

報告 RCラーメン高架橋の増杭および地中梁による補強効果の評価

東 基行*1・森川 昌司*2・松田 猛*3・関 雅樹*4

要旨：東海道新幹線のRCラーメン高架橋には、杭を中間支持層で打止めた中間支持杭構造の高架橋がある。現在、これらの高架橋は、衝撃振動試験結果等から耐力に問題はないと考えられるが、高密度の列車走行に伴う鉛直加振により、将来的に構造物の耐力に悪影響を与える可能性も懸念される。列車走行時の高架橋の鉛直加速度および上層梁等の応力低減のため、営業線において増杭および地中梁による基礎補強を実施した。本稿では、高架橋基礎の鉛直地盤反力向上による鉛直加速度および応力の低減効果、および基礎の鉛直反力に着目した解析による仕様改良の検討について報告する。

キーワード：基礎補強, 増杭, 地中梁, 基礎鉛直反力, 鉛直加速度測定, 応力測定

1. はじめに

東海道新幹線は、1964年10月の営業開始から既に40年以上が経過しており、将来に渡り健全性を維持するためには構造物の適切な維持管理が重要である。

東海道新幹線では、鉄筋コンクリート構造物の健全度評価手法として、1993年以降、衝撃振動試験¹⁾を導入し、関²⁾の高架橋の全体系の固有振動数と柱部分系の固有振動数の関係から柱の剛性と地盤ばねを推定するノモグラムを用いた判定手法を活用した構造物の健全度把握を実施している。

一方、東海道新幹線には、既設杭がN値50の基盤面以浅のN値20以上の砂礫層等で支持する中間支持杭の高架橋があり、その一部に列車走行時の高架橋の鉛直加速度が大きい高架橋がある。現在、これら高架橋に顕著な変状は確認されておらず、別稿で報告する衝撃振動試験の健全度判定結果からも、これら高架橋は十分な耐力を有していると考えられる。しかし、1日あたり最大300本を越える高密度運行に伴い、将来、鉛直振動に起因する上層梁部材のひび割れの開閉等が構造物の耐力に悪影響を与える可能性も懸念される。今回、試験施工として営業線で、高架橋基礎の鉛直反力向上による高架橋の鉛直加速度低減および上層梁等の応力低減を目的とし、

増杭および地中梁による基礎補強を施工し現地測定を実施した。測定は、基礎の鉛直反力算出のための載荷試験、列車走行時の柱鉛直加速度測定および上層梁応力測定を実施した。試験施工個所と同一のRCラーメン高架橋の標準図に主な測定箇所を記して図-1に示す。

本稿では、試験施工した基礎補強の概要、施工前後の現地測定による基礎補強の効果確認結果、および基礎の鉛直反力に着目した解析結果について報告する。

2. 基礎補強試験施工の概要

基礎補強試験施工の対象高架橋は、代表的な中間支持杭の標準RCラーメン高架橋から選定した。基礎補強試験施工箇所の地層は沖積層である。自然地下水位はGL-1.6mである。GL-6m~9mにN値20程度の砂層があるが、以深はN値が低下し、GL-11m~26mにN値2~8程度の軟弱層が存在する。既設高架橋の杭先端部は、しゅん功図よりGL-9.6m程度と想定される。

基礎補強は、基盤面に達する増杭を増打し、地中梁で既設RCラーメン高架橋のフーチング上部と一体化し、列車走行時の活荷重の一部を分担する構造である。高架橋の死荷重は既設基礎で支持するため、ジャッキアップ等による死荷重の増杭への移行は、営業線への影響を考

