# 鉄道盛土の越水による上部構造の 流失機構・条件の解明 EXPERIMENTAL STUDY ON PROCESS AND CRITERIA OF BAILWAY BALLAST BREACHING

# 上田康弘<sup>1</sup>・椿涼太<sup>2</sup>・河原能久<sup>3</sup>・吉田浩紀<sup>4</sup> Yasuhiro UEDA, Ryota TSUBAKI, Yoshihisa KAWAHARA and Koki YOSHIDA

<sup>1</sup>学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)
<sup>2</sup>正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科(同上)
<sup>3</sup>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)
<sup>4</sup>正会員 山口県庁 (〒753-8501 山口市滝町1-1)

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. The breaching of the rail and road embankment in flood plain has not been paid attention but more sophisticated treatment of the embankments in the floodplain must be developed to predict the damage due to inundation flow with intense condition. In this study, the breaching process and the critical flow condition to be breached are explored experimentally using the ballast embankment constructed by actual railway ballast material. An actual-sized ballast embankment with real rails and sleepers is installed in a open channel with 1 meter width. Using this actual-sized embankment, a criteria condition to reach severe embankment breach is specified. In the case of the water level surpasses the top of rails, the ballast layer is breached by flow through the railway embankment.

Key Words: Railway embankment, embankment breaching, overflow discharge, seepage flow inundation flow

# 1. 序論

近年,全国各地で集中豪雨や台風などの自然災害が発生し,そのたびに河川の洪水氾濫が多発している.洪水 氾濫により家屋や公共施設などの構造物への物的被害や, 構造物の倒壊や浸水などにより人的被害が引き起こされ ている.橋梁を含めた道路・鉄道網などが損壊する<sup>1)</sup>こ とは,被災地域のライフラインを遮断し,その後の復興 にも大きな影響を及ぼしている.

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機能を果たすことが期待される. その一方で,洪水氾濫により道路や鉄道網が切断される事例も山間部等でみられ,鉄道盛土の流失例(図-1等)も多くみられるが,このような被害に至る過程や,具体的な流失条件についてはこれまでほとんど検討されていない.

洪水氾濫による氾濫原に設けられた盛土構造の流失リ



図-1 鉄道盛土の流失状況 (兵庫県佐用町/JR西日本姫新線)

スクをあらかじめ評価することができれば、避難経路や 復旧計画の策定する上で有益である.また、越水により



図-2 実スケールでのバラスト堤体流失実験水路



図-3 ケースaの初期状態(バラストのみ設置)

盛土の流失破壊が生じると、盛土により堰上げられていた氾濫流が盛土流失部を集中的に流れることとなる.洪水氾濫解析を行う際にこのような氾濫原の盛土の流失現象を適切に取り入れることは、堤外地における氾濫流の伝播を正確に予測する上で重要である.

鉄道盛土は、レール、枕木、バラスト堤体、土質盛土 により構成されている<sup>2)</sup>.鉄道盛土の流失機構は、

- 1) バラスト流失により始まるもの,
- 2) 植生等に被覆された土質盛土の法面や法尻の洗掘 に起因するもの,
- 3) 浸透破壊に起因するもの

が考えられる. 椿ら<sup>3</sup>による既報では、実際に鉄道で利 用された廃バラストを用いた小サイズのバラスト堤体を 用いた開水路実験等を行うとともに鉄道盛土流失の要因 分析を行っている.鉄道盛土下流側の植生斜面流失<sup>4</sup>と、 バラストを支える盛土部分の浸透流流量について概算を 行い、上記の3つの流失機構の中ではバラスト部の流失 が発生しやすいことが示唆された.

そこで、本研究では、より実際的かつ具体的に鉄道盛 土流失現象の解明と流失条件の同定を行うことを目的と して、実スケールのバラスト堤体を用いた通水・流失実 験を行うこととした.この堤体は幅1mの開水路内に、



**図-4** ケースbの初期状態(バラスト・鉄道軌道・枕 木設置)

実際に鉄道盛土に供用される、未使用のバラスト材料 (新バラスト),コンクリート枕木および鉄道軌道を設 置したものである.

