

中央環状線機能強化事業における鋼橋の改良事例

CONSTRUCTION CASE OF STEEL BRIDGE IMPROVEMENTS IN UPGRADING THE CENTRAL CIRCULAR ROUTE

染谷厚徳* , 臼井恒夫**

Atsunori SOMEYA and Tsuneo USUI

ABSTRACT Upgrading The Central Circular Route Project of the Metropolitan Expressway is a countermeasure against bottlenecks and missing links on the Central Circular Route, which was fully opened to traffic in March 2015. This paper describes two of these four-lane widening projects, the improvement between Horikiri-Kosuge JCT completed in February 2018 and the improvement between Itabashi-Kumanochō JCT completed in March 2018, while utilizing the existing structures under difficult restrictions, and describes the typical design and construction of both projects.

KEYWORDS : 鋼構造, 免震・制震, 合成構造

Steel structures, Seismic isolation and damping, Composite structure

1. はじめに

首都高中央環状線機能強化事業は、首都圏の環状線として初めて、平成 27 年 3 月に全線開通した首都高速中央環状線のボトルネック対策、ミッシングリンク対策を行ったものである。堀切・小菅ジャンクション(以下、JCT)間改良、板橋・熊野町 JCT 間改良のボトルネック対策と中央環状線と高速 7 号小松川線を接続する小松川 JCT を新設するミッシングリンク対策を実施している。図-1 に事業位置図を示す。

本稿では、困難な制約条件の中で、既設構造物を活かしつつ、平成 30 年 2 月に完成した堀切・小菅 JCT 間改良、平成 30 年 3 月に完成した板橋・熊野町 JCT 間改良の 2 つの 4 車線化拡幅工事について、両工事の代表的な設計や施工について報告する。



図-1 中央環状線機能強化の事業位置図

*首都高速道路(株)技術部 構造技術室 技術推進課(〒100-8930 千代田区霞が関 1-4-1(日土地ビル))

**首都高速道路(株)保全・交通部 点検・補修推進室 点検推進課(同上)

2. 堀切小菅 JCT 間改良事業

2.1 事業概要

堀切・小菅 JCT 間改良事業は、中央環状線と高速 6 号向島線及び三郷線が平面接続している中央環状線の内回りを拡幅し 4 車線化する事業である。当該区間の高架橋は、図-2 に示すようなダブルデッキ構造で、上層の外回りは平成 13 年に 4 車線化していたが、下層の内回りは 3 車線のままであり、平日 1 日あたり約 7 万 7 千台（H28 年度平均）という重交通箇所であることから、慢性的な渋滞が発生していた。今回、下層の内回り約 560m 区間を綾瀬川側に最大 3.4m 拡幅し 4 車線化している。また、この拡幅に合わせて、両 JCT 間に位置している小菅出口の分岐部を約 90m 小菅 JCT 側に移設して、堀切 JCT 合流部から小菅出口分岐までの距離を長くし利用しやすくしている。