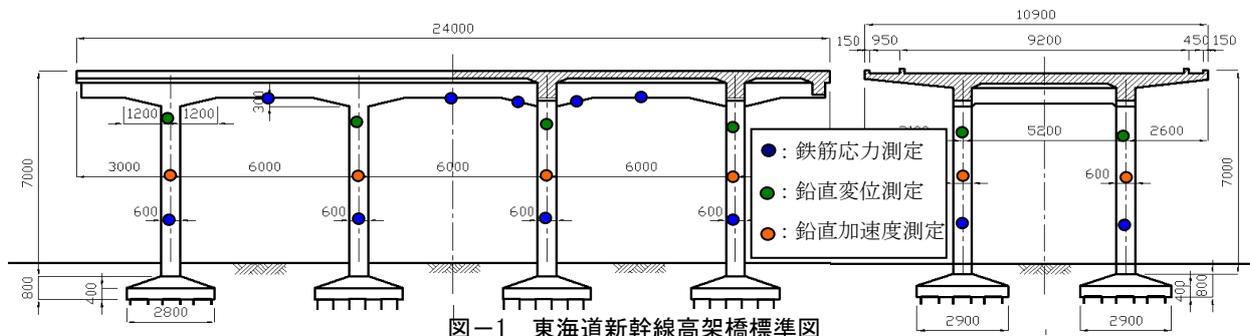


図-1 東海道新幹線高架橋標準図

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 主幹研究員 工修 (正会員)
 *2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 構造リノベーショングループリーダー 工修 (正会員)
 *3 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 構造計画チームマネージャー (正会員)
 *4 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 部長 工博 (正会員)

慮し実施しない。図-2 に試験施工箇所の土質調査結果を示し高架橋の既設杭先端部を図示する。また、基礎補強の概要図を図-3、4 に示す（着色部が新設部）。

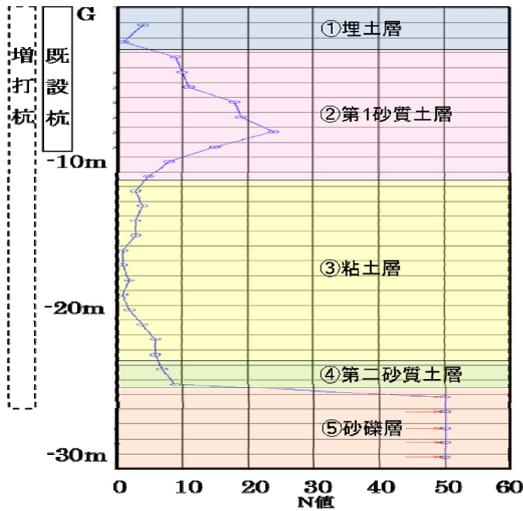


図-2 土質調査結果

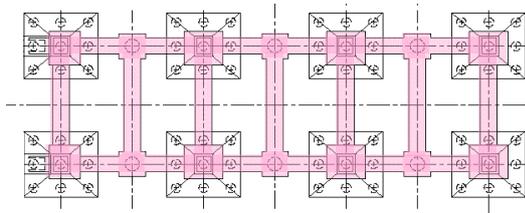


図-3 基礎補強の概要図 (1)

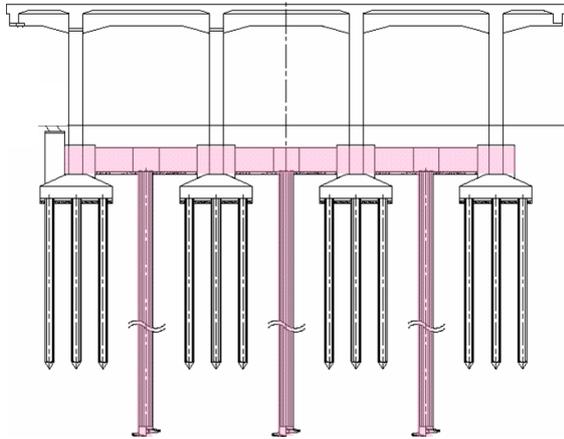


図-4 基礎補強の概要図 (2)

増杭の配置は、敷地内で施工を完結するため、各線の高架橋柱間とした。また、今回の施工箇所は、高架橋端部が生活道路となっているため、上下線各線の4本の高架橋柱間に3本の新設杭を増打ちする構造とした。試験施工の目的は、基礎鉛直反力の向上による鉛直加速度および高架橋応力の低減であるが、増杭は地震時に既設基礎が損傷を受けた場合を想定し、増杭のみでも高架橋の荷重を支持できる仕様（杭径：600mm）とし、増杭先端はGL-26mの基盤面に根入1mを確保するため増杭先端到達長はGL - 27mとした。

試験施工した基礎補強は、営業線高架橋直下での近接工事である。増杭は、営業線の既存基礎への施工時の悪影響を避けるため、また、高架橋下の施工は約4.5m空頭制限下での施工となるため、試験施工では、無排土で溶接による継足しが容易な回転圧入鋼管杭を用いた。

