

# プレキャスト PC 床版を用いた床版取替工事 — 複雑な線形・形状を有する「綱木川橋」への適用 —

## Replacement of Existing RC Slab with Precast Prestressed Concrete Slab

池 上 浩太朗 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部 課長  
 吉 原 直 樹 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 工務部  
 井 野 耕 志 株式会社 IHI インフラ建設 PC 事業部 PC 技術部

「綱木川橋」は東北自動車道仙台宮城インターチェンジ～泉インターチェンジに位置する鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋であり、1975 年の開通から 37 年が経過していた。今回の改良工事の対象である鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、経年劣化や大型車両の増加に加え、冬季の凍結防止剤の散布の影響で塩害劣化の進行が著しい状況にあった。そこで、抜本的な老朽対策として RC 床版取替を行うことになった。本稿では、綱木川橋床版補強工事の詳細設計および施工における課題とその対策について報告する。

The “Tsunakigawa Bridge,” which is a steel 2-span continuous plate-girder bridge located between the Sendai-Miyagi Interchange and the Izumi Interchange on the Tohoku Expressway, opened to traffic 37 years ago in 1975. The existing Reinforced Concrete (RC) slab had deteriorated significantly due to the effects of dispersing cryoprotectant during winter and the increased volume of large vehicles. Consequently, the existing RC slab was replaced with a precast prestressed concrete slab as an extreme measure to protect against further deterioration. This report describes the design and construction work in detail.

### 1. 結 言

「綱木川橋」は東北自動車道仙台宮城インターチェンジ～泉インターチェンジに位置する鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋であり、1975 年の開通から 37 年が経過している。今回の改良工事の対象である鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、経年劣化や大型車両の増加に加え、冬季の凍結防止剤の散布の影響で塩害劣化の進行が著しい状況にあった。これまでに、RC 床版の上面増厚（1998 年）や舗装の部分補修によって維持が行われてきた。しかし、近年その補修頻度が多くなってきたことから、抜本的な老朽対策として RC 床版取替を行うことになった。

本工事の実施に当たっては、上下線分離構造であることから、反対車線を対面交通規制しながらの RC 床版取替を実施した。また、本橋は近くにインターチェンジがあるため、追越車線のほか、加速・減速車線を有しており、斜角が小さく複雑な線形に対応できる取替用プレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、PCa 床版）の形状を合理的に設定することが設計上の課題であった。

