

### 新幹線高速走行区間を対象とした 累積損傷度理論による路床沈下量の推定

伊藤 壱記\* 桃谷 尚嗣\*\* 景山 隆弘\*\*\*  
中村 貴久\* 川中島 寛幸#

#### Estimation of Subgrade Settlement Using Cumulative Damage Theory in High-Speed Sections of the Shinkansen

Kazuki ITO Yoshitsugu MOMOYA Takahiro KAGEYAMA  
Takahisa NAKAMURA Hiroyuki KAWANAKAJIMA

To ensure operational safety and maintainability of railway systems, subgrades supporting slab tracks are required to effectively mitigate settlement. Furthermore, a reliable model for estimating subgrade settlement is essential to enable higher train speeds. In this study, a calculation model for cumulative settlement was developed based on the cumulative damage theory. A full-scale loading test taking into account the effect of train speed was conducted, and the predicted cumulative settlement was compared with the observed results to validate the proposed approach.

キーワード：累積損傷度理論，路床，沈下量，有限要素解析

## 1. はじめに

山陽新幹線（岡山-博多間）以降に建設された新幹線の軌道では，施工の速度が速く，軌道保守の省力化が可能なスラブ軌道が主流となっている．スラブ軌道は，レール，レール締結装置，軌道スラブおよびん充層等で構成されており，レール締結装置とてん充層で高低変位を矯正できる．しかし，これらの調整量には限界があり，スラブ軌道を支持する構造物に塑性沈下が生じると大規模な補修が必要となる．このため，東北新幹線（東京-盛岡間）および上越新幹線（大宮-新潟間）までの新幹線においては，基本的には高架橋およびトンネル区間を除いて盛土や切土等の土構造物上にスラブ軌道は適用されてこなかった．しかしながら，施工や保守の効率化のため，土構造物上についてもスラブ軌道を適用することが求められていた．

そこで，1987年から鉄道建設公団（現，鉄道建設・運輸施設整備支援機構）と鉄道総合技術研究所において開発<sup>1)</sup>が進められたのが，図1に示す「A形スラブ軌道（以下，スラブ軌道）用のコンクリート路盤」である．コンクリート路盤は，鉄筋コンクリート版（層厚300mm）と粒度調整碎石層（層厚150mm）を組み合わせた構造である．盛土上におけるスラブ軌道に対する繰返し載荷試験等による検討により，コンクリート路盤を支持する路床（路盤表面から深さ3mまでの範囲）の地盤反力係数 $K_{30}$ 値が $110\text{MN/m}^3$ 以上である条件において，列車荷重による沈下を十分小さく抑えられ，土構造物上でも問題なくスラブ軌道を適用できることが確認された<sup>1)</sup>．これにより，北陸新幹線（高崎-長野間）以降の土構造物上にスラブ軌道が適用されている．

最近では，トンネル発生土等の盛土材料への適用に関する検討や列車速度の向上が盛土に与える影響の検討が実施されており，盛土の沈下量を推定する手法が求められている．「鉄道構造物等設計標準・同解説

\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室  
\*\* 軌道技術研究部  
\*\*\* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室（現 総務部）  
# 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構

(土構造物)<sup>2)</sup>」(以下、土構造標準)の付属資料には、累積損傷度理論に基づく累積沈下量を推定する手法<sup>3)</sup>が記載されているものの、その妥当性の検証については実施されていなかった。

そこで、本研究では解析および実物大試験を行い、累積損傷度理論を用いた累積沈下量の推定方法の妥当性を検証することとした。土構造標準では、列車速度による輪重変動を考慮する場合、列車が静止した状態の軸重(以下、静止軸重)に対して速度に応じた衝撃係数を乗じた値を列車荷重として用いることが望ましいとされている。本研究では、この考え方にに基づき、衝撃荷重を考慮した静的解析による応答値の算定を想定した。まず、有限要素法による線形過渡応答解析から得られた列車速度と路床に生じるひずみの関係に基づき、列車速度に応じた衝撃係数を評価した。次に、現行の土構造標準に従って構築した路床およびコンクリート路盤の実物大模型に対する繰返し載荷試験(以下、実物大載荷試験)を行った。載荷条件の設定にあたっては、線形過渡応答解析で求めた路床に生じる動的応答を考慮した。さらに、累積損傷度理論と静的線形解析をハイブリットさせた推定方法<sup>3)</sup>により実物大載荷試験で生じる累積沈下量を推定し、実物大載荷試験で得られた累積沈下量と比較してその妥当性を検証した。最後に、妥当性を検証した累積沈下量の推定方法により、新幹線の速度 260km/h および 360km/h における供用 100 年で生じる沈下量を求め、列車速度が沈下量に与える影響を評価した<sup>4)</sup>。

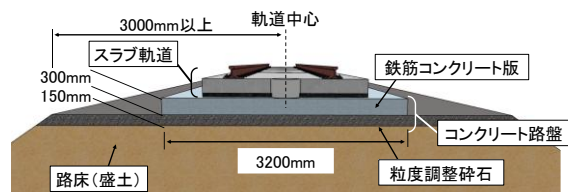


図1 A形スラブ軌道用のコンクリート路盤の構造

## 2. 列車の高速走行時における動的応答の評価

### 2.1 解析方法

実物大載荷試験を行うにあたり、盛土上のスラブ軌道を高速で列車が走行する際に生じるコンクリート路盤下の路床の動的な鉛直ひずみを三次元線形過渡応答解析により求め、得られた解析結果に基づいて実物大載荷試験の載荷荷重を設定した。新幹線の速度は 260km/h および 360km/h とした。なお、列車速度 260km/h は整備新幹線に対応する速度、列車速度 360km/h は国内で想定される最高速度である。

