

論文 桁の曲げ剛性向上を目的とした主桁間補強鋼管挿入工法の接合構造に関する基礎的検討

伊藤 隼人*1・小林 薫*2・小林 寿子*3

要旨：桁の曲げ剛性向上を目的とした補強構造として、主桁間に補強鋼管を配置する構造を考えた。本構造においては、補強鋼管と横桁部、補強鋼管同士の接合部で剛性を低下させないことが課題となる。補強鋼管と横桁部の接合部においては、PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナット取り付けして先端定着体としたあと施工アンカーを用いプレストレスを導入した。また、補強鋼管同士の接合部は、鋼管端部にフランジを設け、半割の外鋼管によって覆い、ボルトにより接合し、内部にグラウトを充填する構造とした。本構造において、列車走行解析結果から想定した軸引張力および水平荷重を載荷し、剛性低下が発生しないことを確認した。

キーワード：桁補強, 鋼管接合, 剛性向上

1. はじめに

新幹線高架橋の PRC 桁の一部で新幹線の通過による加振の周期と桁の固有周期が一致した場合に共振状態を示すことが報告¹⁾²⁾されている。通常の設計においては、列車通過時の輪重による加振振動数と桁の固有振動数が接近して共振することがないように剛性を持つように配慮³⁾されている。また、近年の列車の高速化に伴い、その通過速度によっては共振傾向の発生の可能性が指摘される。

列車高速化に対する既設桁のたわみ量の低減対策としては、池野ら⁴⁾によって防音壁を用いた既設 PC 桁のたわみ低減効果の検討がされており、桁と一体として挙動し、剛性を増加させる構造の検討結果が示されている。このことから、列車高速走行時のたわみを低減する方法として、桁の曲げ剛性を効果的に向上させることが有効だと考えられる。しかし、桁の構造条件によっては、防音壁による補強が利用できない場合も想定される。そこで、I 型や T 型の多主桁構造の単純桁を対象に主桁間に補強鋼管を挿入する方法を考えた。桁間に補強鋼管を配置、桁下に空間的制約がある場合でも使用が可能となるなど、施工条件の適用性が広がると考えられる。著者らは、上記構造について、縮小試験体を製作し、曲げ載荷試験を実施し、無補強の基本試験体に対して、補強鋼管を配置した場合、曲げ剛性が向上することを報告⁵⁾している。上記試験の範囲内において、補強鋼管の曲げ剛性への寄与度は、Branson 式の中立軸以下の断面二次モーメントにおいて補強鋼管分の断面二次モーメントを 5 割程度とすることで、概ね実験結果と一致することが確認されている。これは、端横桁と中間横桁以外で主桁との接合がないことから、平面保持が十分でないことによると考えられる。

