

FEM 解析による鉄道強化路盤厚さの検討

須長 誠¹・関根悦夫²

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 土質・基礎研究室(〒185 国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 土質・基礎研究室(〒185 国分寺市光町 2-8-38)

本論文は、鉄道強化路盤の厚さを低減するために列車荷重の大きさ、路盤強度、路床強度等をパラメータとした FEM 解析を行い、その結果を参考にして設計における路盤厚さを検討したものである。解析では、実際の鉄道路盤の列車荷重載荷時の挙動に合うように 3次元の FEM 解析を用いた。その結果、従来用いられていた 2層系の弾性解析から求めている路盤厚さに比べて経済的になることがわかった。また解析結果を基にして施工性を考慮した設計時の厚さについても検討し、軌道構造、路床強度に応じた路盤厚さを提案した。

Key Words: FEM, reinforced roadbed, roadbed thickness

1. はじめに

著者らは、図-1 に示すように鉄道の軌道保守作業の減少に寄与している強化路盤の構造を見直して建設費の低減を図る研究を行った。研究成果のうち、強化路盤の実態調査と実物大の模型による載荷試験については既に報告済とし¹⁾、路盤厚さを 15cm まで低減できる可能性を示した。

本論文は、列車荷重の大きさ、路盤強度、路床強度等をパラメータとした FEM 解析を行い、その結果を参考にして設計における路盤厚さを検討したものである。路盤厚さの検討は、現場実態調査、実物大模型の載荷試験を通じて検討したが¹⁾、種々の荷重条件、路盤・路床条件等、全ての条件についての検討は不可能である。したがって現場実態調査、載荷試験での検討結果を基本とはするが、その他の条件の検討を FEM 解析によることとした。

以上のように設計における強化路盤の厚さの検討は、現場実態調査、実物大模型の載荷試験とともに FEM 解析によってさらに深度化されることとなった。

なお、本論文は既に発表投稿した論文²⁾とともに従来よりも経済的にした強化路盤の設計法を記載した「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」³⁾の骨子となるものである。

2. FEM 解析の内容

(1) 解析方法

従来の強化路盤の解析では、レール面に作用する 1 輪荷重によって路盤表面に作用する路盤圧力を求めた後、

バーバー (Barbar) の 2 層系弾性解析により一定の路盤表面沈下量 (2.5mm) 以下になる時の路盤厚さを求めている³⁾。しかし、図-2 に示すように実際の列車荷重は連行荷重であり、少なくとも路盤表面には、8 輪からなる荷重が作用すると考えられること、盛土あるいは切取のように土構造物の種類によっても路盤表面たわみ量は異なること、またバーバーの弾性解は基本的に 2 層系を 1 層系の地盤に変換する近似解であること等のため、本解析では、実際の路盤の挙動に合うように 3次元 FEM 解析 (汎用プログラム NASTRAN 使用) を用いることにした。解析では、8 個の連行荷重が作用した場合の路盤の沈下量が 2.5mm 以下になるような路盤厚さを求めた。

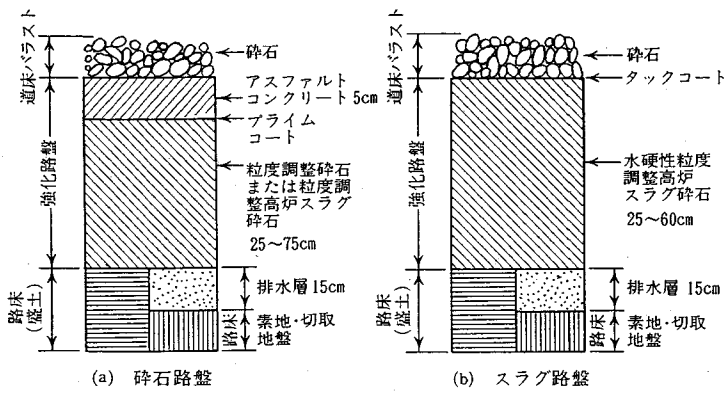
(2) 解析モデル

解析モデルは盛土と素地 (切取り盛り土を伴わないで原地盤がそのまま路床となるもの) の場合の 2 種類を設けた。盛土の場合の解析モデルの半断面概要を図-3 に、メッシュを図-4 に示す。盛土高さは、列車荷重の影響範囲が路盤表面より 3m 程度であること、高架橋との経済性比較より盛土は 6m 以下が多いことより高さを 6m とした。なお素地の場合のモデルは半断面で幅 30m、深さ 10m とした。またモデルの長手方向の長さは盛土、素地ともに 30m とした。