地中梁は、幅0.7m高さ1.0mの鉄筋コンクリート製とし、フーチング直上の既設高架橋柱と増杭を井桁状に接続する形状とした。地中縦梁と高架橋柱の接続部は、柱を傷めず施工するため、柱を鋼材で挟みPC鋼棒で締め地中梁の鉄筋と接続した。図-5に高架橋柱と地中縦梁の接続部の概要を示す。また、写真-1に鋼管杭圧入および柱周りの鉄筋組の施工状況を、写真-2地中梁完成後の状況を示す。

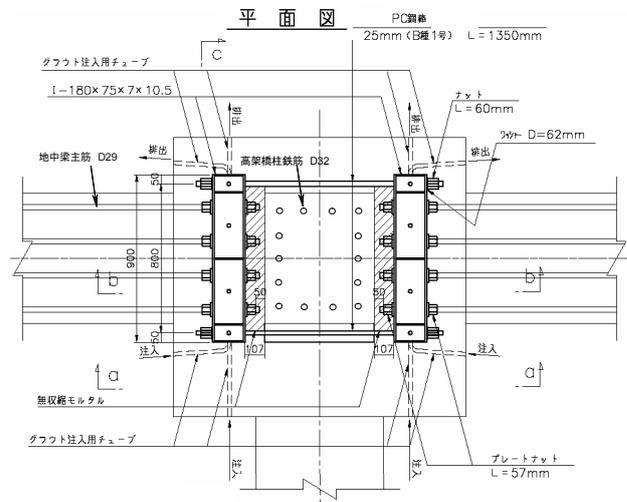


図-5 高架橋柱と地中梁の接続部の概要



(鋼管杭圧入) (地中横梁と柱周り鉄筋組)

写真-2 基礎補強施工状況



写真-3 地中梁完成時の状況

3. 基礎補強による効果の確認

基礎補強の効果確認として、現地測定を実施した。

現地測定は、基礎鉛直反力の向上を確認するための、保守用車載荷による高架橋柱の静的沈下量測定、列車走行時の鉛直加速度の低減効果を確認するための、高架橋柱の鉛直加速度測定、および応力低減効果を確認するための上層梁応力測定を基礎補強の施工前後に実施した。

(1) 保守用車載荷による静的沈下量測定

基礎の静的沈下量測定は、深夜に保守用車を時速 5km 程度で低速走行させ、上下線各柱の最大沈下量および各柱の軸力を測定した。測定に用いた保守用車は、車両重量約 23t (2 軸、軸距 5.5m、軸重約 11.5t) である。測定機材は、ラインゲージセンサーを用いた。ラインゲージセンサーの不動点は、基礎補強実施高架橋に隣接する東京・大阪方の両高架橋の柱頭部を不動点とした。沈下量測定の概要図および沈下量測定位置を図-6 に示す。

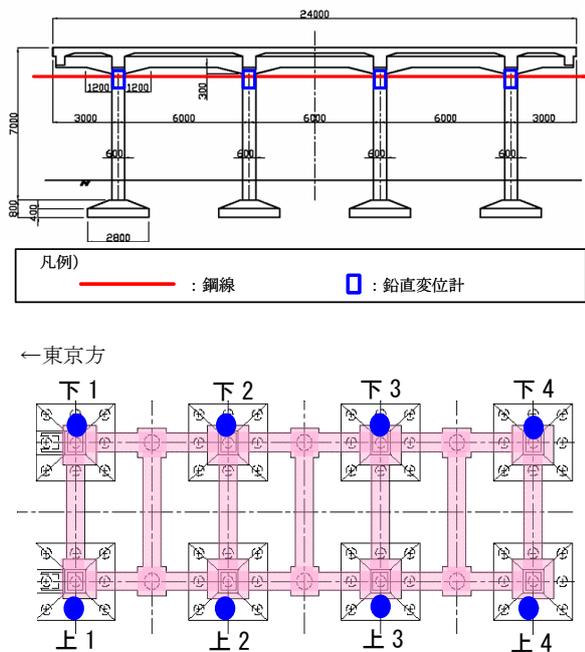


図-6 沈下量測定概要図

沈下量測定結果を図-7 に示す。また、同保守用車載荷時に測定した軸力を沈下量で除して求めた各柱の鉛直反力を表-1 に示す。沈下量および軸力は、各柱で測定された最大値を用いた。

