

論文 カント区間の道床沈下の非対称性に関する解析的検討

河野 昭子¹

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番地38号）

E-mail: kono.akiko.43@rtri.or.jp

道床沈下・流動解析モデル‘DEMCS-track’を用いて、バラスト軌道のカント区間の離散体モデルを作成し、路盤剛性3条件、外力作用方向3条件（均衡速度方向、カント不足方向、カント超過方向）における繰返し載荷シミュレーションを行った。その結果、載荷初期のまくらぎの鉛直方向変位は、路盤剛性の影響を受けること、また外軌側において内軌側よりも著しく大きくなる傾向が確認された。また載荷に伴い、内外軌両側の鉛直方向変位の非対称性は減少する傾向も見られた。更に、まくらぎ底面の内軌側のみを弾性化した条件でシミュレーションを行った結果、弾性化しない場合に比較して、載荷初期の内外軌両側の鉛直方向変位の非対称性が緩和される傾向が確認された。

Key Words : Ballasted Track, Discrete Element Method, Canted Tracks, Unsymmetrical deformation

1. はじめに

道床バラスト軌道のカント区間においては、内外軌両側レール下の道床厚が異なることから、必然的にレール下の支持剛性が異なる。これに加えて、カント区間を走行する列車の速度は必ずしも均衡速度が保たれているとはいえず、特に在来線のカント区間では、特急列車、普通列車、機関車と様々な走行速度の列車通過荷重を受けるため、軌道に対する外力作用方向も様々である。

更にカント区間では、現場の条件により内軌側または外軌側のまくらぎ下が浮きまくらぎ状態となり、列車通過時にまくらぎが回転する現象も確認されている¹⁾。

カント区間のバラスト軌道については、新幹線の高カント区間におけるバラスト流動について、そのメカニズムや抑制方法に関する実験的検討が行われている²⁾³⁾。これらの研究では、主にカント区間のまくらぎ間のバラストの挙動に着目した観察が行われている。

これに対して本研究では、まくらぎ下の道床沈下の非対称性に着目し、そもそもカント区間において、まくらぎが回転する原因となるまくらぎ下のバラストの非対称な移動特性を3次元DEMを用いた解析によって観察する。

更に、まくらぎ底面の内軌側だけを弾性化した条件で解析を行い、まくらぎ下の道床沈下の非対称性に対する影響についても観察する。

2. シミュレーション条件

(1) モデル

図-1に本研究で用いた離散体カント付バラスト軌道モデルを示す。カントは75mmとし、内軌側レール下の道床バラスト層の厚さは200mmとした。まくらぎは3号PCまくらぎである。

道床バラスト層モデルのバラスト要素数は14400個で、見かけの密度は1.63g/cm³となったが、文献4より、実際の道床バラスト層の密詰状態の範囲内となった。

シミュレーションには筑波大学で開発されたDEM-CSを鉄道総研が一部改良したDEMCS-track⁵⁾を用いた。

路盤部分は、K30値が30MN/m³、70MN/m³、110MN/m³となる3通りの条件とした。

(2) DEMパラメータ

表-1にDEMパラメータを示す。まくらぎ要素とバラスト要素のパラメータの根拠は従来⁶⁾と同様である。

路盤要素のパラメータについては、平板載荷試験を模擬したDEMシミュレーションを実施し、そこでK30値が30MN/m³、70MN/m³、110MN/m³となる値を用いた。

(3) 載荷条件

載荷荷重は、左右レール要素それぞれに最小1kN、最大30kNの正弦波載荷とし、ここでは後述の載荷方向の影響に着目するため、載荷周波数は5Hzで統一した。

荷重作用方向は図-2に示すように、均衡速度（73.19km/h）方向、カント不足方向（走行速度100 km/h 想定、均衡速度方向から3.45度外軌側向）、カント超過方向（走行速度50km/h 想定、均衡速度方向から2.15度内軌側向）の3通りとした。更に載荷回数は100回とした。

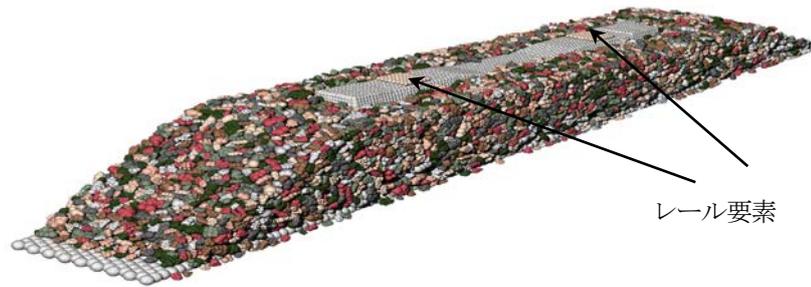


図-1 離散体カント付バラスト軌道モデル

表-1 DEMパラメータ

		粒子間ばね係数 (N/m)		粒子間減衰係数 (N·s/m)		粒子間摩擦角 (度)
バラスト要素	Kn	9.09×10^6	Cn	478	36	
	Ks	2.27×10^6	Cs	238.5		
まくらぎ要素	Kn	9.09×10^6	Cn	478	20	
	Ks	2.27×10^6	Cs	238.5		
路盤要素	30MN/m ³	Kn	2.00×10^2	Cn	95.6	20
		Ks	0.50×10^2	Cs	59.8	
	70MN/m ³	Kn	3.00×10^3	Cn	11.1	20
		Ks	0.75×10^3	Cs	5.555	
	110MN/m ³	Kn	4.00×10^5	Cn	97	20
		Ks	1.60×10^5	Cs	61.3	

