

論文 都市高速道路高架橋におけるフーチングレス化・壁高欄のフルプレキャスト化の構造検討および実構造物への適用性検証

伊原 茂^{*1}・岩城 孝之^{*2}・山本 多成^{*3}

要旨: 労働力人口が減少する中で、首都高速道路をはじめとする都市高速道路の高架橋建設・更新に向けて、生産性・維持管理性の向上等を可能とする高架橋構造の開発は急務な課題である。本研究では、これまで不可欠と考えていた下部構造のフーチングを省略した上で耐荷性能を有する橋脚構造の詳細検討、フルプレキャスト壁高欄の構造検討および実験的検証を行い、新たな高架橋構造を提案した。さらには、本構造を首都高速 1 号羽田線東品川栈橋・鮫洲埋立て部の大規模更新事業の迂回高架橋に適用し、現場における生産性・維持管理性の向上等の効果について検証した。ここでは、その詳細内容について述べることにする。

キーワード: 高耐震性パイルベント橋脚、フーチングレス化、二重鋼管接合構造、フルプレキャスト壁高欄

1. はじめに

現在、首都高速道路の交通量は約 100 万台/日、供用延長は約 320km に達しており、そのうち、高架橋は約 76% を占めている。高架橋の多くは鋼構造で、下部構造（基礎杭、基礎フーチング、橋脚）、支承、上部構造（主桁、床版）、橋面（壁高欄、舗装）の要素から構成されている。その中で、本研究では、今後の労働者人口減少を見据えて、生産性・維持管理性の向上に関する技術知見・報告が比較的少ない下部構造および壁高欄に着目した。

下部構造には、上部構造の荷重を基礎・地盤へ確実に伝達する機能および長期的に安定した耐荷性能を有する性能が要求される。都市高速道路高架橋には、図-1 に示すように鋼製橋脚の定着構造であるアンカーフレームを埋設し、基礎杭へのスムーズな力の伝達機能を担うフーチングがある。標準的な高架橋の場合、フーチング高さは約 4m~5m を必要とするため、既設構造物が近接する場合、フーチングの構築が困難である。そこで、伊原¹⁾ は、図-2、写真-1 に示すようにアンカーフ

ム代替構造として、鋼製橋脚の定着深さを低減できる鋼製格子部材を埋設した合成構造フーチングを開発し、載荷実験および非線形 FEM 解析により要求性能を検証し、フーチング高さを約 2m まで抑えることができた。

これに対して本研究では、フーチングを省略した上で耐荷性能を確保できる橋脚構造を詳細に検討し、生産性・維持管理性向上を図ることを目的とする。フーチングレスの代表的な構造として図-3 のパイルベント橋脚がある。従来のパイルベント橋脚は、単列杭を所定の高さまで立ち上げ、杭頭部を鉄筋コンクリート等で結合した形式である。しかし、単列杭のため橋軸方向の剛性が小さく、地震時の応答変位が大きくなるなど耐震性能が低い。そこで、左右 2 列の杭配置による耐震性向上・桁下空間の確保および横梁部のプレキャスト化を図り、動的解析により要求性能を検証した。本構造は、合成構造フーチングと比べて開削工事を伴わないため、経済性に優れている。ただし、地中に既設構造物が近接している場合でも対応可能であるが、さらに地上部の桁下空間に

