

合成桁橋の床版取替における急速撤去技術

阪神高速道路(株)		橋爪 大輔	、	阪神高速道路(株)	正会員	鈴木 英之
阪神高速道路(株)	正会員	中山 栄作	、	飛島建設(株)	正会員	佐竹 康伸
飛島建設(株)	正会員	石塚 健一	、	飛島建設(株)	正会員	○中山 佳久
第一カッター興業(株)	吉田 啓助	、	(株)オリエンタルコンサルタンツ	正会員		上野 淳人

1. はじめに

阪神高速道路は、昭和 39 年に環状線（土佐堀～湊町）が最初に開通してから 50 年以上経過しており、全体の 3 割以上の区間が開通から 40 年以上経過し、構造物が老朽化している。さらに、大型車交通量の増加や車両総重量の増加、凍結防止剤の使用などによって、構造物が大きなダメージを受けている。こうした中で、阪神高速道路(株)では、構造物の健全性を永続的に確保し、高速道路ネットワークの機能を将来にわたり維持していくための抜本的な対策として、大規模更新・修繕事業に着手している。

コンクリート床版と鋼桁からなる合成桁橋は、経済性と合理性により 1950 年代から 60 年代に多く建設されており、開通から 50 年を迎え、想定以上の交通量の増加などによって床版の損傷が激しくなり、床版取替工事が数多く計画されている。合成桁橋の RC 床版の取り替えは、一般に標準部の床板を切断・撤去し、後から鋼桁直上の床版を人力斫りにて撤去するが、鉄筋とずれ止め（スタッド）が密に配置されているため、現状では短時間に既設鋼桁と RC 床版を分離できず、このことが床版取替工事におけるクリティカルパスとなっており、工程短縮が難しくなっている。また撤去時の斫り作業による、騒音・振動・粉じんなどの環境負荷も大きな課題となっている。

2. 技術開発の目標

技術開発の目標は、合成桁橋の床版取替時に非常に手間が掛かる鋼桁と RC 床版の接合部（以下、接合部）の除去を床版撤去開始までの準備期間に行い、通行止め開始後の床版撤去を鋼桁位置に関わらず一括して行うことで、床版撤去期間を短縮することとした(図-1)。接合部の除去期間中の一般交通に支障があってはならないため、鋼桁を損傷させることなく接合部を除去し、接合部除去後は仮補強を行って合成桁橋の機能低下を防ぎ、合成桁橋の健全性をモニタリングする技術が必要であった。接合部のコンクリート除去にウォータージェットを活用した Hydro-Jet RD 工法（Hydro-Jet demolition technique for Replacing the decks）を開発した。

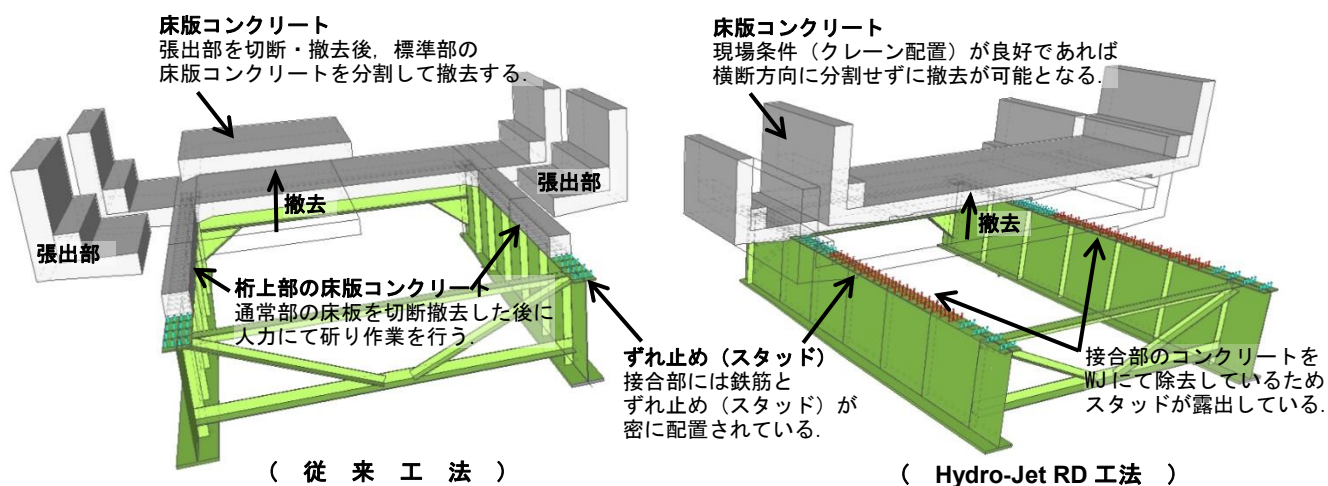


図-1 従来工法と新工法の床版撤去方法の比較

キーワード 大規模更新, 合成桁橋, ウォータージェット, ずれ止め（スタッド）, 鋼製補強材, 床版撤去
連絡先 〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15 飛島建設(株)本社土木事業本部リニューアル統括部 TEL 03-6455-8324