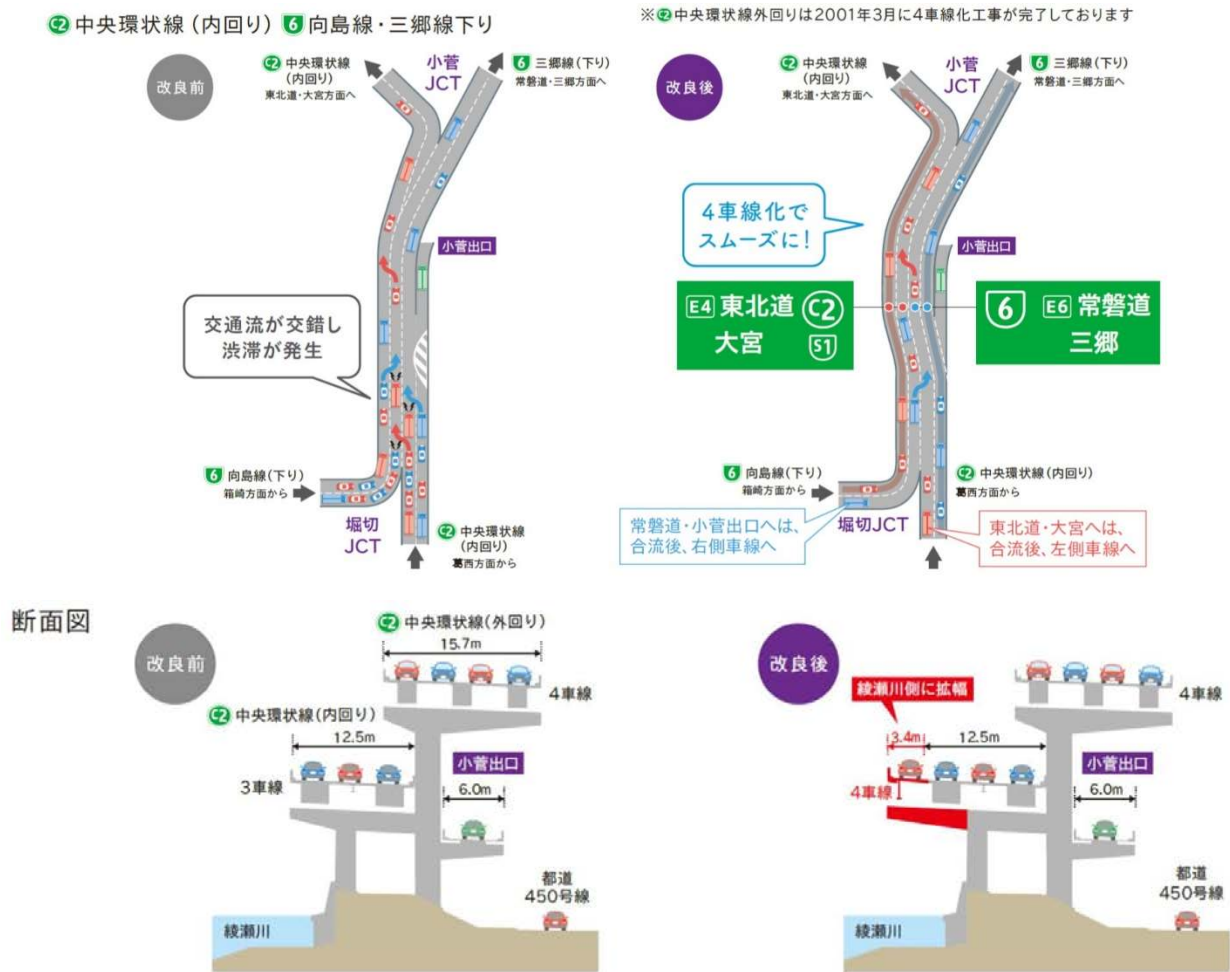


図-2 事業概要図

2.2 構造概要

既設橋梁は、上層 4 車線、下層 3 車線の 2 層高架構造であり、図-3 に示すように河川（綾瀬川）と都道に挟まれた綾瀬川堤体に位置している。既設橋梁は昭和 58 年に建設され、供用後は平成 11 年に「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」に基づき、縦リブの補強及び中詰めコンクリート充填による鋼製橋脚の耐震補強、平成 13 年に上層（外回り）の車線拡幅を経て、現在の構造形式となっている。対象となる既設の上部工形式は、図-4 に示すように単純鋼床版箱桁（2 連）、単純合成钣桁（5 連）、単純非合成箱桁（1 連）および 3 径間連続非合成箱桁（1 連）で構成されている。また、下部工形式は鋼製橋脚であり、基礎は場所打ち杭（φ1500mm）と RC フーチング構造で構成され、河川護岸と一体の構造となっている。なお、当該箇所はⅢ種地盤であり、N 値 50 以上の東京礫層（Tog）を支持基盤としている。

本工事では、下層（内回り）を1車線増やし4車線化するため、延長約560mの区間を河川側に最大で約3.4m拡幅する。また、これにあわせて、この区間にある小菅出口の分岐部を小菅 JCT 側に約90m 移動し、堀切 JCT 合流部からの距離を長くして、小菅出口を利用しやすく付け替える。上部工拡幅に伴う死荷重や交通荷重の増加に対応する必要がある一方、河川内に橋脚を新設することや堤体内のため大規模な工事ができないことから、首都高速として初めて橋梁全体で免震・制震化を採用した。免震支承及び粘性ダンパー、鋼製ダンパーを配置することにより橋脚基礎への地震時慣性力を低減し、基礎の改良を最小限に留めている。工事範囲の概要を、図-4 に示す。

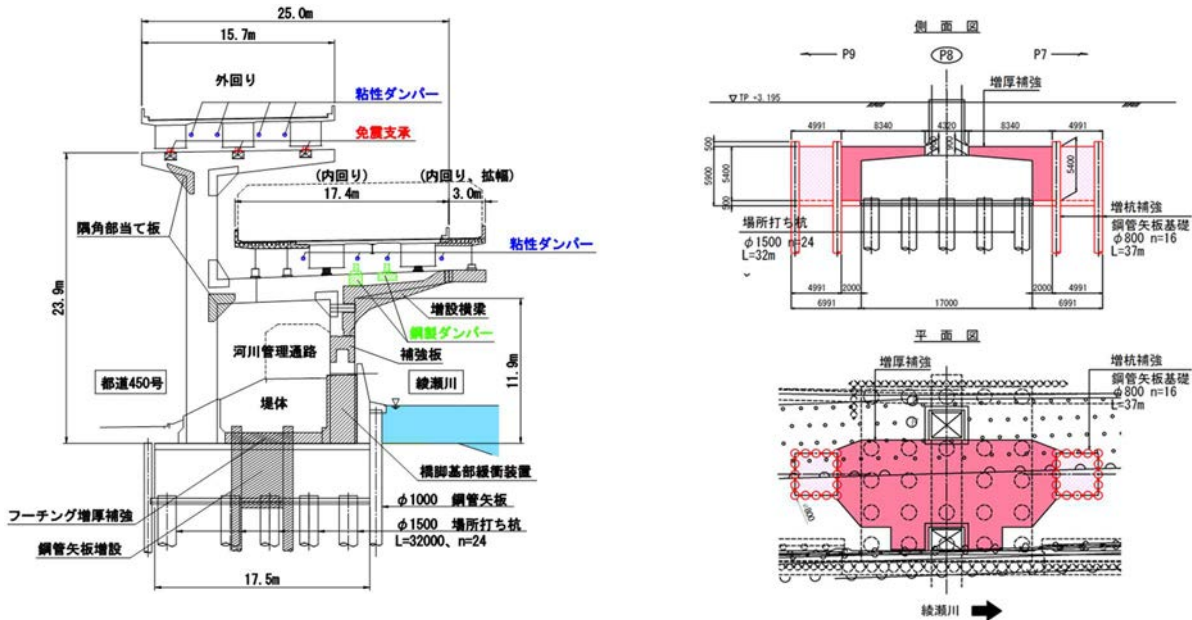


図-3 構造概要 (P8 橋脚)

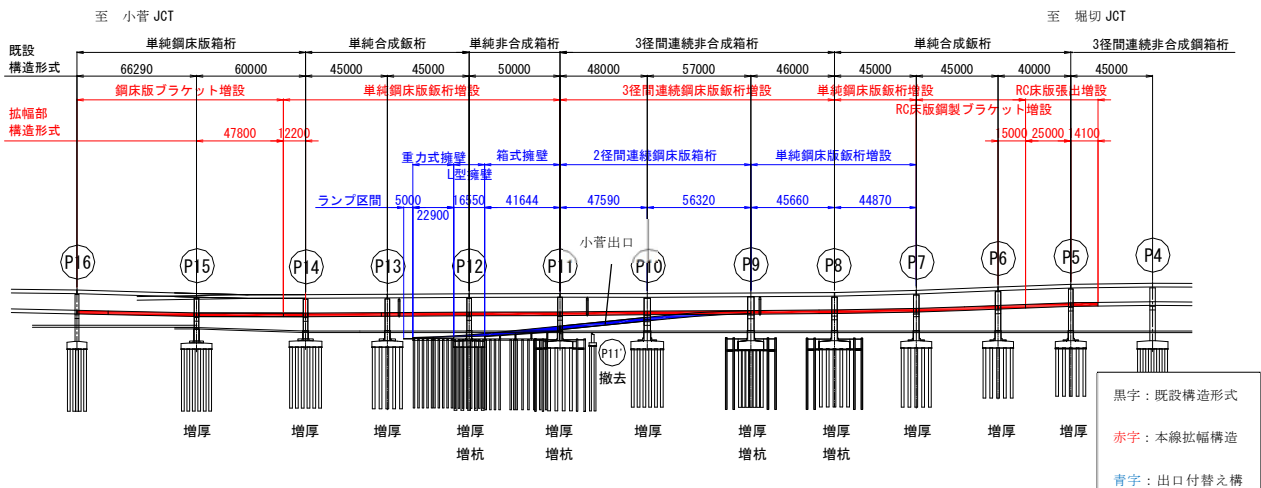


図-4 工事範囲

2.3 免振・制震化の設計

免震・制震化の設計は、図-5 に示す 3 次元立体骨組モデルを用いて、非線形時刻歴応答解析を行った。解析モデルは、上部工を線形はり要素、橋脚の横梁および上層柱をバイリニア型の M-φ 曲線を設定した非線形はり要素、橋脚下層柱を非線形ファイバー要素、基礎を線形ばね要素としている。また、免震・制震デバイスは、非線形ばね要素とし、それぞれの履歴特性値を考慮して組み込んでいる。

