締固めを厳密化した盛土の実規模繰返し載荷試験

鉄道総合技術研究所　（正）○冨田 佳孝　中島 進　藤本 達貴　笠原 康平　中村 貴久　桃谷 尚嗣
複合技術研究所　森腰 慎一

１．はじめに　鉄道盛土に適用可能な盛土材料には「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物[1]（以下，「土構造標準」とする）」において厳格な規定が設定されており，早期復旧の制約となる場合がある．そこで，筆者らは盛土施工管理指標の厳密化により適用材料の拡張に取り組んでおり，笠原ら[2]は土構造標準におけ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を示したが，藤本ら[3]の要素試験では湿潤・飽和時における強度・剛性の低下が懸念されている．本研究では実際の鉄道盛土での適用を想定して鉛直方向の繰返し載荷試験を降雨作用を模擬して散水を加えながら行い，下位の土質材料を用いた盛土と土構造標準の盛土との累積変形に関する相対比較を行った．

２．実験方法　本研究は鉄道総研が所有する基礎の動静的載荷試験装置を用いて，非排水のせん断ピット内(幅 2 m×奥行 2 m×深さ 3 m)に表 1 に示すバラスト軌道とそれを支持する盛土を構築し，1 本の PC まくらぎに鉛直方向の繰返し載荷を行った．

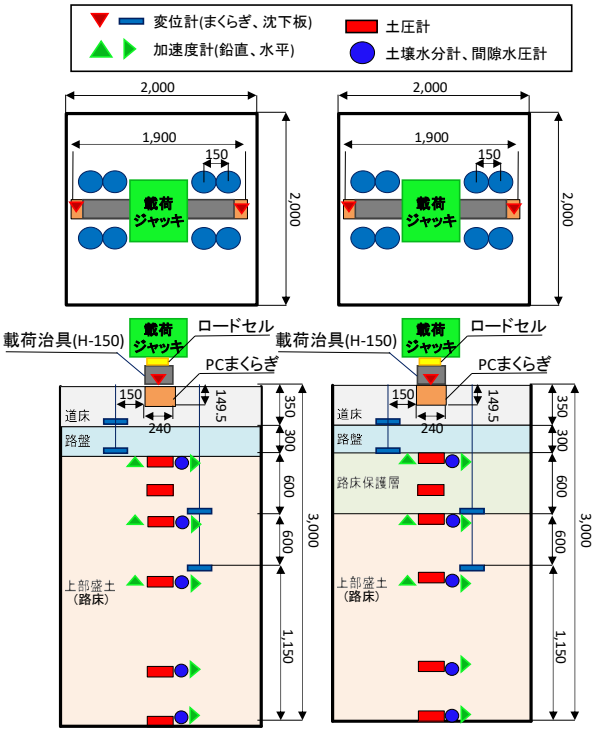
Case1 は土構造標準に準じた仕様とした．Case2 は土構造標準に不適合な材料を用いた仕様として，C 群材料(CL)を締固めエネルギー4.5 Ec の締固め度 90%以上で，基準となる地盤反力係数を 110MN/m^3 以上とした．また，豪雨時の湿潤，飽和化に伴う路床の剛性低下の影響軽減及び噴泥防止を目的とした路床保護層を設置した．Case3 は Case2 に路床保護層の無い仕様とした．

載荷は荷重制御方式で行い，載荷周波数は 7Hz，載荷荷重は EA-17 荷重を既往研究[4]からまくらぎ 1 本の荷重分担率を 40%とし，荷重振幅を 80kN に設定した．載荷回数は 200 万回で行い，一日あたり 20 万回の載荷とし，各日の載荷終了時には除荷を行った．100 万回載荷以降は，飽和度上昇時の影響を確認するため，道床表面から散水し 200 万回までの載荷を行った．散水量は土構造標準では，排水設備設計用の降雨作用として 5 年確率相当の降雨(150 mm/h)が 10 分間継続した状態を設定していることから，これに対応する量として，基準散水量を 120L に設定した．その上で，飽和度の上昇傾向や沈下の増加傾向等に応じて，1 日目が基準散水量の 120L，2・3 日目を 240L，4・5 日目を 360L とした．なお，Case3 の盛土は GL-1.25 m 以深は飽和度が上昇した状態の Case2 の地盤を残置し、以浅を再構築した条件で載荷を実施した．計測器配置は図 1 のとおりとし，Case2，3 には過剰間隙水圧を観測するため間隙水圧計を設置した．

