

低空頭ウォータージェットによる 効果的なコンクリート除去技術

Hydro-Jet RD 工法におけるウォータージェット装置の開発

鈴木 英之・佐竹 康伸・吉田 啓助

合成桁橋の床版更新では、損傷した床版のみを撤去・新設し、健全な鋼桁は再利用する。しかしながら、鋼桁と RC 床版は密に配置されたスタッドで接合され、分離することが容易ではなく、床版撤去の工期短縮を難しくしている。

その課題解決のため、通行止め後の床版撤去期間を短縮する『Hydro-Jet RD 工法 (Hydro Jet demolition technique for Replacing the decks)』(以下「本技術」という)を開発した。本技術は、車両を通行させながら、鋼桁と RC 床版の接合部のコンクリートのみをウォータージェットにて 5 cm 程度除去し、露出部に補強材を装着して交通供用を維持する。その結果、通行止め後の作業量を減らし、床版撤去期間を短縮する効果を持つ。

本稿は、当該技術の中で、床版と鋼桁を損傷することなく、接合部のコンクリートだけを除去するウォータージェット装置、施工方法の開発を中心に報告する。

キーワード：橋梁、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

1. はじめに

高度成長時代に建設された高速道路の多くは経年劣化が顕在化しており、国土強靱化を推し進めるわが国において、社会インフラの健全化が重要課題となっている。そこで高速道路の大規模更新・大規模修繕事業は、2015 年 3 月に高速道路会社の更新事業に対する道路整備特別措置法に基づく事業が許可され、整備が始まっている。一方、都市部の更新事業は、ネットワーク維持の重要性から、長期間の通行止めを極力避けなければならない、大規模更新を行うには課題も多い。

1960 年代初頭より建設が盛んとなった鋼コンクリート合成桁橋 (以下、合成桁橋) は、経済的な橋梁形式として数多く建設され、老朽化が進んでいる。合成桁橋は、経済性を追求した鋼桁であるため、撤去時の作業荷重が作用すると不安定になり易いなど、合成桁橋特有の床版更新の難しさから急速施工に関しては課題が多い。過去には、床版と鋼桁のずれ止めがブロックジベル (馬蹄形スタッド) であったことなどから、短期間規制と急速施工の工事条件を満たすために、既設の鋼桁ウェブを切断して上部の床版と鋼桁の一部を新設の T 字部材と床版に取り替えた事例があった。しかしながら、長期的な維持管理の観点からも健全な鋼桁を切断することなく、更なる急速施工が図れる技

術が必要とされた。

本技術は、①通行止め期間の大幅な短縮、②準備工時の交通安全性の確保、③周辺環境への配慮、以上を目標に取り組み、これらを実現したものである。

2. 本技術の開発コンセプト

(1) 開発の経緯

本技術は、通行止め期間の短縮を目的としてウォータージェット (以下、WJ) を活用した床版撤去技術



写真—1 阪神高速道路における床版撤去

のコンセプトを考案し、施工、構造に関する各種要素試験を実施、技術を確認した。そのうえで、阪神高速15号堺線玉出入路にて施工を行い、開発技術の信頼性と適用性を高めた（写真—1）。

（2）従来工法との比較と本技術の新規性

従来の合成桁橋の床版撤去では、鉄筋やずれ止め（スタッド）が密に配置されている桁上部を残し、床版を細かく分割して撤去しなければならない。さらに桁上部に残ったコンクリートの除去にも時間が掛かるため、撤去工程が長くなっている。近年普及が図られているワイヤーソーで鋼桁と床版を分離する工法は、鉄筋やずれ止め（スタッド）が密に配置されている接合部内部の状況を確認できないため、鋼桁を損傷させないようにワイヤーの位置を誘導する装置を設ける等、慎重な作業が必要であり大幅な工程短縮には至っていない。

この課題に対し本技術は、床版の撤去に先立ち、供用下で鋼桁上のずれ止め（スタッド）を全延長にわたって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（写真—2）。また、床版と鋼桁間に空隙があることから、鋼桁位置に関係なく床版の切断位置を設定でき、撤去



