

粘性土地盤に対応したスラブ軌道用 RC 路盤の性能評価

桃谷 尚嗣* 関根 悦夫*
高橋 貴蔵* 丸山 修**

Performance Evaluation of Reinforced Concrete Roadbed on Clay Subgrade

Yoshitsugu MOMOYA Etsuo SEKINE
Takatada TAKAHASHI Osamu MARUYAMA

A high bearing capacity is essential for subgrade to avoid excessive settlement upon constructing slab tracks on earth structures. However, soft diluvial clay layer was visible on a route under planning of a Tohoku-Shinkansen line adjacent to a local town named Shichinohe, and a double-line-integrated reinforced concrete roadbed was developed. We carried out detailed ground investigations to construct slab track on the soft diluvial clay to evaluate the performance of the concrete roadbed. We further carried out on-site cyclic loading tests with application of vibration exciting machinery. Based on the foregoing results, the authors carried out FEM analysis to evaluate deformation characteristics of the concrete roadbed. It was clear that the double-line-integrated reinforced concrete roadbed was able to support properly slab track on the soft diluvial clay subgrade.

キーワード：スラブ軌道，コンクリート路盤，粘性土，地盤調査，載荷試験

1. はじめに

従来、盛土や切土などの土構造物上に敷設される新幹線の軌道はバラスト軌道が一般的であり、スラブ軌道の適用は高架橋やトンネルに限られていた。しかしながら、品質の高い路床（路盤表面から深さ3mまでの地盤で列車荷重を受ける範囲）とコンクリート路盤を用いることで土構造物上にA形スラブ軌道を敷設することが可能となり¹⁾、北陸新幹線以降に建設された新幹線では軌道保守作業の省力化とライフサイクルコスト低減を目的として、土構造物上にもスラブ軌道が広く適用されている。

スラブ軌道では大きな沈下が生じた場合、軌道保守が困難であるため、路床には高い支持条件が求められている。「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」では切土や素地において路床にN値4未満の粘性土層がある場合、路床の表層改良を行ってもスラブ軌道を敷設できず、コストの高い地盤改良が必要になる。東北新幹線計画路線における七戸付近の切土区間において、N値4未満の比較的軟弱な粘性土の路床が存在していることが確認された。地盤改良を行うと建設コストが増加するが、仮にバラスト軌道を選択すると、開業後に定期的な保守作業を行う必要が生じるため、ライフサイクルコストの増加につながる。また、降雪地域のバラスト軌道では、高

速走行する車両から落下した雪塊がバラストを飛散させないようにネットを張るなどの対策も必要となる。

今回の検討箇所は事前調査の結果、洪積層の切土で十分な過圧密状態にあり、列車荷重による残留沈下はほとんど生じないと考えられた。そのため、路床の表層改良によりスラブ軌道を敷設できると判断できれば、ライフサイクルコストを大きく低減させることが可能となる。

