

PC道路橋の設計における一定せん断流パネル解析の適用性に関する研究

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 ○栗山 照雄  
 (株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 博(工) 原田 健彦  
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 工修 河野 晴彦  
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 博(工) 白戸 真大

Abstract: This study examines the applicability of constant shear flow panel analysis for a PC road bridge. This analysis is generally recognized as a reasonable design method for a steel road bridge. In case of designing a PC box girder used on a cable-stayed bridge, the trend of the effect of torsion was observed and the initial deformation of stress and its direction due to the difference of volume change at each construction stage reflected an actual phenomenon. Also the tensile stress at the bottom of the lower slab caused by the curvature of the PC cables were qualitatively evaluated. It was therefore shown that a constant shear flow panel element could be useful for the PC road bridge design and improve the design efficiency.

Key words: Truss analysis, Constant shear flow panel, In-plane deviation force, PC box girder

1. まえがき

PC道路橋では、コンクリートの打設から硬化、緊張力導入などの架設段階を経て最終構造系に至るまで、若材齢時の温度、クリープ・乾燥収縮、鉄筋拘束や段階施工時の材令差に伴う新旧コンクリート間で生じる外部拘束などによって、コンクリートの応力状態が変化する。そのため、図-1に示すような、初期段階のひび割れを生じさせる可能性があり、設計において架設時からの応力状態を適切に評価し、初期変状の発生リスクを可能な限り小さくすることは耐久性の信頼性向上の上では有効な手段のひとつになる。

一方で、従来からPC箱桁橋の設計に用いられている平面・立体骨組解析は、主桁全断面を一本の梁要素として取り扱う<sup>1)</sup>ため、作用を上床版、下床版およびウェブごとに直接与えることができず、施工段階ごとに生じて累積される局所の応力状態は評価できない。そのため、初期変状に対しては構造細目による仕様規定に準じた補強、あるいは複雑・特殊な構造などでは有限要素法(以下、FEMと称す)解析などによる照査を実施している。しかし、このFEM解析はモデルの要素分割や境界条件の設定に個人差があるため、計算応答値が異なる場合がある。また、FEM解析では詳細な要素応力が直接算出されるため、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基づく許容値や安全率<sup>2)</sup>を直接適用できない。

近年、鋼道路橋を対象に従来の骨組解析を主体としつつ、骨組解析では評価が困難な局所の応力状態を算出可能な一定せん断流パネル(以下、せんパネと称す)を用いた解析による合理的な設計手法が確立されつつある。せんパネは、従来設計に適用されてきた多主桁格子解析モデ

