

FEM 解析によるバラスト軌道内応力分布モデルの検証

○ [土] 桶谷 栄一 [土] 古川 敦 (鉄道総合技術研究所)

Verification of stress distribution in railway ballast structure by FEM analysis

○ Eiichi Oketani, Atsushi Frukawa (Railway Technical Research Institute)

Track settlement consists of according to ballast settlement and roadbed settlement. The former is based on pressure on sleeper bottom plane and the latter on the roadbed pressure. The stress distribution in railway ballast structure should be a key parameter, because there is difference with the realities in method of calculating the distribution area of roadbed pressure. In this study, it proposes the coefficient in which this difference is corrected.

キーワード：バラスト軌道，軌道沈下特性，まくらぎ下面圧力，路盤圧力，FEM 解析

Key Words : ballasted track, characteristic of track settlement, pressure on sleeper bottom plane, roadbed pressure, FEM analysis

1. はじめに

バラスト軌道の設計¹⁾では、高低変位進みによる走行安全性、乗り心地の照査を行うために、軌道の塑性沈下特性を求める。軌道沈下量は、道床沈下量と路盤沈下量の和として求め、前者はまくらぎ下面圧力、後者は路盤圧力を用いて算定する。しかし、従来モデルでは路盤圧力の分布面積の算定方法など実態と乖離する部分が多いことが指摘されている²⁾³⁾。

そこで、これらの算定方法について FEM 解析を用いてその妥当性を検証した。以下に、その結果をまとめる。

2. 従来モデルによる算定方法

2.1 従来モデルの概要

バラスト軌道は、レールに作用する輪重・横圧がまくらぎ、道床バラストを通して路盤に伝達する構造体である。従来モデルにおけるバラスト軌道における力の伝達モデルを図1に、設計標準¹⁾で用いられている、バラスト道床内に作用する力の分散モデル(以下、「従来モデル」という)

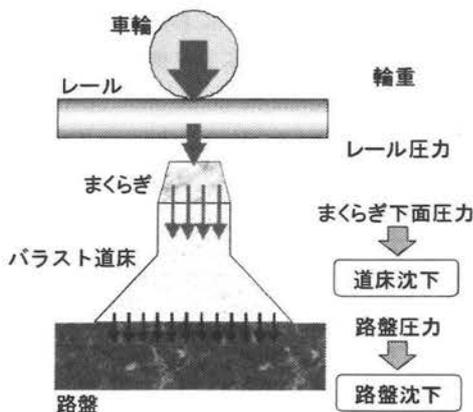


図1 バラスト軌道における力の伝達モデルの概念

を図2に示す。従来モデルの特徴は以下のとおりである。

- ① 輪重はレール、レール締結装置、まくらぎを介して、まくらぎ下面に作用する。
- ② さらに、まくらぎ下面圧力はバラスト道床内に作用し、道床厚 150 mm までは分散がなく、150 mm 以上で 45° に分散する分布となり、路盤上面に伝わる。

2.2 従来モデルによるバラスト道床・路盤のばね係数

(1) バラスト道床のばね係数

バラスト道床のばね係数 D_B は厚さ、材質に係わらず、一律 200MN/m である。

(2) 路盤のばね係数の算定法

路盤のばね係数 D_S [MN/m] は道床内圧力分布を用いた路盤圧力の分布面積 S_B [m²] を式(1)によって、初期地盤反力係数 K_S [MN/m³] を式(2)によって求め、式(3)により算定する。まくらぎの幅を B [mm]、長さを L [mm] とする。

$$S_B = \{B + (h_B - 150) \times 2\} \times \{L + (h_B - 150) \times 2\} / 10^6 \dots (1)$$

$$K_S = 2 \times K_{75} = \frac{2 \times K_{30}}{2.2} \dots (2)$$

$$D_S = \frac{K_S \times S_B}{2} \dots (3)$$

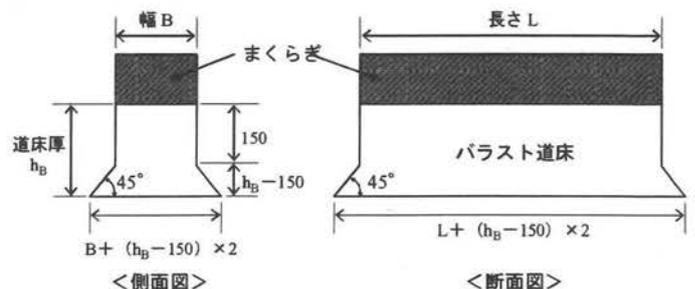


図2 バラスト軌道内に作用する力の分散 (単位: mm)

