

論文 バラスト軌道による荷重分散効果が R C 複鉄筋版桁のたわみに与える影響

伊藤 雄郷¹・吉田 幸司²・西山 誠治³・田辺 篤史⁴・川谷 充郎⁵

¹正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: yuugo.itou@jr-central.co.jp

²正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: k-yoshida@jr-central.co.jp

³正会員 株式会社日建設計シビル 都市基盤・エンジニアリング部門

(〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町 3-6-14)

E-mail: nishiyama@nikken.jp

⁴正会員 株式会社日建設計シビル 都市基盤・エンジニアリング部門 設計部

(〒541-0054 大阪府大阪市中央区南本町 3-6-14)

E-mail: tanabe.atsushi@nikken.jp

⁵フェロー 神戸大学名誉教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: m-kawa@kobe-u.ac.jp

東海道新幹線の道路交差部で用いられている RC 複鉄筋版桁は桁高が低く、RC 構造物としては活荷重によるたわみが比較的大きい桁である。このため、RC 複鉄筋版桁の維持管理において、桁のたわみの把握は重要である。実橋における桁のたわみ計測結果より、実構造物のたわみは設計値に比べてかなり小さいことがわかっている。この要因の一つに軌道構造物による荷重分散効果の影響が考えられる。軌道構造物による荷重分散は、レールやバラスト等が複雑に影響するため、実物大の RC 複鉄筋版桁模型を用いた載荷実験により、軌道構造物が桁のたわみに与える影響について、定量的に把握を行った。また、実験の結果をもとに 3 次元 FEM 解析による比較検討を行い、その結果、軌道構造物による荷重分散効果により、桁のたわみは 20 % ほど小さくなること等を明らかとした。

Key Words: double reinforced concrete girder bridge, ballast track, load distribution effect, deflection, real scale loading test, 3D FEA

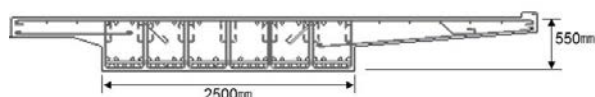
1. はじめに

東海道新幹線において、道路交差部等は桁下空間を確保する必要があるため、比較的短スパン(8~12m 程度)の箇所には、桁高の低い RC 複鉄筋版桁橋梁が多く採用されている。図-1 に RC 複鉄筋版桁と一般的な RC 桁の断面を示す。RC 複鉄筋版桁は、桁高を低くするため、鉄筋量を増やして耐力を確保する構造形式であり、一般的な RC 桁に比べて、たわみが生じやすい。このことから、鉄筋に作用する応力の変動量も大きく、疲労やひび割れも懸念されるため、RC 複鉄筋版桁の維持管理において、桁のたわみの把握は重要である。

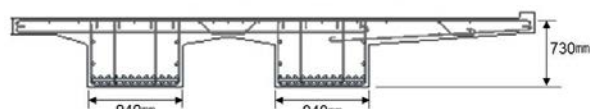
著者らは RC 複鉄筋版桁橋梁 372 連を対象に、支間中央における列車走行時の動的たわみ計測を実施

し、そのほとんどの最大たわみ量は、設計値から算出したたわみ量と比べて小さいことを示している¹⁾。RC 桁の設計計算において、はね出し部やバラスト止めを断面に換算していないこと、また、レールの曲げ剛性は考慮していないことなどが考えられる。さらに、設計計算においては、列車荷重等を集中荷重として扱うが、東海道新幹線のほとんどはバラスト軌道であり、軌道構造物(レール、まくらぎ、バラスト、締結装置、各種パッドなど)によって荷重が分散し、その効果によってもたわみが減少した可能性がある。

軌道構造物による荷重分散については、軌道工学の観点からの研究が多く実施されている。相川ら²⁾は、まくらぎ下面に圧力センサを設置したセンシングまくらぎを開発し、バラスト軌道におけるまくら



(a) RC複鉄筋版桁の標準的な断面



(b) 一般的な桁の断面 (T桁)