3. 接合部除去の影響

技術開発に先立ち、接合部のコンクリートを 50 mm 程度除去(写真-1)した合成桁 (以下、不完全合成桁という) は、合成構造が不完全となることが懸念されるため、その構造的な影響を 3 次元弾性 FEM 解析で検討した。解析の結果、不完全合成桁は、交通量の多い高速自動車国道 (6 主桁、幅員 17.5m、支間長 26m) を対象とした B 活荷重作用時に、鋼桁と床版のずれ変形に起因するせん断力(図-2)によりスタッドに降伏応力の 3~4 倍程度の曲げ応力が発生するものの、鋼桁、RC 床版については応力が若干増加する程度であり許容応力度を満足する。スタッドに作用する曲げ応力について以下に示す。



写真-1 鋼桁と床版の分離状況

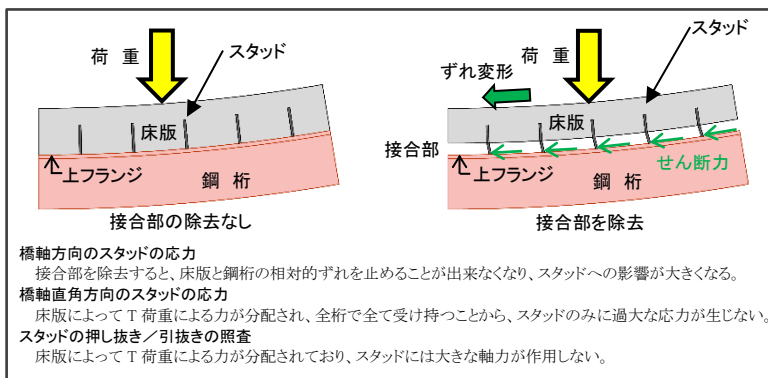


図-2 鋼桁と床版のずれ変形に起因するせん断力

- ・スタッドの橋軸方向は、全桁全区間の接合部を除去した場合、スタッド降伏強度の 4.6 倍の曲げ応力が作用する。支間端部を 0.8m 程度残し、除去する区間を 1 主桁の 4m に限定した場合、支間中央では降伏強度以下、支間端部では降伏強度の 2 倍の曲げ応力が作用する。除去する区間を 1 主桁の支間端部 2m に限定した場合、許容応力度以下となる(図-3)。