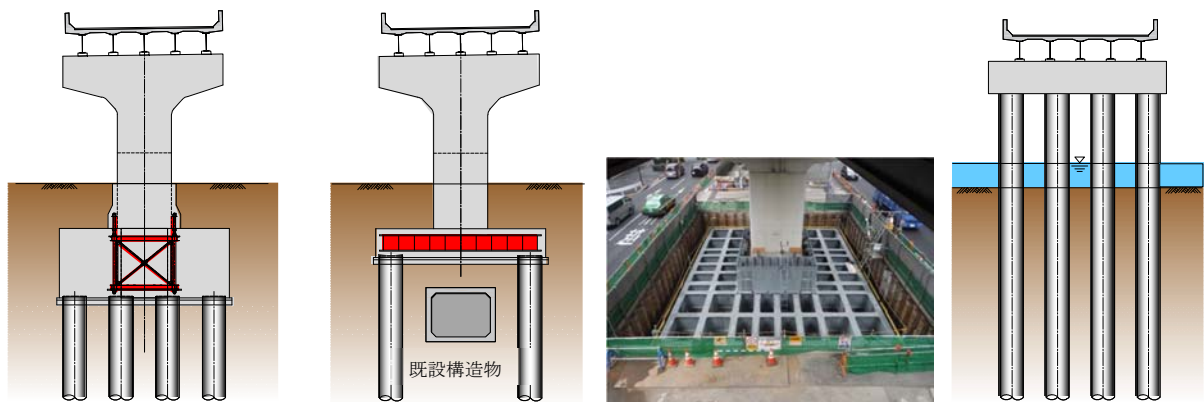


図-1 アンカーフレーム構造 図-2 合成構造フーチング 写真-1 鋼製格子部材 図-3 パイルベント橋脚

*1 首都高速道路（株）プロジェクト部構造設計室 博士（工学）（正会員）

*2 （株）大林組 生産技術本部橋梁技術部

*3 （株）大林組 東京本店首都高東品川 JV 工事事務所

制約条件がある場合には、杭配置が困難と考えられる。

一方、壁高欄に関しては、車両が路外に逸脱しない、また、進行方向に復元させる機能および車両の逸脱防止性能、乗員の安全性能、車両の誘導性能、構成部材の飛散防止性能が要求される。現在、プレキャスト化が進んでいる中で、壁高欄ブロック同士を PC 鋼材で橋軸方向に約 20m~30m まで一括連結し、壁高欄と床版部をアンカーで一体化するタイプ、壁高欄同士を孔あき鋼板ジベルで接合し、壁高欄と床版の接合にループ継手を用いて、現場で高耐久性モルタルを打設するタイプがある。しかし、これらは、車両が交通事故等で壁高欄に損傷を発生させたとき、損傷部分のブロックだけを取り替えることは困難である。そこで、ボルト固定式のプレキャスト壁高欄を開発し、衝突実験の結果、壁高欄同士をボルト連結することで損傷時の部分的な取替えを可能とした。

以下では、生産性向上・維持管理性の向上に寄与する都市高速道路の高架橋構造として、下部構造のフーチングレス化および壁高欄のフルプレキャスト化に関する詳細検討、さらには、実構造物への適用性を検証した内容について詳細を述べることにする。

2. 新たな高架橋構造の提案

新たな高架橋構造として、表-1 に示すとおり下部構造にはプレキャスト化を全面的に適用した高耐震性パイルベント橋脚によるフーチングレス化、上部構造には工

場製作の鋼桁、橋面構造にはプレキャスト RC 床版、フルプレキャスト壁高欄からなる支間長 30m を標準とする鋼 3 径間連続合成鋼桁橋を提案する。

表-1 新たな高架橋構造

幅員	9.2m (有効幅員 8.0m, 2 車線)
上部構造	支間長 30m, 橋長 90m
	鋼 3 径間連続合成鋼桁橋 (5 主桁, 桁高 1150mm) プレキャスト RC 床版 (床版厚 210mm, $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$)
下部構造	高耐震性パイルベント橋脚
	プレキャストピアキャップ ($\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$) 両面リブ付鋼管: $\phi 1400\text{mm}$, SKK400, 板厚 14mm
	鋼管杭 ($\phi 1200\text{mm}$, 長さ 25m) 上杭 (外面リブ付鋼管含む) SKK400, 板厚 20mm, 下杭 SKK490 板厚 16mm

2.1 高耐震性パイルベント橋脚構造

現場で支持層の変化に柔軟に対応できる継ぎ杭が可能で機械式継手が使用できる鋼管杭の適用を考えた。本研究では、鋼管杭を左右に橋軸方向 2 列で杭間隔を杭径の 2.5 倍とし、これらを杭頭部のピアキャップで剛結することで幾何学的剛性を高めて耐震性能を向上させることとした。また、左右に配置する鋼管杭の間には工事車両の動線確保、供用後の高架橋下の構造物点検が容易にできるようにスペースを確保する。

