

長大鉄道橋における混合構造適用の検討

1. はじめに

混合構造とは、【異種材料の断面からなる部材を組み合わせた構造形式】で、橋梁であれば鋼（主に合成）部材とコンクリート（主に PC）部材を直列（橋軸方向）に連結した構造である。道路橋においては、長大な複合斜張橋の他、中央径間に比べて側径間が短い（支間バランスが悪い）一般的な連続桁橋に適用されているが、鉄道橋での適用実績はない。

鉄道橋においても、交差条件、地形条件等の影響で側径間長が短い連続桁が有り、さまざまな対応を行っている。その様な箇所へ混合構造を適用することで諸問題を解決できると考え、鉄道橋への混合構造の適用を目指し課題の解決を図った。

2. 検証モデル

連続合成桁の A 橋（写真－1）は、高速道路を斜めに越えるため、110m の中央支間長が必要であったが、地形条件の関係で側径間を短くせざるをえなかった（図－1）。側径間が短い連続合成桁の問題点を以下に示す。

- ① 中央径間の重量が重く、側径間の重量が軽くなるため、端支点部に浮上りが生じやすいため、カウンターウェイト（設計上考慮しない“おもり”）が必要となる。
- ② 側径間の重量を増やすため、不経済な鋼断面（鋼重量増える）となる。

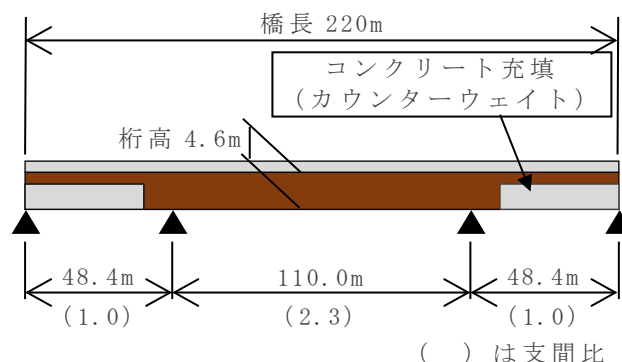
その問題点を解消するため、側径間を PC 桁とした混合構造（B 橋）とすることで、材料を有効活用しながら、重量を確保することで浮き上がりを防止できると考えた（図－2）。

また、単純構造に比べ同支間長を有する連続構造はたわみ量が小さくなる。さらに、側径間が短い場合、側径間のたわみ量を小さくできる（図－3）。それにより、軌道整備基準値を守りやすくなり、端支点部の折れ角を抑えることが出来るため、列車走行性能が向上する構造が可能となると考えた。

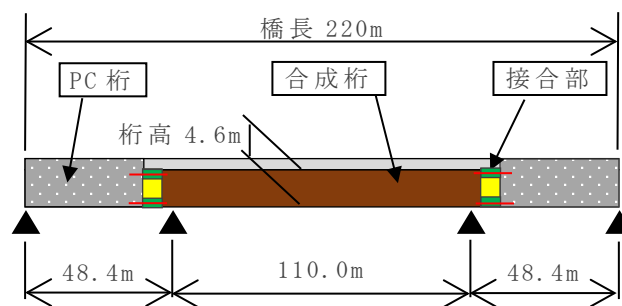
B 橋の鋼とコンクリートの接合部は鋼殻セルの内部の中詰めコンクリートと PC 桁のコンク



