

一定せん断流パネル解析をPC道路橋の設計に用いる場合の モデル化手法の提案

(株) オリエンタルコンサルタンツ ○ 原田健彦

同 上 栗山照雄

同 上 水田崇志

論文要旨

本研究では、鋼道路橋の合理的な設計手法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について、PC道路橋の設計に適用することを前提とし、既往研究では確立されていないPC鋼材、その定着部および偏向部のモデル化ならびにプレストレスの導入方法を提案した後、単純なモデルを用いて試算した。その結果、次の事柄を明らかにした：提案手法により得られた各要素の断面力から、従来の一本棒モデルによる計算応答値と同等の公称応力を得ることができた；要素ごとの断面力から得られる主応力分布は、有限要素解析と同様にせん断変形の影響を考慮した局所的な応力分布性状を示した。これらの結果は、本提案手法を用いた一定せん断流パネル解析をPC道路橋の実橋における設計計算に十分適用可能であることを示唆している。

キーワード：骨組解析、一定せん断流パネル、公称応力、PC箱桁

まえがき

PC道路橋の設計計算では、主桁全断面を一本のはりとして取り扱い、図-1に示すような平面あるいは立体骨組解析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¹⁾。一方、従来の骨組解析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した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、詳細な計算応答値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²⁾。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は困難である。そのため、例えば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、設計実務でははり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、はり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。

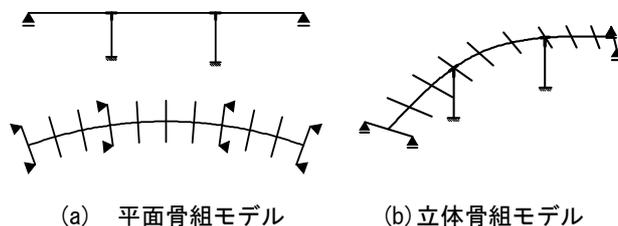


図-1 設計計算に用いるモデル

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^{3,4)}。PC橋も基本的には上床版、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な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鋼材やその定着部および偏向部のモデル化、ならびにプレストレスの導入方法をまず提案した。次に、PC道路橋(PC箱桁橋)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、本解析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PC道路橋の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。

1. 一定せん断流パネル要素を用いたPC箱桁橋のモデル化

1.1 一定せん断流パネル要素解析の概念

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はり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はり要素(以下、縁(ふち)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、従来の骨組解析に用いられるはり曲げ理論では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、せん断パネルを用いた解析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、せん断パネルを用いた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^{3,4)}。このせん断パネルを用い、上床版、下床版およびウェブなどの各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。

1.2 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。また周囲の縁部材1~4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 σ_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

