

既設防音壁の拘束を利用したPC桁の たわみ低減工法の開発



小林 薫*



池野 誠司**



清水 満*

新幹線の速度向上に伴い、既設プレストレストコンクリート桁（以下「PC桁」）のたわみ低減対策として、既設防音壁の拘束を利用した工法の開発を行った。既設防音壁は一定間隔で目地が設けられており、列車荷重載荷時には防音壁に応力が伝達しない構造となっているが、本工法は防音壁目地部の変形を拘束することで、桁と一体として挙動させ、曲げ剛性を増加させる構造を実現した。本工法の開発では、模型試験体での載荷実験、実大模型による鋼製部材取り付け時の樹脂注入実験、貫通ボルト周辺への確実な樹脂充填を可能にする有孔ボルト注工法の開発を行った。本工法は3連のPC桁に適用され、現行営業列車通過時の桁中央部のたわみ量が、対策前と比較し約1/2程度に低減した。

●キーワード：新幹線高速化、たわみ、PC 桁、防音壁、剛性増加

1. はじめに

新幹線の土木構造物は、設計最高速度を260km/hとして設計されている。新幹線の速度向上に関しては、高速化予定区間の約17,500連のコンクリート桁について、列車走行に伴う構造物の動的挙動を再現する解析シミュレーションなどから運転速度向上時の影響検討を行った。その結果、3連のPC桁において、最高速度が300km/hを超える場合に、現行の鉄道構造物設計標準（コンクリート構造）¹⁾に規定されている乗り心地から定まるたわみの基準値を満足しない結果となった。

上記の問題に対応するため、既設防音壁の拘束を利用したPC桁のたわみ低減工法を開発した。既設防音壁は、場所打ちのRC構造で、コンクリート打設後の収縮に伴うひび割れ防止のため、一定間隔に構造目地が設けられ、桁のたわみ低減に寄与しないように施工されている。既設防音壁によっては、品質に不安があるものや経年で劣化が生じはじめている場合もある。PC桁の付属設備である既設防音壁をたわみ低減に利用する場合は、慎重な対応が必要になると考えられる。

以上の状況を踏まえ、本工法の開発では、既設防音壁の補強効果を模型試験体での載荷実験およびFEM解析で検討を行った。対策対象PC桁1連で、試験施工を行い効果を確認すると同時に、試験施工から約1年間、点検、を実施し、既設防音壁に問題がないことを確認した。残り2連の既設PC桁の対策も2010年度に完了した。

本報告は、既設防音壁の拘束を利用したPC桁のたわみ低減工法の開発概要を述べる。

2. 既設防音壁の拘束を利用したたわみ低減工法の概要

列車通過時の桁のたわみを低減させる方法としては、下記の①～③に示すように、数種類の方法が考えられる。

- ① 桁の曲げ剛性を増加させるため、後から付加的な部材を増設する方法
- ② 桁の固有周期と同調した付加マス設置によるダンパー効果を利用した方法
- ③ 桁のたわみとともに応力的に問題となる場合では、鋼板圧着工法や外ケーブルによるプレストレス導入を行う補強工法と併用する方法

本PC桁でのたわみ低減方法としては、桁の曲げ剛性を向上させる方法を選定した。その理由として、桁の応力や耐力的な問題は事前検討で問題がないこと、付加マスの設置スペースがないこと、列車速度の向上に伴うたわみ量を増加しないこと、列車速度の向上に伴うたわみ量を増加しないこと、列車速度の向上に伴うたわみ量を増加しないことから、現実的な対応が可能であるためである。

桁の曲げ剛性を向上させる方法としては、主桁に準じた付加部材の増設が考えられるが、本PC桁の主桁間隔が狭く、設置工事の困難さが予想された。

ここで、本PC桁には現場でコンクリート打設されたRC構造の防音壁が設置されていることに着目し、これを活用する方法を検討した。

RC構造の既設防音壁は、一定間隔で構造目地が設けられており、列車荷重載荷時には防音壁に応力が伝達しない構造となっている。そこで、列車載荷時に既設防音壁の目地部の変形を拘束するように、高強度のモルタル材料を充