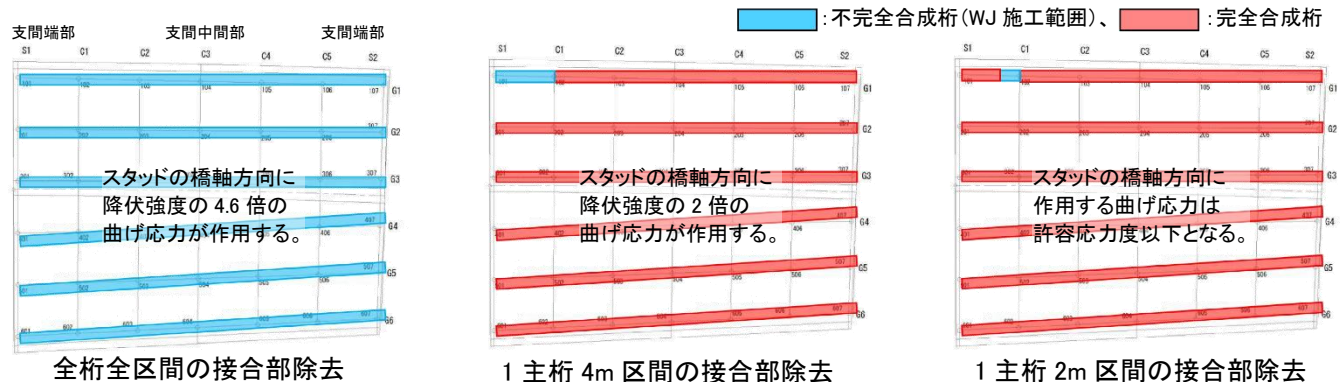


図-3 WJ施工範囲とスタッドに作用する最大曲げ応力

- ・スタッドの橋軸直角方向は、全桁全区間の接合部を除去した場合、降伏強度の 0.84 倍の曲げ応力が作用する。床版によって荷重による力が分配されており、全桁で全て受け持っていることから、接合部の除去によってスタッドのみに過大な応力は生じていない。よって、橋軸直角方向のスタッドは応力超過しない。
- ・スタッドの押し抜き／引抜きの照査 は、床版によって荷重が分配されており、スタッドには大きな軸力が作用しないことが確認できた。発生する軸力について、押し抜き、引抜きに関する照査を行った結果、圧縮許容値 68.5 kN、引張許容値 23.0 kN に対して共に 10 kN 以下であり、応力超過しない。

以上の結果から、除去した接合部周りの拘束力がなくなる支間端部は一度に除去する範囲を 2.0m 以下に限定し、その都度補強を行うことで橋軸方向の曲げによるスタッドの降伏を防止できる。また、支間中央部は 1 パネル 4m (横桁間隔程度) 範囲での除去が可能である。スタッドを曲げ降伏させなければ接合部除去時の構造安全性を確保できる (鋼桁と RC 床版は許容応力度を満足している) ため、接合部除去により露出したスタッドの曲げ補強方法 (仮補強材) を開発することとした。

4. 接合部の除去後に設置する仮補強材の開発

(1) 仮補強材の要求性能

接合部の除去後に設置する仮補強材の要求性能は以下の通り。

- ①スタッドが降伏荷重の4倍程度の水平荷重（せん断力）に対しても弾性状態の変形性能（せん断剛性）を維持する。
- ②狭隘な場所での施工性を確保する。
- ③鋼桁に削孔等の損傷を与えない補強方法である。

(2) 鋼製補強材の構造

仮補強材は、鋼製補強材と空隙を埋める特殊モルタルで構成される。仮補強材は(図-4)に示すように4本1列または4本2列のスタッドの最外側スタッドを鋼材で囲み、鋼材とスタッドの隙間および鋼材と床版の隙間にモルタルを充填して、活荷重作用時の鋼桁と床版のずれ変形を抑制する構造とした。鋼桁の上フランジをオーバーハングする部材を鋼製補強材に設けて支点ボルトにて締め付けることで、スタッドが負担するせん断力の低減を図っている。

また、鋼製補強材は3ピースで構成し、組立時の背面パーツの差し込みを容易とし、解体用ボルトを差し込むだけで解体できるなど、組立解体が容易な構造としている。

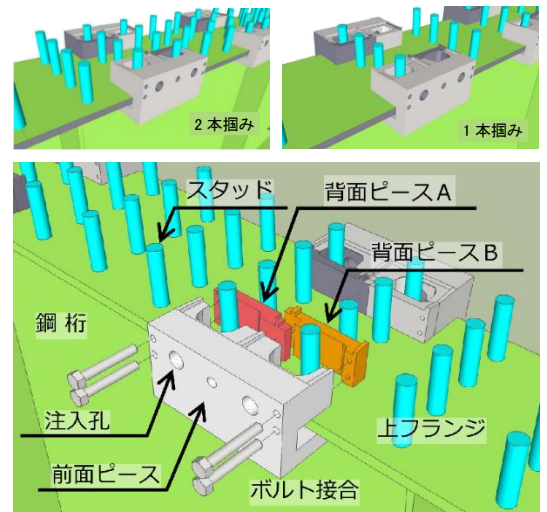


図-4 鋼製補強材の構造

(3) 仮補強材の性能

仮補強材の基本性能（所要変形性能を維持できる最大荷重）は要素試験により確認した。(図-5)の試験結果に示すように、露出したスタッドに仮補強材を設置することで、スタッド無補強時の降伏水平荷重（全スタッドの下端が降伏するまで）の約3.5倍〔2本掴みの場合〕から約4倍〔1本掴みの場合〕まで、スタッド無補強時の弾性挙動と同等の変形性能を維持できることを確認した。

