

# 新名神高速道路 菰野第二高架橋の設計・施工

## — 一面吊形式の PRC 3 径間連続エクストラードズド橋 —

牧田 通\*1・中村 雄一郎\*2・興梠 薫明\*3・五藤 正樹\*4

本稿は、新名神高速道路 菰野第二高架橋の主橋である PRC 3 径間連続エクストラードズド橋の設計・施工について報告するものである。本橋は一面吊形式で斜材を並列ケーブル構造としたことからウェイクギャロッピングによる斜ケーブルの振動発生リスクの低減対策を施し、加えてレインバイブレーションによる振動についても抑制対策を講じた。斜ケーブルの防食は、100 年の設計供用期間にわたる耐久性能の確保を図るために四重防食仕様とした。橋梁における落雷や火災の発生頻度は高くはないものの斜ケーブルの破断に至る場合もあることから、それらについても対策を講じることとした。主塔側の斜材定着方法は維持管理性に配慮して分離固定方式のセパレート定着とし、景観に配慮したスレンダーな形状とするため定着部のある主塔上側の約半分は鋼-コンクリート合成構造とした。主桁は 3 室箱桁構造とし、床版の拡幅による将来的な車線の増加にも対応可能なように設計した。

キーワード：PRC エクストラードズド橋，一面吊形式，斜材，高速道路

### 1. はじめに

菰野第二高架橋は 2019 年 3 月に開通した新名神高速道路新四日市 JCT～亀山西 JCT 間において三重県三重郡菰野町に位置する橋梁である。主橋は二級河川三滝川を横過する橋長 341 m の PRC 3 径間連続エクストラードズド橋で(写真 - 1)、主橋の起点側と終点側にはそれぞれ PRC 5 径間と PRC 11 径間の連続箱桁橋が取り付き、高架橋全体では 19 径間で橋長は 1 103 m に及ぶ。主橋であるエクストラードズド橋の中央径間長は 161 m であり、一面吊形式でコンクリートウェブを採用した PRC 構造のエクストラードズド橋としては国内最大級の支間を有している(図 - 1)。そのため、斜ケーブルにはエクストラードズド橋では国内最大の容量となる約 800 t の張力を導入可能なケーブルを採用した。本稿では、菰野第二高架橋の主橋である PRC 3 径間連続エクストラードズド橋の設計および施工の概要について報告する。

### 2. 設計の概要

斜材を中心に、設計の概要および設計・施工にあたり実施した検討の概要について説明する。



写真 - 1 PRC 3 径間連続エクストラードズド橋全景

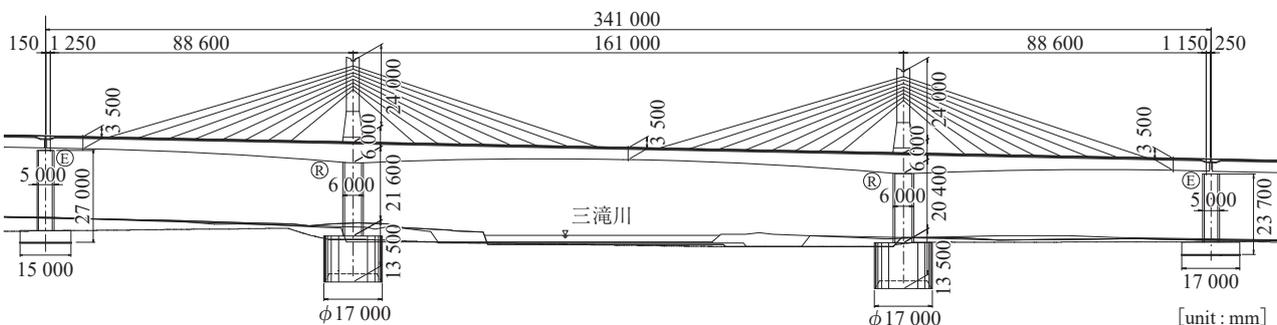


図 - 1 PRC 3 径間連続エクストラードズド橋一般図

\*1 Tohru MAKITA：中日本高速道路(株)名古屋支社  
 \*2 Yuichiro NAKAMURA：(株)ピーエス三菱  
 \*3 Shigeaki KOROKI：(株)ピーエス三菱  
 \*4 Masaki GOTO：中日本高速道路(株)名古屋支社



