

論文 共振 PRC 桁の支点追加補強時における動的応答評価

松岡 弘大*1・徳永 宗正*2・築嶋 大輔*3・後藤 恵一*4

要旨: 一部の高速鉄道用 PRC 桁における共振時の大振幅振動低減を目的に支点追加による補強が検討されている。支点追加は他補強法に比べれば簡便であるが、追加位置や支持剛性で効果が異なるうえ、桁の動特性や曲げモーメント分布が大幅に変化する。本研究では共振 PRC 桁を対象に、現有性能の推計を行ったうえで、支点追加補強時の動的応答評価を行った。その結果、追加支点の支持剛性が既存支点の半分程度確保できれば、既存支点から 2m 以上の位置への支点追加で、最大変位を無補強時の半分以下まで低減できること、支点追加位置 1m の場合は既存支点で生じる負反力の制限を満たさない場合があることを明らかにした。

キーワード: 共振現象, PRC 桁, 補強設計, 支点追加, 高速鉄道

1. はじめに

鉄道橋の共振現象は、列車の規則的な軸配置による加振周期と、鉄道橋の固有振動数が近接することで発生する¹⁾。これらは「連行移動荷重による速度効果」と呼ばれ、多くの検討のもと衝撃係数として設計でも考慮されている²⁾。しかし、列車の高速化や PRC 構造(使用状態でのひび割れ発生を許容した PC 構造)による低剛性桁の普及などにより³⁾、その後の供用において一部の低剛性な PRC 桁で共振により衝撃係数が 1.5 を超えるような大振幅振動の発生が報告されている⁴⁾。また、特に大きな振動を有する桁ではたわみ抑制のための大規模な補強の導入も必要となっている⁵⁾。

共振した PRC 桁の補強手法はすでいくつか提案され、その効果検証も実証的に進められている⁶⁾。中でも、支点追加によるたわみ抑制手法は他手法と比較して簡便であり、応急処置も含めて今後も汎用的に導入される可能性が高い⁶⁾。一方で、道路が横切るなど桁下空間の使用が制限される場合、補強効果に大きく影響を及ぼす追加支点の位置や鉛直支持剛性(以下、単に支持剛性と呼ぶ)の確保に大きな制約を受ける。追加支点が既存支点の近傍にしか設置できない場合、十分な補強効果が得られない可能性も高い⁶⁾。また、追加支点の導入により、桁のモード形状などの動的応答特性が大きく変化するため、既存支点での負反力や桁での負曲げモーメントの発生なども危惧される。

以上を踏まえ、本研究では支点追加補強の導入が想定される共振が生じた PRC 桁を対象とし、実測結果に基づく現有性能の推定を行うとともに、推定した諸元を有する数値解析モデルを用いて支点追加位置および支持剛性と補強効果の関係、および既存支点の負反力や桁の負曲げモーメントへの影響を明らかにする。

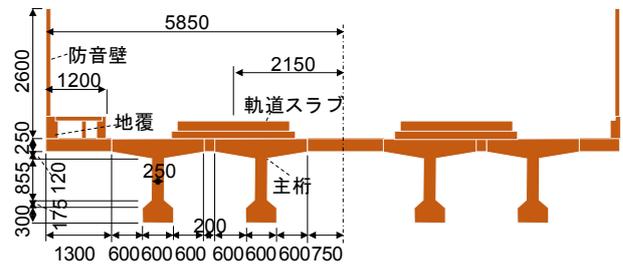


図-1 対象橋梁の断面図(単位 mm)

2. 検討方法

2.1 対象橋梁

図-1 に本研究で対象とする PRC 桁の断面図を示す。桁はスパン 29.2m、桁長 30.0m のポストテンション式単純 T 形 4 主桁(複線桁)である。桁高が低く抑えられているため、同程度のスパンを有する桁と比較して曲げ剛性が低い傾向にある。本橋梁は、文献⁶⁾などで対象とされた橋梁と同一であり、列車通過時のひび割れ開口による固有振動数の低下や複線同時載荷など、共振の発生メカニズムについてもすでに多くの検討が進められている。下部工の構造形式は現地状況により異なるが、上部工である桁については標準桁として設計されたものであり、同一路線内に同一諸元の桁が多数存在する。