写真—2 WJによる接合部コンクリート除去状況



写真—3 複数台による床版切断状況

表—1 積算上の工程短縮の想定

工種	日数	工種	日数
通行止め前作業	なし	WJ・はつり 仮補強設置	17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
桁上破砕	4日程度	桁上破砕	なし
スタッド撤去	2日程度	スタッド撤去	他の作業に含む
通行止め計	18日程度	通行止め計	9日程度

ブロック数を少なくできる。また、床版切断時は、スタッドに支えられているため、複数の切断機で同時作業を行っても床版のずれ・落下がない（写真—3）。

以上によって、橋面上からの作業量の低減が図れ、同時に複数の作業が可能であることから、通行止め後の撤去工程の大幅な短縮が可能となった。径間長20m、2主桁、1径間の床版撤去の積算工程において、桁上コンクリートを手斫りする従来工法では通行止め期間が18日となるが、本工法では9日間と半分に短縮できることが想定できた（表—1）^{1)～3)}。

（3）WJによる除去範囲の管理（車両通行時の構造安全性）

WJによる鋼桁と床版接合部の撤去は、床版コンクリートを直接損傷させるリスク以外にも、鋼桁と床版接合部のコンクリートを除去した状態で車両を通行させた場合、スタッドが降伏して合成構造が不完全となることが予想された。このため、構造的な影響を3次元弾性FEM解析で検討した結果、接合部のコンクリートを除去した状態では、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によって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が、鋼桁、床版は応力が若干増加するものの許容応力度は超えないことが明らかになった。この検討結果より、スタッドを曲げ降伏させなければ鋼桁および床版の構造安全性は確保できることが明らかになり、WJで接合部コンクリートを除去した後、鋼製補強材と特殊モルタルからなる仮補強材をスタッドに設置することで、スタッドの曲げ降伏を防ぎ、合成桁橋としての機能の低下を抑制した^{1), 2)}。

仮補強材を設置するまでに、一度に撤去する接合部コンクリートの延長は、構造解析にて設定した。この橋梁構造に影響を与えない延長方向の制限量以内で、WJによる除去厚を設定範囲（設定値±5mm）に管理し、接合部コンクリートの除去と仮補強材の設置を1日の作業サイクルとして繰り返す計画とした。

3. WJを用いた接合部コンクリートの除去技術の開発

開発コンセプトに基づいた本工法の施工手順を以下に示す。

- ①交通供用を維持した状態で、床版と鋼桁接合部のコンクリートのみをWJによる超高压水で除去する。
- ②接合部除去後、当日に除去した範囲のスタッド及び上フランジに仮補強材を設置し、合成桁橋としての機能低下を抑制する。
- ③桁端部を除く、支間全体の接合部を仮補強材に置き換えるまで①②を繰り返す。
- ④交通規制後、撤去作業開始時に仮補強材を速やかに取り外し、床版を所定の寸法で切断した後、スタッドを切断して床版を撤去する。

ここでは、新たに開発した複数の装置のうち、WJ装置について述べる。

(1) 既存 WJ 技術の現状把握

新開発の WJ 装置は、これまで述べたように、床版及び鋼桁に悪影響を与えず、さらに合成桁橋としての機能を損なわずに交通供用を可能とする接合部を除去し、必要寸法を過不足のない管理された厚みで、上フランジの全幅を除去する必要がある。

また、本技術は吊り足場での施工を想定しているため、使用水量、回収水量、発生騒音などの発生量の把握と、その削減方法は実用化に向けて重要な要因であった。これらの目標及び問題点に対し、既存の WJ 技術の対応度を確認するため、事前に要素試験を行い、現状の把握を行った。

要素試験は、固定された 1 m 角の有筋コンクリート塊に対し、高压水の噴出方向をコンクリート面に対して、60°、90°、120°と変え、それぞれにおいて、コンクリート面に平行方向に移動させて切削した。要素試験の結果、以下の知見を得た。

- ①同じ厚みで切削できる深さは、120 mm 程度である（標準的なフランジ幅 250 mm の半分程度）。
- ②鉄筋背面のコンクリートの除去率が低い。
- ③高压水の噴出源から 1 m の騒音が 130 dB を超える。
- ④必要とする使用水が $4 \text{ m}^3/\text{時}$ を超える。
- ⑤多くの使用水が飛散し、回収が困難である。