連合) の Recommendation<sup>4)</sup> に記載される 100 年間の耐久性性能を満足する標準的な防食仕様と同等以上の四重防食仕様を採用した。一層目の防食は PC 鋼より線を内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線 (ECF ストランド) とすることで実施し、二層目および三層目の防食は個々の ECF ストランドにワックスを塗布し高密度ポリエチレン (HDPE) を被覆して実施し、四層目の防食は所定の本数の HDPE 被覆した ECF ストランドを束ねてさらに HDPE により被覆することで実施した (図 - 3)。48 本の ECF ストランドを束ねた斜ケーブルはこれまで日本での使用実績がなかったため、斜材システムの疲労安全性を確認するために実物大供試体を用いた軸引張疲労試験を実施した。次項で軸引張疲労試験について説明する。

(3) 斜材システムの軸引張疲労試験

動的載荷で最大 10 MN の容量を有する横型疲労試験機 (表 - 1) により軸引張疲労試験を実施した (写真 - 3)。ケーブル供試体の長さはケーブル定着間の距離で 5 261 mm

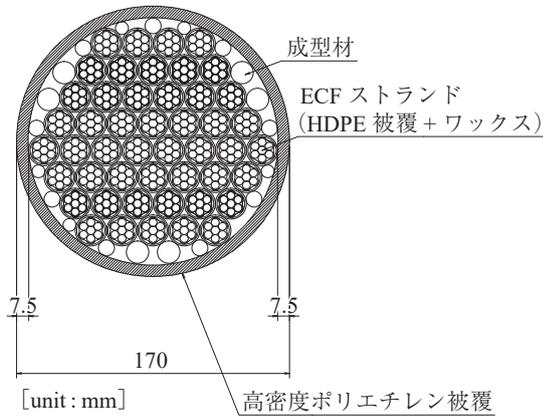


図 - 3 斜ケーブル断面図 (48S15.2B)

表 - 1 横型疲労試験機の仕様

項目	仕様
試験機容量 (動的)	10 680 kN
試験機容量 (静的)	28 480 kN
試験機長さ (クロスヘッド間)	5 ~ 6 m
ラム最大ストローク	203 mm

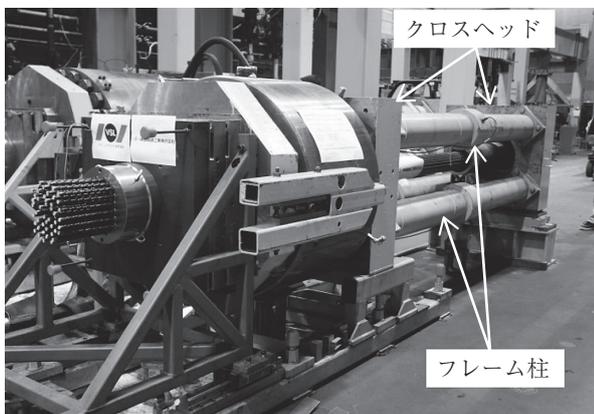


写真 - 3 軸引張疲労試験の状況

とした。試験機へのケーブル供試体の設置はストランド 1 本ごとの手挿入で行い、試験時に個々のストランドに載荷荷重の偏りが生じないように専用のシングルジャッキを用いて低荷重での引き揃え作業を実施し、その後疲労試験を実施した。供試体のアンカーヘッドおよびケーシングパイプ付き支圧板は実橋で使用するものと同じ寸法のものとした。疲労試験の荷重は NEXCO 試験法 435 「防錆被覆 PC 鋼材の試験方法」<sup>5)</sup> に準拠して設定した。すなわち、下限荷重は鋼材の応力が設計荷重作用時の許容応力と同じ大きさとなるようにケーブルの規格破断荷重の 60% (= 7 517 kN) とし、上限荷重は鋼材の応力振幅が 100 N/mm<sup>2</sup> となるように設定した (= 8 183 kN)。荷重は試験機の 4 本のフレーム柱に 1 個ずつ据え付けられた合計 4 個のロードセルにより、変位はクロスヘッドに取り付けた変位計により測定した。疲労試験中の鋼線の破断をアンカーヘッドに取り付けた加速度計によりモニタリングした。疲労荷重は 1.25 Hz で載荷し、疲労サイクルが 200 万回に到達した時点で試験を終了した。疲労試験終了後に試験機に設置されたままの状態ですべての状態で定着効率試験を実施し、ケーブルの規格破断荷重の 95% (= 11 902 kN) 以上まで静的に載荷した。