本稿では、綱木川橋床版補強工事の詳細設計および施工における課題とその対策について報告する。

### 2. 工事概要および RC 床版劣化状況

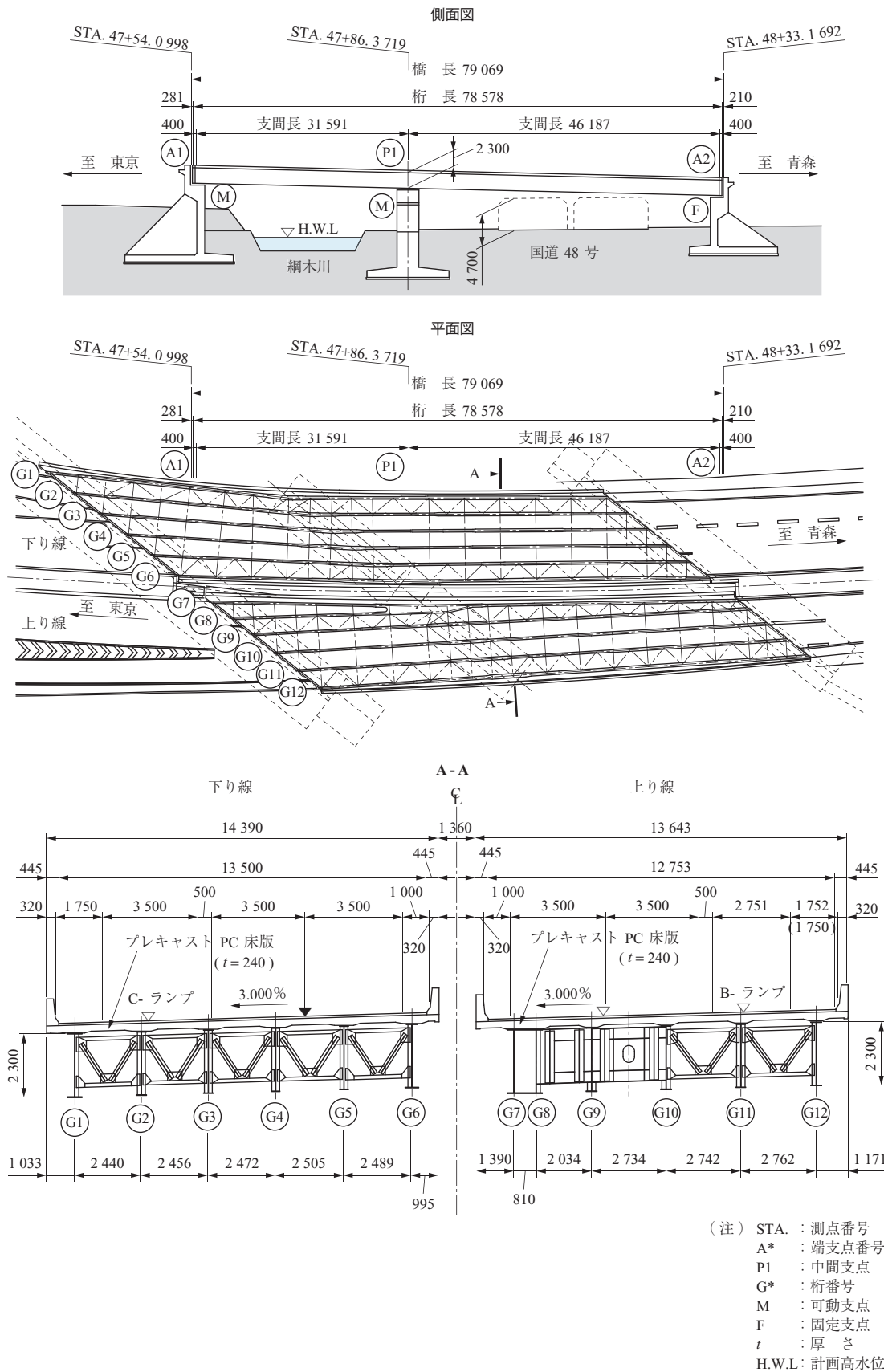
#### 2.1 工事概要

「綱木川橋」の全体一般図を第 1 図に、本工事の概要および橋梁諸元を次に示す。

工事名	東北自動車道綱木川橋床版補強工事
発注者	東日本高速道路株式会社 東北支社
橋長	79.069 m
有効幅員	上り線 10.530 ～ 22.688 m 下り線 13.500 ～ 27.475 m
斜角	A1 支承線上 36° 11' 01" P1 支承線上 37° 59' 37" A2 支承線上 40° 38' 24"
構造形式	鋼 2 径間連続非合成鉄桁橋
工期	自 2012 年 8 月 22 日 至 2014 年 4 月 13 日

#### 2.2 RC 床版劣化状況

本橋の RC 床版劣化状況の一例を第 2 図および第 3 図に示す。第 2 図は上面増厚部と既設 RC 床版の境界面に確認されたコンクリートが砂利化した状況である。この劣化は 1998 年の上面増厚補強後、本工事以前に実施された



第 1 図 全体一般図 (単位 : mm)  
Fig. 1 General drawing (unit : mm)



第 2 図 RC 床版コンクリートの砂利化

Fig. 2 Gravel becomes dislodged from concrete in the RC slab



第 3 図 断面欠損した既設鉄筋と既設補強鉄筋

Fig. 3 Defect cross-section for existing re-bar

### 3. 詳細設計

#### 3.1 設計概要

床版の詳細設計は、設計要領第二集<sup>(1)</sup>に基づき実施した。伸縮装置の近傍と、PCa 床版で対応が難しい桁端部の鋭角部（現場打ち施工部）は RC 床版として設計した。第 1 表に PCa 床版設計に用いるコンクリートの設計条件を示す。

本橋の場合、斜角が小さいことおよび桁端部付近まで PCa 床版を使用していることなど設計要領の規定のみでは設計を完結できない事項があった。以下、本橋における設計上の課題およびその対応について紹介する。なお、以下の報告では上り線を中心に述べる。

