

## 一定せん断流パネル解析を用いたPC道路橋の設計手法の提案

(株)オリエンタルコンサルタンツ	正会員	博(工)	○原田	健彦
(株)オリエンタルコンサルタンツ	正会員		栗山	照雄
(株)富士ピー・エス[元国総研交流研究員]	正会員	工修	正木	守
国土交通省 国土技術政策総合研究所		博(工)	星隈	順一

Abstract: This study discusses applicability of analysis using the constant shear flow panel model to design of PC road bridges that is originally proposed for the design of steel bridges. The present paper has tested a new way to incorporate prestress into the shear flow panel model and used it for the design of a PC bridge with a simple configuration. When comparing the proposed model shows a good accuracy in terms of both nominal stress distributions and principal stress distributions compared to the calculated results obtained with the truss analogy and more sophisticated finite element analysis, which also enables to calculate local stress distributions simultaneously.

Key words: Truss analysis, Constant shear flow panel, Nominal stress, PC box girder

## 1. まえがき

PC道路橋の設計計算では、主桁全断面を一本の梁として取り扱い、図-1 に示すような平面あるいは立体骨組モデルを用いた数値解析を主体として断面力を算出し、断面計算により公称応力を求めることが大半である（以下、従来法と称す）<sup>1)</sup>。一方、従来法で評価することが困難な局所の応力分布の変化は、PC道路橋の耐荷力や耐久性の信頼性に影響を与える可能性があり、必要に応じてシェル要素などを用いた有限要素解析により検討される。しかし、主要な設計計算で用いる許容値や安全率は、公称応力と対比することを前提に、実験の整理結果や経験の積み上げによるものが大部分であり、詳細な解析結果を得ても公称応力を前提とした許容値の場合には必ずしもそのまま比較できない<sup>2)</sup>。また、有限要素解析モデルを用いた影響線あるいは影響面解析も一般に困難である。そのため、たとえシェル要素などを用いた詳細な有限要素解析を用いたとしても、設計実務では梁モデルを前提にした設計計算の実施も欠かせない。

一方で、梁を前提にした計算では局所的な応力状態がコンクリートに与える影響に対してある程度割り切った対応をせざるをえず、設計実務では経験的に用心鉄筋を配置して補強したり、コンクリート打設などの施工上の工夫で対処したりするのが現状である。

以上から、PC道路橋の初期品質を向上するためには、設計計算を行う段階で初期ひび割れ発生リスクを最小限にする断面形状や鋼材配置などの検討が望まれる。そこで、骨組解析を主体とし、公称応力と局所の応力状態を同時に算出できる手法があれば、設計の合理化と高度化を両立できるものと考えられる。鋼道路橋の合理的な設計計算モデルの一つとして研究されている一定せん断流パネル要素を用いた解析は、その定式化上、公称応力と局所のせん断流を同時に算出でき、実橋の設計計算における使用実績もある<sup>3, 4)</sup>。PC橋も基本的には上・下床版およびウェブなどの版部材により主桁が構成されており、各版部材を弾性体として扱うことで同解析の適用が期待されるが、解析モデルに対するプレストレスの導入方法が確立されてい

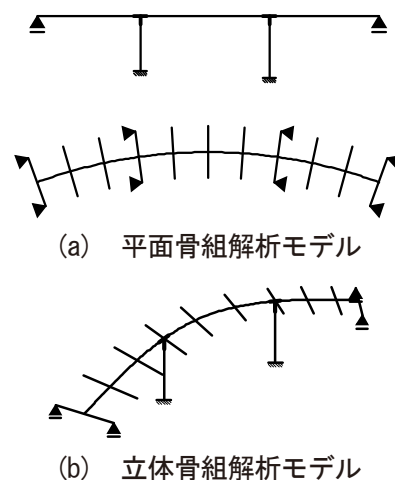


図-1 設計計算に用いるモデル

いなどの課題がある。

そこで本検討では、一定せん断流パネル要素を用いた解析手法をPC道路橋の実橋に適用することを想定し、PC鋼材やその定着部・偏向部のモデル化とプレストレスの導入方法をまず提案した。次に、PC道路橋を対象に、提案手法と従来法によりそれぞれ求めた公称応力を対比し、従来法と同等の解析精度と作業量による設計照査の実行可否について調べた。そして、解析結果より主応力の大きさや向きを算定し、初期ひび割れ発生の可能性が高い箇所の応力状態の評価を試みた。最後に、本手法が従来法に比べて合理化および高度化できる点ならびに実橋における設計計算へ適用する上での留意点についてそれぞれ整理した。

