

# 設計 VE によるプレテンションウェブの適用

## — 新名神高速道路 錐ヶ瀧橋上り線 —

忽那 幸浩\*1・柳野 和也\*2・堤 忠彦\*3・西永 卓司\*4

錐ヶ瀧橋上り線では、当時それまで詳細設計を伴う橋梁工事に適用していなかった設計 VE が初めて試行的に導入され、従来現場打ちで施工される PC 箱桁のウェブの一部（中ウェブ）をプレテンション方式のプレキャストウェブに置き換えるプレテンションウェブ橋を設計 VE として採用した。

本稿では、ウェブ構造にプレテンションウェブを適用するに至った背景と、プレテンションウェブの実用化に向けて実施した設計 VE の概要を紹介し、また、設計当時を振り返っての技術的工夫を述べるとともに、この設計 VE で得られた知見と現状の技術レベルに照らして評価し、今後の展開に関する展望について述べる。

キーワード：プレテンションウェブ、設計 VE

### 1. はじめに

錐ヶ瀧橋上り線は、三重県亀山市に建設された 14（5 + 4 + 5）径間連続 PC ラーメン箱桁橋で、平成 19 年 3 月に竣工し、平成 20 年春に新名神高速道路の一部として開通した。

今日においてもプレストレストコンクリート（以下 PC）橋の建設に関わるさまざまな技術開発は行われ、新しい形式の橋梁が提案され実用化されているが、平成 16 年頃の設計当時においては、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進展していた。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。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きた。このような中、錐ヶ瀧橋上り線では、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設計 VE として提案し、国内初の試みとして張出し架設工法で施工した。

本稿では、設計図書に定める工事目的物の機能、性能など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契約後 VE 提案方式のうち、提案の範囲を「PC 構造物の詳細設計」としたものを、設計 VE と略称している。具体的には、道路橋示方書や NEXCO 設計要領などの技術規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ものであり、当時、本橋に対して、試行的に導入されたものである。本稿では、この設計 VE に対し、プレテンションウェブ工法の実用化に向けて実施した設計 VE の概要を紹介して、その技術的工夫を述べるとともに、この設計 VE で得られた知見と現状の技術レベルに照らして評価し、今後の展開に関する展望について述べる。