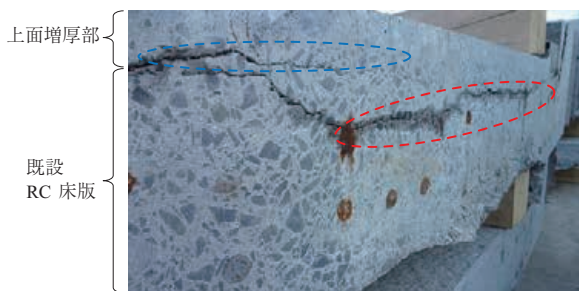
#### 3.2 PCa 床版製作上の課題

本橋は近くに仙台宮城インターチェンジがあるため、第 1 図に示すように主桁の配置および平面線形が変化している。一方、PCa 床版を合理的に製作するという観点からは、可能な限り同一形状とすることが望ましい。また、本橋の RC 床版取替においては、交通規制期間の短縮および品質確保の観点から現場打ち部を少なくするため、桁端部にも可能な限り PCa 床版を使用するという設計計画とした。これらの課題に対して、以下の 2 ケースについて、

大規模舗装・RC 床版補修時に舗装切削後の既設床版面を打音による検査を行い、剥離したコンクリートや浮きの除去を実施した部分で確認された。

また、コンクリートの砂利化が確認された部位では、既設 RC 床版の上側鉄筋に著しい断面欠損が見られた（第 3 図参照）。これは、凍結防止剤散布による塩分の影響であると考えられた。さらに、RC 床版下面には遊離石灰を含む亀甲状のひび割れ、剥離、浮きが発生していた。

第 4 図に本工事で撤去した既設 RC 床版の断面を示す。既設 RC 床版と上面増厚部との境界面での剥離や、上側鉄筋位置での水平ひび割れが見られた。



第 4 図 既設 RC 床版の断面

Fig. 4 Cracks on cross-section of removed RC slab

第 1 表 PCa 床版設計に用いるコンクリートの設計条件

Table 1 Design criteria for PCa slab

項	目	単位	制限値	備考
設計基準強度		N/mm <sup>2</sup>	50.0	
プレストレス導入時圧縮強度		N/mm <sup>2</sup>	36.0	
許容曲げ圧縮応力度	プレストレス導入直後	N/mm <sup>2</sup>	21.0	
	設計荷重作用時	N/mm <sup>2</sup>	17.0	
許容曲げ引張応力度	プレストレス導入直後	N/mm <sup>2</sup>	$k1 \times -2.51^{(2)}$	方法 B
	死荷重作用時	N/mm <sup>2</sup>		方法 C
	設計荷重作用時	N/mm <sup>2</sup>	$k1 \times -3.12^{(2)}$	方法 B
	風荷重作用時	N/mm <sup>2</sup>		方法 A
ヤング係数	プレストレス導入直後	N/mm <sup>2</sup>	$2.95 \times 10^4$	
	設計荷重作用時	N/mm <sup>2</sup>	$3.30 \times 10^4$	
クリープ係数		-	3.0	
乾燥収縮度		-	$20 \times 10^{-5}$	

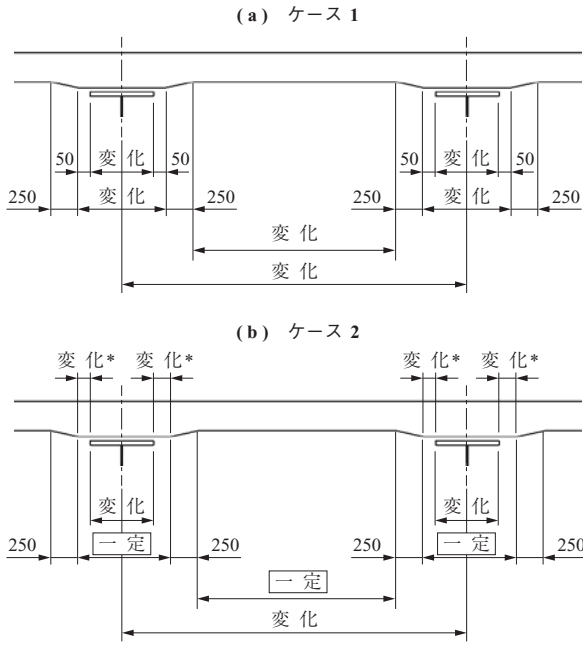
設計条件

- ・床版：PRC (Prestressed Reinforced Concrete) 構造（直角方向）とする。
- ・方法 A：コンクリートに生じる曲げひび割れを、ひび割れ幅の制限値まで許容する。
- ・方法 B：コンクリートに曲げ引張応力を発生させるが、曲げひび割れは発生させない。
- ・方法 C：コンクリートに曲げ引張応力を発生させない。
- ・ $k1$ ： $k_{0b} \cdot k_{1b}$  とする  
 $k_{0b}$ ：コンクリートの引張軟化特性に起因する引張強度と曲げ強度の関係を示す係数  
 $k_{1b}$ ：乾燥、水和熱など、その他の原因によるひび割れ強度の低下を表す係数