## 2. 一定せん断流パネル要素を用いたPC箱桁橋のモデル化

### 2.1 一定せん断流パネル要素を用いた解析の概念

一定せん断流パネル要素は、図-2 に示すように、格子状に組み合わせた梁要素間をせん断変形のみ抵抗する板要素で補間した要素（以下、せん断パネルと称す）であり、板要素とその外周の梁要素（以下、縁部材と称す）間には図中の矢印で示すような内力の平衡関係がある。そのため、従来の梁曲げ理論ではBernoulli-Eulerの仮定に基づいてせん断変形の影響が無視されるのに対し、せん断パネルでは板要素に生じたせん断応力と等価な垂直応力が縁部材に伝達され、せん断変形の影響を評価できる。

一方、解析で得られるのは従来の格子解析と同様に各要素の断面力と節点変位であるので、部材単独の応力状態については公称応力として整理することが可能であり、影響線解析なども容易になる<sup>3,4)</sup>。このせん断パネルを用い、上・下床版やウェブなどの部材をそれぞれ格子状に分割してモデル化し、数値解析を行う手法が「一定せん断流パネル解析」である。

### 2.2 PC箱桁橋のモデル化

#### (1) コンクリート部材のモデル化

PC箱桁橋は、鋼橋と異なり、部材厚が厚くハンチやテーパーを有する。そのため、床版やウェブをモデル化するにあたっては、図-3 に示すように格子状に分割した板要素に平均部材厚  $t_m$  とせん断弾性係数  $G_c$  をそれぞれ与えてせん断変形に伴うせん断流  $q$  (せん断応力  $\tau_{xy} = q/t_m$ ) を負担させている。また縁部材には、表-1 に示すように断面積  $A$  および弾性係数  $E_c$  をそれぞれ与えて軸変形および面内曲げ変形に伴う垂直応力  $\sigma_x$  を負担させ、面外曲げ変形に対しては断面2次モーメント  $I_y$  を与えて抵抗させている。なお、せん断パネル面内方向のせん断変形を拘束しないように、同方向の縁部材の断面2次モーメント  $I_z$  には小さな値を入力した(本検討では  $I_z = 10^{-9} \text{m}^4$  とした)。

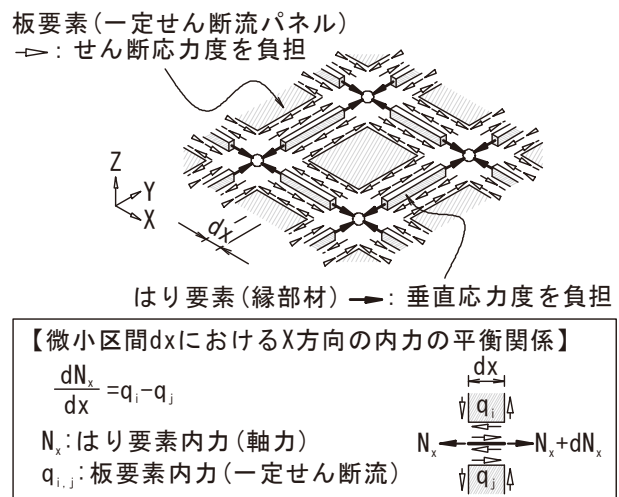


図-2 一定せん断流パネル要素の概念

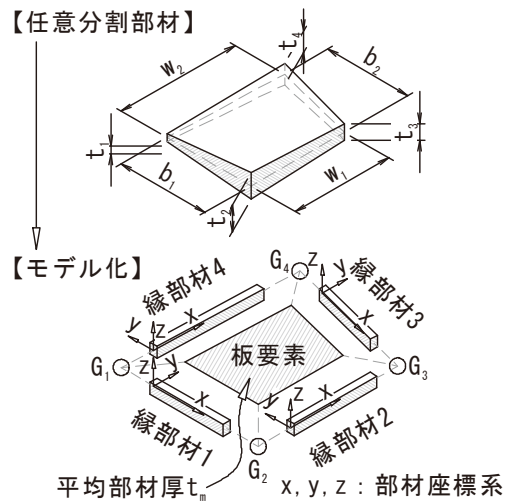


図-3 分割した床版やウェブのモデル化

表-1 せん断パネルにもたせる断面定数

項目	板要素	縁部材	
		1および3	2および4
板厚 $t$	平均厚 $t_m$	—	—
断面積 $A$	—	$t_m(w_1 + w_2)/4$	$t_m(b_1 + b_2)/4$
断面2次モーメント $I_y$	—	$t_m^3(w_1 + w_2)/48$	$t_m^3(b_1 + b_2)/48$
$I_z$	—	$I_z \approx 0$	$I_z \approx 0$

