

設計 VE による新技術の適用

— 第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋 —

忽那 幸浩*1・柳野 和也*2・堤 忠彦*3・篠原 貴*4

1. はじめに

日本道路公団（以降 JH）では、品質を確保しつつ経済的な高速道路建設を行うため、橋梁建設においては鋼コンクリート複合橋やプレキャストセグメント工法による PC 箱げた橋、またエクストラードズ橋など多くの新技術・新工法を開発・適用し、これまでに一定の成果を得ている。また最近では、契約後 VE 方式や入札時 VE 提案付き設計・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。新しい契約制度を導入することは、入札参加希望者の技術開発や得意分野を最大限に生かし、建設コストの削減を可能にするとともに、採用された VE 提案によって、提案者へ利益が還元されるインセンティブが働くなど、従来の価格のみの競争から技術力の競争に変換を図ることにより、より一層の技術開発促進が期待されるものである。

JH 中部支社では、平成 15 年度に表 - 1 に示す 2 件の工事において、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ている。

表 - 1 契約後 VE 提案適用工事一覧

工事名
第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(PC 上部工)上り線工事
第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋(PC 上部工)下り線東工事

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、前述の 2 件の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。本稿ではこれを設計 VE と略称するが、具体的には、道路橋示方書¹⁾（以降 道示）や JH 設計要領²⁾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。

表 - 1 に示す工事のうち、第二名神高速道路 錐ヶ瀧橋（PC 上部工）上り線工事では、設計 VE として、従来現場打ちで施工される PC 箱げたのウェブの一部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

ョンウェブ橋の適用を実施している。

プレテンションウェブ橋は、高強度コンクリートを使用したプレテンション部材をウェブに用いることで、高いせん断抵抗性が確保されるため、ウェブ厚を減じることが可能になり、これにより主げた自重が軽減できて上下部構造の規模が縮小され、橋梁建設の低コスト化が期待できる構造である。VE 提案者は、プレテンション部材を箱げたのウェブの一部に使用する場合の設計上の課題を、独自に開発した非線形有限要素解析プログラムを用いて考慮する設計方法を提案した。さらに道示り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を検討できないが、これについても解析により評価して、合理的な設計を行うことが可能となる。

本稿では、錐ヶ瀧橋上り線工事設計 VE により検討を行って提案した内容と、これを反映して実施した設計結果の概要、ならびにコストの節減効果について報告する。

2. 工事概要

錐ヶ瀧橋（PC 上部工）上り線工事（以降 錐ヶ瀧橋上り線）は、東橋、中橋、西橋の 3 連からなる橋梁であり、その工事概要を以下に示す。また、代表的に、図 - 1 に中橋一般図、図 - 2 に標準断面図を示す。

工事名：第二名神高速道路錐ヶ瀧橋(PC 上部工)上り線工事
線名：高速自動車国道 近畿自動車道名古屋神戸線
工事位置：(自) 三重県亀山市安坂山町字小総

(至) 三重県亀山市安坂山町字錐ヶ瀧

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 m + 327 m + 485 m = 1 257 m

支間長：(東橋) 57.5 m + 3@109.0 + 57.5 m
(中橋) 65.0 m + 2@98.5 m + 65.0 m
(西橋) 70.0 m + 3@115.0 m + 70.0 m

有効幅員：(東橋) 12.309 ~ 15.670 m

(中橋) 11.375 ~ 12.309 m

(西橋) 11.375 m

工期：平成 16 年 1 月 29 日 ~ 平成 19 年 3 月 13 日
架設工法：張出し架設工法

*1 Yukihiko KUTSUNA：日本道路公団 中部支社 建設第二部 構造技術課 課長代理

*2 Kazuya YANAGINO：日本道路公団 中部支社 建設第二部 構造技術課

*3 Tadahiko TSUTSUMI：(株)富士ビー・エス 技術本部 土木技術グループ グループリーダー

*4 Takashi SHINOHARA：(株)富士ビー・エス 技術本部 土木技術グループ

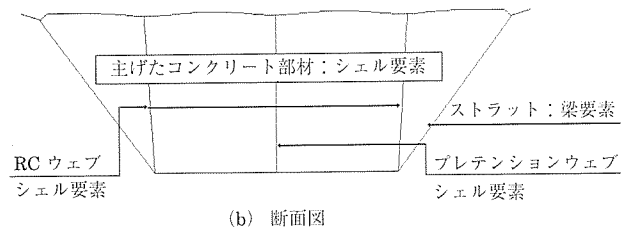
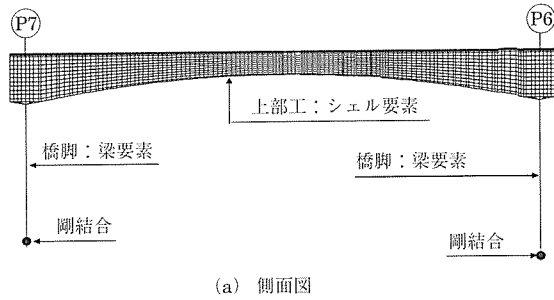