PCa 床版の形状および配置を検討した。

ケース 1

PCa 床版のハンチ（増圧部）幅を鋼桁上フランジ幅 + 100 mm（片側 50 mm）として、主桁形状に合わせて連続的に変化する（第 5 図 - (a)）。重量は最少となるが、すべての PCa 床版の形状が異なるため、製作は煩雑となる。



(注) \*：最小寸法 50 mm を確保

第 5 図 主桁間隔の変化への対応（単位：mm）

Fig. 5 Measure for dealing with variations in girder spacing (unit : mm)

ケース 2

PCa 床版のハンチ幅を大きくし、主桁間隔の変化に対応する（第 5 図 - (b)）。ハンチ幅が過大とならない範囲で PCa 床版をグルーピングすることで、製作コストと製作工程を圧縮できる。ただし、ケース 1 に比べて重量は増加する。

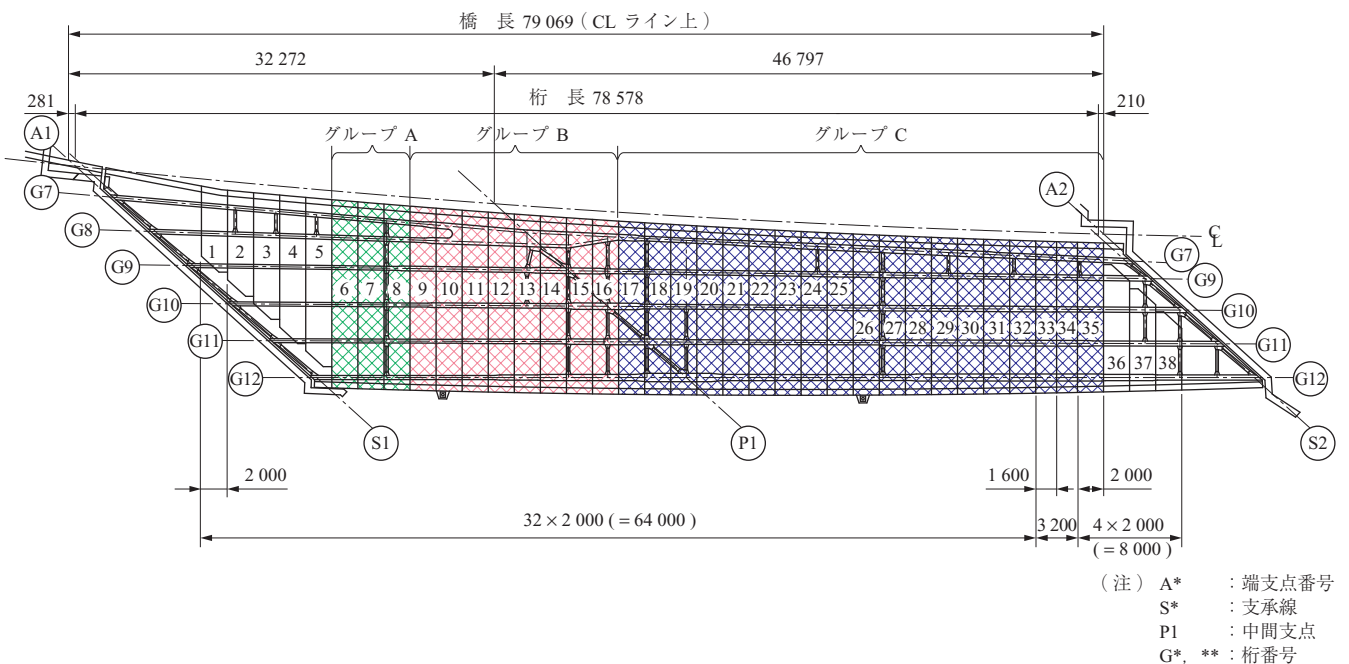
検討の結果、本工事ににおいてはケース 2 を採用し、PCa 床版の形状および配置を決定した。第 6 図に最終的に決定した PCa 床版のグループ、形状および配置（上り線）を示す。これらの方法によって、PCa 床版製作時における型枠基数および調整手間が削減され省力化が可能になった。また、形状を統一することに伴う PCa 床版の重量は形状統一前に比べ増加したが、鋼桁の応力照査の結果、問題ないことを確認できた。

