

越水による鉄道盛土の流失機構に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON RAILWAY EMBANKMENT BREACH

椿 涼太¹・河原能久²・上田康弘³

Ryota TSUBAKI, Yoshihisa KAWAHARA and Yasuhiro UEDA

¹ 正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科 (〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² フェロー正会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科 (同上)

³ 学生員 広島大学大学院 工学研究科 (同上)

The embankment on a floodplain significantly affects the propagation of inundation flow. In case the inundation flow overflows the railway embankment, the embankment retains a potential to be breached. In this study, the process and criteria of the railway embankment breach is experimentally investigated. The critical flow rate per unit width that is capable of breaching the ballast layer of the railway embankment is identified. As well, the infiltration flow in the ballast layer is investigated. Furthermore, three influential factors of the railway embankment breach are discussed.

Key Words: Railway embankment, overflow discharge, infiltration flow, inundation flow

1. はじめに

上流・中流域において洪水氾濫が発生すると、河道や地形の勾配が大きいことや、山地などに囲まれて氾濫域が広がらず河川に沿って流れることから、氾濫域において強い流れが発生し、田畑・道路等の社会基盤・家屋等に洗掘等の被害をもたらす。また局所的に高速な氾濫流が発生することは人的な被害の発生原因となる。上流・中流域においては地形要因から道路や鉄道が河川と併走する区間が長く、これらの社会基盤が洪水氾濫時に被害を受けやすい要因となっている。

河川と併走する道路や鉄道の盛土は、氾濫域の拡大を抑制する二線堤のような機能を果たすことができる一方で、図-1 に示すように越流水により盛土の流失破壊が発生すると、盛土により堰上げられていた氾濫流が盛土破壊部分を集中して流れることとなる。洪水中の鉄道盛土の流失リスクや氾濫流の抑制効果を確実に評価する為には、鉄道盛土の洪水中の流失強度・破壊現象を把握する必要があるが、このような現象について十分解明されていないのが現状である。このような現象を解明することは、鉄道盛土の流失リスクを評価するだけでなく、流失リスクを低減させるための方策を確立する上で不可欠である。このような盛土による、氾濫被害の低減効果を活かして、交通機能と防災機能を併せ持つ一体的な社会資本整備を行うことができれば、面積に比して投入できる資産が限られる上・中流域での人間活動の維持に重要な役割を果たすと期待される。

そこで、本研究では、模型実験・浸透解析を併用して

越水による鉄道盛土の破壊条件と機構の分析を行った。対象とする鉄道盛土は、単線非電化区間のものであり、鉄道軌道に多数の被害がみられた 2009 年 8 月の台風 9 号による兵庫県佐用町周辺の JR 西日本・姫新線の区間を想定した。

2. 鉄道盛土の破壊形態の分析

図-2 に鉄道盛土の形状を示す。寸法は、鉄道規格、設計標準¹⁾、兵庫県佐用町での盛土流失区間の測量結果に基づいている。バラストの厚さ、道床盛土の高さ、盛土のり面勾配などは場所により差はあるものの、単線区間の鉄道盛土は概ね図-2 に示す形状となっている。

鉄道盛土の破壊形態について、2009 年 8 月の姫新線の災害を対象として金子²⁾により (a) バラスト流失と (b) 盛土流失との二通りに区分されている。バラスト流失は、軌道（レールおよび枕木）を支えるバラスト部分が流失するものであり、盛土流失は、バラストに加えて、バラストを支えている盛土部分も流失したものである。図-1 に示すように、盛土が流失しても軌道は完全には破壊されずに、ぶら下がるように残留して、流木やゴミ等がこれに捕捉されている。盛土流失が起きた区間に隣接する、盛土の高さがやや高く、また流失をまぬがれた軌道においても、流木等の捕捉が確認された。このことは、盛土流失区間の周辺で、広く越流がみられたことを示しており、盛土流失は氾濫水の盛土の越流後に発生したものと判断できる。越流後の破壊形態として、