図2に載荷荷重の検討に用いた解析モデルおよび物性値を示す。静止軸重は170kN(標準列車荷重H-175)とした。解析モデルにおける盛土の層構成は、路盤表面から深さ 3m までの路床と、深さ 3m~10m の下部盛土の2層とした。解析モデルの寸法は、軌道長手方向を50m、軌道横断方向を25m(1/2 対称断面)とした。

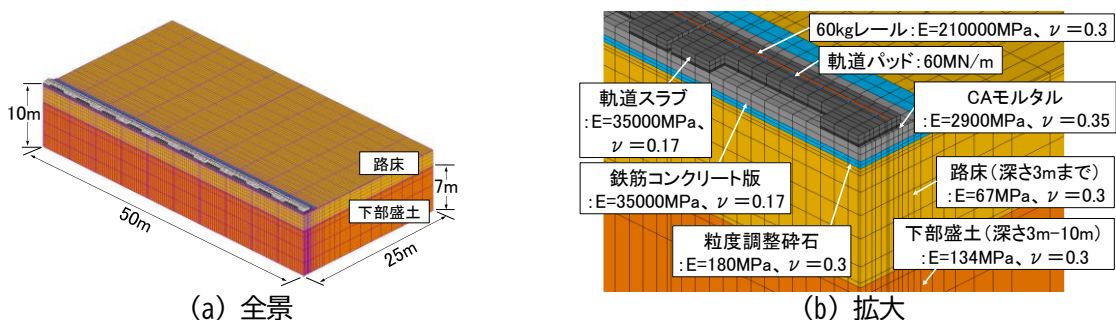


図2 載荷荷重の検討に用いた解析モデル (1/2 対称断面)

### 2.2 線形過渡応答解析による列車速度と応答値の関係

三次元線形過渡応答解析では、列車走行によって生じる路床の動的な鉛直ひずみを評価するため、レール上の節点に列車編成を考慮した連行荷重を与えた。作用させた軸数は、標準列車荷重 H-17 の軸配置で 17 両編成分の 68 軸とした。図 3 に隣接する 2 台車分の軸配置および路床の鉛直ひずみの評価位置を示す。

図 4 に、三次元線形過渡応答解析における車軸 1 軸に対するレール上の節点への入力荷重の設定方法を示す。各節点に与える荷重の入力波形は、車軸が隣接する節点の位置に到達した時点で立ち上がり、当該の節点上で所定の片レールあたりの荷重 (85kN) となる。延長 50m のレール上に 100mm 間隔で配置したすべての節点に対して、この入力波形を適用した。図 5 に入力波形によってレール上の節点に生じる列車速度 360km/h に対する列車荷重を示す。図 6 に列車速度 360km/h における路床表面の鉛直応力の時刻歴波形を示す。同図より、路床表面の鉛直応力には台車毎にピークが発生していることが確認された。

本研究では、コンクリート路盤を構成する鉄筋コンクリート版の設計で用いられている式(1)に示す衝撃係数の算定式を用いた。式(1)は、動的シミュレーションから求まる動的応答で決定する係数である衝撃係数  $i_a$  と、式(2)により算出される軌道の不整に伴う車両動揺に関する係数である衝撃係数  $i_c$  から構成される。速度効果の衝撃係数  $i_a$  は、静止輪重で生じるひずみに対する各列車速度で生じるひずみの増加率とした。表 1 に、三次元線形過渡応答解析で求めた軌道スラブ端部、軌道スラブ中央部および鉄筋コンクリート版目地部における路床表面に生じる鉛直ひずみと衝撃係数  $i$  を示す。式(1)は、元々、橋梁を設計する際の衝撃係数の算定式であり、部材のスパン長  $L_b$  を設定する必要がある。車両動揺に関する係数である衝撃係数

