

報告 プレストレスジョイントを用いた PCa 床版の設計

小林 颯^{*1}・新名 勉^{*2}・奥石 正己^{*3}

要旨:床版取替工事における PCa 床版の橋軸方向の継手としては、ループ継手が標準的に使用されてきたが、設計及び施工上の改善の余地が認められる。著者らは急速施工が可能でかつ接合部にプレストレスを導入できるジョイント(プレストレスジョイント以下、PS ジョイントという)の技術開発を現在実施している。本報告は PS ジョイントを用いた PCa 床版(以下、PS ジョイント床版という)を対象として、部材厚さを変化させた試設計を実施し、取替対象となる既設 RC 床版への適用性を検討するとともに、FEM 解析を用いて PS ジョイント定着部近傍の安全性を確認したものである。

キーワード: PCa 床版, プレストレスジョイント, 急速施工, 楔機構, 締め付け緊張

1. はじめに

昭和 30 年代後半から昭和 40 年代に建設された高速道路は供用後 40 年以上が経過しており、一部の橋梁では各種の劣化が顕在化している。高速道路会社では、このような劣化した構造物を長期的に維持管理していくために、橋梁を対象として、大規模更新・修繕事業に取り組んでいるところである。本稿で対象とする RC 床版に関して、阪神高速道路では、昭和 48 年より前の道路橋示方書で設計され、その後、鋼板接着補強された RC 床版のうち、耐疲労性の低下が懸念される径間・パネルを事業の対象とし、耐疲労性の低下の程度に応じて、補修、補強、取替等の対策を予定している。

このうち、取替(床版の更新)に関するニーズとしては、(1)既設床版と同等以下の重量で、橋梁下部構造及び基礎に影響を与えない軽量構造、(2)更新時の通行止めによる社会的影響、騒音等の環境負荷を抑制できる、急速かつ確実性の高い施工方法、(3)更新した床版における高い耐久性の確保、などが挙げられる。

これらのニーズに対応した一方策として、プレキャスト PC 床版(以下、PCa 床版という)の橋軸方向の接合構造に着目した。現状では、橋軸方向の接合構造は、ループ継手を用いた場所打ちの RC 構造とし、間詰めコンクリートは、乾燥収縮等によるひび割れの抑制に配慮し、膨張コンクリートの充填を標準としている¹⁾。しかしながら、この場合、(1)ループ継手部の鉄筋配置により床版厚が決定し、更新の対象とする既設床版と比較して床版厚が大きくなる、(2)ループ継手部の配筋、間詰めコンクリート打設・養生など、一定の現場作業を必要とする、(3)場所打ち RC 構造部における長期的な耐久性の懸念など、設計および施工の面で改善の余地が認められる。著者らは、これらの改善点

に対応すべく、PCa 床版の橋軸方向の接合部に適用できる継手構造の開発を進めており、本稿ではその設計検討について報告する。

2. 構造概要

現在、開発中の PS ジョイントはシールドセグメントのリング間継手(長手方向継手)として使用されているピン挿入型継手の技術を PCa 床版に適用させて、急速施工、高性能化、環境負荷の低減を目指すものである。PS ジョイントは、施工時にオスボルトをメスケース内の皿バネに押し付けられた楔型のコマに押込むことでボルトをワンタッチで接合させる仕組みで、接合後はコマとフタの楔機構により引抜力を伝達する機械式継手である(図-1, 2 参照)。なお、PS ジョイントの引抜き特性や押し込み特性などの基本的な力学特性は実験で確認している。

PS ジョイント床版(図-3 参照)は、a) PCa 床版の接合面に PS ジョイントを埋込み、床版同士を押し込むことで一体化を図ることにより、PC 床版の薄厚化(軽量化)及び急速施工が可能となる、b)オスボルトを PE シースで被覆しプレグラウト樹脂を注入しておくことで必要な可動域を設けることにより施工誤差を吸収できるとともにグラウト作業が不要となる、c)接合部にプレストレスを導入することにより継手部の耐久性が