図-4 解析モデル図

求める。したがってここでは、設計荷重時および終局荷重時において、各ウェブのせん断力分担比率を、主げた高さおよびウェブ剛性比率の違いに着目してFEM解析により求める。図-3にせん断力分担比率検討フローを示す。

(2) 設計荷重時のせん断力分担比率

1) 解析モデルおよび荷重の載荷方法

解析は、中橋のP6～P7径間全体を対象とし、上部構造をシェル要素、下部構造P6、P7橋脚を梁要素にてモデル化して行った。モデルは、表-2に示すとおり中外ウェブ厚比率の異なる3種類とし、着目断面はけた高の違いによる分担比率への影響を確認するため、図-5に示す4断面とした。荷重の載荷方法は、着目断面から載荷長10mに単位荷重(5.0 kN/m²)を全幅載荷とした。図-4に解析モデル図、図-5に荷重載荷図を示す。

表-2 中外ウェブ厚

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
a	500	500	1:1:1	100%
b	600	300	2:1:2	50%
c	650	200	3:1:3	31%

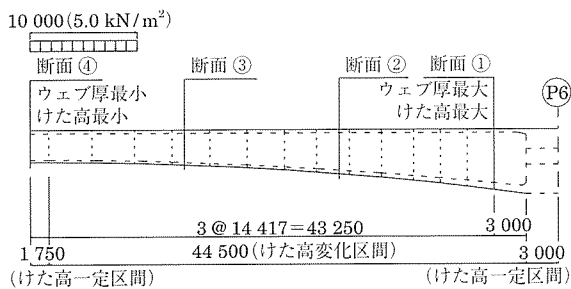


図-5 荷重載荷図

2) 解析結果

a) けた高変化の影響

図-6にモデルcの解析結果から得られた、各着目断面でのせん断力分担比率を示す。

図-6より、支定点6.0m～支間中央部3.0mのけた高変化に対し、ほぼ同一の分担比率で推移していることから、けた高の違いによるせん断力分担比率への影響はないものと考えられる。

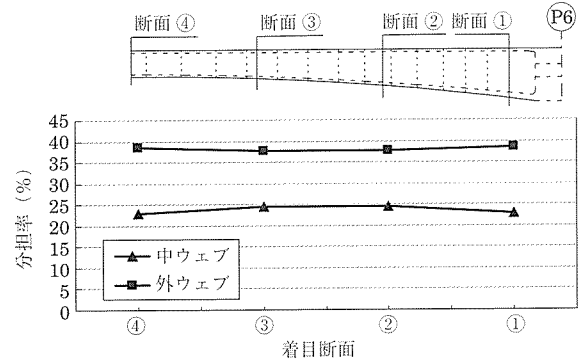


図-6 せん断力分担比率 (ウェブ厚比率一定)

b) ウェブ厚比率の影響

図-7にウェブ厚比率を変化させたときの着目断面①でのせん断力分担比率の解析結果を示す。

図-7より、中ウェブのウェブ厚比率が小さくなるとせん断力分担比率も小さくなる事が分かる。しかし、ウエ

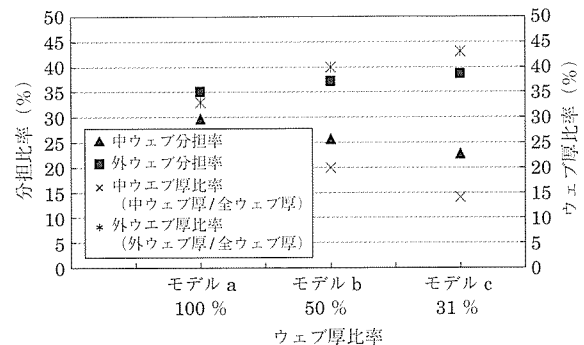


図-7 せん断力分担比率 (ウェブ厚比率変化)

ブ厚比が3 (外) : 1 (中)の場合でも、せん断力分担比率比は1.7 (外) : 1 (中)程度となり、ウェブ厚比率にせん断力分担比率は比例しないことが確認できた。

(3) 終局限界状態のせん断力分担比率

1) 解析モデル

解析は、中橋のP6～P7径間を対象として、P6橋脚から径間中央までの片持ちモデルとし、上部構造をシェル要素、下部構造P6橋脚を梁要素にてモデル化して行った。また、ウェブ厚比率は、前項設計荷重時のせん断力分担比率の解析で用いたモデルc (3 (外) : 1 (中))とした。