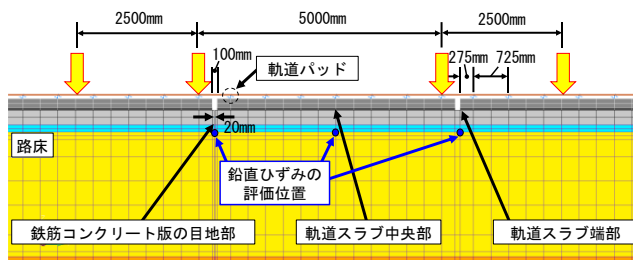


図 3 隣接する 2 台車分の軸配置および路床の鉛直ひずみの評価位置

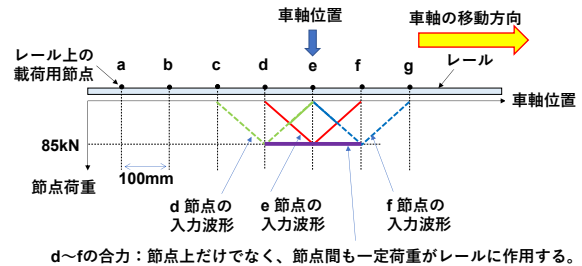


図 4 荷重の入力波形のイメージ

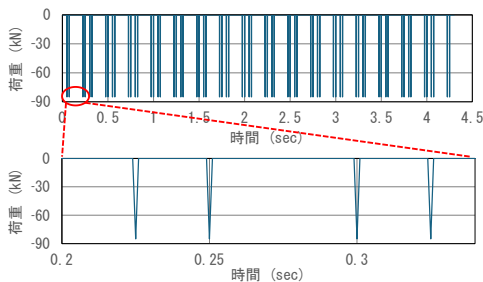


図 5 360km/h 時の片レールあたりの列車荷重

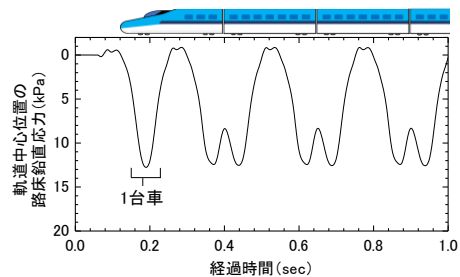


図 6 360km/h 時における路床に作用する鉛直応力

表 1 路床表面に生じる鉛直ひずみおよび衝撃係数  $i$

速度 (km/h)	路床表面の鉛直ひずみ				静的解析の鉛直ひずみに対する比率				速度効果 $i_a$	車両動揺 $i_c$	設計衝撃係数 $i$
	スラブ端部	スラブ中央	鉄筋コンクリート版目地部	3箇所の平均	スラブ端部	スラブ中央	鉄筋コンクリート版目地部	3箇所の平均			
静的	0.000195	0.000185	0.000277	0.000219	1.000	1.000	1.000	1.000	—	—	—
260	0.000230	0.000199	0.000347	0.000258	1.179	1.075	1.251	1.168	0.17	0.15	0.35
360	0.000235	0.000196	0.000369	0.000267	1.207	1.061	1.331	1.200	0.20	0.15	0.38

$i_c$ については、本検討で対象とする構造を踏まえ、橋梁と同じようには部材のスパン長を定義できないことから、安全側の設定となるよう、部材のスパン長  $L_b$  を 0m として  $i_c$  が最も大きくなる条件とした。

$$i = (1 + i_a)(1 + i_c) - 1 \tag{1}$$

$$i_c = \frac{10}{65 + L_b} \tag{2}$$

三次元静的線形解析における各箇所の鉛直ひずみを 1 とした場合、列車速度 260km/h ではスラブ端部で 1.179 倍、スラブ中央で 1.075 倍、鉄筋コンクリート版目地部で 1.251 倍であった。鉄筋コンクリート版目地部の間隔が最大で 60m であることを踏まえ、3 箇所の平均倍率の増加分である 0.17 ( $\div 1.168 - 1.00$ ) を速度効果  $i_a$  とし、部材のスパン長  $L_b$  を 0m とした車両動揺  $i_c$  の 0.15 から式(1)を適用して、列車速度 260km/h における衝撃係数  $i$  を求めると 0.35 となる。同様の方法で、列車速度 360 km/h における衝撃係数も求めると 0.38 となる。

### 3. 実物大载荷試験による路床の沈下特性の評価

#### 3.1 実物大模型の寸法の設定

実物大载荷試験では、試験土槽（幅 3.5m、長さ 7.0m、深さ 2.5m）の寸法の制約上、有限長の鉄筋コンクリート版に対して定点载荷を行う必要があるため、三次元静的線形解析により、実軌道で生じる路床表面の鉛直応力と一致するように鉄筋コンクリート版の軌道長手方向の寸法を設定した。鉄筋コンクリート版の軌道横断方向の寸法は土構造標準に示されている 3.2m とした。なお、軌道スラブおよび CA モルタルに生じる変形の影響を除外するため、実物大模型（路床）上の鉄筋コンクリート版に対して試験装置で直接载荷して路床の沈下特性を評価した。

図 7 に実物大模型の寸法と一致させた解析モデルを示す。図 8 に示す三次元静的線形解析の結果から、鉄筋コンクリート版の軌道長手方向の寸法を 2.3m とした。

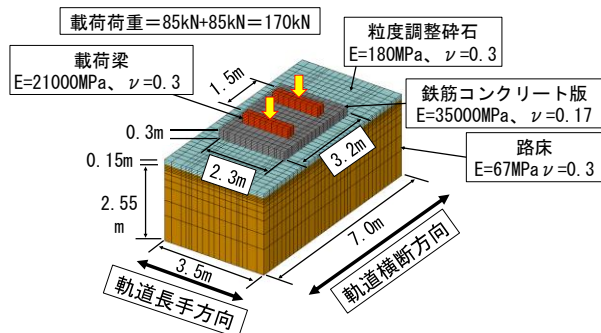


図 7 実物大模型の解析モデル

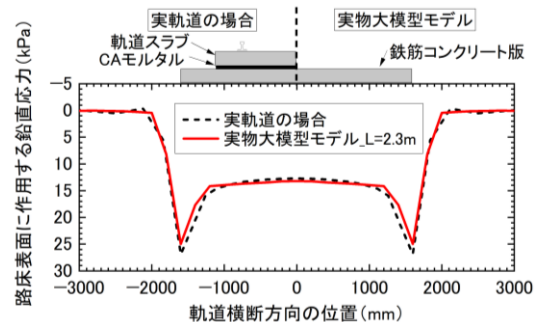


図 8 路床表面の鉛直応力の比較

#### 3.2 実物大模型の構築

構築した実物大模型の寸法を図 9 に示す。土構造標準<sup>2)</sup>に記載されているコンクリート路盤を支持する路床の締固め管理値に準拠して、実物大模型に用いる路床の締固め度を 95% 以上、かつ  $K_{30}$  値を  $110\text{MN/m}^3$  以上とした。路床材には、笠間砂を用いた。路床の構築後、路床表面において直径  $\phi 300\text{mm}$  の载荷板による平板载荷試験を実施した結果、 $K_{30}$  値は  $122.7\text{MN/m}^3$  であった。なお、コンクリート路盤を構成する粒度