免震・制震化の適用として、まずは上部工の免震化のみを検討したが、免震化により桁の相対変位が大きくなり、橋軸方向では、既設の遊間において桁の衝突が発生すること、また橋軸直角方向にお

いては、下層上部工と橋脚柱の離隔が小さい箇所において衝突が発生した。そこで、地震時エネルギーを吸収し応答変位を低減できる制震デバイスを併用することとし、図-6に示すように上下層で橋軸方向に粘性ダンパー、下層では橋軸直角方向に鋼製ダンパーを配置した。上層には免震支承を配置するが、既設の支承高さが低く、単に既設支承を免震支承に置換えることはできなかった。そこで、機能を分離し、免震支承は鋼製橋脚の横梁前面にブラケットを取付けて設置し、既設支承位置には、新たに全方向可動のすべり支承を鉛直支承として設置している。これら橋梁全体での免震・制震化の結果、橋軸方向における桁と桁の衝突、橋軸直角方向における下層上部工と橋脚柱との衝突を回避することができた。橋梁全体の免震・制震化は、地震時エネルギーを吸収し、既設橋脚・基礎への負担を低減したが、P8, P9, P11 橋脚の3基では、レベル2地震動に対して杭に発生するせん断力が既設杭の耐力以上となるため増杭を行った。また、P5~P15 橋脚の11基全てでレベル1地震動に対してフーチング下面の鉄筋が許容応力度を超過したためフーチング上面の増厚補強を行った。P8, P9, P11 橋脚の増杭は、既設基礎と綾瀬川護岸が一体構造であることから、橋軸方向のみとし、現場の空頭制限、施工性、土質条件などから、鋼管矢板基礎(φ800mm)を採用し図-3に示すような配置で既設RCフーチングと一体化した。

本橋梁においては、3次元立体骨組モデルを用いた動的解析によって、免震・制震デバイスの最適な配置の検討を行い、橋軸方向・橋軸直角方向に図-7に示すようなデバイスの配置および基礎補強を決定した。免震・制震デバイスおよび基礎補強の数量は表-1のとおりである。

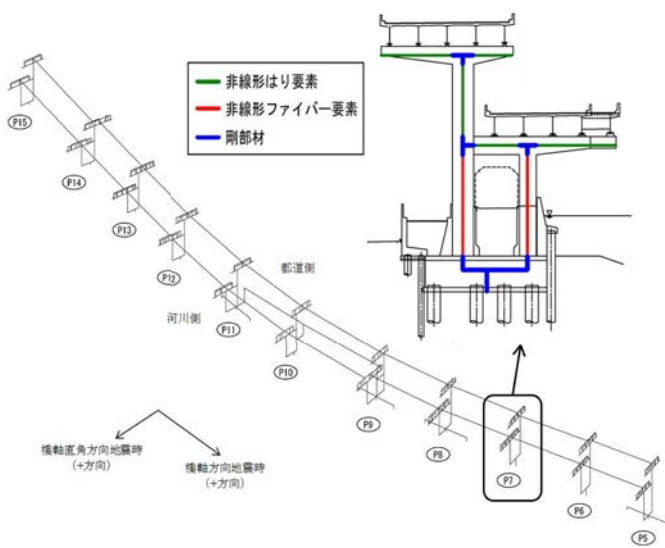


図-5 動的解析モデル(橋梁全体径)

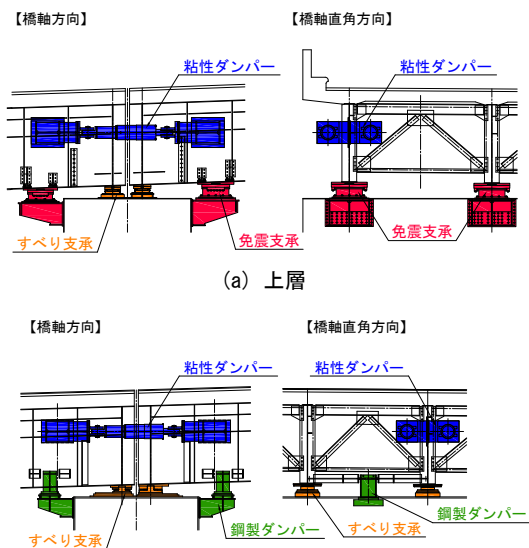


図-6 免震・制震デバイス

表-1 免震・制震デバイスおよび基礎補強の数量

項目		基数
免震デバイス	免震支承	67基
	すべり支承	172基
制震デバイス	粘性ダンパー	66基
	鋼製ダンパー	58基
基礎補強	フーチング増厚補強	11基
	増杭補強(鋼管矢板基礎)	3基

