

スカジット川で崩落した橋の再建

— Restoring a collapsed span over the Skagit River —

著：Christopher M. Vanek, Victor Ryzhikov, and Bijan Khaleghi

訳：会誌編集委員会海外部会

セミトレーラーがワシントン州のスカジット川を渡るインターステート5号線（I-5号線）の鋼製トラス橋端部のトラス頂部の複数の横構に衝突し、北側橋が崩落した。緊急時の設計・建設契約では、事象発生後90日以内に恒久的な架替えを完了する必要がある。軽量骨材を用いたプレストレストコンクリートバルブT桁を採用し、革新的な完全曲げせん断フランジ接続とともに、既設鋼橋からの重量増を5%以内とし損傷していない下部構造を再利用できるようにした。主桁形状を検討し、スカジット川の垂直方向のクリアランスを確保した。仮設PC鋼材を用いることにより、架設時に発生する上縁の引張応力に対応した。本設橋を仮設橋に隣接する施工ヤードで構築し、横取り架設工法を用いることにより、I-5号線の閉鎖時間を19時間とすることができた。

キーワード：軽量骨材コンクリート、省主桁構造、下部工再利用、工期短縮

2013年5月23日、カナダの国境とワシントン州シアトルとの間にあるインターステート5号線（I-5号線）の4車線に沿って、夕方の通勤時間が終わった午後7時半ごろ、南側のレーンにセミトレーラーがI-5号線スカジット川橋の鋼製トラス橋端部のトラス頂部の横構に衝突した。数秒後に、北と南の両方の交通を結んでいる橋長49mの鋼製トラス橋の北側橋がスカジット川に崩落した（写真-1）。セミトレーラーは無事に横断したが、他の2台の車両に乗っていた3人が落下した。彼らはボートで救助され、重傷者はいなかった。崩落によりI-5号線は直ちに閉鎖され、バーリントンとマウントバーノンを通して迂回経路が設定された。

米国西海岸の主要な南北高速道路であるI-5号線は、メキシコからカナダへの都市を結ぶもので、国際貿易に不可欠な高速道路である。1日あたり7万台の車両がスカジット川を渡る。I-5号線は南北の唯一の州境で、シアトルとバンクーバー、カナダ間の主要ルートであり、橋が閉ざされている時間が長ければ長いほど、地域社会、州、国際貿易への影響はより深刻になる。

ワシントン州にとって、貿易は不可欠であり、カナダ

は州最大の貿易相手国の1つである。カナダから輸入された商品の大半は州に残る。さらに、多くのワシントン州の都市は、ブリティッシュ・コロンビア州からI-5号線を利用しているカナダの顧客とのビジネスに依存している。国境政策研究所は、2013年5月と6月にバーリントン南部のカナダの買い物客の51%の減少を示す2013年8月の報告書を発表した。

ワシントン州交通省（WSDOT）の崩落への対応

ワシントン州交通警察、ワシントン州交通省（WSDOT）、および地方機関が直ちに対応し、橋の周りの東と西の迂回ルートを設定し管理した。交通技術者は夜通し、バーリントンとマウントバーノン通る迂回経路を整備した。

スカジット川橋の崩落は、夏の旅行シーズンの始まりであるメモリアルデーの週末の直前に発生し、交通を回復するために仮設橋の設置が必要であった。仮設橋が建設されている間、WSDOTは、本設橋建設のための契約書類と資格を有する請負業者リストを2週間で作成した。

WSDOTの橋梁技術者は被害を評価し、通信スタッフがメディアに対応し、ワシントン州、オレゴン州、ブリティッシュコロンビア州全体に最新の交通情報を発信しながら、緊急対応と恒久対応の両方の計画を開始した。

24時間以内に、請負業者は緊急契約の下で崩落した橋を取り除き、国家交通安全委員会が調査を行っている間に2つの一時的なプレハブ式橋を設置した。交通の混乱を最小限に抑えるため、組立式モジュラトラス橋の設置が決定された（ACROWによって提供され、その後、本設橋に置き換えられた）。仮設橋では速度制限を設け、重車両はその他の道に迂回させた。