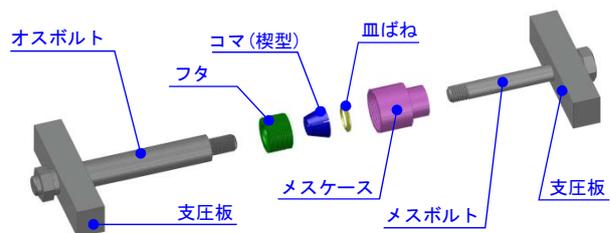
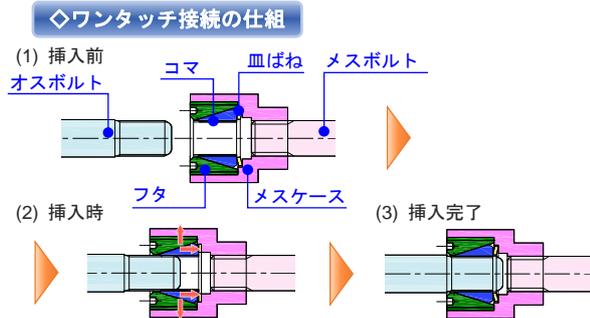


図-1 PS ジョイント図

*1 清水建設(株) 土木技術本部橋梁統括部 工修(正会員)

*2 阪神高速道路(株) 技術部 技術推進室 工修(正会員)

*3 清水建設(株) 土木技術本部開発機械部 工博



ピン挿入に伴い、コマが
拡がりながら挿入方向に下がる

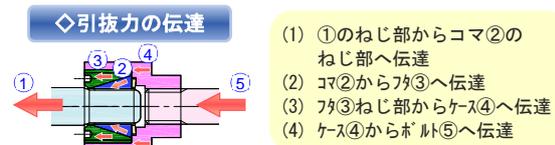


図-2 PS ジョイント接合機構

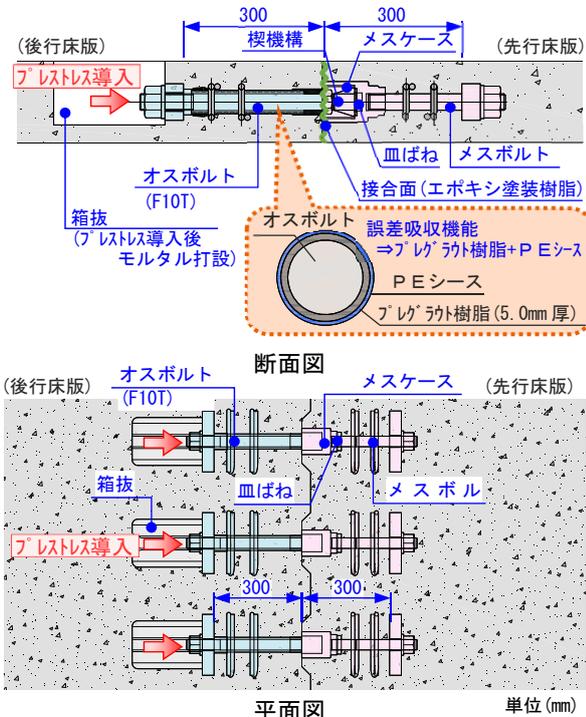
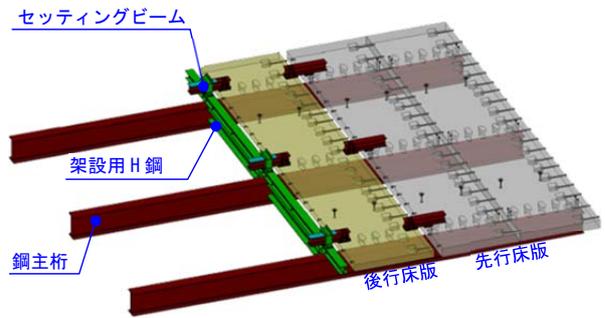


図-3 PS ジョイント床概要図

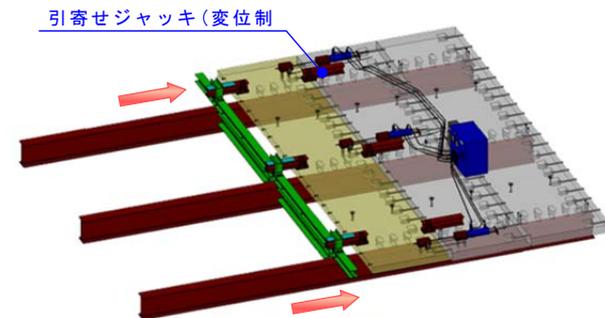
向上する等の特徴を有する。

図-4にPSジョイント床版の施工順序を示す。先行架設した床版を鋼主桁に固定し、後行架設する床版にセッティングビームを設置し、変位制御機構を有するジャッキを用いて引寄せ、PSジョイントのオスボルトとメスボルトを楔機構で接合する。各ボルトの接合は床版の隙間を計測することにより確認する。その後、PSジョイントに電動トルクレンチを用いてプレストレスを導入し、これらの施工を繰り返すことでPCa床版を一体化する。最後に鋼主桁と一体化したPCa床版を結合し、プレストレス導入用の箱抜部を後埋めする。