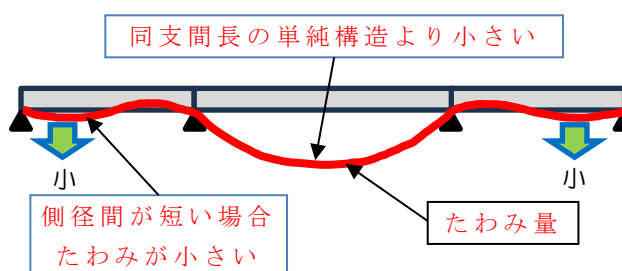
写真－1 A 橋（3径間連続合成桁）



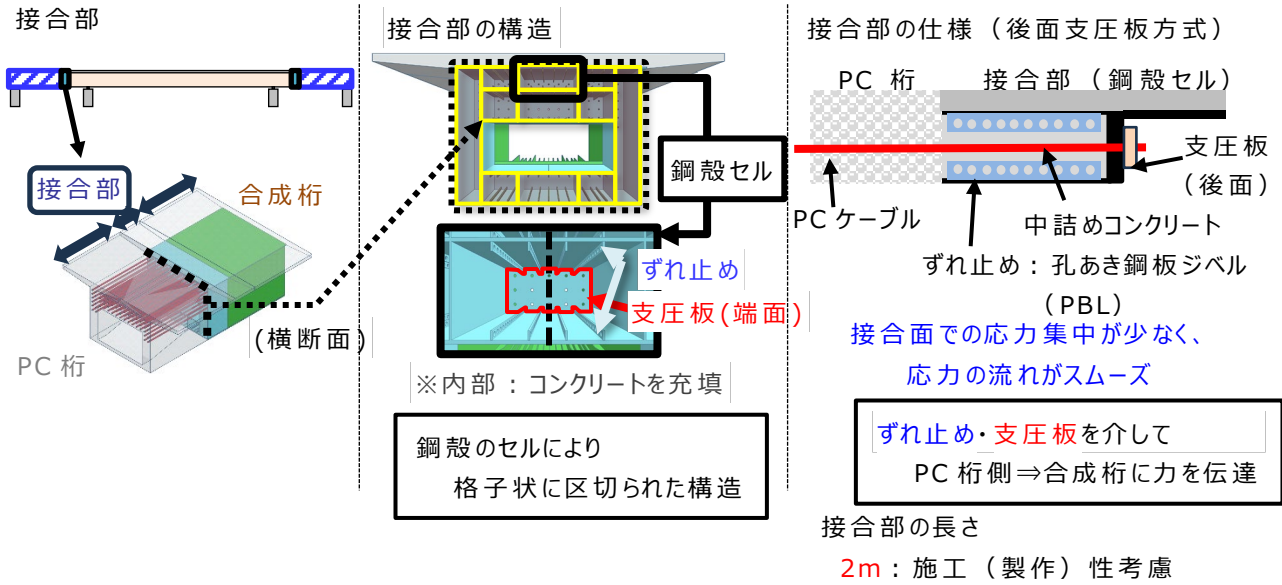
図－1 実橋（3径間連続合成桁）: A 橋



図－2 試設計（3径間連続混合桁）: B 橋



図－3 連続桁のたわみ量のイメージ



図－4 接合部の仕様と応力伝達の考え方

リートが一体化でき、接合面での応力集中が少なく、スムーズな応力の流れとなる後面支圧板方式（図－4）が良いとした。

鉄道橋では、混合構造の適用実績が無いため、定められた設計手法が無い。そのため B 橋の試設計による検証を進め、A 橋との比較を行いながら、適用に向けた解決すべき技術的課題を検証した。