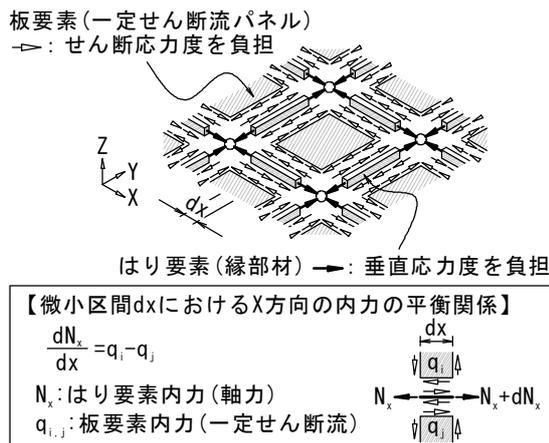


図-2 一定せん断流パネル要素の概念

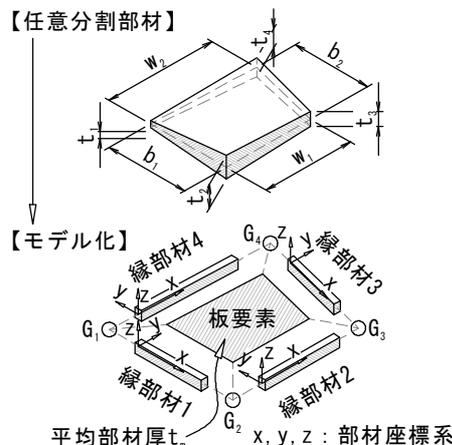


図-3 分割した床版やウェブのモデル化

表-1 せん断パネルに持たせる断面定数

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	—	$t_m(w_1 + w_2)/4$
断面2次モーメント	I_y	—	$t_m^3(b_1 + b_2)/48$
	I_z	—	$I_z \approx 0$

※表中の記号は、図-3と対応。

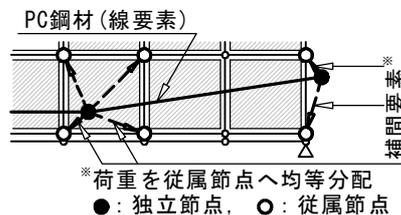


図-4 PC鋼材定着部および偏向部モデル化

る。なお、板要素のせん断変形を拘束しないように、縁部材の面内曲げ方向の断面2次モーメント I_z には小さな値を入力する(本検討では $I_z=10^9\text{m}^4$ とした)。

(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。また定着部および偏向部は、図-4に示す

ように、要素端力を周囲の従属節点に均等分配する仮要素(補間要素)を用いて近傍のせんパンネと節点共有させる。

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 α_p をそれぞれ与えて導入する。ここで、導入応力度を σ_i とすれば、 T_R は次式で表される。

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

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(= $\sigma_i A_p$) を表現できない⁵⁾。そこで本モデル化手法では、表-2に示すように、 α_p および E_p をそれぞれ調整することで、鋼材要素に導入プレストレス力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導入プレストレス力を入力する温度降下の値で調整する。

(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 $L=50\text{m}$ 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。提案したモデ

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。また解析モデルは、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分割としており、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ンネにより上部構造をモデル化した。なお、中間隔壁はせんパン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ンネを組み合わせるモデル化した。またモデルの境界条件(単純支持形式)は図-6に示すとおりである。その他は、鋼橋における研究成果³⁾を踏まえ、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。

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 α_p [$1/^\circ\text{C}$]	1.2×10^{-5} -	1.2×10^{-2} (1000)
弾性係数 E_p [MPa]	2.0×10^5 -	2.0×10^2 (0.001)
導入応力度 σ_i [MPa]	1000	1000
解析値 σ_p [MPa]	920.93	1000.05
再現率 σ_p / σ_i	0.92	1.00