2.2 支点追加補強

図-2 に本研究で想定した支点追加補強の概要を示す。両端単純支持された桁の基本固有振動数 n は、

$$n = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI \cdot g}{D_1 + D_2}} \quad (1)$$

となる⁸⁾。なお、 L は支間長[m]、 g は重力加速度[m/s²]、 I は断面二次モーメント[m⁴]、 E は弾性係数[kN/m²]、 D_1 は

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 副主任研究員 博士(工学) (非会員)

*3 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター 課長 修士(工学) (正会員)

*4 公益財団法人鉄道総合技術研究所 総務部 副主査 博士(工学) (正会員)

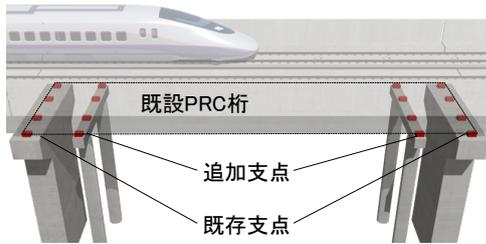
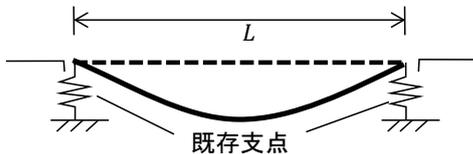
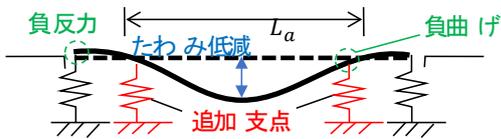


図-2 支点追加補強の概要



(a) 単純支持の場合



(b) 支点追加の場合

図-3 支点追加による支間長短縮効果の概念図

固定死荷重[kN/m], D_2 は付加死荷重[kN/m]である。

共振によるたわみの増大は、固有振動数 n が列車の加振振動数と近接する場合に生じる。したがって、補強により桁の固有振動数を列車の加振周期よりも高くすることで効率的に共振によるたわみの増大を低減できる。

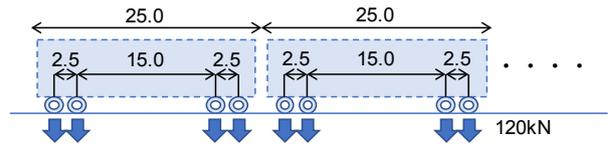
図-3には支点追加補強による支間長短縮効果の概念を示す。なお、支点は鉛直バネ支持で表されると仮定した。支間に新たな支点を追加することで式(1)中の支間長 L が L_a に短縮される。式(1)からわかるように、固有振動数は曲げ剛性 EI に対して平方根の感度しか有さないが、支間長 L に対して二乗の感度を有するため、支間長短縮により固有振動数を効率的に増加させることができる。

ただし、図-3(b)に示すように支点を追加することで桁の変形は複雑化するとともに、支点追加でどの程度支間長が短縮されるかは、既存支点と追加支点の支持剛性、および桁の曲げ剛性により変化する。また、追加支点の支持剛性が高く、既存支点の近傍にしか支点を追加できない場合、桁の追加支点部での負曲げモーメントや既存支点での負反力の発生が懸念される。各種の制約の中で所定の補強効果が得られる支点追加位置および剛性の設定が必要となる。本研究では、桁の曲げ剛性を実測値に合わせて推定したうえで、支点を追加した解析を行い、支点追加補強の効果および既存支点の負反力や桁の負曲げモーメントへの影響について検討した。

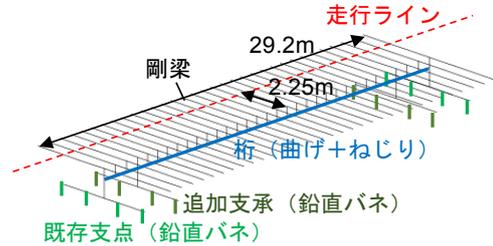
2.3 解析方法

(1) 基本モデル

図-4に数値解析に用いた車両および桁モデルを示す。編成数は設計値および現地計測により取得した輪重を踏



(a) 走行車両モデル (単位[m])



