

プレテンションウェブ工法の実用化について

中須 誠*1・堤 忠彦*2

1. はじめに

近年のプレストレストコンクリート（以下PC）橋の建設に関わる技術革新は目覚しく、さまざまな技術開発を通して新しい形式の橋梁が提案され実用化されている。とくに波形鋼板ウェブ橋や複合トラス橋に代表されるように、ウェブの合理化に関する技術開発は驚異的な速さでこれを実現してきている。橋の構成部材のなかで、床版のように供用上の制約から形状が決定されるものと異なり、ウェブは構造上の機能を有すれば、その形状には高い自由度があり、新しい形式の提案を行う余地はきわめて高いといえる。一方で、実施工においては、ウェブが薄く高さの高い部材となることが多いことから、とくにコンクリートの品質確保においては苦勞の多い部分である。また、橋全体の上部工重量において20～40%程度を占めるウェブの軽量化を図ることは、橋の建設コストを低減するための重要なポイントとなることから、ウェブ形式の技術開発について多くの研究が行われ、その実用化が試行されている。このようななか、第二名神高速道路錐ヶ瀧橋（上り線）工事では、2室箱桁の中ウェブをプレテンション方式のプレキャスト部材で置換えたプレテンションウェブ工法による施工を契約後VEとして提案し、国内初の試みとして施工した。

本稿では、プレテンションウェブ工法の実用化を検討するに至った背景と経緯、また構造の成立性や安全性の確認において大規模な実験を実施するのではなく、近年その発展が目覚しい解析技術を最大限に活用し、限定的な確認実験を併用して実用化を行ったプロセスとその内容について概要を述べるものである。

2. 実用化への背景

2.1 技術的な基盤

プレテンションウェブ工法は、諸外国においては古くは1947～1951年にかけてフランス郊外のマルヌ川に建設されたマルヌ川5橋、また1977年には同じくフランスのプロトヌ橋、さらには1999年にはフランス領コルシカ島においてポストテンション方式のプレキャストウェブを採用したベッキオ橋などが建設されている。一方、日本国内においては、施工実績はないものの、これら諸外国の施工実績や独自に実施した種々の実験や検討成果^{1)～4)}をもとに平成15年11月に本協会から、「プレテンションウェブ橋設計施工ガイドライン（案）」⁵⁾が刊行され、実施工に向けての基本的な技術的基盤は整備された。また、一方で橋梁設計に用いる解析環境が飛躍的に向上した現状を背景として、非線形有限要素解析などを用いた設計手法の高度化による構造物設計の合理化に関する検討もさかんに実施されており⁶⁾、これまで実用化に向けた安全性の検討を実物大の実験によらざるを得なかった状況から、解析によって安全性のみならず、構造の合理化を追求することが可能になり、新技術の開発に要する費用面や時間面でのハードルも低くなってきた。

2.2 契約方式

中日本高速道路株式会社では、近年、契約後VE方式や入札時VE提案付設計・施工一括発注方式などの新しい契約制度を試行し、今後の高速道路網の整備を円滑に推進するための建設コスト削減を目指しているなか、第二名神高速道路錐ヶ瀧橋（PC上部工）上り線工事において、新しい契約制度のうち契約後VE提案方式を試行的に導入した⁷⁾。

契約後VE提案とは、設計図書に定める工事目的物の機能、性能等を低下させることなく、受注者が請負代金を節減できる構造や施工方法を提案するものであり、本工事ではその提案の範囲を「PC構造物の詳細設計」としている。具体的には、道路橋示方書⁸⁾（以降、道示）や設計要領⁹⁾などの技術基準に準じた設計を行うのに代わり、FEM解析など提案者が有する高度な解析技術を用いて構造物の実挙動を正確にシミュレーションして設計を行うことで、安全性を確保するとともに、経済的な設計を行うことである。