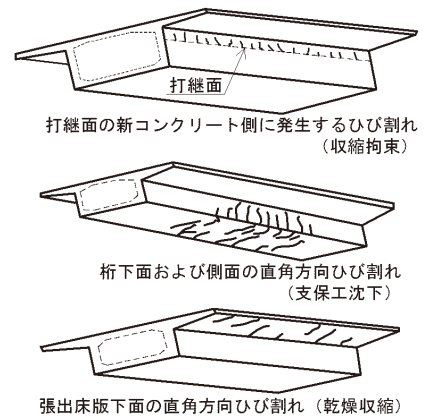


図-1 初期段階のひび割れ事例

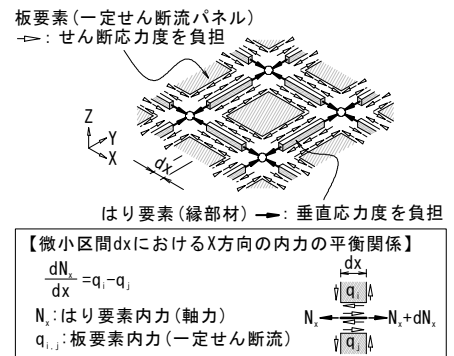


図-2 一定せん断流パネル要素の概要

ルの格子間に板要素を組み入れてモデル化したものであり、図-2に示すように、せん断変形のみには抵抗する板要素の外周に、軸力と曲げを伝達するはり要素(縁部材)を設けた要素である。本解析で得られる値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る<sup>3)</sup>。PC橋においても上記の初期変状や架設時の残留応力が評価できる手法として適用が期待されており、別途実施した検討<sup>4)</sup>によればPC鋼材やその定着部のモデル化方法およびプレストレスの表現方法を検討し、ある程度の有効性を確認した。本稿では、解析モデルの統一による合理化や架設初期段階における局部応力状態の評価を試みることで、PC道路橋の設計に対するせん断解析の適用性について検討した。具体には、まず斜角を有するPC箱桁橋について、せん断モデルによる設計の合理化が可能か検討した。次に実橋を対象に分割施工の側径間支保工部に温度降下を与えることで、段階施工時の収縮差による発生応力の評価を試みた。さらに、桁高変化を有するPC箱桁橋に対し、下床版PC鋼材配置に着目したプレストレスによる下床版腹圧力の評価も試みた。最後に得られた結果から従来の設計手法に比べて合理化あるいは高度化できる点について整理した。

## 2. 着目する変状と設計実務上の課題

PC橋は架設時に温度やクリープ・乾燥収縮、材令差などにより応力状態が刻々と変化し、設計段階で想定していない応力が累積され残留すると施工時段階で変状が顕在化する場合がある<sup>5)</sup>。ここでは、公称応力および棒解析では算出できない応力が同一モデルで求まるというせん断要素の特性を生かせる可能性、およびひび割れ防止の観点で実務における設計の課題があると考えられた以下の3項目に着目した。

### 2.1 斜角の有無による解析モデルの統一

従来設計のPC箱桁橋(単一断面)は、ねじり剛性が大きく活荷重に対する荷重分配も良好なため、図-3(a)に示すように箱桁全断面を一つの梁として断面力を算出することを基本としている。図-3(b)に示す斜角が70度未満の斜橋の場合は単一箱桁橋においても平面格子構造理論を用いて断面力を算定するとされている<sup>1)</sup>。

一方、せん断要素を用いた解析モデルは、実際の主桁形状に基づき全体をモデル化するため、斜角の有無による平面形状の違いもモデルに反映することが可能になる。また板要素(せん断要素)により箱断面形状を構成するため、従来設計の有効断面剛性( $K_t$ ,  $J_t$ )<sup>2)</sup>を設定する必要もなくなり、主桁のねじり剛性(断面積)が直接考慮されることになるため設計が合理化される。

### 2.2 材齢差に伴う打継目の変状

図-4(a)は打継付近の主桁縦方向に発生するひび割れを示したものである。この打継付近ひび割れは、ブロック施工などで打継を設けた場合に先施工側のコンクリートが硬化し、この外部拘束によりあと施工側のRC部材であるウェブ・下床版コンクリートの引張応力により生じるひび割れであり、この変状に対しては、材料的な工夫や構造細目の規定からあと施工コンクリートに用心鉄筋が配置されてきた。

### 2.3 下床版ケーブルの腹圧力に伴う変状

桁高変化を有し下床版PCケーブルを配置する場合、図-5(a)

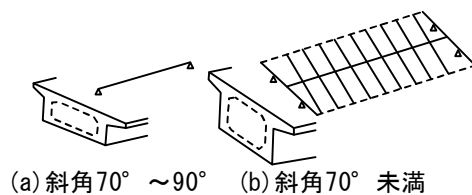


図-3 従来設計におけるPC箱桁橋の解析モデル例

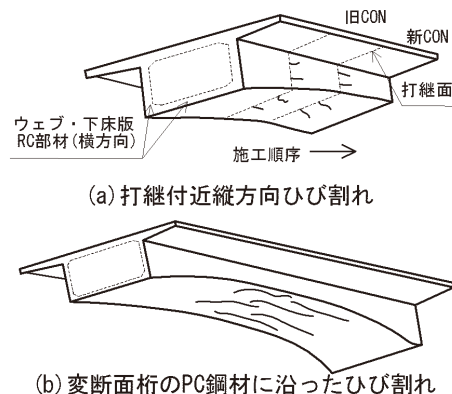
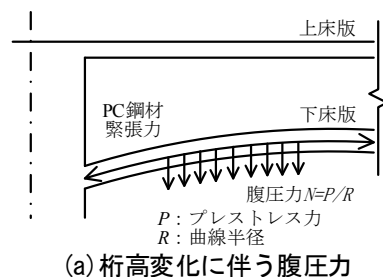