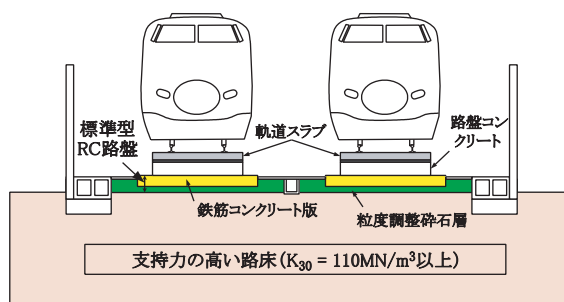


図1 標準型 RC 路盤（支持力の高い路床）

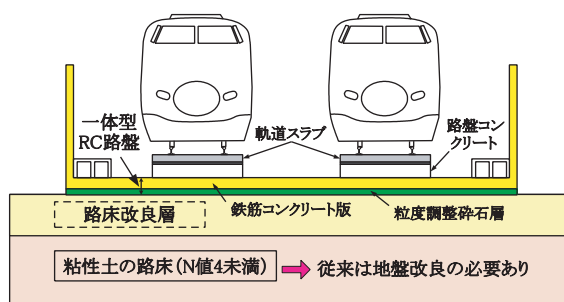


図2 一体型 RC 路盤（粘性土の路床）

* 軌道技術研究部（軌道・路盤）

** 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

特集：軌道技術

土構造物上にスラブ軌道を敷設する場合、図1に示すように、一般的に上下線分離型の鉄筋コンクリート版（ここでは標準型RC路盤と称する）を介して軌道スラブを設置するのが標準的な構造である。それに対し粘性土の路床上にスラブ軌道を敷設するための構造として、図2のように鉄筋コンクリート版を上下線一体とすることによって地盤に作用する応力を低減させる「一体型RC路盤」を適用することを検討した。なお、ここではRC路盤を「鉄筋コンクリート版と粒度調整碎石層」で構成される層として定義している。また、この一体型RC路盤では、防音壁を鉄筋コンクリート版と一体化させることで防音壁の基礎をスリム化し、建設コストの低減を図っている。

本検討では地盤調査、繰返し載荷試験および有限要素解析を行い、一体型RC路盤の変位、疲労破壊に対する安全性および残留沈下に対する評価を行った。

2. 地盤調査および載荷試験の概要

地盤調査および繰返し載荷試験は八戸-新青森間の七戸町付近における切土区間で行った。試験箇所は標高40m程度の台地上に施工された切土であり、事前の調査によりN値が4未満の比較的軟弱な八戸ローム層および更新世の粘性土層が分布していることがわかっていった。なお、路床の表層については、凍上対策についても考慮し、「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」に従い、粒度調整碎石への置換により厚さ約1mの路床改良を行っている。

一体型RC路盤の評価を行うための全体計画のフローを図3に示す。ここでは、はじめに一体型RC路盤敷設箇所の地盤調査を行った。地盤調査では標準貫入試験、電気式静的コーン貫入試験、平板載荷試験、物理試験および三軸圧縮試験を行った。次に、一体型RC路盤上において起振機を用いた繰返し載荷試験を行い、路盤の変位、鉄筋コンクリート版の鉄筋応力、路床の応力および路盤の沈下量を測定した。

さらに有限要素解析により、一体型RC路盤の変位、疲

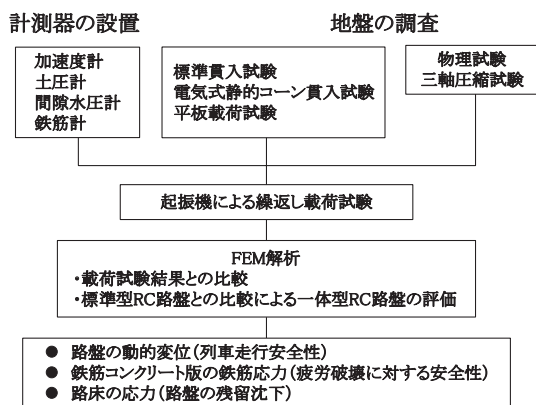


図3 一体型RC路盤の評価のフロー

労破壊に対する安全性および路盤の残留沈下に対する評価を行った。また、一体型RC路盤と標準型RC路盤の比較を行い、一体型RC路盤の性能を考察した。

3. 地盤調査

3.1 地盤調査の方法

路床となる粘性土層に対する地盤調査では、標準貫入試験、電気式静的コーン貫入試験、平板載荷試験、物理試験および三軸圧縮試験を行った。

標準貫入試験は国内外で広く用いられている地盤調査方法であり、標準貫入試験用サンプラーを30cm貫入させるためのハンマーの打撃回数をN値とする。この調査では深さ10m程度まで調査を行った。また、標準貫入試験のボーリング孔を用いて、シンウォールサンプラーにより乱れの少ない試料を採取し、圧密非排水三軸圧縮試験を行った。また、物理試験として土粒子密度、含水比、液性限界・塑性限界、粒度分布の測定を行った。

さらに深さ10m程度までの粘性土層について詳細な情報を得るため、電気式静的コーン貫入試験を行った。電気式静的コーン貫入試験は鋼製コーンを静的に貫入させ、先端抵抗値、周面摩擦力および間隙水圧を測定するものであり、地盤の情報を連続的に得ることができる。