このような契約方式のもと、本工事では、契約後VE提案として、2室箱桁の中ウェブをプレテンションウェブ工法による施工とすることが採用された。また、本橋の設計においては、プレテンション部材を箱桁のウェブの一部に使用する場合の設計上の課題の解決や合理的な耐荷力を評価する方法を、受注者が独自に開発した非線形有限要素解



*1 Makoto NAKASU

中日本高速道路(株) 中部地区
建設事業部 計画設計チームリーダー



*2 Tadahiko TSUTSUMI

(株)富士ビー・エス 技術本部
土木技術グループリーダー



写真 - 1 橋梁全景



写真 - 2 ストラット配置部

析プログラムを用いて考慮する設計方法が提案された。

2.3 施工上の合理化要求

錐ヶ瀧橋（上り線）は、三重県と滋賀県の県境にある鈴鹿連峰の山岳地域に位置し、第二名神高速道路の一部となる全長 1 257 m の高架橋で、西橋梁（5 径間）、中橋梁（4 径間）、東橋梁（5 径間）の 3 連からなる PC 連続ラーメン箱桁橋であり、下部構造は、高さが最大で 64.0 m の高橋脚を、鋼・コンクリート複合構造として施工している（写真 - 1）。また、ランプ分岐部の補助車線設置のための拡幅により幅員が最大で約 21 m まで変化するので、西橋および中橋の 1 径間は 1 室箱桁橋、中橋の 3 径間および東橋の 5 径間は 2 室箱桁橋となっている。本工事は、暫定 2 車線幅員（標準 11.375 m）での施工であるが、東橋の一部（2 径間）は、ランプ分岐のための補助車線をストラットに支持された張出し床版構造として施工しており（写真 - 2）、将来の拡幅は同様の方法で行うことを想定した構造として計画されている。一般的に箱桁を張出し架設によって施工する場合、外ウェブを施工するための外型枠のみを既成型枠として移動作業車に装備し、内型枠はその都度組立てていく方法がとられる。したがって、中ウェブの鉄筋組立てにおいては、鉄筋の支持設備を施工サイクルごとに組立て解体を繰り返すこととなり、ここをプレキャスト化して施工の合理化を図ることは、現場施工の省力化とともに施工サイクルの短縮につながり、施工サイドからの合理化要求の多い部分である。一方、上で述べたとおり、本橋が将来的な拡幅をストラットで支持された張出し床版で計画されて

いることから、外ウェブのウェブ外側最下縁にはストラット受台を設けた構造としており、外ウェブをプレキャスト化することは製作上の煩雑さが問題となる。これら構造上の特徴と施工合理化の要求を総合的に判断し、本橋では中ウェブのみへのプレテンションウェブ工法の適用を検討した。

3. 実用化へのプロセス

新技術の開発や実用化を行う場合、発案 ⇒ 試設計 ⇒ コストスタディー ⇒ 試作 ⇒ 実験・評価 ⇒ 改善 ⇒ 完成という手順をとることが一般的である。しかし、本橋のように、時間的、コスト的な制約や条件のともなう契約工事のなかで実施する場合には、これらの手順をきわめて限定された時間のなかで効率良く進める必要がある。以下に実用化に際して重点的に考慮したポイントと、それらを実現するための課題を効率的に解決するために実施した検討方法について主な内容を述べる。

3.1 技術開発のポイント

プレテンションウェブ工法とは、現場打ちで施工される PC 箱桁橋のウェブをプレテンション方式でプレストレスを導入したプレキャスト部材に置き換えて合成桁を構築する工法である（図 - 1）。本工法の特徴は、①高強度コンクリートを使用したプレテンション部材を使用することで、高いせん断抵抗性が確保され、ウェブ厚を薄くして主桁自重の軽減が可能になり、上下部構造の規模が縮小されることで橋梁建設の低コスト化が期待できる、②プレキャスト部材を品質管理の行き届いた工場で作成することにより、高品質化が期待でき、耐久性の向上が図れる、③ウェブを施工するための型枠作業やコンクリート打設が不要となり大幅な現場施工の省力化が図れるというものである。

