構造物境界部における角折れ時の バラスト軌道の道床横抵抗力特性

山本 紗穂里¹・中村 貴久²・桃谷 尚嗣³・早野 公敏⁴

¹学生会員 横浜国立大学理工学部 建築都市・環境系学科
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: yamamoto-saori-tn@ynu.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: nakamura.takahisa.19@rtri.or.jp

³正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: momoya.yoshitsugu.29@rtri.or.jp

⁴正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: hayano-kimitoshi-hg@ynu.ac.jp

鉄道構造物境界部におけるバラスト軌道では、地震時に局所的変位が生じると道床横抵抗力が低下し、軌道の水平安定性が損なわれる。しかし、現場で生じる様々な条件下の道床横抵抗力特性を調べることは難しく、いままでに蓄積された資料は乏しい。そこで本研究では局所的変位をもたらすものとして、角折れに着目し、室内で角折れが発生できる装置を製作して模型試験を実施した。模型試験では道床横抵抗力に折れ角の大きさや回数、開閉状態が及ぼす影響、そして1本引き載荷試験と軌きょう引き載荷試験における違いなどについて調べた。

Key Words : ballasted track, structure boundary, angular rotation, model test, lateral resistance

1. はじめに

鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力は、水平安定性の観点から重要である¹⁾。ここで道床横抵抗力は道床バラスト内に設置されたまくらぎを横引きしたときの抵抗力である。

鋼製のレールは温度変化により長軸方向に伸縮しようとするが、拘束により伸縮量に制約があるため、軸力が増加して座屈することが懸念される²⁾。このレールの座屈を抑制するためには、過度な水平変位がまくらぎに生じないように、十分な道床横抵抗力の確保が必要である。

特に地震時には道床横抵抗力が低下し、安定性の向上を図る必要がある。浅沼ら³⁾は、軌道座屈安定解析を実施し、地震動の大きさ、最終道床横抵抗力の低下の程度、構造物の諸元によっては大きなレール横変位が生じることを明らかにしている。

地震時に道床横抵抗力の低下がどの程度実際に生じるかについて、中村ら^{4,5)}は大型振動台実験を実施し、正弦波や実地震波を用いた加振により、道床横抵抗力の低

下率を把握している。具体的には加速度のレベル、道床形状の変化あるいは入力波形の違いなどの観点から把握している。同時に、座屈防止板やバラスト止め壁による座屈防止対策工の効果を確認している。小林ら⁶⁾も、盛土上のバラスト軌道を対象に振動台実験を実施し、ジオテキスタイル材料で補強した軌道構造がバラストの流失を防止するとともに、道床横抵抗力の確保に効果があることを実証している。

図-1 角折れの状況

このように地震時における道床横抵抗力の低下率, そのメカニズムおよび向上対策について精力的に研究がなされている. ところが, 盛土区間と橋台区間の境, あるいは張出式RCラーメン高架橋などに見られる構造物境界部のバラスト軌道に着目したとき, その道床横抵抗力特性に関する知見は, 以下に述べるように限定的である.

構造物境界部においては地震時に“角折れ”に代表される局所的変形が生じることが知られている. 図-1に角折れの状況を示す. この局所的変形は通常の振動による変位に加えて, 不同変位をバラスト軌道にもたらしことになり, 道床横抵抗力にさらに影響を及ぼすと考えられる. 例えば曾我部ら⁷⁾は, 振動変位に不同変位を加えて, 構造物境界部の道床横抵抗力をさらに低下させるモデルを提案している.

構造物境界部の角折れによりどの程度道床横抵抗力が実際に低下するかについて, 藤波ら⁸⁾は3次元FEM解析を実施している. 折れ角として30/1000(境界部から軌道長手方向距離10m地点において直角方向に0.3mの相対変位)を設定し, 角折れにともなうバラスト剛性低下を考慮する形で道床横抵抗力を推定している. 解析の結果, 構造物境界部の角折れを考慮しない場合に比較して, 道床横抵抗力が約40%低下することを示している.