※表中の記号は、図-3と対応。

(2) PC鋼材およびプレストレスのモデル化

PC鋼材は線要素を用いて配置し、同要素にはモデル化する1部材あたりのPC鋼材断面積 $A_p$ および弾性係数 $E_p$ をそれぞれもたせる。また鋼材定着部や偏向部は、図-4に示すように、仮要素を用いて近傍のせんパンネと節点共有させた。ここで仮要素には、モデルに剛性や剛体挙動を加えることなく、独立節点(図中●印)の負荷荷重を周囲の従属節点(図中○印)に荷重やモーメントとして均等分配(各従属節点の重み係数=1.0)することが可能な補間要素を用いた。

プレストレスは、PC鋼材を構成する線要素のみに導入応力度 $\sigma_i$ 相当の鋼材ひずみを生じさせる温度降下 $T_R$ および線膨張係数 $\alpha_p$ をそれぞれ与えることで導入した(式(1))。

$$T_R = \sigma_i / (\alpha_p E_p) \quad (1)$$

またプレストレスを導入するにあたっては、PC鋼材の実際の伸び剛性 $E_p A_p$ を与えたモデルでは、鋼材自身が軸方向変形を拘束するため、導入プレストレス力 $P_i (= \sigma_i A_p)$ を表現できない<sup>5)</sup>。そこで本手法では、表-2に示すように、 $\alpha_p$ および $E_p$ をそれぞれ調整することで、鋼材要素に $P_i$ 相当の断面力が発生することを確認した。なお、摩擦などによるプレストレスロス、部材を必要に応じて分割し、要素ごとに変化する $P_i$ を温度降下で調整する。

(3) PC単純箱桁橋を対象としたせんパンネ解析モデルの適用例

図-5に示す支間長 $l=50m$ のPC単純箱桁橋を対象としたせんパンネ解析モデルの適用例を図-6に示す。既述したとおり、PC鋼材などのモデル化やプレストレスの導入方法の有効性を調べることを主目的としてい

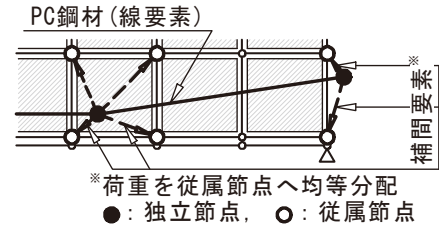


図-4 PC鋼材定着部・偏向部のモデル化

表-2 PC鋼材要素の材料定数の調整

項目	調整前	調整後
線膨張係数 $\alpha_p$ [ $1/^\circ C$ ]	$1.2 \times 10^{-5}$ -	$1.2 \times 10^{-2}$ (1000)
弾性係数 $E_p$ [MPa]	$2.0 \times 10^5$ -	$2.0 \times 10^2$ (0.001)
導入応力度 $\sigma_i$ [MPa]	1000	1000
解析値 $\sigma_p$ [MPa]	920.93	1000.05
再現率 $\sigma_p / \sigma_i$	0.92	1.00