3. 内外軌レール下の変位の非対称性

(1) 内外軌レール要素の移動履歴

図-3 にシミュレーション結果より、載荷10回目と載荷100回目の載荷・除荷過程における内外軌レール要素（図-1参照）の要素中心点の移動履歴を示す。図-3-a) が載荷10回目、図-3-b) が載荷100回目の結果を示し、各図1) が内軌側レール要素、2) が外軌側レール要素の移動履歴、更に各図i) が路盤剛性 30MN/m³、ii) が路盤剛性 70 MN/m³、iii) が路盤剛性110 MN/m³の結果を示す。また、全ての図において、図の原点は各載荷回の載荷開始時のレール要素の位置で、横軸の-は外軌側方向を示す。

図-3-a)-1) より、載荷10回目の外軌側レール要素は、路盤剛性30MN/m³の場合、鉛直方向変位はいずれの載荷方向においても最大荷重時に約2.6mm 沈下し、その後、約1.1mm の位置まで戻る。一方、水平方向の変位は載荷方向によって異なり、カント超過方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約0.27mm 移動した後、約0.35mm の位置まで移動し、均衡速度方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約0.5mm 移動した後、約0.8mm の位置まで移動する。更にカント不足方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約1.1mm 移動した後、約1.6mm の位置まで移動し、載荷方向の影響が明瞭に現れている。

同図より路盤剛性70MN/m³の場合、鉛直方向変位は3通りの載荷方向でほぼ同程度で、水平方向の変位のみ載荷方向の影響を受ける傾向は路盤剛性30MN/m³の場合と同様であるが、変位量自体は全体的に、鉛直方向変位で約4割、水平方向変位でも約5割減少している。

更に同図より路盤剛性110MN/m³の場合でも、鉛直方向変位は3通りの載荷方向で同程度で、水平方向の変位のみ載荷方向の影響を受ける傾向は同様である。変位量が更に減少するが、減少割合は、路盤剛性30MN/m³と70MN/m³条件の差より小さくなる。

次に図-3-a)-2) より、載荷10回目の内軌側レール要素は、路盤剛性30MN/m³の場合、鉛直方向変位はいずれの載荷方向においても最大荷重時に約1.4mm 沈下し、その後、約0.27mm の位置まで戻る。

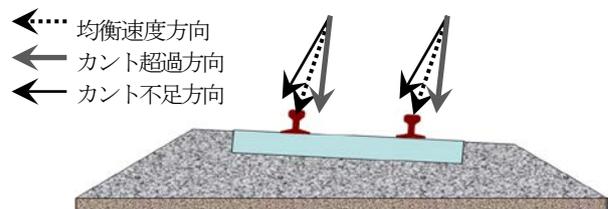


図-2 載荷方向

一方、水平方向の変位は、カント超過方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約0.2mm 移動した後、除荷過程で約0.3mm の位置まで徐々に移動し、均衡速度方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約0.44mm 移動した後、約0.73mm の位置まで移動する。更にカント不足方向載荷では最大荷重時に外軌側へ約0.91mm 移動した後、約1.5mm の位置まで移動し、載荷方向の影響が明瞭に現れている。

同図より路盤剛性70MN/m³の場合でも、鉛直方向変位は3通りの載荷方向でほぼ同程度で、水平方向の変位のみ載荷方向の影響を受ける傾向は同様であるが、変位量自体は全体的に、鉛直方向変位で約3割、水平方向変位でも約4割減少している。

更に同図より路盤剛性110MN/m³の場合でも、鉛直方向変位は3通りの載荷方向で同程度で、水平方向の変位のみ載荷方向の影響を受ける傾向は同様で、変位量は更に減少し、減少割合は、路盤剛性30MN/m³と70MN/m³条件の差より小さくなる。