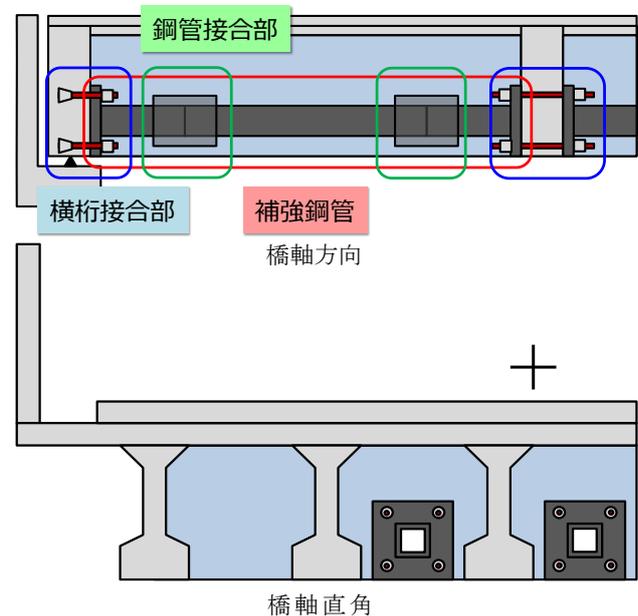


図-1 主桁間に補強鋼管を挿入する補強方法

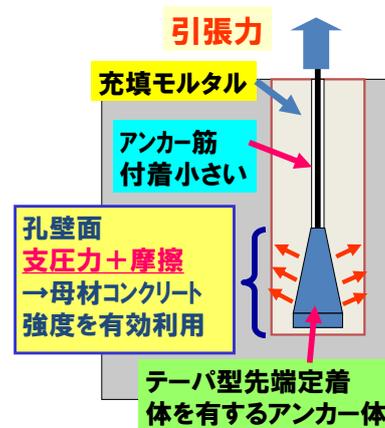


図-2 テーパ型ナットを先端定着体としたあと施工アンカー工法の耐荷機構の略図

*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 上席研究員 博(工)(正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 (正会員)

本構造においては、補強鋼管と端横桁部、あるいは補強鋼管と中間横桁、補強鋼管同士の接合部に剛性を低下させないことが課題となる。本検討では、上記構造を既設の桁に実施することを想定し、補強鋼管と横桁の接合部および鋼管同士の接合部に着目した試験体を製作し、基礎的検討を実施したので報告する。

2. 鋼管補強構造概要

図-1 に主桁間に補強鋼管を挿入する補強方法を示す。補強鋼管と横桁の接合部には、PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナット取り付けして先端定着体としたあと施工アンカー⁶⁾を用いてプレストレスを付加することを考えた。

図-2 にテーパ型ナットを先端定着体としたあと施工アンカー工法の耐荷機構の略図、図-3 に鋼管同士の接合部略図を示す。

これは、列車走行による作用曲げモーメントから発生する軸引張力に対し、横桁と補強鋼管の接合部を開かせず、鋼管の曲げ剛性を有効に活用し、かつ、補強鋼管全体を引張鋼材として機能させるためである。本アンカー工法については、引張試験による引張耐力確認試験を実施しており、定着長を PC 鋼棒直径の 20 倍で、PC 鋼棒が破断する破壊形態となることを確認している。また、高引張耐力の PC 鋼棒を使用することで、アンカー本数を低減し、横桁への削孔を最小限に抑えることができると考えた。試験に用いたテーパ型ナットを PC 鋼棒先端にセットした状況を写真-1 に示す。

補強鋼管同士を直接接合することは、施工上困難となる。施工性を考慮した鋼管の接合法として、鋼管端部にフランジを設け、半割の外鋼管によって覆い、ボルトにより接合して内部にグラウトを充填する構造を考えた。同構造は、列車走行による曲げモーメントが作用した際、補強鋼管に発生する軸引張力が補強鋼管端部のフランジから、内部の充填グラウトへ圧縮力として作用し、応力を伝達する。また、外鋼管がフランジ付補強鋼管と同等以上の鋼材断面積を有することで、剛性が担保される。

3. テーパ型先端定着体を有するアンカーの残存緊張力確認試験

3.1 試験概要

補強鋼管と横桁の接合部には、PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナット取り付けして先端定着体としたあと施工アンカーを用いてプレストレスを導入する構造としている。導入緊張力がどの程度残存するか確認するため、アンカーの長期引張載荷試験を行った。

図-4 にアンカー接合部残存緊張力確認試験体を、写真-2 にアンカー定着状況を示す。表-1 に、試験体に用いた材料強度試験結果を示す。検討に用いた PC 鋼棒は、φ23 で C 種 1 号(SBPR1080/1230)の規格のものを用いた。