図-4 初期段階の着目変状例



(a) 桁高変化に伴う腹圧力

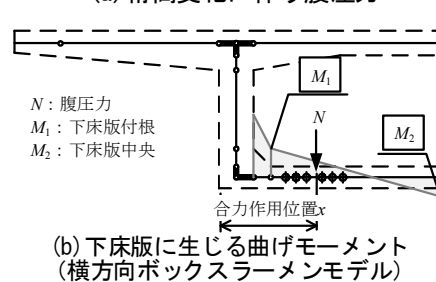


図-5 従来設計における腹圧力の評価方法

に示す腹圧力により図-4(b)のひび割れが生じる場合がある。このひび割れは図-5(a)に示す下床版の鉛直下向きに腹圧力  $N$  が作用し、曲げにより床版下面に生じるものである。従来設計<sup>2)</sup>では図-5(b)に示すように横方向ボックスラーメンモデルを用い、別途腹圧力から算出する鉛直成分を作用させて横方向の曲げモーメントを算出し、断面計算から補強鉄筋量を算出するように、照査を組み合わせ設計を行っている。なお、床版支間が大きい場合や、多室箱桁などの特殊な場合にはFEM解析を用いて対処している。

### 3. 一定せん断流パネル解析の試設計による適用性検討

#### 3.1 対象橋

対象橋は橋長 151.6m の PC 3 径間連続箱桁橋の橋梁 1 (図-6) と、実橋である橋長 142m の桁高変化を有する PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋 (図-7) の橋梁 2 とした。対象橋の諸元を表-1 に示す。

#### 3.2 解析モデル

上部工はすべてせん断要素を用い、PC鋼材は線要素、橋脚には梁要素を用い、横桁などの充実部は剛性換算した板厚を有するせん断要素により考慮している。モデル図を図-8 に、解析諸元を表-2 に示す。