保守用車載荷による高架橋柱の沈下量は、最大で 0.25 mm 程度と非常に小さく、各柱のばらつきも大きいですが、平均沈下量は施工前の 0.22 mm から埋戻し後 0.17 mm と約 23% 減少している。基礎鉛直反力は、8 柱平均に加え、基礎補強の杭と接続する地中梁本数の異なる中間柱 (上2・上3・下2・下3) 平均と端部柱 (上1・上4・下1・下4) 平均、上下線柱別平均を算出した。

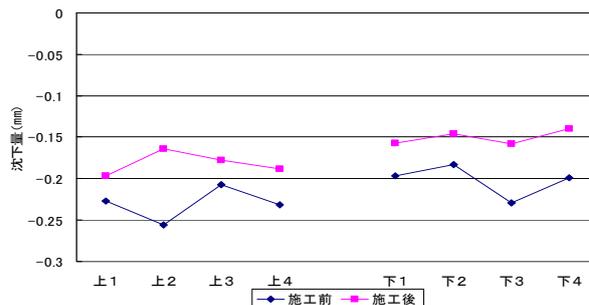


図-7 保守用車載荷による高架橋柱沈下量

表-1 各柱基礎あたりの鉛直反力

	(× 10 ⁶ KN/m)				
	8柱平均	中間柱平均	端部柱平均	上線平均	下線平均
施工前	0.928	0.934	0.923	0.863	0.993
施工後	1.281	1.319	1.244	1.141	1.422

基礎補強前の基礎の鉛直反力は、8 柱平均では、基礎補強により柱の鉛直反力は $0.93 \times 10^6 \text{KN/m}$ から $1.28 \times 10^6 \text{KN/m}$ と約 38% 向上している。上下線を比較すると、施工前は上線平均 $0.86 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、下線平均 $0.99 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、施工後は上線平均 $1.14 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、下線平均 $1.42 \times 10^6 \text{KN/m}$ となり、施工前後とも上線側の鉛直反力が小さく、地層の傾斜等の可能性が考えられる。中間柱と端部柱では、施工前の鉛直反力は同程度であり端部の基礎の鉛直反力は特に低い値ではない。一方、施工後は中間柱が $1.32 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し端部柱は $1.24 \text{KN} \times 10^6 \text{KN/m}$ であった。今回試験施工した基礎補強は、中間柱は線路方向に 2 本の増杭と接続しているのに対し、端部柱は高架橋セット間を道路が通っているため端部は線路方向に 1 本の増杭しか接続していない。施工後中間柱と端部柱の鉛直反力の差は上記補強構造の差によるものと考えられる。

(2) 高架橋柱の鉛直加速度測定

列車走行時の高架橋柱の鉛直加速度測定は、18 時～24 時に通過する全列車 (片線約 50 本) とした。加速度計は VM52 (JISc1510 準拠) を使い、加速度測定位置は柱中央部 (ハンチ下 2.3m) とした。また、営業線における加速度測定事例より、列車速度が増加しても加速度は必ずしも単調に増加しないため、多数の列車速度の異なる測定データを用い、横軸に列車速度、縦軸に加速度をとりグラフ化した。加速度測定の測定箇所概要図を図-8 に、下線の鉛直加速度測定結果を図-9 に示す。

基礎補強施工前後を比較すると、ばらつきがあるが施工後に 20% 程度低減している。また、走行する列車の進入側の柱である DG-1 については施工前後とも 0.02m/s^2 程度大きな値となっている。DG-1 は、当該高架橋を列車が走行時に高架橋に進入する側である、隣接する高架橋から列車が進入する際の列車走行時の衝撃により大きな加振力が加わっている可能性が考えられる。