填する。モルタル材料の充填によって、既設防音壁の目地部の変形が拘束され、既設防音壁が抵抗部材となり、桁の剛性増加に寄与することになる。図1に、対策対象PC桁の橋梁一般図を示す。本PC桁は、地域道路と斜角で交差することから、上下線別の単線構造（4主桁）となっている。また、桁のスパン21.2mに対し桁高は1mに抑えられており、一般的なPC桁と比較してスパンに対する桁高の比が小さいものとなっている。

3. 既設防音壁の拘束効果に関する検討概要

3.1 模型試験体での载荷実験

本工法は、既設防音壁の目地部に高強度モルタルを充填し、目地部の変形を拘束する。目地部の変形が拘束されることで、既設防音壁が桁の曲げ剛性に寄与することになる。

目地部の拘束を行った既設防音壁が、桁の曲げ剛性向上への効果、終局状態での破壊挙動を確認するため、模型試験体による载荷実験を行った。以下、実験概要を述べる。

(1) 試験体概要

図2に、試験体の略図を示す。試験体は、試験装置の制約もあり、スパン3000mmとした。桁はRC構造とし、RC

桁上に既設防音壁を模擬した壁状のRC部材を設置した。既設防音壁を模擬した部材は、本工法適用対象PC桁と壁厚を同一にし、高さは600mmと実橋防音壁の1/3程度にした。防音壁に配置されている鉄筋は、模型試験体の方が実物の概ね1/2と少なく配置した。既設防音壁を模擬した部材の中央には、目地部となるスリットを設けた。

試験体の製作は、RC桁を製作後、防音壁のコンクリートを打設した。所定の養生後、スリット部に型枠をセットし、高強度モルタルを充填した。高強度モルタル充填時は、防音壁のコンクリートへモルタル中の水が吸水されるドライアウトを防止するため、モルタル充填前に十分な給水を行った。

(2) 载荷試験の概要

図3に、载荷状況を示す。試験体への载荷は、防音壁を跨ぐような载荷治具を製作し、RC桁に荷重が载荷されるようにした。载荷点位置は、防音壁の目地部を挟むようし、曲げ応力が目地部で卓越するようにした。