また, 佐藤ら⁹⁾は, 実物大の軌道模型を用いて高架橋上で角折れが生じた軌道を再現し, 道床横抵抗力を測定している. その結果, 角折れ付近のまくらぎの道床横抵抗力は, 道床が乱されていない部分と比較して30~40%ほど低下することを示している. 折れ角の設定は, 藤波ら⁷⁾と同じく30/1000であり, 折れ角の大きさ θ (図-1参照)や繰返し回数がどのような影響を道床横抵抗力に及ぼすかについて調べた事例は見当たらない.

以上述べたように, 振動が道床横抵抗力に及ぼす影響については詳細なデータが蓄積される一方で, 角折れが道床横抵抗力に及ぼす影響については, 実験的にも解析的にも限定された条件下でしか調べられていない. これは様々な条件下の角折れ時の道床横抵抗力特性を, 実際の現場や実物大の実験で調べるには非常な労力や費用を要するためと考えられる.

そこで本研究では実物の1/5サイズの道床模型を対象に, 角折れが発生できる装置を製作し, 模型試験を系統的に実施し, 様々な条件下の角折れ時の道床横抵抗力特性を調べた. 具体的には, 折れ角の大きさや角折れ回数, 開閉の状態が道床横抵抗力に及ぼす影響を調べた. 同時にPIV (Particle Image Velocimetry)解析により, 角折れ時の道床横抵抗力低下の要因について検討した. 最後に1本引き載荷試験と軌きょう引き載荷試験における角折れ時の道床横抵抗力の違いについても調べた.

(a) 装置全体 (道床模型作製前)

(b) 角折れ前 (道床模型作製後)

(c) 角折れ後 (道床模型作製後)

図-2 角折れ機構および水平載荷機構を具備した試験装置 (1本引き試験)

2. 用いた試験装置およびバラスト, まくらぎ

実物大軌道の1/5サイズの道床模型を対象に, 角折れ

図-3 使用した碎石の粒径加積曲線

図-4 角折れが生じたときの道床

を生じさせることができ、かつまくらぎの横引きが可能な装置を製作し、実験に使用した。使用した装置の概要を図-2に示す。装置は主に、[1]角折れ機構が付いた土槽、[2]水平載荷機構、から構成される。

(1) 角折れ機構が付いた土槽

土槽は寸法1245mm×970mm×150mmでアルミニウム製である。土槽の中には、実際のバラストの1/5サイズの碎石を用いた道床模型を作製した。用いた碎石の粒径加積曲線を図-3に示す。同図には実物のバラストの標準粒度に対する1/5サイズの範囲も示した。

土槽は支持台上にあり、土槽底面は中央部で2分割されている。図-2に示したように一つのヒンジを中心として、2つに分割された部分は互いに反対方向にまわり、その結果、底面が開き角折れが発生する仕組みである。土槽の外枠も底面と一緒に回転移動し、回転速度は、ハンドルの手動制御で行った。なおハンドルを逆回転させ、開いている底面を閉じる、すなわち角折れの無い状態に戻すこともできる。角折れを生じさせたときの道床の状況を図-4に示す。

底面の厚さは6mmで、底面の表面にはKoike et al.¹⁰⁾と同

図-5 用いたまくらぎの形状(3H)

様に、実際に近い摩擦条件となるようサンドペーパーを貼り付けた。ただし、角折れが生じる境界部の底面には幅40mm、厚さ0.5mmのバラスト落下防止板を貼り付けた(図-2参照)。角折れ時にこのバラスト落下防止板が土槽底面の開口部を覆うため、碎石が底面より下に落下することを防ぐことができる。また道床の重さにより土槽底面と常に密着しており、底面の開閉の際に、落下防止板と土槽底面の間に碎石が入り込んで噛むような事態は生じない。

(2) 水平載荷機構

水平載荷機構は、道床横抵抗力を測定するために模型道床内のまくらぎを横引きするものである。具体的にはロッドを介して、ジャッキ、ロードセルをまくらぎに連結させる。そしてモーターによりジャッキを回転させることによりまくらぎの横引きが可能である。横引き中の抵抗力はロードセルによって連続的に計測される。なお、角折れが発生した状態でも横引きが可能な機構とした。