\*括弧内数値: 調整前/調整後  
解析値 $\sigma_p$ : 全鋼材平均値

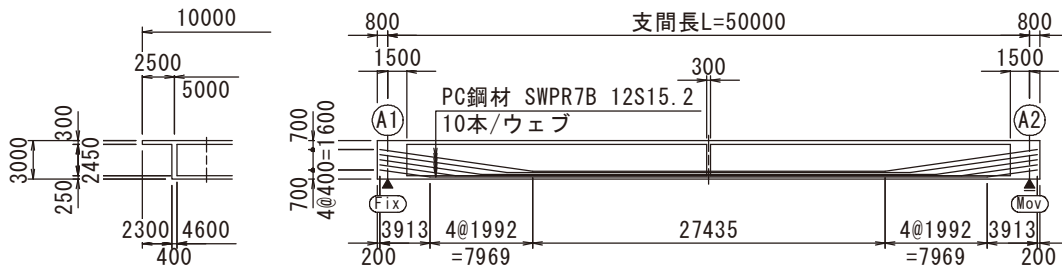


図-5 対象としたPC単純箱桁橋の断面図および側面図

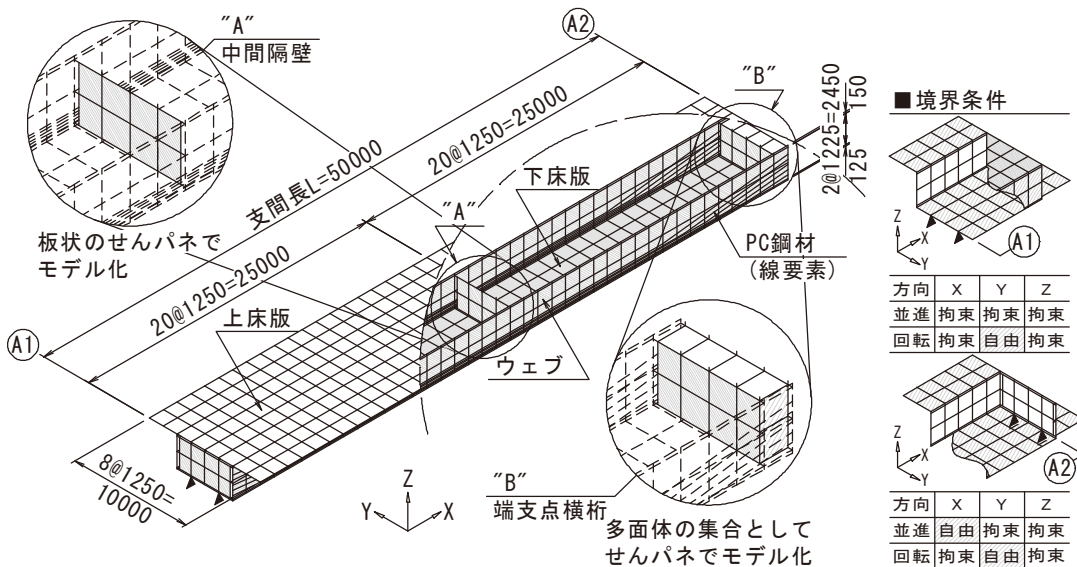


図-6 PC単純箱桁橋を対象としたせんパンネ解析モデルの例

るため、図の例ではハンチを省略して全長にわたり等断面桁とした。解析モデルの要素分割は、鋼橋における研究成果<sup>3)</sup>を踏まえ、従来の骨組解析と同等程度の計算応答値を得る目的で、張出し床版および中間床版をそれぞれ床版支間方向に2および4分割とし、ウェブは上下に2分割とした。橋軸方向には支間長を40等分し、ほぼ正方形のせんパネにより上部構造をモデル化した。なお、中間隔壁はせんパネを用いて板状にモデル化し、端支点横桁は多面体の集合としてせんパネを組み合わせてモデル化した。またモデルの境界条件(単純支持形式)は図-6に示すとおりであり、解析により得られた断面力から断面計算により応力度(公称応力)を算出した。

### 3. せんパネ解析による試算結果

#### 3.1 公称応力の算定

既述したとおり、せんパネ解析では従来法と同様に公称応力を得ることができ、さらにその応力度は分割した部材ごとにせん断変形の影響が考慮される。したがって、せんパネ解析では、従来法に比べて比較的詳細な応力性状を知ることが可能と考えられる。

図-5に示すPC単純箱桁橋を対象とするせんパネ解析による試算結果の代表として、プレストレス作用時( $\sigma_f=1000\text{MPa}$ ;  $T_f=416.7^\circ\text{C}$ で全鋼材要素一定)における断面力分布を図-7に示す。これらの断面力分布から公称応力を算定した結果を図-8に示す。図-8(a)および(b)は、上床版および下床版を構成するせんパネの橋軸方向縁部材における上縁および下縁応力度 $\sigma_u$ ,  $\sigma_l$ をそれぞれ示したものであり、縁部材両端の断面力から次式により公称応力を算出したものである。

$$\sigma_{U(L)} = N_x/A \mp M_y t_m / 2I_y \quad (2)$$

ここに、 $N_x$ および $M_y$ は縁部材両端の軸力および曲げモーメントをそれぞれ表す。図中一点鎖線は、従来法による結果を示しており、せんパネ解析値は従来法と良く一致する。また端支点付近のせんパネ解析値に着目すると、張出し床版端部とウェブ上の縁部材(図-8(a)に示す<1>と<3>)で値が異なっていることも分かる。これは、従来法において有効伝達長や有効幅として考慮されるせん断遅れの影響をせんパネにより評価できたためと考えられる。