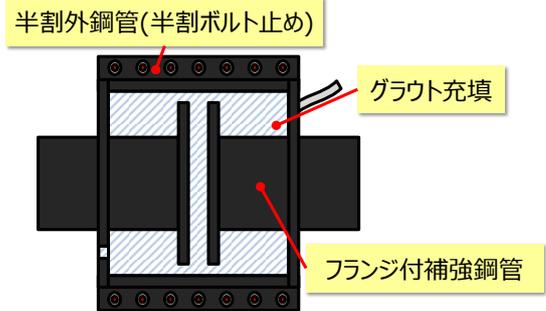


図-3 鋼管接合部略図



写真-1 テーパ型ナットを PC 鋼棒にセットした状況

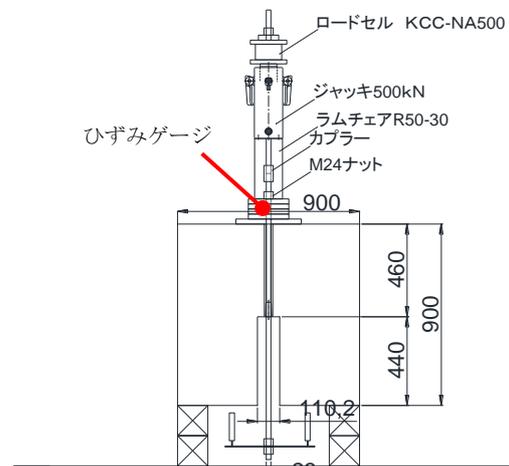


図-4 アンカー接合部残存緊張力確認試験体



写真-2 アンカー定着状況

表-1 材料強度試験結果

試験体名	使用アンカー筋鋼材の規格	母材コンクリート圧縮強度 $f_{ck}(N/mm^2)$	充填グラウト圧縮強度 $f_{ck}(N/mm^2)$
Type1	C種1号	31.3	53.0
Type2	(SBPR1080/1230)	32.5	

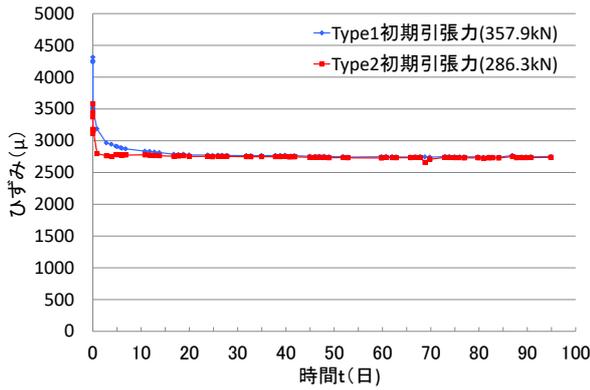


図-5 ひずみ-時間関係

定着長は、PC 鋼棒直径の 20 倍とした。コンクリートブロック寸法は、900 mm×900 mm×900 mmとした。試験体の製作は、コンクリートブロックにコアマシンで所定の削孔を行った。次に坑壁面に水を塗布し、テーパ型先端定着体をセットしたアンカー筋を構内に配置し、充填グラウトを打設した。なお、テーパ型先端定着体からコンクリートブロック端部までの領域は無筋となっている。充填グラウトについては、市販のプレミックスタイプのものを使用した。荷重は、500kN 用のセンターホール型の油圧ジャッキを手動の油圧ポンプを用いて加圧し、アンカー筋に引張荷重を作用させた。荷重荷重は、Type1 を土木学会規準に従い、 $0.7\sigma_B$ の 357kN、Type2 を Type1 の 8 割の 286kN とした。なお、PC 鋼棒のフーチング上面近傍に 4 面ひずみゲージを添付し、ひずみを 94 日間測定した。

3.2 試験結果

図-5 に、ひずみ-時間関係を示す。ひずみは、荷重から 3 日程度で No.1 は 82%、No.2 は 70% まで低減したが、3 日以降は 2650~2800 μ 前後で安定し、94 日間維持した。計測ひずみに PC 鋼棒のヤング係数と断面積を乗じた残存引張力に換算すると 235kN 程度であった。

4. 鋼管接合構造軸剛性確認一軸引張試験

4.1 試験概要

鋼管接合部の軸剛性への影響を確認するため、万能試験機により一軸引張試験を実施した。

図-6 に、鋼管接合部構造軸剛性確認一軸引張試験体形状を、写真-3 に一軸引張試験状況を、表-2 に、試験体に用いた材料強度試験結果を示す。Type3 を鋼管単体の基本試験体とし、 $\square 350 \times 350$ mm、 $t=22$ mm、 $l=1586$ mm の角型鋼管 (BCR295) に $t=32$ mm のフランジを設けた。また、Type4 は、Type3 の角型鋼管を 2 分割し、 $t=32$ mm のフランジを設け、 $\square 550 \times 550$ mm、 $t=22$ mm、 $l=1050$ mm の半割角型鋼管をボルト止めにより接合して覆い内部に充填グラウトを注入し接合した。フランジには 100 mm×50