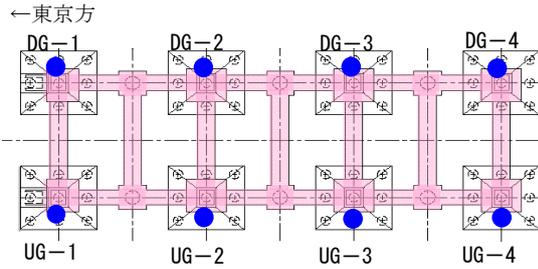


図-8 加速度測定箇所概要図

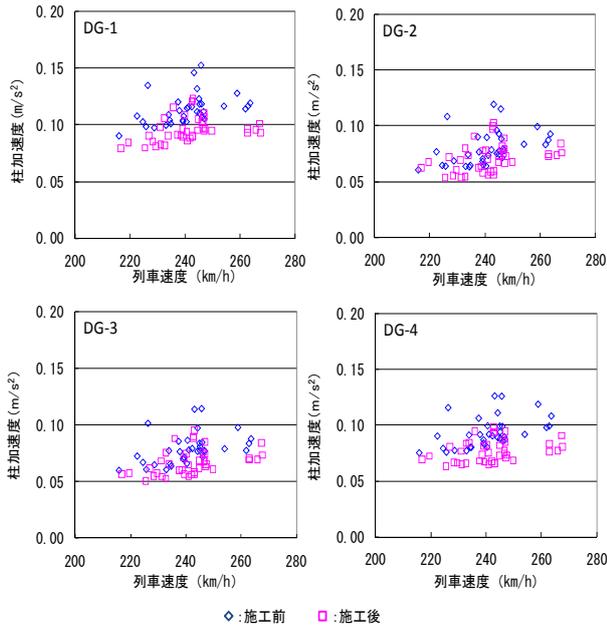
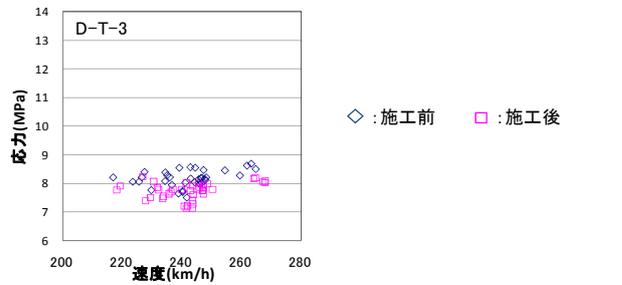
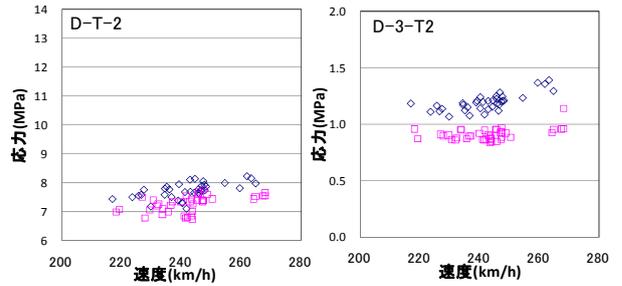
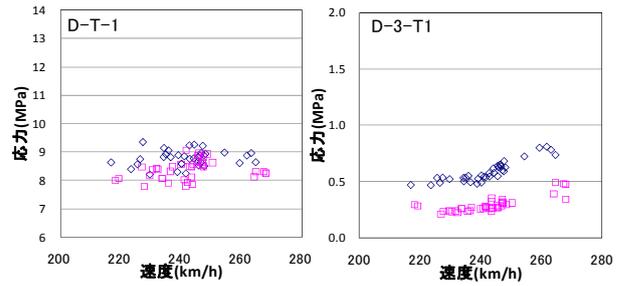


図-9 下線各柱の鉛直加速度



◇ : 施工前 □ : 施工後

図-11 下線上層梁の鉄筋応力

(3) 上層梁部材の応力測定

列車走行時の応力低減効果把握のため、施工前後の高架橋上層梁に生じる応力を測定した。測定対象の営業列車は、柱鉛直加速度測定と共通である。応力測定位置を図-10に、下線の測定結果を図-11に示す。上層梁鉄筋応力は、下線を列車が走行した際に測定された梁下側の主鉄筋の応力である。基礎補強施工前後で縦梁中央部およびハンチ部の鉄筋応力低下している。応力低減量は縦梁中央部のほうが大きい。低減割合はハンチ部(D-3-T1・D-3-T2)が大きく20~30%程度低減している。測定結果より基礎補強は特に上層梁ハンチ部応力低減に効果があると考えられる。

