

## 締固め時飽和度と締固め度を用いた盛土の強度・剛性評価式の一例

鉄道総合技術研究所 (正) ○中島進, 笠原 康平, 藤本 達貴

ジェイアール総研エンジニアリング (非) 中川 洋二

**1. はじめに** 鉄道盛土の施工は、重要度や軌道構造から定まる性能ランクに応じて、材料規定・施工管理規定（例：締固め度  $D_c$ 、地盤の剛性  $K_{30}$  値）が設定されている<sup>1)</sup>。これらの規定に準拠して築造された盛土は安定的に供用されている。しかし、剛性については  $K_{30}$  値を用いて直接的な指標で管理をしているが、特に強度については室内・現場の締固めエネルギーが異なることもあり、現行の施工管理で実現される盛土の性能は必ずしも明らかではない。一方で、合理的な締固めに関する研究が近年進められている<sup>2)</sup>。こうした成果の活用により、現行の締固め管理で実現される鉄道盛土の性能が明らかになれば、これを実現可能な締固めを行うことで、材料規制を緩和することも可能と考えられる。そこで、系統的な三軸圧縮試験<sup>3)</sup>や施工試験<sup>4)</sup>により、鉄道盛土の締固め管理により実現される盛土の強度・剛性の評価式の一例が得られたので、その内容を報告する。

**2. 三軸圧縮試験** 稲城砂を対象とした三軸圧縮試験を実施し、締固め度および含水状態が締固め後の盛土の強度・剛性に及ぼす影響を把握した。図1に三軸圧縮試験の実施条件をまとめる。図1中の数字は試験ケースを示すが、含水条件として最適飽和度  $S_{ropt}$  に対して、乾燥側  $S_{rL}$ 、湿潤側  $S_{rU}$  とし、4.5Ec の締固め試験に基づく最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  を基準として  $D_c$  を変化させて試験を行った。締固め後に所定の  $S_r$  となるように供試体の含水比を調整し、突き固めにより供試体を作製した。その後、拘束圧  $\sigma_c=50\text{kPa}$  まで圧密しせん断を行った。なお、Case35、36は所定の  $S_r$  となるように作製した供試体を通水により見かけ飽和とした後に、圧密・せん断を行った。

三軸圧縮試験結果の一例として、せん断過程の軸差応力と軸ひずみの関係を図2に示す。 $S_r \cdot D_c$  が供試体の変形強度特性に大きな影響を及ぼすことが明らかである。図2をもとに、ピーク時の動員内部摩擦角  $\phi_{peak} = \sin^{-1}((\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3))$  と盛土の施工管理

に用いる  $K_{30}$  値と同様のひずみレベルにおけるヤング率  $E_{0.1\%}$  の関係を図3にまとめる。 $S_r$  一定の場合の  $\phi_{peak}$ ・