(3) 実験結果

実験結果として、载荷点位置での荷重と変位の関係を図4に示す。図5に、破壊状態を示す。破壊状況は、防音壁部上縁の圧壊に伴う曲げ破壊となった。

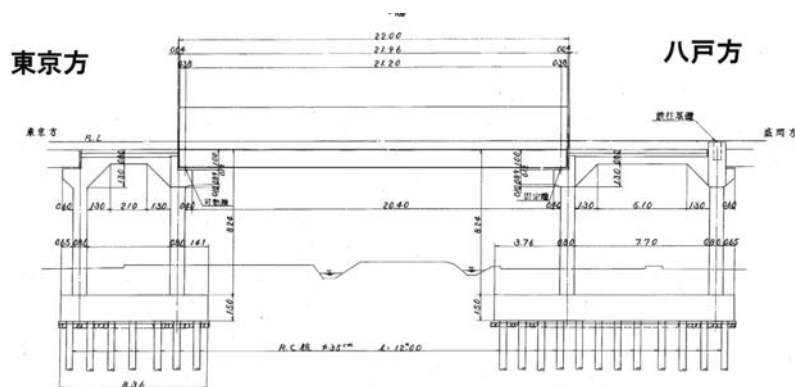


図1 対策対象PC桁の橋梁一般図



図3 模型試験体の载荷状況

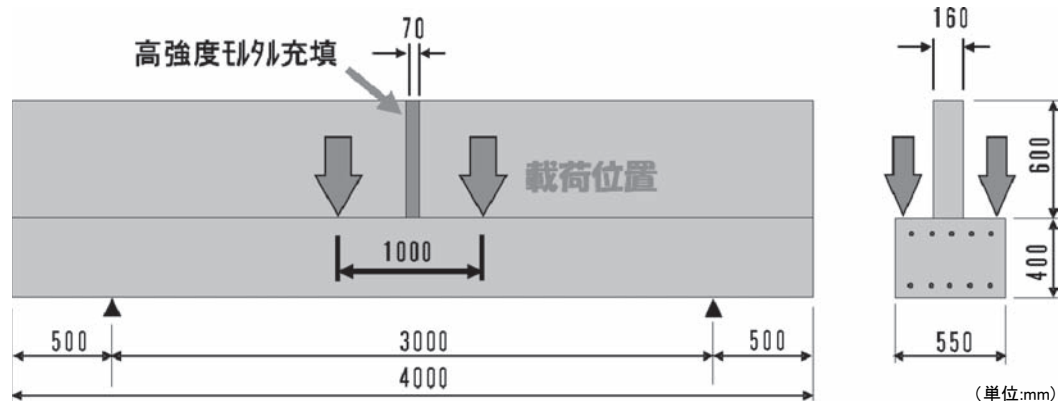


図2 模型試験体略図

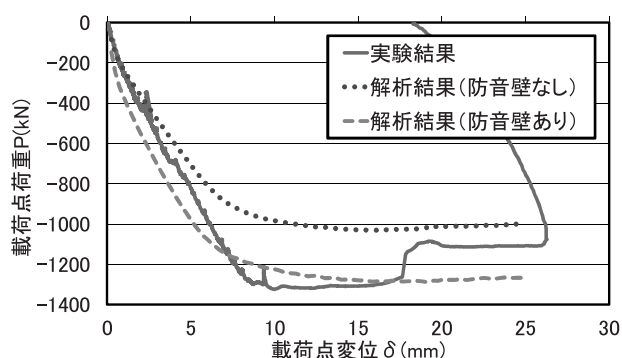


図4 実験結果

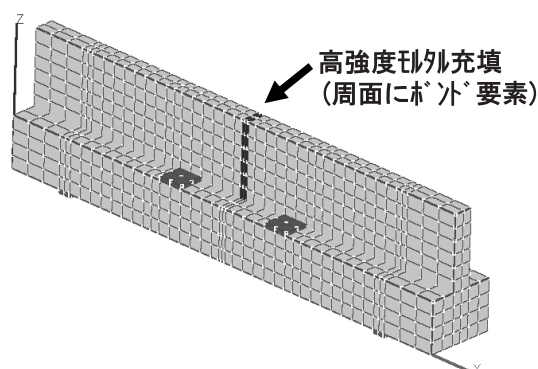


図6 解析モデル

3.2 模型試験体の実験結果の解析的検討

模型試験体の実験結果を3次元非線形有限要素法で検討を行った。試験体は、RC桁上に防音壁が取り付けられ、中央部のスリットにはモルタルが充填されている。充填モルタルは、防音壁コンクリートと界面を有している。このため、全体挙動を適切に評価するためには、構造全体系をモデル化する必要があると考えられることから、3次元非線形有限要素法を用いることにした。

解析に適用した構成則は、東京大学コンクリート研究室で開発された任意の荷重経路依存性を考慮した材料構成モデルに基づくRC平面モデル²⁾を3次元に拡張したものである。本解析手法には、多くの適用例があるが、代表例としては常時偏心軸力を受けるRC柱の交番荷重実験での検証事例³⁾などがあげられる。

図6に、検討に用いた解析モデルを示す。充填モルタル周辺には、ボンド要素を配置し、充填モルタル界面に引張応力が発生した場合、充填モルタルへの応力が伝達しないようにした。解析結果を図4中に示した。図4中において、防音壁を考慮した解析結果が実験結果のシミュレーション結果である。解析結果は、実験結果より剛性を若干大きく