(2) 目標の設定

要素試験の結果を踏まえ、①必要な寸法の確実な切削、②使用水量の大幅な削減を開発目標とした。その他、開発目標一覧を表—2 に示す。

表—2 WJ 装置の開発目標

開発項目	目標
品質	①後工程に必要な寸法を接合部から除去し、かつ床版コンクリートを侵さない管理手法
適用能力	②床版下面から 30 mm がノズル中心となる低空頭仕様の本体構成
作業効率	③1 台のポンプ車両から複数の径間のノズルに対して高压水を供給できる配水システム ④使用水量の低減と使用水量当たりのコンクリート除去量の向上 ⑤狭隘な作業空間においても、人力で設置撤去・移動が可能な小型化、及び軽量化 ⑥ノズルの折り返し、挿入移動の自動化
安全	⑦防護服を必要としない距離からリモート操作可能なシステム ⑧複数スイッチによる並列回路緊急停止システム
環境	⑨使用水量当たりの回収水量の向上 ⑩作業時騒音の低減
その他	⑪床版撤去～設置時の前処理作業の軽減

(3) 目標実現に向けての課題

切削厚に関しては、粗骨材径 25 mm 以上のコンクリートに対し、後工程作業（仮補強、スタッドの切断）に必要な寸法を確保しつつ、床版コンクリート範囲は切削しないという下限と上限の範囲で管理する必要があった。特に、交通供用下での作業であることから、床版コンクリート部を切削しない精密な管理手法が求められた。

また、WJ の使用水は清水が必要であり、都市部で大量の清水を供給することは、一般的には困難なケースが多い。そのため、現実的な供給量として、散水車で供給できる $4 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度と想定し、要素試験における使用水量 $20 \text{ m}^3/\text{日}$ （ $= 4 \text{ m}^3/\text{時} \times 5 \text{ 時間稼働}$ ）に対する削減目標率を 80% とし、かつ、その水量で 1 日の撤去上限値を処理できるシステムが必要であった。

(4) 対策の立案

要素試験の結果を踏まえ、高压水の噴出方向は、切削するコンクリート面に正対する向き（90°）に固定し、ノズルを切削する接合部コンクリートの内部へ挿入するシステムを考案した（写真—4）。このシステムを模擬試験体に対して試験を行ったところ、ノズルの噴射部と接合部コンクリートを等距離に保ったまま切削が行えるため、フランジ幅の大小にかかわらず、同じ切削厚さで、コンクリートの除去が可能となり（表—1 目標①）。切削効率が一定で最適化できたことで、使用水量も激減した（目標④）。また、ノズルがコンクリート内部に潜り込むことで、噴射水の飛散防止と（目標⑨）騒音の低減が行えた（目標⑩）。さらに上フランジ面にコンクリートが残らず、後工程にフランジ



写真一4 低空頭式 WJ 装置

上面の研りや研磨作業が発生しないことも確認できた(目標⑪)。

新たに開発したシステムでは、橋軸方向と橋軸直角方向への移動を制御できる XY 移動装置をベースとしたレール架台装置と低空頭な形状を持つ WJ 装置の二つの装置から構成される。さらに WJ 装置は、前方に高圧水が噴射するノズルを有するタイプ A と側方に噴射するノズルを有するタイプ B の 2 種類を開発し、それぞれをレール架台装置に装着した(写真一5)。

2 種類の WJ 装置の機能を表一 3 に示す。



写真一5 WJ 装置及びレール架台装置

表一 3 WJ 装置の種類

種類	機能
タイプ A	前方に向けて切削する際に使用。先端前面に複数の噴出孔を持ち、圧縮空気により高速回転しながら高圧水を噴射する。
タイプ B	側方向に噴射する際に使用。ノズルの先端側方に噴出孔を持ち、高圧水を噴射する。誤操作による床版コンクリートの侵食防止を目的として、ノズルは、水平に対して±30°程度の限定された可動域を持つ。先端ノズルは、スタッドピッチにより両側噴射ノズルと片側噴射ノズルを使い分ける。