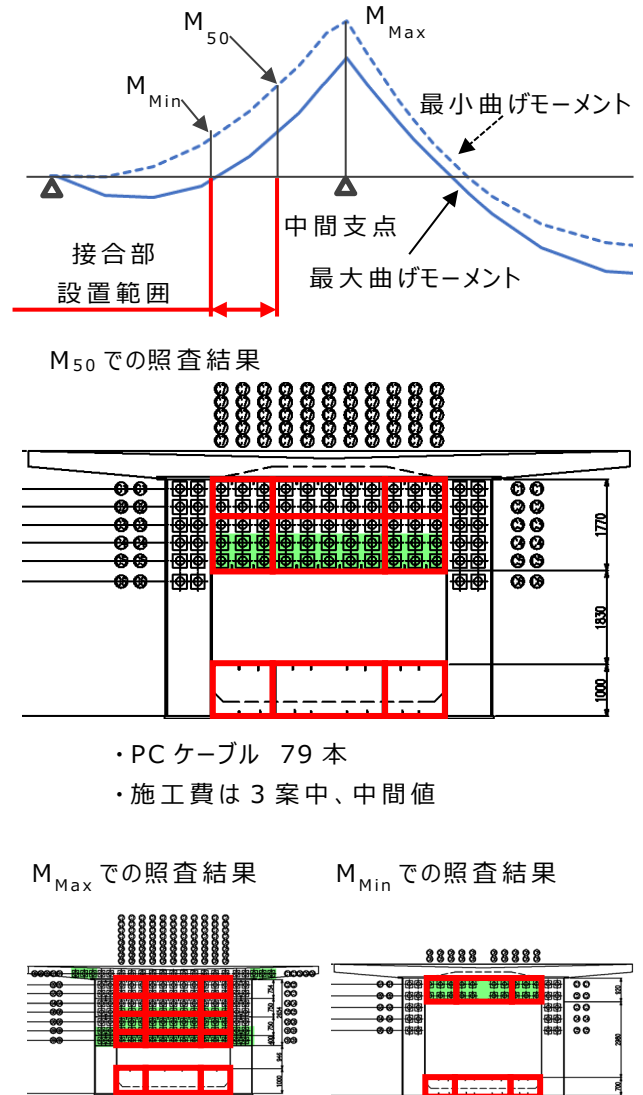
3. 課題に対する検証

3-1 接合部の位置

側径間部の PC 桁の範囲（接合部の位置）は、カウンターウェイトとしての役割、施工性、経済性等に影響するため、接合部位置をパラメータとして B 橋の試算を実施した（図－4）。なお PC ケーブルは、圧縮残しを前提として本数を定めています。

M_{Max} の場合は断面力が大きすぎて PC ケーブルが 126 本となり、設計上は成立したが施工は不可能である。 M_{50} は PC ケーブルが 79 本、 M_{Min} は 40 本で施工は可能であった。経済性を確認すると M_{Min} が合成桁（A 橋）に比べ安いもの、混合桁では最も経済性が劣る結果となった。これは、PC 桁が鋼桁に比べ単価が安いため PC を伸ばせば伸ばすほど経済性が上がるためである。

検討の結果、接合部の曲げモーメントに応じて接合部に定着する PC ケーブルの本数が定まるため、曲げモーメントが大きい中間支点部に近接して接合部を設けることが難しい。一方、



図－5 接合部位置の検討

PC 桁範囲が短いと経済性に劣るため、接合部位置は、中間支点部の曲げモーメントの 50%位置から、荷重状態によらず常に上側引張となる範囲が望ましいとした。

3-2 接合部の応力伝達と設計手法

接合部に用いた後面支圧板方式は、鋼殻セル内に設けたずれ止めと支圧板にて応力伝達を図るが、鉄道橋での仕様や設計手法が明確となっていないため、試設計や FEM 解析を実施し、設計手法を検証した（図-4）。接合部の長さは、鋼殻セルの施工（溶接）が可能な 2m を標準としている。

試設計では道路橋での事例を参考に、接合部位置の断面力が偶力換算できると仮定し、応力伝達を行うずれ止めと支圧板の分担比（仮定値：ずれ止め 0.35：支圧板 0.65）を用いて設計し、FEM 解析を用いて検証した。結果、偶力換算の仮定は問題ないことは確認できたが、鋼殻セル毎に分担比がばらつくことが確認できた（図-6）。これは、支圧板の面積が大きくなるにつれて、支圧板の軸力分担力が大きくなり、ずれ止めの軸力分担力が小さくなりやすいためと考えられる。そのため、鋼殻セル面積を小さくすることが望ましいが、施工性（製作性含む）が劣るため、それらを考慮し支圧板の剛性を確保することが重要と考える。

なお、分担比は想定と異なるものの、FEM 解析にて確認できた伝達力は、設計で想定した力より小さく、一定の妥当性は確認したものの、詳細設計に対しての十分な精度は確認されていない。そのため、実設計においては、本設計手法（偶力換算、仮定の分担比）で接合部断面やずれ止め、支圧板等の寸法等を決定し、FEM 解析によって照査を行うのがよいと考えられる。

3-3 衝撃係数の算定方法

鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物（以下、〇〇構造物の設計標準は「〇〇標準」と示す）で設計される鋼桁とコンクリート標準で設計される PC 桁では、列車走行による動的応答の倍率を示す衝撃係数の算定方法が異なっており、混合構造ではどちらの方法を用いるべきか定まっていない。そのため、走行シミュレーションにより列車走行性能の検証を行った上で、混合構造の設計衝撃係数の算定方法を検証した。