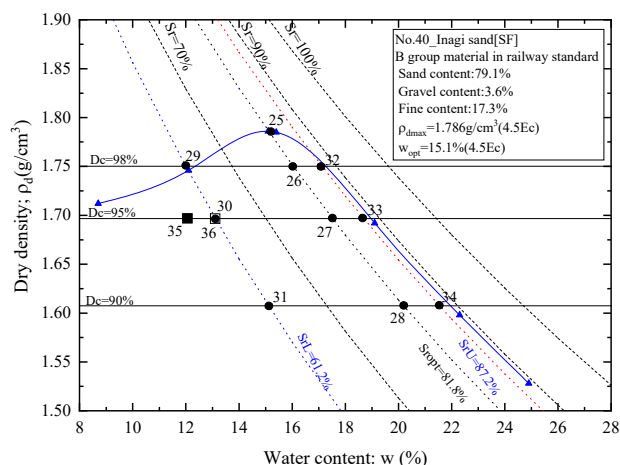


図1 三軸試験の実施条件

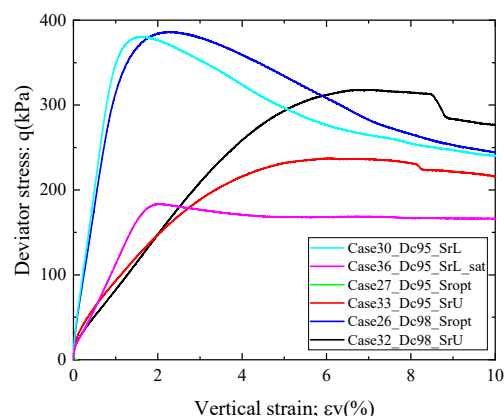


図2 三軸圧縮試験結果の例

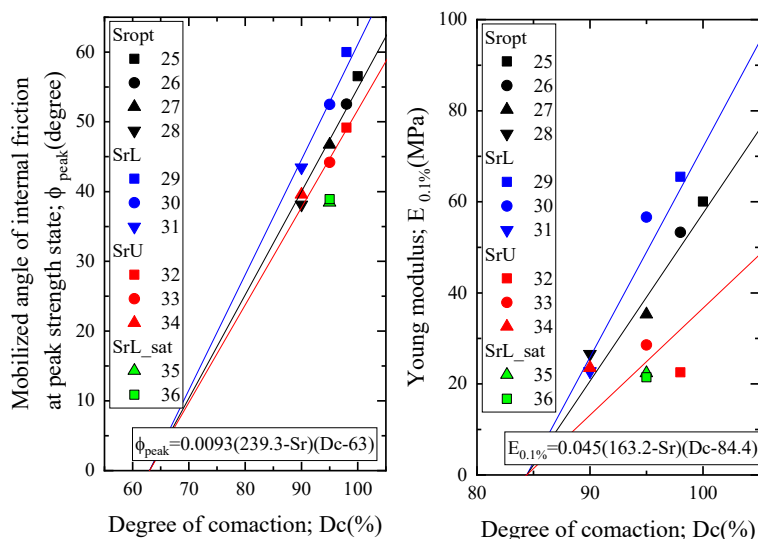


図3 強度・剛性と  $S_r \cdot D_c$  の関係

$E_{0.1\%}$ は概ね  $D_c$  の増加に対して線形的に増加し、図3中に示す式で  $S_r \cdot D_c$  (ただし、 $4.5E_c$  で定義) を関数として、表現可能である。また、供試体の初期飽和度が  $S_{rL}$  の場合でも、見かけ飽和による飽和度の増加に伴い  $\phi_{peak}$  が 30%程度 ( $55^\circ \rightarrow 40^\circ$ )、 $E_{0.1\%}$  が 66%程度 ( $60\text{MPa} \rightarrow 20\text{MPa}$ ) 減少することから、施工時の含水比管理や盛土供用時の排水が重要なことが示唆される。

### 3. 強度・剛性の分布図

前述した強度・剛性の関係式に基づき、 $\rho_d$  と  $w$  の関係上に強度・剛性の等高線を描いた結果を図4に示す。赤線は剛性の等高線、黒線は強度の等高線を示している。ただし、剛性については、図4に

示す弾性力学の式展開に基づき、前述した算定式で求めた  $E_{0.1\%}$  を  $K_{30}$  値に換算した値を示している。なお、換算に用いたポアソン比  $\nu$  は、三軸圧縮試験で実測したひずみレベル 0.1% における実測値である。同一の  $D_c$  でも、 $S_r$  に応じて  $\phi_{peak} \cdot E_{0.1\%}$  は大きく異なる<sup>2)</sup>。一例として、 $4.5E_c$  の締固め曲線と  $D_c=95\%$  の直線で区切られる範囲である  $w=9 \sim 19\%$  においても、 $\phi_{peak}$  は  $45^\circ$  から  $60^\circ$ 、 $K_{30}$  は 100 から  $175\text{MN/m}^3$  の範囲で変動する。