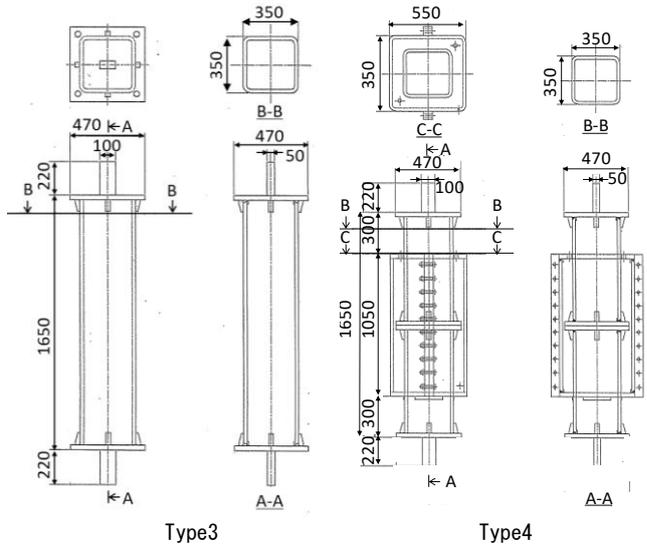


図-6 鋼管接合部構造軸剛性確認一軸引張試験体形状

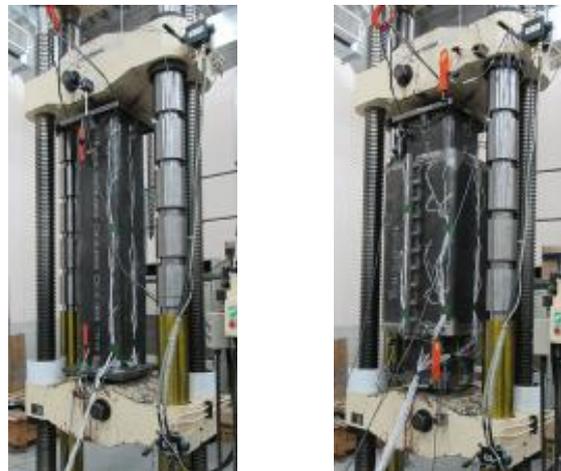


写真-3 一軸引張試験状況

表-2 材料強度試験結果

試験体	鋼管接合部グラウト(無収縮モルタル)	
	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
Type4	55.8	32.5

試験体	鋼材種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
Type3 Type4	BCR295t22	423.0	465.6	203.4	2080