なお、列車走行性能の検証は、乗り心地については台車直上の鉛直加速度、常時の走行安全

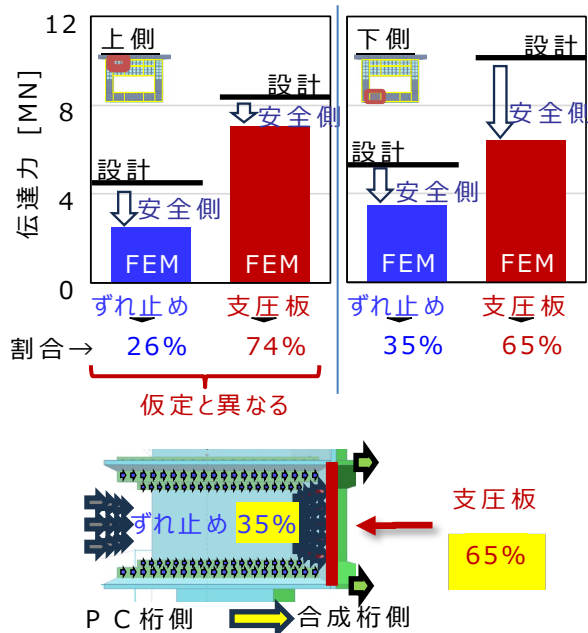
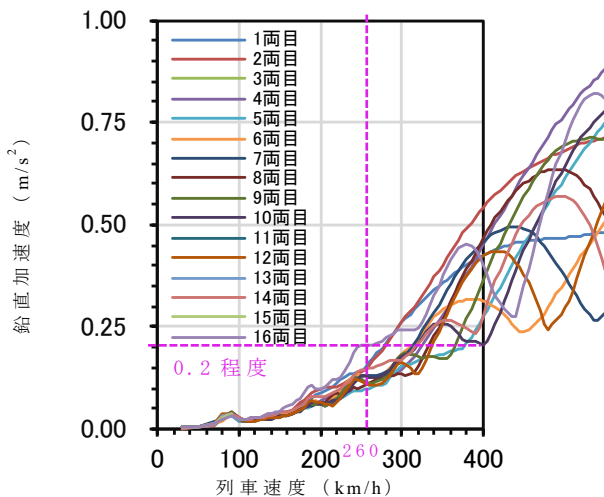


図-6 応力伝達の分担比（解析結果）

A 橋：合成桁 固有振動数 $f=0.956\text{Hz}$



B 橋：混合桁 固有振動数 $f=1.070\text{Hz}$

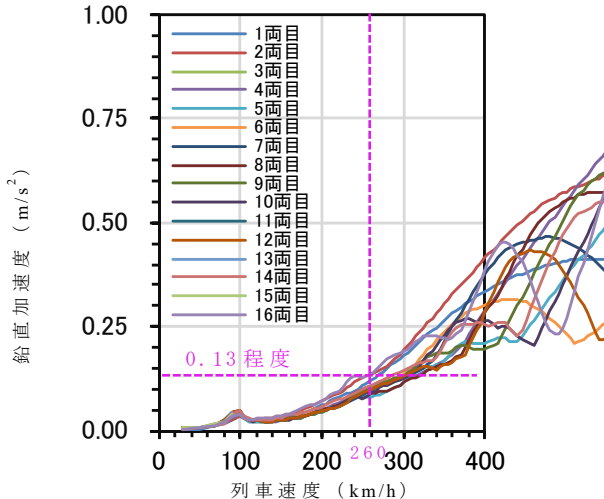
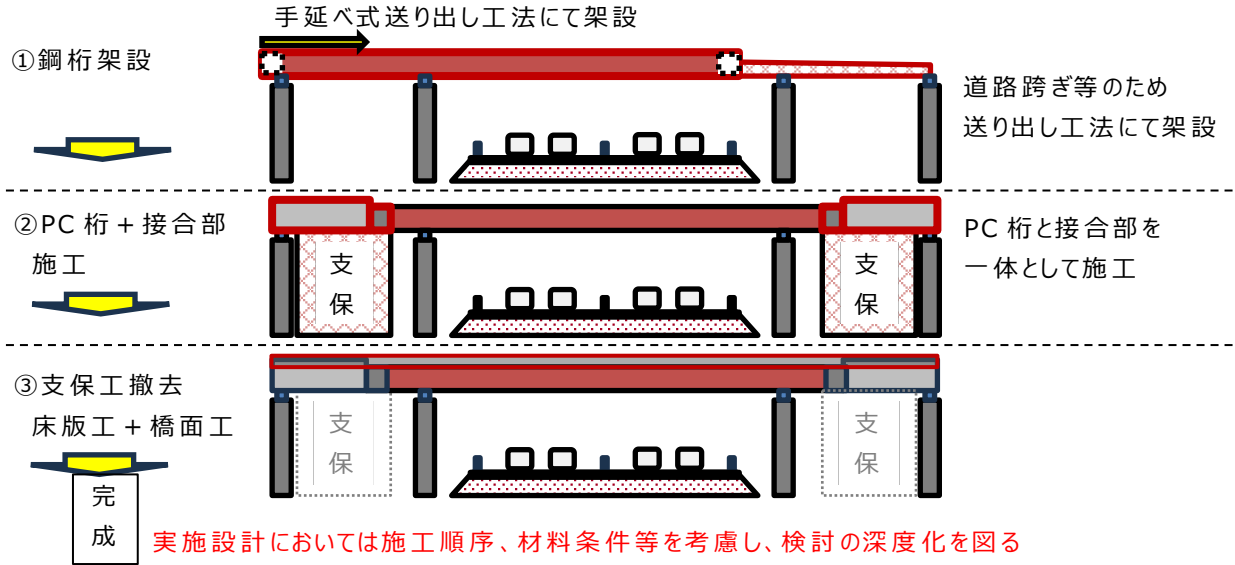
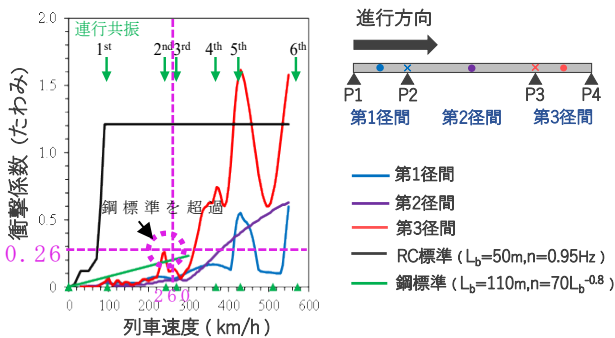