平板載荷試験は30cmの載荷板による「道路の平板載荷試験」とし、粘性土の原地盤表面および路床改良した粒度調整碎石の表面においてK₃₀値を測定した。

3.2 地盤調査の結果

物理試験の結果を表1に示す。得られた試料の目視によると、火山灰質粘性土や洪積粘土が比較的複雑に混じりあって地層を構成していた。物理試験の結果からは自

表1 物理試験の結果

	深さ2m	深さ9m	深さ10m
土粒子密度 (g/cm ³)	2.732	2.551	2.550
含水比 (%)	55.2	222.1	63.1
液性限界 (%)	62.2	254.0	117.6
塑性限界 (%)	26.3	88.5	40.8
塑性指数 (%)	35.9	165.5	76.8

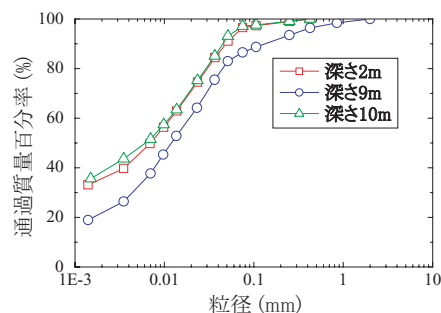


図4 粒径加積曲線

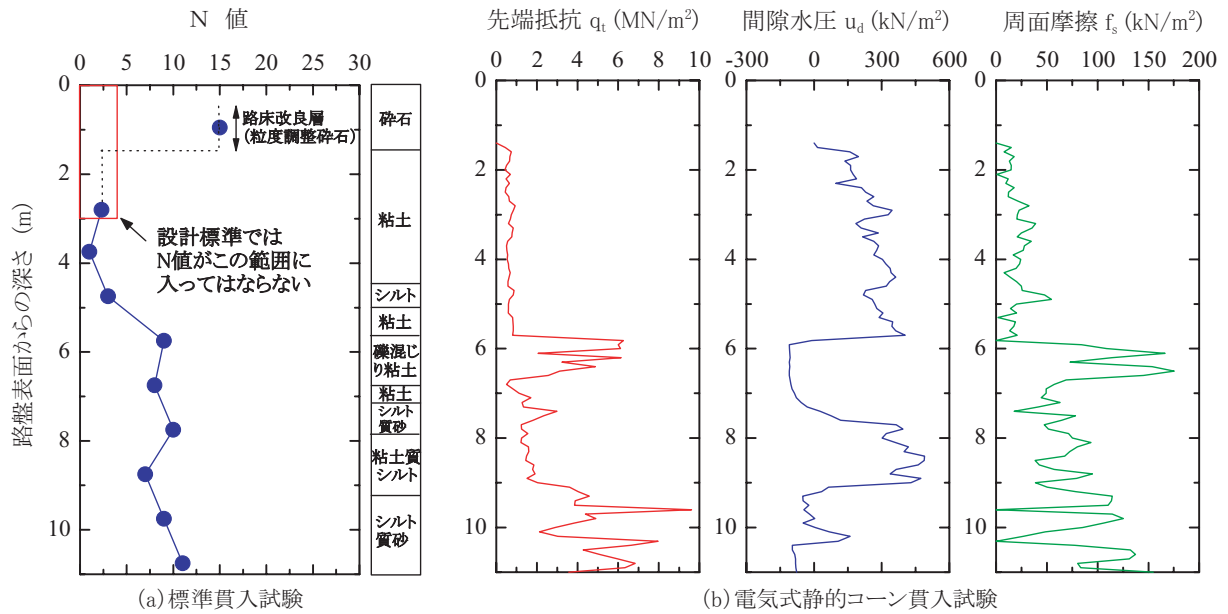


図5 標準貫入試験および電気式静的コーン貫入試験の結果

然含水比や塑性指数が深さ方向で変化していることがわかった。一方、図4に示す粒径加積曲線から、粒度分布については概ね同様であると判断できる。

標準貫入試験および電気式静的コーン貫入試験の結果を図5に示す。なお、路盤表面から深さ1m程度までは粒度調整碎石の置換による路床改良を行った層である。標準貫入試験の結果から、路盤表面から深さ5m付近までN値4未満の粘性土層が分布していることが確認された。設計標準に従うと、原則として標準型RC路盤を用いてスラブ軌道を敷設することはできない路床と判断される。一方、5m以深についてはN値が10前後となり、強度としては比較的小さいものの、列車荷重の影響も小さいことから問題ないと判断できる。