	複鉄筋版桁	T桁
桁高 (道路から桁下までの高さ)	低い (桁下制限が厳しい)	高い (桁下制限が緩い)
鉄筋量	多い (引張鉄筋量 412cm ²)	少ない (引張鉄筋量 308cm ²)
曲げ剛性	低い (断面2次モーメント 0.0346m ⁴)	高い (断面2次モーメント 0.0609m ⁴)

(c) RC複鉄筋版桁とT桁の比較

図-1 複鉄筋版桁の特徴



図-2 供試体セットアップ状況



図-3 バラスト止め設置状況

ぎ下面の(衝撃)圧力分布を求めている。須江³⁾らは弾性まくらぎの検討の一環として、圧力素子を用いたセンサ付軌道パッドを用いて、列車通過時のレール下面の圧力測定を行って荷重分散率を求め、まくらぎの設計強度の見直しを試みている。また、まくらぎの形状を改良することで荷重分散効果を高め、まくらぎやバラストの長寿命化と保守作業回数の削減を図る研究開発も行われており、ラダー型まくらぎ(ラダー軌道)⁴⁾が提案されている。バラスト層内部での荷重伝達に関しては、FEMによる検討^{5),6)}や個別要素法による検討⁷⁾が実施されているが、これらはあくまでバラスト層内での挙動に着目した検討であり、その下にある土木構造物への影響や連成については考慮されていない。この様に、バラスト軌道における荷重分散の検討はレール、まく

らぎ、バラストに着目したものが主体で、直下の土木構造物との関係を考慮した検討は極めて少ないのが現状であり、バラスト軌道により荷重分散が土木構造物の応答に与える影響については不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では、バラスト軌道による荷重分散効果によって、RC複鉄筋版桁のたわみがどの程度低減するのか定量的に把握することを目的に実物大模型による載荷実験および3次元FEM解析による検討を実施する。

2. 載荷実験による検討

(1) 目的

ここでは、軌道構造物等による荷重分散効果が、桁のたわみにどの程度影響を与えるのかについて、実物大模型桁を用いた載荷実験により、検討を行う。

検討にあたっては、軌道構造物の有無、軌道構造物の状態および載荷状態をパラメータとして考慮する。

(2) 実験条件

a) 複鉄筋版桁供試体

供試体としては、東海道新幹線の中で多く用いられている支間10m(全長10.7m)の複鉄筋版桁¹⁾を実物大サイズにて製作しこれを用いる。供試体のセットアップ状況を図-2に示す。供試体は桁高550mm、桁部幅2500mmである。通常は上下線セットで製作されるが今回は片線のみとするため、上下線間にあたる側にL型のバラスト止めを設置する(図-3)。このとき、バラスト止めが桁剛性に影響を与えないよう、バラスト止めに若干の隙間をあける。橋台には不等沈下の影響を受けにくいように橋台底部をスラブで一体化し、支承部には標準設計図を参考に鋼板とレールを組み合わせた支承を用いる。

なお、この供試体は、本実験を実施する前に、別の載荷実験として軌道構造物による死荷重に加えて衝撃分を考慮した活荷重480kN分の載荷を何度か行っており、本線の構造物と同様の状態が再現されている。

b) 境界条件・載荷条件

桁は単純支持条件とする。軌道は、本線で用いられているものと同じ60kgレール、PCまくらぎ(3H)を使用し、道床厚はまくらぎ下30cmである。なお、レール端部は橋台のパラペット部に合成まくらぎ用タイププレート設置し、レール締結装置にて固定する。