したがって、本工法の実用化に際しては、①合成桁として挙動するための上下フランジおよびウェブどうしの適切な接合部構造の開発、②軽量化につながるプレストレスを適切に導入するための PC 鋼材の定着部構造の開発、③製作および施工が容易な構造ディテールの考案、④架設時の施工誤差を一定の範囲で吸収・補正できる構造の考案、などが技術開発のポイントとなる。

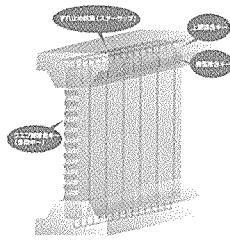


図-1 プレテンションウェブ構造図

3.2 実用化における課題とその解決方法

本橋におけるプレテンションウェブ工法の実用化においては、先に述べたとおり、構造的な課題解決においては主に非線形有限要素解析などの高度な解析技術の活用と、限定した製作および施工性の確認実験を実施した。それらの詳細な内容については、すでに本誌等で報告しているので、関係する報文を参照するかたちで以下に概要を述べる。

(1) セン断設計^{1)~12)}

箱桁は、断面変形に対する剛性が高く、偏載荷によるそりねじり変形が小さいことから、多室箱桁で複数のウェブが存在する場合でもすべてのウェブがほぼ均等にせん断力を負担する。したがって、設計計算では各ウェブを合計したウェブ厚の主桁構造と仮定して耐荷力の照査を行い、各ウェブ厚さと補強構造をほぼ均等に設定するのが一般的である。本橋のように中ウェブのみにせん断耐荷力の高いプレテンションウェブを適用して部材厚さを薄くした場合、内外ウェブでのせん断力分担比率が異なり、厚さの厚い外ウェブがより多くのせん断力を分担する可能性がある。その場合、中ウェブが軽量化された分外ウェブが增厚され、全体としてウェブの軽量化が図られないことになる。そこで、実橋サイズを設定したモデルを用いたFEM解析により、異なるウェブ厚が断面内で混在する場合のせん断力分

担比率の詳細な検討を実施した。その結果、表-1に示すとおり、ウェブ厚比が3(外):1(中)のモデルcの場合でも、せん断力分担比率は1.7(外):1(中)程度となり、せん断力分担比率はウェブ厚比率に比例しない結果となり、分担比率の外ウェブへの移行分が大きくないことから、中ウェブのみにプレテンションウェブを適用することの有効性が確認できた。また、道示⁸⁾に準じた設計を行う場合、終局荷重時のせん断圧縮破壊耐力の算定においては、ウェブにプレストレスを導入することの効果は考慮できない。一方諸外国では、終局限界状態の照査において、AASHTO LRFDが鉄筋量の算出においてひび割れ角度の影響を考慮していること、またBPEL 91では平均せん断応力度の制限値の設定においてひび割れ角度の影響を考慮するなど、いわゆる修正圧縮場理論を適用して合理的な設計を行っている¹³⁾。そこで本橋では、プレテンション方式により鉛直方向に導入したプレストレスによって斜めひび割れの角度がより鉛直方向に近くなり、せん断力の作用方向に対する耐荷力の分力成分が大きくなって圧縮破壊耐力が増加することの効果を解析的に検討した。その結果、平均圧縮応力度で4.6 N/mm² (IS15.2を250 mm間隔で配置)のプレストレスを導入した場合、「ひび割れたコンクリートの圧縮劣化を考慮した圧縮側構成則」を用いた場合でも、プレストレスしない場合に比較して、図-2に示すとおり、おおむね30%程度圧縮破壊耐力が増加することが確認できた。本橋

表-1 セン断力分担比率

モデル	外ウェブ (mm)	中ウェブ (mm)	ウェブ厚比	中ウェブ厚比率 [※]	せん断力分担比率
a	500	500	1:1:1	33%	1.2:1:1.2
b	600	300	2:1:2	20%	1.4:1:1.4
c	650	200	3:1:3	14%	1.7:1:1.7