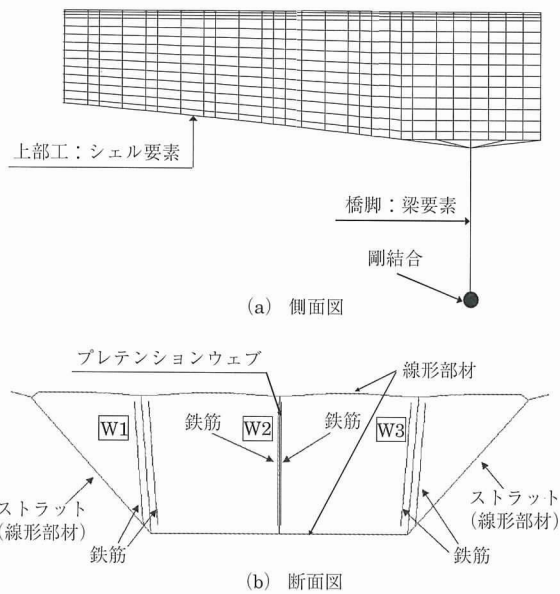


図 - 8 モデル図

2) 材料構成則

材料構成則は、メッシュ分割を十分小さくすることとして、コンクリートは無筋コンクリートの引張軟化曲線、鉄筋は、ひずみ硬化を考慮した鉄筋単体の応力-ひずみ関係を採用した。図 - 9 にコンクリート、図 - 10 に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

3) 荷重の載荷方法

荷重の載荷は、単位荷重 (5.0 kN/m) を 1 ステップ荷重

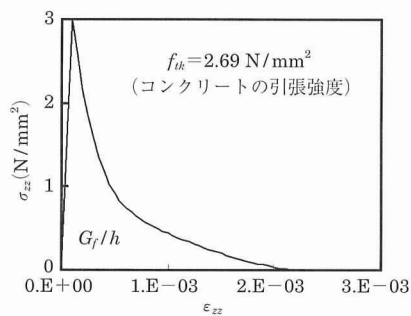


図 - 9 コンクリートの応力-ひずみ関係^{5) 6)}

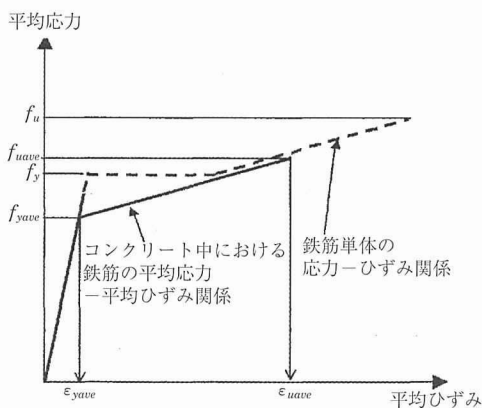


図 - 10 鉄筋の応力-ひずみ関係⁵⁾

としてモデル先端に漸増荷重した。なお、幅員方向には全幅荷重とした。図 - 11 に荷重載荷状態図を示す。

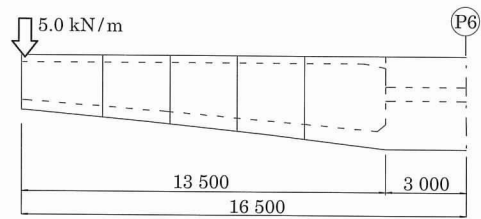


図 - 11 荷重載荷状態図

4) 解析結果

a) 荷重と変位

モデル先端の荷重と変位の関係を図 - 12 に示す。

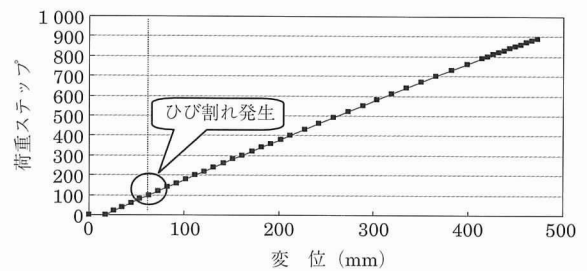


図 - 12 荷重-変位

b) ウェブの圧縮ひずみ

図 - 13 に中外ウェブそれぞれの、載荷荷重 $P = 82\,000$ kN におけるひずみ分布図を、また図 - 14 に、せん断力 (載荷荷重) と着目断面内の着目要素における主圧縮ひずみの関係を示す。

なお、図中に示す τ_{max1} および τ_{max2} は、中外ウェブのせん断力分担比率が、設計荷重時の検討で得られた 1.7(外) : 1(中)であると仮定した場合の道示Ⅲ 4.3.4(2)に準じて算出される、ウェブの圧縮破壊耐力に相当するせん断力を示している。