載荷は列車の台車を模擬した2点載荷の他、より

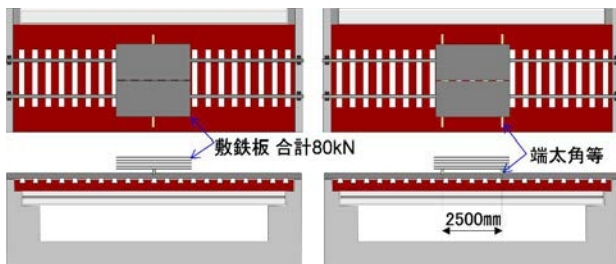


図-4 荷条件



1点荷



2点荷

図-5 荷状況

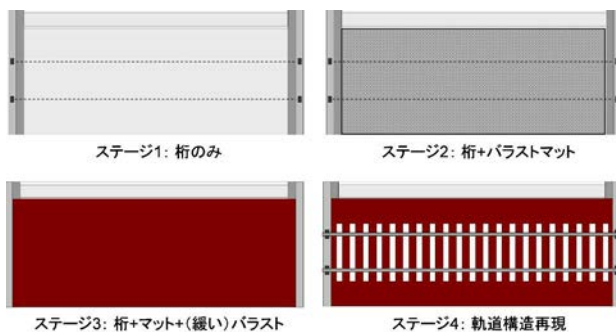


図-6 軌道構造状態のステージ一覧

単純化した1点荷の2種類で行う(図-4参照)。実際の荷状況を図-5に示す。荷重には敷鉄板を束ねたものを使用する。なお、1点荷の場合は荷重した敷鉄板が不安定な状態となるため、安全のためにワイヤをかけたままで実施し、クレーンの能力から荷重は80kNとする。

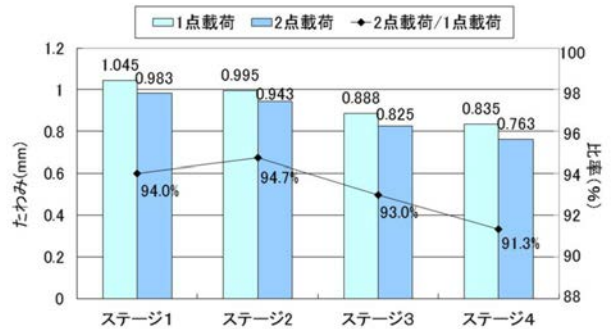


図-7 軌道構造物による支間中央たわみの変化

表-1 各軌道構造によるたわみ減少量と割合

		たわみ減少量(mm)		たわみ減少量(%)	
		1点荷	2点荷	1点荷	2点荷
ステージ1⇒2	バラストマット	-0.050	-0.040	-4.8	-4.1
ステージ2⇒3	バラスト	-0.108	-0.118	-10.3	-12.0
ステージ3⇒4	レール・まくらぎ	-0.053	-0.063	-5.0	-6.4
合計		-0.210	-0.220	-20.1	-22.4

荷重は軌道構造の状態を変化させた4つのステージ(図-6)に分けて行う。ステージ1は複鉄筋版桁本体のみ(設計死荷重:523kN)の状態とする。ステージ2は桁上にバラストマット(板厚25mmのゴムマット)を敷設した状態とする。ステージ3は設計計算の状態を再現するため、桁上に軌道の死荷重相当のバラスト(452kN)を敷設した状態とする。このバラスト重量には、軌きょう(レールとまくらぎ)重量相当も含んでいる。また、バラストを締め固めたことによる桁の曲げ剛性への影響を少なくするために、バラストの締め固めは行わず、なるべく緩く敷設する。ステージ4は実構造物の状態を再現し、軌きょうを設置しバラストも締め固めを行う。レール端部はU字橋台のパラペット部に設けた締結装置に締結する(図-6参照)。

c) 計測内容

たわみ測定は、スピンドル型の変位計(計測精度は0.001mm)を桁下面(支間中央の線路中心)に設置し、活荷重荷重前後でたわみを計測する。荷重荷重によるたわみ増分を求め、これを評価に用いる。

(3) 実験結果および考察

a) 軌道構造物の存在によるたわみの変化

荷重実験により求めた各ステージにおける支間中央の活荷重によるたわみ量とその変化について整理したものを図-7および表-1に示す。ステージを追うごとに明確に桁たわみが減少していることがわかる。たわみの減少量は、バラストを追加したステージ3、軌道構造物を追加したステージ4と次第に減