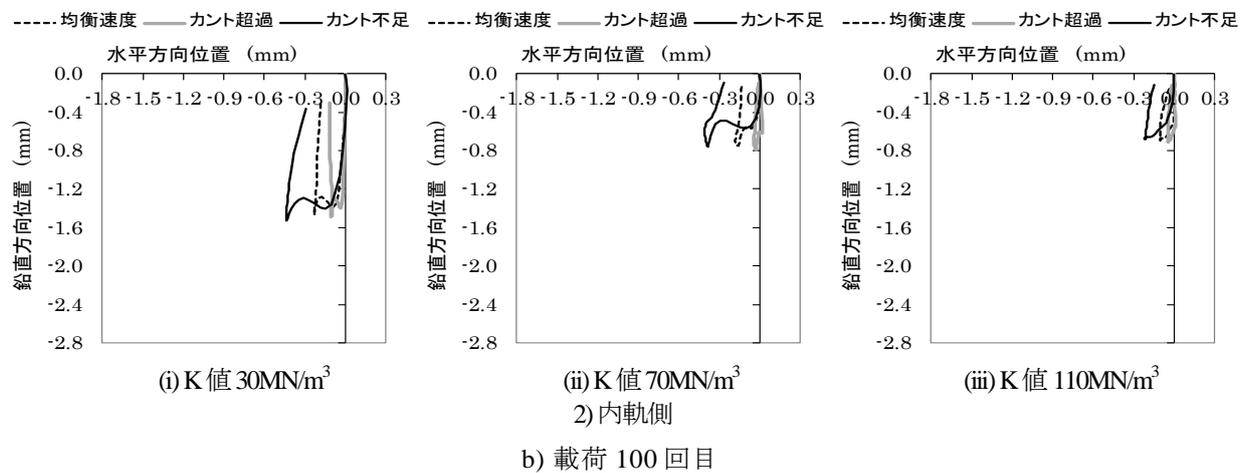
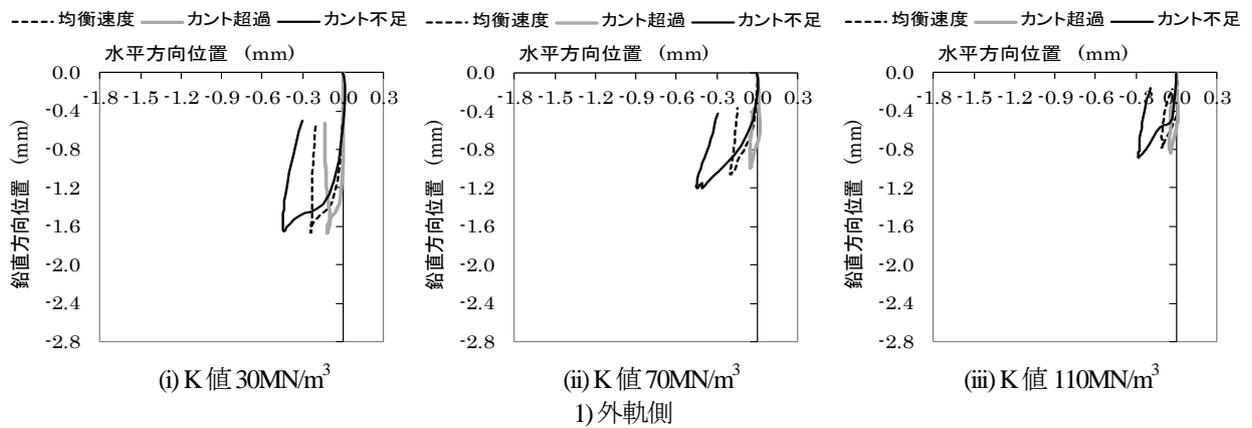
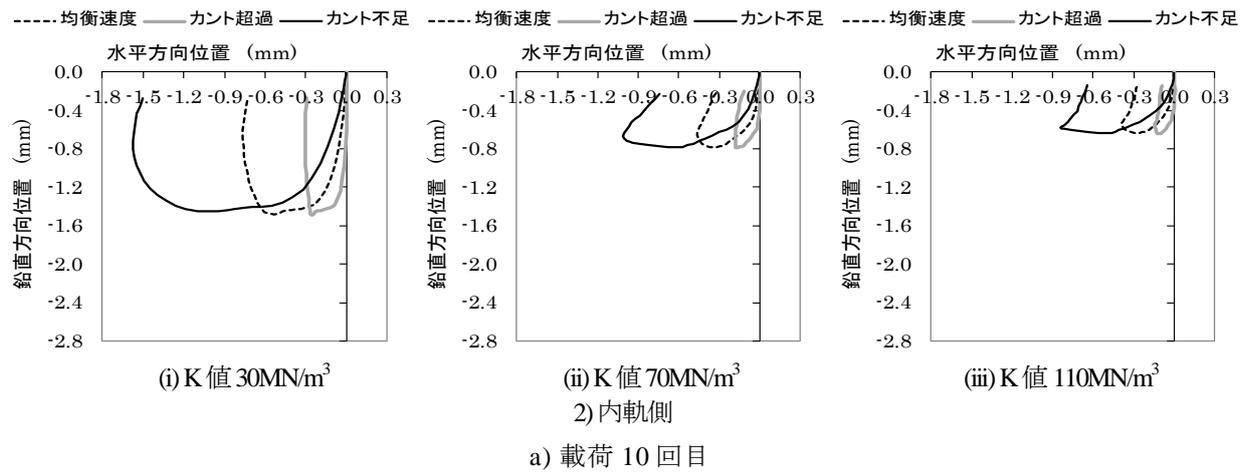
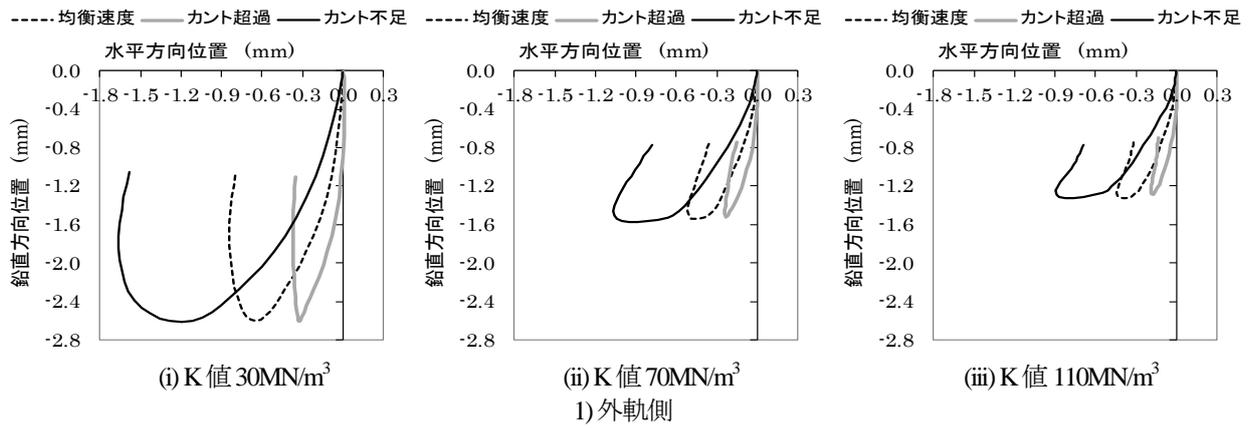