電気式静的コーン貫入試験の結果も概ね同様であり、深さ5m付近までは先端抵抗および周面摩擦が小さく貫入時の間隙水圧の高い、軟弱な粘性土としての特徴を持った層が確認された。深さ6m付近で先端抵抗および周面摩擦が大きく間隙水圧が小さい、砂質土の特徴を持った層が確認されたが、その下は再び粘性土となり、先端抵抗が深さ10mに向かって徐々に増加している。

深さ2mの粘性土層から採取した供試体を用いて行った非排水圧密三軸圧縮試験の結果を図6および図7に示す。最大軸差応力は圧密応力が20kN/m²の場合でも75kN/m²程度であり、列車荷重によって路床に作用する応力20~30kN/m²以下ではひずみも十分小さい。また、列車荷重によって生じる10⁻⁴レベルの変形係数は圧密応力20kN/m²の場合で30MN/m²程度であった。変形係数はやや小さいものの列車荷重を十分支持できる範囲であり、一体型RC路盤によって応力が適切に分散されれば、ひずみレベルもさらに小さい範囲に収まると考えられる。

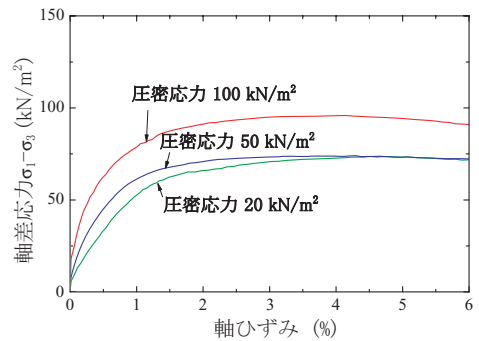


図6 三軸圧縮試験による応力-ひずみ曲線

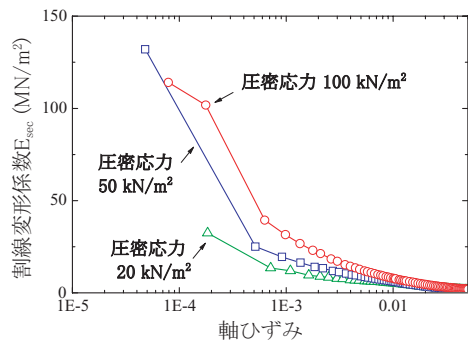


図7 三軸圧縮試験による変形係数

表2 平板載荷試験の結果

試験位置	K ₃₀ 値 (MN/m ³)
原地盤 (粘性土)	50, 39, 34 (平均値 41)
路床改良層 (粒度調整碎石)	199, 150, 202 (平均値 184)

平板載荷試験の結果を表2に示す。原地盤(粘性土)ではK₃₀値の平均値が41MN/m³であり、そのままではスラブ軌道を敷設するための路床条件110MN/m³を満足しな

特集：軌道技術

いことが確認された。路床改良層（粒度調整碎石）の表面では K_{30} 値の平均値が 184MN/m^3 であり、粒度調整碎石による路床置換が適切に施工されていることを確認した。

4. 繰返し載荷試験

4.1 繰返し載荷試験の方法

計測器の設置位置および起振機の設置位置を図8に示す。路床内に加速度計、間隙水圧計および土圧計を設置し、鉄筋コンクリート版には鉄筋計を設置した。また、路盤表面にサーボ型の加速度計を設置し、加速度および変位を測定した。

繰返し載荷試験には自重 53kN 、最大荷重振幅 $\pm 60\text{kN}$ の起振機を用いた。起振機の設置位置は、コンクリート路盤の目地から軌道方向に 2m 離れた位置とし、上り線の軌道中心に合わせて設置した。厚さ 300mm の鉄筋コンクリート版の上に厚さ 200mm 、幅 2400mm の路盤コンクリートを設置し、その上に起振機を固定した。