a) 2009/8 豪雨による JR 西日本・姫新線



b) 2010/7/15 豪雨による JR 西日本・美祿線

図-1 鉄道盛土の流水による被害状況写真

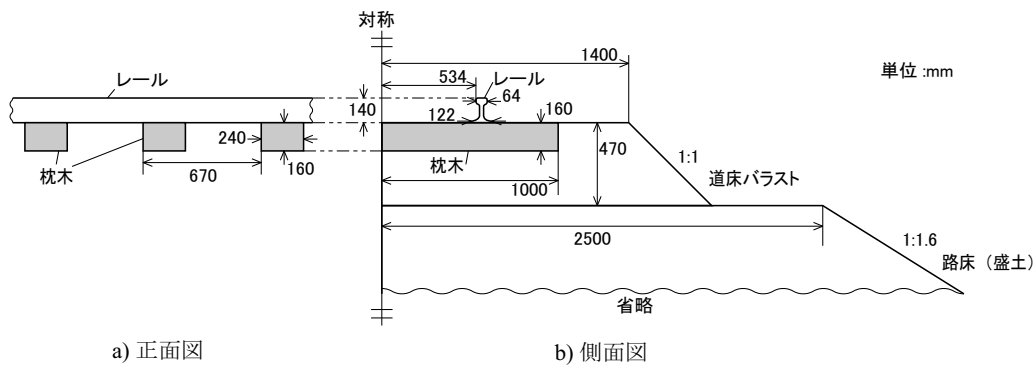


図-2 鉄道盛土の形状

1. バラストの流失が起き、流失部分に越流水が集中して堤体を侵食していくもの、
2. バラストを通過・越流した流れが、路床盛土を流れ落ちる際に盛土表面を侵食していくことが主因となる場合、
3. 路床盛土を透過する流れによる浸透破壊が主因となる場合

の3通りが考えられる。被災後に、その盛土流失がいずれの被災形態により引き起こされたかを断定することは困難であり、姫新線や美祿線の事例にこだわらず、より一般的に捉えると、盛土材料、盛土表面の被覆状況、降雨パターン、周辺の地形と関係などに依存するものと予想される。ここではまず、破壊形態1について次章で分析を行う。

3. 実バラストの透水・破壊実験

鉄道盛土の通過流量と上流部の水位の関係と、流失が起きる限界流量を算定するために、実バラストを用いた透水・破壊実験を行った。

(1) バラストの特性

図-3 に示す、実際に使用された後に交換された廃バラストを用いて実験を行う。バラストは、使用するにつれバラストの角の摩耗や、粒子の分割が起きて、粒径がやや小さく、また粒子の形状が丸く変化する。実験に用いたバラストは、粒径が20～80mm程度、間隙率 ϵ は0.49、比重 ρ は2.55g/cm³であった、本実験ではバラスト交換後に時間がたった場合での特性を調査することとなる。図-4 に、バラストを直径 2.02×10^{-1} mのカラムに詰めて計測した透過抵抗特性を示す。抵抗特性は断面平均流速 U の一乗と二乗の和により、精度よく近似($R^2 = 0.99$)できており、Forchheimer型の抵抗則

$$i = U(5.198 + 124.8U) \quad (1)$$

で表現できることが確認できる。ここに i : 動水勾配である。

(2) 開水路による透水特性と破壊限界の分析

3.1 章で述べたバラストを用いて、幅0.3mの開水路に高さ0.25mの堤体を設置して、透水特性および破壊限界を調査する。図-5 に、堤体形状と、水深・距離の計測点を示す。水路床には $\frac{1}{100}$ 程度の勾配をつけ、またバラ