3.3 設計上の課題およびその対応

3.3.1 主桁のたわみ差による、PCa 床版への負荷応力に対する検討

3.3.1.1 課題

本橋は、複雑な平面線形に対応するため、主桁間隔が変化する構造となっている（第 6 図参照）。また、支点部では斜角 36° 11' 01" (A1) ~ 40° 38' 24" (A2) を有しており、設計荷重作用時に生じる主桁のたわみ差によって、端支点および中間支点付近に付加的な引張応力の発生が懸念された。



(注) A\* : 端支点番号  
S\* : 支承線  
P1 : 中間支点  
G\*, \*\* : 桁番号

第 6 図 PCa 床版のグループ、形状および配置（上り線）（単位：mm）

Fig. 6 Grouping and arrangement of precast PC slab (unit : mm)



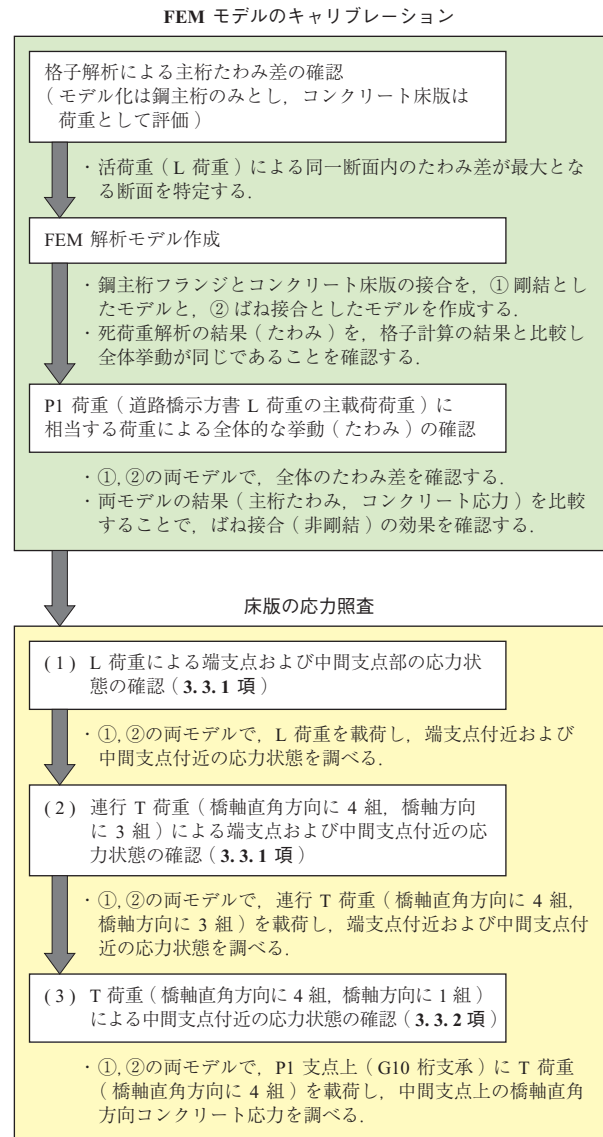
### 3.3.1.2 課題への対応

上記の技術的課題の設計手法として、主桁・横桁および床版をモデル化した三次元有限要素法（以下、FEM）解析を実施した。ここで、支付近の床版に活荷重によって生じる最大引張応力を確認することを目的として、第7図に示す手順で解析を実施した。第8図にFEM解析モデルを、第2表にFEM解析材料条件を、第3表にFEM解析拘束条件を示す。

本橋は非合成構造であるため、コンクリート床版と主桁を剛結させたFEMモデルでは完全合成構造となってしまう、実際とは異なる挙動を示すことが懸念された。そこで、床版と主桁をばねで接合することで非合成構造としての挙動を再現させることにした。ばね接合時、剛結時のそれぞれの主桁たわみを格子計算結果（床版の剛性は非考慮）と比較することで、ばね接合の効果を確認した（FEMモデルのキャリブレーション）。本橋の場合、 $\phi 19 \text{ mm} \times 2$ 本のスタッドを1m間隔で配置するので、フレキシビリティ定数( $f$ )<sup>(3),(4)</sup>は1.9となる。 $f=1.9$ 程度の場合、完全合成とした解析モデルの60%程度の応力が生じることが実験で確認されている<sup>(3),(4)</sup>。ばね接合した本モデルでは、橋軸方向の応力レベルが剛結モデルの75%程度であったことから、床版の設計に対しては安全側であると判断し、主としてばね接合モデルで床版の応力を評価することにした。この結果、主桁たわみは格子検査に比べて小さくなった。