はじめに周波数を変化させた共振試験を行い、その後繰返し載荷回数 200 万回の繰返し載荷試験を行った。

4.2 繰返し載荷試験の結果

載荷荷重 $\pm 10\text{kN}$ および $\pm 20\text{kN}$ において、周波数を段階的に変化させた共振試験を行い、路盤表面の変位を測定した。共振試験の結果、図9に示すように、 $6\sim 7\text{Hz}$ 付近に共振点があり、共振点から離れた 20Hz 付近での変位と比較すると、共振点では変位が 3.5 倍程度に大きくなることを確認された。

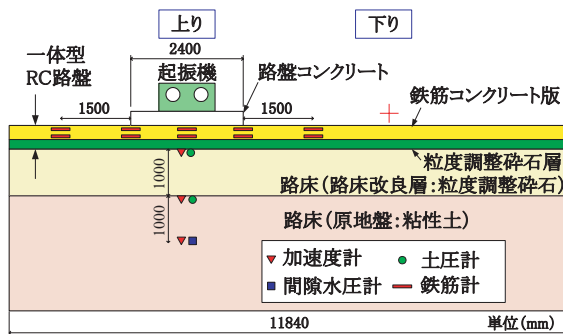


図8 計測器と起振機の設置位置

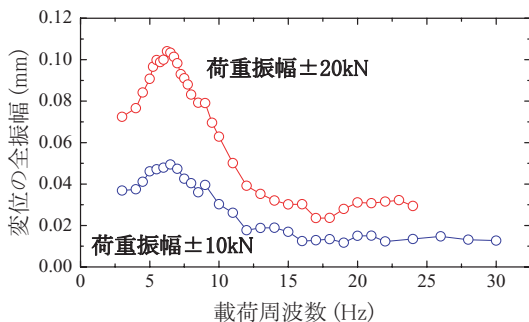
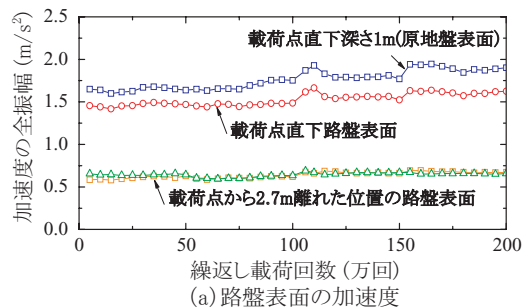
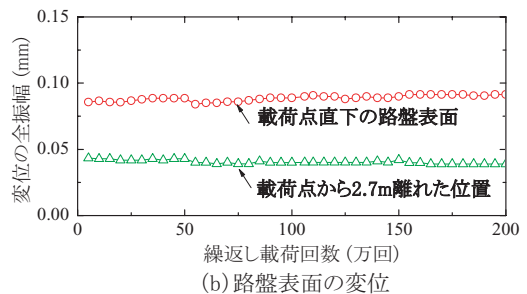


図9 共振試験による路盤表面の変位

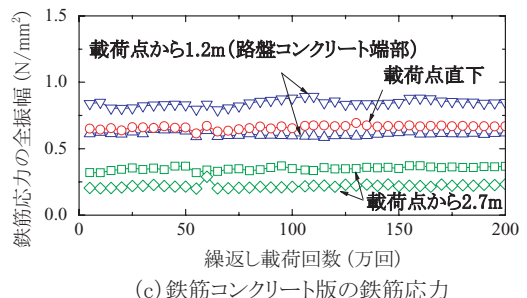
載荷荷重 $\pm 60\text{kN}$ 、載荷周波数 20Hz における 200 万回の繰返し載荷試験による加速度、変位、鉄筋応力（下側）および路床鉛直応力の全振幅を図10に示す。加速度は、載荷点直下で最も大きく、路盤表面よりも深さ 1m の原地盤表面の方がやや値が大きくなった。載荷点から線路横断方向に 2.7m 離れた位置では加速度が $1/2$ 程度となった。路盤表面の変位についても載荷点直下が最も大きく、載荷点から 2.7m 離れた位置では値が $1/2$ 程度となった。鉄筋応力は載荷点直下および起振機の台座として設けた路盤コンクリート端部で値が大きく、載荷点から 2.7m 離れると載荷点直下と比較して値が $1/2$ 程度となった。路床の鉛直応力は路床改良層の表面で $8\sim 9\text{kN/m}^2$ 程度、深さ 1m の原地盤表面では $5\sim 6\text{kN/m}^2$ 程度となった。繰返し載荷試験の結果、これらの測定値は十分小さい値