※括弧内数値: 調整前/調整後
解析値 σ_p : 全鋼材平均値

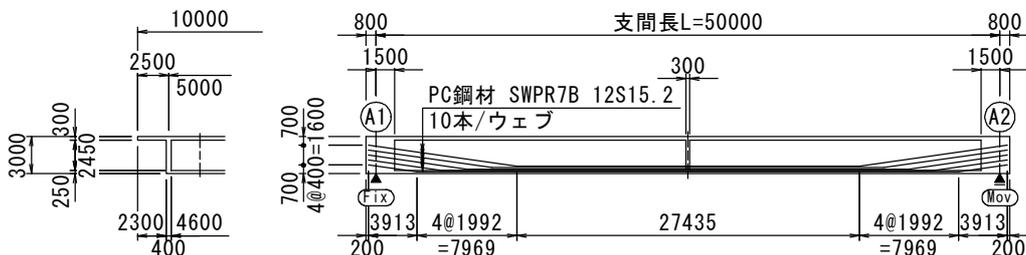


図-5 対象としたPC単純箱桁橋の断面図および側面図

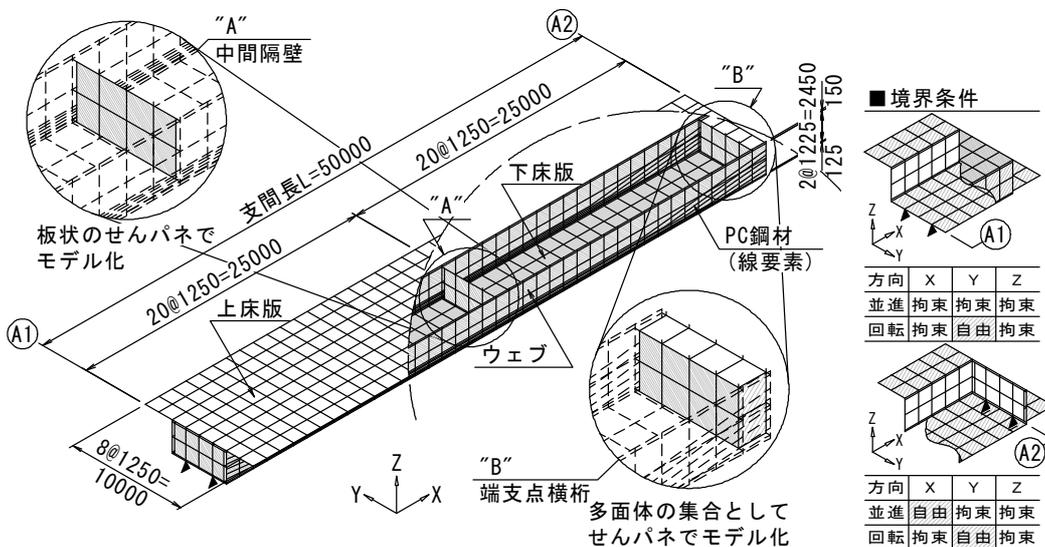


図-6 PC単純箱桁橋を対象としたせんパンネ解析モデルの例

2. せんパン解析による試算結果

2.1 公称応力の算定

既述したとおり、せんパン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、せんパン解析では、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ン解析による試算結果の代表として、プレストレス作用時 ($\sigma_p=1000$ MPa ; $T_R=-416.7^\circ\text{C}$ で全鋼材要素一定) における断面力分布を図-7 に示す。同図 (a) に示す上床版 : 橋軸方向縁部材の軸力分布では、プレストレス力による圧縮軸力と上縁引張の曲げモーメントが発生し、破線で囲んだインフレクションポイントを境に圧縮から引張へ転じている様子がわかる。

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の橋軸方向縁部材における上縁および下縁応力度 σ_U , σ_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。

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

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、せんパン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ン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ンにより直接的に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ンの板要素におけるせん断応力度 τ_{xy} を示しており、板要素の断面力 (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、プレストレス力のせん断方向成分 S_p をウェブの断面積 A_w で除した平均せん断応力度である。図に示すとおり、両者は良く一致しており、せんパン解析では図-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、せんパン解析で算出した公称応力は一本のはり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、ならびに設計実務への適用性が確保されていることを確認した。さらに、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べた利点として確認できた。