調整碎石層については、最適含水比に調整した粒度調整碎石（M-40）を使用し、土構造標準に準拠して締め固め度 95%で締め固めた。

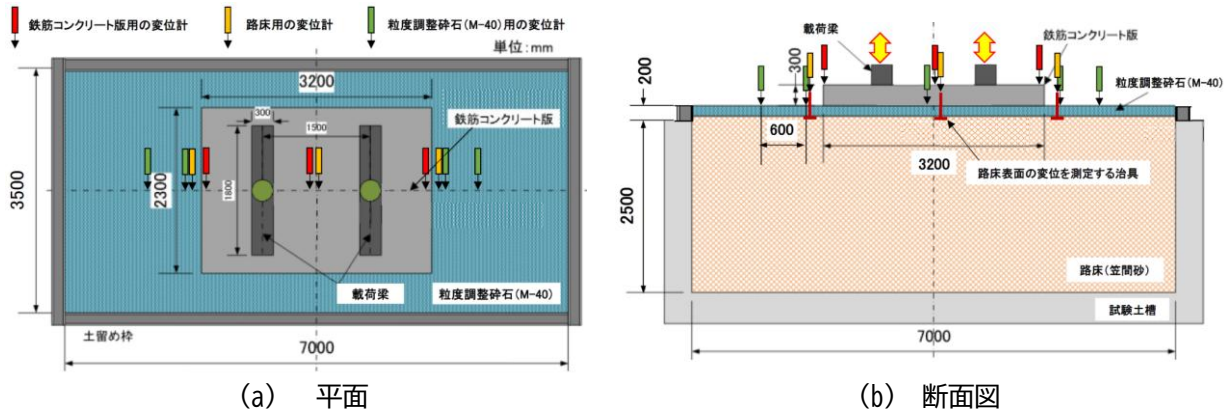


図9 実物大模型の寸法

### 3.3 実物大載荷試験の結果

荷重振幅は、2章で求めた列車速度 260km/h に対する衝撃係数  $i$  を用いて静止軸重 170kN を 1.35 倍 (1.00+0.35) した 230kN に設定した。これに基づき、載荷荷重は最小荷重 5kN，最大荷重 235kN とした。路床表面に作用する鉛直応力が台車毎の通過に応じて周期的に生じるため、載荷周波数は列車速度 260km/h における台車間距離 7.5m に相当する 9.6Hz とした。図 10 に除荷時における路床中央の沈下量と載荷回数との関係を示す。載荷回数 200 万回時の沈下量は 0.810mm であった。

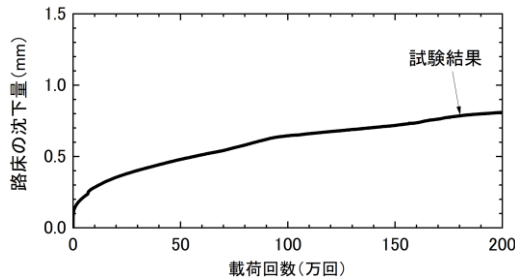


図 10 除荷時における路床中央の沈下量と載荷回数の関係

## 4. 路床の累積沈下量の推定

### 4.1 累積沈下量の推定方法の概要

土構造標準の付属資料に示されている文献 3 では、列車の繰返し載荷による盛土の累積沈下量を推定する手法として、路床材の繰返し三軸圧縮試験結果から累積沈下特性パラメータを設定し、累積損傷度理論<sup>3)</sup>と二次元有限要素解析をハイブリットさせた方法が提案されている。ここで、累積損傷度理論とは、盛土材料のせん断剛性を低下させて、繰返し荷重載荷時の盛土の弾塑性変形を評価する方法である。

本研究でも、累積損傷度理論により、盛土材料の累積沈下特性を算定する。具体的には、累積沈下特性パラメータに基づいて盛土材料の見かけ上のせん断剛性を低下させ、低下後のせん断剛性から算出した弾性係数を二次元有限要素解析における路床モデルを構成する各要素に対して設定し、繰返し列車荷重による累積沈下量を評価する。

路床の累積沈下量の推定フローを図 11 に、累積損傷度理論で用いる軟化せん断弾性係数  $G^*$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係を図 12 に示す。まず、図 11 に示した手順 1 では、繰返し三軸圧縮試験から得られたひずみと繰返し回数の関係をフィッティングできる近似曲線を作成する。この近似曲線および試験条件より累積沈下特性パラメータ  $a_2$  および  $m$  を設定する (図 12)。

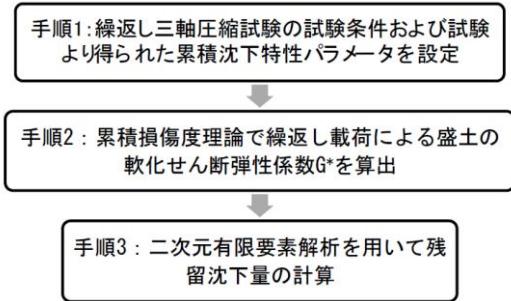


図 11 累積沈下量の推定フロー

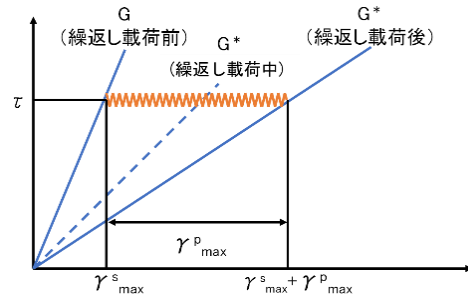


図 12 軟化せん断弾性係数とせん断ひずみの関係

次に、手順 2 では、手順 1 で設定した累積沈下特性パラメータの他、繰返し荷重で生じるせん断応力 (繰返しせん断応力) と繰返し回数等を用いて、式(3)より累積ひずみ  $\varepsilon_1^p$  を算出する。

$$\varepsilon_1^p = (SR_d/a_1)^{1/a_2} N^m \tag{3}$$

ここに、 $a_1$  は初期せん断応力比に応じて定まるパラメータ、 $a_2$  および  $m$  は繰返し三軸試験で定まる累積沈下特性パラメータ、 $N$  は繰返し载荷回数、 $SR_d$  は繰返し载荷によるせん断応力比である。

