

RC ラーメン高架橋鉛直加速度低減のための基礎補強試験施工の評価

The experimental evaluation of the base reinforcement aimed for decreasing vertical acceleration applied for a RC rigid frame viaduct

東 基行*, 森川 昌司*, 長谷川 昌明*, 松田 猛**, 荒鹿 忠義**, 関 雅樹***

Motoyuki Azuma, Masashi Morikawa, Masaaki Hasegawa, Takeshi Matsuda, Tadayoshi Arashika, Masaki Seki

* 工修, 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

**東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (同上)

*** 工博, 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (同上)

Tokaido Shinkansen has more than 4000 RC rigid frame viaducts on its line. Some piles for these viaducts are end-born by layers with substantial bearing capacities above lower soft soils. Vertical acceleration of these viaducts under train loads is comparatively higher than that of other viaducts. There is no matter of structural durability in present. However, they might deteriorate their durability with aging due to their vibration. Then, we have conducted additional steel piles and RC underground beams which connect the steel piles and the bottom of columns of the viaduct in order to reduce their vertical acceleration. And we evaluated the effect of its structural reinforcement.

Keywords: base reinforcement, vertical foundation reaction, vertical acceleration

キーワード: 基礎補強, 基礎鉛直反力, 鉛直加速度

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⁾の提案したノモグラムを用いた健全度把握を実施している。一方、東海道新幹線には、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、その一部には、衝撃振動試験の健全度判定では基礎支持力は健全と判断されるにもかかわらず、列車走行時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いないが、1 日あ

たり最大 350 本以上の高密度運行に伴う上層梁部材のひび割れの動的開閉が、将来的に、中性化防止のために施工している表面保護工に亀裂を生じる等、中性化および鉄筋腐食の進展要因となることが懸念される。

今回、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を目的として、営業線にて増杭および地中梁による基礎補強を試験施工し、効果把握のための現地測定を実施した。現地測定は、鉛直反力算出のための保守用車載荷による静的沈下量および柱軸力測定、列車走行時の高架橋柱鉛直加速度測定、高架橋負担軽減を評価するための梁部材の応力測定を実施した。試験施工を実施した RC ラーメン高架橋の標準図に主な測定箇所記して図-1 に示す。本稿では、基礎補強試験施工の概要および、施工前後の測定結果について報告する。

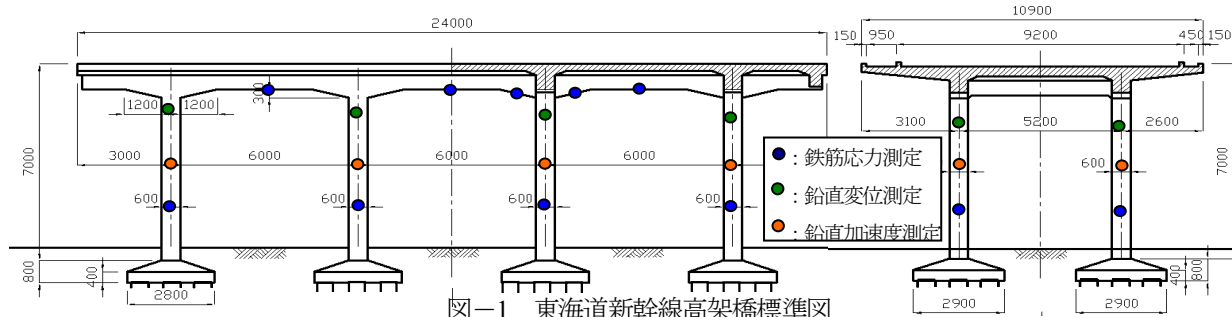


図-1 東海道新幹線高架橋標準図

2. 基礎補強試験施工の対象高架橋

基礎補強の試験施工対象となる高架橋は、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。

基礎補強施工前に測定した衝撃振動試験¹⁾により得られた全体系固有振動数は 2.8Hz、柱部分系の固有振動数は測定を実施した上線柱 4 本平均は 58.3Hz であった。衝撃振動試験は、重錘を用いて橋脚やラーメン高架橋の頭部に水平方向の衝撃を与え、得られた応答波形のスペクトル解析により、その構造物の固有振動数を把握し、健全度を調査する現地試験法である。橋梁下部構造物の健全度診断法として、鉄道において変状の発見・補強対策工の効果の確認に多数の実績がある。測定には（財）鉄道総合技術研究所の衝撃振動試験計測システム IMPACT を用いた。

図-2 に衝撃振動試験の概要図を示す。また、図-3 に試験施工高架橋の衝撃振動試験で得られた固有周波数を、関²⁾が提案したノモグラムに示す。同評価手法は、現地試験によって得られた構造物全体系一次の固有振動数と柱部分系2次の固有振動数を、健全な設計標準値と比較することでRC 躯体の剛性と基礎のバネ系を簡易に評価するものである。凡例のEI は柱剛性の低減度を示し、各EI のプロットは下方ほど地盤バネを低減した際の見安値を示している。