(b) 桁モデル

図-4 解析モデル

表-1 解析ケース一覧

	形式	詳細
橋梁	PRC 桁 支間長 29.2m	支点追加位置：無, 1, 2, 3, 4m (無：基本モデル, 再現解析用)
		追加支点鉛直剛性：12, 36, 122, 366, 1220, 3660, 12200, 36600, 122000 MN/m/支承 既存支点鉛直剛性：1220 MN/m/支承(設計値)
列車	移動荷重列 12両分	走行速度：100~400km/h (1km/h刻み) (評価は200~260km/hの結果を用いた)

まえて、概ね50%乗車を想定した輪重120kNおよび12両とした。

桁は4主桁分を1本の梁要素とし荷重走行位置および支承位置まで剛な梁要素で接続したモデルとした。要素分割は橋軸方向に32分割とした。本モデルの支点部は桁重心から桁下面まで剛な梁要素で接続したうえで、支点位置まで水平に剛な梁要素を追加し、各支点位置において支承や下部工の支持剛性を表現するばね要素を導入した。なお、既存支点にはバネ係数として支承の鉛直剛性の設計値を用いている。断面諸元は図-1から計算し、コンクリートの弾性係数は文献⁹⁾より29kN/mm²とした。ただし、断面二次モーメントは、ひび割れによる低下を考慮するため、現有性能推定で修正した。現有性能の推定は、共振域となる200km/hから240km/hまでの列車速度の桁中央最大変位を指標とし、実測値と解析値が一致するよう、モード減衰比および断面二次モーメントを修正した。解析ケース一覧を表-1に示す。

(2) 支点追加補強モデル

既存支点から1m, 2m, 3m, 4mの位置で4本の主桁下への支点追加を想定し、追加支点部を既存支点と同様に剛な梁要素と支持剛性を導入したばね要素によりモデル化した。支点追加補強で導入する支持剛性は実施工や設計における各種不確実性と支点追加補強で得られる効果の全体傾向を把握するために表-1に示す通り、12~約120000[MN/m]までの広い範囲で変化させた。

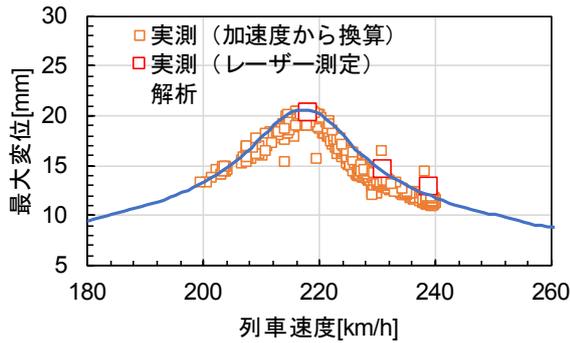


図-5 実測と解析による最大変位の比較

3. 検討結果

3.1 現有性能の推定結果

桁のモード減衰比とひび割れによる低下が想定される断面二次モーメントを推定するため、解析値と実測値が合うようにこれらの諸元の修正を行った。まず、設計諸元を有する解析モデルの結果から共振速度を特定し、実測共振速度との差から、式(1)に基づき断面二次モーメントを決定した。つぎに、修正した断面二次モーメントを導入した解析モデルの結果から共振時の最大変位を算出し、実測最大変位との差からモード減衰比を決定した。

本研究では現有性能の推定に列車通過時の桁中央鉛直最大変位を用いた。実測値はレーザードップラー速度計Uドップラー¹⁰⁾で測定した最大変位と、桁中央に常設された加速度計で測定された桁加速度から換算した最大変位を用いた。なお、加速度から最大変位への換算は、文献⁶⁾を参照されたい。

図-5に列車通過時の桁中央の最大変位と列車速度の関係を示す。なお、解析値は現有性能推定で得られた諸元を用いた結果である。最大変位がピークを示す共振速度、共振時の最大変位ともに、解析値と実測値は良好に一致することがわかる。なお、現有性能推定の結果、断面二次モーメントは全断面の約75%、モード減衰比は2%と推定された。