1 例として盛土区間におけるモデルの要素等の諸元を表-1 に示す。

(3) 荷重

荷重は図-2 に示した 8 個の連行荷重がレール、マクラギ、道床バラストを通じて路盤に載荷されるものと



(a) 砕石路盤 (b) スラグ路盤

図-1 強化路盤の構造

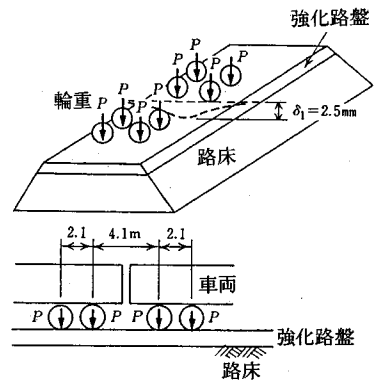


図-2 路盤に加わる連行列車荷重

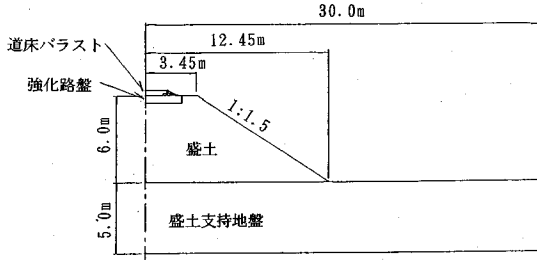


図-3 解析モデルの半断面

し、軌道構造別に速度の関数として表わした路盤圧力のうち、普通鉄道の場合の例として最大路盤圧力を以下に示す²⁾。

ロングレール

$$p_r = 8.26p_d = 8.26p_s (1 + 0.3V/100) = 67.6(1 + 0.3V/100)$$

継目レール

$$p_r = 7.31p_d = 7.31p_s (1 + 0.5V/100) = 59.8(1 + 0.5V/100)$$

ただし p_r : 路盤圧力 (kPa)

p_d : 動的輪重 (kN)

p_s : 静的輪重 (kN)

v : 列車速度 (km/h)

以上の路盤圧力は、列車の輪荷重をレール、マクラギ、道床の荷重分散効果を考慮することにより理論的に求めたものであるが、図-5に示すように理論的に求めた路盤圧力は、土圧計を用いた実測値と比較した場合、やや大きめの値となり結果として路盤厚さが厚くなるので設計上は安全側に作用すると考えられる。

(4) 材料定数

解析に用いる定数のうち、マクラギおよび道床バラストの変形係数は、それぞれ $3.92 \times 10^4 \text{MPa}$ 、 $1.32 \times 10^2 \text{MPa}$ とし、ポアソン比はそれぞれ 0.17, 0.40 とした。また路盤の変形係数については以下のようにして求めた。

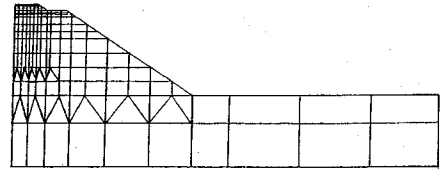


図-4 解析モデルのメッシュ

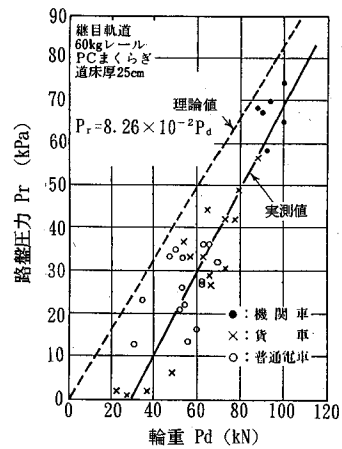


図-5 輪重と路盤圧力の関係

路盤の材料には、砕石路盤に一般的に用いられている粒度調整砕石(MS)があり、スラグ路盤に用いられる水硬性粒度調整高炉スラグ砕石(HMS)がある。また砕石路盤の表層に用いられるアスファルトコンクリートがある。