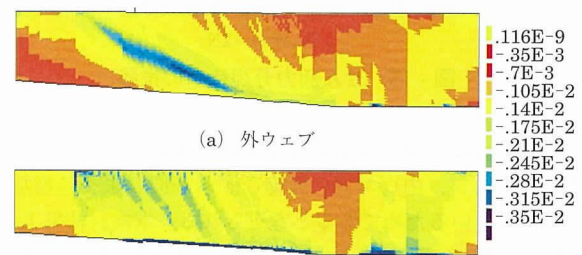
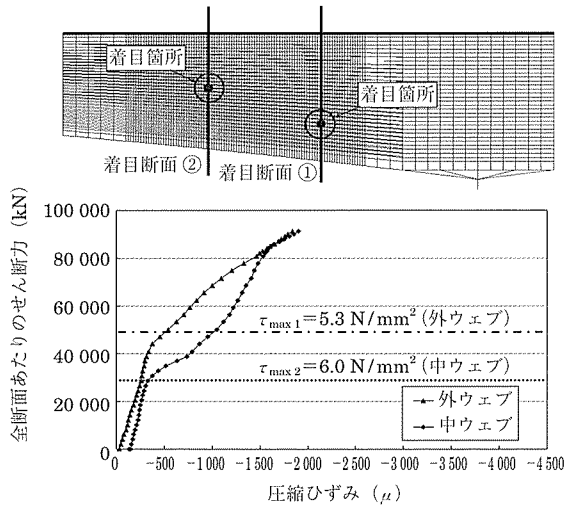


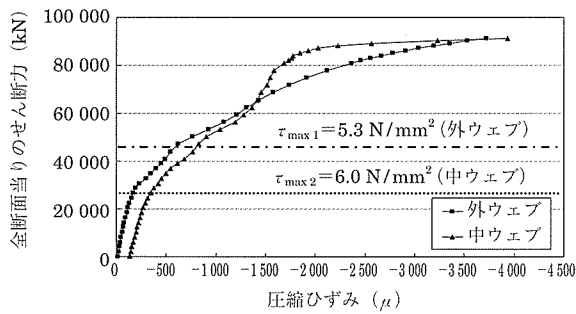
図 - 13 最小主ひずみ ($P = 82\,000$ kN)

c) せん断力分担比率

図 - 15 に荷重の増加にともなう中外ウェブのせん断力分担比率の推移を示す。図 - 15 より、ひび割れ発生後の非線形領域においても、線形領域とほぼ同一の分担比率で推移



(a) 着目断面①



(b) 着目断面②

図 - 14 荷重 (せん断力) - 主圧縮ひずみ曲線

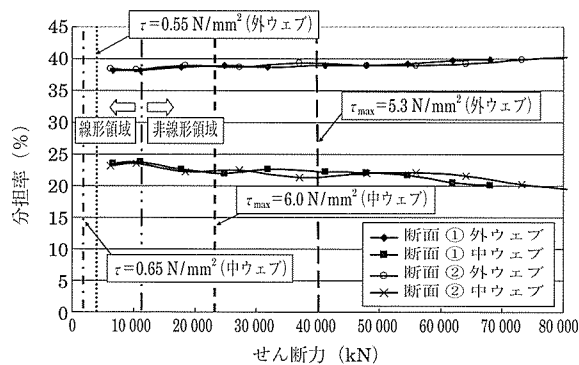


図 - 15 せん断力分担比率の推移

している。これは、前項の「せん断-圧縮ひずみ曲線」から、外ウェブ、中ウェブの圧縮ひずみが同じように増加して推移しているためであると考えられる。本検討結果より、終局限界状態の設計においても設計荷重時と同じ分担比率を使用できると考えられる。

3.2.2 せん断耐力の解析

(1) せん断耐力の解析

ここでは、ウェブにプレストレスを導入することによるせん断破壊耐力への影響を検討するため、プレテンションウェブをモデル化した非線形 FEM 解析を実施してその効果を検証した。

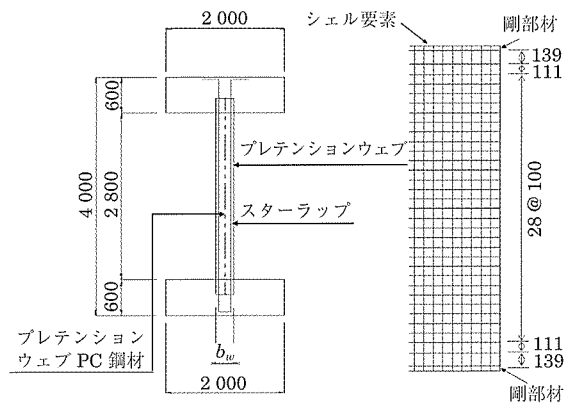


図 - 16 プレテンションウェブモデル構造図

1) 解析モデルおよび荷重の載荷方法

解析モデルは、前項の終局荷重時のせん断力分担比率解析モデルのうち、中ウェブのみを取り出した I 形モデルとした。

解析ケースは、表 - 3 に示すとおりウェブ厚さ 200 mm のプレテンションウェブ構造と、プレテンション鋼材を配置しない RC ウェブ構造で行った。荷重は、集中荷重 (100 kN/step) を着目ウェブが圧縮ひずみ 3 500 μ に達するまでモデル先端に漸増載荷した。

表 - 3 解析ケース

モデル	bw (mm)	スターラップ	プレテンション PC 鋼材	プレストレス 応力度
プレテンウェブ	200	D 16 ctc 125	ctc 250	4.6 N/mm ²
RC ウェブ	200	D 16 ctc 125	—	—