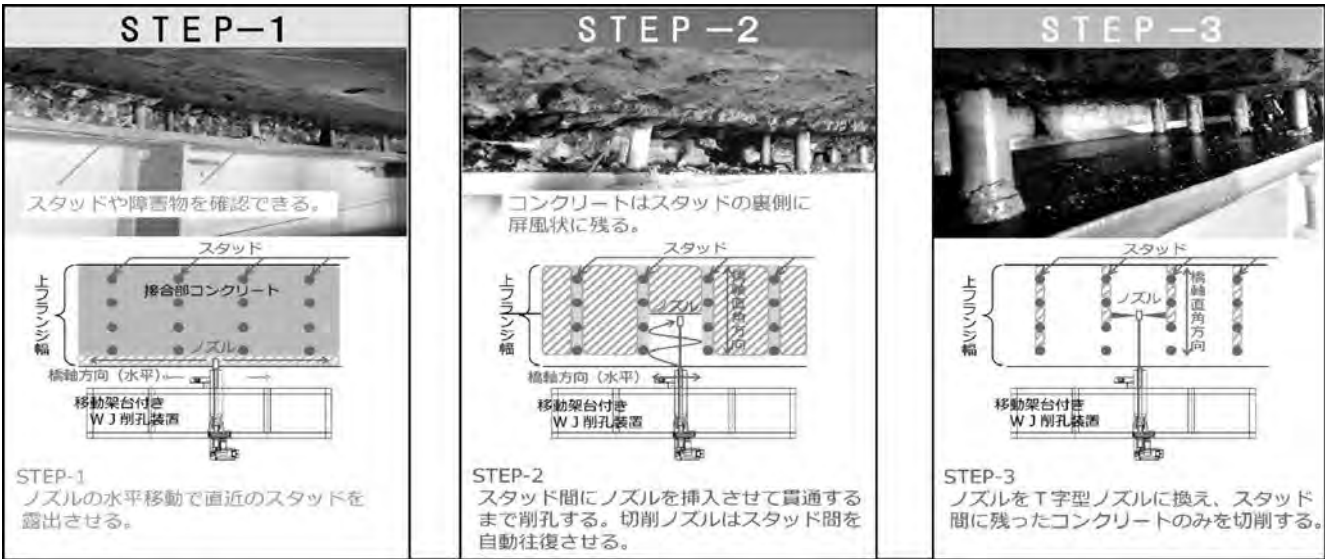
表一 4 接合部コンクリートの切削手順

ステップ	切削方法
STEP1	WJ 装置 (タイプ A) を橋軸方向 (水平) に移動させて接合部ハンチ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。
STEP2	WJ 装置 (タイプ A) 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 50 mm 程度で貫通するまで切削する。
STEP3	ノズルが T 字型 (又は L 字型) 噴射となる WJ 装置 (タイプ B) 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。なお、この時、スタッドピッチが 150 mm 程度以下の場合、左右の両方向から噴射する T 字型噴射ノズル、スタッドピッチが 150 mm 程度以上の場合片側からのみ噴射の L 字型噴射ノズルを使用する。

これらの WJ 装置を使用し、接合部コンクリートの切削は、表一 4 に示す 3 ステップで実施する (図一 1)。

4. 阪神高速道路 15 号堺線の玉出入路における施工

開発した WJ システムは、実物大模型試験、実橋試験を経て、阪神高速道路の入路において施工を行い、検証及び効果の確認を行った⁴⁾。



図一 1 WJ 施工 3 ステップ概念図

(1) 工事の概要

2018年3月より、阪神高速15号堺線玉出入路6径間の床版架け替え工事の内、本技術を用いて、3径間(2主桁、幅5.5m、径間延長22m)の床版を撤去する工事を行った。

事前準備工として行ったWJ作業は、交通供用したまま行ったが、施工中は鋼桁の上下フランジにひずみ計を設置し、ひずみ分布から合成桁の中立軸高さを算出して、橋梁構造と上部交通の安全監視を行った。この結果、施工中に中立軸の高さが想定以上に低下することはなかった。

(2) 作業効率

WJ作業は開発したWJ装置を使用し、水平移動とノズルの伸縮を機械制御で行い、3つのステップで施工することで、使用水量と建設汚泥の抑制、施工時間の短縮、均一な出来形の確保ができた。なお、WJの施工延長は126m、施工日数47日、延べ施工班数83班で、1日当りの施工量は2.68m/日、1班当りの施工量は1.52m/班であった。