MSの変形係数は従前より強化路盤の解析に用いられてきた値が、176MPaであること、また実物大模型試験の逆解析および実際の路盤において列車通過時の路盤の動的応答の逆解析から求めた値が176MPa程度であることにより⁹⁾、その値とした。

またHMSは各種養生条件下での長期強度として一軸圧縮強度を1.18MPaとし、それに対応する変形係数を294MPaとした⁹⁾。

アスファルトコンクリートの変形係数は、温度あるいは

表一 解析モデルの諸元

節点等 モデル名	節点数	要素数	自由度数	モデル長
盛土区間	588	432	1329	正面、側面 とも半断面 30m
素地区間	665	528	1541	

表二 盛土解析モデルの物性諸元

部 位	物 性	変形係数 (MPa)	せん断剛性率 (MPa)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
マクラギ		3.92×10^4	—	21.56	0.17
道床バラスト		1.32×10^2	47.1	16.66	0.40
強化路盤		1.76×10^2	62.8	21.56	0.40
盛土(路床) 1		1.50×10	53.6	14.70	0.48
盛土(路床) 2		5.00×10	17.9	17.64	0.45
盛土(路床) 3		1.00×10^2	35.7	17.64	0.45
支持地盤		1.00×10^2	35.7	17.64	0.45

は荷重の載荷速度に大きく依存しており、その値は数10～数10⁴MPaまで大きく変動する。しかし、鉄道の路盤は厚さ50cm程度の道床バラストで被覆されているため気温変化による路面温度変化が少ないこと、10cm以上のアスファルトコンクリートの場合は温度依存性が大きい鉄道路盤に用いるアスファルトコンクリート厚さは50mmと薄いため路面温度の依存性が小さく、10～40℃で概ね200MPa程度であること⁹⁾、および路盤構造の主体はMSのような砕石であり、MSの値が176MPaであるので設計ではMSと同じ値とした。またポアソン比については、路盤材の種類によらず0.40とした。

路床の変形係数Eは、30cmの円形載荷板を用いた平板載荷試験値であるK₃₀値より弾性式を用いて式(1)のように求め⁹⁾、ポアソン比は0.45を基本とし、路床強度が小さい場合は0.48とした。なお本式で求めた変形係数は、従来の方法で求めた変形係数よりも必ずみ依存性を考慮した結果、2倍大きくになっている。その理由としては、平板載荷試験でのひずみレベルは10⁻³程度に対して列車荷重下での路床のひずみレベルは10⁻⁴程度と考えられ、土はひずみレベルが小さいほど変形係数は大きくなるので、平板載荷試験から求めた変形係数は必ずみ依存性による割り増しを行わないと過小になるためである。

$$E = 48.7K_{30} \quad (1)$$

表二に解析に用いた材料定数の例を示す。

3. FEM解析結果

解析結果の1例として図一6～8に鉄道の種類および

レールの種別に応じた路床のK₃₀値と路盤厚さの関係を示す。但し、新幹線鉄道は最高速度270km/h時の荷重の大きさとし、普通鉄道は最高速度160km/h時の荷重の大きさに対応した路盤厚さとなっている。砕石路盤はスラグ路盤に比べ変形係数が小さいため路盤厚さは厚くなっているが、両路盤とも路床のK₃₀値が大きくなるにつれ路盤厚さは急激に減少し、K₃₀≥108MPa/mでは路盤厚さはほぼ0となる。図一9は普通鉄道ロングレールの道床バラスト厚さが25cmの砕石路盤で、列車速度をパラメータとした場合の路床のK₃₀値と路盤厚さの関係である。列車速度の増加とともに路盤圧力が増加するため路盤厚さが大きくなるのがわかる。

