HOKUGA 北海学園学術情報リポジトリ
学校法人北海学園
北海学園大学
北海商科大学

タイトル	鉄まくらぎの荷重分散特性に関する研究
著者	上浦，正樹; kamiura，Masaki
引用	工学研究 ： 北海学園大学大学院工学研究科紀要(13): 3-8
発行日	2013-09-30

Hokkai-Gakuen Organization of Knowledge Ubiquitous through Gaining Archives.

研究論文

鉄まくらぎの荷重分散特性に関する研究

上　浦　正　樹*

A STUDY ON DISPERSION CHARACTERISTICS OF WHEEL LOAD UNDER STEEL SLEEPER

Masaki kamiura*

概　要

JR 貨物では鉄まくらぎが多く敷設され，高低変位進みの抑制効果が期待されている．この効果をさらに向上させるためには鉄まくらぎを支持するバラストの締固めの十分な管理が必要である．この基礎的段階として，本研究では鉄まくらぎの形状に着目して荷重分散の状態を木まくらぎを比較することにした．その結果，供用されている軌道断面の撮影画像を 2 値化処理した比較では，鉄まくらぎがより大きな広い範囲で支持されていることが認められた．同様に室内載荷試験でも土槽底部の路盤圧力を計測した結果からも鉄まくらぎの方が荷重分散の効果が大きいこととフランジの荷重分散効果が高いことが確認された．また横断方向の軌道の有限要素解析から，これらの結果は鉄まくらぎの左右のフランジの影響によることが確かめられた．

1．はじめに

貨物ヤードや低速度の線区に敷設しているまくらぎの多くは木まくらぎである．木まくらぎは腐食などにより軌間の保持力が低下する可能性があるが，一方でその腐食の程度は目視検査では判定し難い．また，木まくらぎはほとんどが南洋材であり，近年の大量な伐採のため枯渇等が進んできている状況で安価な材料であっても将来的に安定した供給を保証しにくいことが懸念される．このような背景から JR 貨物では木まくらぎ区間において軌間の保持を主な目的として鉄まくらぎの投入が 1988 年から始まり，現在では 20 万本を越えている．投入当初より軌間保持のため木まくらぎ５本につき鉄まくらぎを１本の割合で敷設してきたが，その後において腐食まくらぎの交換に鉄まくらぎを投入するなどにより，その割合は増加してきている．その結果，鉄まくらぎが多く敷設され，軌間の保持だけでなく高低変位進みの抑制効果が期待されるようになってきた．そこで，この抑制効果を向上させるために，鉄まくらぎの敷設および補修ではバラストの適切な締固めの方法の検討が必要となったきた．よって本研究では上面のリブと左右のフランジから構成される鉄まくらぎの中空構造（図-1）に着目した．この断面は概ね台形で底部の長辺に相当する部分は解放されて敷設時に道床バラストで充塡される．よって鉄まくらぎが輪荷重を支持すると，その荷重は鉄まくらぎの中空部分を支えるバラストと左右フランジを介して道床へ伝達される．このようなまくらぎの荷重伝達の方法は鉄まくらぎ以外にはない．従って，鉄まくらぎにおける締固めの検討では，

図-1　鉄まくらぎの断面

* 北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻（社会環境系）教授・博士（工学）
Graduate School of Engineering (Civil & Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

鉄まくらぎの上面のリブと左右フランジによる荷重分散の程度を明らかにし，さらに鉄まくらぎ内部に充塡されるバラストの適正な締め固め程度を示す必要がある．

まくらぎの荷重分布に関する研究には，JR 貨物が鉄まくらぎを導入するにあたり鉄まくらぎと他のまくらぎの各路盤圧力を比較した上浦[1),2),3)]などの研究がある．また，鉄まくらぎの開発全体に関するものとして三枝[4)]の研究がある．しかし，これらは鉄まくらぎの形状に着目した検討までは至っていない．その他にも鉄まくらぎの上面のリブと左右フランジに分けて荷重分散の程度に着目した研究として例はほとんどなく，遠藤ら[5)]によってレール底部が鉄まくらぎに接する範囲の 2 倍程度の長さ 30 cm を切り出して研究した例があるのみと考えられる．

以上より鉄まくらぎにおいて適切なバラストの締固めの検討するための基礎的段階として，本研究の目的は，鉄まくらぎの形状に着目して鉄まくらぎの荷重分散の程度を推定することとした．そのために次の検討を行う．