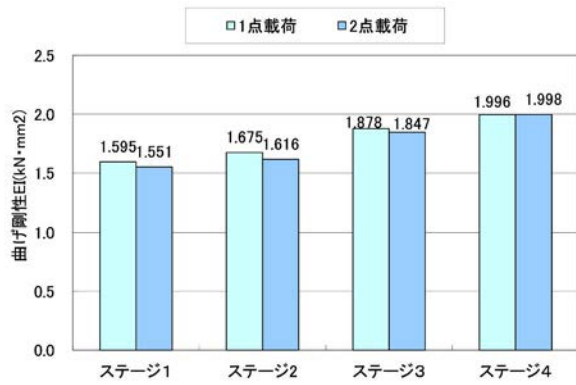


図-8 たわみから逆算した曲げ剛性 EI の比較

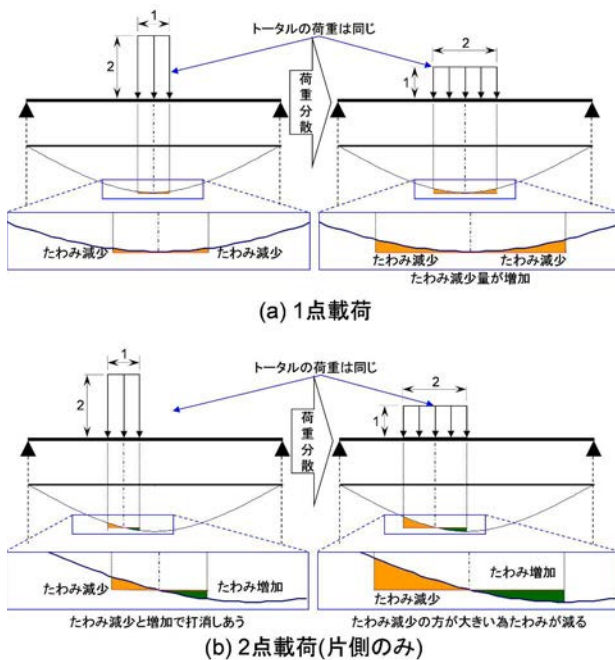


図-9 荷重分散によりたわみが減少するメカニズム

少する。ステージ2から3は、バラストの存在による荷重分散による影響、ステージ3から4へはレールによる荷重分散およびレール自体の曲げ剛性(桁剛性の約1%)の影響となる。トータルの荷重分散等によるたわみ減少率は、1点载荷で約20%、2点载荷で約22%である。以上から、軌道構造物等による荷重分散効果は2割程度であること、荷重分散効果は1点载荷よりも2点载荷のほうが若干大きいことがわかる。

b) 载荷条件による違い

図-7を見ると、1点载荷に比べて2点载荷のたわみが小さく、ステージ4で約1割異なることがわかる。これは2点载荷の場合载荷点が支点部に近くなり、その分だけたわみが減少する為であり、純粋に荷重分散によるたわみ低減の比較とはなっていない。そこで、荷重分散効果による影響を見るため、1点载荷と2点载荷それぞれについて、たわみの理論

式を変形した(1)、(2)を用いて曲げ剛性 EI を算出して比較したものを図-8に示す。

$$EI = \frac{PL^3}{48\delta} \quad (1)$$

$$EI = \frac{P}{24\delta} L^3 \alpha(3-4\alpha^2) \quad (2)$$

ここで、 P : 荷重(2点载荷は2点合計)(kN)、 L : 支間長(10m)、 δ : たわみ(m)、 α : a/L 、 a : 2点载荷(4点曲げ)の支点から载荷点までの距離(m)である。

図-8を見ると、1点载荷と2点载荷の曲げ剛性はほぼ等しく、わずかに1点载荷の方が大きい結果となっている。この要因について、たわみの影響線から考察すると、図-9に示す様になる。支間中央のたわみの影響線は支間中央でピークとなる山形の分布となり、分布荷重による支間中央たわみは影響線と単位長さ当たりの荷重の積を定積分することで求められる。図-9(a)を見るとわかる様に、1点载荷では荷重の範囲が広がるにつれて影響線の値が小さいところが多く積分範囲に含まれることになり、結果としてたわみが減少する。一方で2点载荷の場合は、桁端側に分布が広がるとたわみは減少するが、支間中央側に分布が広がると逆にたわみが増加する方向に作用する。たわみの影響線が3次曲線の為たわみ減少量の方がたわみ増加量よりも大きく、結果として荷重分散によってたわみは減少する方向であるが、1点载荷に比べると減少量は小さくなる。このようなメカニズムにより、1点载荷のほうが2点载荷に比べて荷重分散による影響が大きくたわみの減少量が多くなる。たわみがより小さくなるため、たわみに反比例する曲げ剛性も大きく算出される。