調 達

WSDOTの主な目標は、できるだけ早く安全な長期ソリューションの構築であった。本設橋の設計における主



写真 - 1 崩落したスカジット川橋

な課題は、交通混乱を最小限に抑え、高さ方向のクリアランスを維持し、上部構造の死荷重を制限することであった。また、航路として、スカジット川の垂直方向のクリアランスは、既設トラス橋と同じでなければならなかった。そのなかでもっとも重要なことは、新しい橋の重量が木材杭を用いて建てられた 50 年前の橋梁の耐震性向上の必要性を排除するために、元のトラスの死荷重よりも 5% 以上大きくならないようにする必要があった。

WSDOT は、迅速な構築を容易にするための設計施工方法を選択した。崩落から 11 日以内に、選出された 5 つの有資格チームに対して設計施工方法の提案を依頼した。工期を満足しなかった場合、遅延配達のための 1 日あたり 50 000 ドルと I-5 号線の閉鎖のための 1 日あたり 660 000 ドルの金銭的罰金を提案されたスケジュールが満たされなかった場合に課される損害賠償を伴うコスト提案となった。

設計施工チームは Max J.Kuney Construction Co. を請負業者、Parsons Brinckerhoff を設計エンジニア、Omega Morgan を特殊重量リフト請負業者として構成した。限定された 2 週間の技術提案期間中、設計チームは、WSDOT の要件を満たすために 103 日間のスケジュール内で構築可能であることを含め、多数の設計および施工方法を開発・検討し、最善のものを提案した。

施工方法

予測される巨額の損害賠償金のため、I-5 号線の閉鎖期間を最小限に抑えつつ、請負者の金銭的罰則のリスクを制限する必要性が設計段階で強調された。最短の閉鎖期間を実現するには、一度の閉鎖で建設する必要があるということが設計の早い段階で認識されていた。このた

めに、仮設橋の撤去と新設橋梁の設置を含めたプロセスを 24 時間以内で行うことが要求された。施工方法の選択肢として、陸または水上での施工を含む橋梁の設置の手法である、押引き型車両操舵システム、バージ型油圧式リフトシステム、自走式モジュラートランスポーターシステムを利用した工法が開発された。

当初は水上で作業する案として、油圧式リフトシステムを利用した台船の上に橋を浮かべて移動させるという工法が採用されたが、のちにいくつかの問題が明らかとなった。スカジット川の水位の変動に基づいて収集されたデータによって、喫水および潮流、大規模な台船の複雑な操縦、そして台船設備の明確な重量を見込んだ結果、推定閉鎖期間が延長され、遅延リスクの増加が予測されたのである。最終的にこの工法では、24～48 時間の閉鎖時間を要すると推定された。

続いて、チームは押引き型車両操舵システムを採用した。本システムは、施工や移動作業を簡易化するため、支保工や大規模な横取り桁の使用が必要である。つまり、本設橋を仮設橋の建設と並行して施工するのである（写真 - 2）。仮設橋は、解体時に仮設支柱が組まれた上流方向にスライドさせ、新設する本設橋は、下流の仮設施工プラットフォームから所定の位置に移動するものである。この代替案によって、I-5 号線の閉鎖期間を 12～24 時間に短縮することが可能となり、コストとリスクの削減にもっとも有利な組合せを実現させた。

提案の評価

設計における特記事項として、事故による被害を受けなかった既存の橋脚を本設橋へ利用することを考慮し、最大死荷重の上限は 833 t とした。この制限値は短縮し



写真 - 2 本設橋と仮設橋（本設橋が仮設橋の横に建設された）

た工期とともに、架替工事で利用できる材料を制限された。このプロジェクトは、選択される可能性の高い構造形式が、鋼構造またはコンクリート構造であるという仮定の元、提案されている。

一晩での架替工事を可能とするために、構造形式は仮設の設備内に配置された、仮設橋の設置時に設けられる大きなコンクリート製の台座を納めることができるものである必要があった。台座の撤去作業を考慮すると、閉鎖期間が提案した12～24時間を超過してしまうためである。また構造形式は、従来の支承位置内の橋梁を持ち上げ、スライドさせる施工技術に対応することも必須条件であった。