3.2 支点追加補強の効果

(1) モード特性

図-6に現有性能の推定を行ったPRC桁の支点追加補強前後の1次モードの振動モード形を示す。なお、追加支点の支持剛性は1200MN/m(既存支点と同等)、追加位置は既存支点から3mとした場合を示す。支点追加前には正弦波に近い梁のモード形状は、支点が追加されることで変化する。特に桁端部では梁の曲率が小さく、桁中央部では梁の曲率が大きくなる。これに伴い、固有振動数も2.41から5.94Hzに上昇した。

図-7には支点追加位置を既存支点から3mとした場合に追加支点の支持剛性が桁の1次固有振動数に及ぼす影響を示す。なお、同図には25m車両とした場合の共振

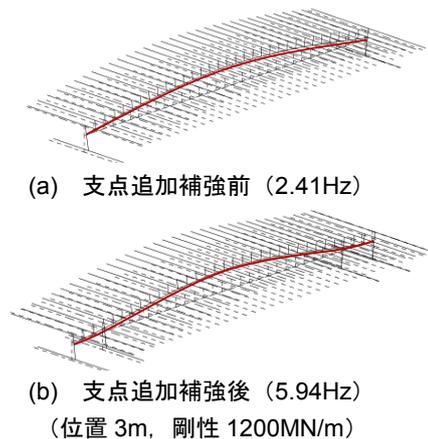


図-6 支点追加補強の有無によるモード形状の比較

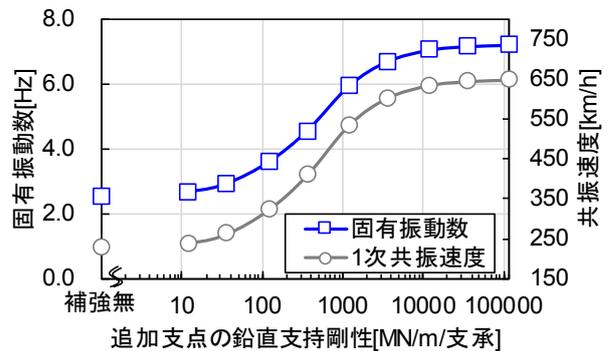


図-7 追加支点剛性が固有振動数に及ぼす影響
(支点追加位置 3m の例)

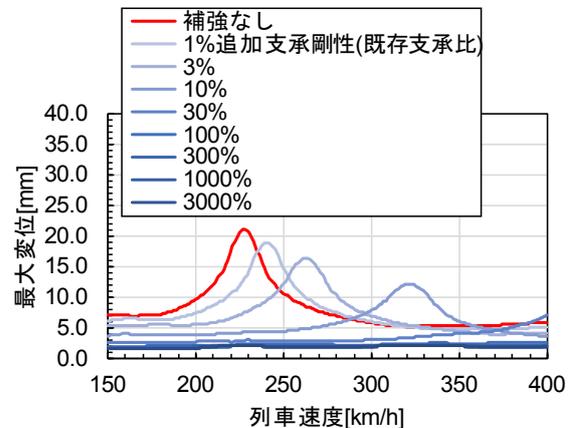


図-8 追加支点剛性が最大変位に及ぼす影響
(支点追加位置 3m の例)

速度を合わせて示す。追加支点の支持剛性が高いほど固有振動数が上昇し、既存支点と同等程度(1200MN/m/支承)であれば、6Hz近くとなり、共振速度は約550km/hに向上する。ただし、支持剛性を増加させた場合でも1次固有振動数の増加には限界があり、追加位置が3m程度の場合には7Hz程度が上限となる。