式(3)に示した  $SR_d$  の算定には、式(4)を用いる。なお、式(4)には、二次元の有限要素解析モデルに対して列車荷重を作用させる構造解析から求まる最小主応力  $\sigma_{3,c}$  と最大主応力  $\sigma_{1,c}$  を用いる。また、二次元の有限要素解析モデルに対する自重沈下解析から求まる最小主応力  $\sigma_{3,0}$  と最大主応力  $\sigma_{1,0}$  を用いる。

$$SR_d = \frac{\tau_d}{\sigma_m} = \frac{(\sigma_{1,c} - \sigma_{3,c}) - (\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0})}{2} / \left[ \sigma_{3,0} + \left( \frac{\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0}}{2} \right) \right] \tag{4}$$

式(3)に示した  $a_1$  の算定には式(5)を用いる。

$$a_1 = \begin{cases} 0.2 & \text{if } SR_{d,max} < 0.5 \\ SR_{d,max} - 0.5 & \text{if } SR_{d,max} \geq 0.5 \end{cases} \tag{5}$$

式(5)に示した最大繰返し载荷によるせん断応力比  $SR_{d,max}$  の算定には、式(6)～式(8)を用いる。

$$SR_{d,max} = SR_{s,max} \left[ 1 + 0.5 \sqrt{1 - (SR_s/SR_{s,max})^2} \right] - SR_s \tag{6}$$

$$SR_{s,max} = \tau_{f,0}/\sigma_m = \left( \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_{3,0} + \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} c \right) / \left[ \sigma_{3,0} + \left( \frac{\sigma_{1,0} - \sigma_{3,0}}{2} \right) \right] \tag{7}$$

ここに、 $SR_s$  は初期せん断応力比、 $SR_{s,max}$  は最大せん断応力比、 $\tau_{f,0}$  は最小主応力  $\sigma_{3,0}$  の時の最大せん断応力、 $\phi$  は内部摩擦角、 $c$  は粘着力である。

式(6)に示した  $SR_s$  の算定には、式(9)を用いる。

$$SR_s = \tau_{max}^s / \sigma_m = \frac{(\sigma_{1.0} - \sigma_{3.0})}{2} / \left[ \sigma_{3.0} + \left( \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{3.0}}{2} \right) \right] \quad (8)$$

ここに、 $\tau_{max}^s$ は最大初期せん断応力である。

次に、式(3)の $\varepsilon_1^p$ を式(9)に代入して累積せん断ひずみ $\gamma^p$ を算定し、 $\gamma^p$ を式(10)に代入して軟化せん断弾性係数 $G^*$ を求める。ここに、 $\nu$ はポアソン比である。

$$\gamma^p = (1 + \nu)\varepsilon_1^p \quad (9)$$

$$G^* = G \frac{1}{1 + \left( \frac{\gamma_{max}^p}{\gamma_{max}^s} \right)} \quad (10)$$

最後に、手順3では軟化せん断弾性係数 $G^*$ を用いて、線路方向に直交する断面において平面ひずみ条件とした二次元静的線形解析から、列車走行による繰返し载荷後の路床の残留沈下量を算出する。

### 4.2 繰返し三軸圧縮試験

3章の実物大模型に用いた路床材(笠間砂)の繰返し三軸圧縮試験を実施した。試験条件は圧密排水条件、载荷周波数を1Hzとし、载荷回数は载荷初期に急進する沈下とその後の漸増する沈下の累積沈下特性を評価するために、過去の試験結果<sup>3)</sup>を考慮して20万回とした。供試体の端面の不整や不陸あるいは端面近傍のゆるみによるベッディングエラーの影響を受けないように、局所変位計装置(以下、LDT)<sup>6)</sup>から得られた鉛直ひずみを基に、図13に示したとおり、フィッティングにより累積沈下パラメータ $a_2$ および $m$ を設定した(表2)。

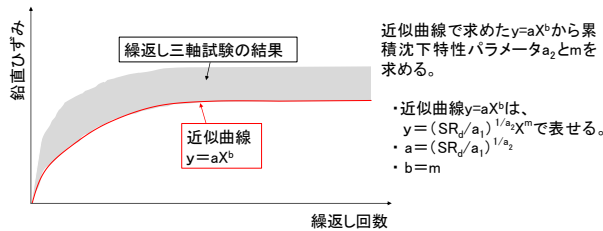


図13 累積沈下特性パラメータの設定方法

表2 試験条件および累積沈下特性パラメータ

背圧	初期有効拘束圧 $\sigma_r$ (kPa)	初期せん断応力 $\tau_g$ (kPa)	繰返しせん断応力 $\tau_d$ (kPa)	初期せん断応力比 $SR_g$	繰返しせん断応力比 $SR_d$	$a_1$	$a_2$	$m$
-20	20	6.25	6.25	0.238	0.238	5.045	0.497	0.231

### 4.3 路床の累積沈下量の推定

土構造標準の付属資料<sup>2)</sup>に示されている累積損傷度理論を用いた累積沈下量の推定では、前述した通り二次元静的線形解析が実施されている。二次元静的線形解析モデルを用いて、累積沈下量を精度良く推定するためには、軌道長手方向に対して分散する列車荷重の影響を考慮する必要がある。そこで、二次元静的線形解析では、三次元静的線形解析で得られる路床表面に生じる鉛直応力と同等となるように、列車荷重に補正係数を乗じた载荷荷重を設定した。図14に示す通り、二次元静的線形解析の载荷荷重は、列車荷重230kNに対して補正係数0.33を乗じた76kNとした。

図15に繰返し三軸圧縮試験で得られた累積沈下特性パラメータを用いた解析結果と「3.3 実物大载荷試

験の結果」に示した実物大載荷試験における路床の沈下量を示す。図 15 より、載荷回数 200 万回時における累積沈下量は、試験結果で 0.810mm、解析結果で 0.607mm となった。解析で得られた累積沈下量に対する実物大載荷試験の比率は 1.33 倍であった。実物大載荷試験の路床表面の変位は、図 9 中に示した治具を用いて間接的に測定しており、治具の設置精度や路床部の若干の緩み・不陸等によるベディングエラーの影響を受けた可能性がある<sup>7)</sup>。