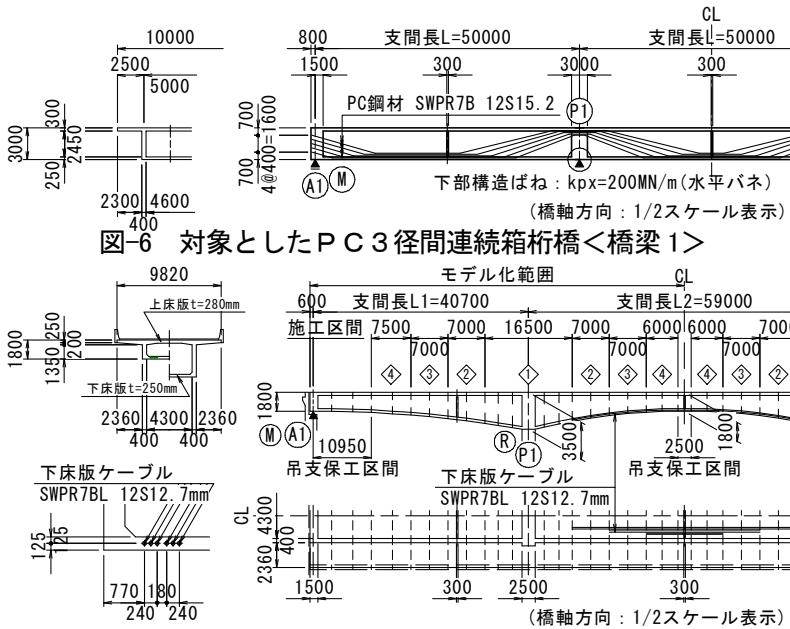


図-6 対象とした PC 3 径間連続箱桁橋<橋梁 1>

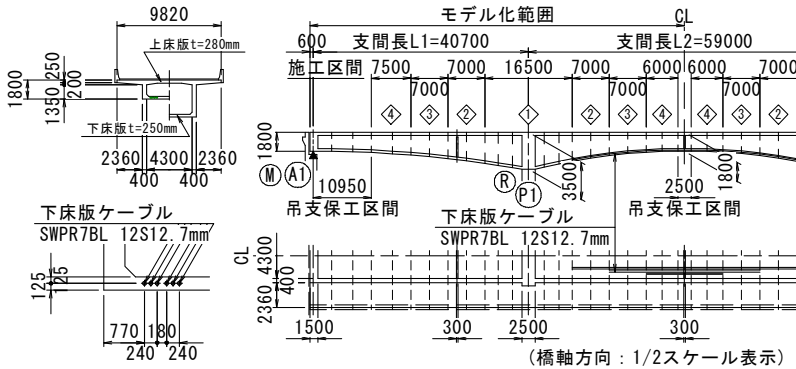
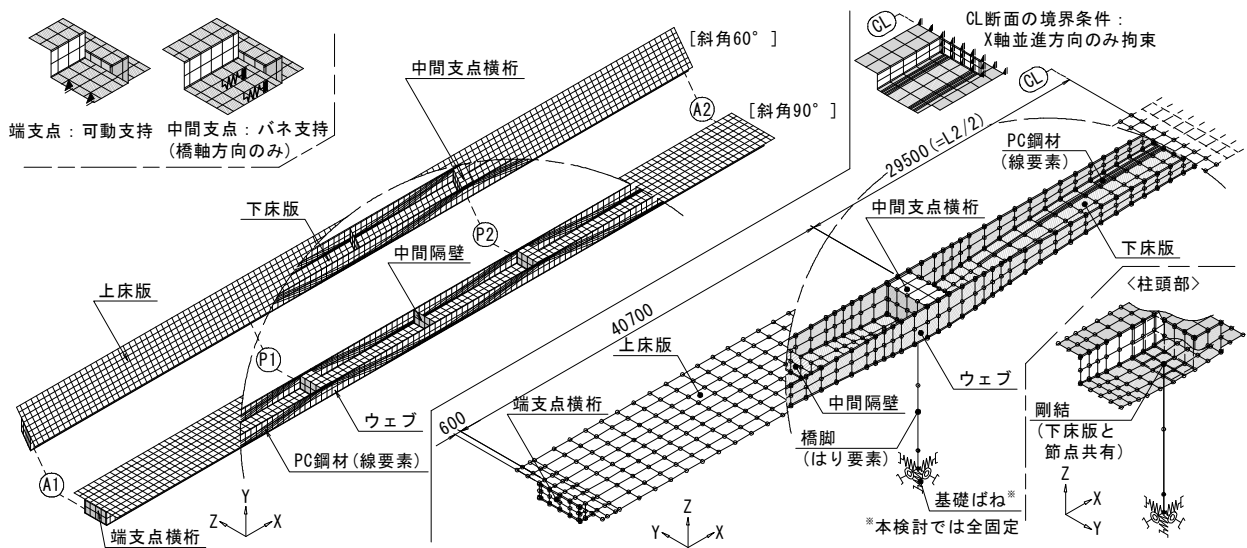


図-7 対象とした PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋<橋梁 2>

表-1 対象橋諸元

	橋梁1	橋梁2
橋種	PC3径間連続箱桁橋	PC3径間連続ラーメン箱桁橋
橋長	151.6m	142.0m
支間長	3@50m	40.7m+59.0m +40.7m
幅員	10.00m	9.82m
桁高変化	無し	有り
桁高 支点/ 支間中央	3.0m/3.0m	3.5m/1.8m
上/下 床版厚	0.30m/0.25m	0.28m/0.25m
PC鋼材	12S15.2 10本/ウェブ	12S12.7 9本/下床版
導入 応力度	1000N/mm <sup>2</sup>	1000N/mm <sup>2</sup>



(a) 橋梁1 PC3径間連続橋モデル：全橋モデル (b) 橋梁2 PC3径間連続ラーメン橋モデル：1/2モデル  
図-8 検討に使用したせん断パネル解析モデル

