

氾濫流による鉄道バラスト流失機構に関する模型実験

横浜国立大学大学院都市イノベーション学府 学生会員 ○小野田 元
 横浜国立大学工学部 非会員 遠山 祐貴
 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 正会員 早野 公敏

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨のような短時間において多量の降雨を受け、鉄道軌道が流失する事例がしばしば発生している。椿ら¹⁾は道床バラストの流失が軌道の流失の大きな要因であることを示し、模型実験を行ってバラストの透水抵抗則や崩壊限界水量を算定した。しかしながら、バラスト道床の幅・高さなどの違いが流失崩壊に及ぼす影響は検討されておらず、一般性のある流失メカニズムの解明には至っていない。そこで本研究では道床バラスト流失を対象とした模型実験を行い、得られた結果をもとにミクロ的な視点から道床バラスト流出機構の解明を試みた。

2. バラスト流失模型実験

図-1 に実験装置の概要を示す。実験装置は①二つの水槽とポンプからなる循環流システム、②水槽内に設置したバラスト道床(図-2)、③動画や水圧計などのデータ取得システムで構成されている。鉄道基準を満足するバラストを用い、幅や高さを変えた道床バラストを作製した(表-1)。道床密度は 1.60g/cm^3 になるように突き固めた。流量を段階的に増加させ、各段階における定常状態で道床の流入・流出側水位、道床内の間隙水圧などの測定を行った。また流出側の法面形状の測定も合わせて実施した。

3. 実験結果

図-3 に単位幅流量 q と流入・流出側水位 h_{in} , h_{out} の関係を示す。道床幅 L が広いほど、初期の段階において q の増加に伴う h_{in} の増加が著しいが、越流状態になると h_{in} の増加傾向は低減する。一方、道床幅の違いにかかわらず h_{out} はほぼ同じ傾向を示している。

図-4 に道床内の平均流速 U_{ave} と平均動水勾配 i_{ave} の関係を示す。 U_{ave} , i_{ave} はそれぞれ次のように求めた。

$$U_{ave} = \frac{2q}{h_{in} + h_{out}}, \quad i_{ave} = \frac{h_{in} - h_{out}}{L - 1/2(h_{in} + h_{out})}$$

同図に示したように、 $U_{ave} \sim i_{ave}$ の関係は Darcy 則で表される線形にはならず平均流速の 1 乗と 2 乗の和で表現される Forchheimer 則に従った非線形となった。CaseB~D において U_{ave} の増加に伴い i_{ave} の大きさが横ばいになったのは、越流が開始したことが原因である。横ばい部分を除いたデータを $i_{ave} = aU_{ave} + bU_{ave}^2$ の関係で近似した曲線を、同図に合わせて示した。

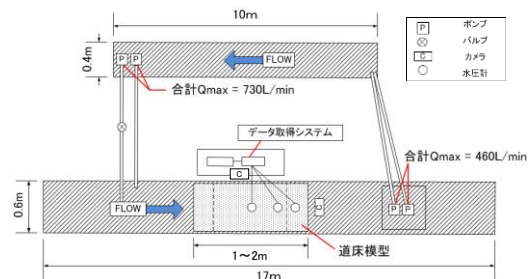


図-1 実験装置概要



図-2 水槽内に作製したバラスト道床

表-1 実験ケース一覧

	道床幅	道床高さ	奥行き	道床密度	間隙率	法面勾配
caseA	1.03m	0.39m	0.6m	1.60g/cm^3	0.41	1 : 1
caseB	1.18m	0.256m				
caseC	1.13m	0.269m				
caseD	1.98m	0.251m				

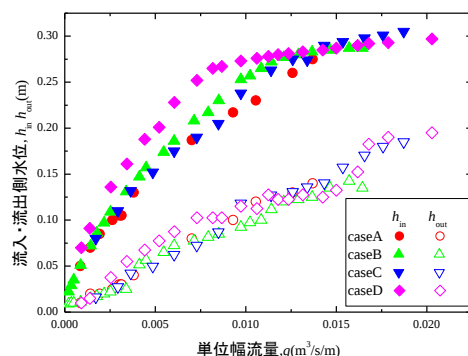


図-3 $q \sim h_{in}$, h_{out} の関係

キーワード バラスト流失, 豪雨災害, 模型実験, Forchheimer 則, 進行性破壊, 透水力

連絡先 〒240-0065 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 横浜国立大学土木工学棟 TEL 045-339-4038

CaseD で実測した流出側の法面形状を図-5 に示す. 流量 q の増加にともなう法面形状の変化が認められる初期の段階においてバラストがいくつか抜け出し (STEP1), それに起因した小崩壊が発生した (STEP2). その後, 小崩壊により法尻付近に崩積したバラストが流失して法面が急勾配になり (STEP3), 全体的な安定性が減少して大崩壊が発生した (STEP4). 同様に他のケースにおいても局所的な抜け出しに起因する進行性破壊が認められた.