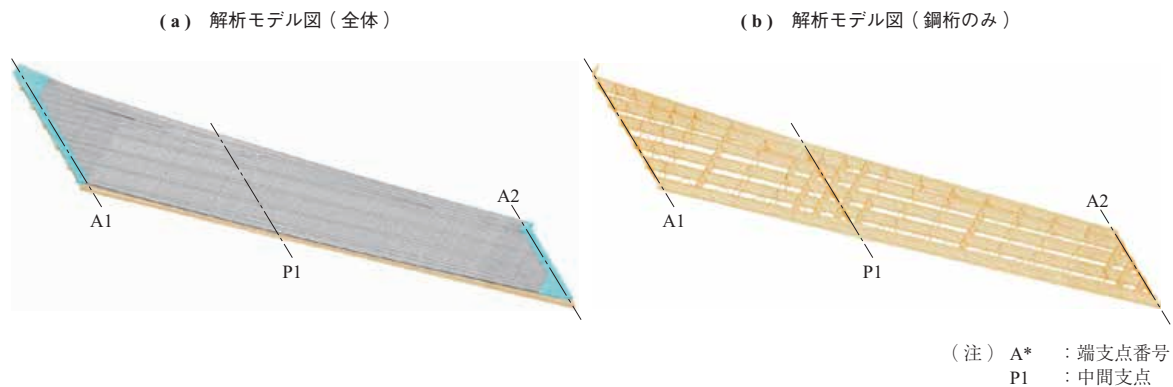
鋼桁と床版のばね接合は、複合構造標準示方書<sup>(5)</sup>から、頭付きスタッドのせん断力-ずれ変位関係を計算し、その結果からスタッド1本当たりのばね値を設定してFEMモデルに適用した。

断面内での主桁のたわみ差が最大となるよう、L荷重および連行T荷重の載荷位置を検討し、床版に生じる最大



第7図 FEM解析フローチャート  
Fig.7 Flowchart for FE analysis

引張応力を確認した。本橋では、中間支点を境界に反対側の耳桁側に荷重が集中するよう載荷した場合の、主桁のそり上がりによる影響を考慮する必要があると考え、連行



第8図 FEM解析モデル  
Fig.8 FE analysis model

第 2 表 FEM 解析材料条件  
Table 2 Material conditions for FE analysis

項 目	設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性 係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 (-)	摘 要
プレキャスト コンクリート	50	33 000	0.167	ソリッド要素
現 場 打 ち コンクリート	50	33 000	0.167	ソリッド要素
主 桁	-	200 000	0.3	シェル要素
横 構 対 傾 構	-	200 000	0.3	シェル要素 ビーム要素

第 3 表 FEM 解析拘束条件  
Table 3 Support conditions for FE analysis

支点 位置	TX (橋軸)	TY (直角)	TZ (鉛直)	RX (橋軸)	RY (直角)	RZ (鉛直)
A1	自由	固定	固定	自由	自由	固定
P1	自由	固定	固定	自由	自由	固定
A2	固定	固定	固定	自由	自由	固定

(注) TX : 橋軸方向変位      RX : 橋軸まわり回転  
TY : 橋軸直角方向変位      RY : 橋軸直角軸まわり回転  
TZ : 鉛直方向変位      RZ : 鉛直軸まわり回転

T 荷重による照査も行うことにした。第 9 図に床版コンクリートの応力度を示す。

第 9 図に示されるように端支点付近での最大引張応力度は、橋軸直角方向で 0.68 N/mm<sup>2</sup> および橋軸方向で 0.1 N/mm<sup>2</sup> 以下であった。これらの結果、当初懸念されていた端支点付近では主桁たわみ差によって PCa 床版に付加的に生じる引張応力度については、問題としないと判断した。斜角が小さいことからたわみ差に影響が懸念されたが、本橋の場合は幅員に対して主桁本数が多くその間

隔が狭いため、端支点付近では大きなたわみ差は生じにくく、有害な応力は発生しなかったと考えられる。

一方、第 9 図で注目すべきは中間支点上の橋軸直角方向の引張応力度である。橋軸方向の引張応力度は主桁と床版をばね接合しているため、合成作用によって PCa 床版に主方向の負曲げモーメントが作用し引張応力度が発生したものと考えられる。しかし、通常の PCa 床版設計では中間支点上では橋軸直角方向の曲げモーメントは発生しない。この理由について次項で詳述する。