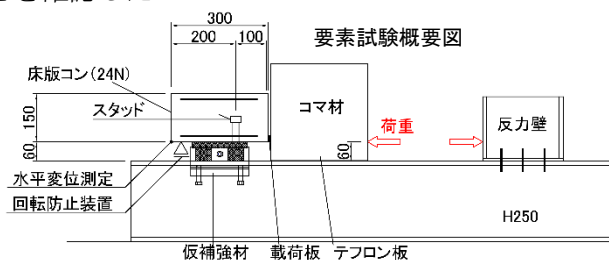
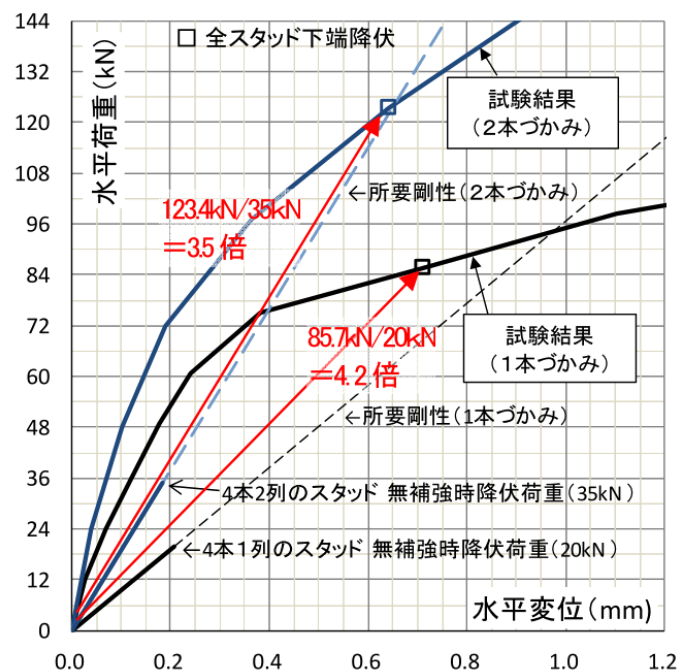


図-5 仮補強材の性能図(要素試験)



(4) 特殊モルタルの性能

鋼製補強材とスタッドの空隙を埋める特殊モルタルとして、可塑性を有する高強度無収縮モルタルを開発した。鋼製補強材前面から注入することで、鋼製補強材内部とコンクリート床版との隙間を隅々まで充填でき(図-6)、作業の翌朝(σ 15 時間程度)には $40\text{N}/\text{mm}^2$ の強度を発現する。可塑性を有することで充填完了後の空隙の発生を防ぎ、鋼桁と仮補強材、RC 床版の一体性を確保する。

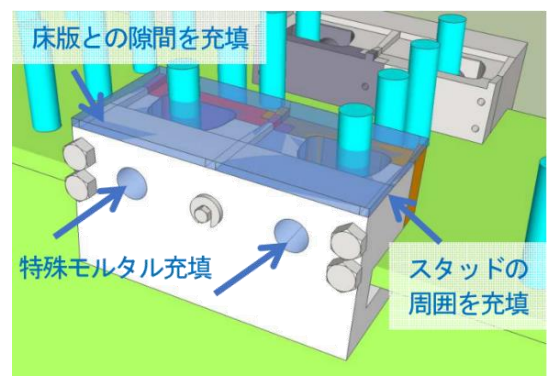
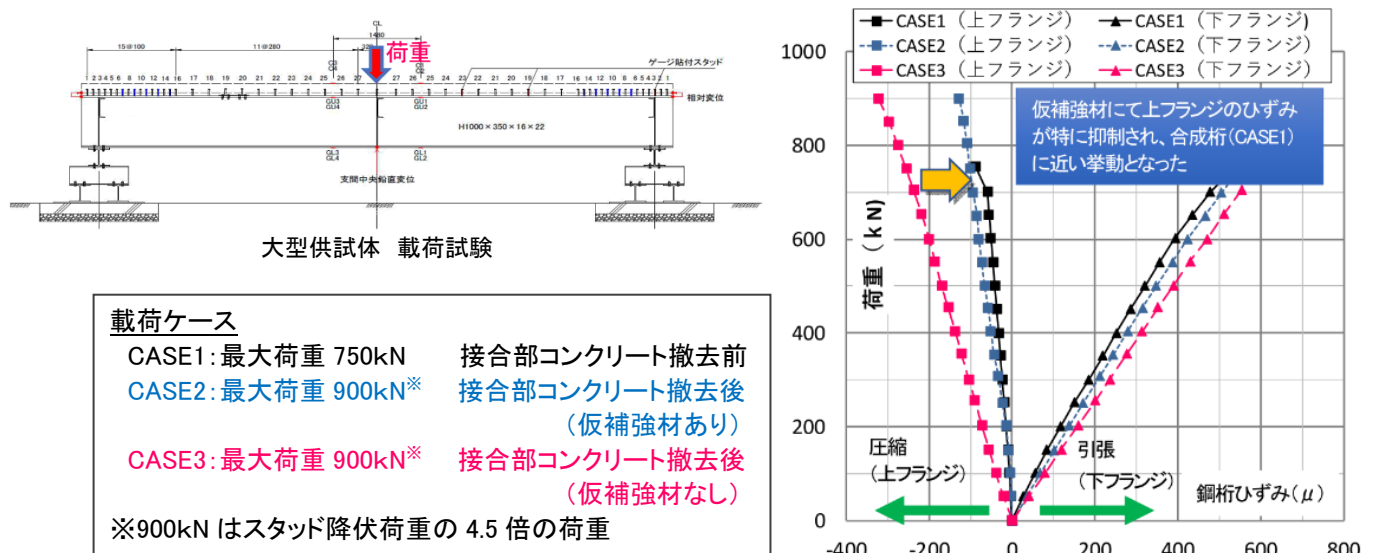