図-3 内外軌レール要素の移動履歴

つまり、**図-3-a)** に示す**荷重10回目**においては、内外軌両側のレール要素の移動履歴の鉛直方向変位は路盤剛性の影響を、水平方向変位は荷重方向の影響を受けるといえる。

更に同図より**荷重10回目**の内外軌両側レール要素の移動履歴を比較すると、水平方向変位に対して鉛直方向変位の差が顕著であり、外軌側の鉛直方向変位が内軌側の2倍程度となっている。

一方、**図-3-b-1)** より**荷重100回目**においては、外軌側レール要素は路盤剛性 30MN/m^3 の場合、鉛直方向変位はいずれの荷重方向においても最大荷重時に約 1.6mm 沈下し、その後、約 0.4mm の位置まで戻り、変位量は荷重10回目より著しく減少する。また、水平方向の変位も、カント超過方向荷重では最大荷重時に外軌側へ約 0.1mm 移動した後、約 0.13mm の位置まで移動し、均衡速度方向荷重では最大荷重時に外軌側へ約 0.24mm 移動した後、約 0.2mm の位置まで戻り、カント不足方向荷重では最大荷重時に外軌側へ約 0.45mm 移動した後、約 0.3mm の位置まで戻り、変位量はいずれも減少している。

同図より路盤剛性 70MN/m^3 の場合でも、鉛直方向変位および水平方向の変位に対する荷重方向の影響の定性的傾向は同様で、変位量も荷重10回目に対して2~3割減少している。また路盤剛性 30MN/m^3 の場合と比較しても、鉛直方向変位は約3割、水平方向変位は約5割減少している。

更に同図より路盤剛性 110MN/m^3 の場合でも、鉛直方向変位および水平方向の変位に対する荷重方向の影響の定性的傾向は同様で、変位量も荷重10回目に対して2~3割減少している。また路盤剛性 70MN/m^3 の場合と比較しても、鉛直方向変位と水平方向変位が約3割減少している。

次に**図-3-b-2)** より、**荷重100回目**の内軌側レール要素の移動履歴を同じく外軌側レール要素と比較すると、路盤剛性 30MN/m^3 の場合では、鉛直方向変位と水平方向の変位はほぼ同程度となっている。

これに対して路盤剛性 70MN/m^3 および 110MN/m^3 の場合では、依然として鉛直方向変位は外軌側の方が大きい傾向となっている。

(2) 内外軌レール下のひずみ

前節において内軌側と外軌側のレール要素の移動履歴において、特に鉛直方向変位の差が顕著であることが示されたが、そもそも内外軌両側レール下の道床厚さが 75mm 異なっている。

そこで、各レール要素の荷重10回目と荷重100回目の鉛直方向の変位振幅を初期状態における道床厚さで除した値（以下、ひずみ）を**図-4**に示す。

まず**図-4-a)** に示す**荷重10回目**においては、路盤剛性3

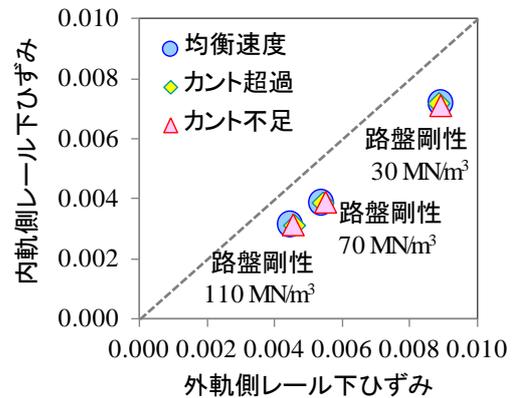
通り、荷重方向3通りの合計9通りの条件において、いずれも外軌側のレール下のひずみが内軌側よりも大きく、アンバランスとなっていることが明らかである。