疲労試験中の加速度計によるモニタリングでは加速度の変化は確認されず、定着効率試験における荷重 - 変位関係は最大荷重に至るまでスムーズな挙動であったことから、疲労試験および静的試験のいずれにおいても供試体に大きな変状が発生した可能性は無いと考えられた。すべての試験の終了後に供試体を解体し目視により供試体の状況を検査したところ、ストランドの破断やスリップは確認されず、定着具およびそのほかの部品の割れや変形も生じていなかった。試験後のウェッジを写真 - 4 に示す。なお、写真 - 4 の右端のウェッジには ECF ストランドの青色のエポ

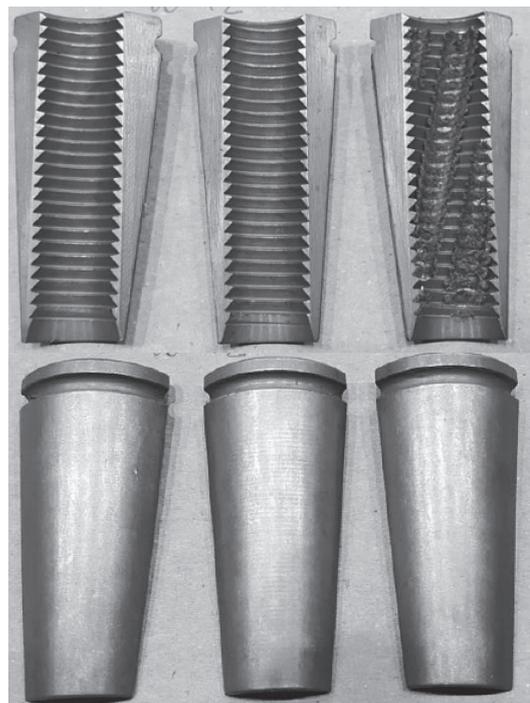


写真 - 4 試験後のウェッジ

キシ樹脂被覆が部分的に付着しているが、ウェッジの検査はそれらを取り除いた上で実施しており、変状は確認されなかった。以上より、本橋で使用する48本のECFストランドを束ねた斜ケーブルによる斜材システムは疲労安全性を有することが確認された。

#### (4) 落雷・火災対策

斜ケーブルが落雷または火災を受けた場合、短時間で耐荷性能を損失するおそれがある。落雷・火災はいずれも発生頻度は高くないものの斜ケーブルの破断にまで至る場合もあり、適切な対策を講じる必要がある。本橋では、落雷に対しては主塔頂部に避雷針を設置した。火災に対しては、車両に起因する火災で斜ケーブルが熱せられる状況を想定し、耐火の観点で対策を実施することとした。以下に火災対策について詳述する。

火災対策に求めた耐火性能は、斜ケーブルが20分間にわたり火に曝されたとしてもHDPE製の被覆が250℃以上にならないこと、と設定した。ここで、20分間は最寄りの消防署から消防車が現場に到着し消火活動を開始するまでの想定時間であり、250℃はHDPEの力学特性が失われない温度である。この耐火性能を満足させるために、難燃性断熱材である結晶質アルミナ繊維をブランケット状にしたもの(写真-5)を厚さ19mmで斜ケーブルに巻き付け、その上に表面をフッ素系樹脂塗料で塗装した厚さ0.3mm



写真-5 結晶質アルミナ繊維製の難燃性断熱材<sup>6)</sup>



写真-6 斜ケーブル火災対策工の施工

のステンレス鋼板により覆うこととした。斜ケーブルの火災対策は路面からの高さ7.5mの範囲に施工した(写真-6)。施工範囲の高さ7.5mは、ガソリンなどの可燃物が路上に流出して着火した場合に火焰の高さは流出物の分布を円形と仮定して直径の約1.5倍に及ぶという前提で、普通車やタンクローリーなどの車両事故での流出物の直径は4~5mであることから火焰の高さがほぼ6~7.5mとなること<sup>7)</sup>を参考に決定した。