4つの設計施工チームが、本設橋の架替え案を提出した。2つの鋼構造と、2つのプレストレストコンクリート桁による代替案が評価された。スパンの荷重条件を容易に満たし、元の橋梁と鋼桁とコンクリート床板に一貫性のある意匠性をもっている、鋼下路トラス（隣のスパンの複写）案が提出されたが、鉄骨桁の製作に時間制限があるため納期の遅延の可能性があり、施工時のリスクが増加することで工期全体の遅延に繋がるリスクが高まるおそれがあった。

一方、従来のコンクリート桁の代替案は比較的重量が増すが、時間は短縮できる。一番の懸念は、重量制限と設計基準を満たすかどうかであった。これにより設計チームは、8種の軽量骨材を用いたPC床版を使用した一体型のパルプT桁橋を検討することとなった。WSDOTは以前、この構造形式の耐久性を考慮して、桁の使用を大型車混入率の低い交通条件の橋梁のみに制限していた。しかし、設計施工チームはこの構造の使用を可能とするため、フランジ間で曲げとせん断を完全に伝達させることができる接合方法を取り入れた（写真-3）。コンクリート桁を採用するにあたり、主桁、横桁、壁高欄が、規定された死荷重を許容内に収めるためには軽量骨材が必要であった。こうしてコンクリート桁の工法が、もっとも工程とリスク削減の組合せとして有効であると証明



写真-3 接合部打設状況

した。

WSDOTは、A・B・C案のそれぞれ一番良い所を統合した工法を採用した。A案は完成日が早く、B案はI-5号線の閉鎖期間が少なく、C案はトータルコストがもっとも低いものであった。選択された案は、格安の初期コスト、全体的なライフサイクルコストの低減、最短時間での桁の調達、そして仮設橋を本設橋と置き換えるために必要とする閉鎖期間の最短プランを提供した。この工法は、I-5号線の閉鎖期間が24時間未満で、設置場所への径間の移動を含めた工事を90日で行うという提案を実現させるものであった。

本設橋の設計

設計方法

工事の範囲には、二つの仮設橋に隣接する新設の本設橋の施工と、その後の仮設橋の撤去と本設橋の設置までを含んでいる。閉鎖期間を最短とするために、本設橋は仮設橋のすぐ横に杭・橋脚を設けて施工する必要があった。車線は、桁端から6m離して設けなければならず、これらの橋梁は本設橋および仮設橋の上・下流の空間を用いて、パイルベントの内側で施工することとなった。そして仮設橋は本設橋の完成時に、上流側の車線へ移動させる計画であった。同様の作業として、本設橋は仮設橋と置き換えるために上流に運ぶ必要がある。すべての移動は車線の内側で作業が行われ、一度の道路閉鎖期間内に二つの橋梁の移動を同時に行った。本設橋の設置後、仮設の橋梁と杭、車線を撤去した。

この新しい本設橋は、LRFD橋梁設計示方書とWSDOT橋梁設計便覧を参照し、設計している。上部工の重量を制限するために、チームは2210mmの主桁間隔とすることを提案した。この間隔で施工したことで、入札時に発表していた概念図と比較して主桁を1本削減することができた。新しい上部工の総重量は、軽量コンクリート製壁高欄と調整コンクリートを含めて830tであり、契約に示された最大重量を下回る結果となった。

設計プロセス

着工命令にしたがって、設計施工チームは新設橋と仮設橋の架替えを4か月以内で行った。設計プロセスの要となるのは、製作に移れるように軽量骨材コンクリート桁の詳細設計を完成させることである。コンクリート桁の製作を迅速化するために、桁製作工場は発注者が設計検討している段階で製作図を描き上げていた。製作者もまた計画が進展するたびに設計や詳細についての最新版を受領した。これらの調整によって、桁製作工場は工程内で材料調達を行い、複雑で詳細な桁の必要条件を満たすプレストレスト床版を準備することができた。