# 2. 実スケールでのバラスト堤体流失実験

#### (1) 実験概要

実スケールの鉄道のバラスト堤体を用いた通水実験を 行うために、長さ約5m,幅lm.高さ1mの開水路を作製 した.この水路中央部に図-2に示すように、バラスト堤 体、コンクリート枕木、鉄道軌道を設置した.また、バ ラスト堤体下部の水路床材料は、合板で作製し、不透水 層となっている.これは、既報<sup>3)</sup>において、バラスト堤 体を支える盛土部分の通過流量がバラスト部の通過流量 に対して通過単位幅流量が4~7桁小さいと見積もられた. バラストを透水・越流する状況での、盛土内の透過流は 無視できると判断した.また、本実験水路は流量等の制 約もあり、幅1mで作製したが、被害実例において枕木 間隔スケールでバラスト流失がみられたため、図-4のよ うに1セットの枕木を設置できるため、最低限の流失



(a) ケースa

(b) ケースb 図-5 崩壊後のバラスト堤体



(a) 通水前

(b)下流側レール越流前

(c)下流側レール越流後

図-6 バラスト流失過程 (ケースb)

図-3はケースa,図-4はケースbのバラスト堤体設置時の 状況を下流側から撮影した状況を示している.

#### (2) 実験結果

### a) バラストのみ設置した場合(ケースa)

図-3に示すようにバラスト堤体のみを設置して徐々に 通水流量を増加させていったところ,通水初期の単位幅 流量q=0.02m<sup>2</sup>/s程度の段階で,盛土の根基部分

(Y=600mm)から、いくつかのバラストの流失がみら れた. その流失量はわずかであり, 盛土斜面形成時に不 安定な状態でとどまった粒子が通水をきっかけとして流 失したものと思われる. 流量を増加させていくと、この ような根基部分からの軽微な流失が確認された. その後, 堤体全体がほぼ水没する程度まで通水流量を増加させる と,バラスト堤体の下流側法面が流出していき,幅 50cm程度の流路が形成された. このような大規模な流 失が確認されたものを「バラスト堤体の崩壊」と定義し て、このような崩壊が確認された単位幅当たりの通水流 量を崩壊限界流量q。(m<sup>2</sup>/s)とした. 同条件で二回実験を 行った結果, g=0.0416m<sup>2</sup>/s および g=0.0386m<sup>2</sup>/sで崩壊 がみられた. 設置した際のバラスト粒子同士の噛み合い や流失箇所の粒径分布などの影響で多少の流失強度の違 いは考えられるが、同程度の通水流量でバラスト堤体の 崩壊がみられた. 図-5(a)のような流路が形成される機 構は以下のように考察される.まず,粒子の噛み合わせ の不均質さなどにより、法面の上部の流失強度の弱い箇 所から流失が開始する. 流失により堤体高さが部分的に

現象は捉えられる水路を作製した. 図-2の側面図の下流 端(正面図の下流側左端「×」)を(X,Y,Z)=(0,0,0)とし た. このとき、Y=0.6m~4.3mまでをバラスト堤体の設 置区間とし、バラスト堤体は幅1.0m、長さ3.7m、高さ 0.47m, 法面勾配は1:1となるように新バラストを設置し た. また, Y=0.6~2.5mの区間の水路側面をアクリル板 で作製して, 流況を観察できるようにした. 本実験で対 象とした鉄道盛土形状は、単線非電化区間の盛土形状に 基づくもので、2009年8月の佐用豪雨で流失被害のあっ た区間の鉄道盛土形状をモデルとしている.