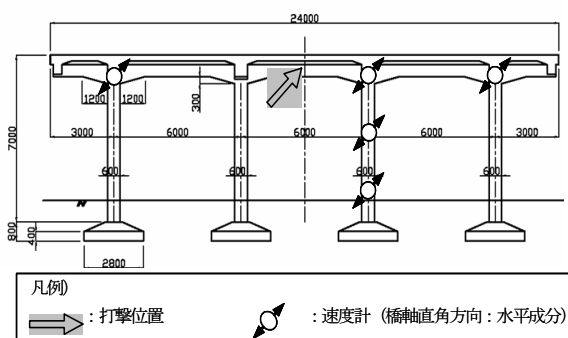


図-2 衝撃振動試験概要図

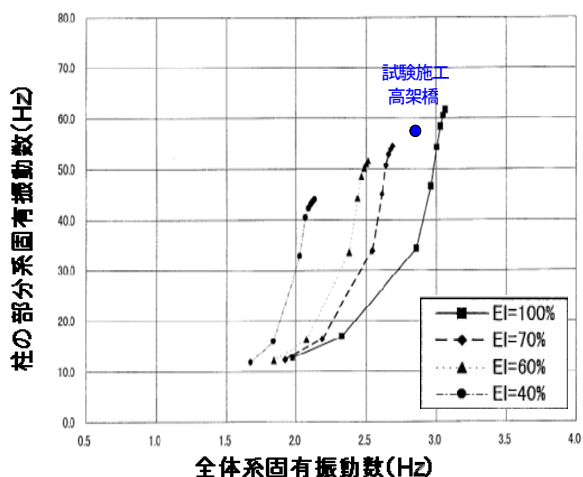


図-3 試験施工高架橋の衝撃振動試験結果

施工前の当該高架橋の固有周波数は、縦軸の柱部分系の固有振動数がノモグラムに示される目安値(各黒点)の上端付近に位置し、全体系の固有振動数がEI=100%と70%の間に位置している。

ノモグラムを用いた健全度判定では、当該高架橋の柱剛性は幾分低いものの許容範囲内である。一方、基礎に関しては、本ノモグラムは杭基礎を N 値 50 の基盤面で支持する構造で算出されている、試験施工測定値は目安値の上部付近に位置していることから当該高架橋の基礎支持力は問題ないものと考えられる。従って本稿では、基礎の鉛直反力を測定するため保守用車載荷による沈下量測定および柱軸力測定によりによる基礎鉛直反力把握することとした。

3. 基礎補強試験施工の対象地盤

試験施工箇所地層は沖積層である。図-3 に試験施工箇所の土層、標準貫入試験結果を示し高架橋の既設杭先端部を図示する。各地層は図-4 に示す①～⑤から構成され、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。図-4 に試験施工箇所の標準貫入試験結果を示し高架橋の既設杭先端部を図示する。

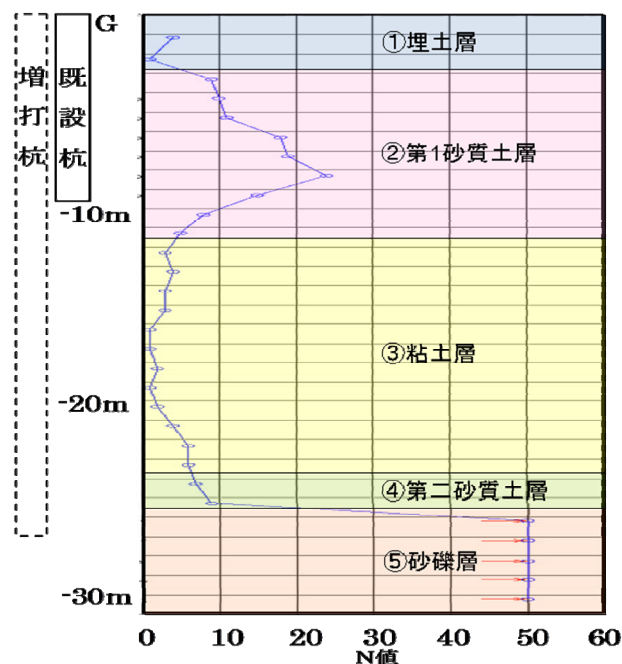


図-4 標準貫入試験結果

4. 基礎補強の概要

基礎補強は、基盤面に達する杭を増打し、既設 RC ラーメン高架橋のフーチング上部で、柱と地中梁を一体化し、列車走行時の活荷重の一部を増杭で分担する構造と

した。また、高架橋の死荷重は既設基礎で支持し、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慮し実施しない。基礎補強の概要図を図-4、5、6に示す（着色部が基礎補強による新設部）。

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。衝撃振動試験結果から、既設基礎の支持力は健全と考えられ、今回の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等を想定し、増杭のみでも高架橋の死荷重を支持できる仕様（杭径：600mm）とし、増杭先端はGL-26mの基盤面に達し、根入1mを確保するために増杭先端到達長はGL-27mとした。図-4に増杭の先端部を図示する。

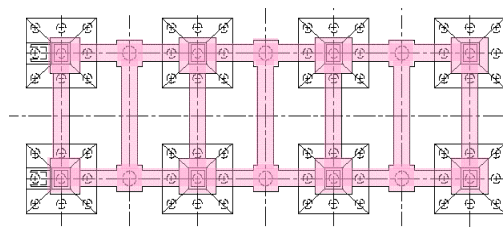


図-5 基礎補強の概要図(1)