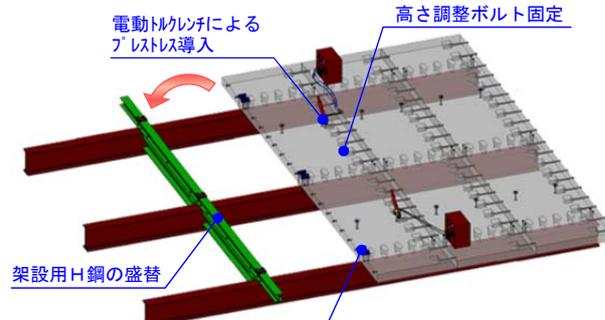
PSジョイント床版は(1)ループ継手の代替による床



(1) PS ジョイント床版の架設



(2) 引寄せ・接合



(3) プレストレス導入

図-4 PS ジョイント床版の施工順序

厚の縮小、(2)場所打ちRC構造部の解消、(3)接合部にプレストレスを導入することによる長期的耐久性の向上を目指した構造である。

3. PS ジョイントを用いた床版の比較設計

3.1 概要

PSジョイント床版を対象として、その厚さを変化させた比較設計を実施し、取替対象となる既設RC床版への適用性を検討するとともに供用状態及び終局状態の照査を行った。さらに、PSジョイント定着部近傍のFEM解析を実施し、定着部の安全性を確認した。

3.2 比較設計の対象橋梁

PSジョイント床版の比較設計は、床版取替の対象となる設計年次の古い既設橋梁に対して実施した。床版厚170mm及び同180mmの既設橋梁と、主桁支間4mと仮定した道路橋示方書に適用した橋梁(床版厚210mm)を対象とし、PSジョイントの適用可能性を検討した。

3.3 PS ジョイント床版の比較設計フロー

図-5 に PS ジョイント床版の設計フローを示す。PCa 床版の接合部において設計荷重時にフルプレストレス、終局荷重時に引張応力度制限値以下となるように、PS ジョイントの仕様および配置を定めた。

3.4 比較設計結果

事前の検討より、PS ジョイントの配置ピッチ、断面内の配置高さ、メスケースの直径、かぶり厚さ(30mm)、箱抜形状などを考慮すると適用できる床版厚は170mm 以上と想定される。表-1 に PS ジョイント床版の比較設計結果を示す。既設 RC 床版では接合面の PS ジョイントの配置(ボルト径、ピッチ)、工場製作性等の面で優位であること、取替えの対応となり得る保有ストック数が多いことを踏まえて、詳細検討における床版厚は 180mm を選定した。さらに、コンクリートの設計基準強度は、従来より薄い部材であり、動輪荷重による押抜きせん断破壊及びプレストレスによる支圧力の双方に対する抵抗性を確保するために、一般的な 50N/mm² から 70 N/mm² へ変更した。

4. PS ジョイントの導入力検討

PS ジョイントはトルクによりプレストレスを導入できる緊張材として設計を行った。使用した緊張材の材質は F10T である。設計においては PS ジョイントの導入力は、道路橋示方書Ⅱの F10T の引張接合用高力ボルトの許容値²⁾を満足するとともに、PS ジョイントを PC 鋼材と見立てて道路橋示方書Ⅲの許容応力度³⁾

も満足するように設定した。PS ジョイントの配置間隔は、PCa 床版の接合部において設計荷重時にフルプレストレスとなるように定めた。今回の設計では、クリープ・乾燥収縮、弾性変形を考慮し、リラクセーションは 10% と安全側に仮定して、設計荷重時の導入力を算定した。その結果、初期導入力を $\sigma_{pi}=690\text{N/mm}^2$ とし、設計荷重時では $\sigma_e=525\text{N/mm}^2$ とした。なお、今後の実設計ではクリープおよび乾燥収縮を考慮するとともに、リラクセーション値は試験結果を反映して定める予定である。