2.3 まくらぎ下面圧力の算定

まくらぎ底面の面積 S_T [m²] の算定式を式(4)に、左右のレール圧力 P_{r1} , P_{r2} [MN/m²] を用いたまくらぎ下面圧力 P_t [MN/m²] の算定式を式(5)に示す。

$$S_T = B \times L / 10^6 \dots\dots\dots(4)$$

$$P_t = \frac{P_{r1} + P_{r2}}{S_T} \dots\dots\dots(5)$$

2.4 路盤圧力の算定

路盤圧力の分布面積を用いた路盤圧力の P_{smean} [MN/m²] の算定式を式(6)に示す。

$$P_{smean} = \frac{P_{r1} + P_{r2}}{S_B} \dots\dots\dots(6)$$

3. FEM 解析

3.1 モデルの概要

FEM 解析は NASTRAN を用いた 3 次元静的弾性モデルで行った。解析モデルは基本的に 1/2 モデルとし、レール、軌道パッド、まくらぎ、バラスト道床と路盤層から構成される。なお、軌間は 1067 mm とした。

モデルの断面及び側面の簡略図を図 3 に示す。なお、路盤層は新設線軌道をモデル化する場合のアスファルト混合物、粒度調整砕石、路床 (土) を勘案し 3 層構造とした。今回は既設線軌道をモデル化して解析を行うので、路盤層は路床 (土) のみで構成されるものとした。

荷重は 1 レール当たり 50kN とし、レールの車輪接触位置 (図 3 の矢印の位置) に载荷した。

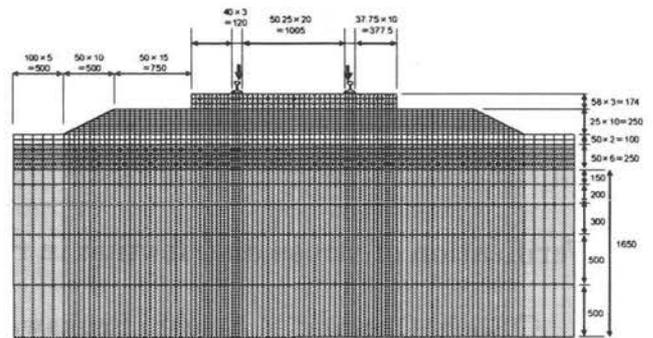
3.2 物性値

各要素の物性値を表 1 に示す。路盤層の物性値は鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物⁴⁾の有道床軌道用アスファルト路盤の設計方法を参考にした。

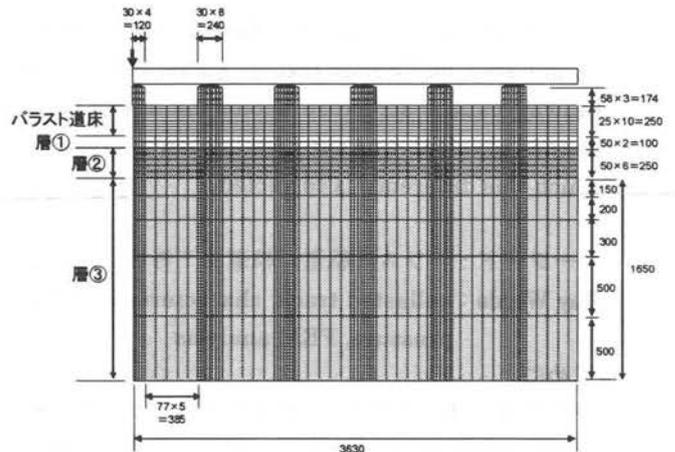
バラスト道床の弾性係数は、これまでの実物大載荷試験結果²⁾⁵⁾⁶⁾により 88~200MN/m² の範囲で設定されている。このばらつきは、試験に用いたバラスト道床の粒度分布や摩耗状態によるものであると考えられる。バラスト道床の弾性係数は、文献 5) における実物大試験結果との比較により求められた 100MN/m² とした。

3.3 拘束条件

まくらぎ直角断面ではレール長手方向の変位を拘束、レール直角断面ではレール横断方向の変位を拘束、モデル短部はレール長手方向及び横断方向の変位を拘束、底部は完



(a) レール直角断面



(b) まくらぎ直角断面

図 3 FEM 解析モデルの断面及び側面の簡略図 (単位: mm)

全拘束とした。

3.4 解析ケース

道床厚は 150, 200, 250, 300 mm の 4 ケース、 K_{30} 値は 30, 70, 110MN/m³ の 3 ケースとし、これらの組合せによる 12 ケースで解析を行った。