(2) 列車通過時の径間中央最大変位

同様の解析モデルの走行ライン上に図-4(a)で示した荷重列を移動載荷させる列車走行解析を実施した。図-8に得られた桁中央の最大変位と列車速度の関係を示す。

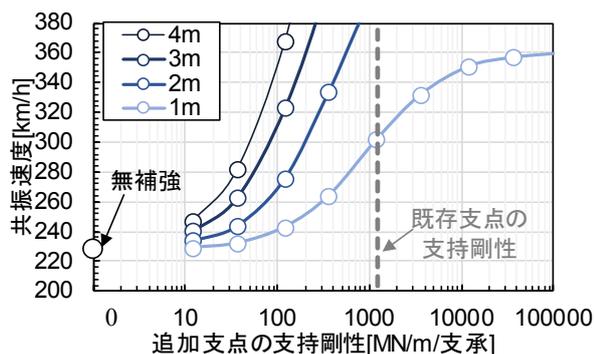


図-9 共振速度に及ぼす追加支点の位置と剛性の影響

なお、支点追加位置は既存支点から3mの場合を例として示す。補強前は220km/h程度で共振により最大変位が急増するが、追加支点の支持剛性の増加に伴い、共振速度が高速側へシフトし、共振時の最大変位も減少する。なお、走行解析により得られる共振速度は、前節で推定した共振速度と概ね同じ値となる。したがって、共振速度のみを指標とした概略計算では固有値解析のみでもある程度補強効果を予測できると考えられる。

(3) 共振速度と追加支点の位置および支持剛性

図-9に追加支点の位置および支持剛性と共振速度の関係を示す。なお、追加支点の位置は、1m、2m、3m、4m、列車速度は100km/h～400km/hとし、径間中央変位が最大値を記録した速度を共振速度とした。追加支点の支持剛性が高いほど共振速度が上昇するほか、追加支点の位置が既存支点から遠いほど共振速度向上効果が高いことがわかる。

(4) 最大変位と追加支点の位置および支持剛性

図-10には、列車走行速度260km/hまでにおける径間中央最大変位と追加支点の位置および支持剛性の関係を示す。また、同図には乗り心地から定まる桁のたわみの設計限界値¹¹⁾を合わせて示す。追加支点の支持剛性が高いほど、追加支点の位置が既存支点から遠いほど最大変位の低減効果が大きいことを確認できる。また、支点追加位置ごとに、最大たわみが急激に低下する追加支点の支持剛性が存在することがわかる。例えば、距離が1mの場合では、既存支点の支持剛性の0.5~1倍程度でたわみの最大値が16mm程度から7mm程度まで半減する。支点追加位置は2m以上の場合ではより小さい支持剛性で同様にたわみの最大値が急激に低下する。また、追加支点の位置を2m以上とした場合、追加支点の支持剛性を既存支点の半分程度とすれば、最大変位が約7mmまで大幅に低減される。図-10は列車荷重として実測値の平均相当である1軸当たり120kN(H12相当⁸⁾)とした結果である。一方、補強設計では補強後の使用期間を通じて問題がないことを確認するため、設計用の列車荷重を用いて照査を行うことが一般的である。

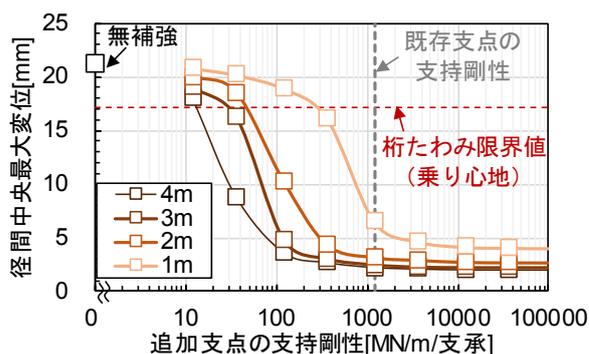


図-10 最大変位に及ぼす追加支点の位置と剛性の影響
(H12荷重：乗車率50%想定)

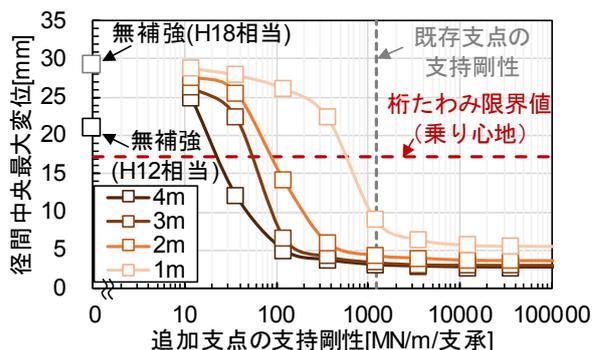


図-11 最大変位に及ぼす追加支点の位置と剛性の影響
(H18荷重：乗車率350%相当)