2.2 ピアキャップのプレキャスト化

(1) 鋼管杭とキャップの接合構造

図-4 に示すようにピアキャップをプレキャスト化するために、キャップ 2 ブロックとキャップ同士を連結する

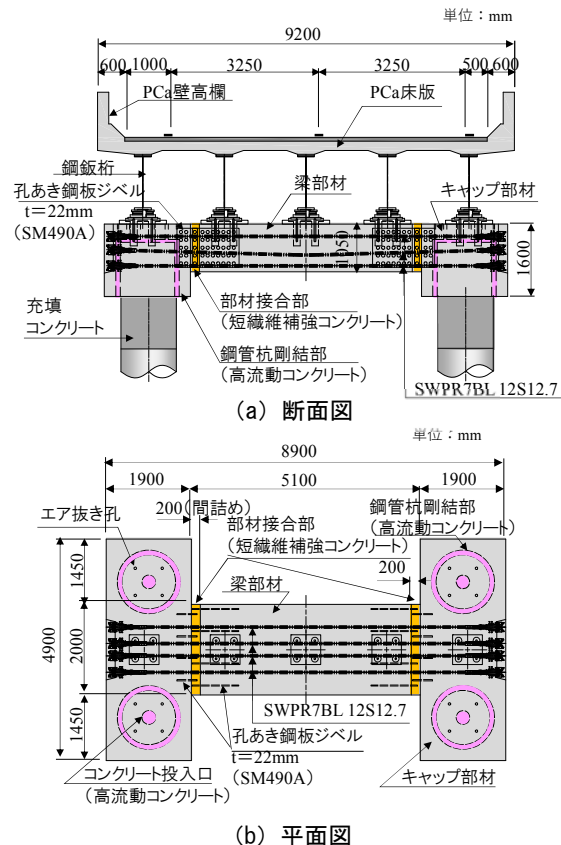


図-4 ピアキャップ構造詳細

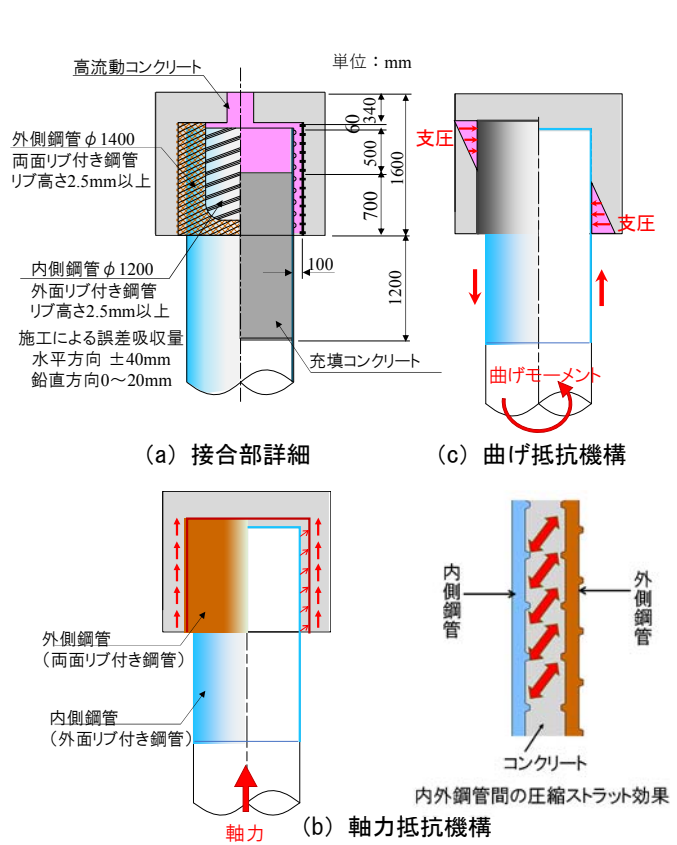


図-5 リブ付き二重鋼管接合構造

る横梁ブロックの3ブロックに分割することとした。コンクリート配合は表-2のとおりである。

表-2 ピアキャップのコンクリート配合

設計基準強度 (N/mm ²)	セメントの種類	スランブ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)
50	普通	18±2.5	20	4.5±1.5

