

鉄道盛土の締固め度と剛性及び強度に関する実験的検討 その2 (要素試験)

盛土 締固め 三軸圧縮試験

鉄道総合技術研究所

正会員 ○藤本 達貴 笠原 康平

国際会員 中島 進

複合技術研究所

木口 峰夫

1. 研究背景

土構造物が崩壊した場合、早期・低コスト・強化復旧が求められるが、鉄道路構造物（盛土、擁壁）の構築に適用可能な盛土材料には厳格な規定が設定されており、購入土により復旧が行われることが多く、早期復旧の制約となっている。そこで、筆者らは、現行の材料・施工管理規定のもとで実現される盛土の性能を明らかにすることで、使用できる盛土材料を拡張するための新しい施工管理指標を提案することを目的として研究を進めている。笠原らの小型施工試験¹⁾では、「鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物²⁾（以下、「土構造標準」）」で規定される下位の土質材料でも、締固め度を高めることで上位材料相当の剛性や支持力を得られる可能性があることが示された。一方で、小型施工試験¹⁾では特定の試験条件のみの検討となっており、含水比など締固め条件の影響に対しては未検討である。

そこで本稿では、締固め度および締固め時の飽和度を系統的に変化させた三軸圧縮試験を行い、締固め条件が、強度および剛性に及ぼす影響について分析した。

2. 試験条件と評価方法

試験に用いる材料は、稲城砂および荒木田砂を用いた。それぞれの工学的分類は、稲城砂がSF、荒木田砂がCLとなり、「土構造標準」で規定されるB群材料、C群材料となる。

試験にあたっては、直径70mm、高さ140mmの供試体に整形し、所定の拘束圧（50kPa・100kPa・150kPa）まで等方圧密した後、不飽和状態のまま排気・排水条件にて、鉛直軸ひずみ速度を0.05%/minで鉛直軸ひずみ15%まで単調に載荷した。

締固め度および締固め時飽和度の試験条件を表1に示す。また、それぞれのCaseについて締固め曲線上へプロットしたものを図1および図2に示す。締固め度は4.5E_cの ρ_{dmax} を基準として、90%、95%、98%、100%（100%は稲城砂のみ）とし、飽和度は「 ρ_{dmax} が得られる最適飽和度 Sr_{opt} 」³⁾、それよりも乾燥側の Sr_L 、湿潤側の Sr_U とした。また、せん断にあたっては、Case11, 21は飽和条件とし、その他のケースは不飽和条件にて実施した。

試験結果の評価に関して、強度については最大軸差応力状態における動員内部摩擦角 $\phi_{peak} (= \sin^{-1}((\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)))$ にて評価した。また、剛性の評価にあたっては、鉄道路構造物の施工管理に用いる鉛直ひずみ0.1%相当のひずみレベルにおける剛性を、拘束圧依存性を考慮して拘束圧の平方根で正規化した正規化ヤング率 $[E_{0.1\%}/\sigma_3^{0.5}]$ を用いた。

表1 試験ケース一覧

ケースNo.	群分類	試料名称	工学的分類	締固め度 D_c (%)	供試体作成時飽和度 Sr_c (%)	供試体作成時含水比 w (%)	備考
CASE1	B群	稲城砂	SF	100	Sr_{opt} (81.8%)	15.1	-
CASE2				98		16.0	-
CASE3				95		17.5	-
CASE4				90	20.2	-	
CASE5				98	Sr_L (61.2%)	12.0	-
CASE6				95		13.1	-
CASE7				90		15.1	-
CASE8				98	Sr_U (87.2%)	17.1	-
CASE9				95		18.7	-
CASE10				90		21.5	-
CASE11				95	61.2%→100%	12.0	見かけ飽和
CASE12	C群	荒木田	CL	98	Sr_{opt} (79.6%)	16.4	-
CASE13				95		17.9	-
CASE14				90		20.5	-
CASE15				98	Sr_L (60.2%)	12.4	-
CASE16				95		13.5	-
CASE17				90		15.5	-
CASE18				98	Sr_U (86.5%)	17.8	-
CASE19				95		19.4	-
CASE20				90		22.3	-
CASE21				95	60.2%→100%	12.4	見かけ飽和