表-1 流量毎のバラスト堤体の透過状況

流量 q (m^2/s)	流入水深 h_{in} (m)	流出水深 h_{out} (m)	水平距離 l (m)	流入 Fr 数 $\text{Fr}_{\text{pore,in}}(-)$	流出 Fr 数 $\text{Fr}_{\text{pore,out}}(-)$	流出部の動水 勾配 $i_{out}(-)$	備考
0.0015	0.110	0.023	0.65	0.030	0.313	0.87	
0.0041	0.158	0.043	0.60	0.048	0.338	1.66	のり面崩壊
0.0069	0.195	0.078	0.48	0.058	0.230	1.44	↑ なし
0.0091	0.220	0.115	0.34	0.064	0.169	1.19	↓ 小礫の流失
0.0112	0.235	0.120	0.44	0.071	0.196	1.57	↑
0.0144	0.250	0.115	0.30	0.083	0.267	2.59	↓ 堤体の崩壊
0.0144	0.250	0.150	0.30	0.083	0.179	1.64	
0.0154	0.260	0.200	0.10	0.084	0.125	1.14	
0.0154	0.260	0.160	0.23	0.084	0.175	1.66	
0.0161	0.260	0.180	0.20	0.088	0.153	1.46	
0.0165	0.265	0.180	0.19	0.088	0.157	1.53	
0.0174	0.250	0.180	0.28	0.101	0.165	1.67	
0.0180	0.265	0.200	0.16	0.096	0.146	1.48	



図-3 実験で用いたバラスト（目盛りの数字は 10cm 単位）

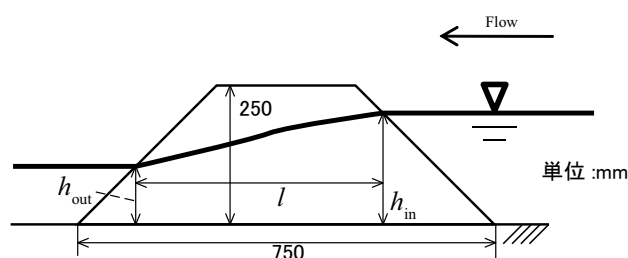
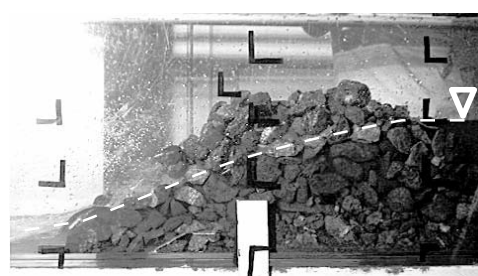


図-5 バラスト堤体の透過実験装置

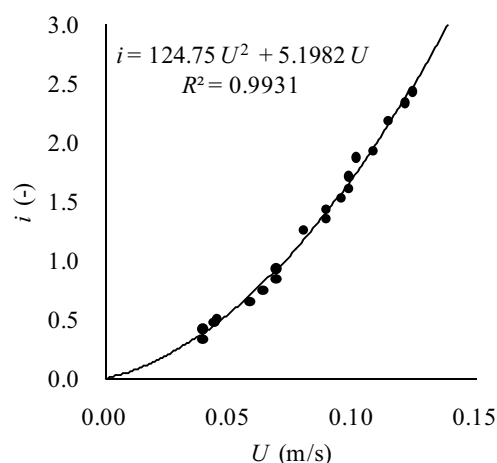


図-4 バラストの透過抵抗特性

スト部の下流 1m で水を自由落下させており，バラスト部の下流では射流となっている．表-1 に実験により計測

した，通過流量毎の堤体のり面での水深 h_{in} , h_{out} ，流入部から流出部までの距離 l ，流入・流出部の間隙 Froude 数 $\text{Fr} = \frac{U}{\epsilon \sqrt{gh}}$ ，式 (1) より算定した流出部の動水勾配 i_{out} を示す．同表では，上から下に向けて通過流量を増やしているが，備考欄に示したように $q = 0.0069 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度を越えると，のり面での礫の部分的な流失が起き，また $q = 0.0144 \text{ m}^2/\text{s}$ 以上では，流入水深 h_{in} が，堤体の天端の高さ 0.25m と同程度となるとともに，のり面の大規模な崩壊が起きた．実験を行った条件においては，崩壊後も堤体の一部は水面上に出た．バラスト内部の浸透流の水面形は，低下背水曲線となり³⁾，水面形は下流部の水深により規定される．よって，本実験で得た，バラスト堤体の崩壊限界流量 $q = 0.014 \text{ m}^2/\text{s}$ は，バラスト堤体の大きさとは関係なく適用できる目安となる．