この荷重分散によるたわみ減少効果はどのステージにおいても等しいはずであるが、レールを敷設したステージ4のみ1点载荷と2点载荷の曲げ剛性が等しくなっている。このことは、ステージ4のみ1点载荷のたわみが大きい、もしくは、2点载荷のたわみが小さくなったことを表している。なぜこのようなことが起こったのかについて、詳細に検討するためにFEM解析による検討を実施する。

3. 軌道による荷重分散の解析検討

(1) 目的

ここでは、軌道構造物による荷重分散についてより詳細に確認を行うために3次元FEM解析を行う。

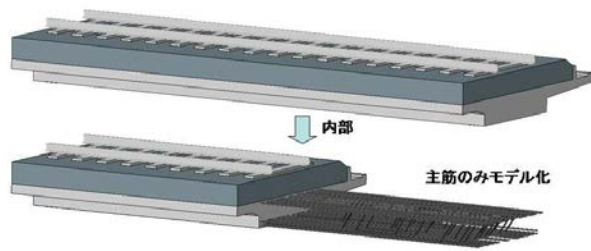
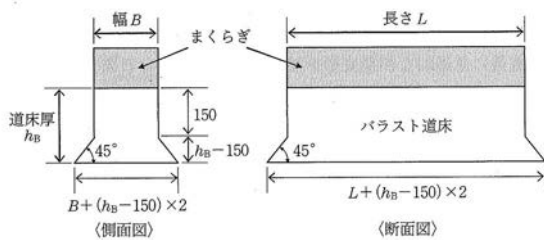


図-10 解析モデル

表-2 材料特性

	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	備考
コンクリート	25.0	0.2	$f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$
バラスト	0.12	0.2	社内の既往の検討から決定した値
鋼材	200	0.3	



付属図 16.11 バラスト軌道内に作用する力の分散 (単位: mm)

図-11 まくらぎ下の荷重分散モデル⁸⁾

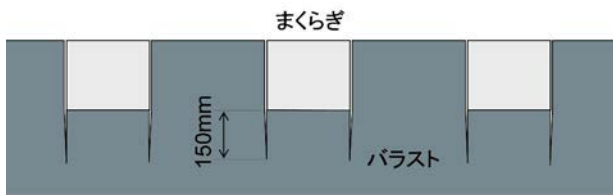


図-12 バラスト内荷重分散モデルの再現

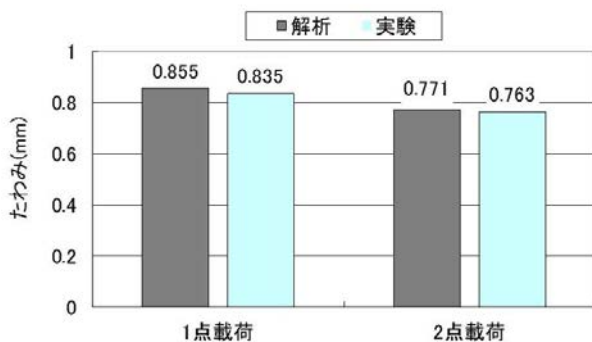


図-13 支間中央たわみの実験と解析の比較

(2) 方法

検討に用いる解析モデルを図-10に示す。解析コードにはAbaqus ver. 6.14-1⁸⁾を使用する。桁、バラスト、まくらぎにはソリッド要素を、鉄筋およびレールには梁要素をレール・まくらぎ間の締結装置には6自由度のバネ要素を用いる。なお、バネ値は

実走行の測定結果から求めている。レールは桁外まで延長し、実験の橋台パラペットにある締結装置の位置で、接地バネにより固定する。複鉄筋版桁はその鉄筋量が多く、その影響を無視できないため、主鉄筋を梁要素としてモデル化し、Embedded要素(梁要素の節点位置がホスト要素の要素座標位置に拘束される)⁸⁾としてコンクリート桁の内部に埋め込んでいる。まくらぎ-バラスト間、バラスト-桁間はAbaqusのTie拘束機能⁸⁾を用いて節点共有と同様に変位が一致する様に接着する。使用材料の特性を表-2に示す。材料特性には一般的なものを使用し、構成則も一般的な等方弾性体としている。バラスト要素のモデル化に際して、まくらぎ下の荷重分散モデルが図-11の様に軌道標準⁹⁾にて提案されているので、この分散形状を再現するために、図-12に示す様にバラスト要素にスリットを設け、まくらぎ下面から150mm下までは荷重分散が起こらない様に配慮する。また、等方弾性体としてモデル化することで、45度で荷重が分散される様にしている。

