかる。この供試体の締固めエネルギーレベルは $1.0E_c$ であり，下部が上部よりわずかに ρ_d が大きいことを考慮すると，この割線剛性の大小関係と整合する。また，供試体の全体平均は上部と下部の中間に位置している。この結果は，供試体上部と下部で割線剛性の大小が異なる場合，全体平均の割線剛性は直列の合成であることを示唆している。これについては，4.3 で E_0 データを基に詳しく議論する。

図 7 に現場締固め供試体の q～ε_v 関係例を示す。図 6 と類似して，$\varepsilon_v=1.5\%$ 付近で q がほぼ一致するものの，ピーク前の割線剛性は供試体下部より上部が著しく小さい。現場締固め供試体は供試体上部が下部より ρ_d が大きいことを考慮すると，この割線剛性の大小関係と一致しない。文献 4）ではこれを現場締固め時に締固め表層に与えるせん断破壊による乱れの影響と考察している。また，供試体の全体平均は上部と下部の中間に位置し，$\varepsilon_v=0.3\%$ 付近までは上部の挙動に近い。

4.2 初期ヤング率～乾燥密度関係

図 8 には全ての室内締固め供試体の初期ヤング率 E_0（$\Delta\varepsilon_v \approx 0.001\%$）に対する供試体上部，下部および全体平均の ρ_d 関係を示す。締固め時の S_r を 15%～30%，30%～60%，60%～80% 別にパラメーターとしている。文献 4）にも記載があるが，E_0 は ρ_d の増加とともに増加するが，全体として締固め時の S_r の影響を受けている。

供試体上部と下部および全体平均の E_0 関係に着目すると，全体平均の初期ヤング率 $(E_0)_{ave}$ は殆ど上部と下部の中間に位置している。この傾向はばらつきがあるものの，ρ_d や S_r に関わらずほぼ同じ傾向である。

図 9 には全ての現場締固め供試体の E_0 に対する供試体上部，下部および全体平均の ρ_d 関係を示す。図 8 と同様にプロットデータは締固め時の S_r 別のパラメーターとしている。全体の傾向として E_0 は室内締固め供試体と同様に締固め時の S_r の影響を受けながら ρ_d の増加とともに増加している。各供試体の上部と下部を比較すると特に S_r の小さい供試体グループほど，ρ_d の大きい供試体上部の E_0 が下部より小さい。これは，図 7 で示した供試体上部が締固め時に受けた乱れの影響と考えられており[4]，締固め時の S_r が最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ に近いほどその影響は小さい。

供試体上部と下部および全体平均の E_0 関係に着目すると，$(E_0)_{ave}$ は上部と下部の中間に位置するものが多い。また，供試体上部と下部の E_0 の差が大きい。これは，供試体全体平均の $(E_0)_{ave}$ の評価では，非一様供試体の変形