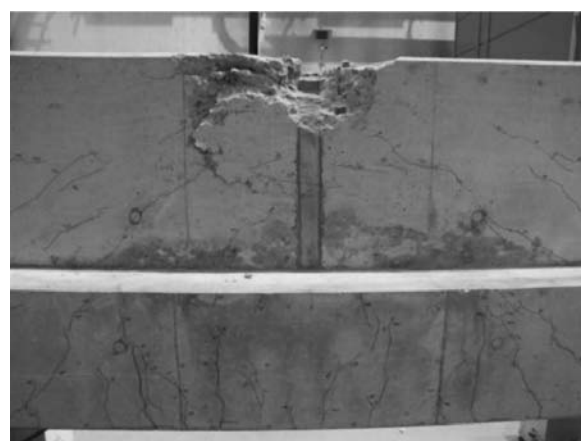


図5 破壊状況

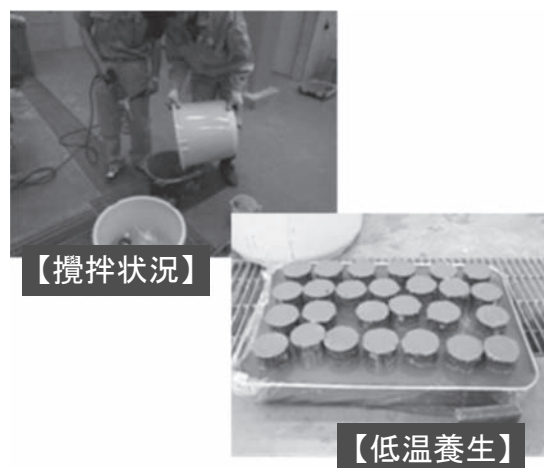


図7 無収縮モルタル試験体作製状況

ているが、最大荷重に関しては適切に評価している。図4中には、防音壁がない場合の解析結果も表示している。図4中の解析結果から、防音壁が曲げ剛性に寄与することがわかる。

4. 試験施工時の検討概要

4.1 施工ステップごとの検討概要

(1) 防音壁目地部モルタル充填時の検討

施工対象PC桁は、新幹線の営業区間である。このため、施工は、夜間の保守作業間合いでの実施となる。事前準備として、既設防音壁の配筋状況を非破壊検査機器などで確認後、ウォールソーイング工法により防音壁の目地部を切断し、鋼板型枠を設置後、事前に強度発現時間を確認済みの無収縮モルタルの打設を行った。

特に、使用するモルタル材料の強度発現特性については、注意が必要である。本工法の試験施工時の検討では、モルタル充填時の外気温などの環境条件を考慮した材料試験を実施した。

モルタルの材料試験では、5種類の無収縮モルタル材料に

ついて、材料ごとに指定されている時間で攪拌したのち、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体を作製した。養生条件は施工時期の現場の気温を想定し、供試体はモールド缶ごと水で冷やした冷水（水温 $10 \sim 15^\circ \text{C}$ ）の中に入れて行った。圧縮強度試験は打設後30分ごとに行い、経時変化を記録した。実験結果を図8に示す。

材料選定にあたっては、試験施工区間の列車間合を考慮し（モルタル打設終了予定＝午前1時30分、下り初列車通過＝午前7時30分頃）、打設後6時間で所要強度（ 24N/mm^2 ）に達する材料とした。

(2) 鋼製部材設置時の検討

鋼製部材の設置は、モルタル充填後に施工される。鋼製部材は、コの字形状となっており、防音壁上端からかぶせるようにして設置する。鋼製部材の目的は、充填モルタル界面部からの雨水の侵入を防止し、耐久性を確保することである。鋼製部材も防音壁の曲げ剛性増加に寄与させるような構造にすると、防音壁での負担応力が過大となる可能性があり、応力ひび割れの発生要因となる。このため、鋼製部材での曲げ剛性増加はできるだけ小さくなる構造とした。

鋼製部材の施工は、保守作業間合い時間で実施した。また鋼製部材の設置範囲は、列車荷重載荷時の曲げモーメント分布を考慮し、桁中央15m区間とした（図9）。

鋼製部材の取り付け方法は、ボルトで鋼製部材と防音壁を貫通して固定する方法とした。貫通ボルト周辺、および鋼製部材周辺の空隙には、樹脂注入を行う。

鋼製部材はコの字型となっているため、樹脂充填時、隅角部に空気たまりができ、充填不良となりやすい。確実な充填を行うためには、適切な空気抜きの配置が重要となる。また、鋼製部材を防音壁に架設後、樹脂注入作業に要する時間は1回の保守作業時間では終了しない。このため、鋼製部材内に間仕切り用の合成ゴム材料のバックアップ材を配置し、その構造、性能を確認するため、実物大の試験体を製作し、注入試験を行い、現場における施工方法を確立した。図10に、鋼製部材周辺部空隙の樹脂注入時の注入ホース、空気抜きホースの配置を示す。