第一の課題は、鋼管杭頭部とキャップの接合構造である。杭頭部に作用する地震時の曲げモーメントが大きく、ピアキャップを鉄筋コンクリート構造とした場合、杭頭部の主鉄筋量が多くなり、配筋が極めて困難となる。また、鋼管杭とキャップの接合部における施工誤差を吸収しつつ、曲げ耐力を確保できる構造とする必要がある。そこで、鋼管杭とキャップの剛結部には、図-5に示す「リブ付き二重鋼管接合構造」を採用した。リブ付き鋼管とは、鋼管面にスパイラル状のリブを付けた既製鋼管であり、リブ高さは2.5mm以上、リブ幅は4mm以上20mm以下、リブ間隔は30mm以上40mm以下、材質SKK400、直径1200mm(内側)、直径1400mm(外側)、板厚20mmである。本構造の鉛直荷重の伝達は、両面リブ付き鋼管を埋設したキャップと外側リブ付き鋼管杭の間に充填したコンクリートの圧縮ストラット効果により行われる。一方、地震時における杭頭部に作用する曲げモーメントに対しては、内側鋼管の外側リブと外側鋼管の内側リブの間の充填コンクリートの支圧応力がコンクリート強度に達するまで抵抗する。内側鋼管内の充填コンクリートの範囲は、図-5(a)に示すとおり内側鋼管が内側に座屈しないようにピアキャップ下端から1D(D:内側鋼管径1200mm)までとし、表-3にコンクリート配合を示す。また、外側リブ付き鋼管のキャップへの埋込み長は、内側鋼管径1200mm以上とし、内側リブ付き鋼管の抜き出しを防止する。これらに関しては、本構造の性能確認試験²⁾により検証されている。

表-3 充填コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	セメントの種類	スランブフロー (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)
50	普通	15±2.5	20	4.5±1.5

第二の課題は、構造成立の必要条件であるプレキャスト部材と鋼管杭の一体化である。非常に狭隘な空間を充填し結合する間詰めコンクリートの施工では、クリアランスの小さい鋼管杭直上(杭頭部)と鋼管杭側部(二重鋼管間のすき間)の未充填を防止することが重要である。そのため、自己充填性ランク1の性能³⁾が確保できる膨張材20kg/m³を混入した表-4の高流動コンクリートを用いることとする。

(2) キャップ部と横梁ブロックの接合構造

キャップ部と横梁ブロックの接合部では、孔あき鋼板ジベルの設置によりせん断耐力確保、表-5のポリプロピレン短繊維を混入したコンクリートの打設、曲げ耐力確保のためにプレストレス導入により一体化を図り、鉄筋組立を省略することとした。これにより、キャップのプレキャスト化、コンパクト化が図れ、横梁高さを低く抑えることができた。このように、高耐震性パイルベント橋脚はプレキャスト化だけでなく、鋼管杭とキャップ、キャップと横梁ブロックの接合部の鉄筋組立作業の省略および高架橋下の維持管理空間の確保ができ、生産性・維持管理性の向上が図れる。

表-4 高流動コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	セメントの種類	スランブフロー (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)
50	普通	67.5±7.5	20	2.0±1.5

表-5 短繊維補強コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	セメントの種類	スランブ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)
50	普通	18±2.5	20	4.5±1.5

2.3 鋼管杭の断面決定

鋼管杭の板厚の決定に際しては、局部座屈に対する許容応力度が上限となる範囲で、補剛材が不要となる最小板厚を設定し、点検・補修が困難な地中部では塑性化させないように静的・動的解析により断面決定を実施した。動的解析においては、入力地震波は3種地盤を想定したタイプ2の3波を採用し、3波平均で杭頭部、地中部における応答曲げ、応答曲率、降伏曲率、終局曲率を検証し、損傷の有無を確認した。表-6は動的解析による鋼3径間連続合成鋼桁橋の中間橋脚の橋軸方向および橋軸直角方向の曲率照査結果を示す。橋軸直角方向の照査において、杭頭部(充填部)に降伏が見られるが、実構造物への適用性検証の対象は、後述の迂回路高架橋としており、供用期間が約6年~7年のため、杭頭部の塑性化を許容することとした。