図-6 特殊モルタルの充填

(5) 大型供試体試験による仮補強材の性能確認

不完全合成桁における仮補強材の効果は、実物大規模の大型供試体の載荷試験で確認した。試験ケースは、ハンチ除去前 (CASE1; 合成桁)、ハンチ除去後仮補強時 (CASE2)、ハンチ除去後無補強時 (CASE3; 不完全合成桁) とし、CASE2 および CASE3 における最大荷重は、無補強時のスタッド降伏荷重の 4.5 倍 (900kN) とした。また、CASE2 における仮補強総耐力が、CASE3 の最大荷重時にスタッドに生じるせん断力の総和を上回る様に仮補強材の組数を配置した。(図-7)に支間中央における鋼桁フランジの荷重-ひずみ関係を示す。仮補強材の設置により、上フランジのひずみが特に抑制されると共に合成桁 (CASE1) に近い挙動を検証できた。



5. 接合部除去方法の開発

(1) 接合部の除去方法

接合部のコンクリート除去にはウォータージェット (以下、WJ) 工法を採用した。最大 240MPa の超高压水によって鋼桁やスタッドを損傷させずにコンクリートだけを 50 mm 程度除去する。超高压水での除去作業の施工性、安全性を確保するために、橋軸方向と橋軸直角方向への移動を制御できる XY 研り装置と WJ 削孔装置の技術改良・組合せにより、移動架台付き WJ 装置を開発した。

(2) 施工性の向上

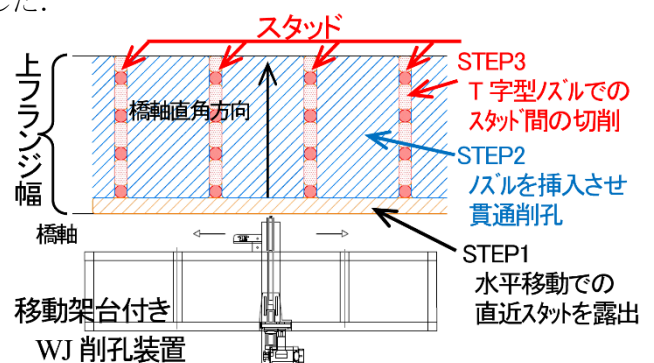
接合部のコンクリートの除去は 3 つの STEP に分けて施工する(図-8)。

STEP-1: 橋軸方向 (水平) に WJ 装置を移動させて接合部コンクリート表面を研り、直近のスタッドを露出させてスタッド配置を確認する。

STEP-2: WJ 装置をスタッド間で反転往復させながらノズルを挿入し、鋼桁上を高さ 5cm 程度で貫通するまで切削する。

STEP-3: ノズルを T 型 (又は L 型) に変更し、スタッド前後に残ったコンクリートを切削する。

接合部の除去高さの目標を 50~60mm とし、延長 10m, 3 主桁, フランジ幅 350mm, スタッド 4 本/列@100~280mm での大型の模擬試験体を製作して切削実験を行った(写真-2)。噴出孔の角度を 7°, 噴出圧 220Mpa の設定で、はつり高さの目標範囲内での切削



が可能であることを確認した。また、噴出の反対側に排水回収装置を装備することで、ほぼ全ての噴出水を回収できている。

WJ 施工では、超高圧水の噴出時や対象物の切削時、貫通して空気を切り裂く破裂音等、様々な騒音が発生する。3 つの STEP に分けて施工することで、使用水量（作業時間）を開発当初から 1/8 程度に低減できている。排水回収装置に消音材を装備することで、約 5 dB の騒音低減効果がある。