①供用されている鉄まくらぎと木まくらぎの軌道断面を撮影する．ここでまくらぎ下付近のバラストにおいて密度が高い部分が荷重支持に寄与する率が高いと仮定し，撮影画像処理により荷重支持範囲を推定する．

②鉄まくらぎと木まくらぎの横断面の FEM 解析により荷重分散のコンター図を作成し，さらに実物大の鉄まくらぎと木まくらぎを用いて室内試験によって路盤圧力などを測定し，荷重分散の程度を推定する．

2．使用した材料

JR 貨物で使用している鉄まくらぎ（図-2）の端部は折れ込んでいる翼部があり，まくらぎの主体であるレール直下のまくらぎ幅とは異なっている．またこの翼部は木まくらぎなどでは見られないものである．そこで，この翼部の効果については別途に検討するものとして，本研究ではこの図のⒶ－ⒶとⒷ－Ⓑで切断したものの内側の材料を用いた（長さ 180 cm，底部幅 26 cm，上部幅 17 cm，高さ 11 cm）．木まくらぎは鉄まくらぎと長さを同じとして長さ 180 cm とし，幅 20 cm，高さ 14 cm のものを使用した．また，砕石は 3 号砕石とした．

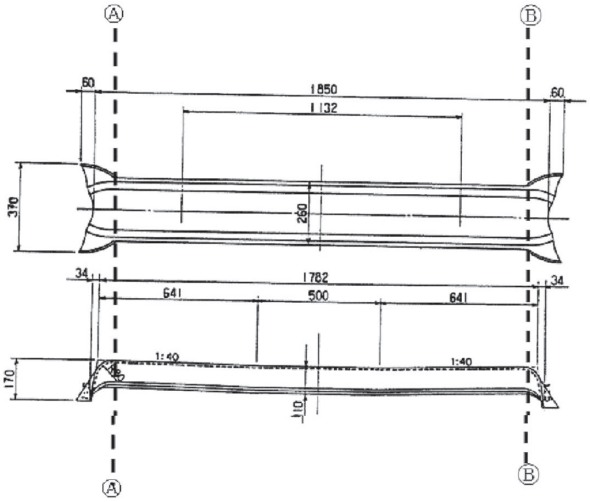

図-2　使用した鉄まくらぎ

図-3　現場の軌道断面

3．2 値化処理による画像解析

図-3 は，JR 貨物札幌貨物ターミナル駅内の線路改良工事に伴う軌道の鉛直断面を示している．この軌道は 1973 年に敷設以来，全て木まくらぎであったが，2009 年に鉄まくらぎが部分的に敷設され，供用期間は 13 年を越えている．路盤の沈下によって道床が補充され道床厚が 40 cm に達し，加えて路盤の状態は悪く道床上からも噴泥が多く見られた．この図ではバラストは白に近く空隙などは黒に近い画像となっている．そこで 2 値化法を用いてまくらぎを支持できる範囲におけるバラストの分布の違いを推定することとした．この画像解析には写真の各画素に対し，完全な白を 1 とし完全な黒を 0 としてその間を 255 段階に識別する Mat Lab 解析ソフトを用いた．しかし，黒い部分の窪みでも内部でまくらぎ荷重の支持に寄与する可能性のあることから，この画像解析によって詳細な検討は困難であると考えられるが，粗いメッシュに区分し，その中の識別された画素の各段階の平均値を用いてメッシュ間の傾向を求めることとで定性的な評価を行うことができると判断し

た．そこでまくらぎを支持できる範囲として横方向ではまくらぎの端部より外側の 5 cm を加えた両端（鉄まくらぎでは 36 cm，木まくらぎでは 30 cm）とし，縦方向では深さ 42 cm として，縦横をそれぞれ 3 等分して 9 個のメッシュを作成した（鉄まくらぎ：図-4，木まくらぎ：図-5）．なお，この写真の鉄まくらぎの翼部は掘り起こされているため，画像解析では翼部を除いた本体の幅をまくらぎ幅とした．メッシュ内の画素に対する解析結果を平均化し，その値をそのメッシュの代表値とした．中段中央のメッシュの代表値を基準に各メッシュの代表値との比を求め，この比を各メッシュの中心座標に対応させて比較コンター図を作成した（鉄まくらぎ：図-6，木まくらぎ：図-7）．