表-6 動的解析による中間橋脚の曲率照査結果

鋼管杭諸元	上杭:直径1200mm SKK400, 板厚20mm 下杭:直径1200mm SKK490, 板厚16mm		
	杭頭部 (充填部)	杭頭部 (未充填部)	地中部
橋軸方向の 応答曲率 (1/m)	1.33×10 ⁻³	1.52×10 ⁻³	1.88×10 ⁻³
橋軸直角方向の 応答曲率 (1/m)	2.65×10 ⁻³	1.99×10 ⁻³	1.57×10 ⁻³
降伏曲率 (1/m)	1.61×10 ⁻³	2.14×10 ⁻³	2.86×10 ⁻³
終局曲率 (1/m)	1.85×10 ⁻²	2.13×10 ⁻²	1.93×10 ⁻²

3. フルプレキャスト壁高欄

3.1 構造概要

写真-2 が研究開発したフルプレキャスト壁高欄である。図-6、図-7 に示すとおり、壁高欄部材同士の連結を曲がりボルト接合、壁高欄と床版との固定をアンカーボルト接合とし、床版部固定用アンカーボルトは、床版に埋め込んださや管構造を有する支圧板に接合することで固定した。設計に際しては、壁高欄同士の接合部をせん断キー構造とすることで衝突荷重が部材間連結ボルトにスムーズに伝わるようにした。また、床版の損傷を回避するために、壁高欄同士の連結ボルトは床版部固定アンカーボルトよりも先行降伏するようにし、さらに、ボルトの防食を考慮して箱抜き部を無収縮モルタルで埋めることとした。本構造は、運搬を考慮して1ブロックの長さ4mとし、損傷等によるブロック取替えを容易にした。



写真-2 開発したフルプレキャスト壁高欄

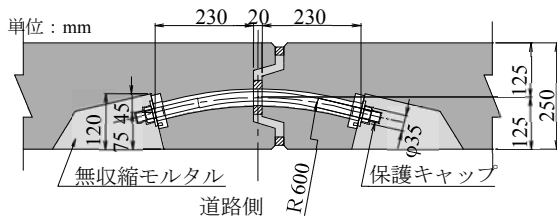


図-6 壁高欄部材同士の接合構造

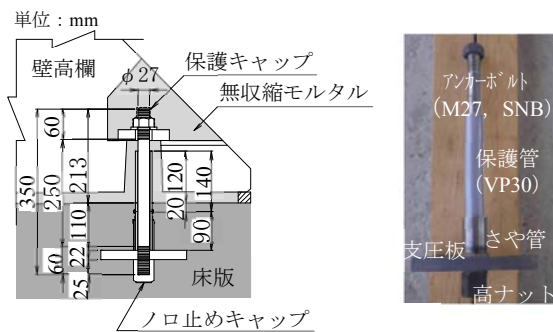


図-7 壁高欄と床版の接合構造

3.2 静的載荷実験

(1) 実験概要

本実験における壁高欄は、首都高速道路における標準形状とし、車両衝突条件はSB種とした。壁高欄の設計荷重時の構造安全性能および破壊に至るまでの各部材の応力状態を確認するために、図-8 に示す実物サイズの

供試体を用いた静的載荷実験を行った。No.1 供試体は、表-7、図-9 のとおり床版部固定アンカーボルトの性能を検証するためにアンカーボルトの直上に載荷した。一方、No.2 供試体は、曲げ性能の検証のために連結部中央に、No.3 供試体はせん断抵抗性能を検証するために連結部の片側に偏心させた位置に載荷した。