図-11は、高速鉄道用の設計列車荷重として一般的なH18荷重(350%乗車)⁸⁾を想定した場合の列車通過時の径間中央最大変位を示す。H18荷重を用いた場合の最大変位は実車両を想定したH12荷重の概ね1.4倍程度となる。図-11から、補強後最大変位は、支点追加位置2m、3mおよび4mで追加支承の支持剛性を100MN/m程度確保した場合に、支点追加位置1mでは1000MN/m程度確保した場合に、乗り心地から定まる桁のたわみの設計限界値を下回ることがわかる。

以上から、対象とした径間長約30mのPRC桁では、既存支点の支持剛性の10%程度(100MN/m程度)と比較的小さい支持剛性でも、支点追加位置を既存支点から2m以上とすれば、一定の補強効果が得られると予測される。また、既存支点の半分程度の支持剛性を確保できれば、2m以上の位置への支点追加により最大たわみを半減させることができると考えられる。

4. 各種制約条件の検討

支点追加補強では、もともとの設計では想定していない位置に支点を追加するため、追加支点が既存支点や桁に及ぼす影響を把握しておく必要がある。以下では、既存支点の負反力および支点追加部の桁で生じる負曲げモーメントの影響について検討を行うとともに、支点追加補強の前提条件に関する留意事項を整理する。

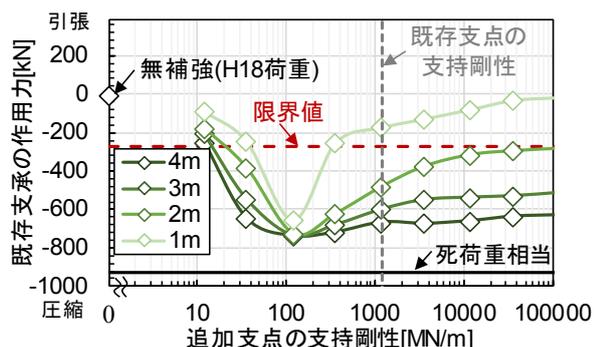


図-12 既存支点で生じる負反力と追加支点の位置および支持剛性の関係 (H18 荷重：乗車率 350%相当)

4.1 既存支点の負反力

ゴム支承におけるゴムの平均圧縮応力度の最小値の設計限界値 (1.5N/mm^2)⁸⁾と当該橋梁の支承諸元 ($300 \times 600\text{mm}^2$) から既存支点の 1 支承当たりの最小圧縮作用力の限界値は 270kN となる。また、支承への作用力は死荷重の圧縮作用力と列車走行時の引張作用力を合計したものであり、死荷重は 1 支承当たり 925kN となる。列車走行時に生じる引張作用力は数値解析により算出した。

図-12 に既存支点の 1 支承当たりに生じる作用力と支点追加位置および支持剛性の関係を示す。なお、図中の作用力は圧縮方向を負、引張方向を正とした。また、列車通過時の引張作用力は既存支点における列車走行速度 260km/h までの最大値を用いた。

図-12 からいずれの支点追加位置でも、追加支点の支持剛性が 100MN/m 以下では支持剛性の増加とともに既存支点で生じる作用力が小さくなる傾向を、逆に追加支点の支持剛性が 100MN/m 以上では既存支点に生じる作用力が大きくなる傾向を確認できる。既存支点と比較して追加支点の支持剛性が高い場合、追加支点を支点到桁中央が下側にたわむため、既存支点上の桁端が跳ね上がり、既存支点での引張作用力が増加すると想定された。これは、図-12 における追加支点の支持剛性 100MN/m 以上における、既存支点の作用力増加に対応する。一方、追加支点の支持剛性が 100MN/m 以下の場合、桁端の跳ね上がりによる引張作用力の増加よりも、支点追加補強で共振が回避され、共振時の上側変位が抑制されたことで、引張作用力が低減される効果の方が顕著となる。追加位置 2m 以上の場合、支持剛性が 30MN/m 以上であれば既存支点の負反力の限界値を下回る。ただし、支点追加位置が 1m の場合、 300MN/m 以上の支持剛性で既存支点の負反力が最小圧縮作用力の限界値を超える。図-11 より支点追加位置 1m で十分なたわみ低減効果を得るには 1000MN/m 以上の支持剛性が必要であるが、この条件は既存支点の負反力の制約を満たせないため、支点追加位置が 1m の場合は設計不可能となる。