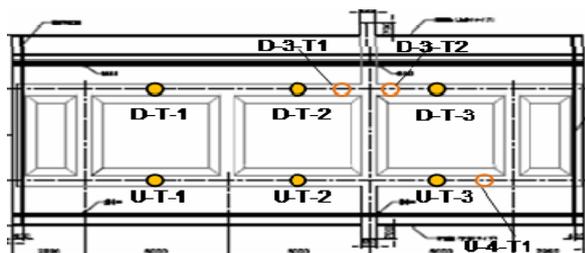


図-10 上層梁鉄筋応力測定位置

4. 解析による検討

基礎補強施工前後の現地測定の結果から、基礎補強により鉛直反力の向上による一定の高架橋鉛直加速度の低減、および上層梁応力の低減が確認された。今後の更なる鉛直加速度および応力の低減に向けた仕様の検討のため、基礎鉛直反力に着目した解析を実施した。解析は、今回の試験施工を模した基礎鉛直反力の解析および測定結果との照合、および今後の仕様改良の方向性についての検討を実施した。解析には、薄層法³⁾(解析プログラム：TLEM)を用いた。

(1) 試験施工の鉛直反力算出

解析により基礎補強施工前後の柱基礎あたりの鉛直反力を算出した。パラメータは、現地の地質調査結果および高架橋しゅん功図を元に設定した。基礎補強後の基礎鉛直反力の算出は、施工前の1柱(既設フーチング)あたりの鉛直反力、増杭1本あたりの鉛直反力を求め、中間柱・端部柱各柱の鉛直バネを算定した。図-12にモデル化範囲の概要図を、図-13に地中梁の剛性を考慮したバネ計算の概要図を示す。

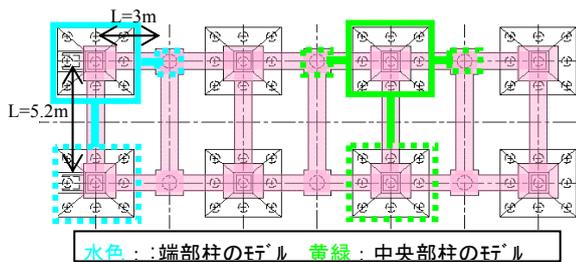


図-12 モデル化の範囲

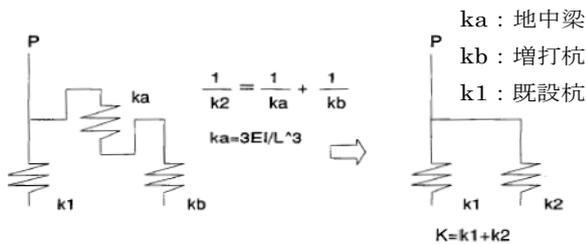


図-13 連バネ計算の概要図

表-2 1柱あたりの鉛直反力(実測値・解析値)

	実測値			解析値	
	8柱平均	中間柱平均	端部柱平均	中間柱	端部柱
施工前	0.928	0.934	0.923	0.934	0.934
施工後	1.281	1.319	1.244	1.261	1.114

解析結果を実測値と併せて表-2に示す。実測値と解析値を比較すると、施工前の基礎鉛直反力は、実測で中間柱 $0.934 \times 10^6 \text{KN/m}$ 端部柱 $0.923 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し、解析値は $0.934 \times 10^6 \text{KN/m}$ となりほぼ一致。施工後の鉛直反力実測値は、中間柱 $1.319 \times 10^6 \text{KN/m}$ 端部柱 $1.244 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、解析値は中間柱 $1.261 \times 10^6 \text{KN/m}$ 端部柱 $1.114 \times 10^6 \text{KN/m}$ であり、中央柱・端部柱とも解析値の方が低い値となった。実測値が大きいのは、解析では長期的に地中梁底面が空いた場合を考慮し加味していない地中梁底面の反力の寄与が考えられるが、本解析は、今後の試験施工に向けた検討資料として有用であると考えられる。

(2) 地中梁断面拡大の検討

基礎補強施工後の基礎の鉛直反力は、図-13に示す連バネ計算で表され、地中梁の剛性(Ka)の影響も大きい。地中梁の施工は杭施工に比べ安価であり、改良仕様を検討する場合、地中梁の断面拡大が効果的と考えられる。解析により杭断面を拡大した場合の鉛直反力を算出した。解析に用いた地中梁断面の概要図を図-14に示す。