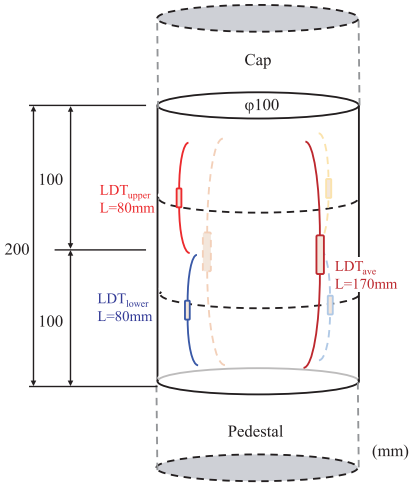


図 5　鉛直方向の局所変位計の配置

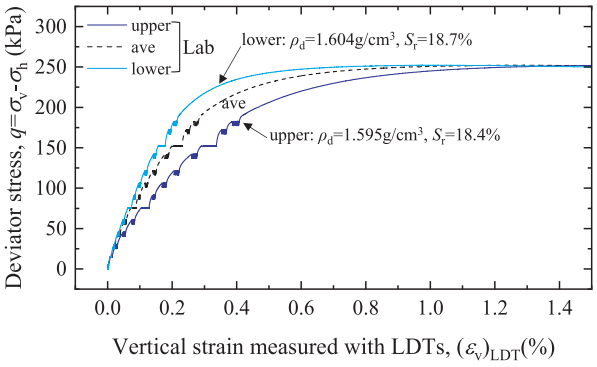


図 6　室内締固め供試体の q～ε_v（LDT）関係例

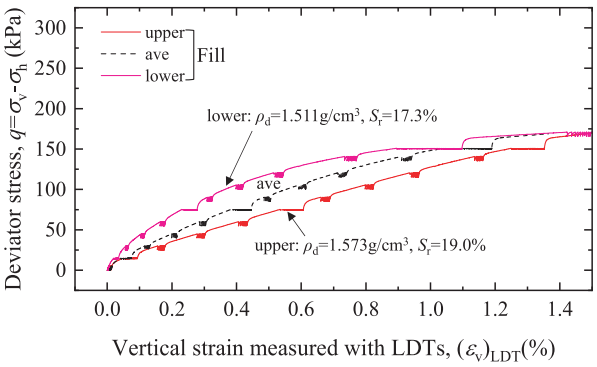


図 7　現場締固め供試体の q～ε_v（LDT）関係例

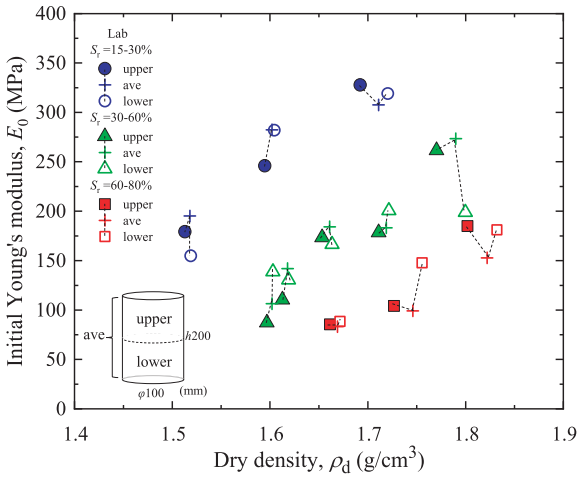


図 8　室内締固め供試体の E_0～ρ_d 関係

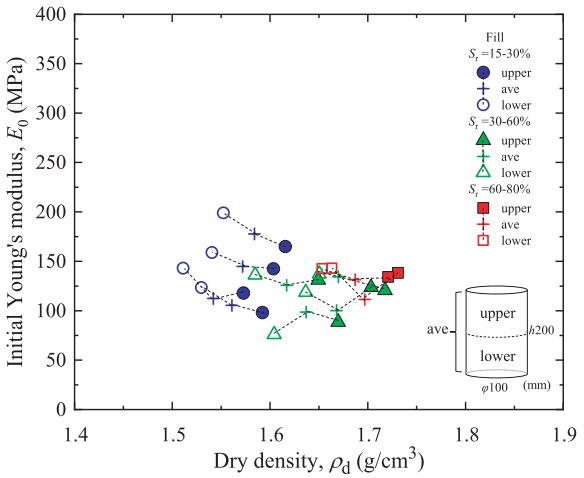


図 9　現場締固め供試体の E_0～ρ_d 関係

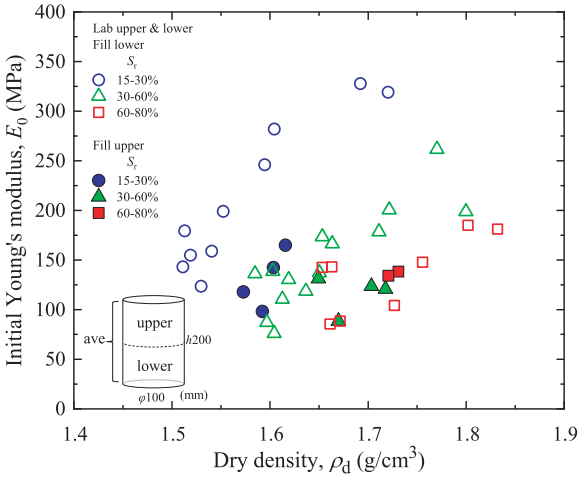


図 10　室内と現場締固め供試体の E_0～ρ_d 関係

特性を適切に評価することは困難であることを意味する。

図 10 には全ての室内および現場締固め供試体の E_0 に対する供試体上部および下部の ρ_d 関係を示す。図 8 と同様にプロットデータは締固め時の S_r 別のパラメーターとしている。また，現場締固め時の乱れの影響を受けた現場締固め供試体上部を色塗りデータ，現場締固め供試体下部および室内締固め供試体上部と下部を白抜きデータとしてプロットした。全体の傾向として E_0 は室内締固め供試体上部および下部と現場締固め供試体下部は締固め時の S_r と ρ_d の影響を受けつつ，類似傾向を示している。一方で，現場締固め供試体上部は締固め時に受けた乱れの影響で，同じ ρ_d の乱れの影響の少ないデータと比べて低い E_0 を示しており，特に締固め時の S_r が小さい 15%～30% のグループで顕著に表れている。つまり，この乱れによる E_0 の低下は締固め時の S_r の影響を受けている[4]。このことから，図 9 にも示したが現場締固め供試体全体平均の $(E_0)_{ave}$ の測定では，非一様供試体の詳細な変形特性の評価が出来ないことがわかる。

4.3　非一様性の考慮を要する供試体条件の検討

締固め方法により供試体上部と下部の物性が大きく異なる場合，4.1，4.2 で示したように通常の $(E_0)_{ave}$ を測定する方法では，締固め層の変形特性を詳細に把握することが難しい。本節では試験結果から得られた局所的な E_0 と $(E_0)_{ave}$ の違いに着目し，非一様な供試体として局所変形の検討が必要な供試体の条件について検討した。

供試体上部と下部で異なる E_0 を直列に合成して評価する方法を，フックの法則に基づき式（1）が成り立つと仮定して適用した。

$$(E_0)_{combined} = 2/[1/(E_0)_{upper} + 1/(E_0)_{lower}] \qquad (1)$$