図-8(c)は、ウェブを構成するせんパネの板要素におけるせん断応力度 $\tau_{xy}$ を示しており、板要素の断面力

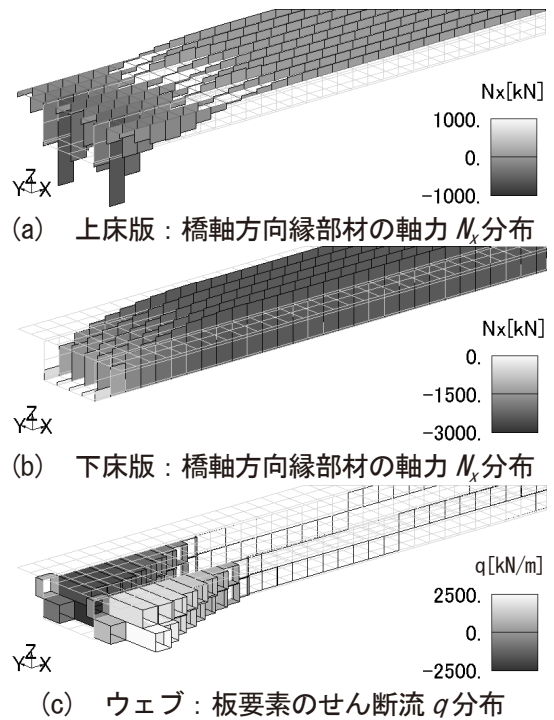


図-7 プレストレス作用時の断面力分布

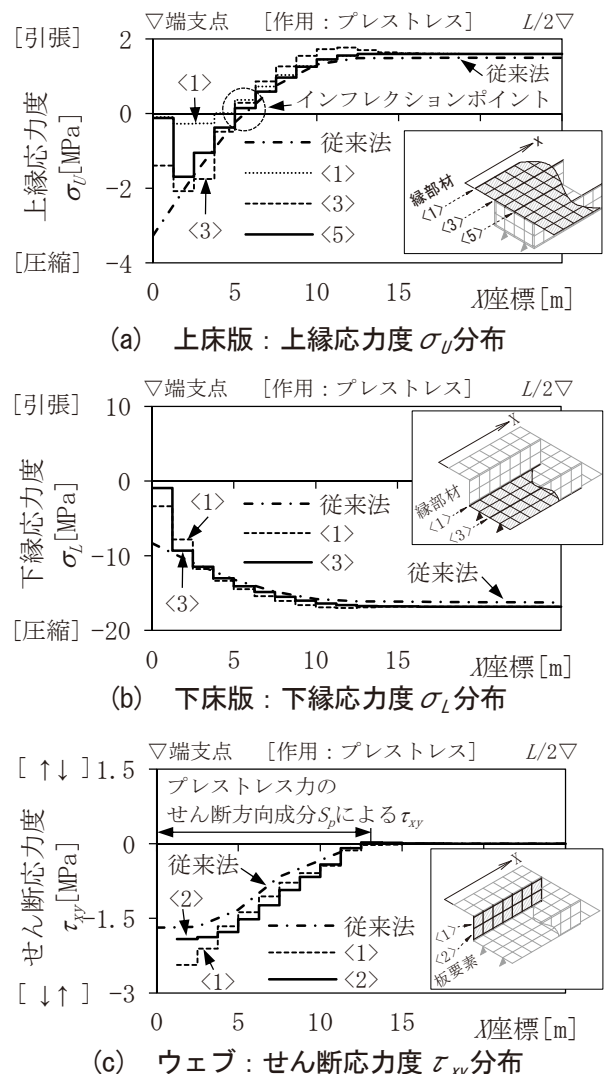


図-8 プレストレス作用時の応力度分布

(せん断流  $q$ ) を平均部材厚  $t_m$  で除して公称応力を算出したものである。一方、図中一点鎖線は従来法による結果を示しており、プレストレスのせん断方向成分  $S_p$  をウェブの断面積で除した平均せん断応力度である。図に示すとおり、両者の傾向は一致しており、せん断解析では図-6 に示すように PC 鋼材を実際の配置に合わせてモデル化し、プレストレスを導入することで  $S_p$  を直接的に評価できることが分かる。