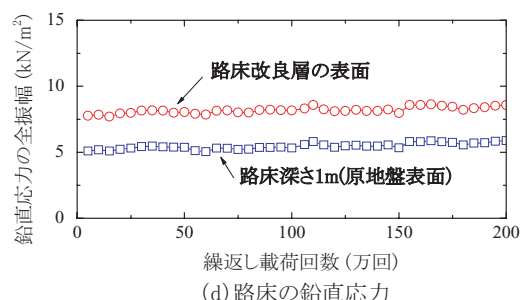
(a) 路盤表面の加速度



(b) 路盤表面の変位



(c) 鉄筋コンクリート版の鉄筋応力



(d) 路床の鉛直応力

図10 繰返し載荷試験の結果

であり、200万回の载荷中、概ね一定であった。

繰返し载荷前後の水準測量の値の差は±1mmの範囲であり、有意な残留沈下は確認されなかった。また、载荷中に間隙水圧はほとんど発生しなかった。

5. 有限要素解析による評価

5.1 繰返し载荷試験との比較

図11に示す解析モデルによる有限要素解析(静的線形

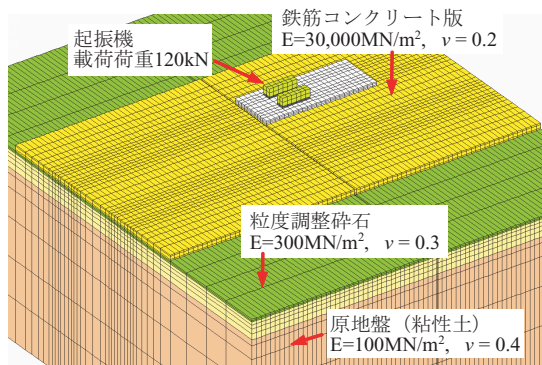


図11 有限要素解析モデル

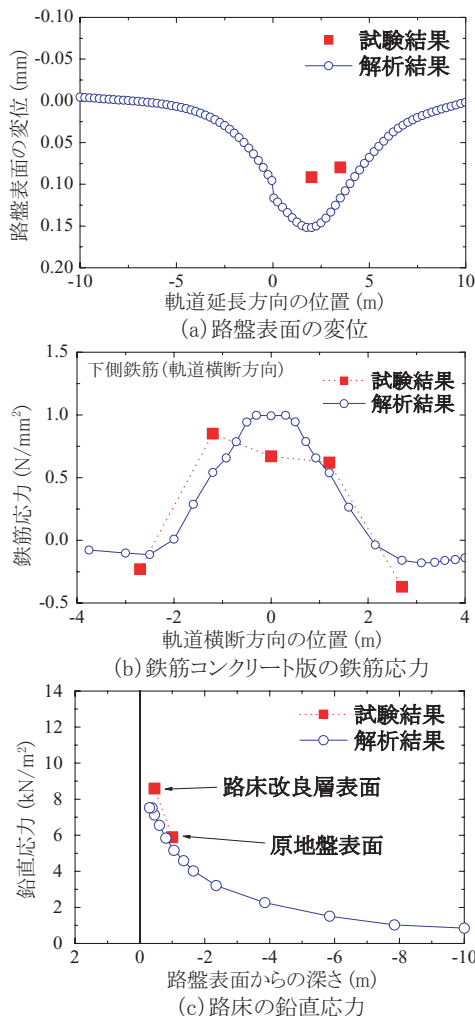


図12 試験結果と解析結果の比較

弾性解析)を行い、200万回の繰返し载荷後の測定値との比較を行った。解析に用いた地盤の弾性係数は地盤調査の結果をもとに応力・ひずみレベルを考慮して設定した。地盤の条件として支配的となる原地盤(粘性土)の弾性係数は、繰返し载荷試験時の変位量から発生するひずみ量を推定して、三軸圧縮試験の結果をもとにひずみレベル 10^{-5} に対応する値として 100MN/m^2 を用いた。