### 2. 橋梁概要

錐ヶ瀧橋上り線は、東橋、中橋、西橋の 3 連からなる橋



\*1 Yukihiko KUTSUNA

現職 中日本高速道路(株)  
東京支社 環境・技術管理部

当時 日本道路公団 中部支社  
建設第二部



\*2 Kazuya YANAGINO

中日本高速道路(株)  
東京支社 総務企画部

日本道路公団 中部支社  
建設第二部



\*3 Tadahiko TSUTSUMI

(株)富士ビー・エス  
技術本部

(株)富士ビー・エス  
技術本部 設計部



\*4 Takuji NISHINAGA

(株)富士ビー・エス  
技術本部 土木設計グループ

(株)富士ビー・エス  
技術本部 設計部

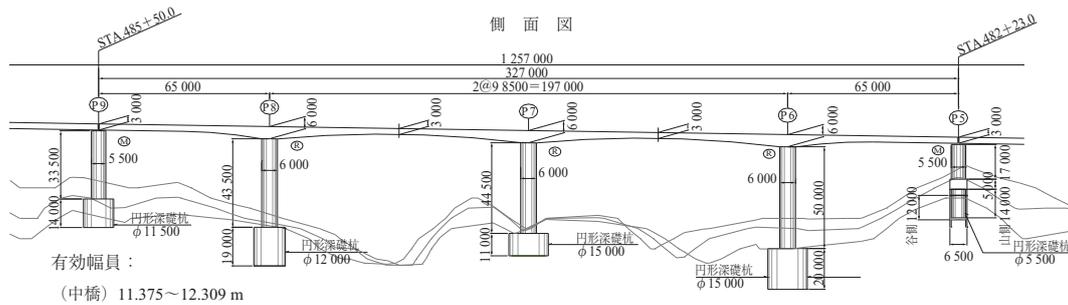


図 - 1 中橋一般図

梁である。代表的に、図 - 1 に中橋一般図、図 - 2 に標準断面図を示す。

構造形式：(東橋) PC 5 径間連続ラーメンストラット付き 2 室箱桁橋

(中橋) PC 4 径間連続ラーメン 2 室箱桁橋

(西橋) PC 5 径間連続ラーメン 1 室箱桁橋

設計荷重：B 活荷重

橋 長：445 (東橋) + 327 (中橋) + 485 (西橋) = 1 257 m

架設工法：張出し架設工法

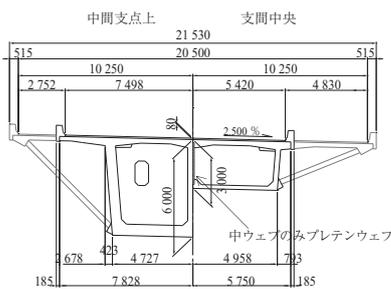


図 - 2 標準断面図

### 3. 適用に至った背景と設計 VE の概要

#### 3.1 適用に至った背景

プレテンションウェブ工法は、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方法で、① 高強度コンクリートを使用したプレテンション部材のため、高いせん断抵抗性が確保され、ウェブ厚を薄くすることが可能となる。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で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現場施工の省力化が図れる。このように構造の合理化や部材の耐久性を大きく向上できるプレテンションウェブ工法の国内の基準は、平成 12 年頃から公益社団法人プレストレストコンクリート工学会 (以降 PC 工学会、旧名社団法人プレストレストコンクリート技術協会) で研究活動が行われ、平成 15 年 11 月に PC 工学会から「プレテンションウェブ橋設計施工ガイドライン (案) 平成 15 年 11 月 (社団法人プレストレストコンクリート技術協会)」<sup>1)</sup> (以降ガイドライン (案)) として発刊された。

このガイドライン (案)<sup>1)</sup> が発刊された翌年、錐ヶ瀧橋上り線の詳細設計が始まり、設計・施工の技術的な最新の基準として適用できた。また、構造計算に使用する解析技術、とくに非線形有限要素解析のような高度な解析技術は、使用するにあたって、既往の研究成果や文献<sup>2)</sup> を参考に材料特性の設定方法、部材のメッシュ分割方法などを十分検証することで、有効な解析手段として活用できた。これによって、これまでの安全性の検証を実験に頼らざるを得ない状況から、解析によって安全性の検証のみならず、構造の合理化まで追求することが可能となった。このように設計基準や解析ツールが整ったこと、また、はじめに示したとおり、当時のウェブ構造の合理化を求める社会的背景を受けたことなど、プレテンションウェブ工法を実用化できる十分な環境にあったことが、錐ヶ瀧橋上り線でプレテンションウェブ構造を VE として提案できた大きな要因である。

#### 3.2 設計 VE の概要と技術的工夫

先に述べたとおり、VE 提案としてのプレテンションウェブへの置き換えを、2 室箱桁の中ウェブに限定した。これは、図 - 2 に示すとおり、本橋は一部ストラットに支持された床版構造を有する主桁構造として施工するため、外ウェブに適用した場合には、ストラット受台を含めたプレキャストウェブとする必要があり、製造が煩雑となることと、桁高が高いため施工が煩雑となる中ウェブのみのプレキャスト化でも、現場作業の省力化への効果が大きいと判断したためである。このように、中ウェブのみに部材厚の薄いプレテンションウェブを適用した場合には中外ウェブ厚が大きく異なり、せん断力の分担比率も異なることが予想され、また、厚さの厚い外ウェブがより多くのせん断力を分担した場合、中ウェブが軽量化された分外ウェブが増厚され、全体としてウェブの軽量化が図られないことが懸念された。当然すべてのウェブをプレテンションウェブとした場合、このような課題は発生しない。このせん断分担比率の算定が設計 VE として検証する 1 つ目の課題であった。検証は、当時でも頻繁に解析ツールとして使用されていた FEM 解析を使用して、ウェブのせん断分担比率を算出し、設計に反映させた。なお、本検討の詳細は本工学会誌<sup>3-5)</sup> などで報告しているため、そちらを参照されたい。

もう一つの設計 VE としての課題は、終局荷重時の斜圧縮破壊耐力の照査である。道路橋示方書Ⅲコンクリート編 (平成 14 年)<sup>6)</sup> (以降、道示Ⅲ) に準じた主桁のせん断対

する設計では、設計荷重時において斜引張応力度の照査、終局荷重時においては斜圧縮破壊耐力の照査を行う。斜引張応力度に対してはプレストレスの効果が見込めるため、プレテンションウェブの合理性が発揮される。一方、終局時の斜圧縮破壊耐力の照査においては、プレストレスの効果を考慮できない。つまり、コンクリートの平均せん断応力度の最大値（設計基準強度  $50 \text{ N/mm}^2$  の場合、 $6.0 \text{ N/mm}^2$ ）に鉛直プレストレスの効果が含まれていない。したがって、斜圧縮破壊耐力により部材厚さが決定される場合には、プレテンションウェブを適用することの効果が発揮できないため、終局荷重時の照査における平均せん断応力度最大値の制限値を新たに提案することを設計 VE の 2 つ目の課題として試みた。