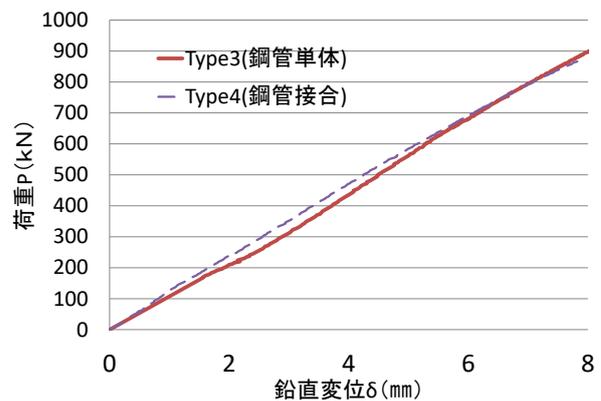


図-7 荷重-変位関係

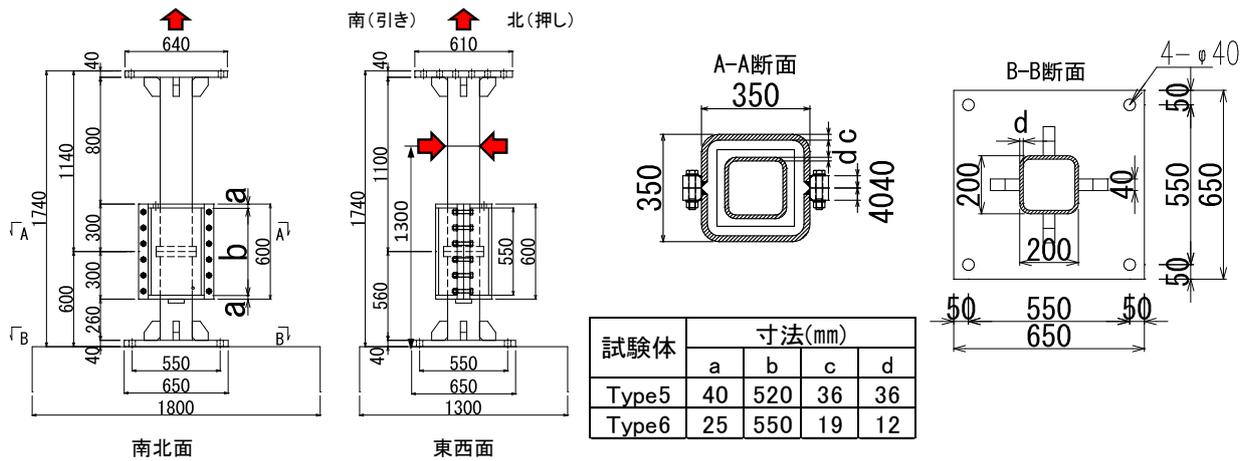


図-8 試験体形状

表-3 材料強度試験結果

試験体	コンクリート(40-15-20H)			アンカーグラウト(無収縮モルタル)			鋼管接合部グラウト(無収縮モルタル)		
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
Type5	58.1	4.3	33.0	99.9	3.4	39.5	38.2	3.6	28.7
Type6	41.6	3.4	29.5	104.7	4.0	40.1	48.7	4.1	31.1

mm×220 mmの掴み代を設け、万能試験機のチャックで掴ませることにより、一軸引張試験を実施した。変位については、上面フランジと下面フランジに変位計を設置し、その合計値を鉛直変位とした。

試験体	鋼材種別	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏ひずみ (μ)
Type5	SS400t36	232.9	433.7	184.4	2081
Type6	STKR490t12	523.3	565.2	183.5	2852
	STKR490t19	516.0	559.4	189.4	2724

4.2 試験結果

図-7に荷重-変位関係を示す。Type3, Type4の荷重-変位関係は概ね一致し、接合構造を設けた場合でも、900kNの軸引張で、鋼管単体とほぼ同等の軸剛性を有していることを確認した。

5. 接合試験体正負交番載荷試験

5.1 試験概要

列車走行により作用する補強鋼管への軸引張力および曲げモーメントにより、接合部の影響で剛性が低下しないか確認するため、接合試験体の正負交番載荷を実施した。

図-8に試験体形状、表-3に試験体に用いた材料強度試験結果、写真-4に試験概況、図-9にひずみゲージ位置を示す。試験体の鋼材断面については、共振傾向を示している桁断面¹⁾を想定し、剛性向上により、共振傾向を抑制できると考えられる鋼材断面積²⁾を有したものをType5(SS400, 内鋼管□200 mm×200 mm, 外鋼管を350 mm×350 mm)とし、Type6は、市販鋼管で最大厚さとなる内鋼管をSTKR490, □200 mm×200 mm, t=12 mm, 外鋼管をSTKR490, □350 mm×350 mm, t=12 mmとした。

補強鋼管同士の接合部については、内鋼管の端部にSS400, t=40 mmのフランジを設け、半割の外鋼管でボルト止めし、注入孔からグラウトをハンドポンプで充填して製作した。