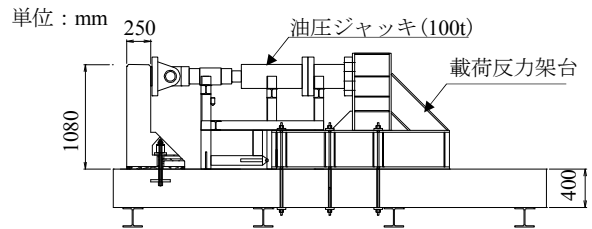
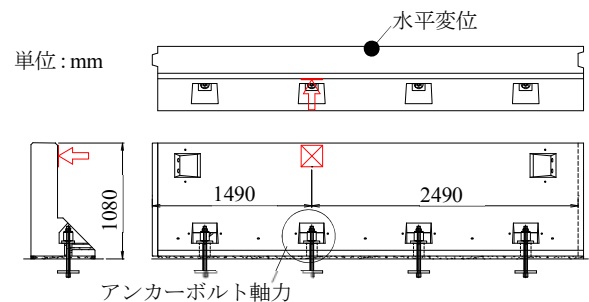


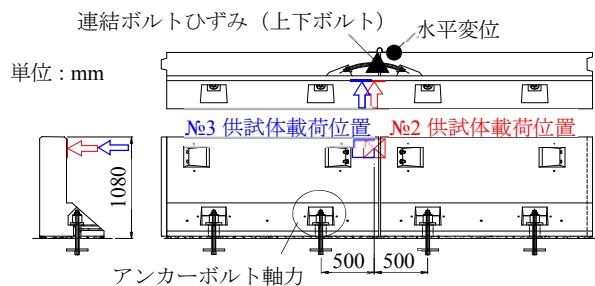
図-8 載荷実験方法

表-7 供試体の種類および目的

供試体		目的
No.1	L=4m	床版部固定アンカーボルトの性能検証
No.2	L=2m×2	部材間連結部の曲げ性能検証
No.3	L=2m×2	部材間連結部のせん断抵抗性能



(a) No.1 単体供試体 (L=3980mm)



(b) No.2, No.3 連結供試体 (L=1980mm×2)

図-9 各供試体の載荷位置および測定箇所

(2) 実験結果

図-10 に各供試体の荷重と壁高欄水平変位の関係を示す。各供試体ともに初期ひび割れ発生荷重は、146kN~178kN(平均165kN)であり、最大荷重は設計荷重(81kN)の約4倍の約324kNであった。また、2m連結の供試体No.2, 3は4m一体のNo.1と同様な荷重変位関係にあることから、連結ボルトによる曲げ・せん断力伝達が十分機能し連続版として挙動していると考えられる。

図-11 に各供試体の荷重と床版部固定アンカーボルト軸力の関係を示す。なお、軸力は、各供試体ともに壁高欄の左端部から2つ目の床版部固定アンカーボルトの値とした。床版部固定アンカーボルト軸力は、全ての供試体で概ね同様な増加傾向を示しており、最大荷重時の軸力は同等であった。なお、いずれのアンカーボルトも降伏には至らなかった。

図-12 に各供試体の荷重と連結ボルトひずみの関係を示す。なお、ひずみの測定値は上段ボルト、下段ボルトともに連結ボルト中央部の上下に貼付けたひずみゲージの平均値とした。供試体 No.2, No.3 とともに、上段ボルトに発生するひずみの方が下段ボルトに比べて大きく、曲げの影響が大きい供試体 No.2 の方が、ひずみは大きい傾向にあった。また、荷重が 194kN で目地上部のひび割れが発生した後、ひずみの増加傾向に変化は見られるも