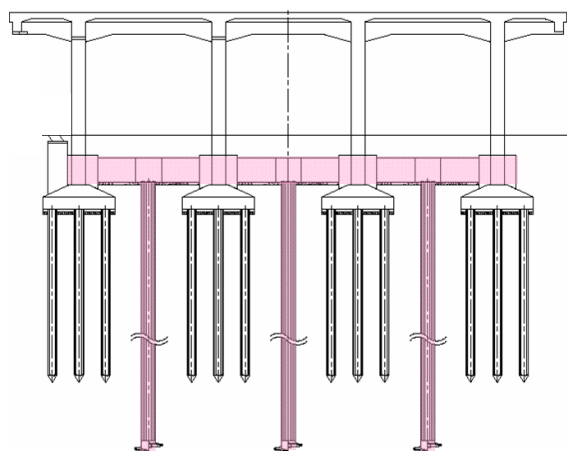


図-6 基礎補強の概要図(2)

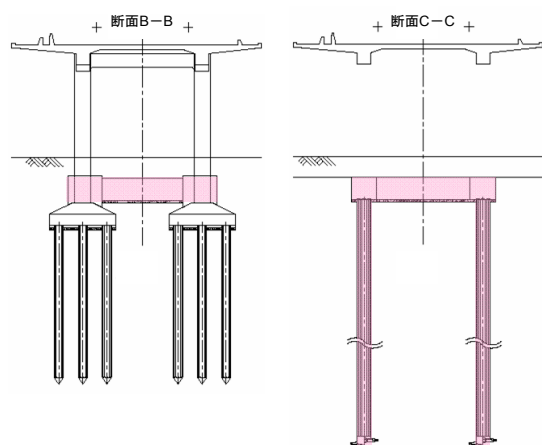


図-7 基礎補強の概要図(3)

基礎補強施工は、営業線高架橋の既設基礎に近接する増杭打設を伴うため、増杭は営業線近接工事であることに配慮し選定した。杭種は、構造物の隆起等を防止するため無排土杭、また、高架橋下での施工は約4.5mの空頭制限があり、継ぎ足しが容易であることが望ましい。施工時間帯も既設高架橋への影響を考慮し夜間となるため、低騒音であることが必要である。左記条件を満たす杭として試験施工では、回転圧入鋼管杭を用いた。杭打設は列車走行の無い夜間に鋼管を2m毎に溶接にて継ぎ足し施工した。今回採用した回転圧入鋼管杭は、先端の羽により土中に貫入するとともに中空の管内に土を取込む構造となっている。また、先端の羽は地層中で大きな先端支持力を有するとともに引抜抵抗も発揮するよう設計されている。回転圧入鋼管杭を写真-1に示す。



写真-1 回転圧入鋼管杭

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連結する形状とした。地中梁コンクリートの設計強度は $f_{ck} = 27.0\text{N/mm}^2$ 地中梁の主筋にはSD345のD29mmを地中梁上部および下部に各4本配置した。地中梁の柱周りおよび増杭周りは、断面を拡幅し柱を囲う構造とした。地中縦梁と高架橋柱の接続部は、柱を可能な限り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ている。図-8に高架橋柱と地中縦梁の接続部の概要を示す。

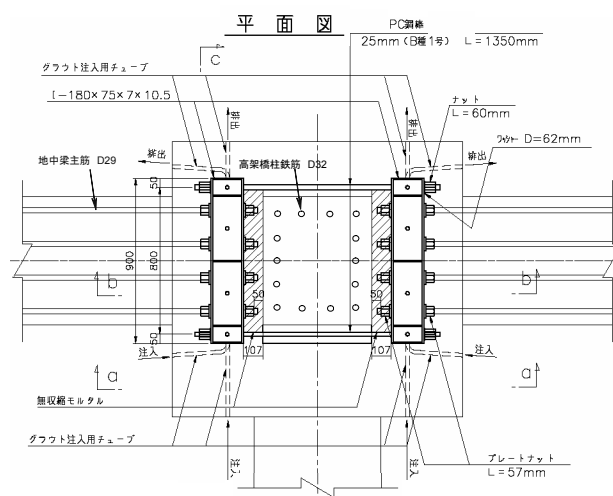


図-8 高架橋柱と地中梁の接続部の概要



(鋼管杭圧入)



(地中横梁と柱周り鉄筋組)



(地中梁鉄筋組全景)



(コンクリート打設)

写真-2 基礎補強施工状況



写真-3 地中梁完成時の状況

増杭と地中梁の接続部は杭頭補強筋を組み、地中梁下端から1.1mの深さまで中詰めコンクリートを打設した。また、地中梁のコンクリート打設時に既設柱周りに空隙を生じた場合に備え、地中梁コンクリート打設の翌日に既設柱鉄筋組部にグラウト注入を実施した。施工時間帯は、列車走行による振動が既設柱と地中梁の一体化に悪影響を与えるのを避けるため、鉄筋組および型枠組を除き夜間施工とした。また、地中梁施工により、既設柱のせん断スパン比が小さくなるため、基礎補強施工後に高架橋柱の鋼板巻きを実施した。鋼管杭圧入・地中梁の鉄筋組み・コンクリート打設の施工状況を写真-2に、地中梁完成後の写真を写真-3に示す。

5. 基礎鉛直反力向上効果

基礎補強による基礎鉛直反力向上度を把握するため、柱1柱あたりの鉛直反力を、現地測定および解析により算出した。現地測定における基礎鉛直地盤反力は、保守用車を当該高架橋に載荷した際の柱軸力および沈下量から算出し、解析には薄層法を用いた。