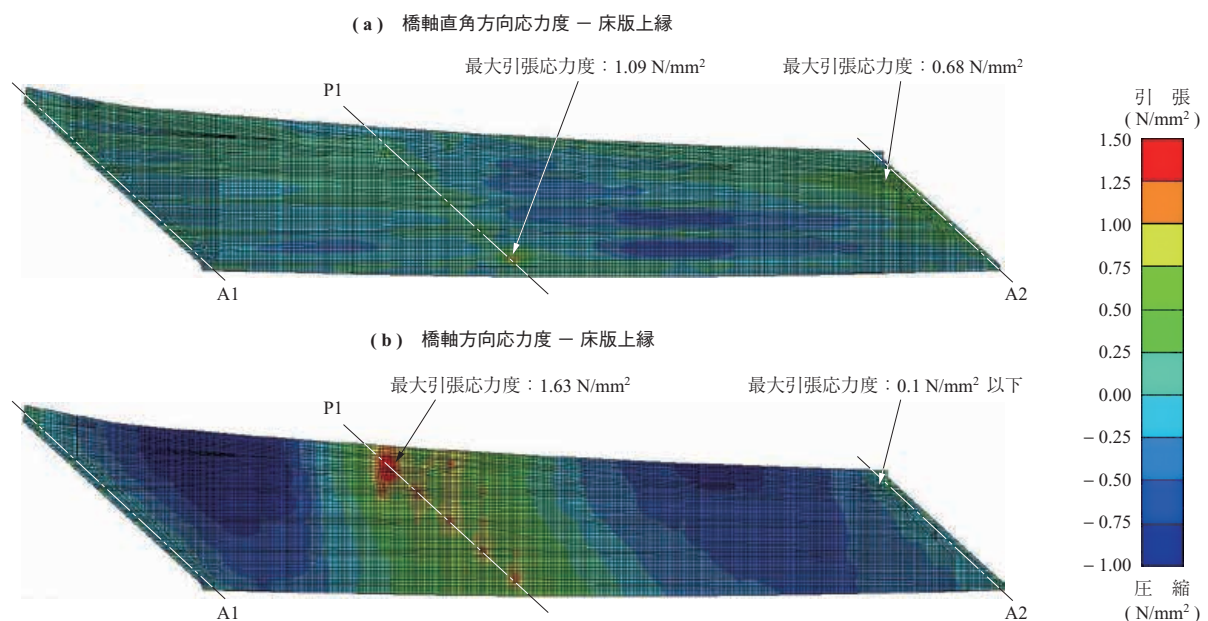
### 3.3.2 中間支点上の橋軸直角方向応力度の検討

#### 3.3.2.1 課 題

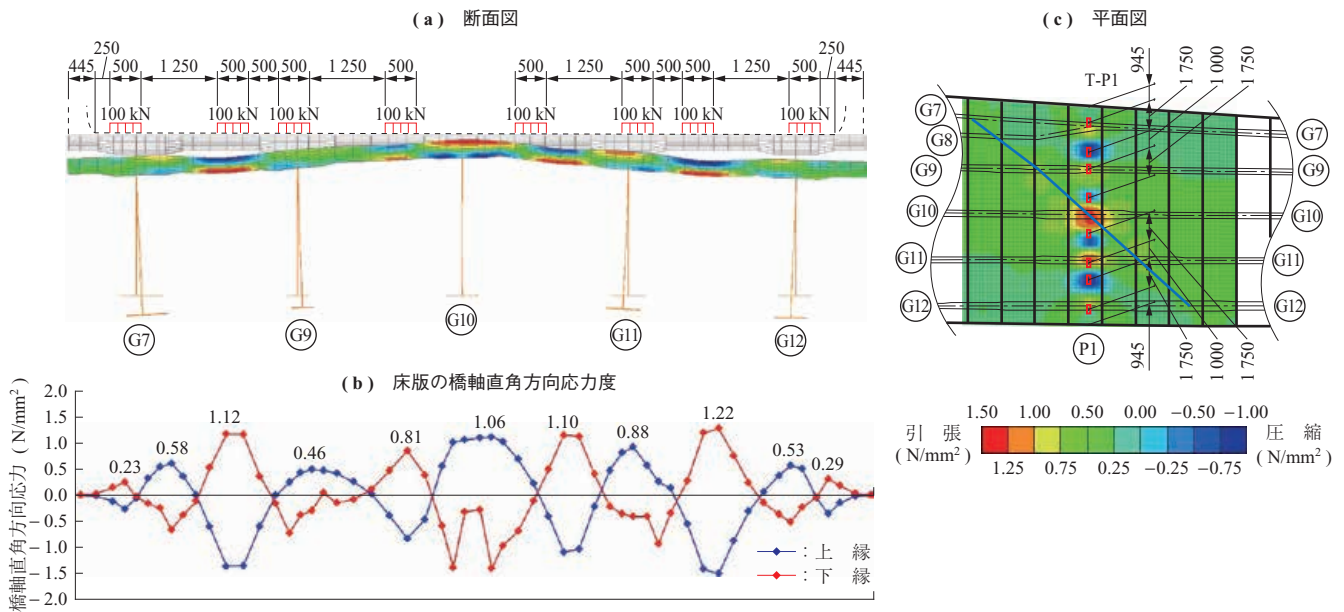
一般に床版の橋軸直角方向の設計は、主桁にたわみ差が生じないことを前提に行われる。本橋は斜角が P1 橋脚上で約 38°あるため、活荷重が第 10 図に示すように載荷された場合、中間支点上の G10 主桁と隣接する主桁にたわみ差が生じる。特に、本橋のような斜角が小さい場合は、この影響が大きく橋軸直角方向の PC 鋼材量の決定要因となることが懸念され、その設計方法が課題となった。