ここで，$(E_0)_{combined}$ は合成した初期ヤング率，$(E_0)_{upper}$ は供試体上部の局所的な初期ヤング率，$(E_0)_{lower}$ は供試体下部の局所的な初期ヤング率である。

図 11 には同一の供試体の上部と下部の E_0 から式（1）を用いて求めた $(E_0)_{combined}$ と，同時に得られる $(E_0)_{ave}$ の関係を示す。比較的一様な室内締固め供試体と，鉛直深度方向に締固め時の S_r，ρ_d の勾配と表層の乱れを有する非一様な現場締固め供試体をプロットしている。1：1 で示した補助線に一致するデータは $(E_0)_{combined}$ と $(E_0)_{ave}$ が一致することを意味する。

プロットデータは全体的に 1：1 の補助線に沿って分布しており，室内と現場締固め供試体の違いは殆どみられない。このことから式（1）の仮定は成立しており，締固め方法に寄らずこの方法で局所変形と全体変形の関係を表すことが可能であることがわかる。

なお，全プロット 21 データの $(E_0)_{combined}/(E_0)_{ave}-1$ を整理した結果，平均値 $\mu=0.027$，標準偏差 $\sigma=0.116$ であった。$\mu\pm\sigma$ を図 11 中の補助線に示したが，プロットデータの多くが測定誤差を含む ±12% 程度内にあることが確認された。

図 12 には室内締固め供試体と現場締固め供試体の上部と下部それぞれの $E_0/(E_0)_{ave}-1$～$[\rho_d/(\rho_d)_{ave}-1]$ 関係を示す。横軸の $[\rho_d/(\rho_d)_{ave}-1]$ は，表 1 に示した $(\rho_d)_{ave}$ に対する上部と下部の ρ_d の密度比率を百分率で示しており，供試体が非一様で ρ_d 勾配が大きいほど絶対値が大きくな

る。また，縦軸の $E_0/(E_0)_{ave}$-1 は 0 に近いほど供試体上部または下部の E_0 が $(E_0)_{ave}$ に近いことを意味する。4.2 で説明したが E_0 は締固め時の S_r の影響を受けるため，締固め時の S_r が 15%～30% のプロットは中塗り，30%～80% のプロットは中抜きとした。

$E_0/(E_0)_{ave}$-1 は全体的にばらつきがあるものの，全体的に［$\rho_d/(\rho_d)_{ave}$-1］が大きい現場締固め供試体ほど $E_0/(E_0)_{ave}$-1 の分布幅が大きい傾向にある。この分布幅が大きいのは締固め時の S_r が異なるためであるが，ここでは締固め時の S_r が 15%～30% の中塗りプロットに着目する。