4. FEM解析法の妥当性の検証

先ず従来の設計に用いられていた解析法と本解析法とを比較するため、図一10に作用荷重で正規化した路盤面の沈下量と路床の変形係数の関係を示す。同図によれば、本解析法は従来の解析法に比べ、列車荷重群による重ね合わせた合成した沈下量を求めるため、従来の沈下量よりも大きくなる。したがって解析法としては安全側の値を与えることがわかる。しかしながら、路盤圧力は列車の軽量化等により従来よりも小さくなり、またK₃₀値より求まる路床の変形係数は従来の2倍になったことより、路盤厚さとしては従来よりも薄くなり、経済的になる。

図一11は本解析法による路盤の沈下量を実物大模型の沈下量および僅か2例ではあるが、実際の営業線路で測定した沈下量と比較したものである(営業線での測定

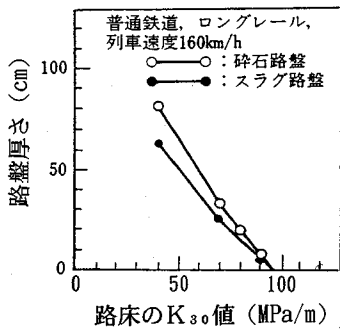


図-6 K_{30} と路盤厚さの関係(普通鉄道, ロングレール)

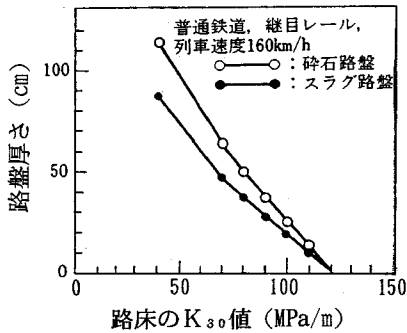


図-7 K_{30} と路盤厚さの関係(普通鉄道, 継目レール)

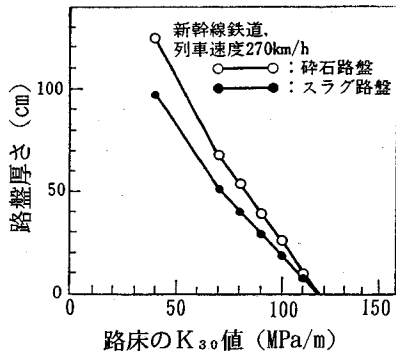


図-8 K_{30} と路盤厚さの関係(新幹線鉄道, ロングレール)

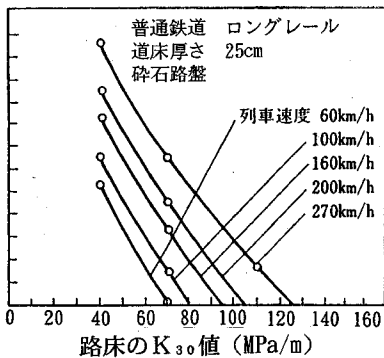


図-9 列車速度と路盤厚さの関係(普通鉄道, ロングレール)