使用したまくらぎはモルタル製で、まくらぎ寸法は実際の1/5である。形状は、新幹線に実際に用いられている3Hまくらぎのものとした。図-5に模型まくらぎ形状を示す。

3. 1本引き試験による道床横抵抗力特性

(1) 1本引き試験方法

折れ角の大きさや角折れ回数などが道床横抵抗力に及ぼす影響を調べるため、角折れを生じさせた後、まくらぎ1本を横引きする1本引き試験を実施した(図-2および図-4参照)。試験方法は以下の通りである。

まず、すべてのケースで道床密度が 1.60g/cm^3 になるように碎石をよく締固めて、土槽内に図-2に示す形状の道床を作製した。道床の作製途中では、角折れの影響を最も受け易いと考えられる角折れ境界部の直上の道床に、まくらぎを設置した。具体的には、土槽中心線から27mmずれた、落下防止板の端部の位置に、まくらぎの

長軸方向と角折れ境界部が平行になるように設置した。なお、まくらぎの上面高さが道床表面と一致するように道床を作製した。

続いて、角折れの最中および横引き時に沈下を防ぐために、まくらぎ上部の治具にワイヤーを通した。実際のまくらぎはレールに締結されており、角折れが生じるとぶら下がることが想定されたためである。横引き時に測定する道床横抵抗力に、ワイヤーの張力が及ぼす影響は無視できるほど小さいことをあらかじめ確認している。なお、治具は横引きの際にロッドと締結するために使用するもので、その重量は、まくらぎ1本あたりで負担するレールや締結治具の重量を考慮したものとした。

道床の作製およびまくらぎの設置が完了した後、図-6に示すように所定の回数の角折れを発生させた。角折れ時の土槽底面の回転速度は前述したように手動制御だが、なるべく一定速度(1mm/sec)になるように実施した。そして土槽底面が開いた(角折れした)状態あるいは閉じた(角折れていない)状態のどちらかに保ったままで、まくらぎとロッドを締結させ、まくらぎの横引きを行った。横引きは、一定の荷重速度0.4mm/minでまくらぎの水平変位が10mmになるまで行った。

発生させた折れ角の大きさや回数は、試験ケースによって変化させた。表-1に各試験ケースで生じさせた折れ角の大きさ、角折れの回数および角折れの開閉状態を示

図-6 角折れの繰返しと開閉の状態

表-1 1本引き試験ケース一覧

角折れ幅 (mm)	折れ角	角折れ 回数(回)	角折れ 状態
0	0	0	—
5	4.75/1000	1	閉じ
		10	
		20	
10	9.5/1000	1	閉じ
		10	
		20	
20	19/1000	1	閉じ
		10	
		20	
		1	開き
		20	

す。同表では、折れ角の大きさを角折れ幅として表している。角折れ幅は、横引き試験における荷重側の道床法面端部における目開き幅である(図-2の(b)参照)。角折れ幅10mmが折れ角の9.5/1000程度に相当する。角折れの回数は開閉2回分を正弦波1波分と考え、正弦波10波分に相当する20回を最大値とした(図-6参照)。

同表に示すように、角折れ幅として5, 10, 20mmの3種類、角折れ回数として1, 10, 20回の3種類を設定した。角折れ幅が5, 10 mmの場合は、角折れ回数1, 10, 20回後の閉じた状態でそれぞれ横引きを実施し、角折れ幅が20 mmの場合は角折れ回数1, 20回目の開いた状態ならびに閉じた状態、そして角折れ回数10回目の閉じた状態でそれぞれ横引きを行った。また、表-1に示すように角折れを全く生じさせない(角折れ幅が0mm, 角折れ回数が0回)、いわゆる常時の道床の横抵抗力の測定も合わせて行った。なお、表-1に示す12ケースでそれぞれ道床を作製して横引き試験を1回ずつ実施した。従って例えば、角折れ幅5mmで角折れ回数が1, 10, 20回の3ケースの場合、道床を3回作製してそれぞれ所定の角折れ回数に達したときに横引き試験を実施している。