試験結果と解析結果の比較を図12に示す。繰返し载荷試験と有限要素解析の比較から、有限要素解析により一体型RC路盤の変形特性を概ね正しく評価できていることが確認できる。なお、鉄筋コンクリート版の応力はコンクリートも引張応力を負担する全断面有効時の値である。変位については試験結果が解析結果の2/3程度であった。路盤の変位は主に路床の変形係数に支配されるが、繰返し载荷試験時の挙動においては、解析で設定した値よりもさらに原地盤(粘性土)の変形係数が大きかったと考えられる。この一因としては、粘性土の载荷速度依存性²⁾により、20Hz载荷時の変形係数が三軸圧縮試験の場合よりも高かった可能性が考えられる。しかしながら、共振試験における共振点での変位の最大値は20Hz载荷時の約3.5倍であったため、動的応答を考慮すると最大変位はより大きくなることに留意する必要がある。

5.2 標準型RC路盤と一体型RC路盤の比較

次に、有限要素解析において標準型RC路盤と一体型RC路盤の比較を行った。なお、ここでは一体型RC路盤の設計上の性能評価を行うことから、原地盤(粘性土)の

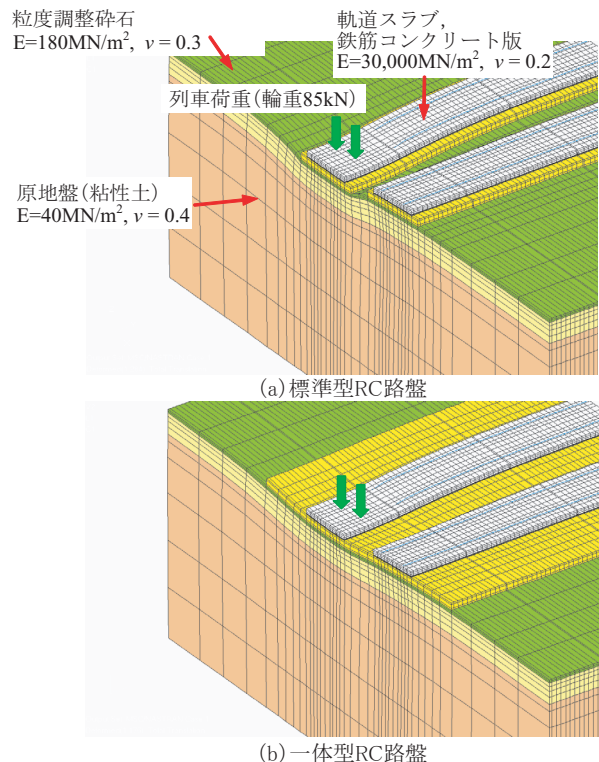


図13 標準型RC路盤と一体型RC路盤の変形性状

表3 一体型RC路盤と標準型RC路盤の比較（解析結果の最大値）

	一体型RC路盤	標準型RC路盤	一体型 / 標準型
路盤表面の変位	0.60 mm	0.71 mm	0.85
鉄筋応力	2.08 N/mm ²	2.33 N/mm ²	0.89
路床改良層（粒度調整砕石）表面の鉛直応力	10.5 kN/m ²	28.6 kN/m ²	0.37
原地盤（粘性土）表面の鉛直応力 （路床深さ1m）	6.89 kN/m ²	9.02 kN/m ²	0.76

弾性係数については設計時に考慮するひずみレベル 10^{-4} を考慮して、三軸圧縮試験の結果をもとに 40MN/m^2 を用いた。また、載荷荷重は輪重 85kN の列車荷重とし、二軸台車の車輪位置で荷重を与えた。なお、解析モデルは1/2対称モデルとした。図13に示す変形モデル図を見ると、標準型RC路盤の場合は荷重が作用している直下の路盤に変形が集中するが、一体型RC路盤の場合は路盤剛性により軌道横断方向に広く変形が生じていることがわかる。