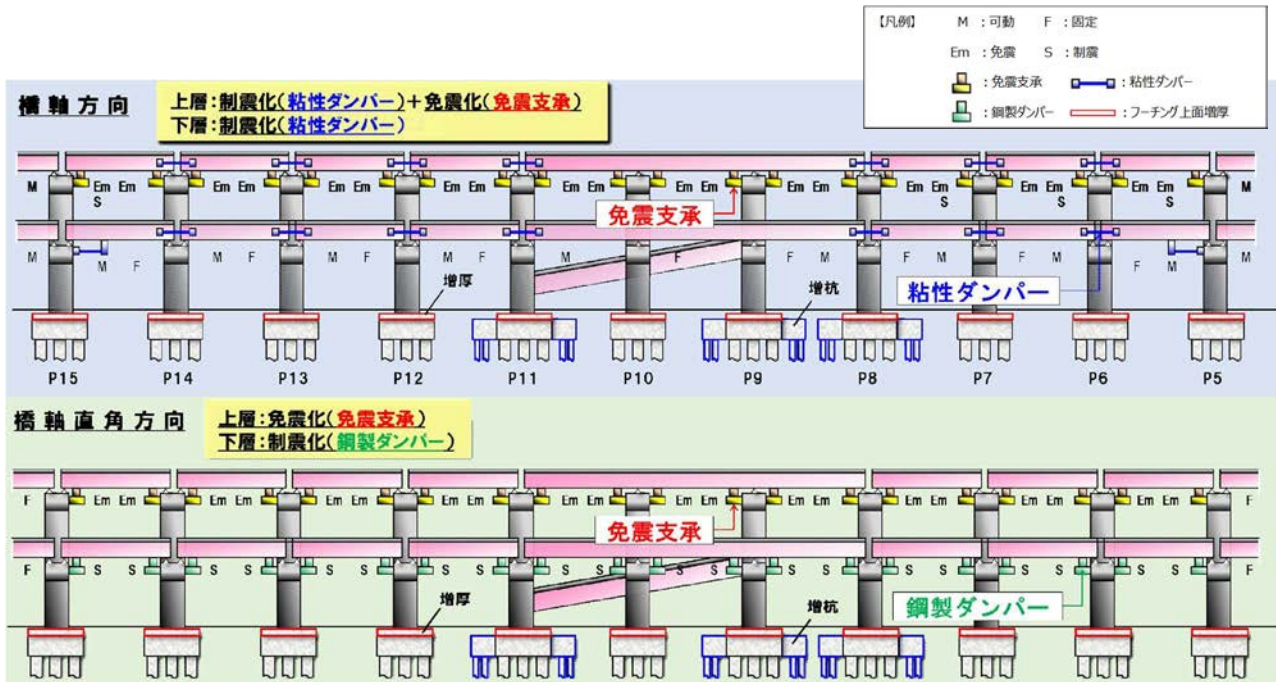


図-7 免震・制震デバイスの配置および基礎補強のイメージ

2. 4 本線拡幅施工

本線拡幅は、現状3車線の堀切・小菅JCT間を綾瀬川側に1車線付加する工事だが、河川内へのベント設置やクレーン台船の乗り入れがある場合は、施工時期に制約を受ける。そこで、高速道路上の工事規制帯のみを利用して拡幅桁・床版の架設が可能な、「移動式門型吊フレーム(以下、吊フレーム)」を用いた架設工法を開発した。吊フレームを用いた本線拡幅工事のイメージを図-8に示す。架設手順は、まず、既設桁に仮設の梁(架設用ビーム)を取り付け、その上に軌条設備を配置する。次に、軌条設備上に吊フレームを構築し、その後、図-9に示すように、夜間に高速を規制して、その規制帯内に新設する桁を搬入し、桁を所定の位置に架設する。

本工法により、すべての作業を高速道路上のみで施工でき、通年施工が可能となった。また、高速道路上の車線規制は、クレーンを使用した架設の場合、アウトリガーを張出すことから3車線中2車線の規制が必要となるが、桁搬入用の1車線のみでの施工が可能となった。これにより、工事中の交通に与える影響を最小限に留めることができた。

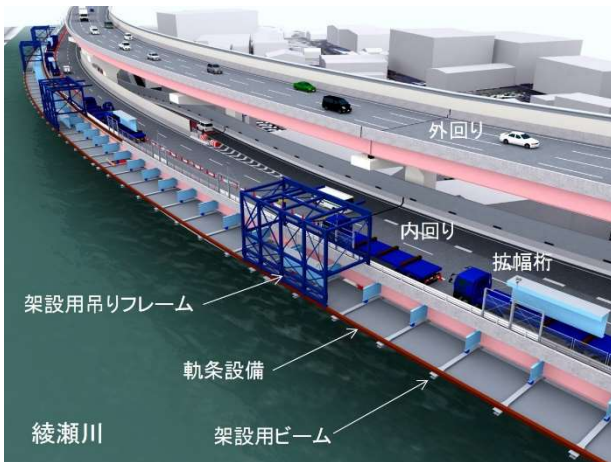


図-8 吊フレームを用いた工事のイメージ



図-9 吊フレームを用いた工事のイメージ

3. 板橋・熊野町 JCT 間改良事業

3. 1 事業概要

板橋・熊野町 JCT 間改良事業は、中央環状線と高速 5 号池袋線が平面接続しており、断面交通量が約 15 万 1 千台 (H28 年度平日平均) と重交通区間の約 520m を従来の 3 車線から 4 車線に拡幅する事業である。当該区間の高架橋は、幅員約 40m の山手通り (都道) に位置するラケット型橋脚のダブルデッキ構造である。この区間の上下層をともに 1 車線増やし 4 車線化するため、両側を均等に約 1.7m 拡幅している。上下層の拡幅前後のイメージを図-10 に示す。