(2) 横引きによるまくらぎの荷重～変位関係

図-7に横引き時に得られたまくらぎの水平荷重～水平変位関係を示す。角折れ幅5, 10, 20mmごとに図を分けた。また各図には、角折れを全く生じさせない場合(常時の場合)に得られた水平荷重～水平変位関係も合わせて示した。なお角折れ幅が10mmで角折れ回数が1回のケースについては、データロガーの不調から初期の荷重データが欠損している。

同図を見ると、いずれの角折れ幅においても、角折れが生じると、常時のものより道床横抵抗力が低下していることが確認できる。また図-7の(c)では、角折れが閉じた(角折れから元に戻した)状態よりも開いた(角折れている)状態で横引きしたほうが、道床横抵抗力がより低くなっている。開いた状態では、角折れによるバラストのゆるみや沈み込みがより顕著になる。そのため、まくらぎ底面や側面で発揮される摩擦力が小さくなり、道床横抵抗力がより減少すると考えられる。

角折れが閉じた状態における、横引きした際のまくらぎの鉛直変位～水平変位関係を図-8に示す。鉛直変位は荷重側のまくらぎ端部で測定したもので、横引き直前の状態を原点とし、まくらぎが上昇する側を正とした。同図には角折れを全く生じさせない場合の関係も合わせて示した。

同図をみると、角折れを与えない横引きの場合、水平変位の増加に伴い鉛直変位が増加する。これは、まくらぎ直下のバラストが横引き中にせん断変形し、ダイレタンシー特性として膨張するためである。一方、角折れを

与えた場合、鉛直変位はあまり変わらないかあるいは減少する傾向を示す、特に角折れ幅が大きいほどまくらぎが沈下する傾向が見られる。これは角折れ中に、まくらぎは幾分上昇するが、その後の横引きでまくらぎが沈下していることになる。すなわち、角折れによってまくらぎ底面のバラスト粒子がゆるみ、正のダイランシー特性が弱くなっていると考えられ、底面の摩擦抵抗力を減少させる要因になっていると推察される。

角折れが開いた状態ではまくらぎの姿勢が若干乱れた

(a) 角折れ幅が 5mm

(b) 角折れ幅が 10mm

(c) 角折れ幅が 20mm

図-7 横引きによるまくらぎの水平荷重～水平変位関係
(1本引き試験)

ため、鉛直変位を測定できなかったが、前述した水平荷重～水平変位関係から、開いた状態のほうが角折れによるバラストのゆるみや沈み込みがより顕著になると考えられる。

(3) 角折れ幅・角折れ回数が最終道床横抵抗力に及ぼす影響

図-7に示した横引き時の水平荷重～水平変位関係において、水平変位5～10mmの関係がおおむね水平になっていることから、この区間の平均値を最終道床横抵抗力と

図-8 横引きによるまくらぎの鉛直変位～水平変位関係
(1本引き試験)

図-9 最終道床横抵抗力～角折れ幅関係

図-10 最終道床横抵抗力～角折れ回数関係

して各ケースの値を求めた。水平荷重の最大値ではなく、平均値としたのは、データに変動がみられるためである。

角折れ幅と最終道床横抵抗力との関係を図-9に示す。いずれの角折れ回数においても、角折れ幅が大きいほど最終道床横抵抗力が低下している。

角折れ回数と最終道床横抵抗力の関係を図-10に示す。角折れ幅が5mmの場合は角折れ回数が1回で、角折れ幅が10mmと20mmの場合は角折れ回数10回ほどで、最終道床横抵抗力の低下が収まる傾向にある。角折れ回数が20回の時、角折れが閉じた状態では角折れ幅5, 10, 25mmの場合について道床横抵抗力が6%, 26%, 37%低下している。開いた状態では角折れ幅20mmの場合に道床横抵抗力が69%低下している。