(3) 出来形

玉出入路のずれ止め(スタッド)は4本/列であるので、4測点/列として、除去した範囲ですべての列の測点の出来形計測を行った。計測の結果、目標寸法の50mmに対し、 ± 5 mmの範囲に2688測点中、79.6%に当たる2140測点が入った。

(4) 使用水量

使用水量は、1日の作業量である約3m弱の切削に対し、5m³程度の使用量となっている。これは、標準的な散水車で搬入できる量であり、供給量として問題はない。

実績としては、施工日数47日における使用水量は216m³であったので、日平均使用量は4.6m³/日となった。建設汚泥は193.2m³発生しているので回収率は89.4%、約9割の使用水を回収している。広範囲に飛散し、乾く水量、及び使用水に圧力をかけることにより高温化して蒸発する水量を考慮すると、ほぼ100%回収できていると推定できる。

(5) 環境負荷

騒音発生源の抑制に加え、床面の防音仕様の適用、側面は防音シートと防音パネルの二重仕様としたことも寄与し、離隔8mの最近接の民家における騒音を85dB以下に抑制できた。

5. 今後の課題

今後の課題として、以下があげられる。

(1) 障害物対応

接合部内には、図面標記にない段取り筋、型枠吊り金具の残骸、鋼製スパーサーなどが存在する。WJ装置のノズルを挿入する際に、これらと衝突、干渉した場合、駆動軸に負荷がかかり、状況によっては、ロッドの変形破損となる。現状は、発生音などからオペレーターが緊急停止させているが、トルク管理により、駆動軸の負荷増大などの異常を自動感知できるシステムが必要である。

(2) ハンドガン施工の削減

横桁、端部などはWJの架台装置と干渉するため、すべての部位について機械施工ができず、一部をハンドガン施工としている。また、接合部コンクリートの厚さが極端に少ない箇所もハンドガンで施工した。ハンドガンの施工は、安全上の配慮が必要で、施工の効率も悪いことから、できる限り少なくする必要がある。今後は、WJ施工機械のさらなる小型化を進め、ハンドガン施工の範囲を減少させる。

6. おわりに

本技術Hydro-Jet RD工法は、床版の架設の前段階の撤去作業に着目して開発を行い、標準的な撤去工法と比較し、短い通行止め期間で撤去できることを検証した。一方、撤去床版の形状、寸法に自由度が高いことから、効果的な架設方法と組み合わせた更新工法とすることで、道路規制下での更なる工期短縮を図ることが可能だと考えており、今後はこれら更新技術の開発にも取り組む所存である。

謝 辞

最後になりますが本工法の開発を進めるにあたり、多大なご協力、ご支援を頂いた関係者の皆様に、心より、感謝申し上げます。

JICMA

《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.
- 2) 佐藤彰紀, 橋爪大輔, 石塚健一, 佐竹康伸: 合成桁橋のRC床版取替におけるウォータージェットを用いた急速撤去技術の開発(その1:

概要と構造検討), 第73回年次学術講演会, VI部門-328, 2018.

- 3) 川端康夫, 佐藤彰紀, 中山佳久, 吉田啓助: 合成桁橋のRC床版取替におけるウォータージェットを用いた急速撤去技術の開発(その2: 施工技術の開発と試験施工), 第73回年次学術講演会, VI部門-329, 2018.
- 4) 鈴木英之, 中山栄作, 佐竹康伸, 中山佳久, 齋藤公生, 村岸聖介: 阪神高速道路15号堺線玉出入路床版取替工事への新技術の適用, 橋梁と基礎 2019年2月号, 2019.

[筆者紹介]

鈴木 英之 (すずき ひでゆき)
阪神高速道路㈱
大阪管理局 保全部 保全設計課
課長代理



佐竹 康伸 (さたけ やすのぶ)
飛鳥建設㈱
土木事業本部 リニューアル統括部
担当部長



吉田 啓助 (よしだ けいすけ)
第一カッター興業㈱
ウォータージェット事業部
部長