注) ※: 中ウェブ厚/全ウェブ厚

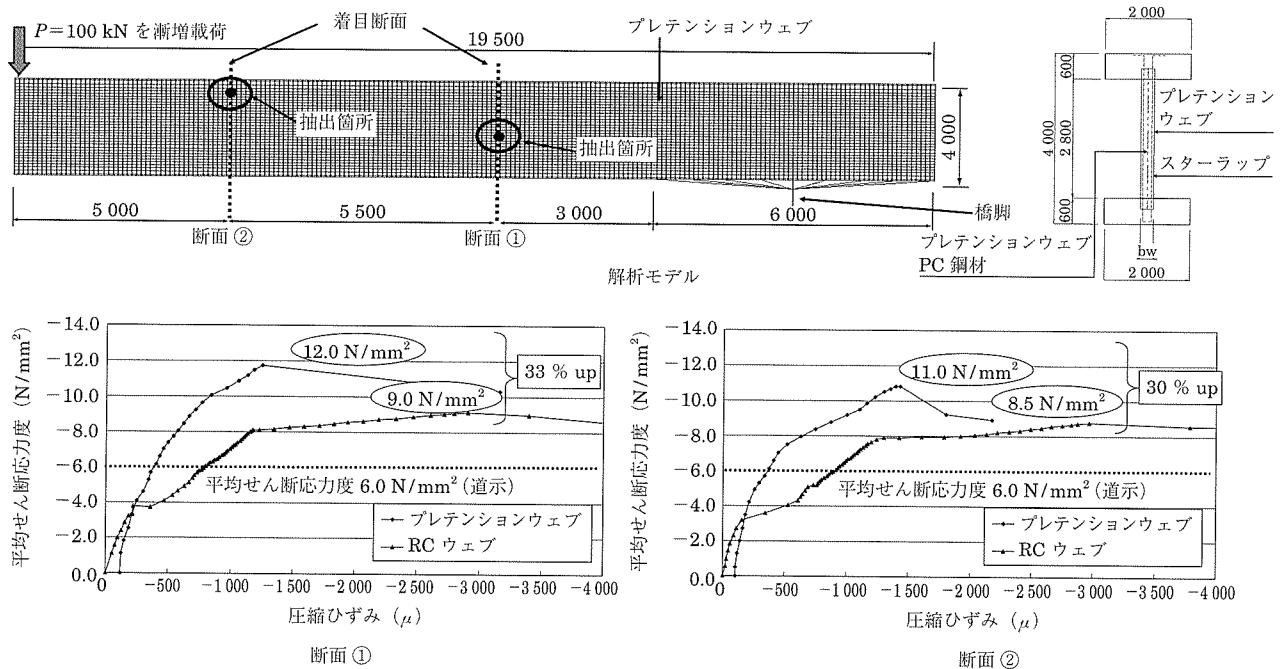


図-2 解析モデル(上図)および平均せん断応力度-圧縮ひずみ関係(下左:断面①、下右:断面②)

の設計においては、この解析結果をもとに、RC ウェブの解析結果が道示⁸⁾に規定する τ_{max} に対する安全率と同等程度になるようにプレテンションウェブを用いる場合の τ_{max} を 8.0 N/mm^2 と定めた。

① RC ウェブ

安全率 = 解析結果 / 道示 τ_{max}

$$SF = (8.5 \sim 9.0) / 6.0 = 1.42 \sim 1.50$$

② プレテンションウェブ

プレテンションウェブの τ_{max} を 8.0 N/mm^2 とした場合

$$SF = (11.0 \sim 12.0) / 8.0 = 1.38 \sim 1.50$$

これにより、終局荷重作用時のせん断圧縮破壊によって部材厚が決定される場合、約 25% の厚さ低減が可能になり、すべての区間において必要ウェブ厚が構造細目を満足する最小厚である 150 mm となった。ただし、柱頭部は桁高が 6.0 m であり、1～3 BL についてはプレテンションウェブの座屈に対する安全性を考慮して、桁高に対して過度に薄くならないようにウェブ厚を 200 mm とした。