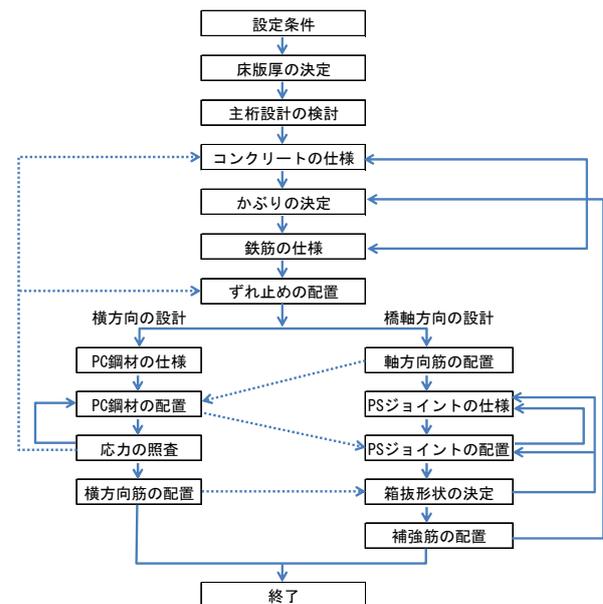


図-5 比較設計フロー

表-1 比較設計結果

床版厚	170mm	180mm	210mm
対象橋梁	既設橋を参考に主桁スパンL=3.1mを想定	既設橋を参考に主桁スパンL=3.4mを想定	主桁スパンL=4mを想定
断面図 (単位:mm)			
平面図 (単位:mm)			
道路橋示方書の適用	×	×	○
コンクリート設計基準強度	70N/mm ²	70N/mm ²	50N/mm ²
PSジョイントボルト径	M30	M36	M36
PSジョイントピッチ	@240mm	@350mm	@500mm
箱抜形状	△(箱抜部下面に横筋が配置できない)	△(箱抜部下面に横筋が配置できない)	△(箱抜部下面に横筋が配置できない)
補強方法	△(狭隙であり補強筋配置余裕が少ない)	△(狭隙であり補強筋配置余裕が少ない)	○
構造妥当性	△(図心配置となる)	△(図心配置となる)	○(偏心が確保できる)
設計成立性	△(耐荷試験・解析により確認)	△(耐荷試験・解析により確認)	○(同程度の実績あり)
長期耐久性	△(動輪荷重試験等により性能確認)	△(動輪荷重試験等により性能確認)	○(床版厚は道路橋示方書に準拠)
経済性(PSジョイント数に着目)	△	○	◎
施工性	△(押込み力大)	○(押込み実験で確認)	◎(押込みしやすい)
工場製作性	×	△(床版厚が薄く製作に手間が掛る)	○
誤差吸収	△(PSジョイント、配筋に余裕がない)	△(PSジョイント、配筋に余裕がない)	○
床版更新適用性 (保有ストックに着目)	△	○	△
コメント	<ul style="list-style-type: none"> PSジョイントピッチが密となり、施工性、経済性が劣る。 PSジョイントピッチを広げるには、かぶりの縮小や特殊鉄筋の使用、鋼繊維コンクリートを検討等、追加で種々の検討が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 床版厚が薄いため、PSジョイント定着部や、箱抜部の検討が必要である。 既設のRC床版径間数が多いため、詳細検討する床版厚には、最適であると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> H24道路橋示方書に準拠した床版厚であり、長期耐久性、施工性とも優位である。 部材に余裕があるため、問題なく補強できる。 PSジョイントの支圧板、箱抜部の検討は必要である。

5. PS ジョイント箱抜部の検討

PS ジョイントは接合後に油圧トルクレンチでナットを締め付け、プレストレスを導入する。そのため床版には締付け用の箱抜を設ける必要がある。図-6 に PS ジョイント(M36)を対象とした床版厚 180mm における箱抜形状を示す。汎用の油圧トルクレンチの長さ及びソケットの大きさを考慮して、箱抜きは、断面方向 125~165mm、橋軸方向 240mm を最小寸法とした。