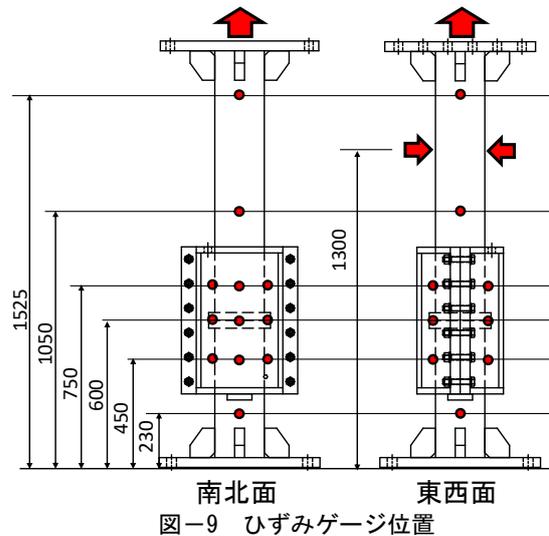


図-9 ひずみゲージ位置



写真-4 試験概況

フーチングと補強鋼管の接合部については、 $\phi 23$ の PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナットを取り付けて先端定着体としたあと施工アンカーを4本用い、ベースプレートとフーチングを接合した。また、アンカー定着長は 20ϕ の 460 mm とし、アンカー1本当たり、3項の試験結果の残存引張力である 235 kN よりやや低い、 200 kN の緊張力を付加し、計 800 kN のプレストレスを導入した。

荷重は正負交番荷重試験装置を用い、鉛直ジャッキにより、引張軸力 255 kN の荷重を行い、その後、引張軸力を維持した状態で、フーチング上面より 1300 mm の位置に、水平ジャッキで水平荷重 13 kN の正負交番荷重を実施した。軸力荷重、水平荷重とも2サイクルを繰り返した。荷重については、共進傾向を示している桁断面について、サブストラクチャー法による列車走行解析を行った試計算結果により決定した。桁構造部をシェル要素、補強鋼管をビーム要素で3次元モデル化し、代表的な新幹線車両が 360 km/h での複線走行を行った際に、補強鋼管に作用する最大軸引張力および最大曲げモーメントと同等となるように設定した。

5.2 試験結果

(1) 荷重-変位関係

図-10 に鉛直荷重 255 kN までの鉛直荷重-変位関係を示す。なお、ここでの鉛直荷重は引張軸力を意味する。Type5 は、1回目、2回目ともに 255 kN で 2 mm 程度の鉛直変位となった。Type6 は、1回目、2回目とも、 255 kN で 1.5 mm 程度の鉛直変位となった。また、Type5 と Type6 を比較すると Type6 のほうが剛性は高い。これは Type6 の充填グラウトの強度がやや高く、弾性係数が大きいため、グラウトの弾性圧縮分の変位量が Type5 と比較して小さいためであると考えられる。また Type6 は、 200 kN あたりで変曲点を迎え、剛性が低下しているが、その後の第2勾配では、Type5 と同程度の剛性となっている。Type5 については、初期剛性からの剛性低下は見られなかった。

図-11 に鉛直荷重 255 kN を維持し、水平荷重 13 kN を荷重した水平荷重-変位関係を示す。Type5、Type6 ともに、直線的な分布となり、初期の曲げ剛性を維持している。また、Type6 は Type5 よりも鋼材断面積が小さいことから曲げ剛性がやや低くなった。

(2) ひずみ分布

図-12 に Type5 の 255 kN (2回目) 荷重時の鉛直ひずみの分布を、図-13 に Type6 の 255 kN (2回目) 荷重時の鉛直位置の鉛直ひずみの分布を示す。なお、外鋼管の鉛直ひずみについては、ひずみゲージ取り付けの高さ位置の平均ひずみをプロットしている。Type5、Type6 ともにいずれの高さにおいても、補強鋼管断面積と弾性係数から計算されるひずみと概ね一致する結果となった。