2) 材料構成則

材料構成則は、前項で示した終局限界状態のせん断力分担比率解析に用いたものと同様のものを使用した。さらに、せん断耐力に影響を及ぼす要因を検証する目的で、コンクリートの圧縮側構成則には、①「ひび割れたコンクリートの圧縮劣化」を考慮した構成則 (Thorenfeldt) と、②道路橋示方書に示す応力-ひずみ関係の 2 種類を用いた解析を行った。図 - 17 に「ひび割れたコンクリートの圧縮劣化を考慮した構成則」の概念図を示す。

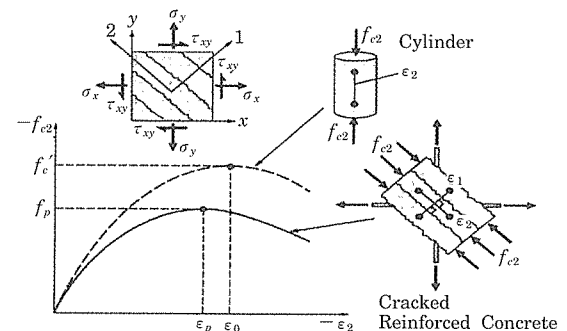


図 - 17 コンクリートの圧縮側構成則⁵⁾ (Thorenfeldt)

3) 解析結果

a) 荷重と変位

片持ちモデル先端の荷重と変位の関係を図 - 18 に示す。

(2) せん断耐力に影響する要因

解析に用いるコンクリートの圧縮側構成則を変えて解析を行った結果から圧縮破壊メカニズムの検討を行い、せん断耐力に影響する要因を分析してプレストレスを導入する

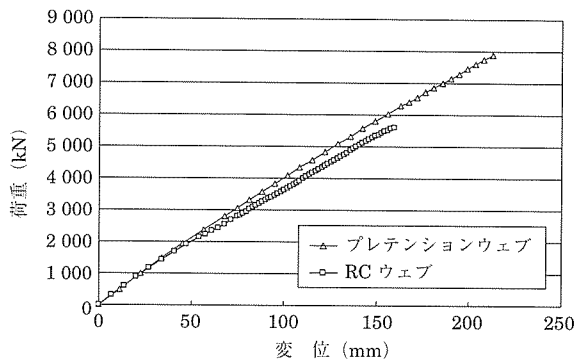


図 - 18 荷重－変位関係

この効果について検討を行った。斜圧縮破壊耐力は、式 (1) に示すとおり、主にひび割れ角度の影響とひび割れの進展にともなう圧縮劣化の影響により決定される。

斜圧縮破壊耐力 (V)

= ひび割れ角度の影響 (A) + 圧縮劣化の影響 (B)

$$\dots\dots\dots (1)$$

コンクリートの圧縮側構成則を変えて行った解析のうち、「①ひび割れたコンクリートの圧縮劣化を考慮した構成則」を用いて行った解析結果では、式 (1) に示す右辺 2 つの影響が考慮された結果が得られる。一方、「②道路橋示方書に示される応力－ひずみ関係」を用いて行った解析では、圧縮劣化の影響を考慮しないひび割れ角度の影響を反映した解析結果が得られる。ここでは、これら 2 つの解析結果から、おのおの要因の度合いを検証し、プレストレスを導入することでせん断耐力の向上が図られるメカニズムについて検討する。