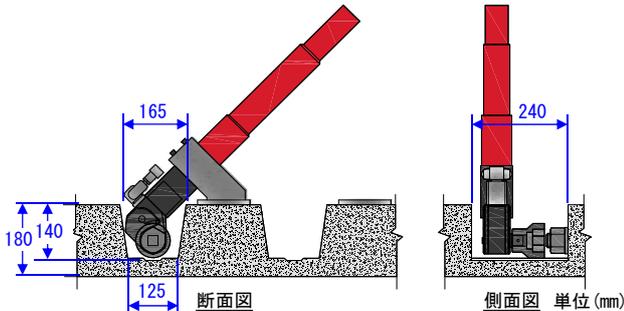


図-6 箱抜形状

6. PS ジョイントの支圧力に対する検討

検討対象とした橋梁のRC床版厚さは180mmであり、道路橋示方書に示されたスパン4.0mのPC床版の最小版厚である210mmより薄くなっているため、PSジョイントのプレストレス導入に伴う支圧力に対して補強法を検討する必要がある。そこで日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工基準⁴⁾に従い、補強筋の検討を行った。表-2にPSジョイントボルトの支圧プレート、補強筋の検討結果を示す。表中に示すように既往のPC定着工法では、設計基準強度50N/mm²、スラブ厚180mmの条件では性能未達となっているため、対象橋梁にPSジョイントを配置した場合には補強鉄筋が増加し配置困難と判断した。そこで、設計基準強度70N/mm²に変更し、支圧プレートを80mm×210mm×40mm、フープ鉄筋80mm×210mmをD13、2段配置に変更した。この補強方法に関しては、FEM解析にて応力照査を行うとともに、別途実物大の確認実験を実施することにより性能を確認した。図-7、8にPSジョイント定着部の平面図及び断面図を示す。

表-2 支圧プレート、補強筋の検討結果

工法	床版厚 mm	設計基準強度 N/mm ²	鋼材径 mm	支圧プレート			補強筋		性能
				短辺	長辺	厚さ	配置補強筋量	補強量の計算結果	
PS ジョイント	170	70	M30	70	170	32	フープ鉄筋D13 2段	D13mm×3本	-
	170	70	M33	75	186	36	フープ鉄筋D13 3段	D13mm×5本	-
	180	70	M36	80	210	40	フープ鉄筋D13 2段	D13mm×4本	-
	170	50	M30	70	170	32	フープ鉄筋D13 2段	D13mm×4本	-
	170	50	M33	75	186	36	フープ鉄筋D13 2段	D13mm×4本	-
	180	50	M36	80	210	40	フープ鉄筋D13 3段	D13mm×5本	-
定着P 工法	250	27	28.6	125	220	36	グリッド筋φ9+D10	φ9mm×12本	OK
	220	35	28.6	120	210	36	グリッド筋φ9+D10	φ9mm×11本	OK
	210	40	28.6	110	195	36	グリッド筋φ9+D10	φ9mm×11本	OK
工法	180	50	28.6	100	180	36	グリッド筋φ9+D10	φ9mm×9本	未達

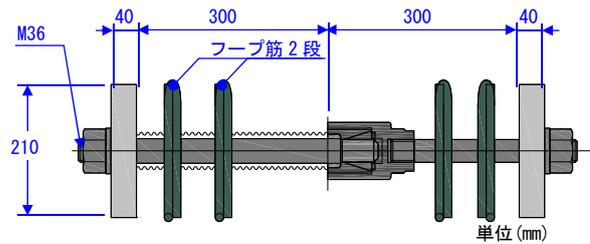


図-7 PS ジョイント (M36) 定着部平面図

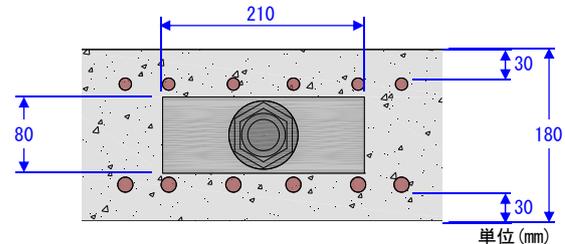


図-8 PS ジョイント (M36) 定着部断面図

7. PS ジョイント床版の3次元 FEM 解析

検討対象とした橋梁のPCa床版厚さは180mmと薄いため、PSジョイント導入力による局所応力について慎重な検討が必要である。現在、施工されているPCa床版では180mm厚さの施工事例がないこと、さらに、PCa床版の継目部にはPSジョイントを定着する箱抜が必要であることから、応力の発生は3次元であり、3次元解析や実験による検討が不可欠となる。そこで、ソリッドモデルによる線形3次元FEM解析を実施し、局所に発生するPSジョイントによる付加応力を把握した。表-3に解析条件、図-9にFEM解析モデル図を示す。PCa床版にPSジョイントを3本配置し、締付け用箱抜を施し、PSジョイント導入力を作用させた。

図-10~図-16にFEM解析結果を示す。図-11、12に示すように橋軸方向にはPSジョイントの導入力により接合部に圧縮応力が発生している。また、図-10、14、15に示すようにPSジョイントの定着力により箱抜部の底面および隅角部に局所的に大きな引張応力が発生することが判明した。さらに、図-13に示すようにPSジョイントの支圧板前面には支圧力による橋軸直角方向の引張応力が発生することを確認した。これらの局所的な引張応力に対しては、FEM解析による引張応力を集計した引張力に対して、鉄筋応力度が100N/mm²程度になるように補強筋を配置した。