車両を通した状況で作業できるように設計検討が進められると、設計者はヘビーリフティング業者と連携した。橋梁構造の設計では横桁での揚重も考慮した設計とし、重量制限を維持するための仮設の支柱の位置を設定するために横取り作業を考慮する必要がある（写真-4）。こ

の間、架け替える主桁が既設橋脚に適合するように既設の主桁の測量が行われた。上部構造の設計は着工命令から 20 日で承認され、最初の主桁は 2 日後に製作された。



写真 - 4 本設橋設置状況

プレキャストコンクリート桁が製作されている間、施工業者は橋梁構造を支持する仮設の鋼管杭の施工および横取り作業に取り掛かった。既設構造の配置に合わせて施工設備が配置できるように、注意深く杭基礎の配置と高さを決める必要があった。仮設橋にはジャッキ設置位置に制限があり、横取り装置には油圧ラムのストロークに制限があった。仮設の鋼管杭基礎は着工命令から 24 日以内に建設されていた。そのときには、鋼ブレースとベントキャップの最終設計が完了していた。完成図面は着工命令から 5 週間後の 8 月の第 1 週に公開された。

上部構造部材

新設橋梁に対する設計施工チームの解決策は、橋梁の建設を加速させる技術を利用したものだ。長支間のプレキャスト・プレストレストコンクリート床版桁を使用するにあたり、橋梁形式の構造的整合性に関する懸念事項があげられた。Oesterle と Elremaily によれば、「これらの議題は隣接部材の接合、長手方向の継手、キャンパー、横断勾配、活荷重分配、活荷重の継続性、横方向荷重の抵抗、斜角、メンテナンス性、交換可能性、また施工性および出来栄に関するその他の要因を含んでいる」ということであった。

発注者を安心させ、ひび割れが発生する可能性を軽減するために、バルブ T 桁橋で使用される標準的な溶接接合ではなく、接合部を重ね継手にした上で場所打ちする方法が採用された。また、アスファルト合材を使用しないで厚さ 38 mm の高強度コンクリートでオーバーレイする方法が採用された。WSDOT 標準のバルブ T 桁橋の接合は、中心に 1.2 m の溶接された接合具があり、長手方向に連続的にグラウトされたせん断キーを使用することとしている (図 - 1)。この接合部はせん断を伝達し、接合部が鉛直変位を制御しているにすぎない。Oesterle と Elremaily による研究に基づいて開発された新しい接合方法では、床版フランジ間の曲げとせん断を完全に伝達し、連続的な横方向の床版挙動を改善できる。