(1) 保守用車載荷による基礎の鉛直バネ算出

保守用車載荷による高架橋柱のバネ値測定は、営業線における測定であるため、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、営業列車の軸重とほぼ等しい車両を使用した(軸重11.5t、2軸、車両重量約23t)。測定は、基礎補強施工前・施工後に実施、測定機材は測定精度0.01mmを確保したラインゲージセンサーを用いた。測定機器は施工中存置するため、施工の障害となるのを避け柱上部に設置した。ラインゲージセンサーの不動点は、試験施工高架橋に隣接する東京・大阪方の高架橋の柱頭部とし、両不動点を鋼線で結び、試験施工高架橋の各柱頭部に設置したレーザーセンサーで、鋼線の鉛直変位を測定した。沈下量測定の概要図および沈下量測定位置を図-9に示す。

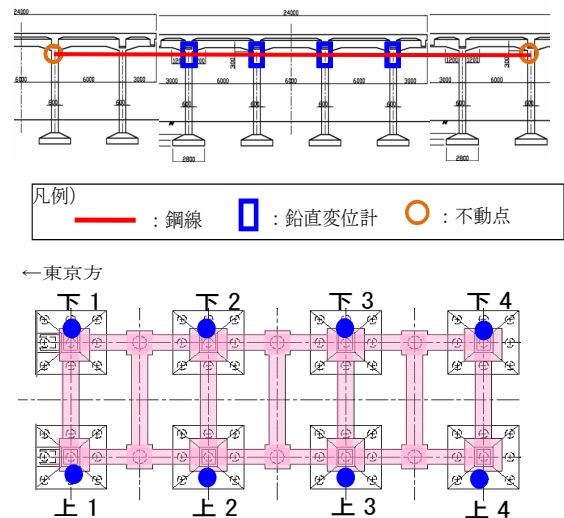


図-9 沈下量測定概要図

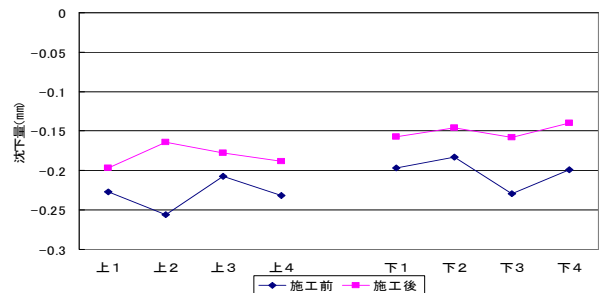


図-10 保守用車載荷による高架橋柱沈下量

表-1 1柱あたりの鉛直反力

	(×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

沈下量測定結果を図-10に示す。保守用車載荷による高架橋柱の沈下量は、最大で0.25mm程度と非常に小さい値であったが、平均沈下量が、施工前の0.22mmから埋戻し後0.17mmと約23%減少している。

また、同保守用車載荷時に測定した柱軸力を沈下量で割戻し算出した1柱毎の鉛直反力を表-1に示す。

鉛直反力は、全8柱中、中間柱は線路方向の2本の増杭と接続しているのに対し、端部柱は線路方向の1本の増杭と接続しており補強形式が異なるため、8柱平均に加え、基礎補強の補強形式の異なる中間柱（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。

上下線別では基礎補強前の鉛直反力は上線平均 $0.863 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、下線平均 $0.993 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、補強後は上線平均 $1.141 \times 10^6 \text{KN/m}$ 、下線平均 $1.422 \times 10^6 \text{KN/m}$ であり、基礎補強前後とも上線側の鉛直反力が小さい値となり、地層の傾斜等の可能性が考えられる。基礎補強により柱の鉛直反力は8柱平均 $0.928 \times 10^6 \text{KN/m}$ から $1.281 \times 10^6 \text{KN/m}$ と約38%向上している。中間柱と端部柱では、施工前の鉛直反力は同程度であるが、施工後は中間柱が $1.319 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し端部柱は $1.244 \times 10^6 \text{KN/m}$ であった。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異によると考える。

(2) 解析による鉛直反力算出

解析により基礎補強施工前後の1柱あたりの鉛直反力の算出を試みた。既設杭および増杭の鉛直反力の算出には薄層法³⁾（解析ソフト:TLEM）を用い、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1柱あたりの鉛直反力の算出は、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、中間柱および端部柱について左記を連バネ柱あたりの鉛直バネを算定した。図-11にモデル化範囲の模式図を、図-12に地中梁の剛性を考慮したバネ計算の概要図を示す。

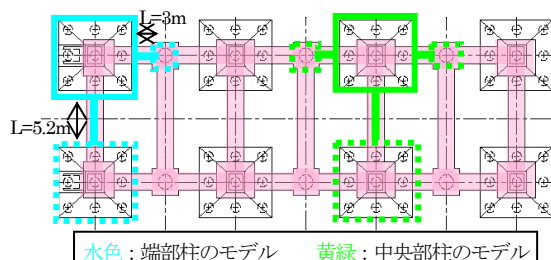


図-11 モデル化の範囲

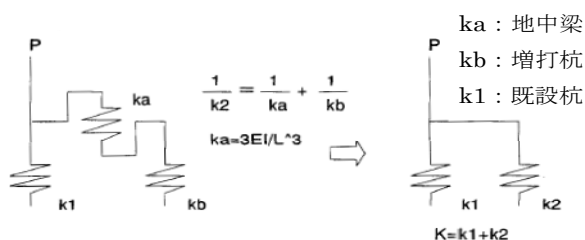


図-12 連バネ計算の概要図

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1柱あたりの鉛直反力は、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 $0.934 \times 10^6 \text{KN/m}$ でありほぼ一致している。一方、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 $1.244 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し、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、中間柱・端部柱とも解析値の方が低めの値となった。実測の値が大きいのは、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が寄与しているためと考える。また、解析でも実測同様に端部柱基礎は中間柱基礎に比べ鉛直反力向上度が小さい。今後の基礎補強の施工展開においては、中間柱基礎同程度の鉛直反力向上が見込める杭配置を検討する必要がある。

