

発生バラストを用いた鉄道盛土における列車走行時の盛土沈下量の推定

(公財) 鉄道総合技術研究所 正) ○景山 隆弘 中村 貴久 伊藤 孝記

1. 目的

鉄道のバラスト道床には単粒度碎石（以下、バラスト）が用いられており、経年劣化が進行した場合や土砂災害により外部から土砂が流入した場合に、新品のバラストに交換され、発生したバラストは廃棄される（以下、発生バラスト）。この発生バラストを盛土材料として再利用することができれば、環境負荷の軽減とともに、産廃コストの削減が期待できる。しかし、発生バラストを盛土に用いた場合の列車荷重による累積沈下特性は明らかにされていない。そこで、列車走行時の盛土の残留沈下量を検討した結果について報告する。

2. 累積損傷度理論を用いた盛土の残留沈下量の推定方法

本研究では、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物（以下、土構造標準）」の付属資料 22¹⁾に基づき、列車荷重による応力増分を考慮して盛土の剛性を軟化させることで、繰返し载荷による盛土の残留沈下量を推定する累積損傷度理論と二次元有限要素解析をハイブリッドさせた方法（以下、沈下解析）を用いた。図1に沈下解析による盛土の残留沈下量の解析フローを示す。

まず、手順1では、繰返し三軸圧縮試験結果の試験条件および载荷回数と鉛直ひずみに関する近似式より累積沈下特性パラメータを設定した。次に、手順2にて、手順1で設定した累積沈下特性パラメータを基に、図2中の式(1)を用いて、応力増分に応じた繰返し载荷による累積ひずみ ε_1^p を算出する。ここで、 a_1 は初期せん断応力比に応じて定まるパラメータ、 N は繰返し载荷回数、 SR_d は繰返し载荷によるせん断応力比、 ν はポアソン比である。次に、 ε_1^p を式(2)に代入して累積せん断ひずみ γ^p を算定し、 γ^p を式(3)に代入して軟化せん断弾性係数 G^* を求める。最後に、手順3にて、 G^* を用いて列車荷重を作用させた二次元有限要素解析から、列車走行による繰返し载荷後の盛土の残留沈下量を算出する。

3. 盛土材料の累積沈下特性に関する繰返し三軸圧縮試験

試験に用いた新品バラスト、3種類の発生バラストおよび比較対象用としてバラスト軌道を敷設する鉄道盛土に用いられるB群材料相当の稲城砂（表1）の粒径加積曲線を図3に示す。図3には締固め試験 E-b 法（JIS A 1210-2009）により求めた各試料の最大乾燥密度 ρ_d

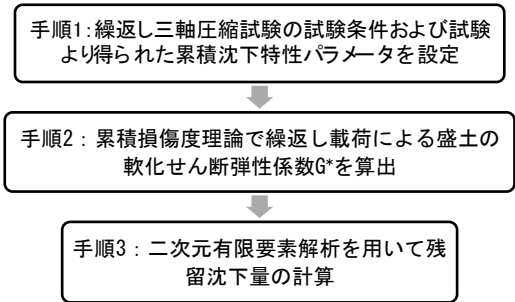


図1 沈下解析の計算フロー¹⁾

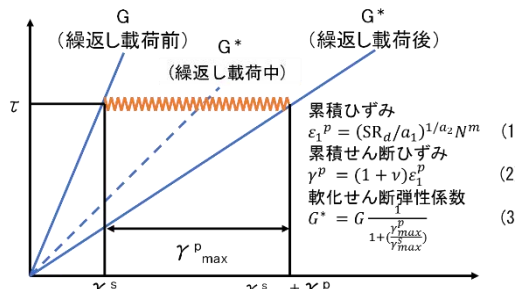


図2 軟化せん断弾性係数とせん断ひずみの関係¹⁾

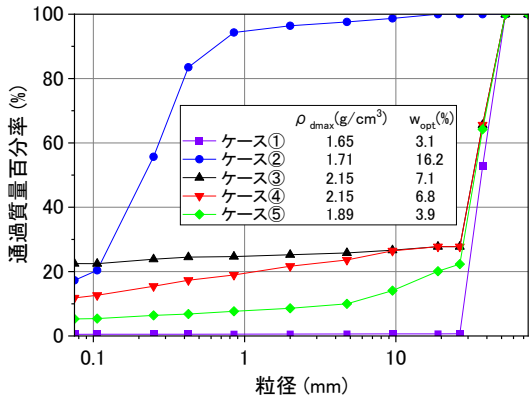


図3 発生バラストの粒度分布

表1 繰返し三軸圧縮試験の試験条件および累積沈下特性パラメータ

ケース名	試料	初期せん断 応力 τ_s (kPa)	繰返しせん断 力 τ_d (kPa)	初期せん断 応力比 SR_s	繰返しせん断 応力比 SR_d	a_1	a_2	m
ケース①	新品バラスト (A 群)	13.75	13.75	0.407	0.407	2.704	0.7231	0.035
ケース②	稲城砂 (B 群)	13.75	13.75	0.407	0.407	2.704	0.7231	0.035
ケース③	発生バラスト (B 群) 細粒分	13.75	13.75	0.407	0.407	2.307	0.6831	0.151
ケース④	発生バラスト (A 群) 砂	13.75	13.75	0.407	0.407	1.447	1.197	0.084
ケース⑤	発生バラスト (A 群) 礫	13.75	13.75	0.407	0.407	0.407	0.500	0.053