境界条件と荷重条件は載荷実験に合わせる。境界条件は単純支持条件を支承部の鋼板部に設定する。荷重条件はレールの節点に集中荷重として作用させる。

(3) 解析結果

解析により得られた線路中心における支間中央たわみ(実験での計測位置)について、実験と比較した結果を図-13に示す。両者は概ね一致をしていることがわかる。

荷重分散の分布状況を確認するために、バラスト下面(桁の上面)の圧力分布を図-14に示す。1点載荷では支間中央部に圧力が集まっているが、2点載荷では桁端近傍にまで広く分布していることがわかる。さらに、まくらぎ下面の圧力から各まくらぎが荷重をどの程度分担しているか算出して比較したものを図-15に示す。図-15中にはレール端部の接地バネから算出した反力を「外」の項目の値として合わせて示す。この値はレールを通じて桁外に伝達される荷重であり、桁外にある複数のまくらぎによる荷重分担に対応する。図-15をみると、1点載荷では荷重分散範囲が桁内にとどまるのに対し、2点載荷では桁外まで荷重が分散していることがわかる。このことから、2点載荷ではレールを伝わって荷重が桁外まで分散することでたわみが小さくなり、算出した曲げ剛性が大きくなったことがわかる。また、1点載荷と2点載荷で結果が異なるものの、レールによる荷重分散効果の影響は片側3.75m~5mの範囲である

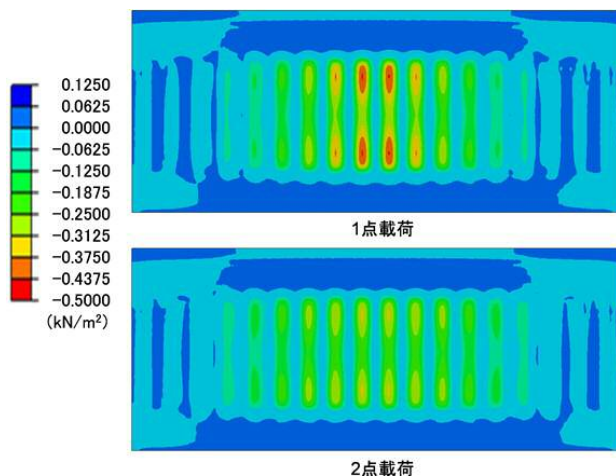


図-14 バラスト下面の圧力分布

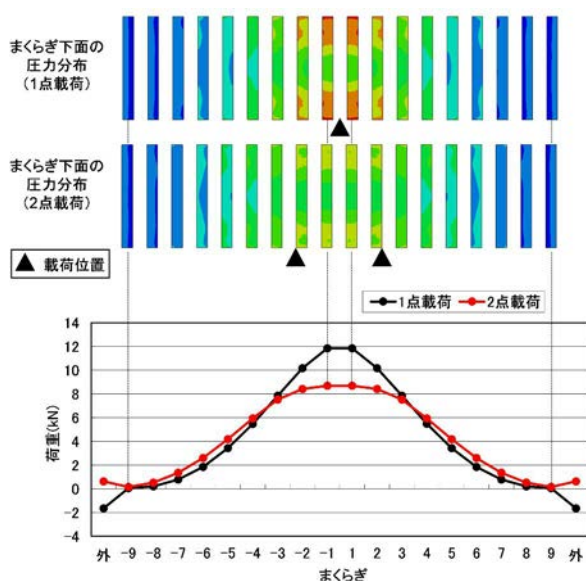


図-15 まくらぎの荷重分担の比較

ことから、桁の支間長が 10 m より短い桁においては、レールによる軌道分散効果により、桁のたわみの減少がより顕著に表れると考えられる。

4. まとめ

実物大の RC 複鉄筋版桁模型を用いた载荷実験および 3 次元 FEM 解析により、軌道構造物による荷重分散効果について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) バラストマット、バラスト、軌道を敷設した各段階において、荷重分散効果により、たわみが減少する。本線同様に軌道構造物を敷設した状態において、荷重分散によるたわみ減少率は、桁のみの状態と比べて、1 点载荷で約 20 %、2 点载荷で約 22 % であった。すなわち、軌道構造物の存