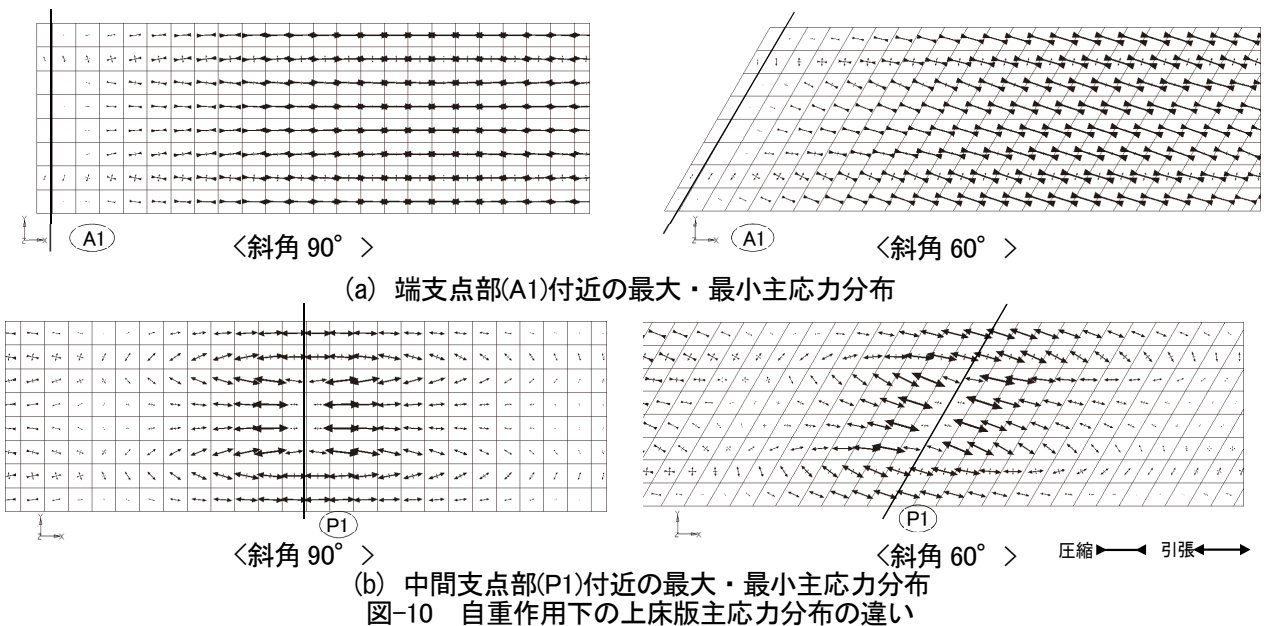
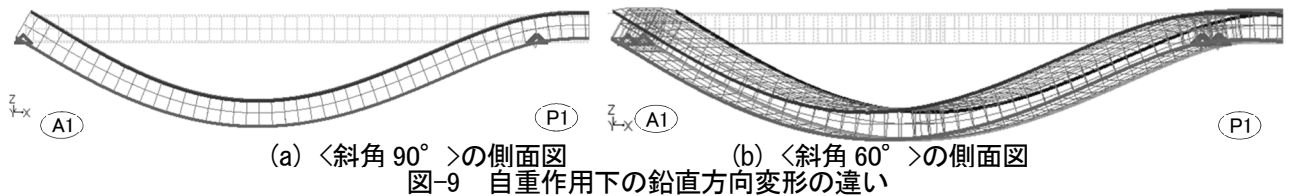
表-2 解析モデル諸元

	橋梁1	橋梁2	
支承条件	端支点:可動 中間支点:バネ	端支点:可動 中間支点:剛結	
モデル化範囲	全橋	橋軸方向1/2	
斜角	90° と60° の2ケース	90° の1ケース	
要素分割	橋軸方向	120分割 120@1.25=150.0m	49分割(桁高変化に合わせて設定)
	橋軸直角方向	張出床版2分割2@1.25=2.5m 中間床版4分割4@1.25=5.0m	張出床版2分割2@1.28=2.56m 中間床版4分割4@1.175=4.7m
	鉛直方向	ウェブ2分割 2@1.225=2.45m	ウェブ2分割 2@0.635=1.27m~2@1.485=2.97m