4. 道床横抵抗力低下の要因

前章で示したように角折れが生じると、道床横抵抗力

(a) 角折れ1回目を与える直前

(b) 角折れ20回後の閉じた状態

図-11 PIV解析に用いた画像

(a) 開いた時

(b) 閉じた時

図-12 角折れの開閉に伴うバラストの移動

は低下する。低下する要因の一つとして、角折れによってまくらぎ底面のバラスト粒子がゆるみ、正のダイレタンシー特性が弱くなるとともに底面の摩擦抵抗力を減少させることを前述した。

一方、まくらぎの道床横抵抗力は底面摩擦力のみならず、端面抵抗力や側面抵抗力によっても発揮される^{11), 12)}。そこで、角折れが端面抵抗力や側面抵抗力に及ぼす影響を定性的に調べるため、角折れが生じる際のバラスト粒子の挙動をPIV解析により把握した。具体的には表-1の試験ケースのうち、角折れ幅が10mmで角折れ回数が20回そして角折れが閉じた状態で横引きを行ったケースを対象に、土槽上部からデジタルカメラによる撮影を行った。

画像撮影は、角折れを与える直前、そして1~20回の各回の角折れが開いた状態および角折れが閉じた状態において行った。PIV解析に用いた画像の例を図-11に示す。なお、画像は道床の上部から撮影したものであるため、実際のバラストの挙動は3次元であるが、算出した変位および最大せん断ひずみなどの値はすべて2次元に投影したものである。

(1) 角折れの開閉によるバラストの流出

[1]角折れを与える直前から1回目に開いた状態に至るまでのバラスト粒子の移動、[2]1回目の開いた状態から1回目の閉じた状態に至るまでのバラスト粒子の移動を、それぞれ求めた結果を図-12に示す。変位量を算出した格子点の間隔は8.1mmである。なお図中の斜めの線は、沈下を防ぐためにまくらぎ上部の治具に通したワイヤーである。

図-12の(a)では角折れが開いた時、バラスト粒子は土槽の回転に追従し移動している。一方、図-12の(b)では角折れが閉じた時に、まくらぎ端部から道床法尻方向に向かってバラスト粒子が流出している。したがって、図-4に示したような、角折れによるまくらぎ端部周辺の道床流出は、角折れが閉じた際に発生していると考えられる。初期状態で密に詰まったバラスト粒子は、角折れが開いたことによってせん断変形し体積膨張するが、その後角折れが閉じて元々の密度に戻ることができないため、法尻方向に流出したものと考えられる。

(2) 角折れの繰返しに伴うまくらぎ端部道床の塑性化

角折れを与える直前から角折れ20回目の閉じた状態に至るまでの、角折れの繰返しに伴うバラスト粒子の累積変位を算出した。得られた累積変位の分布を図-13に示す。角折れの支点とは反対側の開き部、すなわち横引き時の載荷側のまくらぎ端部から、ハの字状にバラストが変位している状況が認められる。

図-13の変位ベクトル分布から最大せん断ひずみ分布

図-13 角折れの繰返しに伴うラス粒子の累積変位

(a) 角折れ20回後の閉じた状態 (b) 角折れなしの横引き後
図-14 まくらぎ端部付近の最大せん断ひずみ分布

を算出した。具体的には前述したように2次元の平面ひずみ条件を仮定し、格子点の変位から最大せん断ひずみを求めた。得られたひずみ分布を図-14の(a)に示す。まくらぎ長軸方向に対し $-40\sim 40$ 度ほどの範囲に顕著な最大せん断ひずみが分布している。図-14の(b)には角折れを全く生じさせない常時における道床で、まくらぎを横引きした際に得られた最大せん断ひずみ分布¹³⁾を示した。

図-14の(a)と(b)を比較すると、角折れによって顕著に塑性化する領域は、まくらぎを横引きする際に塑性化する領域と重なっていることがわかる。すなわち、角折れが生じた道床では、本来まくらぎが横引きされる際にラスがせん断変形して破壊すべき領域がすでにせん断破壊してしまっているため端面抵抗力が減少し、道床横抵抗力の低下の一因となったと考えられる。