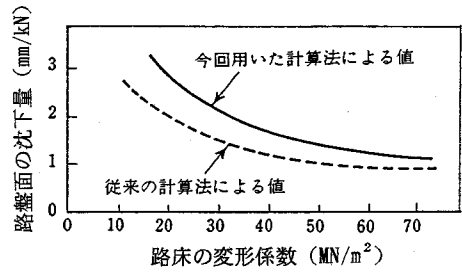


図-10 設計法による路盤面の沈下量の違い

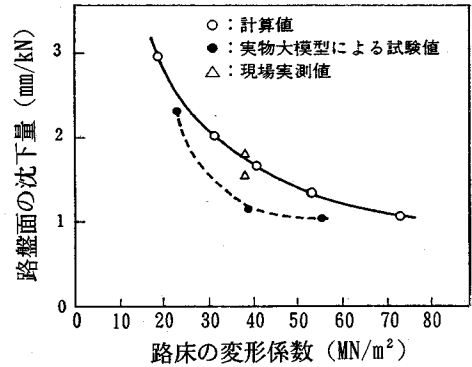


図-11 路盤面の沈下量の解析値と実測値との比較

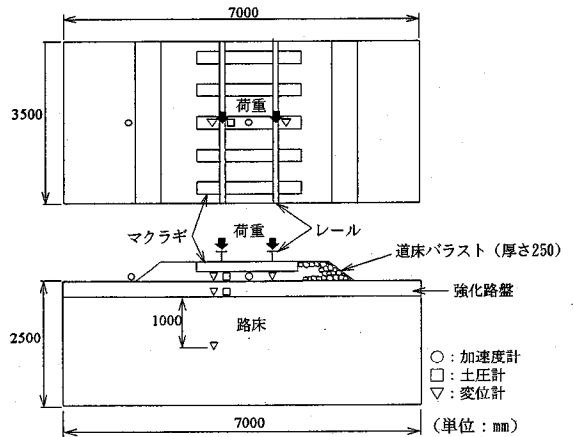


図-12 実物大模型による載荷試験の概要

は測定計器の埋設, 測定場所, 測定時期が限定されかつ困難な場合が多いため2例しかない)。●の実物大模型の作用荷重と△の営業線での作用荷重は異なるため同図では, 作用荷重で正規化した路盤の沈下量で示した。また営業線の測定箇所は高さ6m程度の盛土と素地である。実物大模型の沈下量は, 解析値および実際の線路での実測値よりも小さくなっている。この理由は, 実物大模型は図-12に示すようにマクラギ5本で構成し, 載荷は2箇所となっているため, 重ね合わせた路盤沈下量は8個の荷重群よりなる実際の路盤沈下量よりも小さくなること, また応力の影響範囲が実際の列車荷重では深さ

表—3 設計における路盤厚さの値（普通鉄道，ロングレール）

分 類		砕石路盤			スラグ路盤	
		アスファルトコンクリート (cm)	M. S. C または M. S. S (cm)	排水層 (cm)	H. M. S (cm)	排水層 (cm)
路 床 条 件						
盛土	$K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	15(25)	0	15(25)	0
盛土	$69 \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	30(50)	0	25(40)	0
素地，切取	$K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	15(25)	15	15(25)	15
素地，切取	$69 \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$	5(5)	30(50)	15	25(40)	15

() 内の数値は従来の設計値

M. S. C：粒度調整砕石（Mechanical Stabilized Crushed Stone）

M. S. S：粒度調整高炉スラグ砕石（Mechanical Stabilized Slag）

H. M. S：水硬性粒度調整高炉スラグ砕石（Hydraulic Mechanical Stabilized Slag）

3m程度と考えられるのに対して，模型試験では深さ2.5mと浅く沈下量が小さめになることなどが考えられる。一方，解析値は実際の線路の挙動を極力シミュレーションしたため実測値とほぼ一致したと考えられる。

5. 路盤の設計厚さの検討

鉄道の路盤の設計では，軌道構造，路盤種類がきまれば，路盤下の路床の支持力すなわち K_{30} 値によって厚さがきまる。図—6～8を利用すれば，路床の K_{30} 値より路盤厚さを求めることができるが，路床の K_{30} 値の増加に伴う路盤厚さの減少の割合が比較的大きく，路床の K_{30} 値に対する路盤厚さの感度が大きいことがわかる。

路床の K_{30} 値は，現場における施工管理試験によって最終的に求め，確認するものであり，設計の段階では N 値等から換算した概略的な値しか判明していない。したがって設計の段階で路床の K_{30} 値に対応する路盤厚さを求めると，施工の段階で大幅な変更を招くこととなる。まして現場で行う平板載荷試験の試験精度を考慮すると，設計ではある路床の K_{30} 値に対応した路盤厚さを図—6～8だけから求めるのではなく，ある範囲の路床の K_{30} 値に対して路盤厚さをきめる方が実務的と考えられる。

鉄道で用いる盛土材料は一般的には $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$ が容易に確保できる良質な材料と $69 \text{ MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$ が確保できる材料に分類される。そこで路盤厚さをきめる路床の K_{30} 値の範囲を $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$ と $69 \text{ MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$ とにし， $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$ での路盤厚さは $K_{30} = 108 \text{ MPa/m}$ に対応する厚さとする。また $69 \text{ MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$ での厚さは $K_{30} = 69 \text{ MPa/m}$ に対応する厚さとする。解析では路盤の沈下量が2.5mmの時の路盤厚さを求めるので，2.5mm