(2) プレテンション鋼材の定着^{(10), (13), (14)}

箱桁断面の主桁では、上下フランジの付け根付近でウェブの斜引張応力度がもっとも大きくなる。したがって、プレストレスによるせん断補強を有効に活用する場合には、定着長を低減させることが重要である。一般に PC 鋼材とコンクリートの付着力で定着するプレテンション方式の場合、定着に必要な長さは、 $\phi 15 \text{ mm}$ までの PC 鋼より線の場合、道示「6.6.7 PC 鋼材の定着」¹⁾ではその直径の 65 倍以上確保することを規定している。そこで、付着定着長

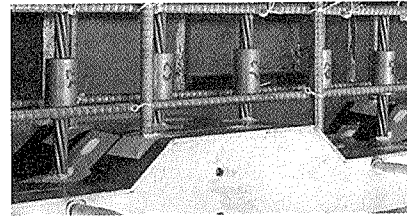


図-4 圧着グリップ

の影響を低減する方法を検討するために、定着方法の異なる供試体を製作し低減効果およびプレストレス分布を確認した。

実験の結果、各供試体のコンクリート表面に発生するひずみ分布は図-3のようになり、何らかの機械的な定着方法を併用することで定着長の低減に有効であることを確認した。この結果から、プレテンションウェブ部材を製作する場合の施工性なども考慮し、圧着グリップ 70 mm のみを付加したタイプ (Type 3) の定着方法を採用することとし (図-4)、設計有効伝達長を 30ϕ として設計に採用した。

(3) 製作および施工^{(13) ~ (16)}

プレキャスト部材を製作する場合、部材どうしの接合を確実なものとするためにマッチキャスト方式が採用されることが一般的である。しかし、張出し架設による施工を行う場合には架設の進行に合わせてたわみ量を補正していく必要があり、施工に先行して製作することはたわみ管理上の問題が発生する。そこで、プレテンションウェブどうしの接合部となる多段キー部の型枠を高い精度で製作することを前提に、単独モールドによるセパレート方式で製作し

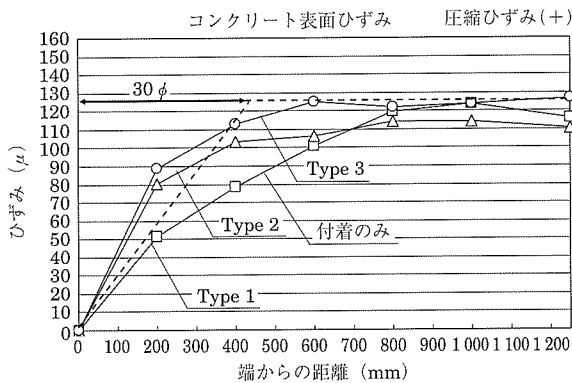


図-3 コンクリート表面に発生するひずみ分布

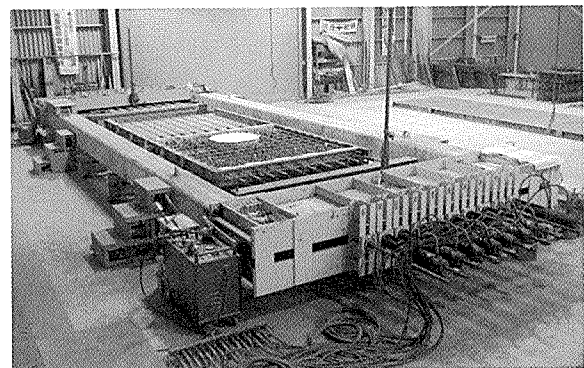


図-5 製作状況 (単独モールド)