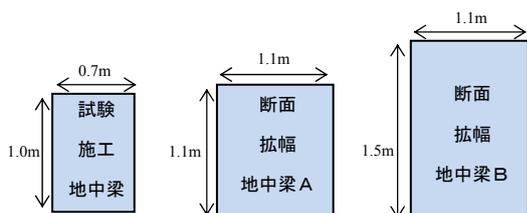


図-14 解析に用いた地中梁断面の概要図

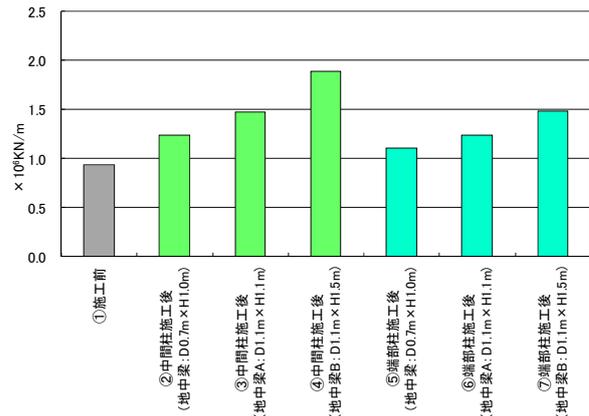


図-15 基礎鉛直反力の解析結果(地中梁拡大)

地中梁断面を拡大したケースの基礎の鉛直反力解析結果を図-15に示す。解析結果から、①施工前の基礎鉛直反力 $0.934 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し、中間柱では、②試験施工地中梁で $1.244 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、③地中梁Aで $1.479 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、④地中梁断面Bで $1.888 \times 10^6 \text{KN/m}$ となり、解析ケース中最も地中梁断面が大きい地中梁Bでは施工前の約2倍となった。端部柱は、⑤試験施工地中梁で $1.105 \times 10^6 \text{KN/m}$ であるが、⑥地中梁Aで $1.239 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、⑦地中梁Bで $1.486 \times 10^6 \text{KN/m}$ と地中梁Bのケースで約1.6倍となった。比較的安価な地中梁断面拡大を実施することで、本解析より杭は共通であっても、基礎鉛直反力の向上が期待できることが推察される。一方、杭の仕様を向上端部柱の基礎鉛直反力向上率が低い、これは高架橋既設基礎と増杭の接続数の差によるものと考えられる。

(3) 高架橋端部柱基礎間への増杭追加の検討

試験施工の実測による効果確認、および(1)(2)の解析においても、増杭との接続数の差に起因すると考えられる補強構造の差異により端部柱の鉛直支持力の増加は中間柱に比べ小さい。地中梁断面を拡大することにより端部基礎鉛直反力は向上するが、中間柱の基礎に比べ増加率は小さいため、端部柱の基礎の鉛直反力向上策として端部付近に増杭を追加することにより、高架橋柱基礎と増杭の接続数を増し、基礎の鉛直反力を増すことを検討した。端部増杭の追加位置は、営業線の高架橋セット間には道路が敷設されている場合があるため、汎用性に配慮し端部柱上下線間への増杭による基礎鉛直反力を算出した。モデル化範囲の概要図を図-16に、端部上下線間に増杭を追加した解析結果を図-17に示す。

端部に増杭を追加したケースでは、⑧施工前の基礎鉛直反力 $0.934 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し、上下線間に増杭を追加した場合の端部柱の基礎鉛直反力は、⑧試験施工地中梁で $1.30 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、⑨地中梁Aで $1.53 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、⑩地中梁断面Bで $1.897 \times 10^6 \text{KN/m}$ となった。端部上下線間に増杭