### 3.3 斜角の有無の影響

斜角に起因するねじりに伴う変形, 床版主応力の評価は橋梁1を用い, 斜角90度と斜角60度の2モデルについて検討した。図-9に斜角の有無による自重作用下の変形の違いを示す。図中太線は, それぞれ左右の床版端部における梁要素の変形を示している。図-9(b)に示す斜角60度の場合には左右のたわみ差を表現できており, センパネ要素を用いることで斜角に起因するねじりを考慮した設計が可能であることが分かる。

また, 同様に図-10に自重作用下の主応力ベクトル(上床版平面図)を示す。斜角60度の主応力は, 斜角の影響により主応力が鈍角方向に向く様子が捉えられており, この傾向は上床版引張が卓越する中間支点上で良く表れている。これらの結果より, センパネ解析では変形や主応力分布などに対してねじりの影響を直接的に考慮でき, 斜角の有無によらず同じモデルで設計が可能であることを示唆している。



### 3.4 打継施工による収縮差の影響

本検討では, 部材間収縮差の影響により発生するひび割れの観点から, 収縮差が生じる箇所における局所の応力状態について, センパネ要素解析により検討する。ここでは, 部材間の収縮差を温度荷重に換算し, 単位荷重として各部材に温度変化 $-20^{\circ}\text{C}$ (線膨張係数  $1.0 \times 10^{-5}$ )を与えることで表現する。本検討では, 橋梁2を対象に以下の2ケースについて検討する。

#### (1) 打継目付近の若材齢部材の影響

図-11(a)に示す側径間支保工区間の要素のみに温度降下を与えた一例として, 図-12に該当箇所の温度降下单ケース最大・最小主応力ベクトルを示す。図中丸印a, bで示すように, ハッチング部の境界部において,

若材齢の新コンクリート側（温度降下側）に、旧コンクリートである施工済みブロックの外部拘束による引張応力度が、打継面に沿って発生する様子が見てとれる。

(2) 同一断面内打継部の収縮差の影響

図-11 (b)に示す側径間支保工区間における上床版部材のみに温度降下を与えた（下図ハッチング部）。図-13 に、側径間支保工区間の温度降下单ケース最大・最小主応力ベクトルを示す。図中丸印 c, d で示すように、断面内打継部において、若材齢の新コンクリート側の上床版上下縁に、打継面に沿って引張応力が発生する様子が分かる。以上のように、せんパネ解析では打継施工による収縮差を温度荷重として与えることで、打継目付近の応力性状の評価が可能となる。本検討では、仮に $-20^{\circ}\text{C}$ の温度変化を与えたが、定量的な妥当性評価は今後の課題である。

3.5 下床版PCケーブルによる腹圧力の評価

橋梁2を用いて、下床版ケーブルを分散配置したケース(図-14 (a))を基本ケースとし、これに対し、下床版ケーブルを中央に集中配置したモデル(図-14 (b))を作成し、両モデルにプレストレス（温度荷重）を作用させた。いずれも導入応力度は $1000\text{N}/\text{mm}^2$ を仮に与えた。

せんパネ解析による結果を図-15 に示す。図-15 (a)の分散配置では下床版中央に生じる最大曲げモーメントは $6.8\text{kNm}$ であるのに対し、図-15 (b)に示す集中配置では、同曲げモーメントは $26.7\text{kNm}$ と大きくなっている。これは、せんパネ解析により桁高変化およびPC鋼材配置に合わせて腹圧力が直接的に得られることを示している。

従来設計では、腹圧力による面外力を個別に算定し、その反力をボックスラーメンモデルに作用させている。また、FEM 解析ではモデル化が簡易でなく、かつ公称応力が得られない。これに対し、せんパネ解析では桁高変化を立体的にせんパネでモデル化し、鋼材を線要素として実際の鋼材配置で表現することができるため、腹圧力の影響を同一モデルで評価でき、かつ格子解析と同様に各要素に作用する断面力から求まる公称応力で設計できることを示唆している。