この革新的な接合方法によってより効果的に活荷重が分配され、主桁本数 (および関連する死荷重) を減らせ

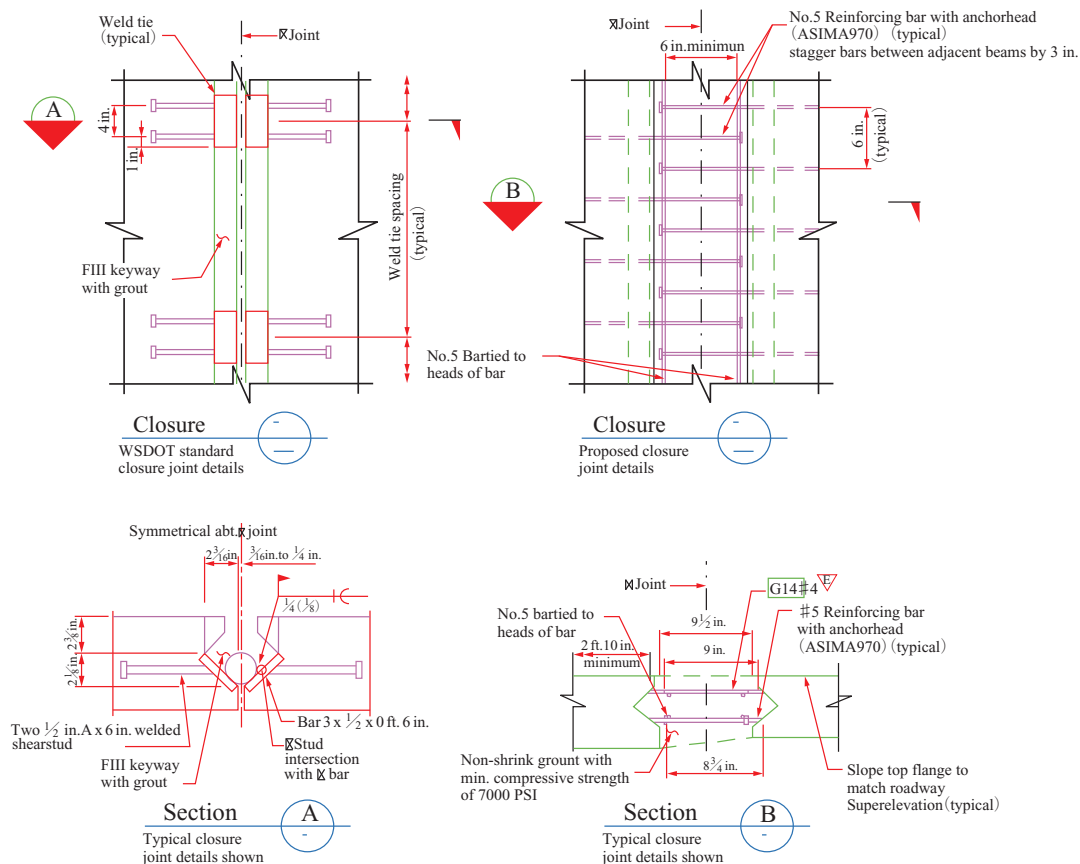


図 - 1 標準的なフランジ接合方法 (左) と新しい接合方法 (右)

る一方で耐久性を向上させることができる。本接合方法によって、I-5号線を頻繁に通過する過積載車両によりシリカフェームコンクリートオーバーレイ上にひび割れが発生する可能性を低減した。床版の全横断連続性を与えるために、桁フランジから突き出た先端の鉄筋が、隣接した桁同士から隣り合った千鳥配置で非接触の重ね継手を形成するように使用されている（写真 - 3）。複雑な接合を成立させるために、製作者は突き出た補強筋の厳しい許容値を満たす必要があった。

決定した上部構造断面は床版幅 1 650 mm のパルプ T 桁で構成され、桁は既設橋脚の構造に合うように配列された。仮設橋に対する変位制限装置として既設の台座を再利用し、仮設中に台座を撤去する必要をなくした。主桁中心間隔が 3.0 m で、主桁間のスペースはわずか 2.21 m となっていた。主桁の設計では、62 MPa、1.954 t/m³ の軽量骨材コンクリートの使用が必要であった。端支点横桁、中間横桁および壁高欄の上部構造もまた現場打ちで 28 MPa の軽量コンクリートの使用が必要であった。主桁フランジの平滑な走行面や限界摩耗を確保するために、シリカフェーム入りの調整コンクリートを最終の路面に適用した。

コンクリート主桁にとって、キャンバーや横断勾配による付加的な死荷重を軽減することは何よりも優先すべき事項である。スパン/重量の条件にあった構造系にとって、事前にキャンバーを付けることは設計の早い段階に特定させる必要がある。桁高スパン比が 29.5 で 1S15.2 の PC 鋼材を使用した長くスレンダーな軽量骨材コンクリート主桁は、165 mm と過剰なキャンバーになることが推定された。現行の道路線形に合うようにこのキャンバー推定量を調整するために、約 90 t の厚い調整コンクリートを橋面に追加する結果となった。プレストレス、桁自重、横桁、壁高欄および調整コンクリートによるたわみを考慮した結果、線形勾配は現行の道路線形に合わせることができた。スパン/重量の限界を超えるような床版の天端への過剰な出来高を軽減するために、主桁の型枠をおよそ 110 mm 下げ越した。従来鋼桁橋に用いられるこの技術は、軽量骨材を混合した特徴的なプレキャストコンクリート製作工場との調整により採用された。床版の横断勾配による過剰な出来高を軽減するために、桁の上フランジの横断勾配を現計画高に合せて 1% とした。

