

砂質土の締固め特性を踏まえた地盤剛性指標の活用 の 妥当性に関する検討

中央大学大学院 学生会員 ○樋口駿之介 戸舘宗一郎
中央大学 正会員 平川大貴

1. はじめに：土構造物の安定性向上への社会的要求に高まりに伴って締固め管理基準値(締固め度 D_c)の増加が求められつつある。砂質土で設定 D_c 値を増加させると低含水比状態ではコラプス挙動、高含水比状態では過転圧の問題が大きくなる。そのため、要求性能の向上に対応するには使用する土の物性を踏まえて締固め範囲(含水比 w と乾燥密度 ρ_d の範囲)と締固め層厚を設定することが求められる。基本的な物性把握として行われる「突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)：以下、突固め試験と表記」実施時に地盤剛性指標を測定することで、要求性能に見合った締固め範囲の設定に繋がると考えられる。本研究では、突固め試験に併せて山中式土壌硬度計による硬さ測定、ポータブルコーン貫入試験(単管式)、FWD 試験を実施し、 w — ρ_d —地盤剛性指標の関係性を集約することの利点、および各種の地盤剛性指標の整合性を検討した。

2. 使用材料と実験条件：本研究では良配合の山砂(土粒子密度 $\rho_s=2.680 \text{ g/cm}^3$, 平均粒径 $D_{50}=0.2 \text{ mm}$, 細粒分含有率 $F_c=4.0\%$)を用いた。この砂質土の締固め特性(後述、図-1a)と強度変形特性は良好である。1.0 E_c (突固め試験 A-b 法)での(最適含水比 w_{opt} , 最大乾燥密度 ρ_{dmax})は(17.2%, 1.620 g/cm^3)であり、この条件での内部摩擦角 ϕ は 43.5°と高いことを三軸圧縮試験(飽和・CD 条件)より確認している。

本研究では、まず、 $\phi 100 \text{ mm}$ のモールド(=突固め試験, A 法)を用いて w — ρ_d —地盤剛性指標の関係性を把握した。突固め試験で w — ρ_d 関係を求めた後、山中式土壌硬度計および三軸試験でその締固め条件(締固めエネルギー E_c , w , ρ_d)での力学的指標(地盤剛性指標, 剛性および強度)を算出し、各指標が最大となる(w , ρ_d)条件を比較した。三軸試験は締固めで構築した土骨格の強さに注目するために飽和・CD 条件とした。山中式土壌硬度計の計測は突固め時(不飽和状態)だけではなく、モールド全体を水浸させ、マトリックスサクションを取り除いて三軸試験(飽和・CD 条件)結果と等価な状態の2条件で測定した。突固め試験は小型・簡便であるため、飽和化に伴う供試体の硬さの変化を把握しやすい。すなわち、突き固めた供試体に対して水浸状態でも硬さを測定することでその(E_c , w , ρ_d)条件でのコラプス挙動の程度を、異なる E_c での測定値を比較することで過転圧の挙動の程度をおおよそ把握できる。

次に、不飽和状態(突固め状態)のみに限定して地盤剛性指標の算出方法について検討した。算出方法は、前述の山中式土壌硬度計(標準型)とポータブルコーン貫入試験(単管式)(以下、CPT 試験)および FWD 試験(平板径 150 mm, 重錘重量 78.5 N, 落下高さ 100 mm)の3種類である。FWD 試験は、本研究では平板への急速載荷試験と位置付けている。山中式土壌硬度計と CPT 試験はともに貫入試験であるが、両試験で構造が異っており、山中式土壌硬度計は先端部がバネで支持されている。供試体は JIS A 1210 で基準化されているモールド($\phi 100 \text{ mm}$)では測定ができないため、プラスチック製円筒土槽($\phi 280 \text{ mm}$)を用いて突き固めて作製した。締固め方法は突固め試験に基づき、与えたエネルギーは A 法ランマーで 1.0 E_c (=約 550 kJ/m^3)となるようにした。

3. 結果と考察：土壌硬度計(不飽和/水浸状態)と三軸試験(飽和・CD 条件)で得られた w — ρ_d —力学的指標の関係の比較を図-1に示す。図-1a は w — ρ_d 関係、図-1b は土壌硬度計(不飽和/水浸状態)で算出した地盤剛性指標(支持強度)の分布、図-1c&d は三軸試験で算出した初期剛性 E_{ini} および最大偏差応力 q_{max} の分布を表している。 E_{ini} は局所変位計(LDT)で測定しており、ひずみレベル約 10⁻³%での値である。図-1a&b より、 w_{opt} より乾燥側ではコラプス挙動が現れていることが見てとれる。一方で、 w_{opt} より湿潤側では E_c の増加に対して支持強度が増加しない、あるいは低下する挙動が現れており、過転圧が明確に生じていることが確認できる。また、不飽和/水浸のいずれの状態においても支持強度が最大となる条件は w_{opt} よりやや乾燥側であり、いずれの状

キーワード 砂質土 締固め特性 地盤剛性指標

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学大学院理工学研究科 TEL 03-3817-1799

態も飽和度 S_r で表現することができる。今回検討した山砂では、水浸状態において $S_r=65\%$ の (E_c, w, ρ_d) 条件において最も強度が大きくなっている。この傾向は三軸試験より得られた E_{ini} において同様である。以上の結果は、締固め土に対して何らかの力学的パラメータの情報を追加することで、突固め試験結果からコラプスおよび過転圧の挙動を避けて強度を最大とする (E_c, w, ρ_d) 条件を見出せることを示唆している。