以上のように、せん断解析で算出した公称応力は一本の梁モデルを用いた従来法による結果と一致しており、提案したモデル化およびプレストレスの導入方法はいずれも有効であることを確認した。さらに、従来の梁曲げ理論では直接的な評価が困難なせん断遅れの影響など、断面の立体的挙動も同時に捉えられることも従来法に比した利点として確認できた。

### 3.2 主応力の算定

PC 道路橋の初期ひび割れ発生の有無を評価するには、各部材の任意点における主応力の大きさや向きを調べる必要がある。前述のように、せん断解析では板要素の外周に配置した各縁部材の部材軸方向の  $\sigma_t$  および  $\sigma_l$  をそれぞれ得ることができ、これらの直交応力成分と板要素の  $\tau_{xy}$  から、別途シェル要素などを用いた計算をやり直すこと無く、図-9 に示すように任意点の最大・最小主応力  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  の大きさと向きをそれぞれ導くことが可能となる。

図-10 は、プレストレス作用時における上床版およびウェブの桁端付近における  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  の大きさと向きをベクトル表示したものである (内向きと外向きの矢印はそれぞれ圧縮と引張を表す)。ベクトルの矢印の向きに着目すると、図-8(a) に示したインフレクションポイント付近で圧縮から引張へ転じる様子が見てとれ、これより支間中央寄りでは橋軸方向の引張応力度が一樣に分布していることが分かる。また桁端付近では、ウェブに対してハの字にベクトルの方向が向いており、図-8(a) に示した  $\sigma_y$  分布と同様に、ベクトルの大きさがウェブ上に比べて張出し床版端部が小さく、せん断遅れの影響によるプレストレス力の広がりや表現できている。このように、せん断変形の影響が無視される従来の梁曲げ理論に対し、せん断解析では、板要素に生じた  $\tau_{xy}$  と等価な垂直応力度が縁部材に伝達されることでせん断遅れの影響を評価できる有限要素解析と同様に主応力の大きさや向きを評価できることが分かる。