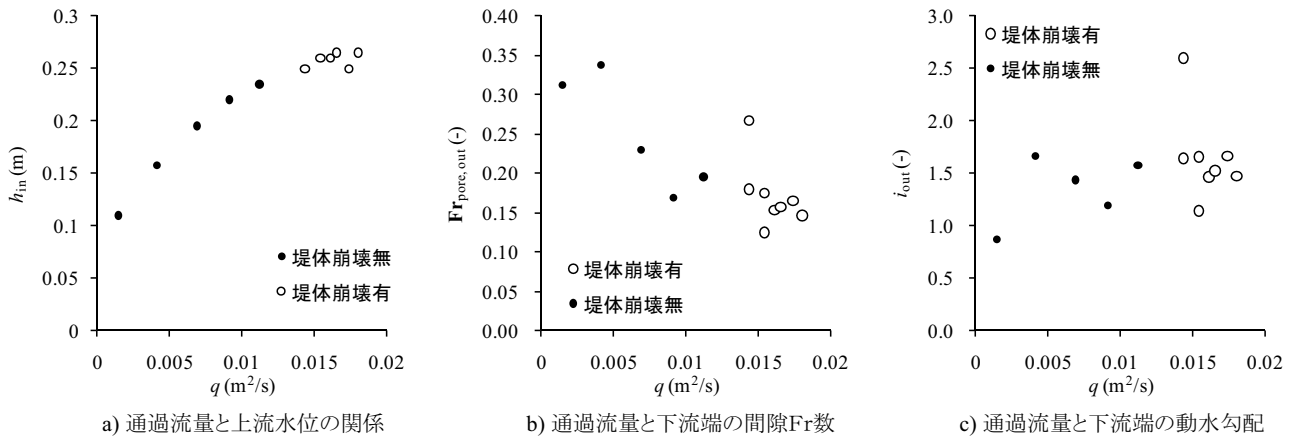


図-6 バラスト堤体の透過実験結果

表-1 に示した実験結果に基づいて、バラスト堤体を通過する流れの特性を図-6 で確認する。同図では、堤体の崩壊がみられた $q = 0.014 \text{ m}^2/\text{s}$ 以上のケースは参考値として白抜きで示している。図-6a) には、通過流量 q と流入水深 h_{in} の関係を示している。同図より、流量が増加することで一部ばらつきがあるものの、上流水位が増加していることが確認できる。次に、図-6b) で、通過流量 q と流出 Fr 数を比較すると、流量を増加するにつれて、0.3 程度から 0.1 程度まで減少している様子が確認できる。水深に対して粒径が大きく、水面変動も強いため、流出点での水深を正確に計測することは困難であり、その水深により算定した Fr 数の精度も十分とは言えないが、一次元解析的には支配断面となる^{3,4)} 下流端においても、実際にはそれほど大きな Fr 数とはならないことが確認できる。続いて、図-6c) に、流量と下流端での動水勾配を比較する。ばらつきが大きいものの、流量に依存せずに動水勾配は平均的には 1.5 程度の値を示している。動水勾配を用いて水面形を、

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i}{1 - \text{Fr}^2} \quad (2)$$

と見積もると、 i より若干大きくなるものの、 $\text{Fr} = 0.2$ 程度では、ほぼ i と同程度となる。以上、図-6b)、図-6c) より、本研究のような間隙の大きな多孔質中を、比較的速い流れが通過する水面をもつ浸透流れを把握する上で、下流端条件は、Fr 数ではなく動水勾配により規定することが実態に合うことが示唆される。ただし、実験を行った堤体の勾配は 1:1 であるから、これより大きな水面勾配は物理的に取りえない。この点については、次節での抵抗モデル再検討の際に改めて議論することとする。

(3) 一次元解析による開水路実験の水面形の再現

図-7 に、堤体崩壊が起きなかった $q < 0.014 \text{ m}^2/\text{s}$ の 5 ケースについて、実測した流出水深 h_{out} を下流端に与えて、 $\frac{dh}{dx} = i$ と置いた一次元解析により求めた距離 l だけ上流に遡った位置での水深を、実測した流入水深 h_{in}