表-3 FEM 解析条件

モデル条件	PSジョイント床版の接合部の切り出しを想定
モデル寸法	W=1500mm, L=2000mm, t=180mm
座標系	X:橋軸方向, Y:橋軸直角方向, Z:鉛直方向
境界条件	橋軸面:自由、橋軸直角面:対象
固定条件	橋軸中心境界:Y, Z, θy, θz固定 橋軸直角中心境界:X, θx固定
荷重条件	プレストレス (σpi=700N/mm ²)
ヤング係数	コンクリート:37000N/mm ² PSジョイント, 支圧板:200000N/mm ²
その他	PSジョイントとコンクリートの付着なし シースをモデル化
解析ソフト	ABAQUS (R2016)

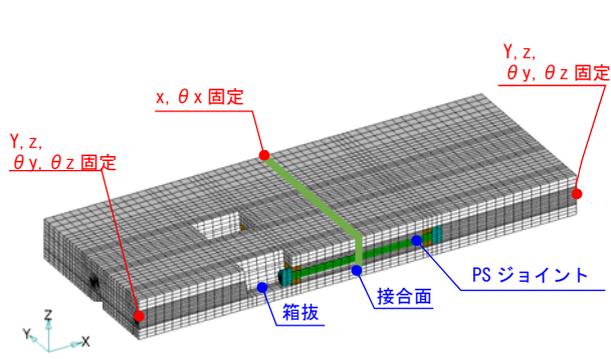


図-9 FEM 解析モデル鳥瞰図

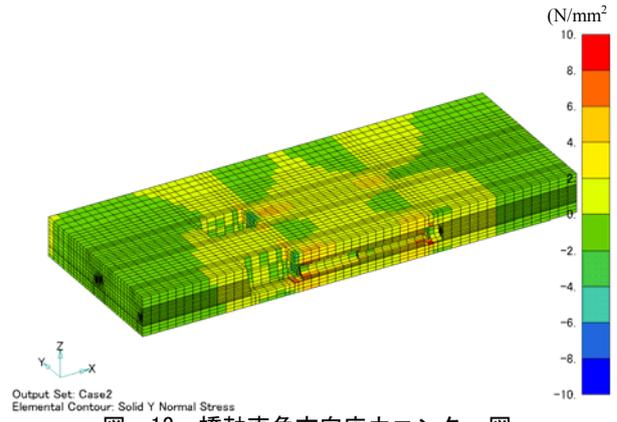


図-13 橋軸直角方向応力コンター図

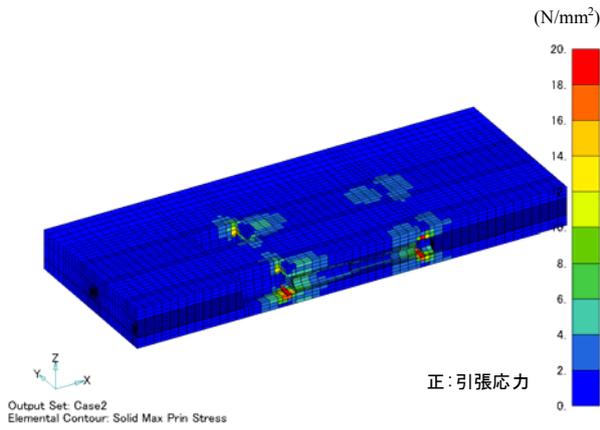


図-10 最大主応力コンター図

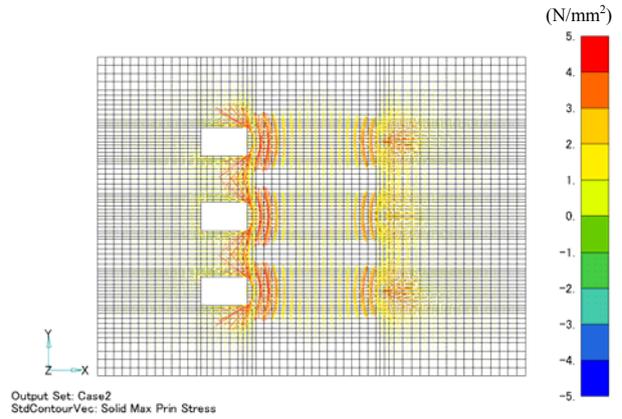


図-14 主応力ベクトル図(上面)