図 - 19 に示す解析結果から、RC ウェブに対するプレテンションウェブの最大平均せん断応力度の伸び率は 30 ～

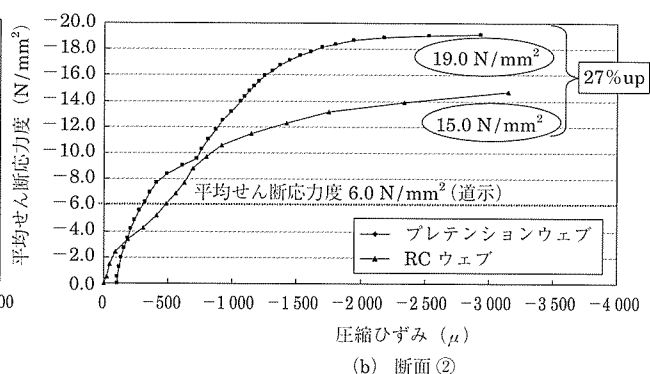
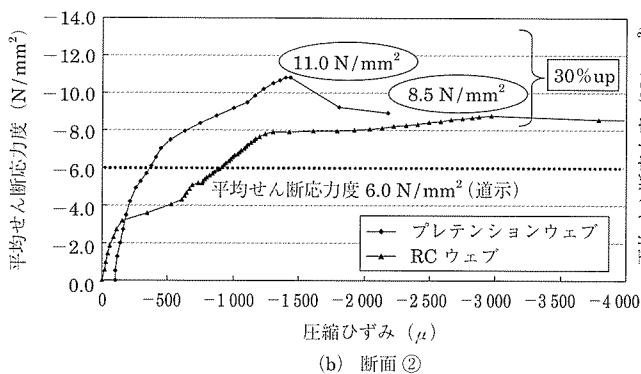
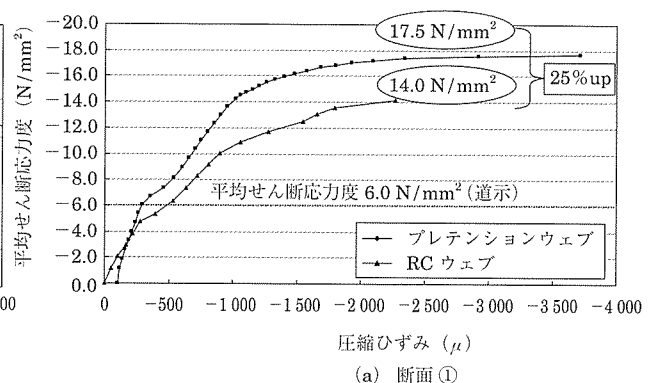
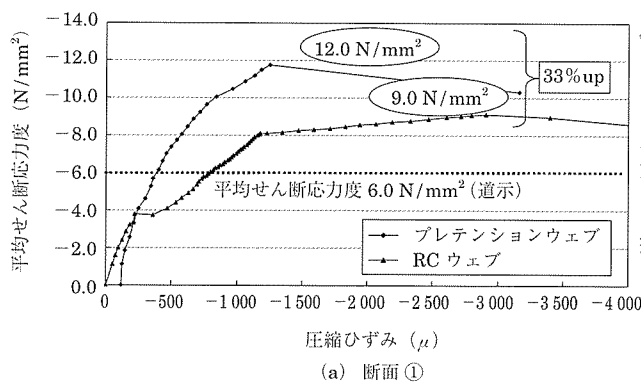
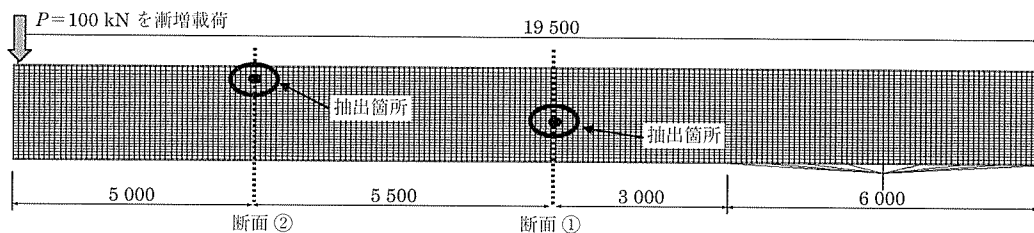


図 - 19 平均せん断応力度-圧縮ひずみ (構成則①)

図 - 20 平均せん断応力度-圧縮ひずみ (構成則②)

33 %である。一方、図 - 20 に示す解析結果から、同様に RC ウェブに対するプレテンションウェブの最大平均せん断応力度の伸び率は 25 ~ 27 %である。これら 2つの結果から、プレストレスを導入して部材軸線に対するひび割れ角度が大きくなることでせん断耐力が向上する効果が 25 ~ 27 %、またプレストレスを導入して圧縮劣化の度合いを軽減してせん断耐力が向上する効果は、図 - 19 と図 - 20 に示す結果の差として得られる 5 ~ 6 %程度と考えられる。

(3) せん断耐力の評価

ここでは、プレストレスを導入したプレテンションウェブの圧縮破壊に対するせん断耐力の評価方法について検討を行った。「道示Ⅲ 4.3 せん断力が作用する部材の照査 表 - 4.3.2 コンクリートの平均せん断応力度の最大値」では、コンクリート設計基準強度に対する平均せん断応力度の最大値は、 $\sigma_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ の 6.0 N/mm^2 を上限値としている。これは上述したせん断耐力に影響する要因のうち、圧縮劣化の影響が少ないことから明らかである。一方、プレストレスを導入することによる主応力方向の変化により、斜めひび割れ角度が大きくなる効果は解析的にも明らかであり、この効果を適切に考慮することは、プレテンションウェブ構造の合理的な設計において重要である。したがってここでは、図 - 19 に示す解析結果をもとに、RC ウェブの解析結果が道示りに規定する 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} を定める。

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

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

以上より、プレテンションウェブのせん断圧縮破壊耐力

の算定に用いるせん断応力度の最大値を 8.0 N/mm^2 とした場合でも、道示で規定する制限値を用いて RC ウェブとして設計される場合と同等程度の安全率を有しており、また、荷重の増加にともなう平均せん断応力度—圧縮ひずみ関係も、最大値まで安定して推移していることを考えると、十分妥当な値であると考えられる。

3.3 プレテンションウェブ橋の設計

3.3.1 概要

FEM 解析を用いたせん断力分担比率およびせん断耐力に関する検討結果を反映して、実構造物の設計を行った。設計のうち、ここでは主にプレテンションウェブ厚および鋼材量の決定に関係するせん断力に対する設計項目について示す。