堤体を設置した後に、上流側に流入するように設けた 四角堰より開水路に水を供給して,一定の通水流量を 保った定常状態での、通水流量と上流側の水深huを計測 するとともに、水路側面および下流側からデジタルビデ オおよびカメラを用いて通水状況,水面形,堤体の流失 状況を記録した.

バラスト堤体については,

- ・ケースa:新バラスト堤体のみ設置
- ・ケースb:新バラスト堤体,鉄道軌道,枕木2つ設置を 左右に設置
- ・ケースc:新バラスト堤体,鉄道軌道,枕木1つ設置を 中央に設置

の3通りの条件で実験を行った.実際の鉄道盛土上部構 造における枕木同士の間隔は、ケースbで設置されたも のであるが、水路幅の関係上実験で多数の枕木をもった 実験遂行が困難であったため水路中央に枕木を設置した ケースcを設定することとした.

低下すると、その部分に流れが集中して流路形成が促進 される.流路形成により流れがさらに集中して、バラス トの移動が止まるまで流路勾配が減少していく.

#### b) バラスト,鉄道軌道,枕木2つ設置した場合(ケースb)

図-6(a) に示すように盛土の両端に枕木を設置した ケースbで、バラスト堤体の崩壊限界流量q<sub>c</sub>を確認した ところ、一回目はq<sub>c</sub>=0.0436m<sup>2</sup>/s、二回目はq<sub>c</sub>=0.0457m<sup>2</sup>/s でバラスト堤体の崩壊に達した.崩落が始まると、ケー スaと同様に下流の法面に流路が形成され、その流路が 発達して下流側レールの下を潜る流れが形成され、流路 の勾配が小さくなっていった.その間、流路幅の拡大は 限定的であった.

二度行なった実験に共通して、堤体やレールによりせき止められた水(図-6(b))が、下流側のレールを越流した後(図-6(c))、バラスト堤体の崩壊に至った.このことから、堤体内での浸透流だけでなく、堤体上面の下流端を越流することが、堤体の崩壊のきっかけとなることが示唆される.堤体の大規模な崩壊は、ケースaと同様に、堤体上面下流端の崩落がきっかけとなって発生した.バラストが水没して浮力が作用することに加え、越流することで堤体表面へせん断力が作用することで大規模な崩落が起きたものと考えられる.逆にいえば、少なくとも本実験の結果からは、堤体上面の下流端まで水没しない条件では、バラストの軽微な流失は見られるもののバラスト堤体は安定を保つと考えられる.

#### c) バラスト,鉄道軌道, 枕木1つ設置した場合(ケースc)

開水路の中央のX=0.5mに枕木を1つ設置し、これに鉄 道軌道を二本固定した.バラスト堤体の崩壊限界流量は、 q<sub>c</sub>=0.0463m<sup>2</sup>/sとなった.これは、枕木を二本設置した場 合に得られたq<sub>c</sub>=0.0436 m<sup>2</sup>/s~0.0457m<sup>2</sup>/sよりやや大きい もののほぼ同程度である.このケースcの実験ではケー スbの場合のように下流側のレールを越流する流れには ならなかったが、レールの下から噴流状態で水が通過し てレールの下流側でも開水面が形成され堤体下流端での 越流も発生し、その後にバラスト堤体の崩壊に至った. ケースcでは枕木2つのケースbよりもバラスト流失量が 大きかった.

#### (3) 通水単位幅流量と上流側水深(Y=4540mm)の関係

図-7に各ケースでの通水単位幅流量qと上流側水深  $h_{in}(Y=4.54m$ 地点の水深)の関係を示す.枕木2つ設置した 条件での関係を「 $\bullet$ 」で、枕木1つ設置したケースの結果 は「+」で示しているが、2ケースともに破線で示した崩 壊限界流量に達する時の上流側の水深 $h_{in}$ はほぼ同じ値と なっている.