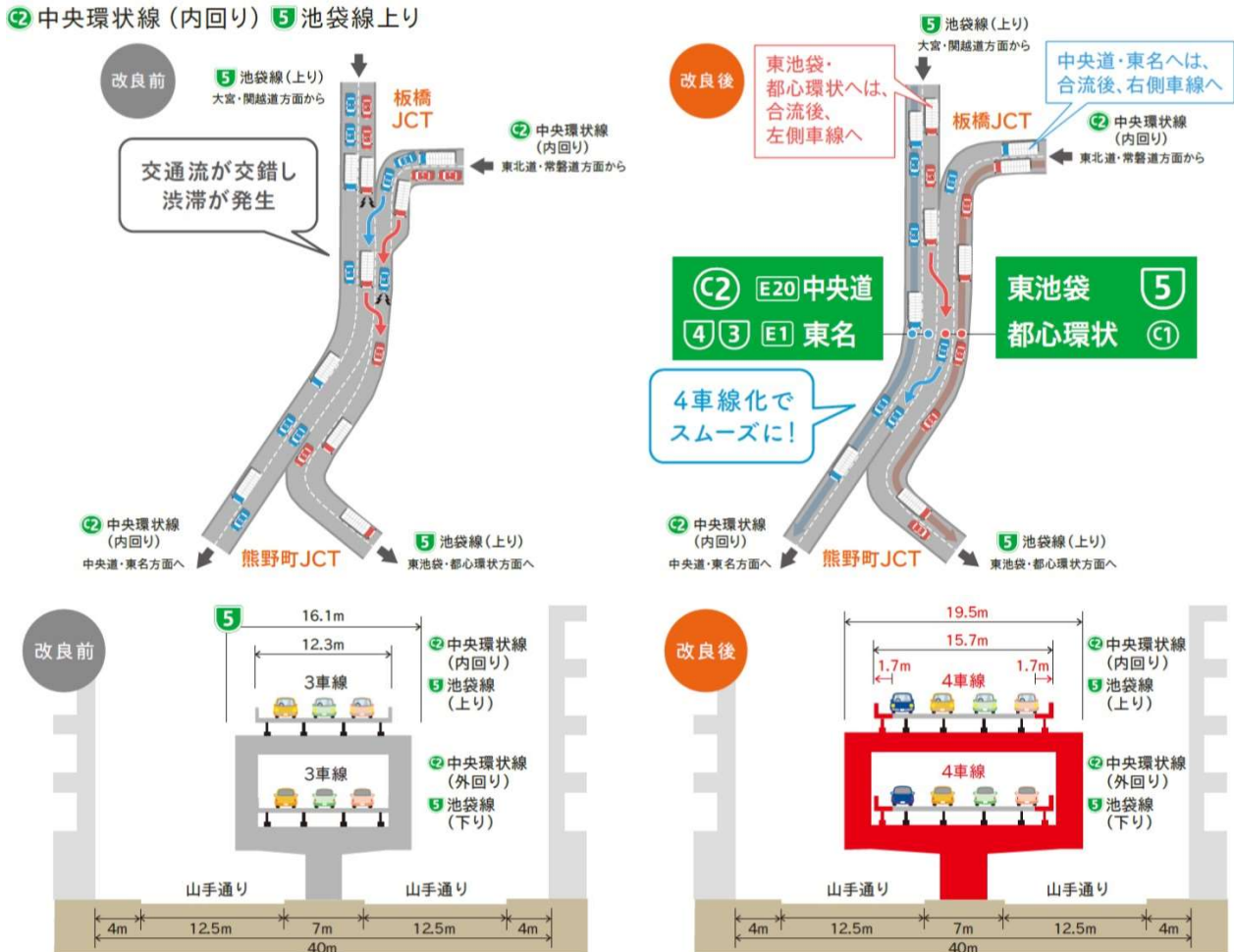


図-10 事業概要図

3. 2 構造概要

本工事では、現状の 3 車線に 1 車線を追加するため、大規模な既設橋梁の改築が必要となる。当該橋梁のようなラケット型橋脚のダブルデッキ構造の場合は、下層の車線を拡幅するために、増設桁の設置が必要であり、既設橋脚の上層柱が支障となる。そこで、下部構造については既設橋脚を一回り大きい 2 本の新設橋脚で前後を挟み込んで上部構造を受け替えた後、既設橋脚を撤去する「サンドイッチ工法」を開発して採用した。この工法により、特に下層の上部構造拡幅のための構造制限を解消することができ、4 車線化を実現した。また、橋脚や床版の拡幅荷重および交通荷重の増加に対応するため、基礎構造も改良する必要があり、杭の増設とフーチングの拡幅を行うこととした。しかし、当該基礎は高架下を通る山手通りの中央分離帯部に位置し、土被りは約 2.5m と浅いため、新設の鋼製橋脚と拡幅するフーチングとの接合に従来のアンカーフレーム構造を設置する空間が確保できなかった。そこで、低土被り内に収まるようにアンカーフレームの代替構造として、橋脚基部に剛結した鋼製格子部材をフーチング内に埋め込んで一体化する「合成構造フーチング」を開発して採用した。

上部・下部構造の概要を図-12 に示す。

上部構造については、板橋 JCT から熊野町 JCT までの約 520m について、幅員の両側を約 1.7m ずつ拡幅することで、4 車線化を実現した。工事区間の既設橋梁は、単純 RC 床版合成鈹桁および 3 径間連続鋼床版箱桁により構成されており、増設桁および鋼床版ブラケットの設置による拡幅を行った。また、合わせて耐震性の向上および振動低減を目的とし、上部構造の連続化も行っている。工事範囲の概要を図-13 に示す。



図-11 サンドイッチ工法

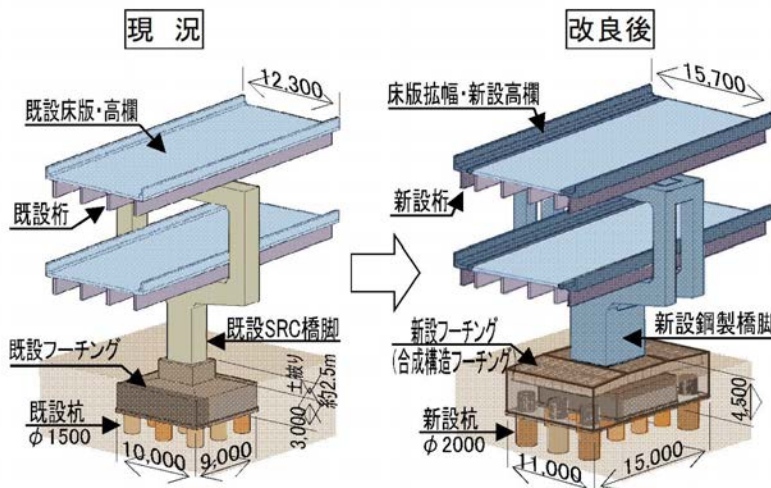


図-12 構造概要

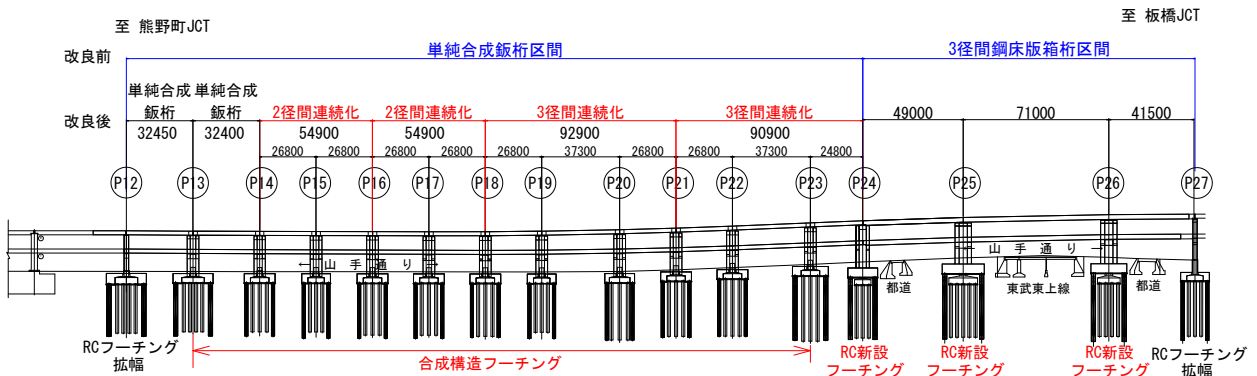


図-13 工事範囲

3. 3 合成構造フーチングの設計

合成構造フーチングは、図-14 に示すとおり、鋼製格子部材を介して鋼製橋脚基部の作用力を効率的にフーチング全体及び杭へ伝達させるためのものである。このため、鋼製格子部材は十分な断面性能を有する I 型鋼材を格子状に組み合わせて剛性を高くし、平面的に広げて荷重分配性に優れた構造