と比較する。同図中の「+」で示した、式(1)のモデルでは、抵抗を過大評価して上流水深 h_{in} を三割程度過大評価していることがわかる。同図には併せて、カラム試験結果を利用して 1 次の項を落として同定した抵抗モデル

$$i = 176.76U^2 \quad (3)$$

を「△」で、また、流出水深 h_{out} は実測値として、流入水深 h_{in} の残差の平均和を最小化する係数を同定した

$$i = U(5.00 + 1.20U) \quad (4)$$

の結果を「●」で示している。データでフィッティングを行った「●」の再現性が高いのはある意味で当然であるが、カラム試験結果で、1 次の項を落としたモデルは落とさなかったモデルより図-7 に示した範囲では再現性が良かった。開水路透過実験で同定した式(4)を用いて、各流量でのバラスト下流端での動水勾配を算定すると、 $I = 0.47 \pm 0.07$ (ここで誤差は $\pm \sigma_I$) となり、式(1)により得られた、堤体勾配 1.0 より大きな動水勾配 $I = 1.53 \pm 0.40$ (図-6c) を参照) よりも、図-5 に示すような実験中の水面形の観察結果にも整合する。

以上のことから、カラム試験により同定した抵抗モデル式(1)は、バラスト堤体の開水路透過実験での水面形の一次元解析に用いると実験結果との誤差が大きく抵抗を過大評価していることが確認できた。その原因として、(1) 開水路実験とカラム試験でのバラスト粒子のかみ合わせや粒径分布の偏りなどの影響、(2) 一次元解析の再現性の限界、(3) 壁面の影響等の実験誤差などが考えられ、いずれが主要因であるかは今後再現実験等で確かめる必要がある。

(4) 実スケールのバラスト堤体を透過する破壊限界流れの評価

ここでは、図-7 に示した三つのモデルのいずれかにより、バラスト堤体の透過流れが再現できると仮定して、バラスト堤体崩壊が起きる $q = 0.014 \text{ m}^2/\text{s}$ という条

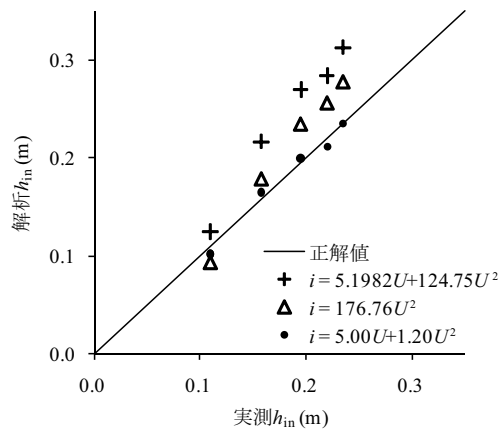


図-7 解析によるバラスト堤体の上流水深の評価

件で、実測流出水深 h_{out} を与えて、図-2 に示す実際の鉄道盛土でのバラストサイズでの水面形を評価した結果を表-2 に示す。ここでは、上流側のバラスト端での水深だけでなく、下流側の枕木端や軌道の位置での水深も示している。同表より、抵抗を比較的強く見積もっている式(1)や式(3)では $l=0.4\text{m}$ に位置する下流側の枕木端が水没している。枕木のある部分は、図-2 の正面図に示したように枕木により通水断面の $36\% (= \frac{240\text{mm}}{670\text{mm}})$ が阻害され、間隙を流れる実流速がその分速くなるため、部分的に大きな流水抵抗を要することとなる。 $l=0.9\text{m}$ の位置では、軌道上面の高さ 0.61m には達していないものの、式(1)や式(3)ではバラスト上の水面が現れている。上流側のバラスト端 ($l=2.8\text{m}$ の位置) では、全モデルでバラスト高さ 0.45m だけでなく、軌道上面の高さ 0.61m をも超える流れが評価されている。水面が堤体上部を超えると、多孔質による流水抵抗の影響を直接受けない部分がバラスト上に現れる。この開水面部分は、多孔質流れとなっている部分の持つ比較的大きな水面勾配が維持されず、水面が平坦になるとともに、軌道によりせき止められることとなる。以上のことから、バラスト堤体崩壊が起きる $q = 0.014\text{m}^2/\text{s}$ では、少なくとも上流部の軌道を越流する流れが発生するものと予想され、これは鉄道盛土流失部分の周辺の軌道に流木等の蓄積が見られた状況と整合する。また、上流側のバラスト下面(道床盛土上面)からの水深が $0.68\text{m} \sim 0.87\text{m}$ 程度を超えると、バラスト流失が発生するものと予想される。これは鉄道軌道上面より $0.07\text{m} \sim 0.26\text{m}$ 高い水深である。