室内締固め供試体の $E_0/(E_0)_{ave}$-1 は供試体上部と下部ともに－0.2～0.1 の範囲でばらつきはあるが概ね 0 付近に位置し，$(E_0)_{ave}$ とほぼ同等である。締固め時の S_r が 30%～80% の範囲を考慮すると，ばらつきの範囲は－0.3～0.5 まで拡がるが，これは締固めエネルギーレベル $4.5E_c$ の供試体下部に顕著に表れている。これは $4.5E_c$ のような高い締固めエネルギーレベル条件での供試体作製は ρ_d 勾配が大きくなるに加え，作製方法に起因する物性のばらつきが拡大し E_0 と $(E_0)_{ave}$ の差異に影響を与えたことが考えられる。

一方，締固め時の S_r が 15%～30% の現場締固め供試体上部の $E_0/(E_0)_{ave}$-1 は 0 付近であり $(E_0)_{ave}$ とほぼ同等である。これは現場締固め供試体上部の ρ_d は比較的大きいが，乱れの影響で E_0 が低下しているためである。また，現場締固め供試体下部の $E_0/(E_0)_{ave}$-1 は 0.1～0.3 とやや大きい。これは供試体上部の乱れの影響で $(E_0)_{ave}$ が低下し，乱れの影響が殆どない供試体下部の値が相対的に大きくなるためである。局所的に測定した現場締固め供試体下部の E_0 は締固め時の S_r と ρ_d の影響を受け，室内締固め供試体と類似傾向を示すことは図 10 で示したが，従来の $(E_0)_{ave}$ の評価では現場締固め時の表層の低剛性部の影響で 20% 程度小さく評価してしまうことがわかる。

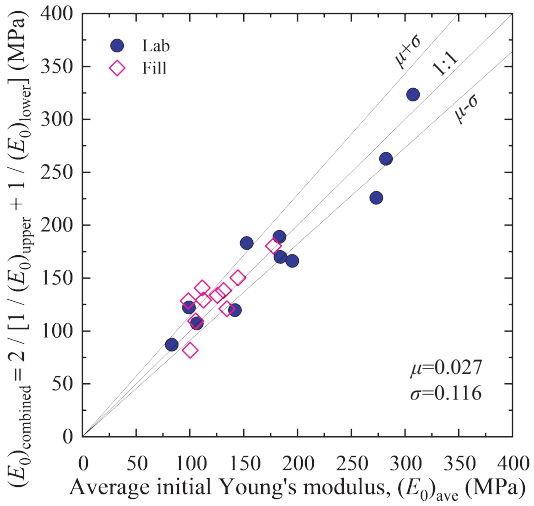


図 11　供試体上部と下部の合成した $(E_0)_{combineed}$ と測定した供試体全体平均 $(E_0)_{ave}$ 関係

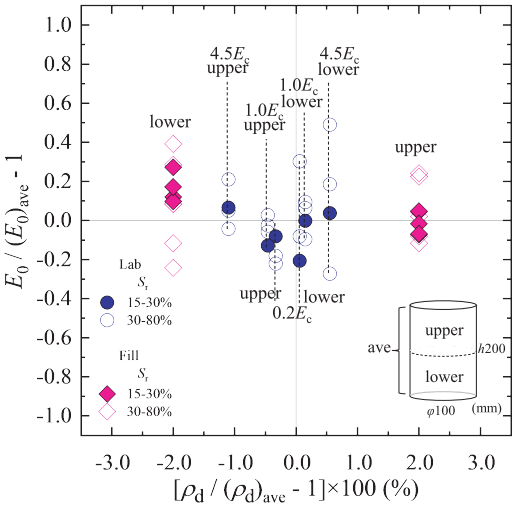


図 12　$E_0/(E_0)_{ave}$-1～［$\rho_d/(\rho_d)_{ave}$-1］関係

5. まとめ

現場と室内で締め固めた鉛直深度方向に非一様な供試体の変形特性を比較的簡便に評価する手法として，小型局所変位計を用いた供試体の上部と下部を別個に評価することを試みた。その結果，以下の知見を得た。

① 現場と室内で締め固めた供試体は程度が異なるが非一様であり，小型局所変位計で供試体上部と下部の変形特性を別個に評価することで両者の変形特性の差異が評価可能である。両者の初期ヤング率 E_0 の直列合成値 $(E_0)_{combined}$ は全体平均値 $(E_0)_{ave}$ とほぼ一致する。