軽量骨材コンクリート主桁に必要な最終改良は、横取り作業との適合性にあった。横取り架設技術は、従来の支承設置内で仮設支持により仮設橋を配置させた。中間横桁で桁装置を支持するために、プレキャストコンクリート桁には架設時に発生する応力を考慮する必要があった。仮設支持位置での負のモーメントによる桁上縁における過度な応力を軽減するために、上フランジに 2 本の仮設 PC 鋼材とその周辺に適度な補強筋を配置することで許容ひび割れ幅内に収めた。1S15.2 の仮設 PC 鋼材を降伏強度の 75% で緊張した（写真 - 5）。定着用切欠きは桁の上フランジでシリカフェーム入り調整コ

ンクリートに設けられ、施工業者は桁架設後、上縁の PC 鋼材の緊張を解放できるようにしておく必要があった。

横取り架設には、軽量コンクリートの中間横桁を一般的ではない支持位置として使用した。その横桁は桁端から 6 m の位置にあり、仮設鋼橋を持ち上げるために使用した横取り装置の配列上にある。仮設橋はその橋を所定の位置に動かす押し引き式の油圧ジャッキによって各横桁に 4 点で支持された。その仮設橋を支持するために、横桁に多くの補強筋を配置することで可能な限り効率的に軽量化し配置することが可能となる桁下に横桁を延長させた。



写真 - 5 仮設 PC 鋼材の緊張状況

本設橋の建設

本設橋の建設は 2013 年 7 月 12 日から始められた。2 ヶ月間で本設橋を完成させるのに、多くの施工業者や製造者が必要であった。着工命令後すぐに、施工業者は鋼管杭基礎の設置の準備で現場に動員された。本設橋のコンクリート主桁を製造するために、桁製作工場では着工命令の 2 日以内に材料調達を始めた。軽量骨材は北カリフォルニアから調達し、Tacoma, Wash の製作工場の設備に出荷された。目標期限に間に合わせるために、ヘッド付きスタッド鉄筋（写真 - 6）を 2 箇所の工場で製造させた。設計を仕上げながら製作工場で作成し、桁製作は発注者によって図面の最終承認を受けた 2 日後



写真 - 6 ヘッド付きスタッド鉄筋の配置状況

に始められた。いったん製作が始まれば、2日周期で製作台を転用した。桁製作工場で頻繁に主桁のキャンバーを測定し、結果を報告した。設計施工チームは、この過程により構造が重量制限内にとどまり、特異的なキャンバーに必要な潜在的な調整をモニタリングすることで確実に行うことができた。いったん桁を現地に運搬すれば、橋が完成にむかう。

上部構造の建設

主桁の架設は、工程を念入りに調整し3日間に渡り行われた。連続施工に際し、陸上に230t、バージに90tのクレーンが配置され、19段階のステップで作業を行った。各ピックは、堤防上に配置されたクレーンからバジクレーンに桁の一端を渡した後、再バラスティング中にバージにクレーンを再配置し、最後にベントに桁を設置する。桁設置時の動画は次のURL「https://www.youtube.com/watch?v=IdUap4_IvY」で視聴可能である。仮設桁と本設桁を所定の位置に移動させるために使用される軌条設備を支えるため、本設橋上部構造物は、仮設桁のすぐ下流にある、別べつの杭基礎とベント上に建設された。仮設の杭基礎とベントに支えられたレールを使用して、垂直方向および水平方向のジャッキシステムを同時に設置した。主桁が架設されると、桁間キャンバーの差異は、もっとも近いところで25mmと測定され、それらを平準化する作業が開始された。調整は製作過程にて、上フランジに設置したレベリング桁とねじ状のインサートを使用して行い、床版とフランジ間の閉合は、各横桁間のわずかな空間を残して完了した。接合部の打設は、48MPaの普通コンクリートを打設して、継手性能が適切に発揮できるようにした。仮設橋を乗せる桁間隔は、壁高欄を床版上に設置する間に、中央分離帯を設置することを容易にした。次に28MPaの軽量コンクリートを使用して、壁高欄および横桁を構築した。最終ステップは、床版上へシリカフェームコンクリートをオーバーレイすることであった。橋体の構築は、主桁搬入から2週間で完了し、橋体が所定位置に設置される3日前に完了した。