以下の沈下量の場合は路盤厚さがなくなる場合があるが，路盤の具備する条件には沈下量を最小にするとともに道床のめり込みに耐え，雨水等による路床部の強度低下を防止するための遮水性の確保があり，沈下量2.5mm以下でも路盤厚さが必要になる。その路盤厚さを最小路盤厚さと称し，最小路盤厚さは実物大模型による繰返し載荷試験¹⁾および現場での施工性を考慮し， $69 \text{ MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{ MPa/m}$ の場合，砕石路盤では25cm，スラグ路盤では20cmとする。また $K_{30} \geq 108 \text{ MPa/m}$ の場合，砕石路盤では20cm，スラグ路盤では15cmとする。

以上のように設計における路盤厚さの例（普通鉄道ロングレールの場合）を表—3に示す。表—3では盛土，切取ともに同じ厚さであるが（排水層は路盤厚さに含まない），解析では素地の方が盛土よりも路盤厚さが薄くなったが，設計では安全側の処置として素地の場合（切取も素地に含める）も盛土の場合と同じ厚さにした。

また表—3には従来の路盤厚さの例を括弧内に示すが，新しい路盤厚さは砕石路盤，スラグ路盤ともに，かなり減少していることがわかる。

6. 結 論

本解析により検討した結果，設計における路盤厚さは以下のようにまとめられる。

- (1) 盛土，切取ともに路床強度の増加に伴う路盤厚さの減少の割合が大きい。すなわち路床強度に対する路盤厚さの感度が大きい。
- (2) 列車速度の増加に伴う路盤厚さの増加の割合は大きい。
- (3) 解析による路盤沈下量は，実際の線路の実測値とほぼ一致していることにより，解析法としては実際の路

盤の挙動を良く表している。

(4) 設計における路盤厚さは、路床の K_{30} 値の測定精度を考慮し、路床の K_{30} 値が $K_{30} \geq 108 \text{MPa/m}$ と $69 \text{MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{MPa/m}$ の場合に分け、その区分に対する厚さとする。

(5) 但し、 $K_{30} \geq 108 \text{MPa/m}$ での路盤厚さは $K_{30} = 108 \text{MPa/m}$ に対応する厚さとし、 $69 \text{MPa/m} \leq K_{30} < 108 \text{MPa/m}$ での厚さは $K_{30} = 69 \text{MPa/m}$ に対応する厚さとする。また両者の場合とも最小厚さを下回らないようにする。

7. あとがき

本研究を基にした新しい設計標準が現在使用されているが、これに併せて施工データの収集や施工後の路盤の健全度の追跡調査などを既に行っており、今後さらに調

査研究を行い、より合理的で安全かつ経済的な鉄道路盤にしていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 須長誠, 関根悦夫: 鉄道強化路盤の厚さの低減に関する研究, 土木学会論文集, No. 498/VI-24, pp. 57-66, 1994.9.
- 2) 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, 丸善, 1992年3月.
- 3) 日本国有鉄道編: 建造物設計標準解説 土構造物, 日本鉄道施設協会, pp. 323-333, 1978年3月.
- 4) 秋山政敬, 細田昌夫: たわみ性舗装体の弾性変位係数と温度, 土木学会第24回年次学術講演会講演集, pp. 303-304, 1969.9.
- 5) 須長誠, 関根悦夫: 鉄道路盤材料の変形係数, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp. 1897-1898, 1991.7.
- 6) 須長誠, 関根悦夫: スラグ路盤材料の強度特性, 土木学会第46回年次学術講演会講演集, pp. 1006-1007, 1991.9.

(1994.8.30 受付)

AN ANALYTICAL INVESTIGATION OF REINFORCED ROADBED THICKNESS IN RAILROAD BY USING FEM

Makoto SUNAGA and Etsuo SEKINE

In order to decrease the reinforced roadbed thickness in railroad, the FEM analysis in the parameter of train load, roadbed strength, subgrade strength and so on is performed, and the reinforced roadbed thickness in the design was investigated. The analysis method was used the three dimensional FEM in order to represent the actual behavior of the roadbed on train load.

The results of FEM analysis offered the economical design than the conventional elastic analysis. And the new reinforced roadbed thickness in design was provided considering the work in field.