6. WJ による接合部除去の試験施工

阪神高速道路の実際の構造物（使用頻度の低い管理用道路）において、WJ による接合部コンクリート除去の試験施工を実施した。

(1) 防水防音型吊り足場の開発

床版取替工事では主に吊り足場が使用されるが、WJ の使用にあたり、足場内、特に吊りチェーン周りの漏水対策が課題であった。そこで、以下に示す防水機能と漏水検知機能を備えた吊り足場構造を開発した。①As 防水シートを床面に敷き詰め、防水・防音機能を備えた。②吊りチェーンと床材の交差部に短い塩ビ管を据え、流動性、柔軟性のあるシリコンで充填し、振動に強い止水構造とした。③吊りチェーン部と防水シート背面に漏水検知センサを配置し、漏水時の早期の警報、漏水個所の特定を可能とした(写真-3)。



写真-3 防水防音型吊り足場構造

(2) WJ による接合部コンクリートの除去

WJ 施工は前述の 3 つの STEP に分けて行い(図-9)、切削量 1.5～2.0m/日程度（橋軸方向出来形）、切削幅は 50～60mm の範囲を遵守でき、削り残しなく切削できた。横桁や対傾構部など機械施工では対処できない部分はハンドガンの人力施工で対処し、機械施工と変わらない出来形精度で施工できている。



図-9 WJ による接合部コンクリートの除去(3-STEP)

使用水量は $4\text{m}^3/\text{日}$ ($0.5\text{m}^3/\text{hr}$) 程度であり、排水回収装置が機能して使用水量の 80%を回収できている。一方で残りの排水は床面に落水するが、防水足場の設置によって足場から下に一切落水することなく回収できている。切削による騒音は発生源からの離隔距離 13mで騒音規制値の 85dB であり、実施工では更に近接する家屋が想定され、用地境界で騒音規制値を満足させるためには、更なる騒音対策が必要である。

(3) 仮補強材の設置

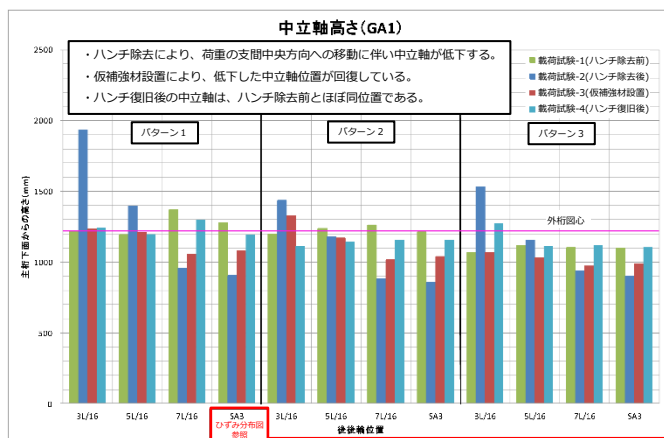
仮補強材は埋設金物などの影響により、計画の位置に配置できない場合が想定された。これが問題にならないよう、仮補強材の配置に自由度を持たせた(写真-4)。特殊モルタルは密実な充填性と所定の強度発現 ($\sigma 15\text{hr}=47.3\text{N}/\text{mm}^2$; 設計 $40\text{N}/\text{mm}^2$) を確認した。補強材の設置作業は 15 分/個、撤去は 10 分/個、さらにスタッド周りの補強モルタルの除去は 5 分/個程度と極めて短時間で施工でき、開発目標である工程短縮に支障がないことを確認した。



写真-4 仮補強材設置状況

(4) 載荷試験

仮補強材は全スタッドの 38%に適用し、重量 20t 車両による載荷試験（着手前、WJ 施工後、仮補強後）を実施した。これによって、仮補強材の効果（床版と主桁の相対変位抑制による合成程度回復；中立軸高さと断面内ひずみ分布の回復）を確認した(図-10、図-11)。



用範囲 100～120mm) と 150mm タイプ (適用範囲 140～160mm) の 2 種類を用意し、スタッド間隔 200mm 以上の場合はスタッド 1 本を掴む形式で対応した。鋼製補強材は鋼桁上フランジの左右外縁の 2 列にのみ配置し、配置個数は FEM 解析にて設定し、径間長 22m の 1 主桁に 68 個配置した(図-12)。