なお図-15(a)は曲げモーメント分布が各断面で交互に異なる傾向を示しており、プレストレスや要素分割等のモデル化に起因するものと考えられるため、原因については今後検証する必要がある。

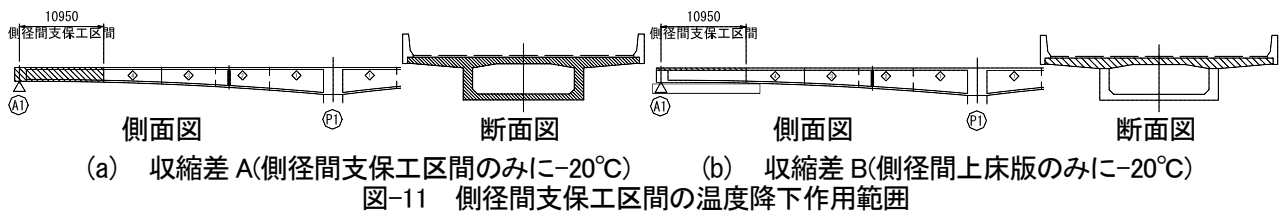


図-11 側径間支保工区間の温度降下作用範囲

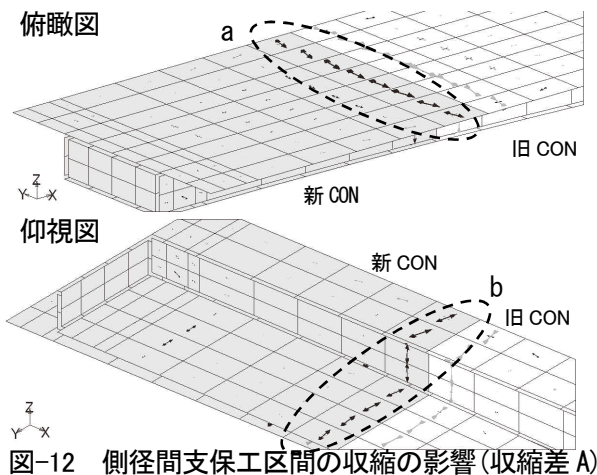


図-12 側径間支保工区間の収縮の影響(収縮差 A)

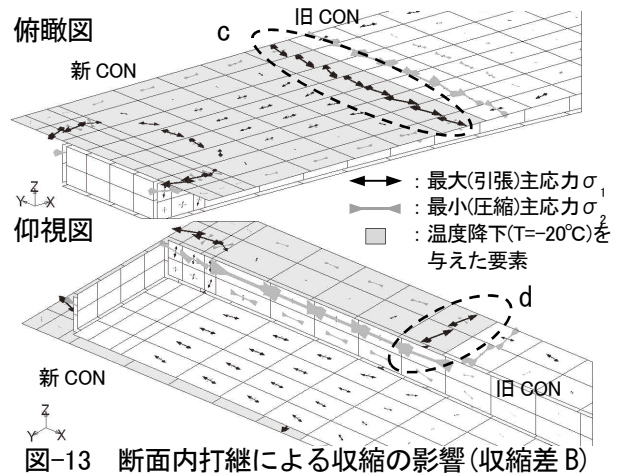


図-13 断面内打継による収縮の影響(収縮差 B)