### 3.3 要素分割の細分化による局所の応力状態の評価に対する検討

図-11 は、要素分割を細分化した場合の  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  分布を

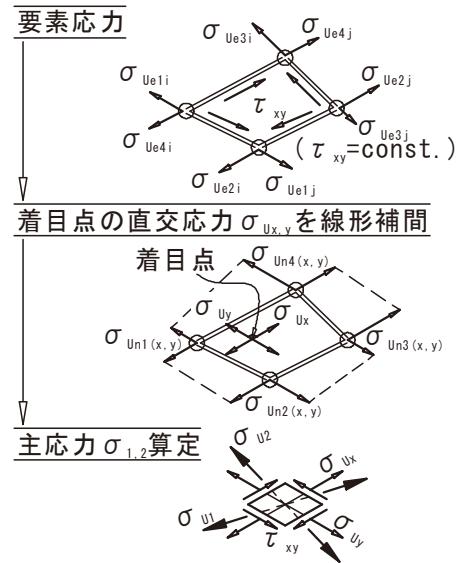


図-9 せん断解析の主応力算定の流れ

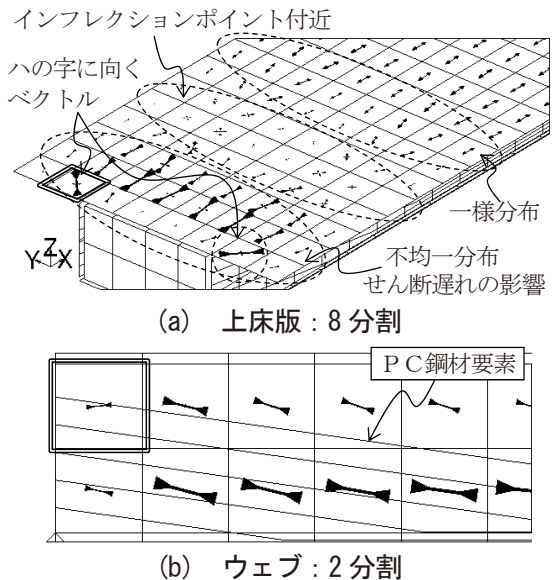


図-10 プレストレス作用時の主応力分布

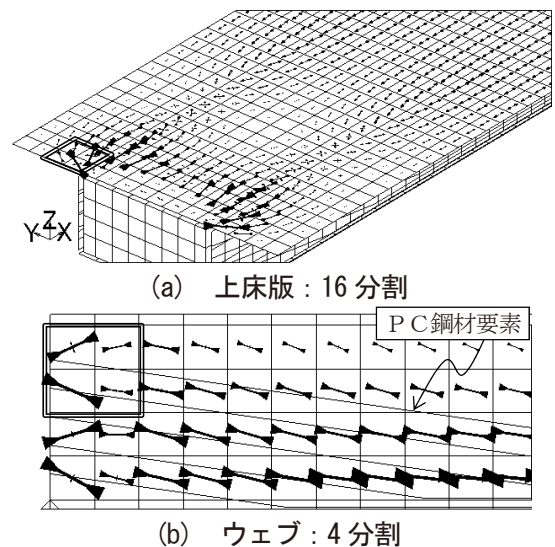


図-11 要素分割の細分時の主応力分布 (プレストレス作用時)

示したもので、プレストレス作用時の上床版およびウェブにおける桁端付近の様子をベクトル表示したものである。図-10(a)および図-11(a)に示す上床版の主応力分布に着目すれば、要素分割を細分化することでせん断遅れによる主応力の流れを詳細に可視化できている。また要素ごとの主応力に着目すれば、図-10に太枠で囲んだせんパネ1要素あたりの応答値は、同じく図-11に太枠で囲んだ4要素の主応力分布の平均的な状態を表していることも分かる。

以上のように、せんパネ解析では、要素分割を細分化することで詳細な応力状態を算定できるが、図-10に示す程度の要素分割においても従来法と同等以上の応力状態を十分評価できているものと考えられる。

#### 4. むすび

本検討で得られた成果は、以下に示すとおりである。

- 1) PC鋼材やその定着部および偏向部には線要素や仮要素をそれぞれ用い、せんパネと組み合わせたモデル化を提案した。またプレストレスは、PC鋼材要素のみに導入応力度相当の温度荷重(温度降下と線膨張係数)を与えて導入した。その際、鋼材要素自身の伸び剛性を小さくすることで導入プレストレス力と等価な断面力を発生させることが可能となった。
- 2) 上記提案手法による単純なせんパネ解析モデルを用いた試算結果では、従来の骨組解析と同等の公称応力を得ることができ、かつ従来の骨組解析では考慮できないせん断変形が応答値に与える影響を直接的に考慮できることを示した。
- 3) 板要素に生じるせん断流と縁部材両端の断面力を用いて主応力の大きさと向きを算定し、ベクトル表示することで有限要素解析と同様に局所の応力状態の可視化が可能となった。

このように、せんパネ解析はPC道路橋に対しても十分適用可能であり、従来の許容値や安全率と対比可能な公称応力が得られる上、有限要素解析と同様に局所の応力状態を評価できる可能性を示唆した。ただし、せんパネ解析をPC道路橋の実務設計へ適用するにあたっては、端支点横桁などの剛性の高い部材のモデル化、鉄筋拘束などの内部拘束の評価方法、定着部などの局部応力の評価、段階施工のモデル化ならびにクリープの評価などに対する検証が必要であり、これらの中には本解析手法による評価が困難なものもある。今後はこれらを個別に検討し、PC道路橋の設計手法に対する本解析手法の適用性について検証を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) コンクリート道路橋設計便覧, (社)日本道路協会, 1994. 2.
- 2) 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, (社)日本道路協会, 2012. 4.
- 3) たとえば, 玉越隆史, 白戸真大, 横井芳輝, 水口知樹: 鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究—一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法—, 国総研資料第841号, 2015. 3.
- 4) たとえば, 西憲一郎, 稲江清継, 中川実, 黒河武晴: 第二東名高速道路 駒門高架橋(鋼上部工) 工事の設計・施工, YBHDグループ技報, No. 38, pp. 36-43, 2009. 1.
- 5) 狩野武, 原田健彦, 松沢政和, 岡田昌之, 水田崇志, 玉越隆史: PC橋の簡易解析手法に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol. 62A, pp. 166-173, 2016. 3.