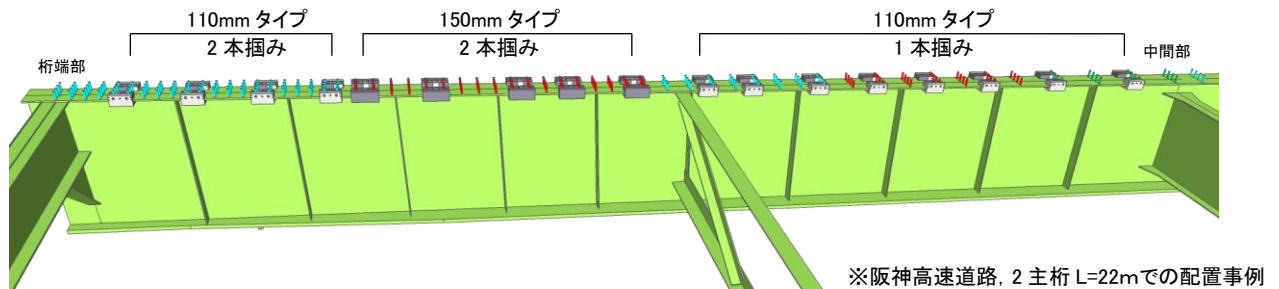


図-12 仮補強材の配置事例

(3) 高欄の撤去

進入路での撤去作業は、橋面の施工幅が狭く大型クレーンの設置が困難であったため、高欄部を先行撤去(写真-5)し、吊り上げ重量の軽減を図った。高欄を切断・撤去する際のクレーンは仮補強材の設置によって鋼桁の補強を行うことなく撤去する径間内に設置できることを、FEM 解析にて確認した。高欄の撤去は従来の施工方法と同様に、1 径間(22m)当り 2 日(昼間作業のみ)で完了している。



写真-5 高欄の先行撤去

(4) 床版の撤去

高欄撤去後、仮補強材を撤去して床版を切断し、スタッドを切断して床版を撤去した。スタッドの切断はプラズマ切断機を採用し、鋼桁への熱伝達の低減、作業時間の短縮を図った(写真-6)。床版撤去は、隣接径間に 25t クレーンを据えて行い、高欄部分を除く横断方向を一括して撤去した(写真-7)。隣接径間にクレーンを設置することで鋼桁の補強を不要とした。床版と鋼桁が仮補強材で接合している(接合部が連続しない)状態で床版を切断し、撤去時の作業荷重が撤去する床版に作用する場合の検討は今後の課題となっている。



写真-6 ずれ止め(スタッド)の切断

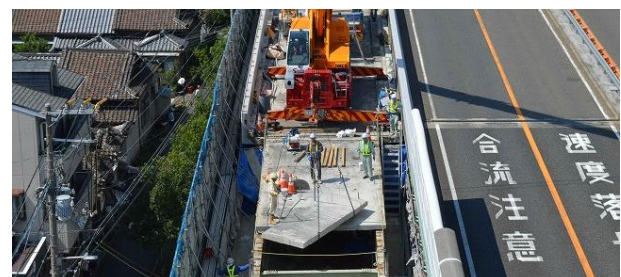


写真-7 隣接径間からの床版撤去

(5) 合成桁橋の健全性モニタリング

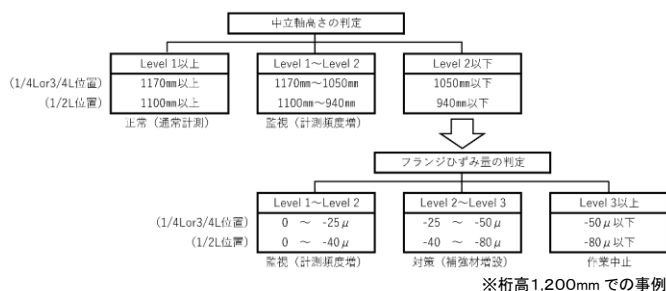
仮補強材の充填モルタルのひび割れや床版下面との界面の剥離等によって仮補強材の性能が低下した場合、その影響は合成桁の中立軸の高さ変化となって表れることから、鋼桁の上下フランジにひずみ計を設置して、通行車両の重量を荷重としたひずみ量を計測し、荷重の作用による中立軸の高さとひずみ量を指標とした 2 段階管理を行った(表-1, 図-13)。これによって交通供用下での接合部の除去作業を、通行車両の安全を確認しながら施工できている。

ひずみ計測は一般通行車を荷重とした動的計測とした。計測間隔は 38Hz (38 回/秒)で行い、輪荷重が作用する約 0.5 秒間に 20 回程の計測を行う。多頻度の動的計測を行うために、光ファイバセンシングシステムを採用した。光ファイバセンシング技術は、光信号の長距離伝送が可能であり、外部の電磁ノイズによる信号の乱れがないため、多測点・多頻度の計測に適している。計測値は移動平均処理を行って計測値の平準化を図っている(図-14)。