6. 高架橋柱の鉛直加速度低減効果

高架橋柱の鉛直加速度測定は、施工前後の測定により、基礎補強による鉛直加速度低減効果を把握した。

測定対象の営業列車は、18時～24時に通過する全列車（片線約50本）とした。加速度計は振動レベル計VM52（JISc1510準拠）を用い、加速度測定位置は柱中央部（ハンチ下2.3m）とした。加速度測定の測定箇所概要図を図-13に、柱へのセンサー取付け状況を写真-4に、施工前後の同一速度（265km/h）の下線の列車走行時の測定波形を図-14に示す。

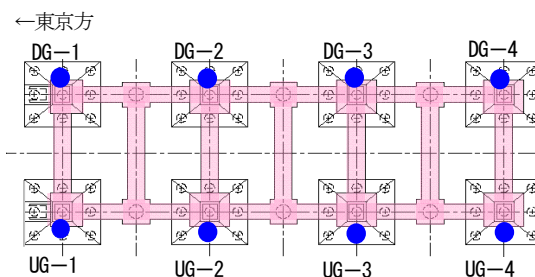
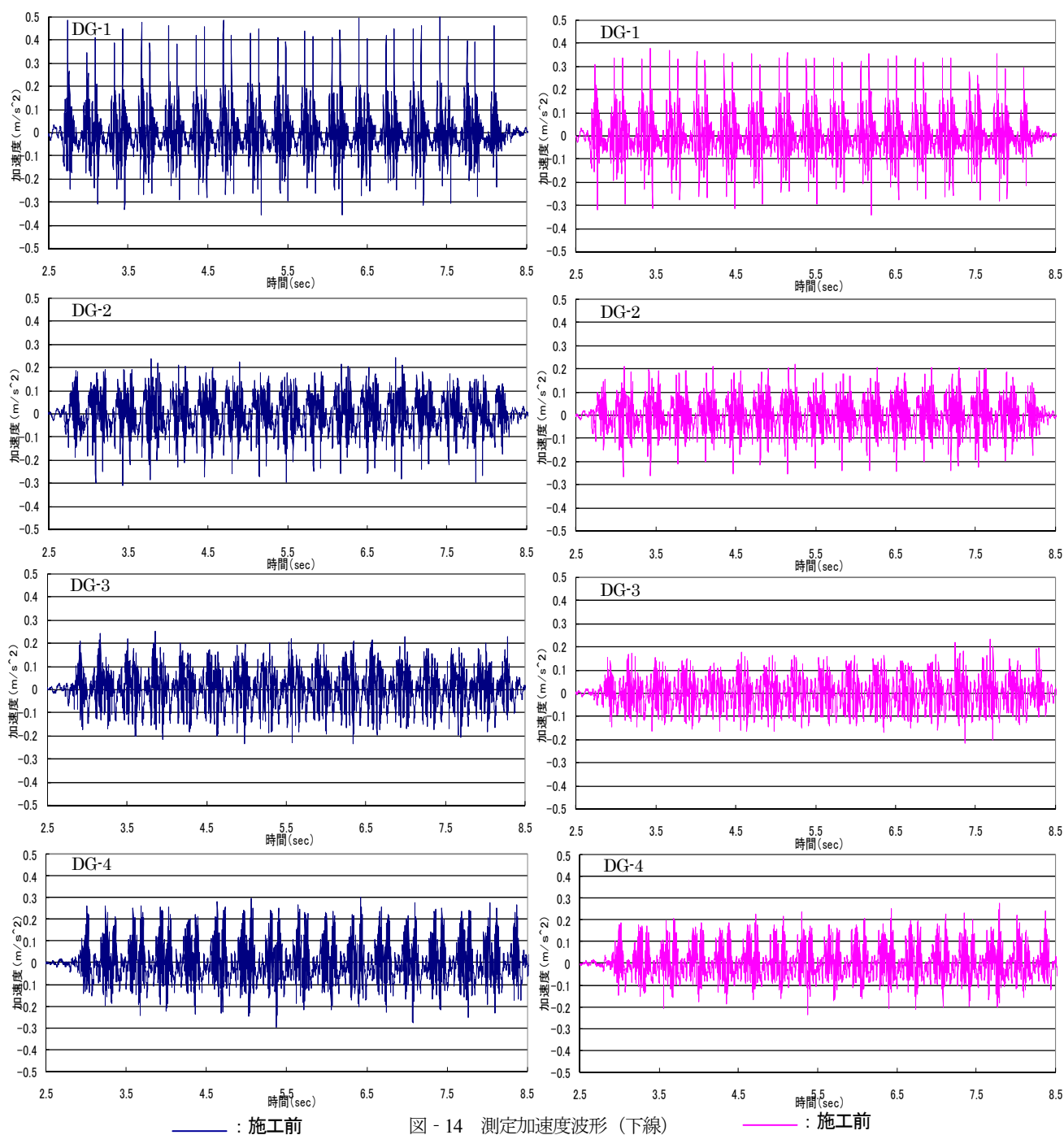