図 - 21 にせん断力に対する設計のフローを示す。

3.3.2 せん断力に対する設計

(1) せん断力分担比率

設計で用いたウェブ厚比率とせん断力分担比率の関係を

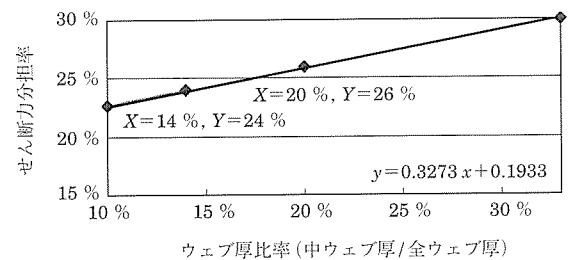


図 - 22 せん断分担比率

図 - 22 に示す。

(2) 設計結果

図 - 23 に、中橋のプレテンションウェブ厚およびプレテンション鋼材配置の総括を示す。

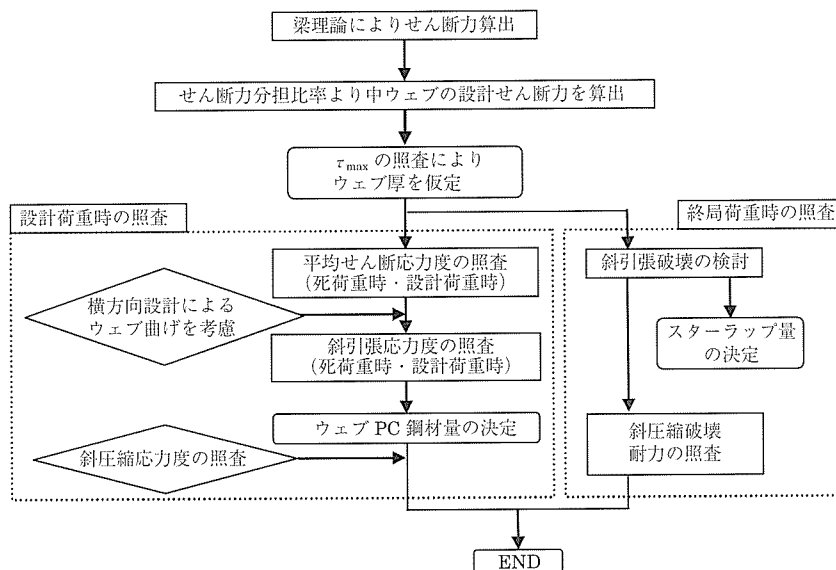
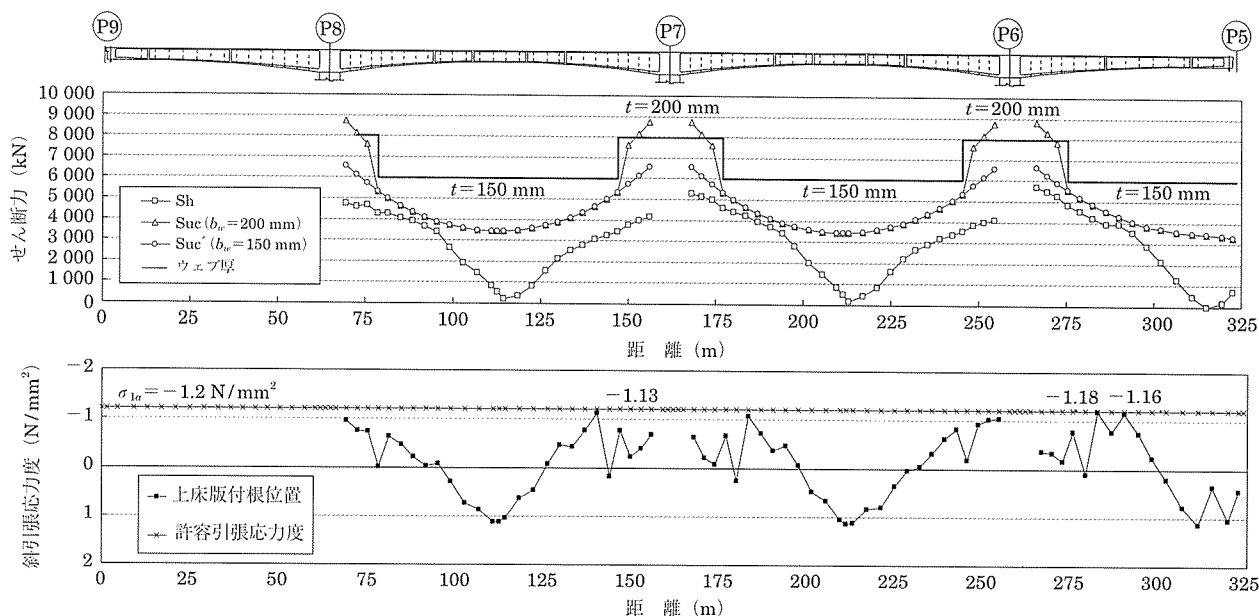