この点を確認するために、 $1.0E_c$ ・不飽和状態において w の推移に伴う b)FWD 試験, c)CPT, および d)土壌硬度計で測定した各種の地盤剛性指標の変化を比較した結果を図-2 に示す。模型地盤が硬く人力による貫入には限界があったため、CPT (図-2c) は円錐部分のみ貫入した状態(貫入深さ 53.5 mm)でのコーン貫入抵抗 q_c を算出している。また、締固め曲線(図-2a)では、参考までに JIS モールド ($\phi 100$ mm, A 法)で算出された $w-\rho_d$ 曲線(図-1a)もあわせて示した。 $\phi 280$ mm で得られた締固め曲線は $\phi 100$ mm (JIS A 1210, A 法)のモールドと一致せず、 w_{opt} 値はやや乾燥側、 ρ_{dmax} 値はやや大きめとなったが、同じ容器で求めた結果の相対的な比較は可能と考えられる。図-2 より、FWD 試験で得られた地盤反力係数 $K_{P,FWD}$ ²⁾, CPT のコーン貫入抵抗 q_c , 山中式土壌硬度計(標準型)での支持強度のいずれにおいても剛性指標が最大となる w 条件は概ね一致していることが確認できる。 w_{opt} より乾燥側の含水状態で強度・剛性が最大となることは多くの盛土材で確認されている特徴³⁾であり、三軸試験での強度・剛性(図-1)とも一致している。以上より、貫入系・载荷系の区別なく、地盤剛性指標を算出する様々なサウンディング・原位置载荷試験で締固めた土の状態を把握できることが確認された。この結果は、施工時の品質管理の向上においても重要な知見だと考えられる。

4. まとめ：土を締め固める際に強度インデックスの情報を加えることで砂質土の締固め特性を把握し、その妥当性を三軸圧縮試験や円筒土槽を用いた模型実験で検討した。その結果、いずれの地盤剛性指標を用いても土の締固め条件による強度分布には類似性があり、三軸試験より得られるの強度・剛性値との整合性が確認された。締固め土に対して貫入系、载荷系を問わず何らかの地盤剛性の情報を加えることで、効率的な品質管理の実現が期待される。

参考文献：1)日本道路協会編：道路土工—盛土工指針(平成22年度版)，2010 2)樋口駿之介ら：砂質土の締固めにおける地盤剛性指標の活用に関する考察，第58回地盤工学研究発表会(投稿中)，2023 3)地盤工学会関東支部 土構造物の要求性能の実現を目指した盛土締固め管理の合理化に関する研究委員会編集：土の締固め管理—現状・新たな展開・展望—，総合土木研究所，2022。

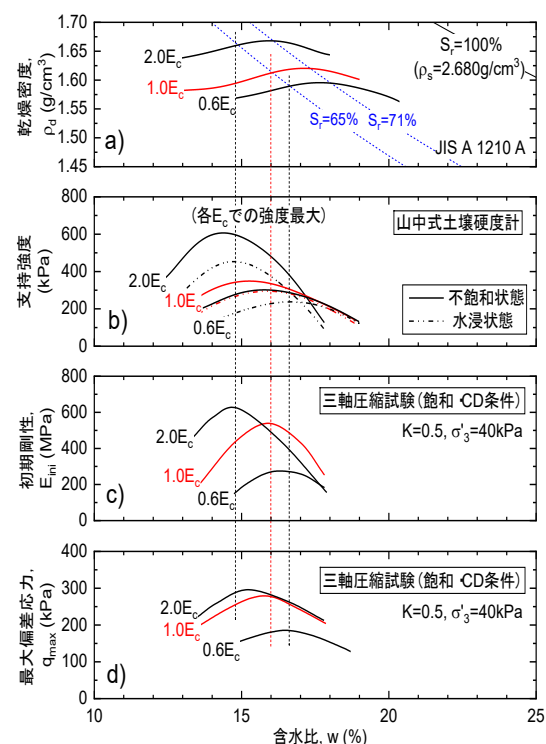


図-1 山中式土壌硬度計および三軸圧縮試験の結果より得られた $w \sim$ a) ρ_d , b) 支持強度, c) E_{ini} , d) q_{max} 関係

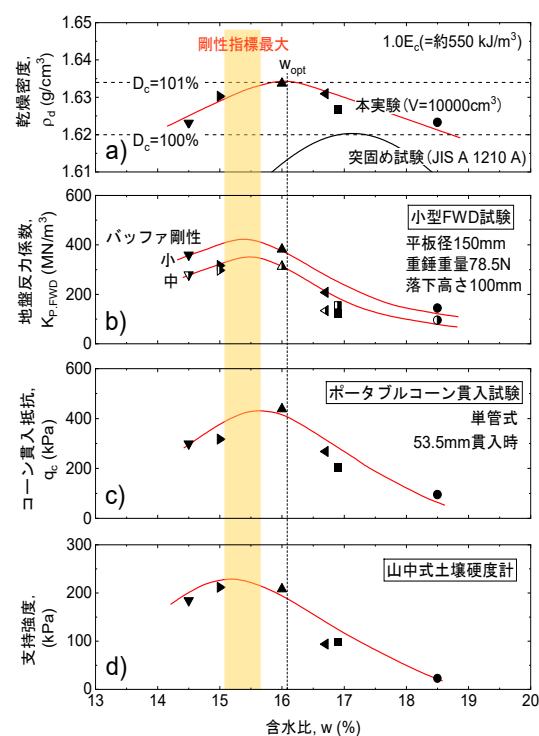


図-2 各地盤剛性指標の相関性、 $w \sim$ a) ρ_d , b) $K_{P,FWD}$, c) q_c , d) 支持強度関係