図-13 加速度計設置位置



写真-4 柱への加速度センサー取付け状況



施工前および施工後の各波形は下線を同一列車が走行した際に下線側柱で測定された加速度波形である。各線毎に波形を比較すると、DG-1の加速度が他より大きい。DG-1は、当該高架橋を列車が走行する際の進入側に位置する柱であり、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ある。

一方、施工前後を比較すると、加速度波形からは基礎補強施工後に鉛直加速度が低減している。加速度低減の程度を把握するため、加速度実効値(JISc2631)の最大値で整理し図-15に示す。また、営業線における多数の地盤振動測定事例より列車速度が増加しても振動レベルは必ずしも単調に増加しないため、異なる列車速度の

多数の測定データを用い、横軸に列車速度、縦軸に振動加速度レベルをとりグラフ化した。上下線各柱で測定された加速度実効値を比較すると、施工前後とも上線が下線に比べ 0.2m/s^2 程度高い。列車走行による加振力は、軌道狂い波形の影響を受け同一ではないと考えられるため厳密な比較は困難であるが、上り線下り線の1柱あたりの鉛直反力は表-1に示すとおり施工前後とも上り線柱の方が低く、上線の振動加速度レベルが高いことと整合している。基礎補強施工前後を比較すると、上下線とも施工後に2割程度低減していることが分かる。また、図-13の振動波形と同様に、走行する列車の進入側の柱であるDG-1・UG-4については、施工前後とも他の柱に比べ 0.2m/s^2 程度大きな値となっている。

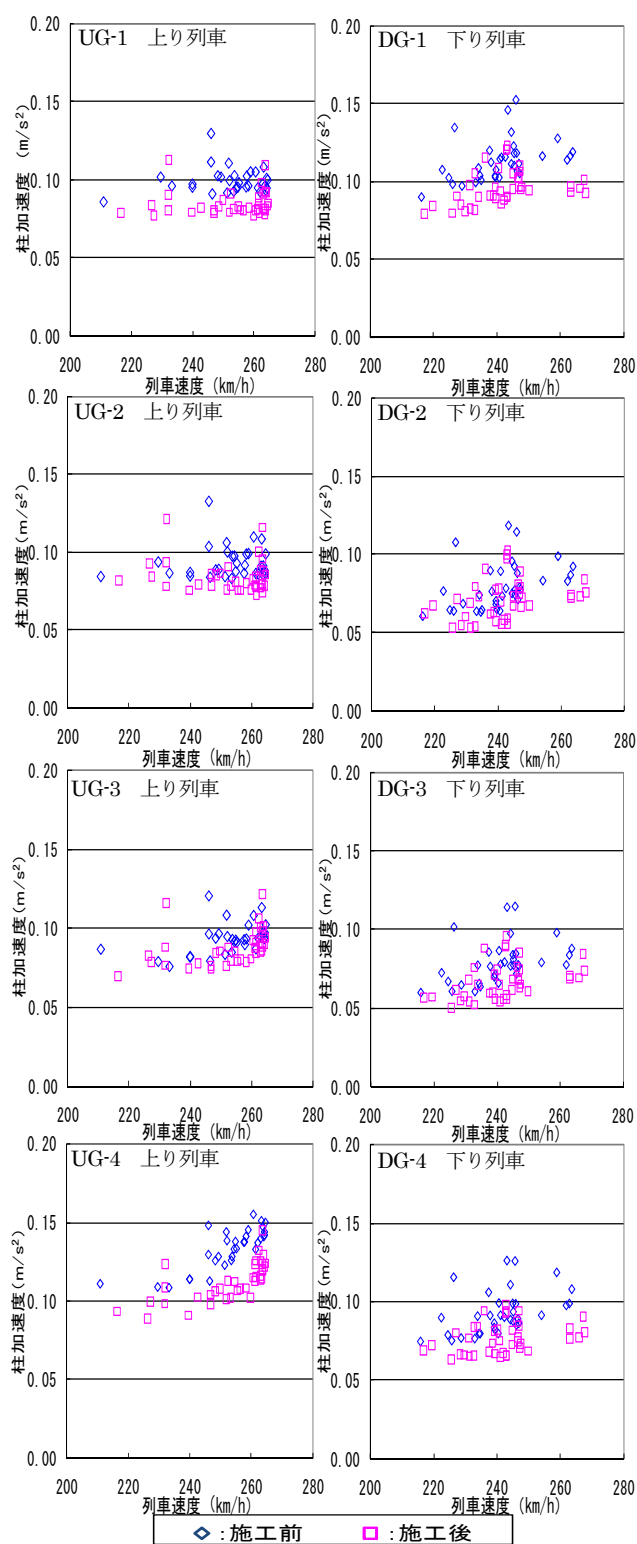


図-15 各柱の振動加速度実効値

基礎補強による加速度低減効果の周波数帯毎の特性を把握するため、下線測定箇所について同一速度の列車通過時の加速度波形をもとに周波数分析（1/3 オクターブ分析：JISc1513）を実施した。周波数分析結果は加速度レベル（VAL：JISc1510）で整理し、施工前の値と施工後の値の差をとった。周波数分析の対象波形系は、図-14 に示す下り列車を下線側柱で測定した波形である。