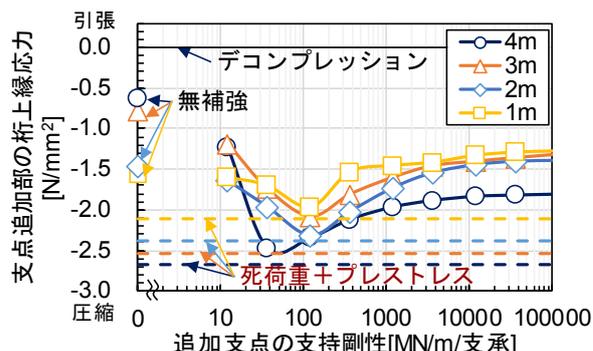


図-13 支点追加部の桁上縁応力と追加支点の位置および支持剛性の関係 (H18 荷重：乗車率 350%相当)

4.2 追加支点部の桁に生じる負曲げモーメント

支点追加で生じる桁の負曲げモーメントにより、桁上面へのひび割れ発生が懸念される。ここでは負曲げモーメントの影響を把握するため、追加支点部の桁の負曲げモーメントを桁上縁応力として評価した。追加支点部の桁上縁には、死荷重による圧縮応力、プレストレスによる応力、および走行列車荷重の負曲げモーメントによる引張応力が作用する。なお、支点追加位置が異なる場合、対象とする断面が変わるため、以下の計算を支点追加位置ごとに行った。死荷重による桁上縁応力は、分布荷重が作用する単純梁における対象断面位置での曲げモーメントから換算した。プレストレスにより生じる桁上縁応力は、設計有効プレストレスと各断面の PC 鋼線の位置から計算した。走行列車荷重による桁上縁応力は解析で得られる列車通過時の負曲げモーメントから計算した。

図-13 に支点追加部の桁上縁応力と支点追加位置および支持剛性の関係を示す。なお、図中の上縁応力は圧縮応力を負、引張応力を正とし、死荷重、プレストレスおよび列車荷重による桁上縁応力を合計した値を示す。また、列車通過時に生じる上縁応力は列車走行速度 $100 \sim 260\text{km/h}$ までの最大値を追加支点の位置および支持剛性ごとに抽出した。列車荷重は H18 相当とした。

図-13 から既存支点の負反力に関する検討と同様に、追加支点の支持剛性が約 100MN/m 以下では支持剛性の増加とともに桁上縁の圧縮応力が増加する傾向を、逆に追加支点の支持剛性が約 100MN/m 以上では支持剛性の増加とともに桁上縁の圧縮応力が低下する傾向を確認できる。したがって、追加支点の支持剛性が 100MN/m 以下の小さい領域では、支点追加による負曲げモーメントの増加よりも、共振時の著大な振動が抑制されたことによる負曲げモーメントの低減効果の方が大きいことを確認できる。また、追加支点の位置および支持剛性によらず、桁上縁応力は常に圧縮側となるため、支点追加により生じる負曲げモーメントの影響は限定的であることを確認できる。