図-7 走行シミュレーション結果
（車体の鉛直加速度）

施工ステップ



図－9 接合部での応力伝達の考え方



図－8 走行シミュレーション結果による
衝撃係数（たわみ結果より）

性については全車輪の輪重変動率を評価指標とした。台車直上の鉛直加速度は、列車速度 260km/h における鉛直加速度は、合成桁で 0.20 程度、混合桁で 0.13 程度であることから、制限値 2.0 に対して十分に小さいことを確認し、混合構造の方が乗り心地のよい構造であった。これは、合成桁の固有振動数 (0.956Hz) 比べ混合桁の固有振動数 (1.07Hz) 大きくなったためである。輪重変動率の結果においても合成桁で 0.016 程度、混合桁で 0.015 程度であることから、制限値 0.185 に対して十分に小さいことが確認できた。これらの結果により、混合構造化を図った方が、列車走行性能が向上することが分かった。

たわみ量より算出した B 橋の衝撃係数 (図－8) に着目すると、時速 300km/h 以下の範囲では、第 1、2 径間は鋼標準に基づく算定値以下に収まった。しかし、第 3 径間は 2 次共振領域

(239km/h 付近) でその値を上回った。その値は、コンクリート標準に基づく算定値を下回っているため、本橋の場合、コンクリート標準に基づく衝撃係数を用いれば設計上安全側となるが、実績もなく、構造物の条件によっても値が異なるため、実設計においては、走行シミュレーションにて衝撃係数を検証することが望ましいと考える。

4. おわりに

本検討においては、以下について確認することが出来た。

- ・ 解決すべき課題を検証し、鉄道橋において長大支間の混合構造が適用可能と判断する。なお、設計計算及び照査においては、FEM 解析、走行シミュレーションを併用することが良い。
- ・ 混合構造を用いることで、側径間が短い連続桁が採用可となり、列車走行性能向上が図れる。

今回の検討は、図－9 の施工ステップを想定して実施したが、適用性の検討であったため、コンクリートのクリープの影響の様な詳細な施工情報は検討に加えられていない。混合構造は、鋼とコンクリートをつなぐ構造であるため、各々の材料特性や施工性を考慮した設計が必要と考える。今後、実設計にあたって、施工順序等を考慮した検討の深度化を図り、適用したいと考える。