2ケースの分布を比較すると, *q*=0.02m<sup>2</sup>/sや*q*=0.05m<sup>2</sup>/s 付近では同程度の上流側水深であるが,バラスト堤体流 失前の*q*=0.03m<sup>2</sup>/s付近では「+」で示したケースcの上流



図-7 単位幅流量q(m<sup>2</sup>/s)と上流側の水深h<sub>in</sub>(m)

側水深が相対的に小さい.これは,枕木が1つ減り,バ ラスト堤体内の通水可能断面が増加したことで透過流量 が増加したためと考えられる.

バラスト堤体の高さはZ=0.47m, レール上端までの高 さはZ=0.63mとなっており, 枕木2つ設置した際には q=0.034m<sup>2</sup>/s程度で上流側の水深はZ=0.63mに達するが, 枕木1つ設置した際にはq=0.04m<sup>2</sup>/s で上流側水深は Z=0.63mに達する. 枕木2つ設置した際のバラスト堤体 崩壊限界流量は $q_c$ =0.047m<sup>2</sup>/s, 枕木1つ設置した際のバラ スト堤体崩壊限界流量は $q_c$ =0.0463(m<sup>2</sup>/s)であることから, ケースbとケースc 間で崩壊限界流量に関しては大きな 差はない. よって実際の鉄道盛土での枕木配置を踏まえ ると, ケースbとケースcの崩壊限界流量の平均値である  $q_c$ =0.0452m<sup>2</sup>/s, 崩壊限界上流水深 $h_{c,m}$ =0.68mが指標とな ろう.

これより、実際の鉄道盛土においてバラスト材料が新 しい場合には、堤体の上流側の水深がh<sub>in</sub> > (0.68m+土質 盛土高さ)、あるいは、レール上端より水位が0.07mより 大きくなると大規模なバラスト堤体流失が発生するもの と評価できる.下流側レールの下を潜るように流路の発 達が進行し、最終的には完全にバラストが流失して図-1 に示すような大規模な鉄道盛土の流失が起きたものと考 えられる.また、実現象として、鉄道盛土区間の中で地 形等の影響から越流しやすい箇所で限界上流水深に達す ることにより、バラスト流失に繋がると示唆される.こ れは、実際の盛土崩壊後の写真等からレールを越流するこ とが確認できており、本実験でもレールを越流するこ とが確認できた.そのため、流失初期段階の議論では、 実際の流失に近い条件が得られたと考えられる.

本実験結果からバラスト堤体流失における限界流量と 限界上流水深の崩壊条件を得たが,



# 3. バラストの材料特性と抵抗則

#### (1) 材料特性とその経年変化

鉄道盛土のバラストは列車荷重を受ける枕木・鉄道軌 道を支えるクッションのような役割をもつため、長期間 使用後にはバラスト同士の摩擦により、バラスト粒子の 形状が丸くなっていくとともに、小粒径の粒子の割合が 増加していく.そのため、供用前の新バラストと供用後 の廃バラストでは材料特性が異なってくる.

図-8に、新バラストと廃バラストの粒度分布を示す. 新バラストは粒径20mm以下の粒子がほとんど含まれないのに対して、廃バラストは20%程度含んでおり、それが摩耗・破砕により生成されたものと考えられる.また 表-1に示すように、廃バラストは新バラストに比べて間隙率がやや小さいことが確認できる.また、各粒子の形状も廃バラストでは隅角部の摩耗によりやや丸まっている.このような特性の相違により、バラストは供用期間の経過とともに、通水抵抗特性やかみ合わせの違いによる流失移動形態が変化していくものと思われる<sup>5</sup>.