国内基準である道示Ⅲ<sup>6)</sup> およびガイドライン (案)<sup>1)</sup> では、鉛直プレストレスを導入することの効果を検討できないため、諸外国の基準に目を向けた。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<sup>7)</sup> を行い、鉛直プレストレスの効果を適切に評価できる基準となっていた。この理論を参考とし、プレテンション方式で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解析的に再現し、評価することを試みた。解析モデルは中ウェブのみを抽出した I 形モデルとし、非線形 FEM 解析で検証した (図 - 3)。

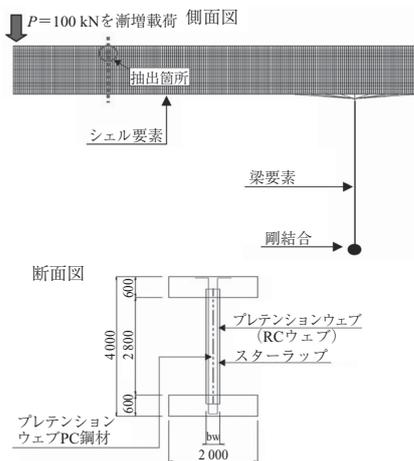


図 - 3 解析モデル

解析結果を図 - 4 に示す。平均圧縮応力度で  $4.6 \text{ N/mm}^2$  ( $1\text{S}15.2$  を  $250 \text{ mm}$  間隔で配置) のプレストレスを導入した場合、解析の材料構成則に「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 (RC ウェブ) に比較して、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。本橋の設計においては、この解析結果をもとに、RC ウェ

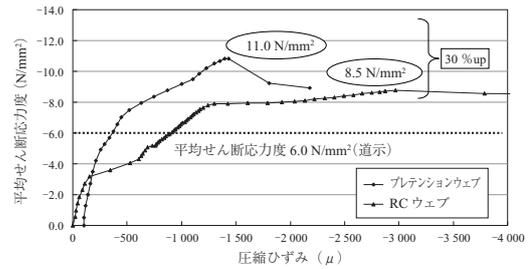


図 - 4 解析結果

ブの解析結果が道示Ⅲ<sup>6)</sup> に規定する  $\tau_{\text{max}}$  (平均せん断応力度の最大値) に対する安全率と同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  $\tau_{\text{max}}$  を以下のとおり、 $8.0 \text{ N/mm}^2$  と定めた。

① RC ウェブ

安全率 = 解析結果 / 道示  $\tau_{\text{max}}$

$$SF = 8.5/6.0 = 1.42$$

② プレテンションウェブ

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

$$SF = 11.0/8.0 = 1.38$$

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  $150 \text{ mm}$  で問題ないことを確認した。なお、詳細な内容については、本工学会誌などで報告<sup>3)~5)</sup> しているので、そちらを参照されたい。

以上が、主な設計 VE として提案した概要報告である。

#### 4. 現状の技術レベルとの評価

プレテンションウェブ工法の国内初の適用例として試行した錐ヶ瀧橋上り線は現在供用中で、とくに不具合の報告がないことから、初期性能をはじめとする品質への有効性は一定の範囲で確認することができた。ここでは、錐ヶ瀧橋上り線の設計 VE で得られた知見をもとに、せん断設計とプレテンションウェブの使用材料であるコンクリート強度に着目し、現状の技術レベルと照らし合わせた評価について述べる。

##### 4.1 せん断設計について

プレテンションウェブの終局時せん断圧縮破壊耐力の算定において、道示Ⅲ<sup>6)</sup> に準じた設計では、鉛直プレストレスを導入することの効果が発揮できていないことは前述したとおりであるが、現在の道示Ⅲにおいても、当時と変わりなく、また、ガイドライン (案)<sup>1)</sup> もとくに改訂されていない。しかし、土木学会コンクリート標準示方書の次期改訂の際には、せん断耐力式が見直され、プレストレスの効果を適切に評価できる国産式が提案されるとのことである。海外ではすでに修正圧縮場理論を適用した合理的な設計手法が標準化されているが、わが国においても近々、鉛直プレストレスの影響を定量的に評価できる手法が確立すれば、使用するコンクリート強度ごとにせん断耐力の照査が可能となり、前述の VE 提案で示したような非線形解析による部材の照査も省け、設計手法の合理化が図