4. 従来モデルの検証方法

4.1 概要

検証方法の流れを図 4 に示す。ここでは、図 1 に示した力の伝達モデルにおいて、まくらぎより下の要素であるバラスト道床と路盤層に着目した。

解析結果からまくらぎ下面圧力と軌道変位量、路盤変位量が求められるので、これらを用いて求めた路盤ばね係数と従来モデルである設計標準¹⁾における算定式を用いて計算した路盤ばね係数との比較により検証を行った。

表 1 要素の物性値

要素種別	要素名	弾性係数 MN/m ²	ばね係数 MN/m	ポアソン比	備考
梁	レール	210000	—	0.30	50N
ばね	軌道パッド	—	110		
ソリッド	まくらぎ	35000	—	0.17	
	バラスト道床	100	—	0.30	
	路床 (土)	18.3	—	0.30	K_{30} 値=30MN/m ³ 相当
		42.6	—	0.30	K_{30} 値=70MN/m ³ 相当
	67.0	—	0.30	K_{30} 値=110MN/m ³ 相当	

4.2 FEM 解析結果を用いた計算

(1) まくらぎ下面圧力

荷重 P がレール上に作用するときのまくらぎによる荷重分担のイメージを図 5 に示す。荷重 P が直下のまくらぎに作用する力を P_1 [MN] とすると、バラスト道床からの反力が作用しているまくらぎ底面の面積 A [m²] を用いて、まくらぎ下面圧力 P_t は以下の式(7)により算定できる。

$$P_t = \frac{P_1}{A} \dots\dots\dots(7)$$

FEM による解析結果から P_1 が求まる。図 6 に示すバラスト道床上面の応力分布から、狭軌用まくらぎでは、バラスト道床からの反力は、まくらぎ端部を除きほぼ均一に作用していると評価できる。この、端部を除く値を FEM まくらぎ下面圧力と定義する。

(2) 荷重分担率

荷重 P が直下のまくらぎが分担する荷重 P_1 は荷重 P の約 40% となることが知られているが⁷⁾、道床厚や K_{30} 値が異なれば全体の系としてのばね係数が異なる場合、この比率は変化する。この割合の百分率を荷重分担率と定義する。

4.3 路盤ばね係数による検証

解析結果におけるバラスト道床上面の変位量は軌道変位量 δ_v 、路盤上面の変位量は路盤変位量 δ_s である。軌道変位量と道床変位量、路盤変位量には式(8)の関係があるので、この関係式より道床沈下量 δ_B を求める。

$$\delta_v = \delta_B + \delta_s \dots\dots\dots(8)$$

また、バラスト道床上面にはまくらぎ下面圧力が作用しているので、軌道変位量との関係から軌道ばね係数 D_v 、道床変位量との関係から道床ばね係数 D_B を求めることができる。道床ばね係数と路盤ばね係数を直列接続の関係にあるので、軌道ばね係数の算定式は式(9)となる。

$$\frac{1}{D_v} = \frac{1}{D_B} + \frac{1}{D_s} \dots\dots\dots(9)$$

そこで、解析結果から得られる軌道ばね係数と道床ばね係数から路盤ばね係数を求める (以下、「FEM 路盤ばね係数」という)。一方で、式(3)によって路盤ばね係数を求める (以下、「設計標準路盤ばね係数」という)。