表 1 試験ケース

Case名		使用材料および締固め基準			
		上部盛土	路床保護層	路盤	道床
Case1	使用材	稲城砂(B群)	—	C-40	道床バラスト
	締固め	Dc=90%(@1Ec)*		Dc=95%(@4.5Ec)*	Dc=98%(@4.5Ec)
	剛性	$K_{30} \geq 70MN/m^3$		$K_{30} \geq 110MN/m^3$	$K_{30} \geq 110MN/m^3$
Case2	使用材	荒木田(C群)	M-40	C-40	道床バラスト
	締固め	Dc=90%(@4.5Ec)*	Dc=95%(@4.5Ec)*	Dc=95%(@4.5Ec)*	Dc=98%(@4.5Ec)
	剛性	$K_{30} \geq 110MN/m^3$	$K_{30} \geq 110MN/m^3$	$K_{30} \geq 110MN/m^3$	$K_{30} \geq 110MN/m^3$
Case3	使用材	荒木田(C群)	—	C-40	道床バラスト
	締固め	Dc=90%(@4.5Ec)* GL-1.25m以深はCase2を残置		Dc=95%(@4.5Ec)*	Dc=98%(@4.5Ec)
	剛性	$K_{30} \geq 110MN/m^3$		$K_{30} \geq 110MN/m^3$	$K_{30} \geq 110MN/m^3$

*含水比は最適含水比付近とする



a)Case1,Case3　　b)Case2

図 1　模型仕様および計測器の配置
(上：平面図、下、断面図)

キーワード　盛土，粘性土，締固め，繰返し載荷試験，災害復旧，実規模
連絡先　〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　（公財）鉄道総合技術研究所 基礎・土構造 TEL 042-573-7261

© Japan Society of Civil Engineers

3．実験結果　Case1 の繰返し載荷時刻歴の抜粋を図 2 に示す. 応力および変位は深度方向に同位相で計測されており，伝搬し減衰していることがわかる.

まくらぎと路床沈下率の累積傾向を図 3 に示す. 変位量は動的載荷中の増分を抽出し, まくらぎ変位量は両側の変位計の計測値を平均化して算出した．また, 路床沈下率は路床天端に設置した沈下板の沈下量を各ケースの路床厚さで正規化した. Case1, 2 のまくらぎ沈下量は降雨時でも同程度の累積変形であった. また, Case3 では 100 万回載荷後までは沈下が少ないが, 降雨過程で沈下の増大傾向が顕著となり, 200 万回載荷後では最も沈下量が大きかった．一方，路床沈下率は Case1 に対し，Case2，3 は比較的小さく，まくらぎ沈下量と路床沈下率の大小が対応していない．これは，後述する道床・路盤の剛性低下と路床上面の剛性低下、応力状態変化の影響と考えられる.

次に, ピーク応力時における鉛直応力の深度分布を図 4 a)～ c)に示す．なお，Case2，3 の鉛直応力からは動的載荷直前までの静水圧の影響を控除している. Case1 は路床天端から 1.2m まで，Case2，3 は路床天端から 0.6 m までの鉛直応力が比較的大きい．200 万回載荷後に着目すると，Case3 では路床上部における鉛直応力の計測値が約 4 倍に増加している．これは，繰返し載荷に伴う過剰間隙水圧の発生や飽和に伴う路床剛性低下の影響により，この範囲の土圧計周辺の応力状態や境界条件が複雑に変化し，土圧計が載荷に伴う応力増分以外も計測した結果と考えられる．実際に Case3 では道床や路盤の沈下量が他ケースと比較して顕著であり，道床から路盤の顕著な剛性低下，それとともに生じた路床上面の剛性低下、応力状態変化により図 3 のまくらぎ沈下が急激に増加したものと考えられる。Case2 では路床保護層の効果により、そうした変化は限定的であり、Case1 とほぼ同等の性能を示した.