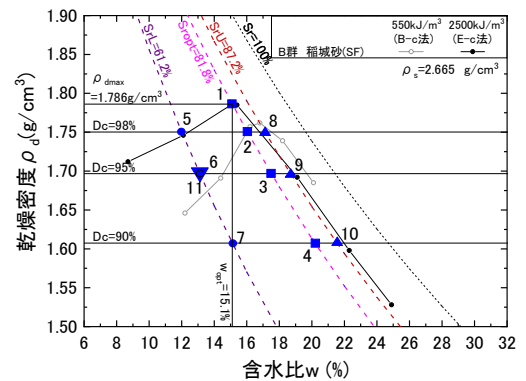


図1 B群(稲城砂)の締固め曲線と試験ケース

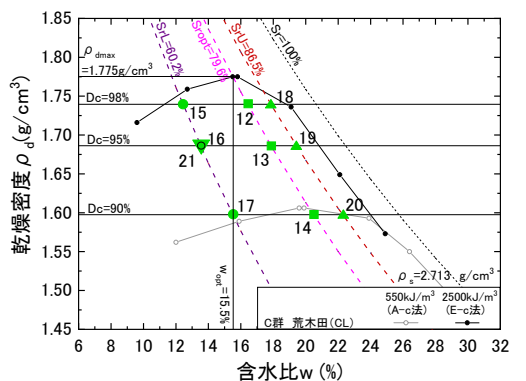


図2 C群(荒木田)の締固め曲線と試験ケース

3. 実験結果

試験結果の一例として、拘束圧が 150kPa での $S_{r_{opt}}$, S_{r_L} , S_{r_U} それぞれの飽和度における、締固め度 D_c と動員内部摩擦角 ϕ_{peak} の関係を図 3 に、締固め度 D_c と正規化ヤング率 $[E_{0.1\%}/\sigma_3^{0.5}]$ の関係を図 4 に示す。図 3 より同一飽和度の場合には締固め度を高めることで強度は増加していき、また飽和度が高くなるに従い強度は低下していくこと、締固め度の増加による強度増加は小さくなる傾向がみられる。また剛性については、 S_{r_L} および $S_{r_{opt}}$ については強度と同様の傾向がみられるが、飽和度が高い S_{r_U} については、締固め度を高めても剛性は増加しない結果となった。

ここで、「土構造標準」では、笠原らの文献¹⁾に示した通り、土構造物の要求性能や重要度等により定まる性能ランクに応じて使用可能な材料の種類を規定しており（例えば性能ランク II では A 群材料および B 群材料が非改良で使用可能）、また、表 2 で示すように、施工時の締固め度 D_c と地盤の剛性 K_{30} 値に管理基準値を設定し、盛土の品質を確保している。これを踏まえて図 3 を見ると、C 群の締固め度を 95%以上とした場合には、土構造標準における性能ランク II 相当の規定である B 群材料の $D_c=90\%$ 以上の強度を発現可能であることが確認でき、図 4 のヤング率も S_{r_U} を除いた飽和度で B 群材料の $D_c=90\%$ 以上となっている。これらの結果は、C 群材料であっても締固め度を高めることで、性能ランク II の盛土材料として使用可能であることを示唆している。なお、この結果は拘束圧 50kPa、100kPa でも同様の結果となり、また、笠原らによる小型施工試験²⁾とも一致する結果となる。ただし、飽和度が高い S_{r_U} では、ヤング率が稲城砂の $D_c=90\%$ よりも小さくなることや、乾燥側の S_{r_L} (Case6 および Case16) をせん断前に飽和したケースである Case11 および Case21 に着目すると、表 3 にも示す通り、B 群材料である稲城砂の飽和による強度および剛性の低下率よりも、C 群材料の低下率が大きくなっており、これは、C 群材料には、浸水によって強度および剛性が急激に低下する可能性を示唆している。そのため、C 群材料の適用性については、浸水の影響などを踏まえてさらなる検討を進めていく必要がある。

また、笠原らの小型施工試験²⁾において、B 群材料（稲城砂）の $D_c=90\%$ ・含水比 $w=13\%$ のケースと $D_c=95\%$ ・含水比 $w=15\%$ の K_{30} 値および極限支持力にほとんど変化が見られなかった理由について考察する。本研究において、上記と同様に、締固め度が 5%・含水比が 2%程度異なるケースの代表として、Case7 ($D_c=90\%$ ・含水比 $w=15\%$) と Case3 ($D_c=95\%$ ・含水比 $w=17.5\%$) を比較すると、図 3 および図 4 における ϕ_{peak} や $E_{0.1\%}/\sigma_3^{0.5}$ は 2 つのケースで近い値を示しており、このことは小型施工試験²⁾で締固め度を高めても K_{30} 値や極限支持力に変化が無かったことを表現している可能性がある。これらより、新しい施工管理指標について研究を進めていくにあたっては、締固め時における飽和度（や含水比）の管理も含めて検討していく必要があると考える。