上記の影響を考慮し、実物大載荷試験と解析結果の沈下量の比率を踏まえて、解析で推定した沈下量に 1.3 を乗じた値を用いて試験結果と比較した。その結果、載荷初期から 200 万回までの間において試験結果とほぼ等しくなった。

ここで、設計において路床の累積沈下量を過小評価しないよう、本研究では解析結果と試験結果の乖離を補正するために導入した 1.3 を基準とし、さらに軌道構造の性能照査で用いられる安全係数の考え方を取り入れて、算定した路床の沈下量よりも大きい沈下量を推定値とすることとした。具体的には、軌道構造の重要度や限界状態に到達した際の社会的影響を考慮するために設定される軌道構造係数  $\gamma_i$  (疲労破壊の照査では 1.1) を用い、1.3 に 1.1 を乗じた値 (1.43) よりも大きい 1.5 を算定した路床の沈下量に乗じた値を推定値とした。

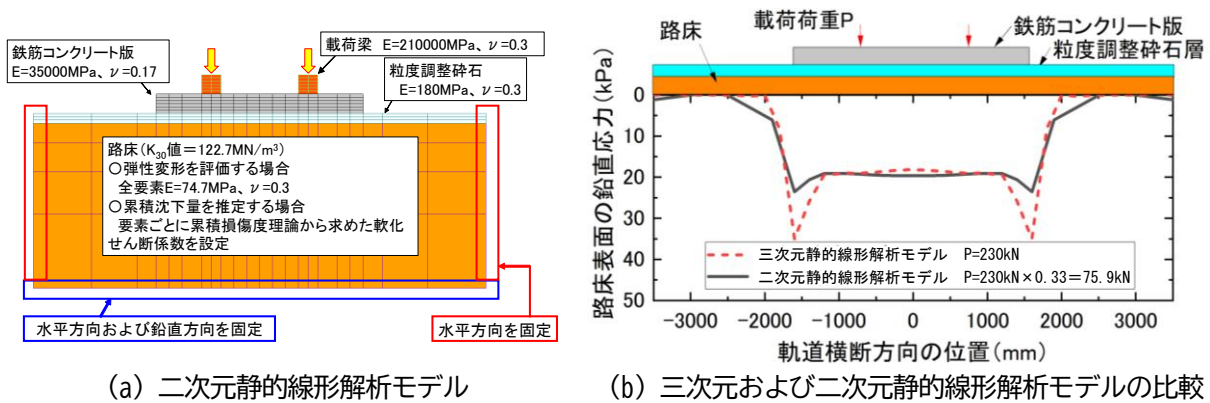


図 14 二次元静的線形解析モデルの載荷荷重の検討

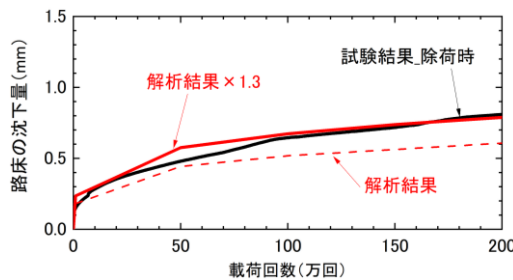


図 15 実物大載荷試験と解析結果の比較

## 5. 列車速度が盛土の累積沈下量に与える影響

### 5.1 解析モデルの条件

本推定手法の手順に従って、図 16 に示す高さ 9m の盛土の二次元解析モデルを用いて、国内で想定される最高速度 360km/h および整備新幹線に対応した速度 260km/h における盛土の累積沈下量を比較した。

表 3 に解析モデルの物性値を示す。CA モルタルの弾性係数は、現地の CA モルタルの圧縮強度が 1.8N/mm<sup>2</sup> 以上であった<sup>8)</sup> ことから、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造<sup>9)</sup>に示されている CA モルタルの弾性

係数を推定する式(11)より、施工性  $\alpha_1$ 、環境  $\alpha_2$  および温度  $\alpha_3$  の影響を表す係数をそれぞれ 1.0 と設定し、圧縮強度  $f'_m$  が 1.8N/mm<sup>2</sup> における値を参考に設定した。鉄筋コンクリート版は鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造より設定した。路床および下部盛土には、実物大模型試験の路床で使用した笠間砂の  $K_{30}$  値および累積沈下特性パラメータを用いた。なお、下部路盤は、路床と同じ笠間砂の  $K_{30}$  値を用いたが、列車荷重作用時のひずみレベルが路床よりも小さくなるため、ひずみレベルに応じた弾性係数を設定することで盛土全体の変形を精度良く評価できる<sup>2)</sup>。そこで、下部盛土の弾性係数  $E_5$  は、 $K_{30}$  値 122.7MN/m<sup>3</sup> を用いて式(12)より求めた<sup>2)</sup>。

$$E_m = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 * 700 * f'_m \tag{11}$$

$$E_5 = 1.218 \times K_{30} \text{ 値} \tag{12}$$

本解析では、3章に示した実物大載荷試験の結果を踏まえて、路床の層厚(2550mm)に対して粒度調整碎石の層厚(150mm)は薄いため、沈下量に与える影響は限定的であると判断した。このため、「路床の沈下量=鉄筋コンクリート版の沈下量」として評価した。鉄筋コンクリート版の沈下量は、盛土中央側に位置する鉄筋コンクリート版天端の隅角部における沈下量を採用した。