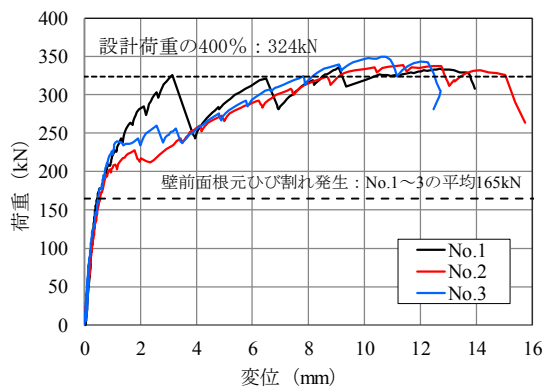


図-10 荷重-水平変位の関係

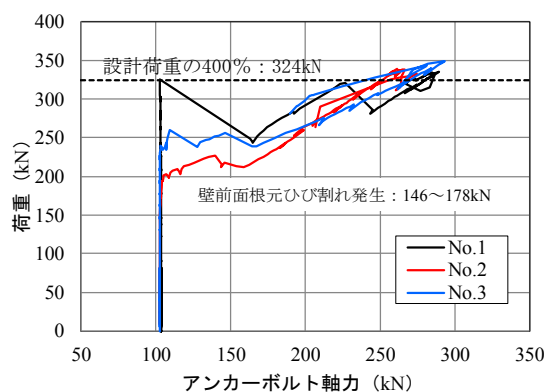


図-11 荷重-アンカーボルト軸力の関係

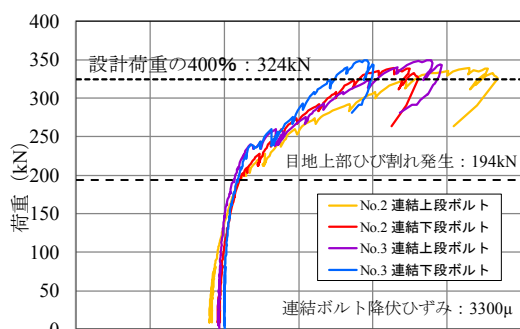


図-12 荷重-連結ボルトひずみの関係

の、いずれの連結ボルトも降伏には至らなかった。

図-13 に供試体 No.2 のひび割れ状況を示す。最大荷重以後は、地覆アンカーボルト箱抜き部の押抜きせん断ひび割れが拡大することで破壊に至った。なお、実験終了後、高欄同士および高欄と床版の接合ボルトは容易に取替えることが可能であり、維持管理性に優れていることを確認した。

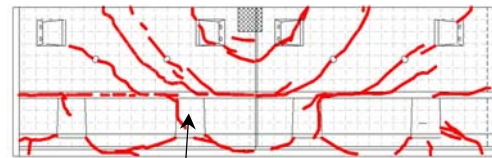


図-13 供試体 No.2 のひび割れ状況(道路側)

3.3 実車衝突実験

(1) 実験概要

本実験では、建設省道路局道路環境課長通達「車両用防護柵性能確認試験方法について(平成10年11月5日)」に示されている性能を満足することを検証した⁴⁾。なお、供試体は延長 24m (4m 壁高欄×6 ブロック) とし、実験施設の能力により 20 トン車両を用い、防護柵設置基準と同等の衝撃度となるように表-8 のとおり衝突速度および角度を設定した。

表-8 衝突実験条件

衝突車両	試験条件			
	車両質量 (t)	衝突速度 (km/h)	衝突角度 (度)	衝撃度 (kJ)
大型車	20 (25)	56 (65 以上)	20 (15)	283 (280 以上)

() 内の数値は、防護柵設置基準に記載されている値

(2) 実験結果

写真-3 に衝突時の車両状況を示す。衝突実験の結果、表-9 に示すとおり、車両の逸脱防止性能、車両の誘導性能、構成部材の飛散防止性能等の全ての要求性能を満足していることが判明した。また、衝突実験後のボルトの取替えは容易に行うことができ、約 1 時間で完了した。

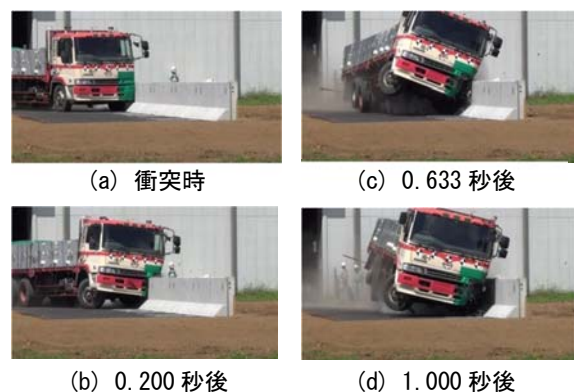


写真-3 衝突時の状況



写真-4 横梁ブロック架設



写真-5 壁高欄のブロック架設



写真-6 工事完成状況

表-9 衝突実験結果

性能項目	実験結果
強度性能	壁高欄が連続保持され、突破しない強度を有する
変形性能	主たる部材に塑性変形は生じていない
車両の挙動	横転することなく誘導されている
離脱速度	衝突速度 56.9km/h の 80.1% (45.6km/h)
離脱角度	衝突角度 20.2 度の 14.9% (3.0 度)
部材の飛散	構成部材の飛散は見られず、部材の取外れもない