#### 2.2 主塔

主塔は上側と下側で異なる構造とし、景観性に配慮したスレンダーな形状とすることが求められた斜材定着部を有する上側の10.4mの範囲は鋼-コンクリート合成構造、下側の13.1mの範囲は鉄筋コンクリート(RC)構造とした(図-4)。斜材定着方法は分離固定方式のセパレート定着とし、主塔を中空構造にして維持管理用通路を設け、斜材定着部の維持管理のしやすさに配慮した(図-4)。

鋼-コンクリート合成構造は鋼殻を250~325mmの厚さのコンクリートにより巻立てたもので、部材厚の薄いコンクリートをスタッド(写真-7)で鋼殻に接合する構造であることから、コンクリートの収縮が拘束されることによるひび割れの発生が想定された。加えて、斜ケーブルの張力によって鉛直方向のひび割れが発生することが考えられた。同様な構造の既設の主塔で、橋梁の完成から数年後に鋼殻の巻立てコンクリートに鉛直方向のひび割れが発生していることが確認されたことも踏まえ、ひび割れの発生リスクを低減する対策を検討した。コンクリートは膨張材を添加した配合とし、収縮の拘束によって発生する応力の算定には自己収縮と乾燥収縮の両者に起因する収縮ひずみを考慮し、クリープによる応力緩和は考慮しないこととした。斜ケーブルの張力による応力は、斜ケーブルの緊張時

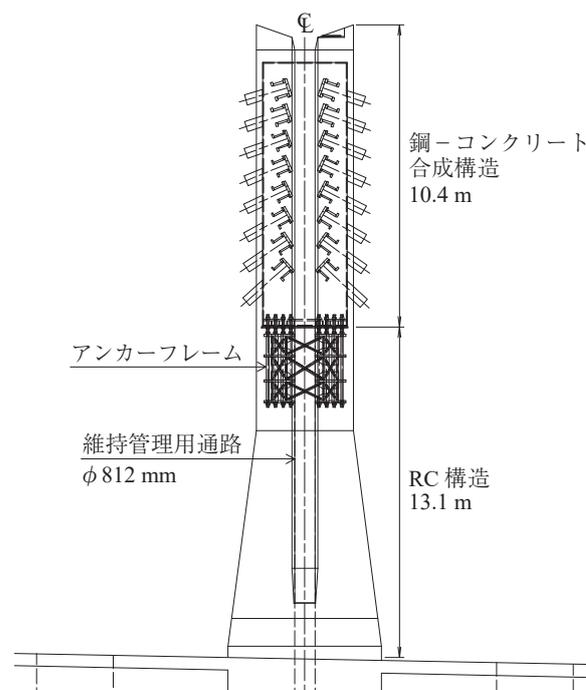


図-4 主塔の構造

と活荷重作用時について算出した。斜ケーブルの緊張時における応力は、巻立てコンクリートは3ロットに分けて打込み、コンクリートを打込む前に各ロットに含まれる斜ケーブルの緊張作業は完了している、という施工手順（図-5）を踏まえて3次元弾性FEM解析により算出した。活荷重作用時における応力は、斜ケーブル張力の水平方向分力だけを考慮して算出した。前述の考えで算出した収縮の拘束による引張応力と斜ケーブルの張力による引張応力を足し合せたものに対してひび割れが発生しないよう巻立てコンクリートの配筋を決定した。斜材定着部は鉛直方向に1m間隔で配置され、各斜ケーブルで異なる張力に合わせて配筋を変えるのは施工上非効率であることから、コンクリート打込み時の各ロットで同一の配筋となるようにした。配筋は各ロットでもっとも多い鉄筋量が必要となる斜材定着部に合せて決定した。