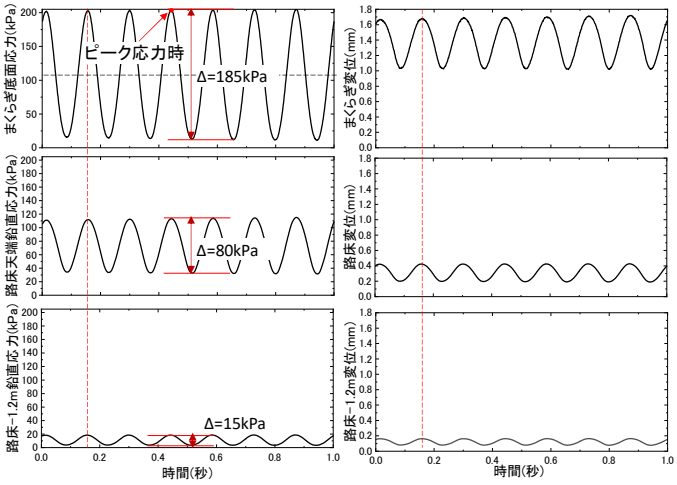


図 2 繰返し載荷時刻歴の抜粋(左：応力 右：変位)

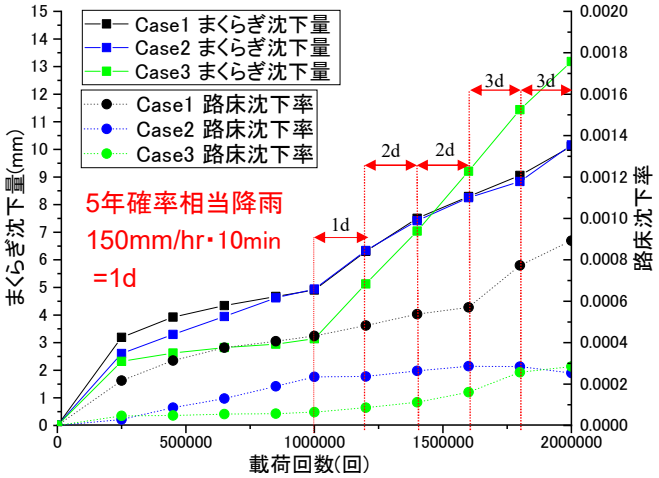
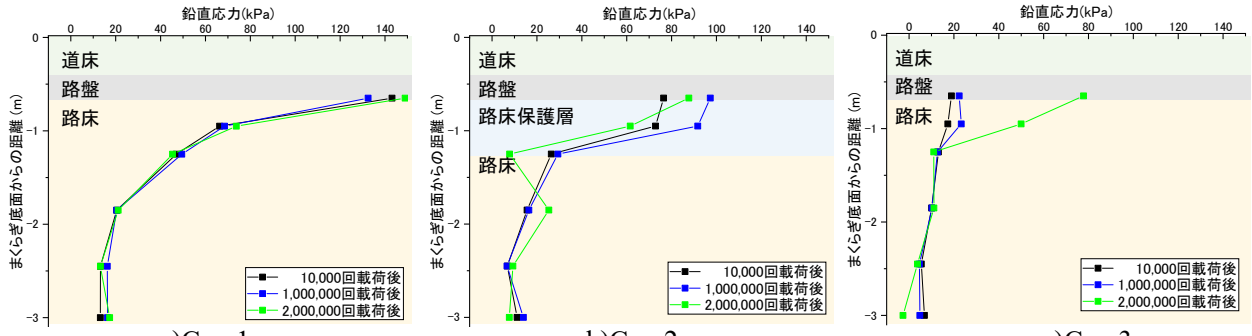


図 3 まくらぎ沈下量と路床沈下率の累積傾向

4．おわりに　本研究では，土構造標準における下位の土質材料を用いた盛土の実規模繰返し載荷試験を行った．その結果，飽和度上昇時に路盤との境界部で状態変化がみられたが路床保護層を設けることで土構造標準の盛土と同等の性能が確認できた. 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.



a)Case1　b)Case2　c)Case3

図 4 載荷時鉛直応力の深度分布

参考文献
1) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 丸善出版, 2007
2) 笠原ら：小型施工試験による鉄道盛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
3) 藤本ら：三軸圧縮試験による鉄道盛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
4) 桃谷ら：軌道模型実験によるまくらぎ荷重分担率と路盤圧力の検討，土木学会第 55 回年次講演会，2000

© Japan Society of Civil Engineers