(3) ラス粒子の移動による側面土圧の減少

図-13において、まくらぎ側面付近のラス粒子はまくらぎから離れる方向に移動している。横引き時の載荷側の位置になるほど、その移動量は大きい。

まくらぎ側面のラスの挙動を詳細に見るため、まくらぎ長軸から100mm程度離れた位置に着目してラス粒子の挙動を調べた。着目した道床の位置を図-15に示す。同図は道床模型のまくらぎ付近を上から眺めた上面図である。着目位置は、横引き時の載荷側および非載荷側で1点ずつ、そして両地点の中心の合計3点とした。

図-15 着目した道床位置 (上面図)

図-16 角折れの繰返しに伴うラスの累積変位

図-17 角折れ回数とラスのy方向累積変位

同図にはxy方向の定義も示した。

角折れの繰返しに伴う、各位置でのラスのx,y方向の累積変位を図-16に示す。非載荷側ではx方向の負の向きに向かって3mmほど変位している。これは非載荷側の道床法尻方向に向かってラスが移動していることを意味する。一方、載荷側では正の向きに2mm程度移動しており、載荷側の道床法尻方向に向かって移動していると考えられる。まくらぎ中央付近では変位はほぼy方向のみである。

図-17は各位置のy方向の累積変位を、角折れの繰返し回数に対してプロットしたものである。いずれの位置でも、y方向は正の向きに変位しており、まくらぎからバ

ラスト粒子が離れる傾向にあることを示している。繰返し回数の増加に対して、変位量の収束傾向は認められない。角折れ1回時のy方向累積変位をまくらぎ高さ51mmで正規化すると、1.2~2.7%となり、側面に働く土圧状態が静止から主働に移行するのに十分である。最終的には側面の露出に至り、側面抵抗力が減少し、道床横抵抗力の低下の一因となったと考えられる。

5. 軌きょう引き試験による道床横抵抗力特性

(1) 軌きょう引き試験方法

1本引き試験は比較的試験方法が簡便であるが、実際には複数のまくらぎがレールに締結されており、レールの剛性や隣りあうまくらぎの干渉などが考慮されない。

図-18 軌きょう引き試験概要

図-19 軌きょう引き試験の様子

表-2 軌きょう引き試験ケース一覧

角折れ幅[mm]	角折れ状態	回数[回]
0	—	0
20	開き	1
		20

そこで労力を要するが、1本引き試験と同じ装置を用いて、バラスト道床内にまくらぎ5本からなる軌きょうを設置し、1本引き試験と同様に、角折れを生じさせた後に横引きを行った。試験の概要を図-18に、また試験の状況を図-19に示す。試験方法は以下の通りである。

まず、碎石を用いて道床を作製した。道床の形状や密度は、1本引き試験のもの（図-2参照）と同じである。道床の作製中に、3Hまくらぎを等間隔で5本設置し、同時に剛性の高い軌きょうに各まくらぎを連結した。具体的には図-18に示したまくらぎCの位置が、1本引き試験におけるまくらぎのものと同じになるように設置した（図-2の(b)参照）。まくらぎ間隔は116mmである。また図-18に示すように、軌きょうとまくらぎの間にロードセルを設置して、まくらぎAとBに作用する水平荷重をそれぞれ計測できるようにした。なお各まくらぎにはロードセルを二個ずつ設置し、水平荷重の算出には二個のロードセルの値の合計値を用いた。軌きょうや取付け治具、ロードセルなどの重量は、実際のレール荷重を考慮してカウンターバランスを用いて調整した。

道床の作製およびまくらぎ・軌きょうの設置が完了した後、1本引き試験と同様に所定の回数の角折れを発生させた。続いて軌きょうの横引きを行った。剛性の高い軌きょうにより連結されているため、横引き中には、まくらぎ5本が同時に一緒に移動する。角折れ中の回転速度や横引きにおける載荷速度は、それぞれ1本引き試験と同じである。

表-2に試験ケース一覧を示す。角折れ幅を20mmとし、1回あるいは20回の角折れを生じさせたあとに、開いた状態（角折れした状態）で横引きを行った。なお、角折れを全く生じさせない（角折れ幅が0mm、角折れ回数が0回）道床についても、軌きょう引き試験を実施した。