を追加することで、追加無しの場合と比して、基礎鉛直反力が向上しており、同一の地中梁断面の中間部柱基礎とほぼ同等の基礎鉛直反力となることを推定される。

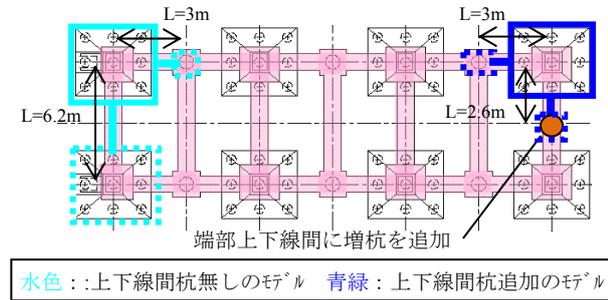


図-16 モデル化の範囲

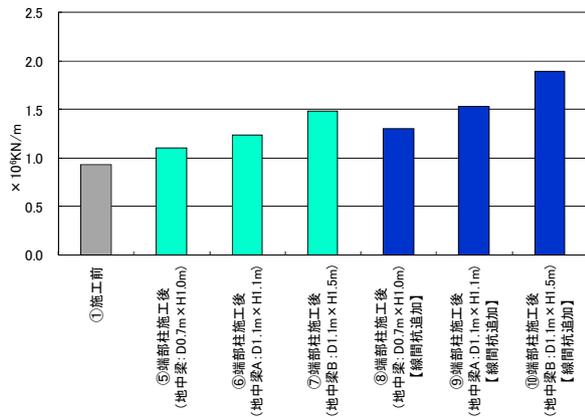


図-17 基礎鉛直反力の解析結果(端部線間増杭)

5. まとめ

本稿では、基礎の鉛直支持力向上による高架橋柱の鉛直加速度低減および上層梁等の応力低減を目的として、営業線で実施した増杭および地中梁による基礎補強試験施工について、効果把握のための現地測定を実施した。また、基礎補強により鉛直反力の向上により、一定の高架橋鉛直加速度および上層梁応力の低減が確認されたことから、今後の基礎補強仕様の検討のため、基礎鉛直反力に着目した解析を実施した。主な効果確認結果および解析による検討結果を以下に記す。

(1) 保守用車載荷時の沈下量および柱軸力測定結果から、基礎補強試験施工により、柱基礎の鉛直反力は8柱平均 $0.928 \times 10^6 \text{KN/m}$ から $1.281 \times 10^6 \text{KN/m}$ に約38%向上した。中間柱基礎と端部柱基礎の鉛直反力は、施工前は同程度であったが、施工後は中間柱の $1.319 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し、端部柱は $1.244 \text{KN} \times 10^6 \text{KN/m}$ であった。施工後の柱基礎の鉛直反力の向上は、高架橋柱下部と増杭を地中梁により接続した効果と考える。また、中間柱と端部柱の鉛直反力向上度の差は、中間柱が線路方向に2本の増杭と接続しているのに対し、端部柱は1本の増杭との接続であることに起因していると考えられる。

(2) 柱鉛直加速度測定より、基礎補強による振動加速度で20%程度の低減効果があることを確認した。

(3) 上層梁鉄筋応力測定より基礎補強により列車走行時の鉄筋応力が低減することを確認。基礎補強は柱基礎の鉛直反力を向上することにより、特にハンチ部の応力低減に効果的と考えられる。

(3) 基礎鉛直反力の薄層法³⁾を用いた解析では、施工前の解析値は、実測値とほぼ一致した。施工後については、解析値は中間柱・端部柱とも実測値よりやや低い値となったが、施工後の端部柱基礎の鉛直反力向上は中間柱基礎に比し小さく実測結果と整合している。

(4) 基礎補強仕様改良に向けた検討では、地中梁断面拡大により、施工前の柱基礎鉛直反力の2倍程度に向上できる可能性が高いことが推定される。また、端部柱の基礎鉛直反力向上が中間柱の基礎鉛直反力向上より小さいことに対する対応策として、端部柱の上下線間に増杭を追加することにより、中間部柱の基礎と同程度の鉛直反力向上が見込まれる。

本稿では、中間支持構造の高架橋等に対して、基礎補強による鉛直反力向上により、列車走行時の高架橋鉛直加速度、および上層梁等の応力が低減することを確認した。また、解析結果より、地中梁断面を拡大することで基礎鉛直反力が大幅な向上が見込めること、端部の基礎鉛直反力の向上は端部上下線間に増杭を追加することが有効なことを確認した。今後は、次なる試験施工に向けて、増杭および地中梁による基礎補強の具体的な仕様検討を実施していきたい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、有益なご指導を賜りました、東京大学・藤野陽三教授、小長井一男教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)基礎構造物・抗土圧構造物, 財団法人鉄道技術研究所編, 丸善株式会社, 2007.1
- 2) 関雅樹: 固有振動数に着目した東海道新幹線構造物の維持管理システムに関する研究, 岐阜大学学位論文, 2001.10
- 3) 小長井 一男: Shaking Table Test Allowing Interpretation of Damage to Structure in Terms of Energy Influx and Efflux through Soil-Structure Interface, Report of research project 1999 Grant-in-aid for scientific research, 2000.3