写真-7 鋼殻表面に設置された巻立てコンクリート接合用のスタッド

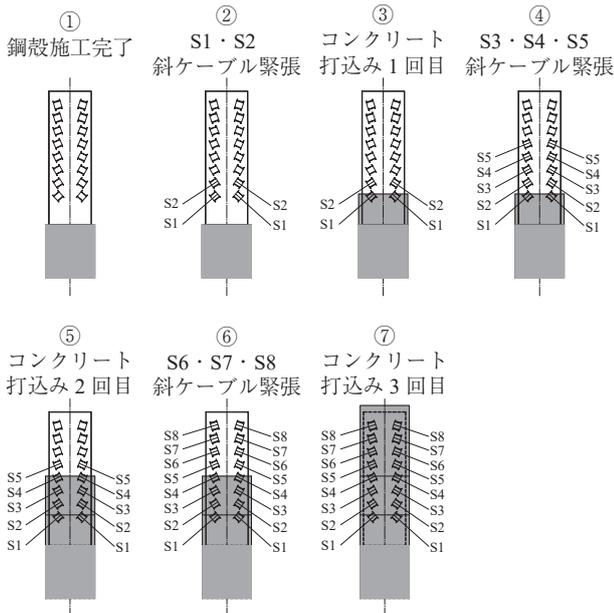
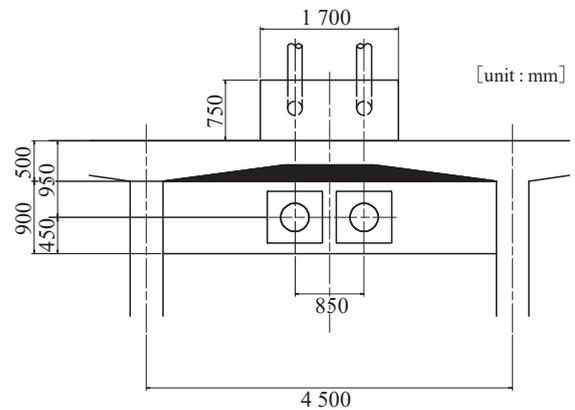


図-5 斜ケーブルの緊張と主塔巻立てコンクリートの施工順序

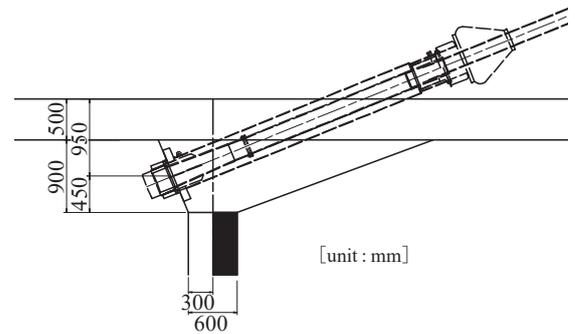
### 2.3 主 桁

3室箱桁構造で上下線それぞれで2車線ずつの合計4車線の道路となるように設計し、床版の拡幅により将来的な6車線化への対応も可能な構造とした。

大容量の並列ケーブルをコンクリートの定着突起による構造で中央セルの上床版に定着させるために、斜材定着部周辺の応力状態を3次元弾性FEM解析により検討した。その結果、コンクリートの引張強度を大きく超える応力が発生することが分かったため、斜材定着部を含む中央セルの上床版の厚さを斜材定着部を含まない左右セルの標準部の300mmから+200mmの500mmに増加し、定着突起直下の隔壁の厚さも標準部の300mmから+300mmの600mmに増加した（図-6）。さらに、各斜材定着部周辺の床版には橋軸方向および橋軸直角方向の両者または前者のみに1S28.6のPC鋼材を配置して追加のプレストレスを導入するとともに補強鉄筋を配置し、コンクリートに発生する応力が引張強度を超過しないように設計した。



(a) 上床版



(b) 隔 壁

図-6 斜材定着部における部材の増厚

### 2.4 景観設計

本橋では構造的検討に基づく設計だけではなく、主に主塔を対象にして視覚的検討に基づく設計（景観設計）も実施した。最初に景観設計のコンセプトを定めるために、外部景観と内部景観の特性を検討した。外部景観の特性は、①主塔の高さが24mで周辺がやや開けた地形であるため広範囲から視認されること、②国道や民間施設など近景からの視点場があること、③斜ケーブルの背景は主に空と鈴