4. ミクロ的な視点によるバラスト抜け出しの検討

流出側の法尻付近に 3 個の間隙水圧計 PW1~3 を設置し (図-5 参照), 局所的な水圧変化を測定し, 得られた値から法尻付近の局所間隙内流速 U_{local}^{pore} と局所動水勾配 i_{local} を次のように求めた.

$$U_{local}^{pore} = \frac{2q}{n(h_i + h_{i+1})}, \quad i_{local} = \frac{h_i^p - h_{i+1}^p}{L_p} \quad (i=1, 2)$$

h^p は水圧計から算出したピエゾ水頭, h は水圧計設置位置の水位, L_p は水圧計間距離である. 添え字 i は水圧計の番号 1, 2, 3 を参照する. 図-6 は CaseD について両者の関係を示したものである.

同図には図-4 で得られた $i_{ave} = aU_{ave} + bU_{ave}^2$ を $U_{ave}^{pore} = U_{ave}/n$ を用いて $i_{ave} = aU_{ave}^{pore} + bU_{ave}^{pore2}$ に書き直した関係も示している. 図-4 と同様に局所的な流速～動水勾配関係にも非線形性が認められる. また i_{local} が急激に増加して大きな透水力がかかり, 抜け出しが発生している.

道奥²⁾は捨石粒子に働く力のつりあいから捨石堰の安定性を検討している. 本研究でも道奥²⁾の考え方をもとに, バラスト粒子を円形と仮定して力のつり合いから抜け出しの安定性について検討を行った (図-7). 具体的には滑動よりも回転が卓越することから, 接触点 P を支点とした粒子 X の回転に関する安全率 F_s について検討を行った. F_s は次式によってあらわされる.

$$F_s = \frac{W \sin \theta + F_{f0} \{1 + \sin(2\beta - 90^\circ)\}}{F_d \cos \beta + F_l \sin \beta + F_i \cos \beta + F_{n0} (45^\circ - \theta)}$$

各パラメーターの定義を図-7 に合わせて示した. 透水力は動水勾配, 抗力・揚力は流速の関数で $i_{ave} = aU_{local}^{pore} + bU_{local}^{pore2}$ の関係を用いてそれぞれの力を算定した. 図-6 には F_s が 1 以下の範囲を示した. 設定した β (法面において隣接するバラスト粒子の噛み合わせ角度に関するパラメーター) において安全率が 1 を切るタイミングは抜け出し発生と概ね一致しており, 用いたミクロ的力学モデルは抜け出し予測に適用可能であると考えられる.

5. まとめ

道床バラスト内の透水抵抗特性は Forchheimer 則に従う. また道床は局所的なバラストの抜け出しに起因する進行性の破壊を示し, バラストの抜け出しはミクロ的な力学モデルによって予測可能と考えられる.

参考文献 1) 椿涼太 他: 越水による鉄道盛土の流失機構に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp. 449 - 454, 2011. 2) 道奥康治 他: 捨石で構築された堰・水制の水理機能, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号 B, 2004.

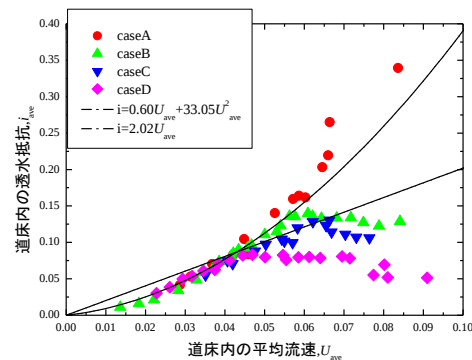


図-4 平均流速 U_{ave} ～動水勾配 i_{ave} の関係

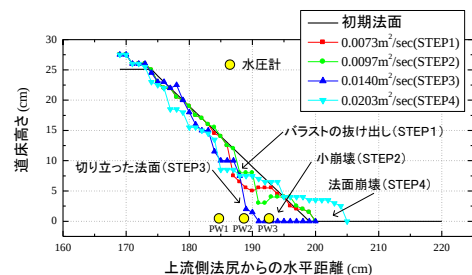


図-5 法面形状の変化(CaseD)

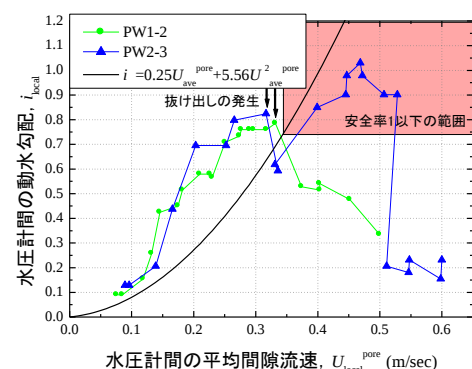


図-6 局所間隙流速 U_{local}^{pore} ～動水勾配 i_{local} の関係

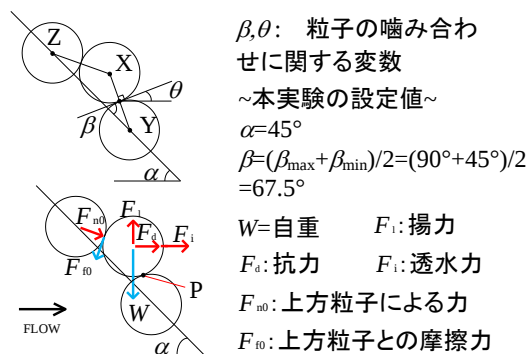


図-7 バラストの抜け出し安定モデル