4.3 その他の留意点

4.1 および 4.2 の検討は、追加支点到死荷重は作用せず、列車荷重分のみを負担すると仮定している。追加支点到死荷重の一部を受け持つ場合、既存支点到作用する死荷重が減少し、既存支承の負反力の限界値は低下する。また、死荷重により追加支点到部の桁に負曲げモーメントが生じるため、桁上面での引張応力は増加し、死荷重による圧縮応力は低下する。したがって、既存支承の負反力と桁の負曲げモーメントのいずれもより大きな制限を受ける。加えて、基礎・橋脚の耐震設計で考慮すべき質量が増加するため、補強部材の大型化を招く恐れがある。効率的に補強を行うためにも、追加支点是桁の死荷重を負担しないことを前提とした設計・施工が必要となる。なお、補強設計における追加支点的支持剛性の計算では、追加支点的支承の鉛直剛性だけでなく、下部工の影響を合成ばねなどにより適切に考慮する必要がある。

5. おわりに

本研究では、径間長約 30m の PRC 桁を対象に、共振に伴う著大なたわみ抑制を目的とした支点到追加補強について、数値解析による検討を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 現有性能を推定したうえで、支点到追加補強の効果を数値解析により算定した結果、支点到追加の支持剛性が高く、既存支点和との距離が遠いほど、共振速度向上および最大変位低減の効果が増加することを確認した。
- (2) 対象とした PRC 桁では、追加支点的鉛直剛性が 100MN/m 以下の場合、追加支点的支持剛性の増加に伴い共振が回避され、既存支点的負反力および追加支点到部の桁の負曲げモーメントは低下する。一方、100MN/m 以上の場合、追加支点的支持剛性の増加に伴い既存支点的負反力および追加支点到部の桁の負曲げモーメントが増加することを明らかにした。
- (3) 本研究で検討した範囲(支点到追加位置 1m から 4m)では、比較的既存支点的の近傍となる既存支点和から 2m での支点到追加補強でも追加支点的の支持剛性を既存支点的の半分程度とすれば、最大変位を無補強時の半分以下に低減できること、支点到追加位置が 2m 以上なら既存支点的の負反力および追加支点的の桁の負曲げモーメントの制約を満たすことを明らかにした。ただし、支点到追加位置が 1m の場合には、既存支承の負反力の制約により設計できない場合があることも確認された。

本研究で残された課題を以下に示す。本研究では既存支点的の支持剛性として設計値を用いた。桁中央最大変位を指標とした現有性能推定により一定の妥当性確保を行

っているが、今後、既存支点的の支持剛性の値を測定などにより検証することが重要と考えられる。また、同形式の PRC 桁において、季節変動により固有振動数が 0.2Hz 程度変動することが報告されている⁷⁾。したがって、追加支点的の位置や支持剛性の決定に、このような不確実性が及ぼす影響を確認する必要がある。最後に、現場状況に合わせてより柔軟に補強工法を選択するためにも、両側への支点到追加以外に、片側のみに支点到追加や両側で異なる位置への支点到追加に関する検討も重要と考えられる。これらについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 松浦章夫：高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究，土木学会論文報告集，No. 256，pp. 35-47，1976.
- 2) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No. 724，pp. 83-102，2003.
- 3) 宮崎修輔，北川隆，金森真：北陸新幹線 PRC 桁の設計，プレストレストコンクリート，Vol.34，No.6，pp.51-58，1992.
- 4) 藤江幸人，井口重信，松田芳範，小林薫：新幹線走行に伴う PRC 単純桁の振動について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 3，pp. 1801-1086，2008.
- 5) 杉田清隆，大澤章吾，築嶋大輔：ひび割れにより剛性低下した PRC 桁の外ケーブル補強試験体の繰返し載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 2，pp. 1315-1320，2017.
- 6) 後藤恵一，大澤章吾，上半文昭，築嶋大輔，箕浦慎太郎：共振の発生した鉄道 PRC 桁の補強対策，補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 17，pp. 551-556，2017.
- 7) 中須賀淳貴，水谷司，山本悠人，内田雅人，蘇迪，長山智則，藤野陽三：新幹線高架橋 PRC 桁の大振幅振動メカニズムの解明と構造特性の長期トレンドの分析，構造工学論文集，Vol. 62A，pp. 42-49，2016.
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，1992.
- 9) 内田雅人，原田悟，井口重信，築嶋大輔：PRC 単純 T 形桁におけるコンクリート弾性係数の特性分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 1，pp. 459-464，2016.
- 10) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，2007.
- 11) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.