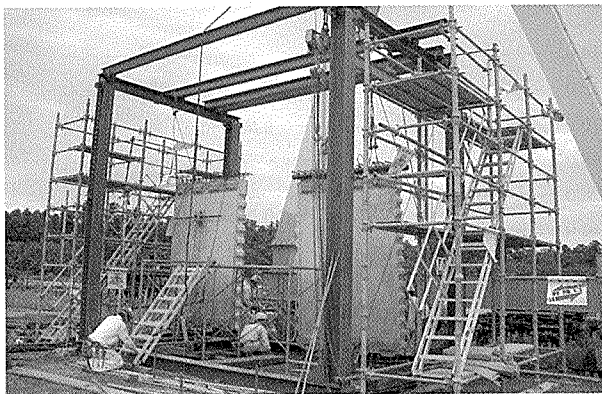


図-6 架設ハンドリング試験

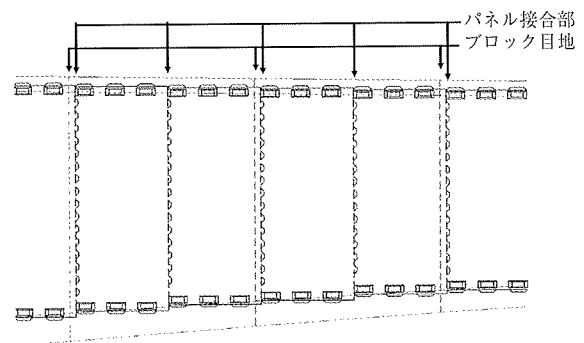


図-7 ウェブ配置側面図

た部材の接合試験を実施して施工性と接合精度の確認を行った。その結果、セパレート方式による場合でも十分な接合精度が確保されることを確認した(図-5、図-6)。また、桁高が変化することからプレテンションウェブ高さも変化する。これに対し、桁高の変化に合わせて台形のパネルを製作する場合、ウェブパネル個々で下フランジとの接合側の辺長が変化し、これにあわせてPC鋼材やスターラップ貫通のための開口位置をパネル個々に定める必要があり、型枠の転用ができないことなど製作が煩雑となることから、1枚のウェブパネルを長方形としハンチ内への埋込み深さを変化させることで対応した(図-7)。

4. 今後の展開

国内初の適用例として試行した本工事の設計・施工を通して、初期性能をはじめとする品質の確保、および施工の合理化への有効性は一定の範囲で確認することができたと考える。しかし、今後プレテンションウェブ工法が広く普及して、さらなる有効性を発揮するためには、本橋の施工で得られた知見をもとにした改良や改善、および検討を要すると考える点がある。以下に、個人的な反省を含めてその主な内容を述べる。

(1) 架設方法

本工事では、プレテンションウェブの適用を中ウェブのみとしたため、施工サイクル日数の短縮は限定的であった。すべてのウェブに適用した場合、工期短縮への効果は大きいことが予想されるが、さらなる効果を得るためには、架設方法の合理化に関する検討が必要である。たとえば、波形鋼板ウェブ橋の施工において最近多く採用される、ウェブ材を先行架設する方法のように、これを架設材として使用しながら複数のブロックを並行施工し、プレテンションウェブの接合に要する日数を施工上のクリティカルパスから排除し、施工サイクル日数を短縮する架設方法の開発などが効果的であると考えられる。

(2) 解析技術と基準の整備

新しい技術の開発においては、機能確認のための実験は不可欠である。これまでも、プレキャストセグメント工法、波形鋼板ウェブ橋、複合トラス橋、リブ・ストラット付き床版、長支間床版など、多くの新技術・新工法が実物大の実験を通して実用化されてきた。しかし、道路建設など公共事業のコスト削減が強く求められるなか、限定され