4. おわりに

本稿では、締固め度および締固め時の飽和度を系統的に変化させた三軸圧縮試験を行い、締固め条件が、強度および剛性に及ぼす影響について分析した。その結果、締固め度を高めることで「土構造標準」で規定される下位の土質材料でも上位材料相当の強度や剛性を得られる可能性があることが示された。ただし、下位の C 群材料は飽和度が高い条件では強度および剛性が急激に低下する結果も見られ、使用できる盛土材料の拡張にあたってはさらなる検討が必要である。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

- 笠原康平, 藤本達貴, 中島進: 鉄道盛土の締固め度と剛性及び強度に関する実験的検討 その 2 (要素試験), 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020 (投稿中).
- 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土留め構造物, 丸善出版, 2012.
- 龍岡文夫ら: 地盤工学・技術ノート, 盛土の締固め 1~20 回, 雑誌「基礎工」, 2013 年 7 月号-2015 年 2 月号, 2013-2015.

表 2 土構造標準の締固め管理規定 (抜粋)

性能ランク	上部盛土(施工基面から3mの範囲)		下部盛土(上部盛土以外の範囲)
	締固め度 K_{30} 値		締固め度
II	平均値90%以上 (下限値87%)	平均値70MN/m ³ 以上 (下限値50MN/m ³ 以上)	平均値90%以上 (下限値87%)

表 3 S_{r_L} と Sat の比較

	B群材料		C群材料	
	S_{r_L} (Case6)	Sat (Case11)	S_{r_L} (Case16)	Sat (Case21)
ϕ_{peak} (°)	41.7	33.9 (0.81)	47.7	32.4 (0.68)
$E_{0.1\%}/\sigma_3^{0.5}$ (MPa)	8.0	6.2 (0.78)	9.6	3.8 (0.40)

※カッコ内は S_{r_L} を 1 とした場合の比率

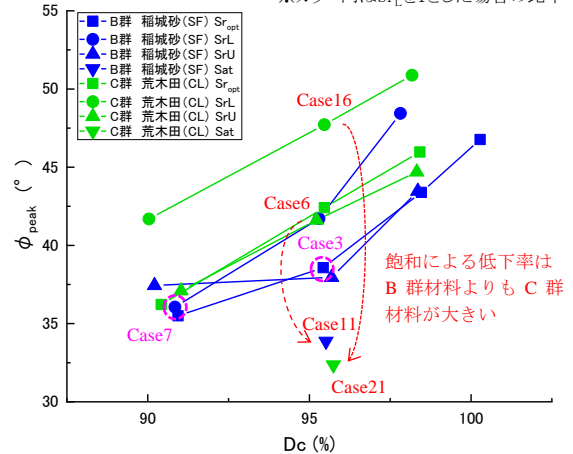


図 3 D_c と ϕ_{peak} の関係 (拘束圧 150kPa)

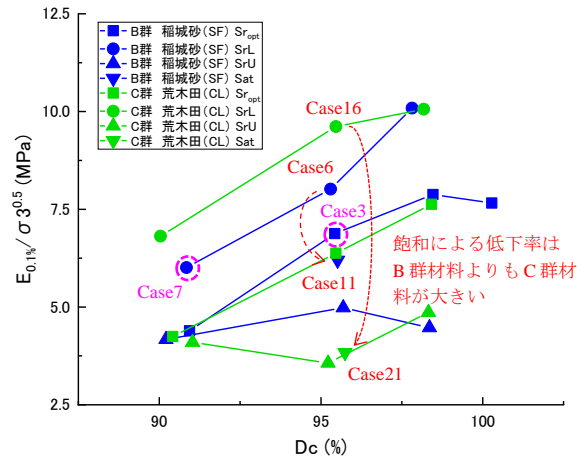


図 4 D_c と $E_{0.1\%}/\sigma_3^{0.5}$ の関係 (拘束圧 150kPa)