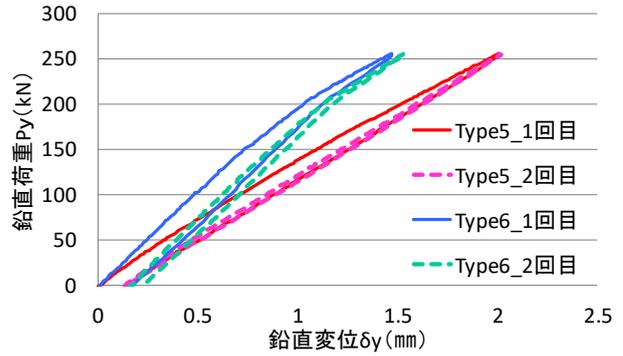


図-10 鉛直荷重-変位関係

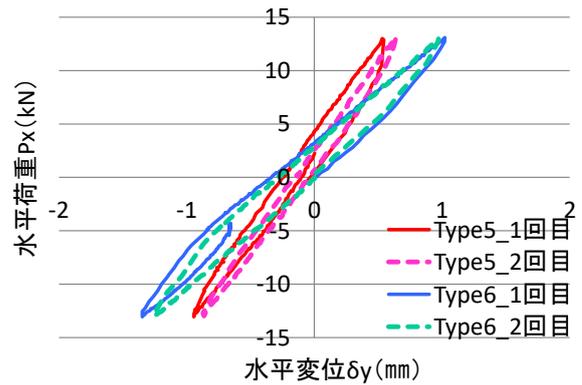


図-11 水平荷重-変位関係

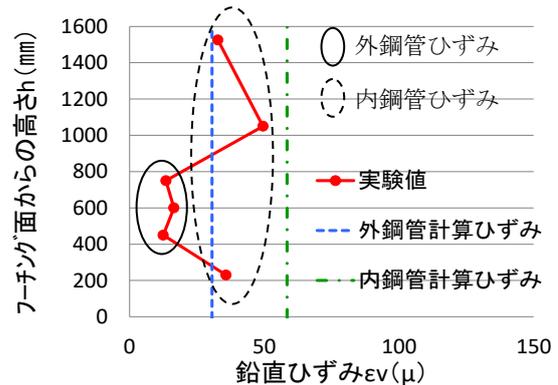


図-12 Type5 ひずみ分布 (255 kN 2回目)

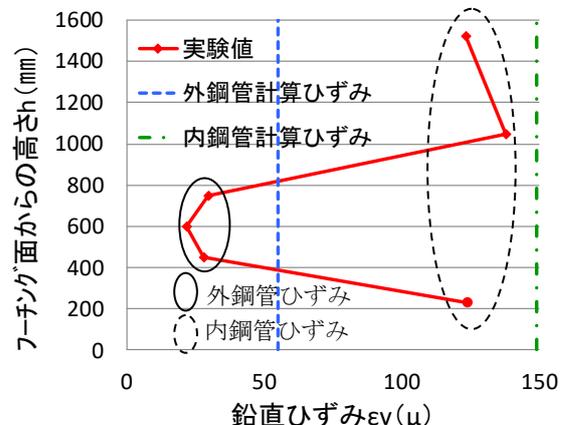


図-13 Type6 ひずみ分布 (255 kN 2回目)