他方**図-4-b)** に示す**荷重100回目**においては、いずれの条件においても外軌側と内軌側のレール下のひずみが同程度となる。これは荷重100回の過程で外軌側レール下の道床バラスト層が締められることで、変位振幅が小さくなることを示している。

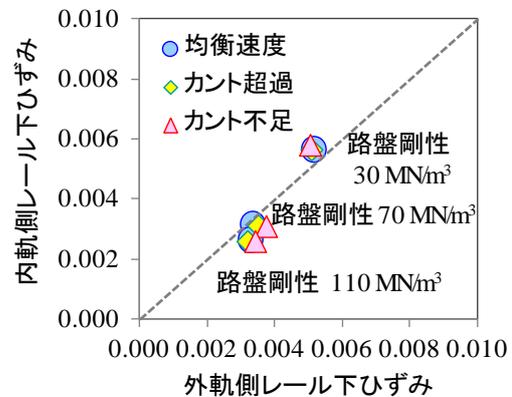
ここで**図-5** に荷重10回後と荷重100回後の除荷時のまくらぎ要素のまくらぎ長手方向中心線を荷重前の中心線と合わせて示す。図より、荷重10回後および100回後において、除荷時においても、まくらぎ要素の外軌側への傾きが残留する傾向が明らかである。

つまり、カント区間においては、繰返し荷重によって外軌側のレール下の道床バラスト層も締められるが、同時に不均衡な沈下も発生していることから、外軌側のまくらぎ下が浮きまくらぎ状態になることが考えられる。

特に実際の軌道では、レールによって前後のまくらぎと締結されることから、外軌側の変位振幅は本解析結果ほど減少しないことも考えられる。



a) 荷重 10 回目



b) 荷重 100 回目

図-4 内外軌レール下の鉛直方向変位/初期道床厚さの値

4. 片側まくらぎ下弾性化の影響

前章において、カント区間の内外軌両側レール下の支持剛性の差は、荷重初期において特に著しいが、荷重回数に伴い差が小さくなる傾向が示された。

ここで図-6 に示すように、荷重10回後のまくらぎ外軌側部分の道床バラスト層を観察すると、まくらぎ下と道床バラスト層の間に既に隙間が発生しているのが確認される。つまり、まくらぎ外軌側の浮きは、荷重初期に既に発生していることが示唆された。

(1) 解析条件

ここで図-7 に示すように、ここまでの検討で用いた離散体カント付バラスト軌道モデルのまくらぎ底面の内軌側のみ弾性材のパラメータに変更し、同様のシミュレーションを行った。ここで弾性材のパラメータとして、有道床弾性まくらぎの物性値である、ばね係数9MN/mよりパラメータを設定した。

(2) 内外軌レール下のひずみの変化

前章の図-4-a) と同様に、片側まくらぎ下弾性化条件で行ったシミュレーション結果より、荷重10回目の内外軌レール要素の鉛直方向変位をレール下の初期道床厚で除した値を図-8に示す。

図より荷重10回目において、路盤剛性3通り、荷重方向3通りの全9通りの条件において、外軌側と内軌側のレール下のひずみは、図-4-a)に比較すると、内外軌の差が減少している。

ただし、内軌側レール要素の変位には内軌側のまくらぎ底面の弾性材の変位も含まれているため、まくらぎ下の道床バラスト層の移動状況を図-9に示す。

図より、移動量が10mm以上のバラスト要素は弾性化なしの場合に19個であるのに対して弾性化ありでは17個、移動量が8~10mmのバラスト要素は両者とも37個、また移動量が5~8mmのバラスト要素は弾性化なしで1198個、弾性化ありで1164個であり、弾性化ありの条件で全体的にバラスト要素の移動量が減少している。

また分布状況では、まくらぎ中央から外軌側においてバラスト要素の移動距離(矢印の長さ)が減少する傾向が見られるのに対して、内軌側では増加する傾向が現れている。つまり、まくらぎ底面の内軌側の弾性化によって、バラスト要素の移動の非対称性も緩和されることが示唆された。

5. 非対称な道床バラスト沈下過程のミクロな観察

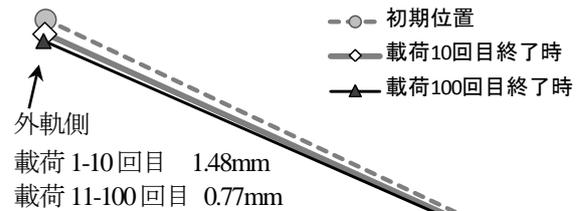


図-5 まくらぎ要素の傾きの変化
(路盤剛性 30MN/m^3 均衡速度方向)