# (2) バラストを通過する流れの抵抗則

バラストにより形成された盛土内での通水抵抗を計測 するため、新・廃バラストを用いて図-9に示すような小 型のバラスト堤体を幅30cmの開水路に設けて、定常状 態での通水流量、バラスト堤体法面の流入水深h<sub>m</sub>、流 出水深h<sub>out</sub>、透水距離 *l*の測定をして、バラスト内の透 過抵抗則を一次元解析により同定した<sup>3)</sup>.その結果、新 バラストの抵抗則として、

$$i = U(0.79 + 25.1U) \tag{1}$$



表-2 実スケール盛土での実測水深と抵抗則を用い た一次元解析による解析水深

	実測h <sub>2</sub> (m)	実測h <sub>1</sub> (m)	解析h <sub>1</sub> (m)
$q = 0.0149 \text{m}^2/\text{s}$	0.231	0.371	0.372
$q = 0.0156 \text{m}^2/\text{s}$	0.246	0.376	0.379



図-11 抵抗則の検証区間

また廃バラストの抵抗則として<sup>3)</sup>,

$$i = U(5.00 + 1.20U) \tag{2}$$

を得た.ここで、U:断面平均流速,i:動水勾配である. 乱流抵抗による寄与に関連する速度の二乗の係数が空隙 の大きな新バラストで大きくなっていることが確認できる.

小型のバラスト堤体により同定した新バラストの抵抗 則(1)の適用性を確認するため実スケールのバラスト堤体 実験で計測された水面形を抵抗則(1)を用いて再現する. 実スケール実験の水面形は,アクリル板を設置した区間 で確認できる(図-11).測定箇所は,上流側では水路 壁面の合板とアクリル板の境界部で上流水深h<sub>1</sub>を測定し, バラスト堤体の初期状態(流出前)での法肩部で下流水 深hを測定した.この下流水深h<sub>2</sub>を実測値として与え, 一次元解析により実測の上流水深h<sub>1</sub>との比較を行った. 上流水深測定箇所でバラスト高さZ=0.47(m)を下回る条 件での二つの流量での水深の実測値と解析値を表-2に示 す.どちらも流量も,精度よく上流水深h<sub>1</sub>が評価されて おり,小型のバラスト堤体を用いて同定された新バラス ト内を透過する流れの抵抗則(1)の実スケールバラスト 堤体への適用性が確認された.

# 4. 結論

本論文では、鉄道盛土における廃バラストと新バラス トのバラスト材料特性の算定を行うとともに、鉄道盛土 流失の大きな要因と考えられバラスト堤体の流失機構と 流失条件を解明するために実スケールでのバラスト堤体 流失実験を行った.得られた知見を以下に示す.

- バラスト堤体が流失する際の崩壊限界流量を算出し、崩壊限界時のバラスト堤体上流水深との関係 性を明らかにした.
- 新バラストと比較し、廃バラストは透過抵抗が大 きいためバラスト堤体内透過時に上流側水深が高 くなり、バラスト流失が生じやすいと示唆される.
- 3) バラスト透過流れの抵抗則を算出し、その実ス ケール盛土への適用性を検証した.

本実験では、バラスト堤体下流側の流路形成・発達過 程は確認できたが、さらにバラスト流失が進むと流路の 貫通や土質盛土を含めたより大規模な堤体崩壊に至ると 予想される.バラスト流失通水可能流量や実験水路の関 係で、大規模な堤体崩壊までの過程を実際に確認するこ とはできなかったが、実験および解析を通してより包括 的な鉄道盛土流失の過程の解明を図る考えである.

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.広島大学工学部有尾一郎博士との討議や資料提供に深謝いたします.

#### 参考文献

- 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.
- 2)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.
- 3)椿 涼太,河原能久,上田康弘:越水による鉄道盛土の流失 機構に関する実験的研究,河川技術に関する論文集,Vol. 17,pp. 449-454, 2011.
- 4) Gyasi-Agyei, Y., Sibley, J., Ashwath, N., 2001, Quantitative evaluation of strategies for erosion control on a railway embankment batter, Hygrological Processes, 15, 3249-3268.
- David Hansen and Rizwanul Bari: Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing under coarse material. J. Hydraulic Eng., Vol. 128, No. 8, pp. 761– 773, 2002.

(2012.4.5受付)