これら 2 つの値を比較し、路盤ばね係数の算定方法を検証する。

5. 検証結果

5.1 まくらぎ下面圧力と荷重分担率

設計標準に基づいて計算したまくらぎ下面圧力 (以下、設計標準まくらぎ下面圧力) と FEM まくらぎ下面圧力を

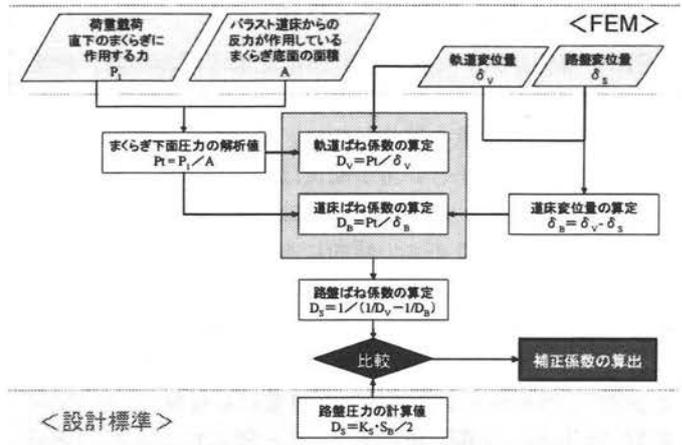


図 4 検証方法の流れ

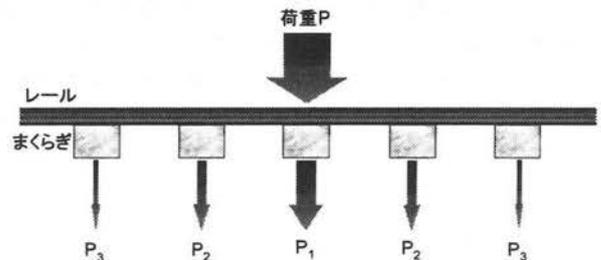


図 5 まくらぎによる荷重分担のイメージ

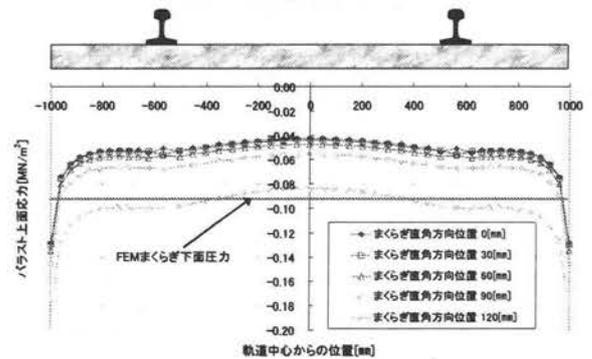
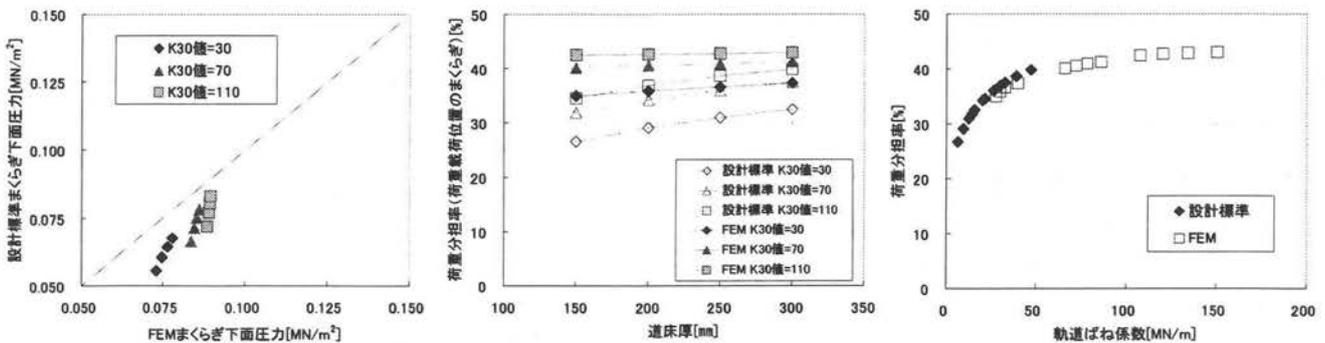


図 6 バラスト道床上面応力分布 (道床厚 300 mm : K30 値 110MN/m³)



(a) まくらぎ下面圧力

(b) 荷重分担率

図 8 軌道ばね係数と荷重分担率の関係

図 7 設計標準と FEM の比較 (まくらぎ下面圧力と荷重分担率)

を 図 7-(a) に、そのときの荷重分担率を 図 7-(b) に示す。設計標準による荷重分担率は 25~40%、FEM のよる荷重分担率は 35~45% である。FEM における軌道ばねの方が硬い傾向にあるためと考えられる。

5.2 路盤ばね係数の補正

FEM 解析結果から軌道ばね係数を道床ばね係数、路盤ばね係数に分けて求めた。設計標準と FEM 解析結果から計算した各ばね係数を 図 9 に示す。式(9)から道床ばね係数と路盤ばね係数の小さい方が軌道ばね係数では支配的であることがわかるが、図 9 より路盤ばね係数はいずれの場合も道床ばね係数より小さい傾向にある。従って、軌道ばねが硬い場合、道床ばねよりも路盤ばねが硬いことの影響が大きいことになると考えられる。