4.2 有孔ボルト注入工法の開発

貫通ボルト周辺への空隙にも樹脂注入を行う。一般的な貫通ボルト周辺への樹脂注入の方法は、貫通ボルトを設置後、樹脂注入用注入パイプ、空気抜きパイプをセットして行う。貫通ボルト1本1本この方法で樹脂注入を行うことは、樹脂充填に時間がかかるため、夜間の短時間の作業時間帯で、多くの貫通ボルト周辺への樹脂注入を行うには合理的な方法ではない。

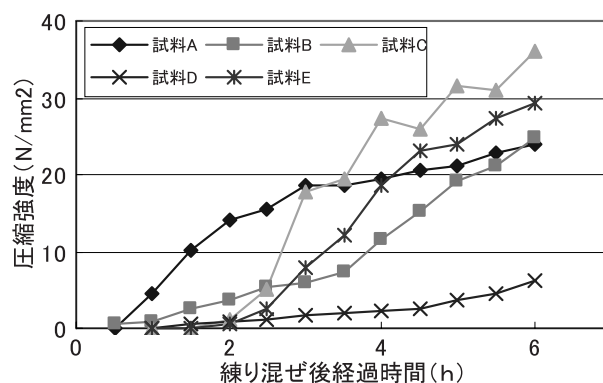


図8 無収縮モルタル強度発現試験結果

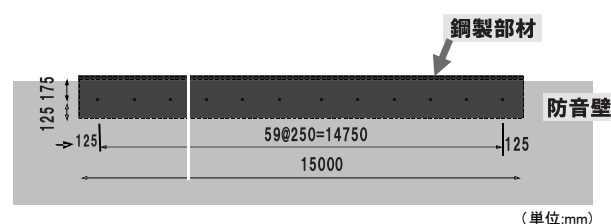


図9 鋼製部材の設置範囲

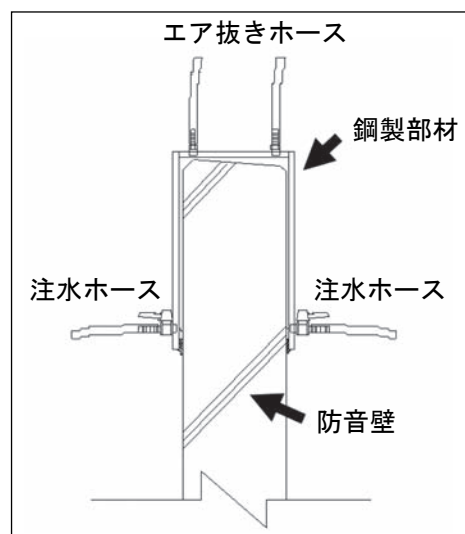


図10 鋼製部材の注入ホース、空気抜きホースの配置

貫通ボルト周辺への樹脂注入を合理的に行うため、有孔ボルト注入工法を開発し、実施工に適用した。図11に、有孔ボルト注入工法の概要を示す。

有孔ボルト注入工法は、貫通ボルトに樹脂注入用の削孔を施しておき、そのボルトをセットすることで、樹脂注入の準備が完了するようにした。樹脂注入機能付きボルトの樹脂の吐出は、貫通ボルトの中央付近の下側からでる。吐出された樹脂は、樹脂材の粘性により同心円状に広がり、空隙部を充填していき、ワッシャー部に設けられた空気抜きから出てくる。空気抜きからの樹脂の漏出を確認することで、樹脂充填の確認ができ、施工管理にも使用できる。

5. 施工後のたわみ計測結果

(1) 現行営業車両走行時のたわみ量計測結果

施工実施前後の新幹線営業列車通過時の桁中央部の最大たわみ量について、計測データをプロットしたものを図12に示す。このように、本施工の結果、桁のたわみ量が施工前と比較し約1/2程度に低減されたことを確認できた。また、防音壁目地部にモルタル充填し、約1年2か月の点検からも問題が無いことを確認した。