(2) 横引きによるまくらぎの荷重～変位関係

軌きょう全体の水平荷重～水平変位関係を図-20に示す。初期の道床横抵抗力は、角折れ1回と20回ではほと

図-20 横引きによるまくらぎの水平荷重～水平変位関係（軌きょう引き試験）

図-21 各まくらぎで負担する最終道床横抵抗力の変化

んど差が見られない。その後は角折れ1回の方が少し小さくなっている。軌きょう全体でみると、角折れしない状態に比べ20～25%程度最終道床横抵抗力が低下している。1本引き試験の場合、同じ角折れ幅20mmで同じく開いた状態で最終道床横抵抗力が60～70%程度低下している。1本引き試験と軌きょう引き試験それぞれの低下率が異なる結果となっている。

(3) 各まくらぎにおける低下率

前述したように1本引き試験に比べると、軌きょう引き試験における最終道床横抵抗力の低下率が小さかった。軌きょうにおける各まくらぎに対する角折れの影響が異なるためと考えられ、図-18のまくらぎA, B, Cそれぞれの道床横抵抗力を整理した。まくらぎCの道床横抵抗力は、対称性を仮定し軌きょう全体の道床横抵抗力から下記のように算出した。

$$LR_C = LR_{\text{全体}} - 2(LR_A + LR_B) \quad (1)$$

ここで LR_A , LR_B , LR_C はまくらぎA, B, Cそれぞれの道床横抵抗力を、 $LR_{\text{全体}}$ は軌きょう全体の道床横抵抗力を表す。

図-21に各まくらぎの最終道床横抵抗力と角折れ回数の関係を示す。同図で角折れが発生しない状態で、すでに各まくらぎが分担する道床横抵抗力が異なるが、これは群杭効果や境界条件の影響として知られる。まくらぎCの最終道床横抵抗力は群杭効果の影響を特に受けるため小さい。

同図で角折れの影響を見るとまくらぎBの20回目の傾向がやや異なるが、角折れによる低下はまくらぎCの場合20～40%程度であり、まくらぎA, Bの場合5～25%程度である。設置位置が同じであるまくらぎCの場合でも、1本引きの角折れによる低下率60～70%に比べて小さい。

角折れが生じると、まくらぎ端面が露出するほどバラストが流出し、1本引きの場合には特に側面も露出する。しかし軌きょう引きの場合、隣接するまくらぎによりバラストが拘束されているため、それほど側面が露出しな

い。加えてもともと群杭効果によりまくらぎ端部の抵抗力の全体に対する貢献が相対的に小さいため、軌きょう引きのほうが1本引きより低下率が少ないと考えられる。

6. まとめ

現場で生じる様々な条件下の角折れ時の道床横抵抗力特性を調べることは難しく、いままでに蓄積された資料は乏しい。そこで本研究では水平角折れに着目し、角折れが発生できる装置を製作し、模型試験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) まくらぎ1本を横引きする1本引き試験の結果、角折れが生じると、常時のものより道床横抵抗力が低下した。角折れが閉じた（角折れから元に戻した）状態よりも開いた（角折れしている）状態のほうが、道床横抵抗力がより低下した。
- 2) 角折れ幅が大きいほど最終道床横抵抗力が低下する一方で、角折れ回数の増加にともなう道床横抵抗力の減少は、1～10回程度の繰返し回数で収束する傾向にある。
- 3) PIV解析などを実施した結果、角折れにより道床横抵抗力が低下する要因として、まくらぎ下部の道床のゆるみ、まくらぎ側面に作用する土圧の低下および道床流出に伴うまくらぎ端部の道床の塑性化などが考えられる。
- 4) 1本引き試験では、20mmの角折れが生じると角折れ部直上で道床横抵抗力が60～70%ほど低下したのに対し、軌きょう引き試験では、軌きょう全体の道床横抵抗力は、20～25%ほどしか低下しない。
- 5) 軌きょうにおける各まくらぎの低下率を調べたところ、角折れ部直上のまくらぎで角折れによる低下率は20～40%程度であり、やはり1本引きより低下率が小さい。その理由として拘束効果や群杭効果の影響が考えられる。