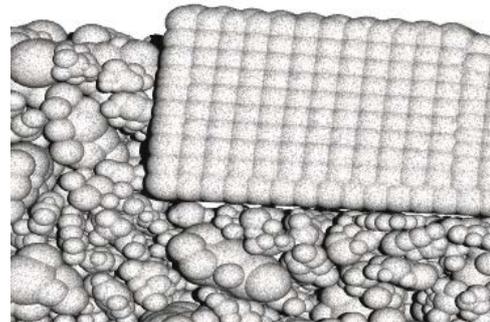
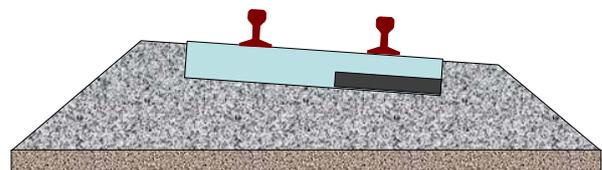


図-6 まくらぎ要素外軌側下の浮き
(荷重 10 回後)



弾性材の物性

図-7 片側まくらぎ下弾性化条件

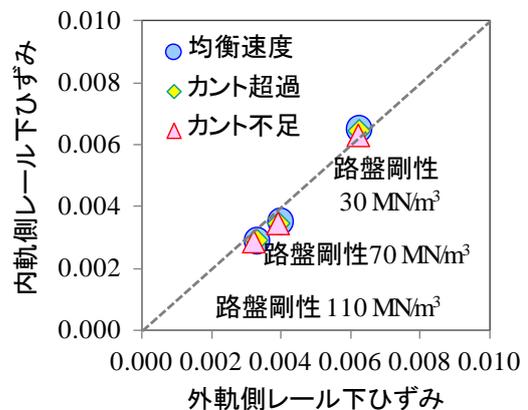


図-8 内外軌レール下の鉛直方向変位/初期道床厚さの値

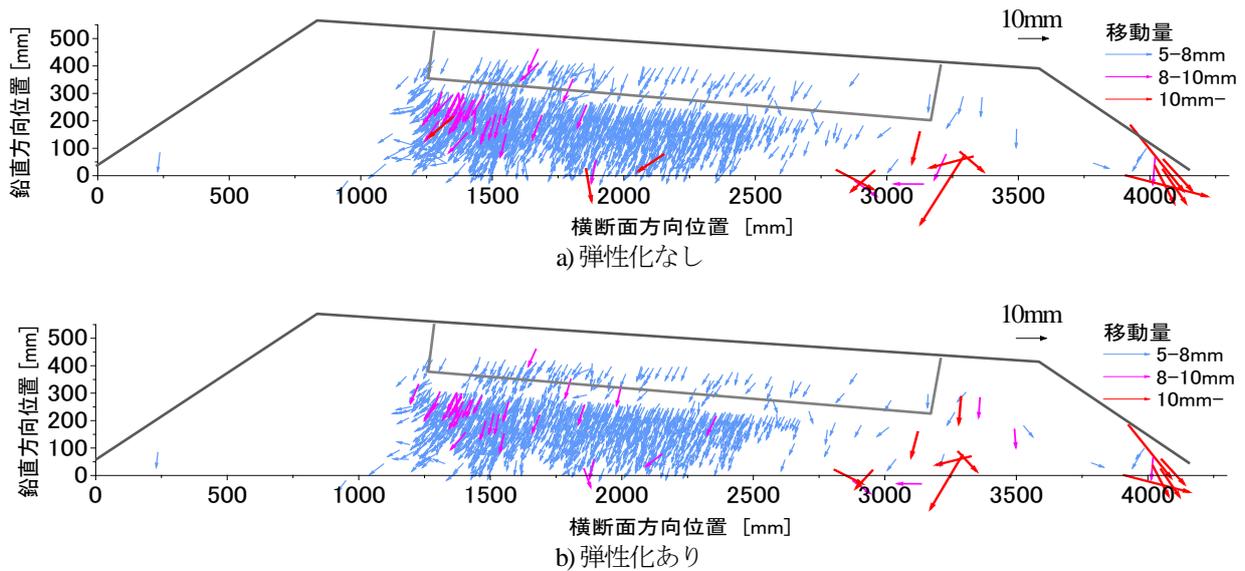


図-9 片側弾性化によるバラスト要素の移動状況の比較

ここで、離散体解析によって得られる情報を用いて、カント区間における道床バラスト層の非対称な沈下過程についてミクロな観点で観察する。なお、路盤剛性 70MN/m^3 の解析結果を用いる。

図-10 に載荷開始前から載荷1回目の最大荷重に達するまでを4段階に分けた場合の、各段階における道床バラスト層内の配位数の分布を示す。

ここで配位数とは、図-10 に示すように軌道横断面方向を8つに分割した各エリア内の粒子間接触点数を N_c 、各エリア内のバラスト要素数を E_b とした場合、 $N_c \times 2 \div E_b$ の値で、エリア内の各要素の接触点数の平均値を表わしている。