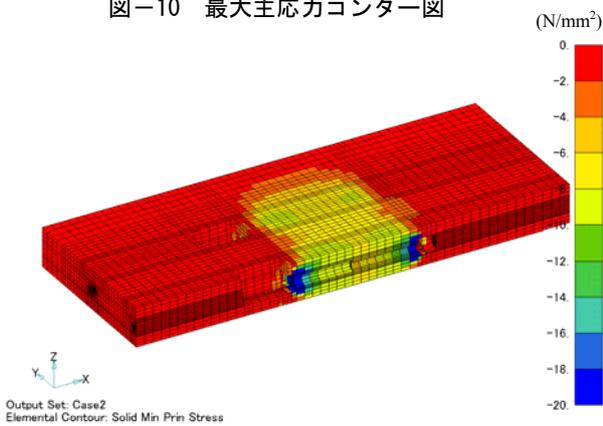


図-11 最小主応力コンター図

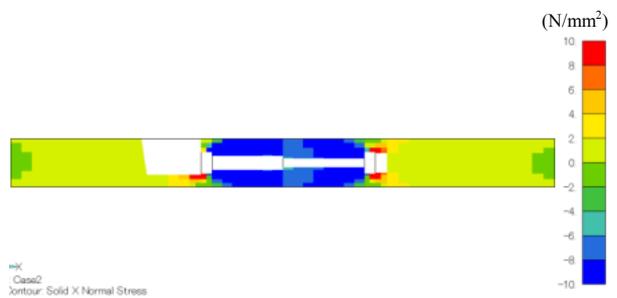


図-15 橋軸方向応力コンター図
(PS ジョイント中心側断面)

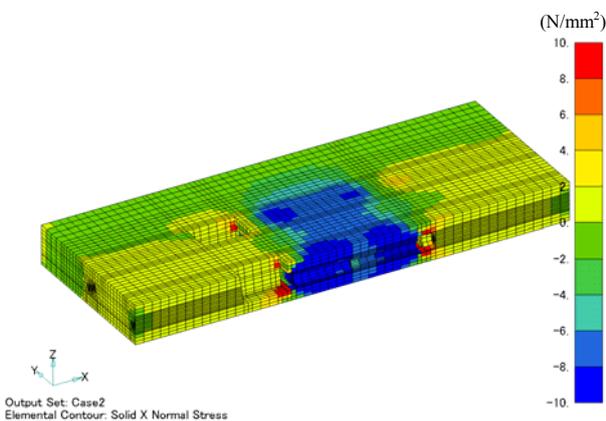


図-12 橋軸方向応力コンター図

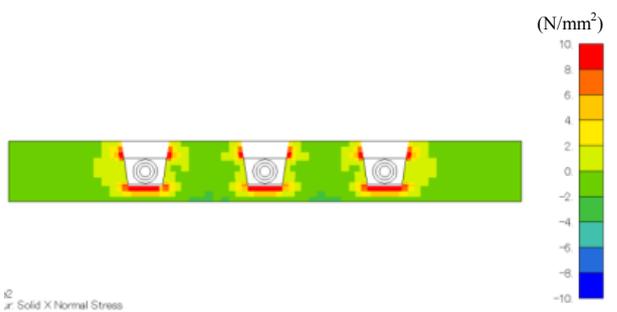


図-16 橋軸方向応力コンター図
(PS ジョイント箱抜部断面)