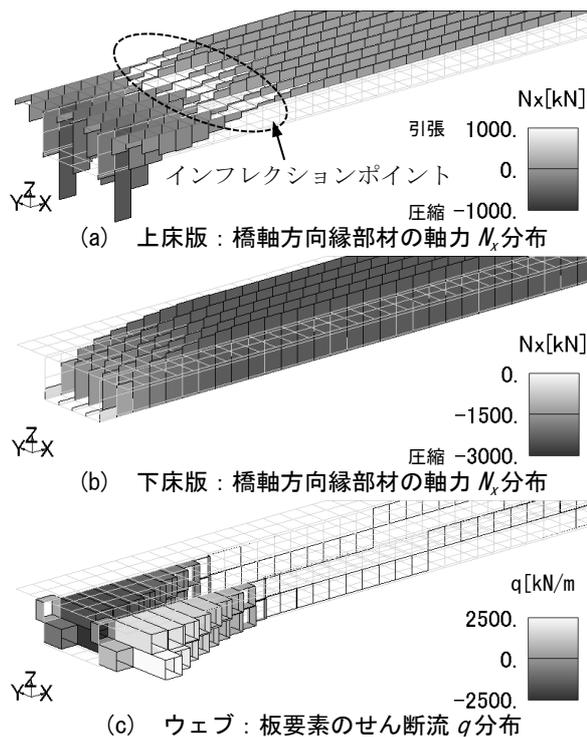
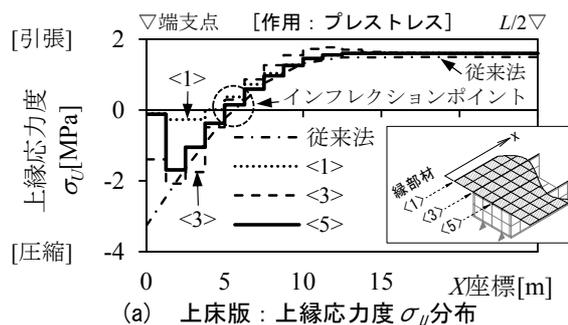
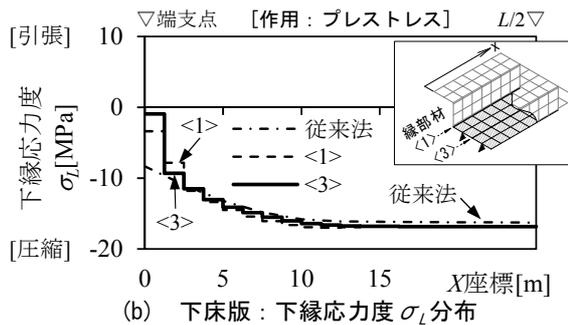


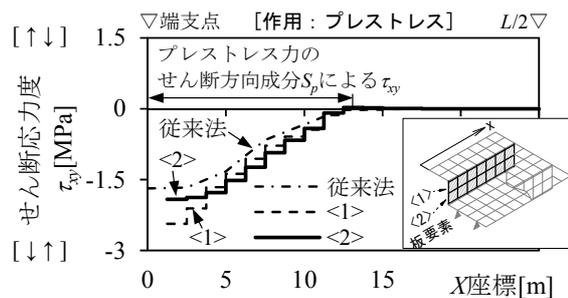
図-7 プレストレス作用時の断面力分布



(a) 上床版 : 上縁応力度 σ_U 分布



(b) 下床版 : 下縁応力度 σ_L 分布



(c) ウェブ : せん断応力度 τ_{xy} 分布

図-8 プレストレス作用時の応力度分布

2.2 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、せんパン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 σ_U および σ_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 τ_{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 σ_1 および σ_2 の大きさと向きを計算応答値としてそれぞれ得ることが可能となる。

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 σ_1 および σ_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-7(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様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 σ_U 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はり曲げ理論に対し、せんパン解析では、板要素に生じた τ_{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、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。

2.3 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 σ_1 および σ_2 分布を示したもので、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可視化できている。例えば、緊張端付近における初期ひび割れ発生の有無に対する検討にも有効的に使用できるものと考えられる。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ン要素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、せんパン解析では、要素分割を細分化することで有限要素解析と同様に局所の応力状態を評価することが可能となる。しかし、換言すれば、せんパン解析では要素分割の程度によって解析結果にばらつきを生じさせ