た費用と時間など技術開発のためのリソース投入を効率的に行う必要がある。このようななかで実施される模型実験では、きわめて限定された規模や数での実験に限定されることから、実験は構造安全性の確認にとどまり、合理性の追求までも行うことは困難である。したがって、点で実施される実験結果をもとに、数値解析を用いて線に補完することで構造の合理性の追求を行うかたちの技術開発方法の確立が望まれる。これによって、これまでに蓄積された貴重なデータが有効活用されることにもなる。しかし、道路橋示方書やコンクリート標準示方書などの諸基準では、高度な解析技術の適用による性能の照査は否定してはいないものの、とくに非線形解析については、標準的な解析方法や解析結果の評価方法などが基準の中で示されておらず、実務設計に高度な解析技術を適用する場合においてはさまざまな障害が存在する。今後、解析技術の信頼性向上と、実務において使用することを想定した実施方法や評価方法などに関する基準の整備が望まれる。

(3) 新しい細目の提案

工場製品として製作する場合、同種・同形状の製品を日常的に決まったルーチンで製作することが品質の確保、ならびに製作コストの低減において有効である。本工事では、プレテンションウェブに埋め込むスターラップ形状を現場打ち施工で行う場合の形状と同等としたことから、多段キーで接合されるプレテンションウェブでは、据付け高さの調整が不可能である。したがって、所要の鉄筋かぶりを確保し、たわみ管理精度を確保するために、施工情報を常時製作に反映させるかたちで製作を行ったことから、断続的に少数の部材を製作するかたちとなり、部材製作コストが想定を上回る結果となった。製作を施工の進捗と分離し、集中的に製作することを可能にするためには、施工誤差の補正を架設現場での施工にゆだねることを可能にする構造細目の考案が必要である。その一方策として、図-8に示すような鉄筋継手構造を採用することが有効であると考えられる。これには、スターラップとしての要求性能との関係を明確にする必要があり、一部要素実験の実施とその評価に基づく基準の整備が必要である。