としている。このように鋼製格子部材は作用力の伝達部材であると同時に、構造部材として鉄筋コンクリート部と一体でフーチング全体の作用力に抵抗することから「合成構造フーチング」と名付けた。当初は橋脚基部周辺にアンカーボルトを配置して、鋼製格子部材と鉄筋コンクリート部の一体性を向上させる計画としていたが、太径のアンカーボルトを既設フーチングに深く削孔することを避けるため、鋼製格子部材及び上側鉄筋を取り囲む形で拘束鉄筋を配置し（図-15）、橋脚基部周辺の浮き上がり等に対しても抵抗できるようにした。さらに、フーチングの新設・既設界面ではウォータージェットによる目荒しを行って付着力を向上させ、既設フーチングの下側鉄筋と新設側の鉄筋とを溶接継手で繋いで新旧部材を一体化させた。なお、レベル2地震時においては既設杭がせん断破壊し、新設杭のみで支持する状態となる可能性があるため、既設フーチングの下側鉄筋の曲げ引張に対しては増設部の上面増し厚による曲げ補強効果を期待している。

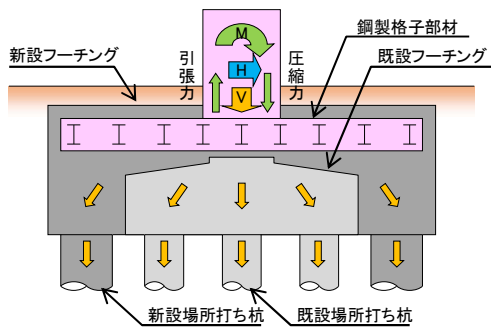


図-14 合成構造フーチングにおける荷重伝達

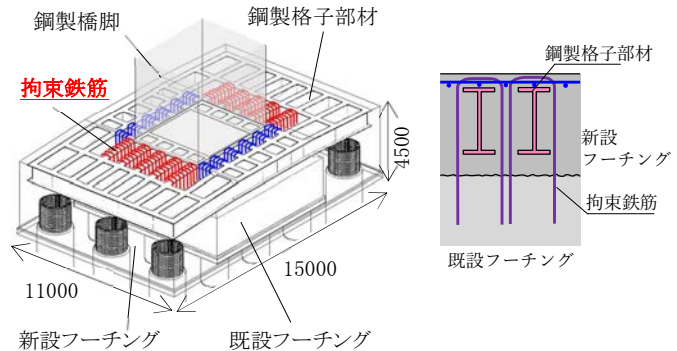


図-15 拘束鉄筋による鋼製格子部材の一体

3. 4 ダブルラケット橋脚構造の設計

新設橋脚は、前述のサンドイッチ工法概念の通り、2本のラケット型橋脚を既設橋脚の前後に設置し、既設橋脚を撤去後に下柱部およびラケット部で2本の橋脚を一体化するものである。完成後はラケット部が2枚構造となることから「ダブルラケット橋脚構造」と呼んでいる。

基礎構造が合成構造フーチングである P13～P23 橋脚は、基部において荷重伝達部材である鋼製格子部材と新設鋼製橋脚を剛結し隅角構造を成す。また下柱部は、2本の橋脚の一体化後は、剛性の高い「3セル構造」として荷重に抵抗する。ラケット部は上層隅角部において「横繋ぎ材」により2本の橋脚を連結する。横繋ぎ材は上柱および上層横梁と同じ幅・高さを有する箱断面の部材であり、これにより剛結することで、ダブルラケット橋脚構造の剛性を高める役割を果たしている（図-16）。

P24～P26 橋脚の基部は、土被りが大きいため分離した新設フーチングのアンカーフレーム構造である。この区間は下柱部を一体化しないが、既設上部構造が連続桁形式であることから、ダブルラケット間の中央に支点を設けるための支点横梁と上層隅角部の横繋ぎ材を設置し、一体化して剛性を高めている。図-17にダブルラケット橋脚の仮組立状況を示す。

作用荷重に対する設計としては、サンドイッチ工法における施工ステップより、2本の橋脚は一体化前の状態（2柱独立状態）において、上部構造の死荷重・活荷重反力を既設橋脚から受け替え負担する。地震作用に対しては、一体化後のダブルラケット橋脚構造として抵抗するものとして、レベル2地震時にも鋼部材が弾性状態となるように設計を行った。さらに、架設時の2柱独立状態が既設橋脚撤去完了までの比較的長い期間にわたり継続することから、架設途中においても、レベル2地震時には柱部の部分的な塑性化を許容するが、許容ひずみ以下となるように設計を行った。

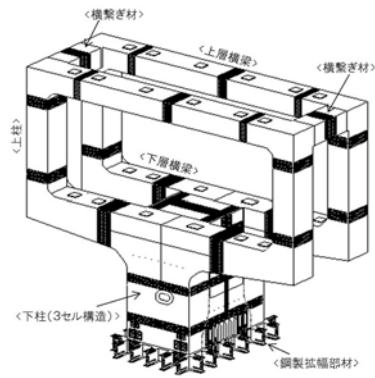


図-16 ダブルラケット橋脚部材構成(P13~P23)