4. 鉄道盛土流失におけるバラスト部以外の要素の評価

(1) 盛土下流側の斜面の侵食について

2章で述べた破壊形態2について、既往文献を参照して見積もることとする。福岡・藤田⁵⁾は、芝を有する地表面の侵食実験を行い、平均侵食深 $y(\text{cm})$ と通水時

表-2 実スケールのバラストを透過する限界流量時の水面形の評価値(斜体は水面が枕木の高さ 0.31m に達しているもので、太字は水面がバラスト天端高 $0.45\mathbf{m}$ より高くなっているものを示している。)

抵抗モデル	$l=0.4\text{m}$	$l=0.9\text{m}$	$l=2.8\text{m}$
	下流側の 枕木端	下流側 の軌道	上流側の バラスト端
式(1)	0.397	0.538	0.871
式(3)	0.364	0.470	0.695
式(4)	0.285	0.393	0.678

表-3 堤防芝の侵食に関する係数

	$\beta (\text{m/s})$	$n (-)$
b 地点 ⁶⁾	0.11	0.038
c 地点 ⁶⁾	0.08	0.042
中村・中川 ⁷⁾	0.4	0.08

間 $t(\text{min})$ との関係を、

$$y = A \log t + B \quad (5)$$

と整理した。ここで、 A は侵食速度の大小を表す係数であり、 B は通水初期に、通水強度に関係なく剥離される高さを表しており、0 とみなしてよいとしている。係数 A について、

$$A = \alpha \left(\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} + \beta \right) \quad (6)$$

と、摩擦速度、侵食抵抗に関連した α 、侵食を開始する限界摩擦速度 β により評価している⁶⁾。限界摩擦速度 β および表面の粗度係数 n について、既往文献の値を表-3 にまとめた。表-3 の b 地点、c 地点は粘土分とシルト分の総計は、それぞれ 46%、59% 含む粘性土であり、根の侵入深さが 15cm 程度の芝で覆われたものである。表-3 の中村・中川は、土質の記述されていないが、表面が植生遷移が終末した状態(チガヤ・カモガヤ等)となったものである。b 地点・c 地点と中村・中川のもう一つの違いは、b 地点・c 地点は侵食試験器を用いて閉管路での実験となっているのに対し、中村・中川は勾配 1:2 の実堤防での開水路実験に基づいている点である。鉄道盛土の勾配は 1:1.5~1:2.0 の範囲で設計されており¹⁾、勾配が大きく水面が乱れた射流状態で越流するという点、また姫新線の盛土について植生遷移が進んだ状態であるという点で、中村・中川の条件と類似する。以上の知見を利用して、鉄道盛土の、のり面の侵食について算定する。のり面の上端ではそり面に沿った流速が未発達であり、下端では湛水部への噴流が起きるが、ここでは、のり面の中央部での等流部で

の侵食を見積もることとする。ここでの水深は、

$$h_0 = \left(\frac{n^2 q^2}{i_0} \right)^{\frac{3}{10}} \quad (7)$$

となり、摩擦速度

$$u_* = \sqrt{gRI} \quad (8)$$

について、 $R = h_0, I = i_0$ として式(7)を代入して q について整理すると、

$$q = \left(\frac{u_*^2}{g i_0} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{i_0^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (9)$$

となる。これに表-3の値を代入すると、b地点、c地点、中村・中川におけるのり面植生の剥離開始流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ は、それぞれ $6.5 \times 10^{-4}, 2.0 \times 10^{-4}, 2.3 \times 10^{-2}$ となる。前章で実験的に見積もったバラスト部の破壊限界流量 $q = 0.014 \text{m}^2/\text{s}$ と比べると、b地点、c地点の条件では剥離が開始し、中村・中川では剥離が起きないと評価される。植生の剥離実験の条件では、中村・中川のものが鉄道盛土斜面に近いが、危険側を考えるとb地点・c地点での条件により剥離が開始するとして、芝の根の深さスケールの半分である2.5cmの深さに侵食に至る時間を福岡ら⁶⁾の図表を用いて見積もると少なくとも3時間程度は継続して越流する必要があり、降雨ピークが集中する中・上流域での集中豪雨時の鉄道盛土の越流状況を考えると、植生のり面の崩壊が主因となって鉄道盛土の流失が起きる可能性は小さいと判断される。