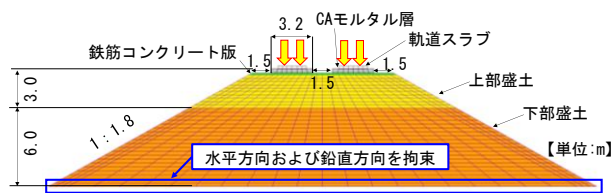


図 16 高さ 9m の盛土の二次元静的線形解析モデル

表 3 二次元静的線形解析モデルに用いた物性値

部材	弾性係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	備考
軌道スラブ	31000	0.17	2.45	
CAモルタル	1200	0.35	1.70	
鉄筋コンクリート版	25000	0.17	2.45	
粒度調整碎石層	180	0.30	2.00	
路床 ( $K_{30}$ 値=122.7MN/m <sup>2</sup> )		0.30	1.85	○弾性変形を評価する場合 全要素:74.7 ○累積沈下量を推定する場合 要素ごとに累積損傷度理論から求めた軟化せん断弾性係数を設定 路盤表面から深さ3mまで
下部盛土 ( $K_{30}$ 値=122.7MN/m <sup>2</sup> )		0.30	1.85	○弾性変形を評価する場合 全要素:149.4 ○累積沈下量を推定する場合 要素ごとに累積損傷度理論から求めた軟化せん断弾性係数を設定 路盤表面から深さ3m以深(下部盛土の範囲)

## 5.2 荷重条件

二次元静的線形解析モデルを用いた解析では、軌道長手方向の荷重分散を考慮した載荷荷重の設定が重要である。そこで、二次元静的線形解析では、三次元静的線形解析(図 17, 表 4)で得られる路床表面に生じる鉛直応力と同等となるように、列車荷重に補正係数を乗じた載荷荷重を設定した。

まず、軌道長手方向の範囲を決定するため、図 18 に鉄筋コンクリート版直下の路床表面に作用する鉛直応力の軌道横断方向に対する平均値および列車荷重(1台車分)に対する軌道パッドが受け持つ反力の割合を示す。同図より、軌道パッドが受け持つ反力の作用範囲は対称軸位置から 7.5m の延長であった。一方、載荷荷重の作用時における路床表面の鉛直応力の作用範囲は対称軸位置から 9.3m の延長であり、スラブ軌道およびコンクリート路盤によって載荷荷重が路床に広く分散されていることが確認された。

次に、二次元静的線形解析モデルでは、軌道長手方向の単位長さあたりの載荷荷重を設定する必要がある。鉛直応力の作用範囲(9.3m)を基準とすると、盛土の沈下量を過小評価する可能性があるため、反力の作用範囲(7.5m)を採用し、安全側の評価を行うこととした。以上より、二次元静的線形解析モデルの載荷荷重の影響範囲は、軌道長手方向の延長 15m(1台車あたり 7.5m)とした。

さらに、軌道長手方向の荷重分散を考慮すると、二次元静的線形解析モデルにおける軌道長手方向 1m あたりの載荷荷重は  $2 \times \text{静止軸重 } P_0 \div 7.5 = 0.267P_0$  (片レールあたりの載荷荷重は  $0.1335P_0$ ) となる。この載荷荷重  $0.267P_0$  の妥当性を検証するため、二次元解析モデルと三次元静的線形解析モデル(軌道長手方向の

延長 7.5m の平均値) における路床表面の鉛直応力を比較した (図 19) 。 図 19 に示す通り、二次元静的線形解析において、列車荷重 230kN に補正係数 0.267 を乗じた 61.4kN を載荷荷重として作用させた結果、三次元静的線形解析モデルにおける鉛直応力分布と概ね一致することを確認した。

本手法では上下線の載荷を分離および同時に載荷して、それぞれの載荷で生じる沈下量を累積する方法を提案するまで深度化できていないため、上下線の軌道スラブに対して同時に載荷した。そのため、実際の営業線よりも厳しい条件で評価していることになる。

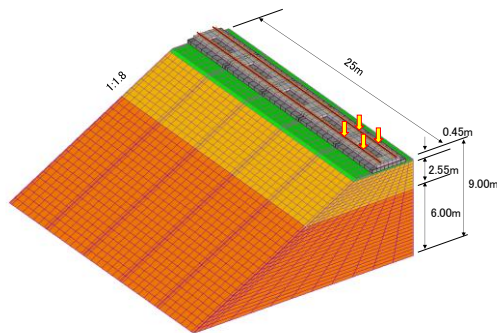


図 17 高さ 9m の盛土の三次元静的線形解析モデル (1/4 対称モデル)

表 4 三次元静的線形解析モデルに用いた物性値

部材	弾性係数E (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	備考
60kgレール	210000	0.30	
軌道パッド	—	—	ばね係数60MN/m
軌道スラブ	31000	0.17	
CAモルタル	1200	0.35	
鉄筋コンクリート版	25000	0.17	
粒度調整砕石層	180	0.30	
路床 (K <sub>30</sub> 値=122.7MN/m <sup>3</sup> )	74.7	0.30	路盤表面から深さ3mまで
下部盛土 (K <sub>30</sub> 値=122.7MN/m <sup>3</sup> )	149.4	0.30	路盤表面から深さ3m以深 (下部盛土の範囲)