以上の結果から，比が 0.7 以上に着目すると鉄まくらぎが木まくらぎよりも大きな広い範囲を占めていることがわかる．これは鉄まくらぎの方が荷重を支持する範囲が広いことを示していると推察できる．よって，鉄まくらぎのバラスト締め固めでは木まくらぎよりも広い範囲で作業する必要があると考えられる．

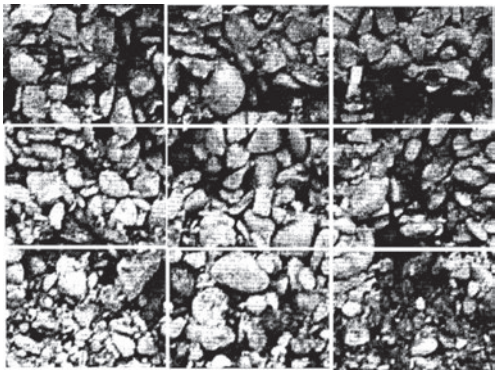

図-4　画像処理用分割画像（鉄まくらぎ）

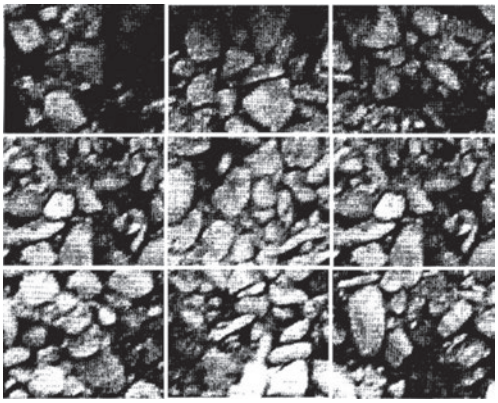

図-5　画像処理用分割画像（木まくらぎ）

4．荷重分散特性の検討

(1)　有限要素法による理論解析

鉄まくらぎにおける軌道の横断面からまくらぎの荷重を支持する範囲を調べることとした．そこで道床バラストを弾性体と仮定し，鉄まくらぎの中空構造を入力でききる有限要素解析プログラムを調査した結果，空港舗装などに用いられている 2 次元解析有限要素法[6] を用いることとした．この解析によってまくらぎからの荷重が道床や路盤への伝達する範囲を検討した．ここで鉄まくらぎと木まくらぎが道床内の荷重分散を比較するため，まくらぎ幅を同じの 20 cm とし，応力コンター図ではまくらぎの中央を横軸の 0 とした．また，まくらぎの高さはそれぞれの値とし，応力コンター図の縦軸ではまくらぎ上面を 0 とした．解析の入力条件では，最大載荷荷重を 10 kN とし，

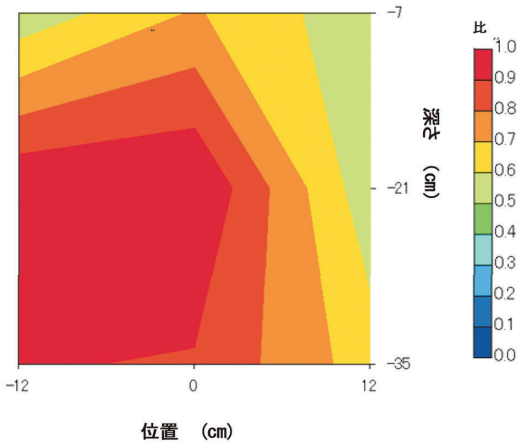

図-6　2 値化による比較コンター図（鉄まくらぎ）

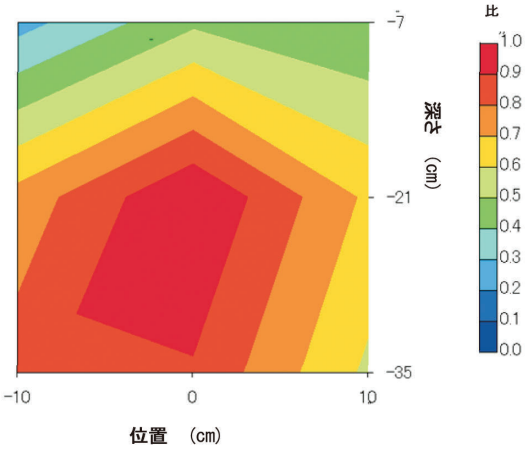

図-7　2 値化による比較コンター図（木まくらぎ）

鉄まくらぎ，木まくらぎ，道床バラストの材料係数を表-1 の値とした．

解析結果として，鉛直方向における圧縮応力のコンター図から鉄まくらぎ（図-8）は木まくらぎ（図-9）より応力分散の範囲が広いことが確認された．この荷重分散効果は鉄まくらぎの左右のフランジの影響が大きいことによっていた．