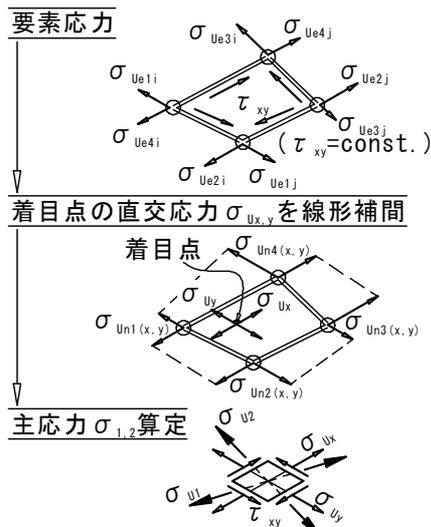


図-9 せんパン解析による主応力算定の流れ
インフレクションポイント付近

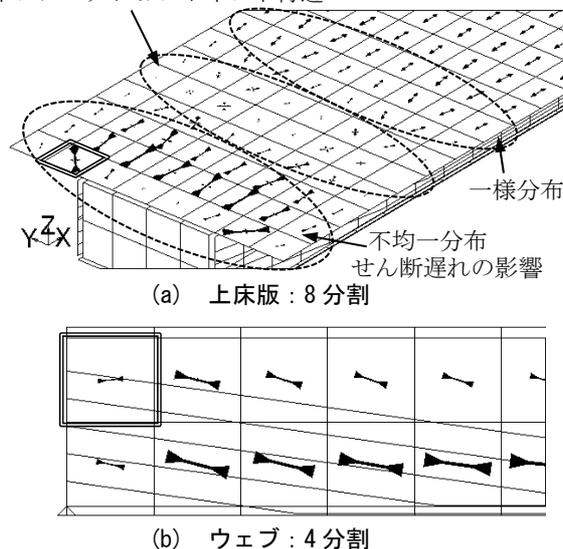


図-10 プレストレス作用時の主応力分布

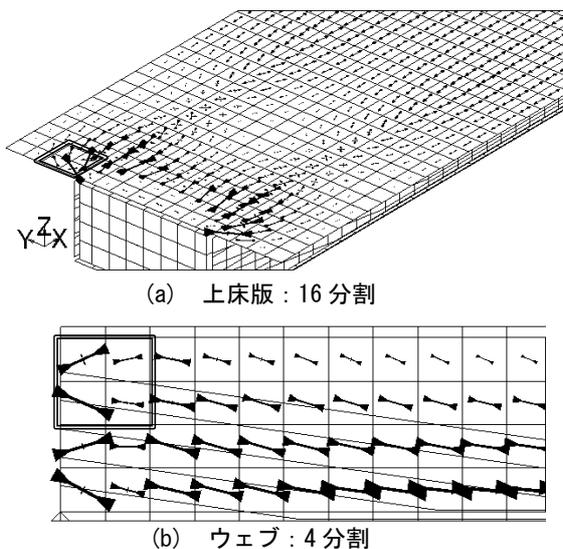


図-11 要素分割の細分化による主応力分布
(プレストレス作用時)

る可能性があるため、実務設計の解析手法として本手法を適用する場合には、従来法における有効伝達長、有効断面およびせん断遅れなどの考え方との整合性をそれぞれ確認し、モデル化の煩雑性や収束計算の速度を含めたさらなる検証が必要である。

3. まとめ

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想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モデル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部の応力状態の可視化が可能となった。また鋼材定着部周辺などの局部の応力状態は、要素分割を細分化することで評価できる可能性がある。

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部の応力状態を評価できる可能性を示唆した。ただし、例えば本提案手

法によるせんパネ解析を実橋の設計計算へ適用するにあたっては、要素分割の違いによる感度分析やモデル化手法の統一化などによりモデル化に左右されない応答値を得る必要があり、鋼道路橋ではそのような研究³⁾もされているが、PC 道路橋特有のルール作りについて検討する必要がある。

あとがき

本論文は、国土交通省 国土技術政策総合研究所より受託した「一定せん断流パネル解析によるコンクリート橋設計に関する調査業務」の成果の一部をとりまとめたものです。本論文のとりまとめを行うにあたり、同研究所 白戸真大室長をはじめ、橋梁研究室の皆様には懇切丁寧な御指導と御鞭撻を賜りました。この場を御借りして、深く感謝の意を表します。

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) 例えば, 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) 例えば, 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.