図-16 に周波数分析結果を示す。周波数分析結果からは、ばらつきが大きい1/3 オクターブバンド中心周波数帯で概ね 16Hz 以下で比較的大きく低減していることが読み取れる。また、中間柱である DG-2・DG-3 は、端部柱である DG-1・DG-4 に比べ特に 6.3～12.5Hz の周波数帯で低減幅が大きい。中間柱と端部柱の振動低減幅の差は、基礎と増杭の地中梁による接続数の差によると考えられる。柱鉛直加速度測定結果から、基礎補強は、各柱の鉛直加速度で 2 割程度の低減効果があり、周波数分析結果より 16Hz 以下の周波数成分、特に 6.3～12.5Hz の低減度が大きいことが確認された。

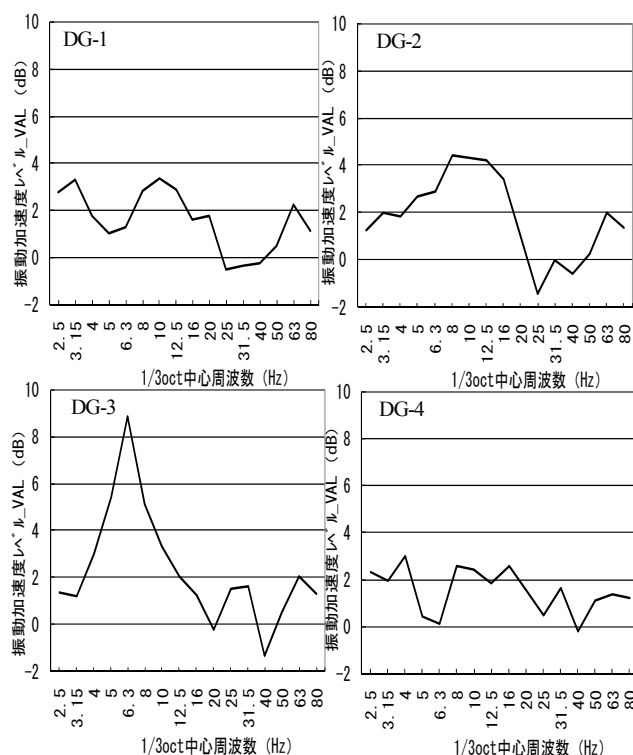


図-16 各柱の振動加速度レベルの差

7. 上層梁部材の応力低減効果

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-17 に、測定結果を図-18・19 に示す。

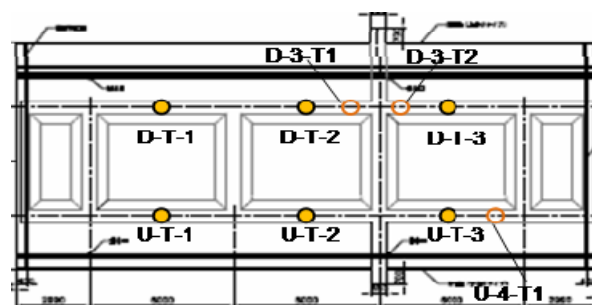


図-17 上層梁鉄筋応力測定位置

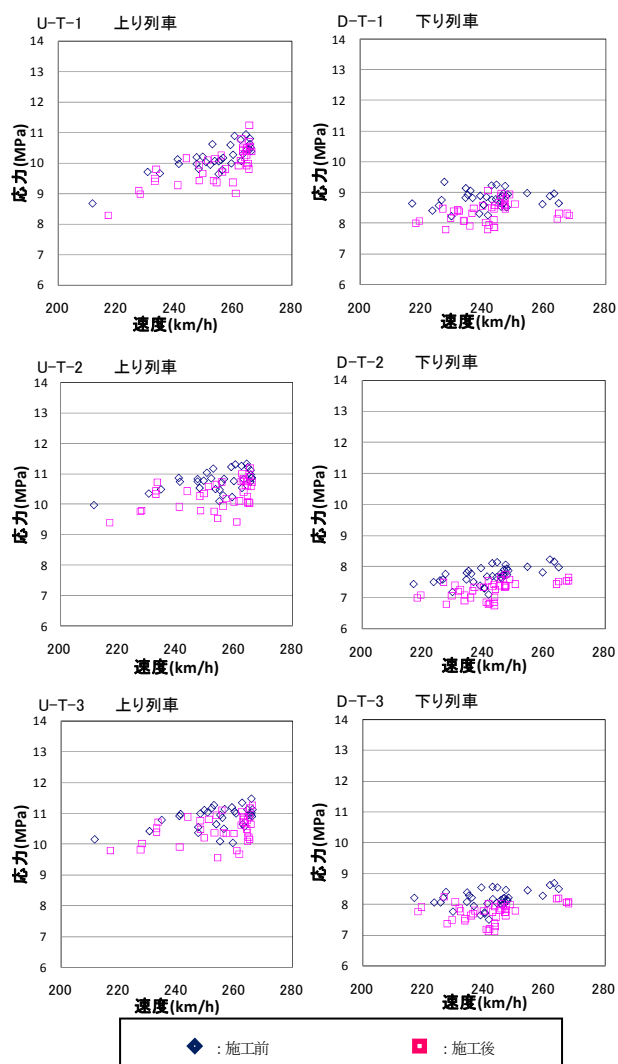


図-18 縦梁中央部の鉄筋応力

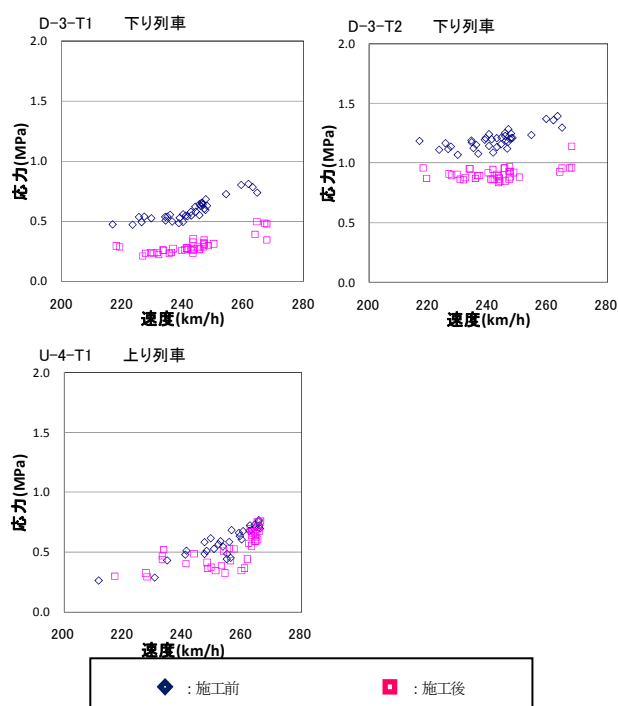


図-19 縦梁ハンチ部の鉄筋応力

縦梁鉄筋応力は、上下線とも当該線を列車が走行した際に測定された縦梁下側の主鉄筋の応力である。基礎補強施工前後を比較すると、縦梁中央部の鉄筋応力は0.5MPa程度、縦梁ハンチ部は、0.2～0.3MPa程度低下している。応力低減は縦梁中央部のほうが大きい。測定された応力がハンチ部の方が小さいため低減割合はハンチ部（D-3-T1・D-3-T2・U-4-T1）が大きい。測定結果より基礎補強は特に上層梁ハンチ部の応力低減に効果があると考えられる。

8. 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。測定は、鉛直反力算出のための保守用車載荷による静的沈下量測定および柱軸力測定、列車走行時の高架橋柱鉛直加速度測定、列車走行時の高架橋負担軽減を評価するための梁部材の応力測定を実施し基礎補強による効果を確認した。主な測定結果を以下に記す。