② 突固め法による室内締固め供試体は，締固めエネルギーレベルが $0.2E_c$，$1.0E_c$ 程度であれば，供試体の乾燥密度 ρ_d は比較的一様に分布し，従来の三軸圧縮試験により得られる供試体全体平均の初期ヤング率 $(E_0)_{ave}$ と供試体上部と下部の局所測定で得た初期ヤング率 E_0 との違いは無視できる程小さい。ただし，締固めエネルギーレベルが $4.5E_c$ 程度になると作製方法に起因する供試体物性や初期ヤング率のばらつきが生じやすい。

③ 現場締固め供試体は供試体の乾燥密度 ρ_d が非一様であることに加えて，現場締固め供試体上部には締固め時の表層の乱れによる低剛性部の存在が示唆され，これらが現場締固め供試体の局所的な初期ヤング率 E_0 と全体平均値 $(E_0)_{ave}$ の違いに大きな影響を与えている。現場締固め供試体の鉛直深度方向の変形特性はこれらのことを考慮して評価することが必要である。

謝　辞

本論文は筆者が東京大学工学系研究科社会基盤学専攻に在籍し，東京大学古関潤一教授にご指導頂きながらまとめた成果の一部です。末筆ではございますが，感謝の意を申し上げます。

参考文献

1）Tatsuoka, F., Hashimoto, T. and Tateyama, K. : Soil stiffness as a function of dry density and the degree of saturation for compaction control, Soils and Foundations, Vol. 61, pp. 989–1002, 2021.
2）Moony, M.A. and Adam, D. : Vibratory roller integrated measurement of earthwork compaction : An Overview, 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics 2007, pp. 1–12, 2007.
3）Heitor, A., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C.（2016）. Small strain behavior of compacted subgrade soil, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics（ICTG2016）, Vol. 143, pp. 260–267, 2016.
4）冨田佑一，古関潤一，龍岡文夫：現場と室内で締め固めた砂質土供試体の非一様性の評価と強度変形特性への影響，地盤工学ジャーナル，Vol. 16, No. 4, pp. 355–369.
5）冨田佑一，古関潤一，龍岡文夫：現場締固め砂質土の強度変形特性の各種影響要因を表現した経験式，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 78, No. 3, pp. 197–209, 2022.
6）Zhao, C., Koseki, J. & Sasaki, T. : Image based local deformation measurement of saturated sand specimen in undrained cyclic triaxial tests, Soils and Foundations, Vol. 58, pp. 1313–1325, 2018.
7）Sasaki, T., Kawamura, S. and Koseki, J. : Liquefaction properties of two types of sandy soil specimens with different compaction thickness, GeoChina 2021 : Advances in Innovative Geotechnical Engineering, pp. 19–30, 2021.
8）Thomson, P.R. and Wong, R.C.K. : Specimen nonuniformities in water-pluviated and moist-tamped sands under undrained triaxial compression and extension, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, No. 7, pp. 939–956, 2008.
9）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, vol. 31, No. 1, pp. 169–180, 1991.

EVALUATION OF LOCAL DEFORMATION CHARACTERISTICS BY TRIAXIAL TESTS OF NON-UNIFORM SANDY SOIL SPECIMENS COMPACTED IN THE FIELD AND IN THE LABORATORY

Y. Tomita

Strength and deformation characteristics of compacted soils are usually evaluated by a triaxial compression tests of specimens, which are compacted relatively uniformly in the laboratory. The compacted soil by the vibration rollers in the field is non-uniform in the vertical depth direction because the gradient of dry density and saturation degree in the depth direction of each compaction layer by the distribution of the load transmitted from the contact surface is large. As a quality control method for earth filling works, nondestructive inspection such as soil stiffness index is sometimes applied, but the average value of non-uniform compaction layers is measured. Therefore, unsaturated specimens retrieved from the test fill produced by the field compaction test and specimens produced by compaction using the same soil in the laboratory were prepared, and triaxial compression tests were performed. Local displacement transducers were installed to evaluate the local deformation characteristics according to the vertical depth of the specimen and compared with the average deformation characteristics of the whole specimen. As a result, it was found that the local low stiffness part had a large effect on the overall average and could not be neglected, because the specimen compacted in the field was non-uniform.