図 - 21 せん断に対する設計フロー



中ウェブ (プレテンション)	ウェブ厚 (m)	200	150	200 (600) 200	150	200 (600) 200	150							
	プレテン鋼材 (m)	@125	@250	@125	@125	@250	@125 @125 @250							
外ウェブ (RC)	ウェブ厚 (m)	600	400	300	400	600	500	300	400	500	600	500	300	300
		500	500	500	500	400	400	400	400	400	400	400	400	400

図 - 23 プレテンションウェブ厚およびプレテンション鋼材配置の総括

4. コスト削減効果の評価

プレテンションウェブ構造を適用することによる直接的なコスト削減の効果は、上部構造重量の軽減による上下部構造全体の鉄筋、コンクリートおよびPC鋼材量などの減少である。一方でプレキャスト部材を用いることによる施工サイクルの短縮、すなわち現場施工期間の短縮による間接的な経済性の効果も期待できる。また品質管理の行き届いた工場で作成されるプレテンションウェブを用いることで、より耐久性の高い構造物を構築することが可能となる。

本橋では下部構造はRCウェブ構造の重量によりすでに施工が完了しているため、コスト削減は上部構造に限定される。プレテンションウェブ構造の採用による軽量化によ

表 - 5 上部構造反力

(単位: kN)

構造	P9	P8	P7	P6	P5	合計
プレテンウェブ	3 189	33 774	44 658	45 555	3 532	130 708
RC ウェブ	2 914	39 878	45 953	47 218	3 466	139 429

って減少する上部構造の主な材料の数量を表 - 4 に示す。なお、表中に示す減少比率とは、RCウェブ構造として設計した数量に対するプレテンションウェブ構造の比率であり、現在精査中のため変動する可能性がある。

表 - 5 に、参考として各橋脚における上部構造反力の比較を示す。表より、中ウェブのみをプレテンションウェブとした中橋の場合で、全体で約6%の重量が軽減される結果となっている。

表 - 4 数量増減

項目	種別	単位	数量		数量増減	減少比率
			① RC ウェブ	② プレテンウェブ		
コンクリート	P2-2	m³	3 851	3 536	- 315	92 %
	プレテンションウェブ	式	0	1	1	-
型枠	P2	m²	13 111	11 817	- 1 294	90 %
鉄筋	P	t	835	758	- 77	91 %
PC鋼材引張	PC鋼より線 12S15.2 B (架設)	kg	94 266	92 592	- 1 674	98 %
	PC鋼より線 19S15.2 B (連続)	kg	70 496	66 458	- 4 038	94 %

5. まとめ

現在、錐ヶ瀧橋上り線工事はプレテンションウェブを設置する前の柱頭部の施工中であるが、設計VEでプレテンションウェブ構造を適用したことによるコスト削減効果は、前述した数量および今後の施工状況も含めて総合的に検証する予定である。

今回、契約後VEとして試行的に「設計VE」を実施したが、今後は契約後だけでなく、契約(入札)前やその前段の設計時点でのVE提案内容が検証・評価され、新技術・新工法として採用される場面が増えていくことが想定される。いわゆる発注者側が耐久性能をはじめとした要求性能を今以上に明確に示すとともに、提案者が提案内容を客観

○ 設計報告 ○

的に説明できるようにすることが今後も必要になるもの
と考える。

本稿で報告したような、設計 VE により新しい構造を実
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縮減に寄与でき
ることが、今後の橋梁設計の参考になれば幸いである。

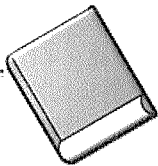
参考文献

1) 道路橋示方書・同解説 Ⅲコンクリート橋編 平成 14 年 3 月 社

団法人 日本道路協会

- 2) 設計要領第二集 平成 9 年 11 月 日本道路公団
- 3) プレテンションウエ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
- 4) ストラットに支持された床版を有する PC 箱げた橋の設計・施工マニュアル(案)平成 16 年 2 月 財団法人 高速道路技術センター
- 5) K. Maekawa, A. Pimanmas and H. Okamura : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.
- 6) コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, 2002.

【2005 年 4 月 28 日受付】



● 関連書籍のご案内

PC箱桁定着部の破壊解析委員会報告書 PC定着部の破壊解析に基づく性能設計

附属資料：特別講演 日本道路公団技術部構造技術課長 猪熊 康夫氏
外ケーブル定着部の性能照査型設計ガイドライン(試案)
標準解析事例

A 4 判・219 頁(会員価格 5,000 円・非会員価格 6,000 円)

平成 16 年 9 月 3 日発行

(社) プレストレストコンクリート技術協会 PC箱桁定着部の破壊解析委員

残り 10 部となりましたので、現金書留にてお早めにお申し込み下さい。