三軸圧縮試験で評価したこの関係が、実際の盛土の状態をどの程度反映しているのかを検証するために、盛土の施工試験<sup>4)</sup> から供試体をサンプリングし、三軸圧縮試験を行った。施工試験では、幅  $4.0\text{m} \times$  奥行  $4.5\text{m}$  の土槽内に、高さ  $1.2\text{m}$  の盛土を構築した。 $4.5E_c$  の  $D_c$  に対して  $D_c=90\%$  以上を目標とした Case3 と、 $1.0E_c$  に対して  $D_c=90\%$  以上とした Case5 について、供試体をサンプリングし、前述した三軸圧縮試験と同一の方法で試験を実施した。その試験結果も図4中に [Case3\_TC]、[Case5\_TC] として示している。[Case3\_TC] では、 $\phi_{peak}=49.7^\circ$ 、 $K_{30}=34.54\text{MN/m}^3$ 、[Case5\_TC] では  $\phi_{peak}=39.0^\circ$ 、 $K_{30}=69.00\text{MN/m}^3$  であった。前述した三軸圧縮試験で求めた等高線に対して、サンプリング試料で得られた  $\phi_{peak}$  は、調和的な結果を示している。これに対して、 $K_{30}$  については等高線に対する乖離が大きかった。これは、比較的小さなひずみレベルを対象とした剛性を比較しているため、サンプリングによる攪乱の影響が大きかったことなどによると考えられる。

そこで、図4には笠原らによる施工試験<sup>4)</sup> で施工管理として計測した  $\rho_d$ 、 $w$  と小型 FWD 試験で計測した  $K_{30}$  値もそれぞれ [Pit2]、[Pit3]、[Pit5] として図示している。要素試験から評価した  $K_{30}$  値は、施工試験の結果よりも小さいものの、 $K_{30}$  値の変化傾向は概ね整合している。例えば、[Pit2]、[Pit3] の  $K_{30}$  値は概ね同等であるが、これは、[Pit2] と [Pit3] を比較した場合、密度増加に伴う剛性の増加と飽和度の増加に伴う剛性の減少が相殺された結果と解釈され、その傾向は等高線においても再現されている。

### 5. おわりに

要素試験結果と小型 FWD の計測値の差異については、今後の検討課題であるが、要素試験結果から得られた盛土の強度・剛性の評価式が、実際に締固められた盛土の強度・剛性に概ね対応することを確認した。この知見を活用し、現行の締固め管理で実現される盛土の強度・剛性を明らかにすることで、合理的な締固め管理の実現を目指したい。なお、本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

**参考文献** 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物、2007。 2) 龍岡ら：盛土の締固め管理における飽和度とエネルギーの管理の意義、第54回地盤工学研究発表会、pp.703-704、2019。 3) 藤本ら：三軸圧縮試験による鉄道盛り土の締固め度と剛性及び強度に関する検討、第55回地盤工学研究発表会、2020（投稿中）、4) 笠原ら：小型施工試験による鉄道盛り土の締固め度と剛性および強度に関する検討、第55回地盤工学研究発表会、2020（投稿中）

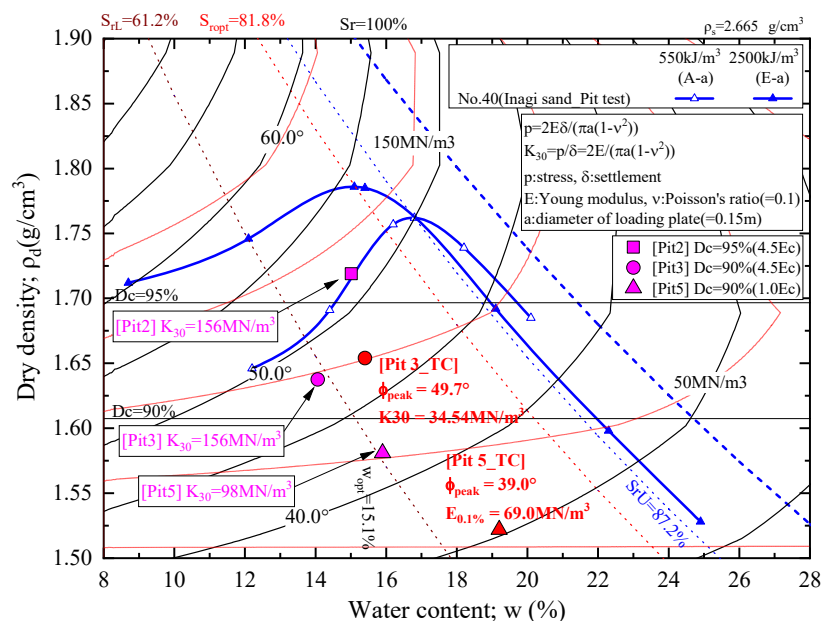


図4 強度・剛性の等高線図