ここで鉄まくらぎで左右のフランジの下端までをまくらぎ本体と仮定して，まくらぎ下面から深さ 20 cm における圧縮応力を比較する（図-10）と，鉄まくらぎの方がまくらぎからの荷重をより分散していることが明らかとなった．

表-1　入力した材料係数

	鉄まくらぎ	木まくらぎ	道床バラスト
弾性係数（MPa）	2.1×10^5	4000	100
ポアソン比	0.30	0.30	0.35
単位体積重量（kN/m³）	79.6	8.0	23.8

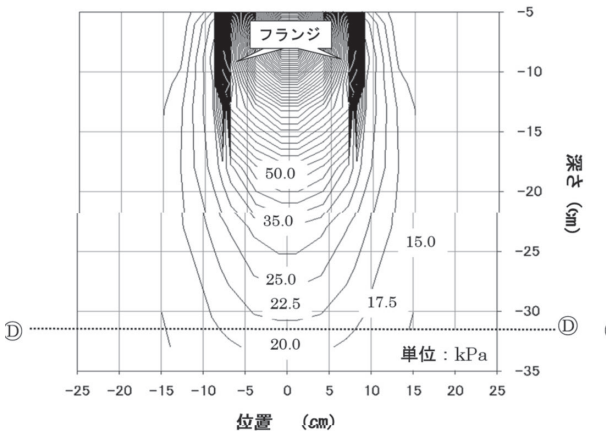

図-8　鉛直圧縮応力のコンター図（鉄まくらぎ）

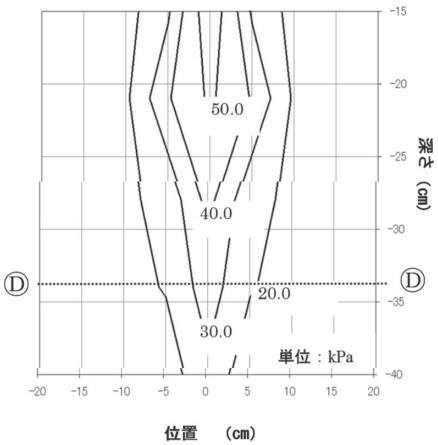

図-9　鉛直圧縮応力のコンター図（木まくらぎ）

⑵　室内試験

土槽（長さ 2.5 m×幅 1.0 m×高さ 0.5 m）内にモデル軌道として 1 本の鉄まくらぎ又は木まくらぎをセットし載荷試験（図-11）を行った．載荷装置の反力は反力フレームで受け，油圧ジャッキ（最大荷重 300 kN）により平均載荷速度 100 kN/min で載荷試験を行った．載荷装置を分配桁上にセットして，載荷荷重は分配桁により左右のレールを介してまくらぎに伝達される方法を用いた．

モデル軌道の道床厚を 20 cm とし，載荷試験により道床から伝達される圧縮圧力を土槽の底部に設置された土圧計で計測し路盤圧力とした．土圧計の形状は直径 10 cm，厚さ 2 cm であり，最大容量は 200 kPa である．この土圧計を 5 台使用し，配置（図-12）は片側のレールの直下（図中の③）から左右対称とした．

試験条件としては，鉄まくらぎ内のバラストが充填されている状態（実）とない状態（空）に分けて載荷試験を行い，鉄まくらぎの左右のフランジが道床に支持される際に果たしている役割を調べることとした．また，同様の条件で木まくらぎ