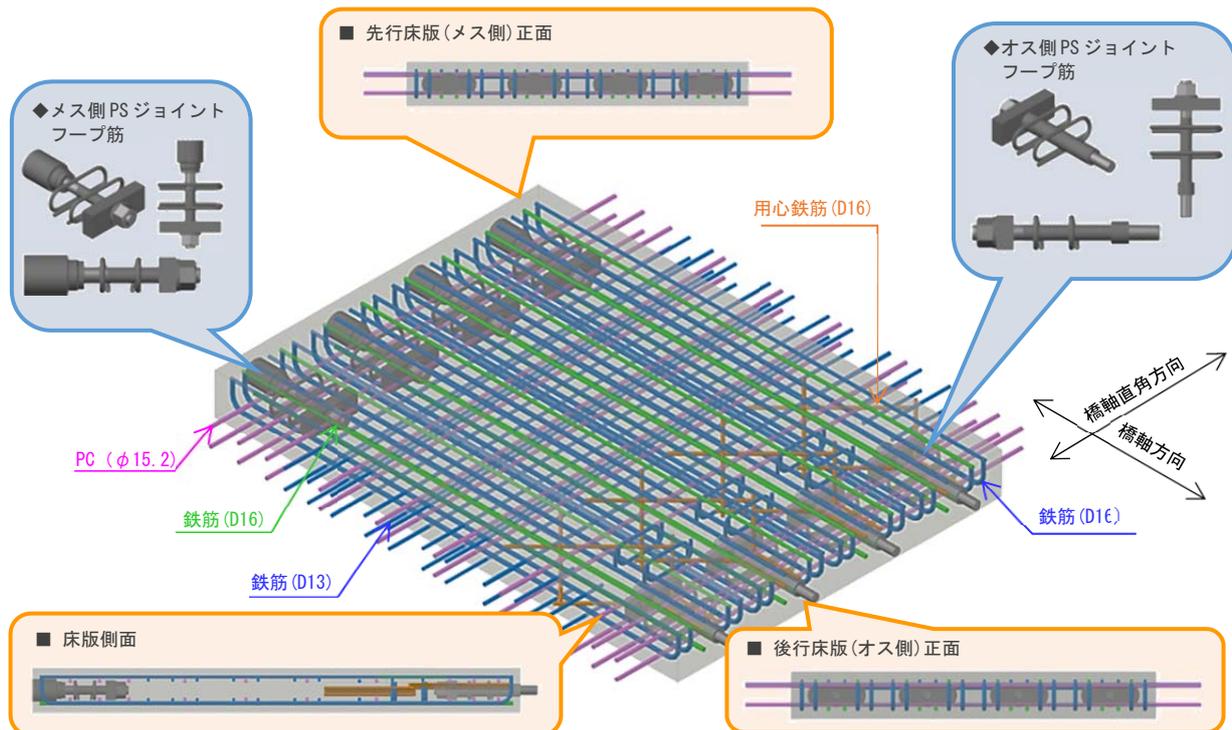


図-17 補強筋鳥瞰図

図-17に補強筋の鳥瞰図を示す。支圧板の前面にはD13のフープ鉄筋を2段に配置している。さらに、箱抜部の周面の引張応力に対しては、橋軸方向鉄筋を追加するとともに、斜め鉄筋を用心鉄筋として追加した。

8. まとめ

PS ジョイントを用いた床版の比較設計において得られた知見を以下に示す。

- (1) PS ジョイントボルトの配置ピッチ，断面内の配置高さ，PS ジョイントボルトのメスケースの直径，かぶり厚さ(30mm)，箱抜形状などを考慮すると適用できる床版厚は170mmと想定される。既設RC床版では接合面のPS ジョイントの配置(ボルト径，ピッチ)，工場製作性等の面で優位であると，取替えの対応となり得る保有ストック数が多いことを踏まえて，詳細検討における床版厚は180mmを選定した。
- (2) 設計におけるPS ジョイントの導入力は，道路橋示方書ⅡのF10Tの引張接合用高力ボルトの許容値と，PS ジョイントをPC鋼材と見立てて道路橋示方書の許容応力度も満足するように設定した。
- (3) 支圧力に対する検討において，コンクリートの設計基準強度 $50\text{N}/\text{mm}^2$ ，床版厚180mmのPCa床版にPS ジョイントを配置した場合には補強鉄筋が増加し配置困難であることを確認した。これについて，コンクリートの設計基準強度 $70\text{N}/\text{mm}^2$ とし，支圧板を $80 \times 210 \times 40\text{mm}$ ，フープ鉄筋を配置する

ことで対応が可能となることを確認した。

- (4) FEM解析の結果，PS ジョイントボルトの導入力により接合部に圧縮応力が発生するとともに，箱抜部の底面および隅角部に局所的に大きな引張応力が発生し，さらに，PS ジョイント支圧板前面には支圧力による引張応力が発生することが判明した。これについては，ひび割れを防止するための補強鉄筋(鉄筋応力度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度)を配置することで対応が可能であることを確認した。

本稿は，阪神高速道路(株)，清水建設(株)，ユニタイト(株)，住友電工スチールワイヤー(株)，昭和コンクリート工業(株)による共同研究の一部成果の報告である。本共同研究の遂行に対し，ご指導頂いた関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 東日本高速道路・中日本高速道路・西日本高速道路：設計要領 第二集 橋梁保全編，PP.4-23，2015.7
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 PP.149-154，PP.232-236，PP.488-493，2012.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編 P.133，2012.3
- 4) 日本建築学会：プレストレスコンクリート設計施工基準・同解説，PP.209-224，1987