鹿山脈の山並みになること、と整理した。内部景観の特性は、①上り線では切土区間から開放的な田園の広がる空間となり背景は空となること、②下り線では背景は鈴鹿山脈の山並みとなること、と整理した。これらの景観特性に基づき、景観設計のコンセプトを「鈴鹿山脈を背景とする風景に馴染み、自然豊かな菰野の新しいシンボルとなる橋～鈴鹿山脈やマコモが広がっていた平野と共存し、多様な視点から見て美しいシンボルの創造～」と定めた。そして主塔の景観設計の基本方針を「開放的な空間に調和するのびやかさのあるデザイン」、「多様な視点から調和して見えるシンプルなデザイン」、「主塔のボリューム感を軽減させるデザイン」と定めた。

コンセプトおよび基本方針を踏まえ、主塔の景観設計を実施した。基本設計での主塔の形状は断面が長方形で簡潔であり単調な視覚的印象であったため、スリットを設置することで陰影をつけて表情を生み出すこととした。スリットにより主塔を構成する面が分割されることでボリューム感が抑制されることに寄与し、加えて雨水の排水経路として機能することで主塔表面に雨だれの跡が残りにくくなることを期待した。スリットは主塔の橋軸方向側面の両面に直線形状で設置し、設置範囲を主塔頂部から最下部までとすることでのびやかな印象となることを期待した。主塔頂部に設置する避雷針を外側から見えにくくするため、主塔頂部の形状を基本設計時の平らなものから主塔頂部の外側を高くした凹型傾斜の形状に変更した。この形状にすることで避雷針の設置位置が外側から目立たなくなり、主塔自体がのびやかな印象になることを期待した。図-7に主塔の側面図と断面図を示す。

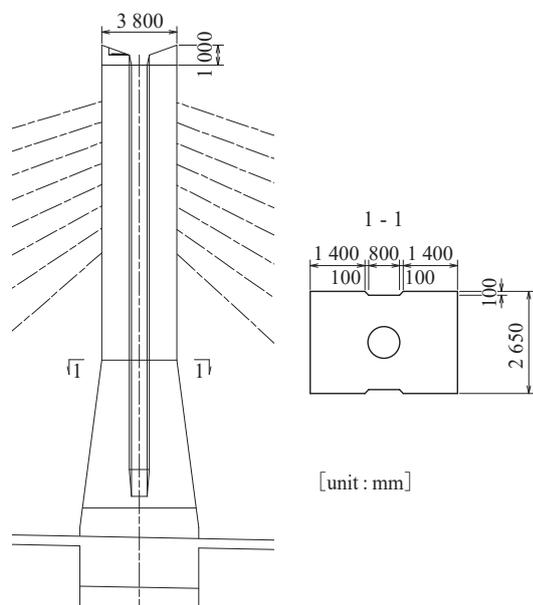


図-7 主塔の側面図および断面図

### 3. 施工の概要

主桁は張出し架設工法により架設し、各張出しにつき19ブロックに分割して施工した(写真-8)。各ブロックの

施工サイクルは、主桁内部での作業の輻輳が生じないように基本設計で計画した施工手順を見直した。具体的には、基本設計では、主桁施工ブロック(Nブロック)の1つ前のブロック(N-1ブロック)における斜ケーブルの配置・緊張を、Nブロックのコンクリートの打込みを開始するまでに完了するサイクルで計画されていた。しかし、斜ケーブルの配置・緊張作業と下床版の鉄筋・型枠組立て作業が同じNブロック内空部で輻輳することが想定されたため、詳細設計では斜ケーブルを1ブロック遅らせて主桁施工ブロック(Nブロック)の2つ前のブロック(N-2ブロック)に配置できるように施工サイクルを見直した。これにより斜ケーブル施工と主桁施工を同時に進捗させることができようになり、標準ブロックでは実働11日から10日に、斜材施工ブロックでは実働14日から12日に低減することができた。

主塔の施工については、下側のRC構造は3ロットに分割してコンクリートを打込んだ。主塔の中心には維持管理用通路のための鋼管を埋設し、主桁の内部から主塔の頂部までのアクセスが可能となるようにした。鋼-コンクリート合成構造との境界である3ロット目の頂部には鋼殻定着用のアンカーボルトをプレファブ化したアンカーフレームを設置した(図-4)。鋼殻は最大で65mmの厚さの鋼板で構成し、運搬・施工を考慮して約25tの5つのブロックに分割して製作した。鋼殻の各ブロックの接合方法としてはメタルタッチ併用摩擦接合を採用した。本接合方法では軸力の一部(設計上は50%)を添接板に受けもたせることなく直接伝達させるため、斜ケーブルの緊張により鉛直方向の軸力が卓越する鋼殻の接合方法としては適している。また、通常の摩擦接合だけの方法と比較するとボルトの必要本数を少なくすることができるという利点もある。