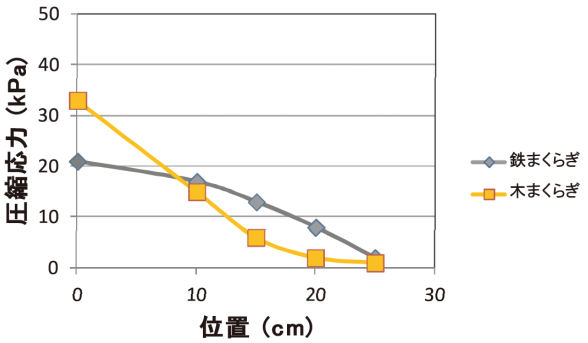

図-10　圧縮応力の比較（深さ 20 cm）

図-11　載荷試験の概要

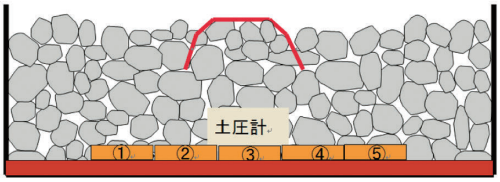

図-12　土圧計の配置

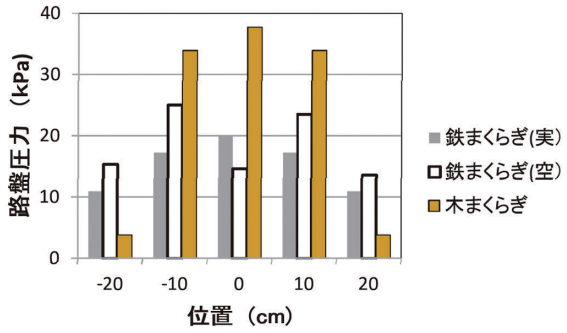

図-13　路盤圧力の分布（横断方向）

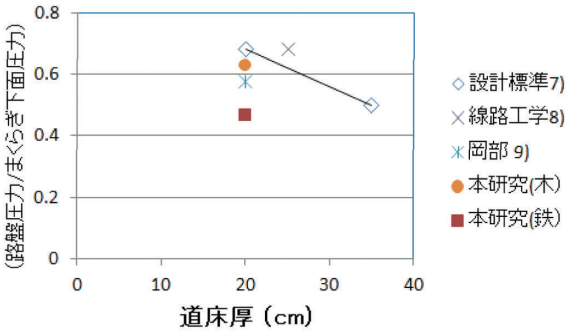

図-14　既往の研究との比較

を用いた載荷試験を行い鉄まくらぎと比較することとした．

試験の結果として，レール上に載荷荷重が 100 kN に換算して得られた路盤圧力の分布（図-13）からまくらぎ直下である中央の土圧計（図-12 での③）を比較すると路盤圧力の値が，鉄まくらぎ(空)＜鉄まくらぎ(実)＜木まくらぎであり，まくらぎ端部では鉄まくらぎ(実)＜鉄まくらぎ(空)＜木まくらぎであった．以上のように 1 本のまくらぎで比較すると木まくらぎよりも鉄まくらぎの方が路盤圧力が小さく，フランジの影響が大きく表れることが明らかになった．次にまくらぎ底部幅が鉄まくらぎと木まくらぎで異なることからまくらぎ直下における平均路盤圧力を比較すると，鉄まくらぎ（実）は 18.1 kPa，鉄まくらぎ（空）は 22.8 kPa，木まくらぎは 35.2 kPa であった．また，路盤圧力／まくらぎ下面圧力で示される比について既往の研究成果と本研究結果を比較する（図-14）と，道床厚 20 cm では本研究の木まくらぎの比が 0.6 であり，他とほぼ同じ値であった．一方，道床厚 20 cm における鉄まくらぎ（実）の比は 0.47 であり，他よりも小さいことが明らかになった．以上より，鉄まくらぎの方が路盤に対する荷重分散の効果が大きいことが確認された．また，鉄まくらぎ（空）では鉄まくらぎを支持する部位はフランジのみであるが，図-13 や平均路盤圧力の比較からも鉄まくらぎ（実）と同様に木まくらぎよりも広い範囲に分布しており，フランジの荷重分散効果が高いことが示された．