橋梁配置

仮設の杭基礎の上に、油圧式の垂直および水平ジャッキシステムを設置し、本設橋の位置をスライドさせて準備を整えた。本設橋の設計途中に、仮設橋の調査をしたところ、施工業者は、鋼製トラス橋の後部サポート上に厚さ44mmの伸縮継手を配置していたが、これをジャッキ作業前に取り外さなくてはならないことが判明した。その結果、仮設橋は既存の基礎構造から再設置され、その後、分解するため、鋼製ベント上に約30分をかけ移動された。横取りシステムは、液体石鹸で潤滑されたテフロン板を用いた送り出し装置で構成されている。これにより、本設橋を仮設ベント上から所定の位置に移動させた。(写真-7)必要となる主方向の移動量により、本設橋の両側に50mmの隙間が生じたため、より正確な移動と時間が必要となった。横取りシステムは、仮設ベント

に桁を設置する際に生じる遊間の、微小な調整を可能とする。この遊間は、ゴム製の伸縮継手の設置を可能とするため小さく設計されている。本設橋の横取り架設には約2時間を要した。



写真 - 7 横取り架設状況

横取りジャッキシステムでは、コンクリート台座に必要な移動量を橋に与えることができなかったため、2段階のプロセスが採用された。

- 1) 端部横桁の油圧ジャッキの上に降下させ位置合せを実施
- 2) 横取りシステムを橋の下から取り外し、既設橋脚上に降下

主桁の配置を考慮し、架台は仮設鋼製トラス橋の下に建てられた。本設橋の降下後、ステンレスシムを使用して、すべての支承が確実に接触しており、既設道路の3.2mm以内に路面高があることが測定された。その後、仮設PC鋼材の緊張を開放し、定着用切欠きを跡埋めし、19時間の閉鎖時間内に区画線を整えた(写真-8)。



写真 - 8 架設後の遊間部

結 論

スカジット川の橋の架替えにおける、構築アプローチの主な利点は、工程短縮に対する請負者の技術の柔軟性と、本橋の再建をわずか3ヵ月で行った設計エンジニアと施工業者と専門業者の連携である。

アイデアを共有することで、発注者の懸念事項に対応することが可能となり、重交通箇所での交通混乱を最小限に抑える費用対効果の高い解決策を提供することが可能となった。設計・施工チームは、契約期限よりも前に

プロジェクトを完了させた。この橋は、19時間の閉鎖と、初期の橋の崩壊から115日、そして着工命令から88日後の2013年9月15日に開通することとなった。スカジット川橋の崩壊は、重要な輸送動脈と貿易路線を切断した。この路線を復旧することの重要性は、国としての優先事項となった。革新的な技術解決と建設作業員の献身について、Jay Inslee知事は「この橋で働いたチーム全体の偉大な仕事を評価したい。」と述べており、橋の開通時に記念された。皆が非常に誇りに思うことができる成果であった。

This article was first issued in PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) Journal, January-February 2015, Volume 60, Number 1, page 52-66

*：会誌編集委員会海外部会

田中 慎也 (株) IHI インフラ建設)

佐藤 千鶴 (株) 錢高組)

森田 遼 (鹿島建設 (株))

濱崎 景太 (首都高速道路 (株))

渡邊 秀知 (株) ビーエス三菱)

【2017年4月11日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

コンクリート構造設計施工規準 ー性能創造型設計ー

定 価 4,104 円／送料 300 円

会員特価 3,400 円／送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版



図書案内

PC 技術規準シリーズ

PC 構造物高耐久化ガイドライン 2015年4月

定 価 4,860 円／送料 300 円

会員特価 4,000 円／送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会 編
技報堂出版