設計標準における路盤ばね係数 (以下、設計標準路盤ばね係数) と解析結果から計算した路盤ばね係数 (以下、FEM 路盤ばね係数) を 図 10 に示す。K₃₀ 値にもよるが、FEM 路盤ばね係数の方が 2~4 倍程度大きい。この理由として、設計標準では、路盤ばね係数算定における路盤圧力の分布範囲を狭く見積もっていることと圧力分布を一様であるとしていることが考えられる。そこで、路盤ばね係数の算定においては、今回求めた FEM 路盤ばね係数と設計標準路盤ばね係数の比を補正係数 (表 2 参照) として設計標準における路盤ばね係数算定方法を提案する。この補正により、冒頭に述べた実態との乖離をより小さくすることができると考えられる。

表 2 路盤ばね係数の補正值

		道床厚 [mm]			
		150	200	250	300
K ₃₀ 値 [MN/m ³]	30	4.27	3.12	2.48	2.36
	70	4.32	3.18	2.56	2.18
	110	4.49	3.37	2.78	2.42

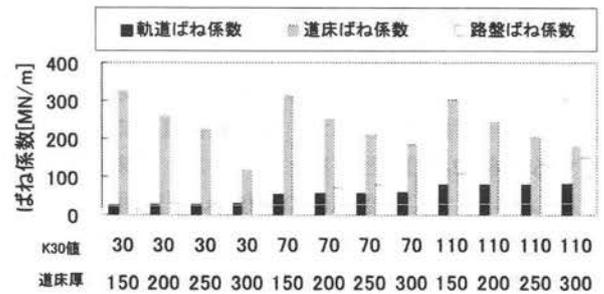
6. おわりに

今回の検証により、設計標準の路盤ばね係数は FEM 解析結果よりも小さく、路盤上面の応力の分布範囲や最大値等の影響を考慮して、補正する必要があることという結果が得られた。この補正係数は、路盤圧力の分布範囲や最大路盤圧力の影響を考慮しているものであると考えられる。

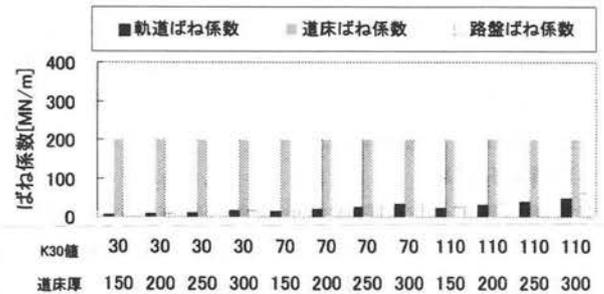
今後は軌間を広げたモデル (標準軌モデル) や有道床軌道用アスファルト路盤によるモデルに対する解析を行い、補正法の検討を深度化することを考えている。

参 考 文 献

- 1) 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[有道床軌道] (案), 1997
- 2) 大塚勝, 村本勝己, 関根悦夫：路盤の剛性と路盤圧力分布に関する検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, III-B289, pp.578-579, 2001
- 3) 大塚勝, 村本勝己, 関根悦夫：鉄道路盤の列車荷重作用



(a) FEM



(b) 設計標準

図 9 設計標準と FEM の比較 (ばね係数)

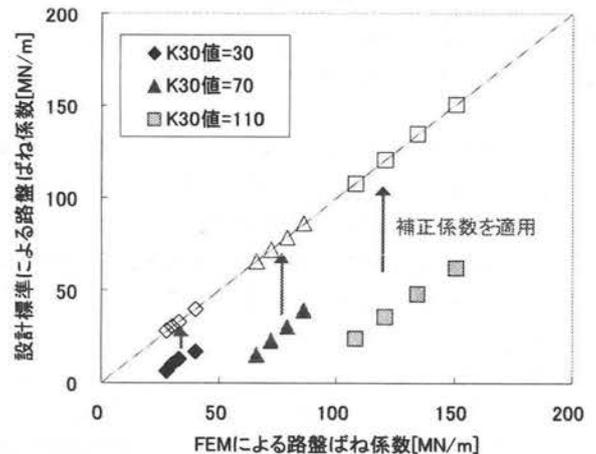


図 10 設計標準と FEM の比較 (路盤ばね係数)

時における応力分布に関する解析的検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, III-798, pp.1595-1596, 2002

- 4) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 2007
- 5) 桃谷尚嗣, 関根悦夫：鉄道用アスファルト路盤の性能照査型設計方法に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.608-619, 2007
- 6) 関根悦夫, 河野昭子, 長戸博, 鬼頭昭人：道床バラストの摩耗過程における強度・変形特性, 鉄道総研報告, Vol.16, No.4, pp.23-28, 2002
- 7) 須長誠, 関根悦夫：経済的な強化路盤の開発に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.5, No.10, pp.25-33, 1991