4. 新たな高架橋構造の実構造物への適用性検証

本研究で開発した高耐震性パイルベント橋脚およびフルプレキャスト壁高欄を導入した高架橋構造を京浜運河に位置する首都高速 1 号羽田線東品川栈橋・鮫洲埋立て部の更新事業の迂回路高架橋(上り 2 車線, 延長 1.9km, 交通量約 36,000 台/日)に適用した。

高耐震性パイルベント橋脚の施工では、キャップ部と鋼管杭の接合部に充填する高流動コンクリートに関しては実物大充填確認実験を行い、未充填部がないことが検証できた。また、左右のパイルベント橋脚の間のスペースが工事車両の動線確保に効果的であり、生産性向上に寄与した。さらに、維持管理性の面では、目視による日常点検、リフト車を用いた構造物接近点検も容易であることがわかった。一方、フルプレキャスト壁高欄は、従来の現場における鉄筋組立およびコンクリート打設を行う方法と比較して工程が約 1/5 程度に短縮することが可能となった。高耐震性パイルベント橋脚のピアキャップと併せて全面的にプレキャスト化を導入した本高架橋構造は、天候に左右されることなく工程を定めやすく生産性に優れており、維持管理性の面でも点検しやすいと考えられる。

このようにして構築した迂回路高架橋は、本設と同じ道路規格であり、現道の首都高速 1 号羽田線の横に位置するという厳しい現場制約条件の下、写真-4～写真-6 に示すとおり、2016 年 6 月から 2017 年 9 月の約 16 か月間で完成させることができた。

5. 結論

本研究では、生産性・維持管理性の向上が図れる高架橋構造として、下部構造のフーチングレス化およびフルプレキャスト壁高欄の構造検討を行い、実構造物への適用性を検証した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) フーチングレス構造およびピアキャップのプレキャスト化を導入した高耐震性パイルベント橋脚を開発し、生産性向上を図った。
- (2) 鋼管杭とキャップの接合に二重鋼管接合構造を採用し、ピアキャップのプレキャスト化を実現した。
- (3) 壁高欄同士および壁高欄と床版にボルト接合を用いたフルプレキャスト壁高欄は、静的載荷実験の結果、設計荷重の約 4 倍の耐荷性能を有していた。
- (4) 静的載荷実験終了後、ボルト接合の状態を検証した結果、容易にボルトの取替えができた。
- (5) 実車衝突実験の結果、開発した壁高欄は、防護柵 SB 種の要求性能を全て満足していることが検証できた。さらに、実験終了後の供試体を確認した結果、取替えが容易にできた。
- (6) 高耐震性パイルベント橋脚およびフルプレキャスト壁高欄を導入した本高架橋構造を首都高速 1 号羽田線の迂回路高架橋 (2 車線, 延長約 1.9 km) に適用し、約 16 か月という短期間で工事が完了した。また、高架橋下における点検が容易にでき、維持管理性の面で優れていることが確認できた。

参考文献

- 1) 伊原茂ほか: アンカーフレーム代替構造の鋼製格子部材を埋設した合成構造フーチングの耐荷性能に関する実験的検証, 土木学会論文集, Vol.71, No.1, 55-71, 2015
- 2) 加藤敏明ほか: 連絡誘導路栈橋部の設計と杭頭接合部の性能確認試験, 橋梁と基礎, Vol.43, pp.35-39, 2009.1
- 3) 土木学会: コンクリートライブラリー136, 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 (2012 年版)
- 4) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 2008.1