(2) バラスト透水時の盛土部の透過流量について

2章で述べた破壊形態3に関連して、バラストを透水・越流している状況では、バラストを支える道床盛土部分にも断面の左右で大きな水压差が作用することとなるため、浸透流が発生する。そのような状況では、上流からの流量がバラスト部と盛土部の双方を通過することとなる。盛土部分の通過流量を、堤体上面のバラスト部からの浸透を、相対的な圧力差が小さいことから無視できると仮定して、矩形堤体内の浸透流量

$$q = \frac{k}{2l} (H_{in}^2 - H_{out}^2) \quad (10)$$

により評価する。盛土高さ z を0.5mから2m、盛土幅を $l = 5.0 + \frac{1}{1.6}z$ と見積もり、盛土高さに対して浸出部の水深 h_{out} が十分小さいと仮定すると、 $H_{in} = z, H_{out} = 0$ とおける。透水係数 k については設計標準¹⁾より、 $k = 1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度と見積もると、通過単位幅流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ は、 $2.2 \times 10^{-9} \sim 2.4 \times 10^{-6}$ と評価できる。この量は、バラストを通過する量に対して4~7桁小さい。よって、バラストを透水・越流している状況では、少なくとも通過流量の観点では盛土内の透過は無視できる。

5. おわりに

本論文では、洪水氾濫時の越流による鉄道盛土流失の機構と条件を把握することを目的に、実バラストを用いた開水路実験を行った。その結果、バラスト堤体の崩壊限界流量は $q = 0.014 \text{m}^2/\text{s}$ 程度と算定された。またバラスト堤体を透過する流れを分析して、抵抗測の検証を行った。次に、開水路実験結果に基づいて、実際の鉄道盛土スケールのバラスト堤体を対象とした浸透流の一次元解析を行って、バラスト流失時の水面形および盛土上流側での水深を見積もった。その他に、鉄道盛土下流側の植生斜面の流失と、バラストを支える盛土部分の浸透流量について概算を行い、バラスト流失が鉄道盛土の大きな要因と考えられることを示した。

一旦バラスト流失が起きると越流水が流失部分に集中して流れる。よって、本研究の知見は、鉄道盛土の流失リスク評価を行う上で重要な指標となる。一方で、開水路実験における水面形と、カラム試験による流水抵抗特性と一次元解析に基づく水面形に不一致が見られるなど、検討を要する事項が残されている。これらの検証を進めるとともに、実スケールの軌道・枕木を持つバラスト堤体での透水実験や、二次元浸透流解析を実施して、バラスト堤体の崩壊限界流量や、通過流量と上流部の水位との関係に関する検証を進めたいと考えている。

謝辞：本研究の一部は、(社)中国建設弘済会・技術開発支援制度の補助を受けて行われました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 丸善, 2007.
- 2) 金子幸弘: 平成21年度台風9号災害による姫新線 播磨徳久・美作土居間土砂災害, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 6, pp. 450-451, 2010.
- 3) 道奥康治, 前野詩朗, 古澤孝明, 羽根田正則: 捨石堰の「水位-流量」特性を規定する水理量, 水工学論文集, Vol. 46, pp. 487-492, 2002.
- 4) David Hansen and Rizwanul Bari: Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing under coarse material, *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 128, No. 8, pp. 761-773, 2002.
- 5) 福岡捷二, 藤田光一: 堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, Vol. 34, pp. 319-324, 1990.
- 6) 福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治: 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集, Vol. 491/II-27, pp. 31-94, 1994.
- 7) 中村巖, 中川博樹: 植生による越流堤防の耐侵食性に関する調査, 河川技術に関する論文集, Vol. 3, pp. 83-90, 1997.

(2011.5.19 受付)