錐ヶ瀧橋(上り線)工事では、今後の採用を想定してさらなるデータの蓄積を行うため、部分的ではあるが外ウェブ

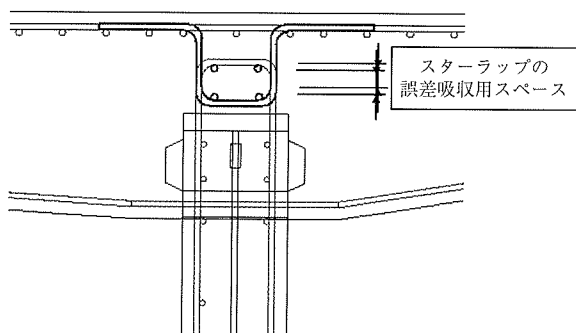


図-8 鉄筋継手構造

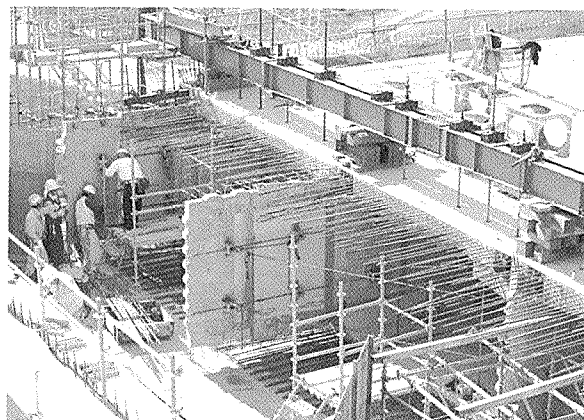


図-9 外ウェブ採用状況

ブへの適用も試行した(図-9)。さらにこの部位では、実橋載荷実験を行って挙動の確認を行っている。これについては、別の機会に報告を行う予定である。

5. ま と め

国内初の試みとして、プレテンションウェブ工法を採用して施工した錐ヶ瀧橋(上り線)工事は、すべての施工を無事完了し、3月の初旬に竣工した。プレキャスト化技術の最大のメリットは、品質と性能が確認された部材のみを用いて構造物を建設できることにある。プレキャストセグメント工法で主桁断面全体をプレキャスト化して橋を建設する場合、製作ヤードの確保、運搬上の制約、大型架設機械の調達など、その採用には一定の制限が生じる。したがって、より広くプレキャスト化技術を普およ・活用するためには、橋の構成部材をパーツに分解して製作し、これらを架設現場で組立てて主桁を構築していくことがもっとも合理的であると考えられる。そのような観点からも、本橋において部分的なプレキャスト化を実現したことの意義は大きいと考える。今後プレテンションウェブ工法は、現場打ち施工では困難な程度の斜ウェブへの適用や大規模橋梁の施工品質の向上のためのツールとしての活用など、新たな可能性に向けて発展して行くことを望むものである。

新しいことにトライして実現することの最大の困難は、先駆者になることにある。経験のないさまざまな新しい問題を予測し、これらを論理的に解決して合意形成を行い、実践するというのはきわめて困難で労力を要することである。筆者自身これまでにあらゆる意味で先駆者となった経験はなく、改めてこれまでに受けたさまざまな恩恵に感謝する次第である。技術革新が新たな需要を創生し、PC建設業界が再び魅力ある業界に再生することを願ってやまない。

平成16年1月の工事契約から約1年間をVE提案の諸検討に費やし、その後の現場施工2年間は日々試行錯誤の繰返しで経過した。その間多くの方々の来訪を受け、さまざまな指導と激励をいただいた。ここに皆様への深謝の意を表すとともに、本報告が新たなPC技術の発展に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 川口哲夫, 二羽淳一郎, 喜多俊介, 村田裕志: コンクリート部材の一体化に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002, pp.715-720
- 2) 喜多俊介, 三木朋広, 松尾真紀, 二羽淳一郎: 形状の異なる打継ぎ面を有する鉄筋コンクリート部材の非線形解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, 2002, pp.709 ~ 714
- 3) 三宅淳一郎, 林和彦, 椿龍哉, 池田尚治: プレキャストウェブを有するPC桁ウェブとフランジとの一体性について, 第12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
- 4) 三宅淳一郎, 林和彦, 池田尚治: プレテンションウェブを有するPC桁のせん断耐荷性能に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.2, pp.125-133
- 5) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会: プレテンションウェブ設計施工ガイドライン(案), 平成15年11月
- 6) 角谷務, 前川宏一, 堤忠彦, 狩野正人: PC橋設計への非線形有限要素解析の適用に関する研究, プレストレスト・コンクリート, Vol.46, No.6, pp.94 ~ 103
- 7) 忽那幸浩, 柳野和也, 堤忠彦, 篠原貴: 設計VEによる新技術の適用-第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋-, プレストレスト・コンクリート, Vol.47, No.3, P16 ~ 24
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲ(平成14年3月)
- 9) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領 第二集 橋梁建設編等
- 10) 岡篤司, 中須誠, 山田菊雄, 柳野和也: プレテンションウェブの性能確認に関する実験報告, 第15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
- 11) 坂本健俊, 忽那幸浩, 柳野和也, 堤忠彦: 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(上り線)の設計, 第15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
- 12) 財団法人高速道路調査会: プレストレストコンクリート橋の海外との技術比較に関する調査研究報告書, 2005年3月
- 13) 藤田貴司, 干村秀次, 堤忠彦, 藤木和敏: 報告 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋の設計・施工, コンクリート工学年次大会2006
- 14) 中須誠, 柳野和也, 干村秀次, 加邊直人, 堤忠彦, 坂本健俊: 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(上り線)の設計, 橋梁と基礎, Vol.40, pp.12-20, 2006年11月
- 15) 八木洋介, 小宇佐武司, 干村秀次, 藤田貴司: 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(上り線)の施工, 第15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
- 16) 小宇佐武司, 南山優, 干村秀次, 加邊直人, 藤木和敏, 八木洋介: 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(上り線)の施工, 橋梁と基礎, 2007年3月

【2007年1月17日受付】