標準型RC路盤と一体型RC路盤の解析において得られた路盤表面の変位、鉄筋応力、路床改良層（粒度調整砕石）表面の鉛直応力、原地盤表面（路床深さ1m）の鉛直応力の比較を表3に示す。この結果から、一体型RC路盤は標準型RC路盤よりも路盤表面の変位、鉄筋コンクリート版の鉄筋応力、路床の鉛直応力が小さくなることがわかった。特に、一体型RC路盤は路床に作用する応力を大きく低減させる効果があり、鉛直応力の最大値は路床改良層表面で63%、原地盤表面で24%低減した。

5.3 一体型RC路盤の性能評価

土構造物上の軌道および路盤の評価を行う際、路床の変形係数にはひずみ依存性があるため、作用応力とひずみレベルの関係を適切に考慮する必要がある。一般に列車荷重作用時は路床に 10^{-4} 程度のひずみが生じるため、設計ではひずみレベル 10^{-4} に対応した変形係数を用いる。それに対し、起振機による繰返し載荷試験では作用応力がひずみレベル 10^{-5} に対応する程度であったため、試験で得られた路盤変位は設計で考慮する路盤変位よりも小さいレベルであった。

路盤変位については、設計で考慮する路床のひずみレベル 10^{-4} に対応する変形係数を用いて行った有限要素解析において、一体型RC路盤の路盤表面の鉛直変位は 0.60mm であり、仮に3倍の衝撃輪重が作用すると変位量は 1.80mm となる。一方、起振機による載荷試験における共振点では共振点から離れた周波数の約3.5倍の変位であったことから、仮に 0.60mm の3.5倍を考慮すると 2.1mm である。一般部ではレール面で3~4mm程度の変位があっても走行安全上問題ないことから、一体型RC路盤の変位量は路盤に許容される値よりも十分小さい値と判断できる。一方、繰返し載荷試験における載荷荷重 $\pm 60\text{kN}$ の変位量（全振幅）は 0.1mm 程度であったことを考慮すると、実際には列車走行により発生する変

位量は十分小さい値になると判断できる。

次に、疲労破壊に対する安全性について評価を行った。解析で得られた一体型RC路盤の鉄筋応力は 2.08N/mm^2 であったが、これはひび割れが生じていない全断面有効時の場合の値である。鉄筋コンクリートの設計ではコンクリートの引張応力を考慮しないのが一般的であることから、引張応力を鉄筋のみで負担させた場合の鉄筋応力を軸力のつり合い計算から求めた結果、鉄筋応力は 24.2N/mm^2 となった。

ここでは12両編成の新幹線が60本/日通過する条件を仮定し、「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物」に従って設計引張疲労強度を算定したところ、 144.3N/mm^2 であった。すなわち、衝撃荷重を考慮しても、十分安全側となることが確認された。

最後に、路床に作用する鉛直応力から残留沈下量の可能性について評価を行った。解析で得られた原地盤（粘性土）の路床に作用する鉛直応力は 6.89kN/m^2 であった。三軸圧縮試験による最大軸差応力は 70kN/m^2 程度であったことから、原地盤（粘性土）の強度に対して作用する応力は十分小さい。また、検討箇所は切土であり、先行荷重を受けた洪積粘土であることを考慮すると、残留沈下が生じる可能性は小さいと判断できる。

6. おわりに

粘性土地盤にスラブ軌道を敷設するための路盤構造として、一体型RC路盤の評価を行った。その結果、一体型RC路盤を用いることで地盤に作用する応力を効果的に低減させ、鉄筋コンクリート版の鉄筋応力も低減できることがわかった。また、一体型RC路盤の列車荷重作用時の路盤変位、鉄筋応力および残留沈下についても、問題ないと判断された。

文献

- 1) 安藤勝敏, 須長誠, 関根悦夫, 青木一二三, 米澤豊司, 岡本武明: RC路盤を用いた土路盤上スラブ軌道構造の実用化, 鉄道総研報告, 第13巻第5号, pp.5-10, 1999.5
- 2) 桃谷尚嗣, 石井高幸, 龍岡文夫: 正規圧密粘土における変形特性のひずみ速度依存性と非排水クリープの予測, 第33回地盤工学研究発表会, pp.615-616, 1998.7