(1) 基礎補強の施工により、保守用車載荷時の高架橋柱の平均沈下量は0.22mmから0.17mmに約23%減少した。柱の鉛直反力は8柱平均 $0.93 \times 10^6 \text{KN/m}$ から $1.28 \times 10^6 \text{KN/m}$ と約38%向上。中間柱と端部柱では、施工前の鉛直反力は同程度であったが、施工後は中間柱が $1.32 \times 10^6 \text{KN/m}$ に対し端部柱は $1.24 \times 10^6 \text{KN/m}$ であった。鉛直反力向上は、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られる。また、中間柱と端部柱の鉛直反力向上度の差は、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1本の増杭しか接続していない補強構造の差異に起因しているものと考えられる。

(2) 1柱あたりの鉛直反力に関する解析値は、施工前には実測値とほぼ一致。施工後は、解析値は中間柱・端部柱とも実測値より低い値となった。これは、解析では地中梁底面の反力を考慮していないためと考えられる。

(3) 柱鉛直加速度測定より、基礎補強による振動加速度で2割程度の加速度低減効果があることを確認。周波数分析より基礎補強による振動低減は16Hz以下の周波数成分、特に6.3～12.5Hzの低減度が大きいことが確認された。また、端部柱は中間柱に比べ同周波数帯の低減幅が小さい。高架橋基礎と増杭との接続数の差異により基礎補強による鉛直反力向上度に差が生じたと考えられる。

(4) 柱鉛直加速度測定より、列車の進入側となる柱の加速度が他より大きい。同部位には隣接高架橋から列車が乗込む際の衝撃により、他の部位より大きな加振力が生じていることが考えられる。

(5) 上層梁鉄筋応力測定より基礎補強により鉄筋応力が低減することを確認。特に、基礎補強はハッチ部の負担軽減に効果的であると考えられる。

本稿では、現地測定により、中間支持杭の高架橋等に対する鉛直加速度低減工法として、基礎補強が有効であることを確認した。しかし、柱下部と増杭との地中梁による接続数の差に起因し、端部柱基礎の鉛直反力向上度は中間部柱に比べ小さく、また、加速度低減効果も端部柱は中間部柱に比べ小さい。基礎補強の施工展開に向けて端部柱の鉛直反力向上度の改善が課題であると考え。今後は列車走行時の加振による高架橋応力への影響を基礎鉛直反力に着目して整理し、施工対象箇所を抽出するとともに、増杭および地中梁の仕様の精査、部上下線間への増杭追加による鉛直反力向上度、鉛直加速度低減および高架橋応力低減度について解析等を実施し、より効果的な高架橋の鉛直加速度低減工法の検討を進めていく。

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，博士論文，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

(2009年9月24日受付)