図-17 ダブルラケット橋脚仮組状況

3. 5 合成構造フーチングの施工

合成構造フーチングの施工は、増設する場所打ち杭を打設した後、既設フーチングの周囲を掘削した。増設杭の杭頭処理、既設フーチングの健全性確認、既設フーチングの表面処理および新旧フーチングを接合する措置を施した後、既設フーチング天端付近まで増設フーチングのコンクリート（1 リフト目）を打設した。次に、合成構造フーチングを構成する鋼製格子部材を既設フーチング天端にクレーンを使用して架設した。鋼製格子部材については道路通行制限（車両制限令）と架設方法を考慮して8分割で工場製作を行った。既設橋脚を取り囲む架設ブロック同士の連結部は、既設と新設の橋脚の離隔が100mm前後と非常に小さく、ボルト締め付けスペースを確保できないことから、片側からの締め付けが可能であるワンサイドボルト工法を採用した。鋼製格子部材組み立て完了後（図-18、増設フーチングの上側鉄筋を配置（図-19）してコンクリート（2 リフト目）を打設した。コンクリート充填時には、鋼製格子部材の隅角部や既設橋脚周囲など狭隙部に充填不良が発生する可能性や、ブリーディング発生による鋼製格子部材とコンクリートの付着力低下が生じる懸念があった。さらに、マスコンクリートによる温度ひび割れ、鋼製格子部材による拘束ひび割れについても対策する必要があった。そこで、事前に実物大模型を用いた充填性確認試験を行ったうえで、コンクリートの配合は普通コンクリートより流動性の高い中流動コンクリートを採用した（図-20）。



図-18 鋼製格子部材の設置状況



図-19 拘束鉄筋等の配筋状況



図-20 コンクリート充填後

3. 6 ダブルラケット橋脚の施工

新設ダブルラケット橋脚の架設ステップを図-21 に示す。ここでは、下層隅角部の大ブロック架設 (STEP2) について述べる。下層隅角部ブロックが高さ約 4.5m、重量約 50tf であるため道路交通制限上 4 分割の小ブロックで工場製作を行った。そのブロックを現地作業へ搬入し作業帯内で地組み立てし、現場溶接にて連結した後に架設を行った。高架下であるため桁下空間が低く、移動式クレーンを展開させることができないため、軌条設備を組み立て、作業帯内へ架設ブロックを引込みながら地組み立てを行った。地組み立てした大ブロックの架設では、山手通り交通規制の制約上、ドーリーと呼ばれる自走式多軸台車による架設を採用した。大ブロックの両側に自走式多軸台車を配置し、山手通りに 1 車線規制帯を設置した後、架設地点まで搬送させた。その後、予め台車上に設けたジャッキアップ装置を駆使し架設を行った (図-22, 23)。次に上層横梁の架設 (STEP4) について述べる。上層横梁は、下層からの架設となる。通行止めや長時間の規制は交通影響が大きく現実的でないことから、下層 3 車線のうち 2 車線を夜間規制 (22 時-6 時) し架設することとした。この規制時間及び空間にて確実に架設を完了させるため、ジャッキアップ装置及びターンテーブルを搭載した特殊トレーラー (架設用) を開発し、ジャッキアップ架設を行った。これにより、架設位置での架設ブロックの受替え等が不要となる。特殊トレーラーにより架設ブロックを架設位置に搬入後、ブロックを 90 度回転させジャッキアップ架設する効率的な作業フローとなり、作業時間を短縮した (図-24, 25)。

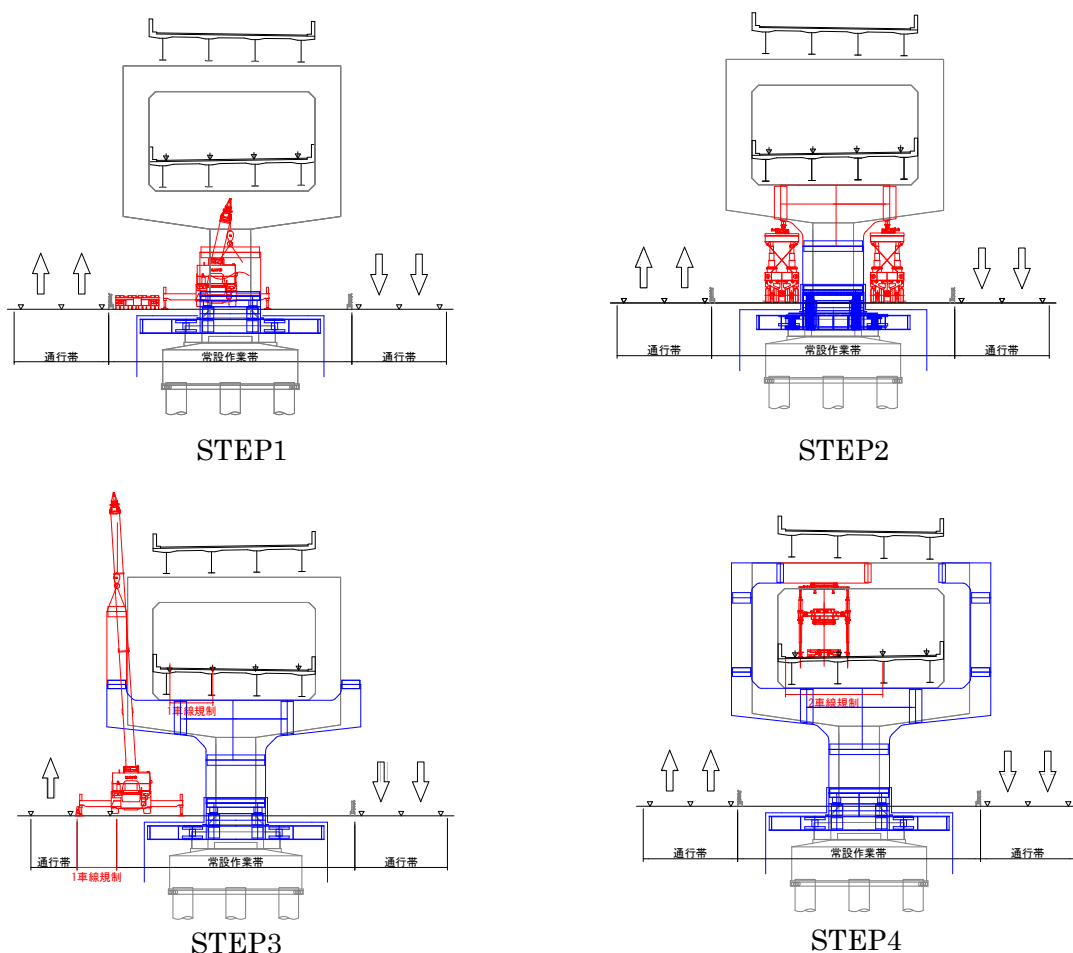


図-21 新設ダブルラケット橋脚の架設ステップ



図-22 自走式多軸台車での移動状況



図-23 隅角部のジャッキアップ状況



図-24 横梁ブロックの回転状況



図-25 横梁ブロックのジャッキアップ状況

3. 7 既設 SRC 橋脚上層横梁の撤去

既設の上層横梁と上層柱の撤去は、架設時と同様に首都高速道路の上空作業および近接作業となるため（図-26）、夜間に車線規制して行うこととした。続く下層横梁と下層柱の撤去については、常設作業帯内での昼間施工が可能であった。