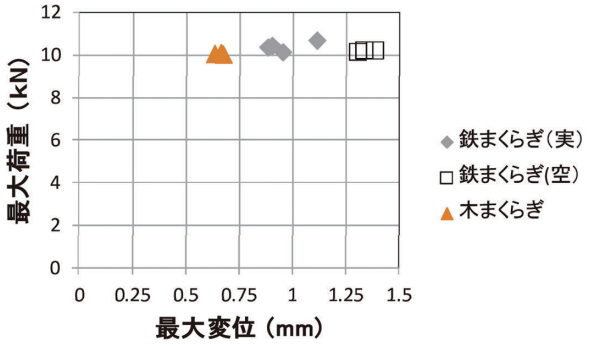

図-15　最大変位の比較

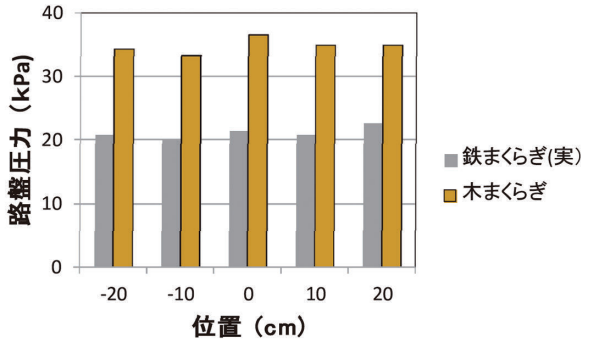

図-16　路盤圧力の分布（縦断方向）

次に最大荷重とレール面上の最大変位の関係と求めた（図-15）．これから木まくらぎが最も小さく，鉄まくらぎ（空）が最も大きいことが明らかなった．このことから鉄まくらぎ内のバラストの状態（実または空）がレール面上の最大変位に影響を与えることが明らかになったが，木まくらぎと鉄まくらぎ（実）における差については鉄まくらぎ内のバラストの密度や鉄まくらぎの形状などのについてさらに検討を要するものと考えられた．

一方，まくらぎ横断方向の結果を確認するために縦断方向の路盤圧力を測定した（図-16）．その方法は横方向のレール直下である中央の土圧計（図－12 での③）を中心に各土圧計が接するよう

に軌間外の 2 台，軌間内に 2 台の計 5 台をまくらぎの縦断方向にセットするものである．その他の試験条件は横方向と同じとした．その結果から鉄まくらぎと木まくらぎともレール直下の路盤圧力とほぼ同じ路盤圧力の値であった．これから縦断方向における各まくらぎの荷重分散にはあまり変化がないことが認められた．

5．まとめ

本研究では鉄まくらぎの形状に着目して木まくらぎとの比較により，鉄まくらぎの荷重分散の程度を検討した．その結果，次の結論を得た．

- 供用されている軌道断面の撮影画像の 2 値化処理により鉄まくらぎがより大きな広い範囲で支持されていることが確認された．
- 軌道の横断方向の有限要素解析による検討では，鉄まくらぎの荷重分散効果には左右のフランジの影響が大きいことが認められた．
- 室内載荷試験では木まくらぎよりも鉄まくらぎの方が路盤に対する荷重分散の効果が大きいことと鉄まくらぎのフランジによる荷重分散効果が高いことが明らかになった．

参考文献

1）上浦正樹，三枝長生，大貫博史：鉄まくらぎのおける道床内圧力分布の解析について，JREA，Vol.34，No.7，pp.24-28，1991．
2）上浦正樹，三枝長生，大貫博史：鉄まくらぎと他のまくらぎ路盤圧力分布の比較，日本鉄道協会誌，おける道床内圧力分布の解析について，No.5，pp.12-15，1992．
3）上浦正樹，三枝長生，高橋　顕：鉄まくらぎの路盤圧力と路盤ひずみの評価方法について，土木学会第 47 回年次講演会，pp.806-807，1992．
4）三枝長生：鉄まくらぎの開発に関する研究（長岡科学技術大学　博士論文，2001．
5）遠藤康敬，上浦正樹，辻　匡明：鉄まくらぎの応力分散効果に関する研究，土木学会第 65 回年次講演会，pp.549-550，2010．
6）董勤喜，姫野賢治，八谷好高，坪内将丈，松井邦人：動的荷重を受ける粘弾性多層構造の有限要素解析，土木学会舗装工学論文集，vol.8，pp.54-61，2003．
7）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説　軌道構造，丸善出版，pp.348-349，2012．
8）佐藤吉彦，梅原利之：線路工学，pp.45-46，1987．
9）岡部二郎：バラスト支持力の実験的研究（下），鉄道線路，Vol.9　No.9，pp.11-16，1961．