(2) 実曲げ剛性の測定結果

施工前後のPC桁の実曲げ剛性を把握するため、衝撃振動試験を行い、PC桁の固有振動数の実測値から実曲げ剛性を検討した。各施工段階での衝撃振動試験結果から固有振動数の推移を図13に示す。なお、実測固有振動数から実曲げ剛性の算定は、ベルヌーイオイラー梁の公式を適用して行った。

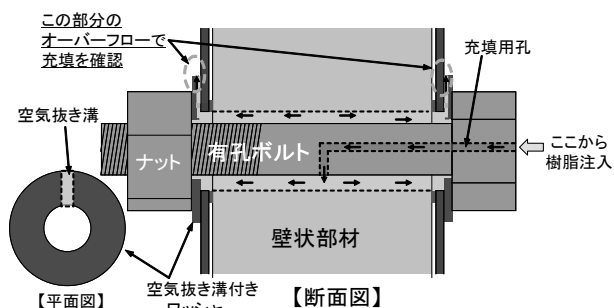


図11 有孔ボルト注入工法の概要

6. 列車速度とPC桁たわみ量の解析結果

本工法施工後の列車走行速度とPC桁たわみ量について、走行列車モデルと当該PC桁の実測曲げ剛性を用いた列車走行解析から検討を行った。検討結果を以下に述べる。

(1) 解析手法の概要⁴⁾

図14に、解析手法の概要を示す。列車走行解析は、走行車両を表現する力学系モデルと構造物を表現する力学系モデルそれぞれをサブストラクチャーとし、両力学モデルは結合節点で変形・力がそれぞれの力学モデルに伝達され、それぞれの力学モデルが変形・力の適合条件を満足するように逐次計算を行うものである。

列車の走行は、両力学モデルを結びつける結合節点が解析開始から時事刻々と変化することで、列車が設定スピードで走行した条件を再現する。

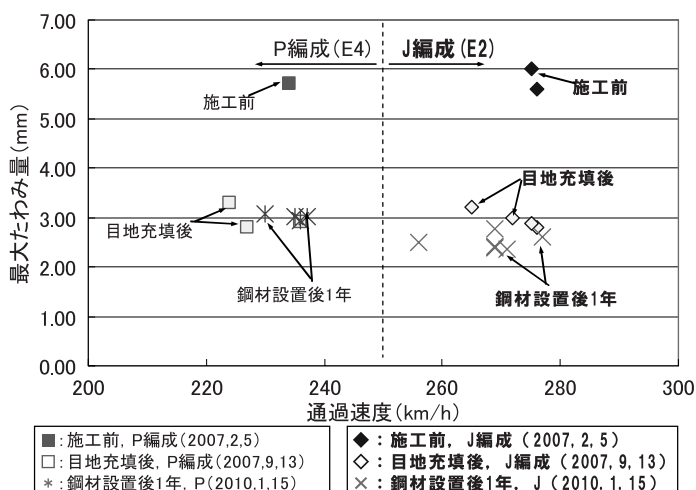


図12 新幹線営業車両でのたわみ計測結果

衝撃振動試験	スペクトル図 (桁中央打撃及び計測)	固有振動数(1次モード)
施工前		4.5 (換算EI=2.40×10 ⁷ kN・m ²)
目地充填後		5.5 (換算EI=3.59×10 ⁷ kN・m ²)
鋼材設置後		5.6 (換算EI=3.75×10 ⁷ kN・m ²)

図13 衝撃振動試験による固有振動数の推移

(2) 列車モデルの概要

図15に、走行車両の力学モデル（以下「列車モデル」という）の概要を示す。列車モデルには、車体と台車そして車軸をモデル化した節点および梁要素と、車体と台車間、台車と車軸間の振動特性と減衰特性をそれぞれモデル化したバネ要素、ダンパー要素を配置した。また、各車両間は上下方向のバネ要素、ダンパー要素で結び、車両間の連結条件も考慮した。