(3) アンカー抜け出し

アンカー抜け出しについては、各アンカーの頭部に変位計を設置して計測した。図-14 に Type5、図-15 に

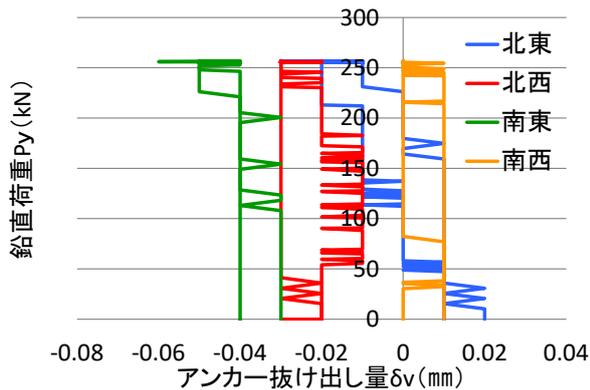


図-14 Type5_鉛直荷重-アンカー鉛直変位

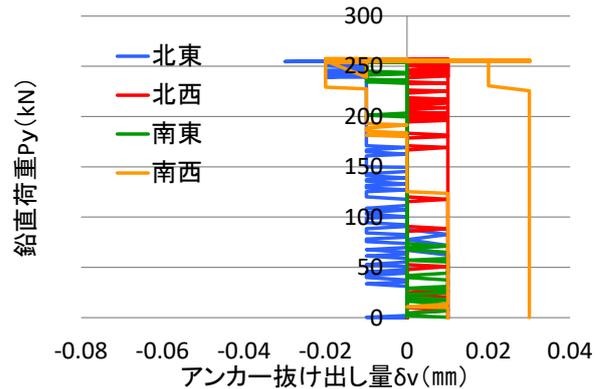


図-15 Type6_鉛直荷重-アンカー鉛直変位

Type6 の鉛直荷重 255kN、水平荷重 13kN を載荷した際のアンカーの鉛直変位を示す。いずれも鉛直変位は微小であり、計測誤差の範囲内であると考えられ、アンカーの抜け出しは発生していないと考えられる。これにより、横桁と補強鋼管を、テーパ型先端定着体を有したあとと施工アンカーにより、適切なプレストレスを導入し接合することで、代表的な新幹線車両が 360 km/h で複線走行した際にも、剛性を低下させることなく接合できると考えられる。

6. まとめ

桁の曲げ剛性向上を目的とした補強構造として、主桁間に補強鋼管を配置する構造を考え、同構造における補強鋼管と横桁部、補強鋼管同士の接合部について、基礎的な検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 本実験の範囲内（テーパ型先端定着体を有するアンカーの残存緊張力確認試験）において、 $\phi 23$ の PC 鋼棒にテーパ型先端定着体を設け、初期引張力 357.9kN、286.3kN で緊張した場合、約 94 日経過後で安定的に残存引張力約 235kN を確保されることを確認した。
- (2) 本実験の範囲内（鋼管接合構造軸剛性確認一軸引張試験）において、提案した鋼管の接合構造により、軸引張 900kN まで、鋼管単体の場合とほぼ同等の軸剛性を有することを確認した。
- (3) 本実験の範囲内（接合試験体正負交番載荷試験）において、列車走行解析の試算結果から決定した鉛直荷重 255kN、水平荷重 13kN を載荷した場合、実験値は、内鋼管単体の場合を想定した鉛直変位の計算値よりも剛性は低くなったが、Type5 では、初期剛性からの剛性低下は見られなかった。
- (4) 本実験の範囲内（接合試験体正負交番載荷試験）において、フーチングと補強鋼管の接合部に、PC 鋼棒先端にテーパ型に加工したナット取り付けて先端定

着体としたあとと施工アンカーを用い、計 800 kN のプレストレスを導入した場合、列車走行解析の試算結果から決定した鉛直荷重 255kN、水平荷重 13kN を載荷しても、アンカーの抜け出しは発生しなかった。

7. 今後の課題

本補強構造については、今回の静的な試験に加え、疲労に対する検討のため、各構造部について動的試験を行う必要がある。また、完成時のみならず各施工段階における応力状態の検討や、充填グラウトの強度発現等についても確認を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 藤江幸人, 井口重信, 松田芳範, 小林薫: 報告 新幹線の走行に伴う 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, pp1081-1086, 2008
- 2) 隈部佳, 原田悟, 岩田道敏, 大久保孝昭: 報告 高橋脚を有する橋梁の新幹線走行に伴う振動について, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp919-924, 2012
- 3) 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, 1999.10
- 4) 池野誠司, 小林薫, 金田淳: 報告 防音壁を用いた既設 PC 桁のたわみ低減効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp1645-1650, 2008
- 5) 伊藤隼人, 小林薫: 論文 主桁間に補強鋼管を有する PRC 桁の曲げ剛性向上に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp511-516, 2017
- 6) 小林薫, 鈴木雄大, 平林雅也, 伊藤隼人: 報告 テーパ型ナットを PC 鋼棒定着体としたあとと施工アンカー工法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, Type2, pp1609-1614, 2016