7. おわりに

今後の研究として実規模レベルの検証が望まれるが、実物大実験の実施には大変な労力がかかる。そのため、FEMなどの解析の適用が期待され、適用の際には、本研究で得られた知見をもとに、解析精度の検証を行うことが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 片岡宏夫：ロングレールの座屈防止，RRR, Vol. 65, No. 9, pp. 8-11, 2008.
- 2) 柳川秀明：最新の鉄道設計技術 ロングレールの適用範囲拡大時の設計法，RRR, Vol. 63, No. 2, pp. 18-21,

- 2006.
- 3) 浅沼潔, 関根悦夫, 片岡宏夫, 曾我部正道, 後藤恵一, 徳永宗正: 鉄道力学 バラスト軌道の地震時変形挙動, 鉄道総研報告, Vol. 25, No. 6, pp. 47-52, 2011.
- 4) 中村貴久, 関根悦夫, 白江雄介: 大型振動台試験によるバラスト軌道の耐震性能評価, 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 12, pp. 23-28, 2010.
- 5) 中村貴久, 桃谷尚嗣, 早野公敏, 小川隆太: 地震時におけるバラスト軌道の道床横抵抗力特性, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 70, No. 3, pp. I_79-I_86, 2015.
- 6) 小林幹人, 関雅樹, 渡邊康人, 可知隆, 古関潤一: ジオテキスタイル材料で補強したバラスト軌道構造の振動台試験, ジオシンセティックス論文集, Vol. 23, No. 0, pp. 215-222, 2008.
- 7) 曾我部正道, 浅沼潔, 桃谷尚嗣, 中村貴久: 構造物境界における有道床軌道の地震時座屈挙動とそのフラジリティ曲線, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 12, pp. 53-58, 2014.
- 8) 藤波潔, 大野和巳, 関根悦夫, 中村貴久: 地震動を受けた構造物境界部バラスト軌道の道床横抵抗力に関する FEM 解析, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演集, IV-158, pp. 315-316, 2011.
- 9) 佐藤吉彦, 三浦重, 高井秀之, 長沢孝哉: 高架橋の水平目違いおよび水平角折れに対する軌道の変形特性試験, 鉄道技術研究所速報, No. A-85-61, pp. 1-77, 1985.
- 10) Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K. and Momoya, Y. : Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks, *Soils and Foundations*, Vol. 54, Issue 3, pp. 502-514, 2014.
- 11) 市川拓真, 早野公敏, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 小池陽平: 極限釣り合い法を用いた鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力の推定, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 70, No. 3, pp. I_71-I_77, 2014.
- 12) Le Pen, L. M. and Powrie, W. : Contribution of base, crib, and shoulder ballast to the lateral sliding resistance of railway track: a geotechnical perspective, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 225, No. 2, pp. 113-128, 2012.
- 13) 山本紗穂里, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 早野公敏, 市川拓真: 横抵抗力試験におけるバラスト軌道道床の変形挙動に関する PIV 解析, 第 11 回地盤工学会関東支部発表会講演集(GeoKanto2014), pp. 216-219, 2014.

(2015. 4. 2 受付)

LATERAL RESISTANCE CHARACTERISTICS OF BALLASTED TRACKS SUBJECTED TO ANGULAR FOLDING AT STRUCTURE BOUNDARIES

Saori YAMAMOTO, Takahisa NAKAMURA, Yoshitsugu MOMOYA
and Kimitoshi HAYANO

When earthquakes induce local displacements on ballasted tracks at structure boundaries, the lateral resistance decreases and the lateral stability becomes lower. However it is difficult to examine the lateral resistance characteristics under various conditions occurring in the field, so that our knowledge related to this issue have not been accumulated. Therefore, angular folding which is one of the phenomena causing local displacements is focused in this study. After an apparatus which could generate angular folding was newly developed, a series of model tests were conducted. From the model tests, effects of folding angles, the repetition numbers, and the opening or closing status on the lateral resistance were investigated. In addition, differences between lateral resistances from single-sleeper pullout tests and those from track-panel pullout tests were also studied.