在により桁のたわみは設計値に比べて 2 割ほど小さくなり、これが実測のたわみが設計たわみに比べて小さい要因の一つであると想定される。

- (2) 2 点载荷時は、载荷位置が支点に近づくため、1 点载荷時に比べて約 1 割たわみが小さいが、理論式から曲げ剛性を逆算して比較することで载荷位置の影響を除外すると、本線同様に軌道を敷設した場合を除き、1 点载荷の方が曲げ剛性が大きくなった。これは影響線が最大値となる支間中央部に载荷点があり、荷重分散によるたわみ減少が大きく出たためと考えられる。
- (3) 本線同様に軌道を敷設した場合、逆算した曲げ剛性が 1 点载荷と同等にまで大きくなった。これは、2 点载荷では、レールを通じて列車荷重等が桁外まで分散されるため、1 点载荷よりたわみが小さくなったためと考えられる。1 点载荷と 2 点载荷で差異が生じたことからこの効果は桁の支間長に依存し、支間が短くなるほど影響が大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤雄郷, 大野雄史, 吉田幸司, 西山誠治, 田辺篤史: 複鉄筋版桁鉄道橋の健全度評価のための簡易指標の提案, 構造工学論文集 Vol. 63A, pp. 876-887, 2017.
- 2) 相川明, 名村明, 河野昭子, 浦川文寛: まくらぎ下面圧力とバラスト挙動に関する現場測定法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 8, pp. 23-28, 2008.
- 3) 須江政喜, 奥村悠樹, 堀雄一郎, 小野寺孝行: 理想的なまくらぎ (Ideal-MAKURAGI) の開発, JR EAST Technical Review, No. 48, pp. 61-66, 2014.
- 4) 井上寛美, 奥田広之, 松本信之, 涌井一: ラダー型マクラギの開発と新軌道構造の展開, プレストレストコンクリート技術協会第 5 回シンポジウム論文集, pp. 43-48, 1995.
- 5) 大塚勝, 村本勝巳, 関根悦夫: 鉄道路盤の列車荷重作用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.
- 6) 桶谷栄一, 古川敦: FEM 解析によるバラスト軌道内応力分布モデルの検証, J-Rail2008, pp. 407-410, 2008. 12.
- 7) 河野昭子, 松島亘志: 離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析, 鉄道総研報告, Vol. 28, No. 12, pp. 41-46, 2014.
- 8) Dassault Systems: Abaqus Documentation ver. 6. 14, 2014.
- 9) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説軌道構造, 丸善, 2012.

(2017. 4. 7 受付)

INFLUENCE ON DEFLECTION OF DOUBLE REINFORCED CONCRETE GIRDER BRIDGES BY LOAD DISTRIBUTION EFFECTS DUE TO TRACK STRUCTURES OF BALLAST TRACKS

Yugo ITO, Koji YOSHIDA, Seiji NISHIYAMA, Atsushi TANABE and Mitsuo KAWATANI

Double reinforced concrete (DRC) girder bridges, which are used for the Tokaido Shinkansen crossing over roadways, have large deflection by live load due to its small height. Thus, grasping deflection of the girder bridges is important to maintain it. Field deflection measurement showed that the deflection of actual DRC girders had significantly smaller value than that of its design. Such difference may be caused by several reasons but one of the reasons is seems to be load distribution effects by track structures. The load distribution effects by track structures may be affected complexly by rail, ballast, sleepers, etc. Thus, the effect is evaluated by real scale loading test quantitatively. Then, comparative investigation by using 3D FEA is conducted to grasp load distribution effects by track structures. As a result, track structures reduced about 20% of deflection due to load distribution effects. The load distribution effect of two-point loading were stronger than one-point loading, because load distribution by rails transmit the load to out of the DRC girder bridge specimen.