(3) 解析手法の概要

数値解析法としては、ニューマークの β 法を適用し、解析刻みは0.005秒とした。構造物の減衰特性は、減衰定数を2%とし、剛性比例型減衰を考慮した。

(4) 解析結果

本工法対策後の解析結果を図16に示す。列車速度が360km/hまでは乗り心地から定まるたわみの基準値以下のたわみ量となることを確認した。

7. まとめ

新幹線の数値向上に向けて、コンクリート桁の動特性を考慮した事前検討の結果、3連のPC桁で乗り心地を確保するための対策が必要になった。本対策のため、既設防音壁の拘束を利用したたわみ低減工法の開発を行った。

本工法の効果、開発において検討事項のまとめを以下に記述する。

- (1) 模型試験体での載荷実験、3次元非線形有限要素法での解析結果から、既設防音壁を桁の曲げ剛性増加に利用することは可能である。
- (2) 既設防音壁目地部に充填するモルタルは、保守作業時間内で強度発現が必要になるので、施工条件に応じた材料選定を行う必要がある。
- (3) 鋼製部材周辺部の空隙への樹脂充填は、適切な個所に空気抜きを設置する必要がある。
- (4) 貫通ボルト周辺の空隙への樹脂充填を確実にを行うため、有孔ボルト注入工法を開発した。
- (5) 本工法の施工によって、列車走行時のたわみを約50%低減可能となった。実桁の曲げ剛性を用いた列車走行解析から、列車速度が360km/h時においても乗り心地の基準値以下のたわみとなることを確認した。

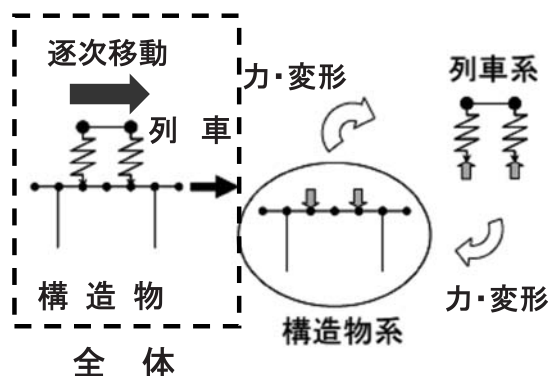


図14 列車走行解析の解析概要

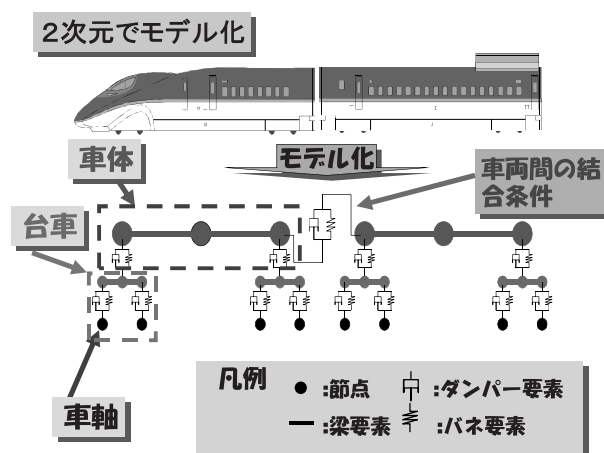


図15 列車モデルの概要

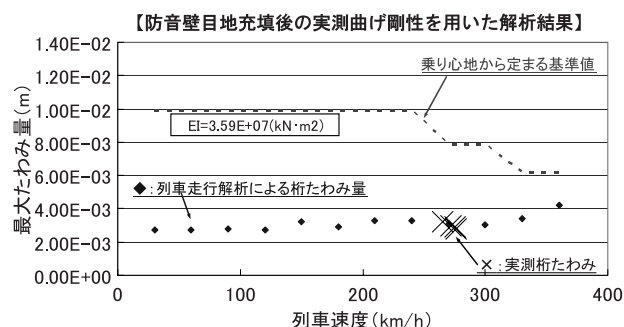


図16 防音壁目地充填後の実測曲げ剛性を用いた列車走行解析結果

参考文献

- 1) 財団法人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、pp68,平成16.4
- 2) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991.5
- 3) 土屋智、津野和宏、前川宏一：常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合載荷したRC柱の非線形三次元有限要素立体解析、土木学会論文集、No.683、V-52、pp.131-143、2001.8
- 4) 金田淳、小林薫：高速列車走行時におけるコンクリート桁の動的挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No2、pp31-36、2006