キーワード 発生バラスト、鉄道盛土、累積損傷度理論

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 TEL 042-573-7276

max, および最適含水比 w_{opt} も示している。なお、締固め試験に用いた試料については最大粒径が 37.5mm 以下となるように粒度調整した。繰返し三軸圧縮試験の試験条件および試験で得られた累積沈下特性パラメータを表 1 に示す。繰返し三軸圧縮試験に用いた円柱供試体の寸法は、新品バラストおよび発生バラストに対して直径 300mm×高さ 600mm, 稲城砂に対して直径 100mm×高さ 200mm とした。円柱供試体の作製では、最適含水比に調整した試料を 5 層に分けて円柱モールドに入れ、各層に対して締固め度が 90% となるように振動バイブレータで締め固めた。別途実施した有限要素解析において、列車荷重（軸重 80kN）により上部盛土表面に作用する鉛直応力が 49kPa であったことから、応力振幅が 50kPa となるように荷重条件を設定した。荷重条件は、拘束圧 20kPa, 荷重周波数 1Hz, 荷重回数 5 万回とし、圧密排水条件とした。鉛直ひずみは、ベディングエラーの影響を小さくするために局所変形測定装置（以下、LDT）²⁾を用いて測定した。

図 4 に鉛直ひずみと荷重回数の関係を示す。ケース②（稲城砂）の荷重回数 1 万回時の除荷時の鉛直ひずみは、1.6% 程度と最も大きかった。また、ケース①（新品バラスト）およびケース⑤（発生バラスト）の荷重回数 1 万回時の除荷時の鉛直ひずみは、0.8% 程度であり、ケース②の 1/2 程度であった。また、ケース③（発生バラスト）およびケース④（発生バラスト）の荷重回数 1 万回時の除荷時の鉛直ひずみは、どちらも 0.1% 程度と小さく、ケース②の 1/10 以下であった。

4. 供用期間中の盛土の残留沈下量の推定

実軌道における発生バラストを用いた盛土の残留沈下量を累積損傷度理論により推定するため、文献¹⁾に示されている実軌道の解析モデルを参考に、沈下解析を行った。3 章の繰返し三軸圧縮試験を最適含水比で試験したため、本解析も盛土内の年間の含水比を最適含水比と想定した条件で実施した。

二次元解析モデルは図 5 に示す通りであり、盛土はのり面勾配が 1 : 1.8 で高さ 6m とし、軌道構造は単線のバラスト軌道とした。土構造物の内、路盤はクラッシュラン、上部盛土はバラストもしくは稲城砂、下部盛土は稲城砂とした。盛土材料の累積沈下特性パラメータには表 1 に示した値を使用し、物性値には図 5 中に示した値を用いた。推定条件は、盛土の供用年数を 1 年、10 年、50 年、100 年の 4 種類とし、年間累積通トン数を 640 万トン（年間の通過軸数は、56.5 万回）とした。

解析結果を図 6 に示す。なお、2 次元解析（奥行 1m あたり）に作用する荷重は、列車速度 100km/h におけるレール継目部の衝撃係数¹⁾1.5 および軌道長手方向のレール等による荷重分散を考慮して設定し、図 6 中に示す。

図 6 より、100 年後の上部盛土の残留沈下量は、ケース①（新品バラスト）が-4.7mm, ケース②（稲城砂）が-3.0mm, ケース③（発生バラスト）が-0.6mm, ケース④（発生バラスト）が-0.8mm, ケース⑤（発生バラスト）が-5.2mm であった。

5. おわりに

発生バラストおよび新品バラストを用いた盛土の 100 年後の残留沈下量の推定値は、盛土内の含水比が最適含水比であるとした場合に最大で-5.2mm であり、盛土条件（目標沈下量-10mm 以下）を満足することがわかった。

参考文献 1) (財) 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, 2007.1. 2) Goto et.al: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and foundations, 31(1), pp. 169-180, 1991.

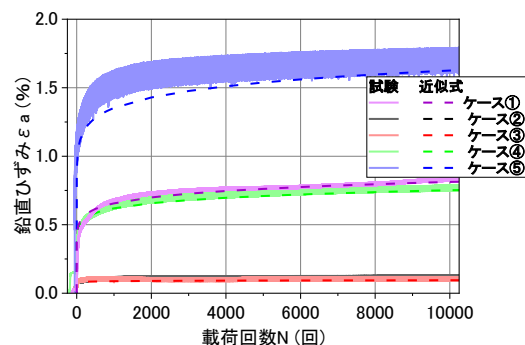


図 4 繰返し三軸圧縮試験結果

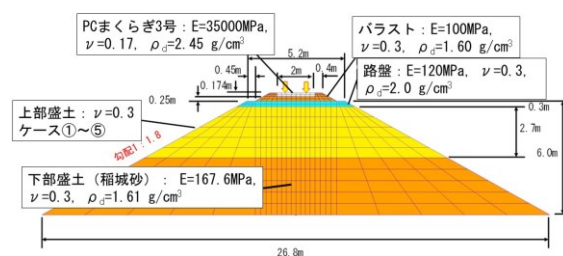


図 5 二次元解析モデル

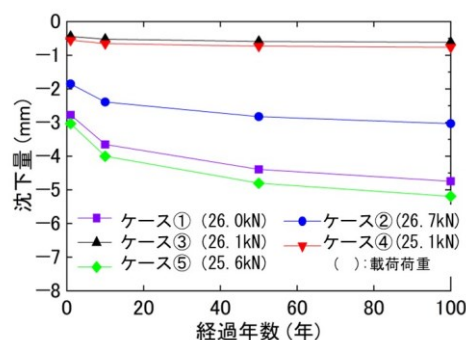


図 6 解析結果