本橋に対しては近接する鈴鹿山脈から吹き下ろし風が頻繁に作用し、斜ケーブルの現場組立てには厳しい環境であり困難な作業になると想定された。また、新名神高速道路の開通時期を踏まえて工程短縮を図る必要があったことから、斜ケーブルにはセミプレファブケーブルを採用した。セミプレファブケーブルは工場で作られた斜ケーブルを現場で緊張・定着して施工するものであり、現場での斜ケーブルの組立てが無い作業工程の短縮だけでなく斜ケーブルの品質向上も図ることができた。斜ケーブルの緊張は主桁の内部から1100tの容量を有するセンターホールジャッキを用いて実施した(写真-9)。ジャッキの重量は約3tと大きかったため、主桁内での設置作業の円滑化と安全性の確保のために専用のジャッキセット装置と桁内運搬台車を開発し使用した。

### 4. おわりに

菰野第二高架橋の主橋であるPRC3径間連続エクストラード橋(写真-10)の設計・施工について、主に斜材の設計および関連する検討の内容を中心に概要を報告した。

斜張橋などの構造安全性においては斜材が重要な役割を担っている。その点を踏まえ、本橋では斜ケーブルに四重



写真 - 8 張出し架設の状況



写真 - 9 斜ケーブルの緊張



写真 - 10 ライトアップされた PRC3 径間連続エクストラードズド橋

防食仕様を採用して高い耐久性能を付与し、また不測の事態である落雷や火災に対しても斜ケーブル破断のリスクを低下させるための対策を実施した。しかし、100年の設計供用期間にわたり斜材の健全性を保つためには建設時の設計・配慮だけでは十分ではなく、適切な維持管理が必要である。現在、中日本高速道路(株)が管理する高速道路には本橋を含めて12橋の斜張橋などがあり、それらについては高速道路橋の多数を占める桁橋とは異なる構造的特徴を考慮した維持管理を実施・検討している。とくに斜材に関してはさまざまな取組みを実施しており<sup>8~10)</sup>、斜張橋などの維持管理の信頼性や効率性の向上に努めている。今後も斜張橋などを含めあらゆる橋梁の構造安全性を確保するために、建設と維持管理の両段階において多様な観点から設計・検討を実施していく所存である。

#### 謝 辞

景観設計についてご指導いただきました「中日本高速道路(株)名古屋支社 景観検討会」のアドバイザーの皆様、および本橋の設計・施工にご協力いただきました関係各位に記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：斜張橋並列ケーブルのウェークギャロッピング制振対策検討マニュアル(案)、1995.9.
- 2) 米田昌弘：PC斜張橋ケーブルの風による振動とその対策、コンクリート工学、Vol.32, No.5, pp.23-30, 1994.5.
- 3) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧、2007.12.
- 4) Fédération internationale du béton (fib) : Acceptance of stay cable systems using prestressing steels, 2019.3.
- 5) 中日本高速道路(株) : NEXCO 試験方法 第4編 構造関係試験方法、2019.7.
- 6) 新日本サーマルセラミックス(株) ウェブページ : <http://www.thermalceramics.co.jp/> (2019.2.2 参照)
- 7) 本州四国連絡橋公団第二建設局：斜張橋ケーブルの製作・輸送および架設に関する検討報告書、1984.3.
- 8) 酒井秀昭、大橋岳：斜材点検用非破壊検査装置の開発と運用 - 自走式斜材点検装置 -, コンクリート工学, Vol.55, No.8, pp.651-656, 2017.8.
- 9) 服部雅史, 若林大, 野鳥昭二, 立松秀之 : エクストラードズド橋の斜ケーブル破断が橋全体挙動に及ぼす影響の一検討, 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.411-414, 2018.11.
- 10) 若林大, 服部雅史, 野鳥昭二, 立松秀之 : 斜張橋斜ケーブルの張力測定による健全性の評価, 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.613-616, 2018.11.

【2019年7月5日受付】