図より載荷開始前の初期状態においては、道床バラスト層の配位数は、いずれのエリアにおいても5.3~5.4程度で、ほぼ均一となっている。

載荷開始後、荷重が最大荷重の1/4となった段階において、内軌側の道床傾斜部以外の7つのエリアで配位数は減少し、特にまくらぎ下に位置する4つのエリアでは4.4~4.5へ減少する。その後、荷重が最大荷重の1/2となった段階においては、まくらぎ中央下部から外軌側道床肩部部分の3つのエリアで配位数が4.0未満へと著しく減少する。この傾向は、荷重が最大荷重の3/4となった段階でも同様であるが、最大荷重の段階においては、まくらぎ中央下部から外軌側道床肩部部分の3つのエリアの配位数が回復し、まくらぎ中央下部から内軌側のエリアとの差も小さくなり、配位数は全体的に4.5~4.8程度となる。

以上より、まくらぎ下の外軌側においては、載荷初期の載荷過程で一旦、配位数が著しく減少する傾向が示された。

これについて、図-10 に示す荷重が最大荷重の1/4となる段階における法線方向粒子間接触点数の分布を図-11 に示す。本図においては、法線方向粒子間接触力が100N以上となる接触点のみを抽出し、線分方向は接触力の作用方向を、線分の長さは接触力の大きさを示す。

図より、まくらぎ中央部および内軌側においては、載荷初期において、法線方向粒子間接触力が鉛直方向に作用する接触点が路盤部周辺まで達している。これに対してまくらぎ中央部から外軌側にかけては、法線方向粒子間接触力が鉛直方向に作用しているものの、路盤部までには達していない。つまり、内軌側では載荷初期において、レール要素から作用する荷重を指示する粒子構造が形成されるものと考えられる。

この点について更に図-12 に、同じく荷重が最大荷重の1/4となった段階におけるまくらぎ底面とバラスト要素の接触力分布を示す。

図より載荷初期の載荷過程において、まくらぎ底面とバラスト要素の接触点は、まくらぎ中央部から内軌側にかけて多く分布している。

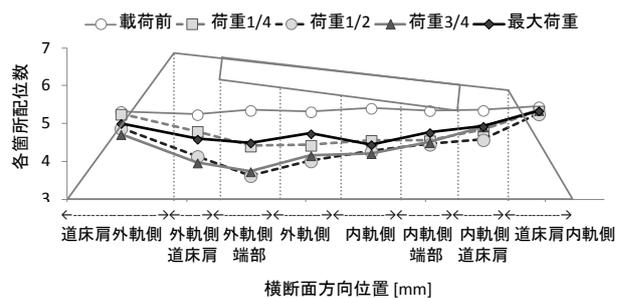


図-10 載荷初期の載荷過程における配位数の変化

これは図11とともに、内軌側のレール下は外軌側よりも道床厚さが薄いことから、内軌側レールから作用した荷重を支持する粒子構造が外軌側レール下よりも早期に形成されることを示している。

一方、その段階において、外軌側では、外軌側レールから作用した荷重を支持する粒子構造が十分に発達していないため、道床バラスト層は変形を続けるため、まくらぎ要素が、内軌側を中心に回転することが考えられる。

次に荷重100回目の荷重過程について、図11と同様に荷重過程の粒子間接触力の分布を図13に示す。

図より荷重100回目においては、荷重過程において内軌側だけでなく外軌側においても、法線方向粒子間接触力が鉛直方向に作用し、路盤部まで到達している。

これは100回の繰返し荷重過程において内外軌側レールから作用する荷重を支持する粒子構造が十分に発達したことを示し、これにより、図3に示したように、まくらぎ要素の移動履歴の傾向が変化するとと言える。

6. おわりに

道床沈下・流動解析モデル‘DEMCS-track’を用いて、バラスト軌道のカント区間の離散体モデルを作成し、繰返し荷重シミュレーションを行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 荷重初期においては、外軌側レール要素の鉛直下向き方向変位は内軌側に比較して著しく大きいですが、荷重と共に、その差は減少する。
- 2) 内外軌両側レール要素の鉛直下向き方向変位は路盤剛性の影響を著しく受け、水平方向変位は、外力作用方向の影響を著しく受ける。
- 3) まくらぎ底面の内軌側のみを有道床弾性まくらぎの物性とした条件で繰返しシミュレーションを行った結果、荷重初期の内外軌両側レール要素の鉛直方向変位の差は、弾性化しない条件に比較して緩和された。