ここでは、制約条件が最も多い上層横梁の撤去工事について述べる。上層横梁の撤去フローを図-27に示す。まず、新設橋脚の両端部に作業構台を設置後、撤去作業に支障する既設の支承を撤去した。

次に、新設橋脚間に仮設梁を渡して撤去ブロックの落下防止対策を実施し（図-28）、パイロットコア削孔と先行切断を行った。最初の撤去ブロックの中央切断はジャッキダウン時の切断面同士の干渉を回避するため確実にクリアランスが確保できる連続コア削孔を採用した。撤去ブロックは運搬上の重量の制約から7ブロック（1ブロックあたり20t以下、トレーラーを含めた総重量44t以下）に分けて行ったが、限られた規制時間内（夜間のみ）に確実に撤去を完了させるため、ブロック自重を支えるために必要な両側450mm幅を除く残りの断面は昼間作業にて先行切断する方針とした。ブロックの撤去は、今回の工事用に開発した特殊トレーラー（撤去用）で支えながらジャッキダウンした（図-29）。試験施工により不確定要素をつぶし、様々な時間短縮策を適用したことで、撤去作業のタイムサイクルを当初計画より約120分短縮し、規制時間内に安全に工事を完了させることができた。

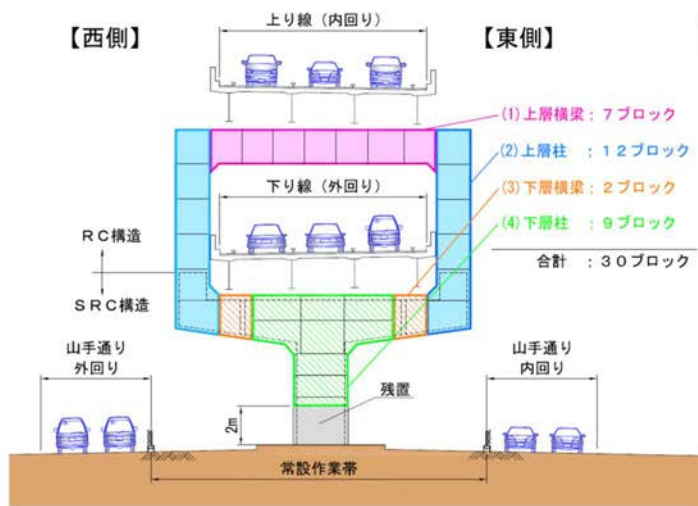


図-26 既設 SRC 橋脚撤去の概要

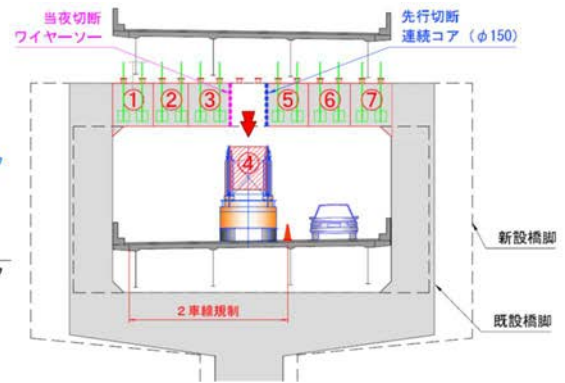


図-27 上層横梁ブロックの撤去状況

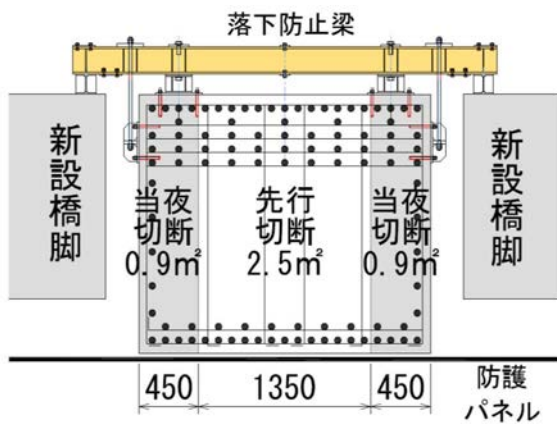


図-28 落下防止対策概念図



図-29 上層横梁ブロック撤去状況

4. おわりに

堀切・小菅 JCT 間改良工事では、首都高速で初めて「免震・制震化」を採用し、堤体内を大規模に改良することなく、既設構造物の拡幅工事に対応することができた。また、施工では、「移動式門型吊フレーム」を用いた架設工法を開発し採用した。同様に板橋熊野町 JCT 間改良工事においても、「合成構造フーチング」や「サンドイッチ工法」を開発し採用することで拡幅工事に対応することができた。両工事とも、供用下での大規模な改良工事であり、創意工夫により困難な制約条件を乗り越えた貴重な事例である。今後、本格化していく既設構造物の更新・改良事業等の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 臼井恒夫：首都高速中央環状線機能強化の事業概要，土木施工，VOL. 59 No. 4，2018. 4
- 2) 染谷厚徳，住田亮介，斎藤隆，門田徹，石部智之：板橋・熊野町 JCT 間改良事業における上部工・下部工の設計，土木施工，VOL. 59 No. 4，2018. 4
- 3) 伊藤寛，右高裕二，兼丸隆裕，瀬尾高宏，宮本喜博：板橋・熊野町 JCT 間改良事業における上部工・下部工の施工，土木施工，VOL. 59 No. 4，2018. 4
- 4) 臼井恒夫：首都高速中央環状線機能強化の事業概要，橋梁と基礎，2018. 5
- 5) 染谷厚徳，住田亮介，斎藤隆，門田徹，石部智之：板橋・熊野町 JCT 間改良事業における上部構造・下部構造の設計，橋梁と基礎，2018. 5
- 6) 伊藤寛，右高裕二，兼丸隆裕，瀬尾高宏，宮本喜博：板橋・熊野町 JCT 間改良事業における下部構造の施工，橋梁と基礎，2018. 5