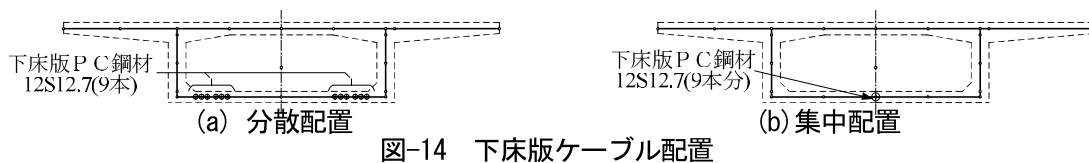


図-14 下床版ケーブル配置

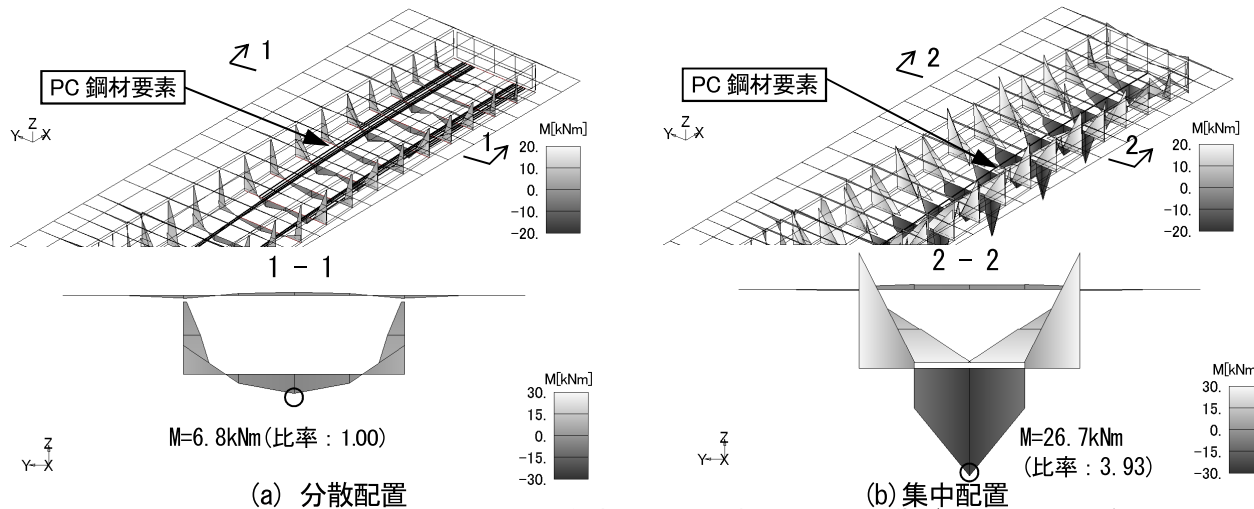


図-15 下床版支間方向に配置された縁部材 (梁要素) に生じる曲げモーメント分布

#### 4. むすび

P C道路橋へせんパネモデルを適用し、斜角の影響、打継施工による収縮差、腹圧力に着目して試設計を実施し、以下の事柄を明らかにした。

- 1) 従来設計では斜角により解析手法(梁解析, 格子解析)が使い分けられるが、せんパネ要素解析を適用する場合には、これらの使い分けが不要となり、モデルの統一化による設計の合理化が図られる。
- 2) P C箱桁橋は下床版とウェブの打設後、上床版を打設するため材齢差が生じ、この影響により上床版にひび割れが生じる場合がある。この材齢差による収縮を上床版に与えることで、上床版はウェブの外部拘束により引張応力が生じることを、本解析で表現できることが分かった。本研究では単位荷重として $-20^{\circ}\text{C}$ の温度変化を与えたが、材齢差を考慮した適切な荷重が载荷できれば、引張応力に応じた補強鉄筋を配置することが可能になると考えられる。
- 3) せんパネ要素解析を適用した場合、主方向と横方向を同一モデルで解析することが可能になる。すなわち、とくに床版などの横方向の設計において従来設計はボックスラーメンモデル単体で設計し、ウェブ厚や桁高をグルーピングしたのちに、個々に横方向の照査を行っているが、簡略化が可能となるため合理化が図られる。加えて、個々に横方向のボックスラーメンに組み合わせてきた腹圧力も同様に対応可能であり、設計の合理化が図れる可能性がある。

以上より従来設計ではそれぞれの照査を別々のモデルで実施してきた項目や、構造細目などで対処してきた項目が、せんパネ解析を適用することで、初期変状の発生リスクを可能な限り抑える可能性があり、せんパネ解析は従来設計に対して高度化できる設計手法の一つになり得ると考えられる。

#### 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) 原田健彦, 栗山照雄, 正木守, 星隈順一: 一定せん断流パネル解析を用いたP C道路橋の設計手法の提案, 第26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.
- 5) 狩野武, 原田健彦, 松沢政和, 岡田昌之, 水田崇志, 玉越隆史: P C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.