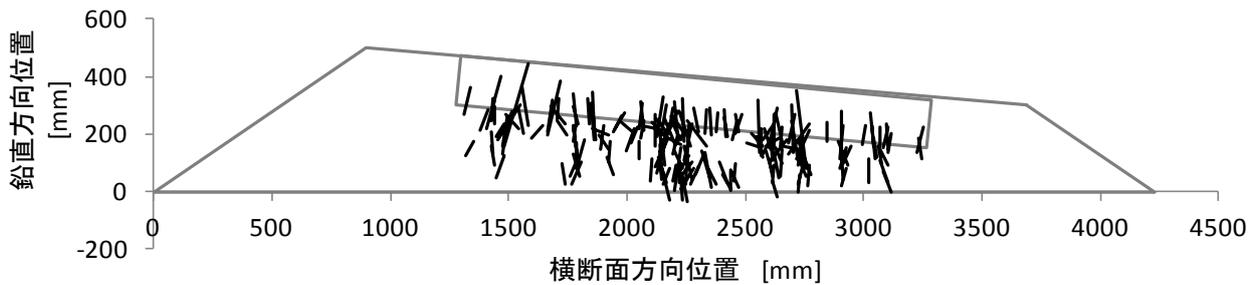


図-11 荷重1回目の荷重過程の粒子間接触点の分布（接触力100N以上の接触点）

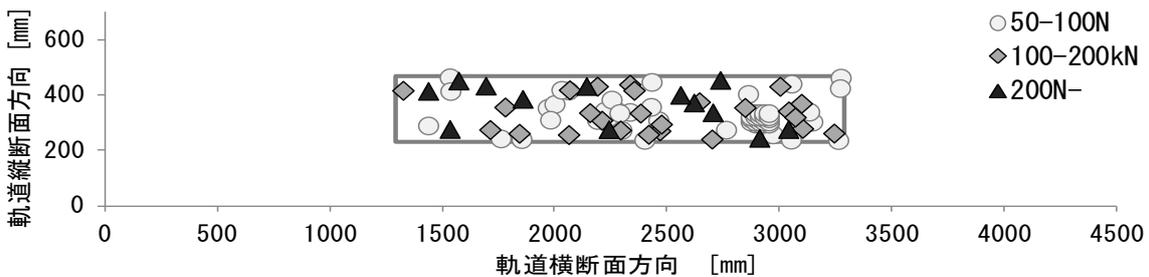


図-12 まくらぎ底面と道床バラスト層間の粒子間接触力の分布（荷重が最大荷重の1/4の段階）

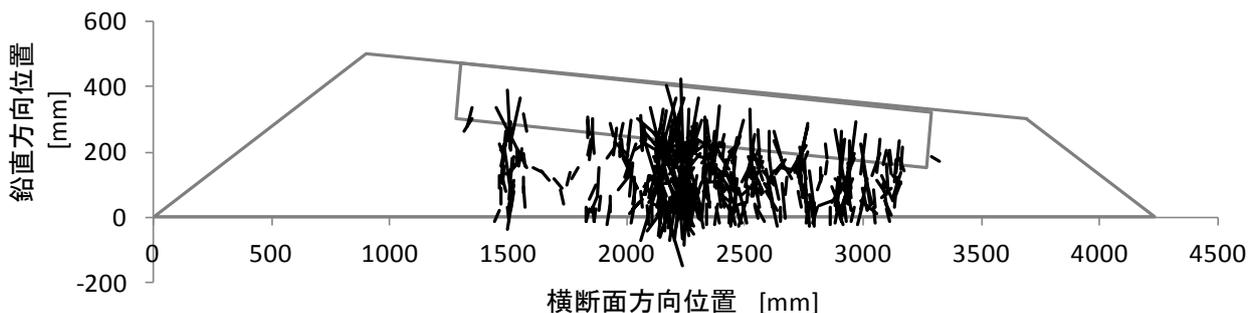


図-13 荷重100回目の荷重過程の粒子間接触点の分布（接触力100N以上の接触点）

参考文献

- 1) J A Priest, W Powrie et al : The effect of enhanced curving forces on the behavior of canted ballasted track : Journal of rail and rapid transit, Vol.227, pp229-244, 2013
- 2) 平尾博樹, 曾田祥信 : 碎石流れ発生に関するメカニズムの検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) ,2014
- 3) 野村清順 ほか : 実物大試験による高カント曲線部のバラスト流動現象の評価, 土木学会鉄道工学論文集, No20, pp169-176, 2016
- 4) 須長誠 : ガンマ線を用いた道床バラストの密度測定法, 第28回土質工学研究発表会, pp2383-2384, 1993
- 5) 河野昭子, 松島亘志 : 離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告, Vol28, No12, pp41-46, 2014
- 6) 河野昭子, 松島亘志 : DEMを用いたバラスト層沈下過程の微視力学的観察, 土木学会鉄道工学論文集, No18, pp235-240, 2014

(2017.4.7 受付)

NUMERICAL EVALUATION OF UNSYMMETRICAL SETTLEMENT OF BALLASTED LAYER AROUND CANTED TRACK

Akiko KONO

A series of cyclic loading simulation is carried out for a canted ballasted track model by using 'DEMCS-track', a 3D-DEM code developed by Railway Technical Research Institute and Tsukuba university. In the series of simulation, three cases of road bed stiffness and three cases of angles of applied load to rail elements on the surface of a sleeper element are defined. The results shows that the rail elements displacements to the longitudinal direction of sleeper element are influenced by angles of applied load and that of vertical direction are influenced by road bed stiffness. The vertical displacement of the outer rail element is clearly larger than that of the inner one during the first stage of cyclic loading. The asymmetric of vertical displacement between the outer rail and the inner one moderate according to the numbers of cyclic loadings. Then cyclic loading simulation is carried out for a canted ballasted track with 'half resilient sleeper', a sleeper which have resilient pad only inner rail sided sleeper bottom. The result shows that the asymmetric of vertical displacement between the outer rail and the inner one is less than that at the case without resilient item.