表-1 中立軸の高さによる3段階管理

レベル	実施事項	中立軸位置（主桁下縁からの高さ）	
		L/2断面	L/4断面
レベル1（正常）	日常計測を継続	1380 ~ 1100	1390 ~ 1170
レベル2（警戒）	仮補強材の点検、計測頻度増	1100 ~ 940	1170 ~ 1050
レベル3（要対策）	仮補強材の増設、交換	940 ~ 830	1050 ~ 960

※桁高1,200mmでの事例



※桁高1,200mmでの事例

図-13 中立軸高さとフランジひずみ量の2段階管理

1/2L位置の中立軸変化

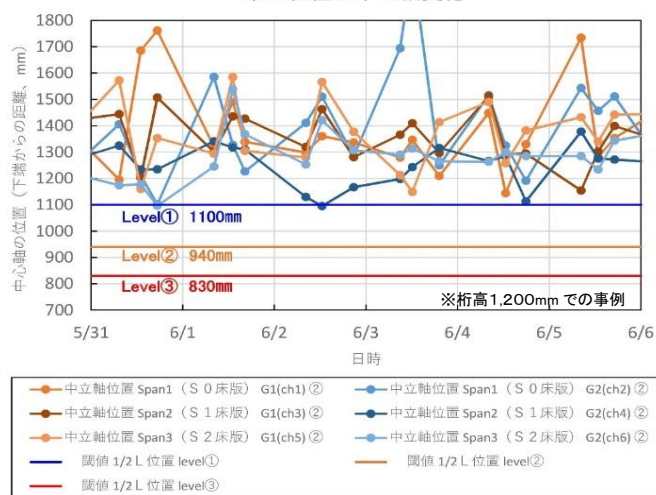


図-14 中立軸の高さの管理事例

8. 床版撤去における工程短縮効果

床版の撤去に先立ち、交通供用下で鋼桁上のずれ止め（スタッド）を全延長に渡って 50mm 程度露出させるため、通行止め後はスタッドを切断するだけで速やかに床版を撤去できる。また鋼桁位置に関係なく床版を切断することができ、撤去ブロック数を少なくできる(写真-8)。以上によって、通行止め後の撤去工程の大幅な短縮が可能となる。積算上、径間長 20m, 2 主桁, 1 径間の床版撤去の場合、桁上コンクリートを後から手すりする従来工法では通行止めが 18 日必要となるが、本工法では 9 日に短縮できる(表-2)。実施工では、径間長 22m, 2 主桁, 3 径間の床版撤去を昼間施工(8hr)のみで、余裕を持って 20 日間で完了している(1 径間当り 7 日間で完了している)。接合部を事前に除去しておくため、床版撤去時は主桁本数や位置の影響を受けず、主桁本数が多いほど工程短縮効果が大きくなる。



写真-8 鋼桁位置を越えた床版の一括撤去状況

表-2 工程短縮の積算上の試算¹⁾

通常のRC床版撤去工程【想定】			本工法による撤去想定工程【想定】	
工 種	日 数		工 種	日 数
通行止め前作業	なし	通行止め前 ↓ 通行止め後	WJはつり・仮補強	22日程度 (通行止め前)
床版切断	6日程度		仮補強材撤去・床版切断	6日程度
床版ブロック撤去	6日程度		床版ブロック撤去	3日程度
桁上破碎	4日程度		桁上破碎	なし
スタッド撤去	2日程度		スタッド撤去	前作業に含む
通行止め計	18日		通行止め計	9日

※径間長20m、2主桁、1径間を想定し試算

9. 今後の取り組み

接合部の除去厚さは、WJ ノズルの大きさ、プラズマ切断機の大きさ、仮補強材の施工性から 50mm±5mm に設定しているが、除去厚さの低減は工程短縮、コストダウンに直接影響するため、可能な限り除去厚さを薄くすることが求められる。WJ 技術の改良によって接合部の除去厚さを 3 割程度薄くすることが可能であることを確認している。今後、この薄い除去厚さに対応する仮補強材を開発するなど、本工法の改良を図る予定である。

阪神高速道路（株）で実施中の大規模更新・修繕事業では、本工法が重要な役割を担っていると考えており、更なる工事期間の短縮、環境的な負荷の低減などの社会的な影響を最小限にすることを念頭に、工法の改良、工夫を行いながら事業を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Yojiro Murakami, Takashi Kosaka, Akinori Sato, Seisuke Muragishi, Kimio Saito, Yasuo Kawabata: Design and Construction of UHPFRC Deck for Replacement of Deteriorated Concrete Slab, 40th IABSE Symposium