れるものと期待される。

#### 4.2 高強度コンクリートの適用について

現行の道示Ⅲ<sup>6)</sup>の設計基準強度は、プレストレストコンクリートの場合 30～60 N/mm<sup>2</sup> が標準とされ、行き届いた品質管理がなされる工場製作に限って 80 N/mm<sup>2</sup> までの使用が認められている。また、近年では、設計基準強度 100 N/mm<sup>2</sup> を超えるコンクリートがプレストレストコンクリート橋梁でも実用化されている。このように使用するコンクリートの高強度化が求められるなか、PC 工学会では「コンクリート構造設計施工基準－性能創造型設計－」<sup>8)</sup>が平成 23 年に発刊され、設計基準強度の適用の範囲を、設計基準強度が 60 N/mm<sup>2</sup> 以下を普通強度コンクリート、設計基準強度が 60 N/mm<sup>2</sup> を超え 160 N/mm<sup>2</sup> 以下を高強度コンクリート、設計基準強度が 150 N/mm<sup>2</sup> 以上を超高強度繊維補強コンクリートと、今まで高強度コンクリートとされてきた適用の範囲が普通コンクリートの範囲となり、橋梁をはじめとしたプレストレストコンクリート構造物への高強度化への促進が図られる環境になりつつある。錐ヶ瀧橋上り線では設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> として設計したが、コンクリートの高強度化は、鉛直方向にプレストレスを与えるプレテンションウェブにとっては、圧縮強度が高くなればその分多くのプレストレスを与えられるということで有利となり、そのプレストレスの効果により終局時の斜圧縮破壊耐力も向上する。したがって、高強度のコンクリートをプレテンションウェブに使用することで、ガイドライン(案)<sup>1)</sup>に示されるプレテンションウェブの最小幅 150 mm の基準を、構造細目を満足する範囲内で、極力最小にするという提案も可能になるのではと考える。

#### 5. 今後の展開

図 - 1 に示す錐ヶ瀧橋上り線の中橋においては、中ウェブのみをプレテンションウェブとした場合でも全体で約 6% の重量が軽減できた。このように、プレテンションウェブの採用によるウェブ厚の低減は、橋全体の上部工重量の軽量化を図る上で効果が大きく、重量の軽減は、最大曲げモーメントの低減が図れるため、その分長支間化が可能となる。よって、今後はプレテンウェブの長所である軽量化を活かし、長支間化に向けた取組みが望まれる。このためには、プレテンションウェブのさらなる軽量化を目指したウェブの合理化を図る必要がある。その提案の一つとして、たとえば、図 - 5 に示すような圧縮材、引張材を明確にし、引張材には、プレテンション PC 鋼材を配置し、コンクリートの不必要な部位をはぎ落とし中抜きとしたプレテンショントラスウェブ構造なども 1 つの案として提案でき、その他にもウェブの合理化を図れる余地はいろいろあると考えられる。

また、これらの合理化を目的としたウェブ構造を検証するには、実験のみに頼るのではなく、近年急速に発展した高度な解析技術を駆使すれば、実挙動を再現した解析が可能となり、また、時間と費用を最小限に抑えて検証できるものとする。

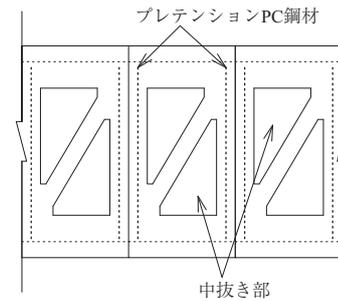


図 - 5 プレテンショントラスウェブ構造

#### 6. おわりに

平成 20 年春に新名神高速道路の一部として開通した錐ヶ瀧橋上り線について(写真 - 1)、当時の設計を振り返るかたちで、設計 VE を中心に報告した。この報告で示したプレテンションウェブの実用化に向けて取組んだ過程が、今後、プレテンションウェブなどの新しい構造を実橋へ適用する場合の過程や、FEM 解析を構造物の設計において慎重にかつ有効に用いることでコスト削減に寄与できる橋梁設計の参考になれば幸いであり、また、合理的な新しい構造の採用の可能性が広がることを望むものである。



写真 - 1 竣工時の錐ヶ瀧橋上り線

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ(平成 14 年 3 月)
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ(平成 14 年 3 月)
- 7) 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
- 8) コンクリート構造設計施工基準－性能創造型設計－社団法人プレストレストコンクリート技術協会

【2012 年 9 月 13 日受付】