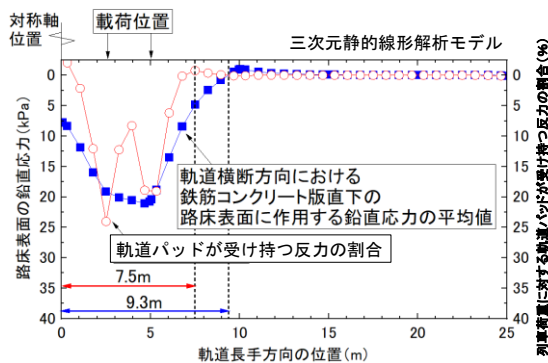


図 18 軌道長手方向の載荷荷重の影響範囲

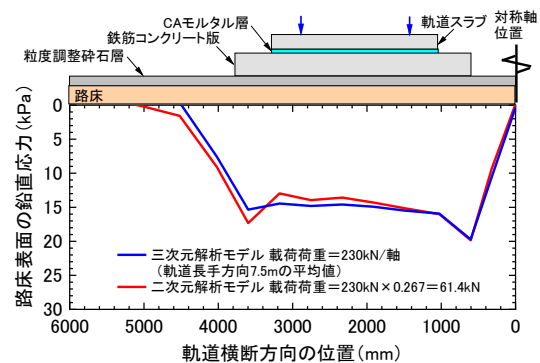


図 19 二次元静的線形解析モデルの荷重の補正係数の検討

### 5.3 沈下量の推定条件

推定条件は、軸重を 170kN、列車速度を 260km/h および 360km/h、列車本数を 10 両編成で 60 本/日 (年間の通過軸数は、87.6 万回) とし、供用中の 100 年間に於いて列車速度は一定とした。盛土の供用年数は、1 年、10 年、50 年、100 年の 4 種類とした。4 章の検討結果に基づき、累積損傷度理論と二次元有限要素解析をハイブリットさせた方法で算定した値に 1.5 を乗じることで路床の沈下量を推定した。列車による載荷回数は 2 章に示した走行時の路床表面の変位波形より 2 軸 (1 台車) で 1 回とした。

### 5.4 沈下量の推定結果

図 20 に鉄筋コンクリート版上面における、速度 260km/h および 360km/h の列車の繰返し通過で生じる沈下量の推定結果を示す。供用開始から 100 年後の沈下量は、列車速度 260km/h で 2.85mm、列車速度 360km/h で 2.99mm となった。列車速度が 360km/h で生じる沈下量は、列車速度が 260km/h の場合よりも沈下量が 5% 程度増加した。また、供用 100 年後の沈下量は 3mm 程度であり、土構造標準に示されているスラブ軌道用のコンクリート路盤の最終沈下量 30mm<sup>2</sup>) と比較しても十分に小さい値であった。

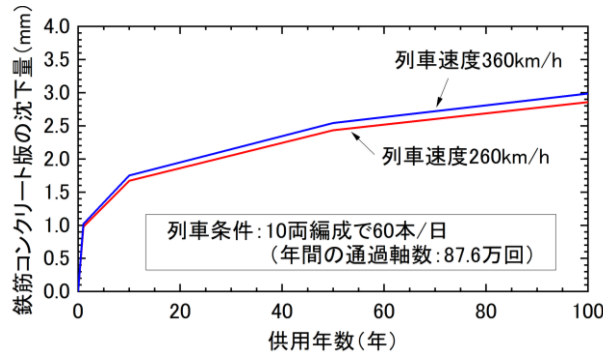


図 20 列車速度 260km/h および 360km/h で生じる沈下量の推定結果

## 6. まとめ

実物大載荷試験により、累積損傷度理論と静的線形解析をハイブリットさせた推定方法の妥当性を検証した。本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 盛土上のスラブ軌道上を列車が走行した際、速度効果による衝撃係数を考慮するため、三次元有限要素解析の過渡応答解析より、列車速度に応じた路床のひずみから求める設計衝撃係数  $i$  の設定方法を提案した。
- (2) 累積損傷度理論を用いた沈下量の推定結果と実物大繰返し載荷試験結果を比較した。その結果、LDTを用いて累積ひずみを測定した繰返し三軸圧縮試験結果から累積変形特性パラメータを決定し、有限要素解析により算出した沈下量を 1.5 倍することで、実物大繰返し載荷試験の結果を安全側に評価できることを確認した。
- (3) 高さ 9m の盛土上に敷設されたスラブ軌道に対して、列車が 1 日に 60 編成 (10 両編成) 通過する条件において、100 年分の列車の繰返し通過で生じるコンクリート路盤の累積沈下量を推定した。推定した累積沈下量は、列車速度 260km/h で 2.85mm、360km/h で 2.99mm であった。列車速度が 360km/h で生じる沈下量は、列車速度が 260km/h の場合よりも沈下量が 5% 程度増加した。土構造標準に示されているスラブ軌道用のコンクリート路盤の最終沈下量 30mm と比較しても十分に小さい値であった。

## 文 献

- 1) 安藤勝敏, 須長誠, 三浦重, 関根悦夫, 鬼頭誠, 青木一三: 土路盤上スラブ軌道用路盤の実用性に関する検討, 土木学会論文集, pp.87-98, No.536, 1996
- 2) 国土交通省鉄道局監修, 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, 丸善出版, 2013
- 3) 館山勝, 篠田昌弘, 堀井克己, 小島謙一: 列車の繰返し載荷による盛土の残留沈下量の算定方法, 鉄道総研報告, Vol.20, Vol.12, 2006
- 4) 伊藤孝記, 桃谷尚嗣, 景山隆弘, 中村貴久, 川中島寛幸: 累積損傷度理論による列車速度を考慮した新幹線盛土の塑性沈下量の評価, 土木学会論文集, Vol.79, No.7, 22-00265, 2023
- 5) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善出版, 2004
- 6) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y., Sato, T.: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, Soils and foundations, 31(1), pp.169-180, 1991.
- 7) 水野直也, 仲村治朗, 渡辺浩平, 斉藤一郎, 西尾伸也: 新第三紀常滑層地盤の変形特性, 土木学会論文集, No.603, III-44, pp.179-190, 1998.9
- 8) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 洲上翔太, 斉藤成彦: 軌道スラブの耐荷特性に基づくスラブ軌道でん充層の補修基準に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 66A, 2020.3
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 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, pp. 398-401, 丸善出版, 2012