#### 3.3.2.2 課題への対応

上記の課題への対策として、第 8 図に示す FEM 解析モデルに主桁間のたわみ差が大きくなり中間支点上の応力度が最大となるように、T 荷重を橋軸直角方向に 4 組載荷した。この載荷状態に対する主応力を第 10 図に示す。第 10 図に見られるように、中間支点上では橋軸直角方向に 1.06 N/mm<sup>2</sup> の引張応力の発生が見られた。さまざまな荷重状態に対して、FEM 解析結果による引張応力と道路



第 9 図 床版コンクリートの応力度  
Fig. 9 Maximum stress in concrete slab



第 10 図 中間支点上の T 荷重位置および橋軸直角方向応力度 (単位 : mm)  
 Fig. 10 Concrete stress in transverse direction at intermediate support (unit : mm)

橋示方書<sup>(6)</sup>式による曲げモーメントから算出される引張応力を比較した結果、道路橋示方書による結果は FEM 解析結果に対して十分安全側であることが確認されたことから、本橋の設計では、道路橋示方書に従った計算で各部位における必要な PC 鋼材量を算出し配置した。設計計算の結果、耳桁上での PCa 床版上縁において設計荷重時の応力度と、衝突荷重時のひび割れ幅が決定要素となった。

## 4. 施 工

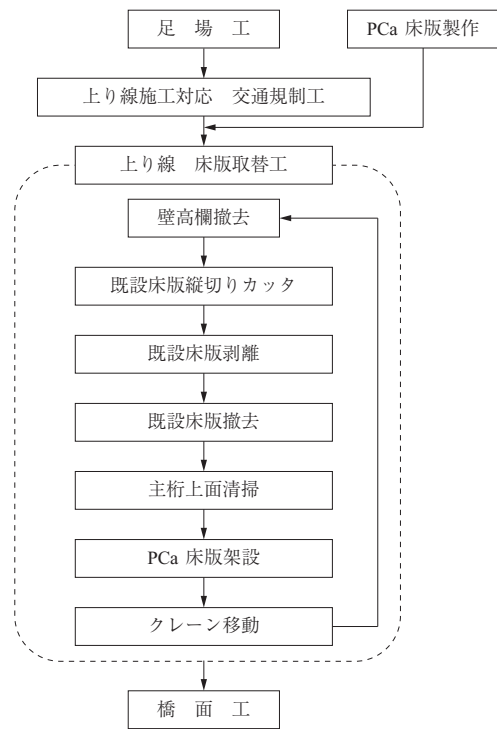
### 4.1 施工フローおよび交通規制計画

本工事の施工フローを第 11 図に示す。本工事は片側車線を交通規制するため昼夜施工可能であるが、交差する国道をまたぐため床版取替時は国道の交通規制の必要性があり、床版取替は夜間 (21:00 ~翌 6:00) のみで実施した。上り線の交通規制は第 4 表に示すとおりステップ 1 ~ 7 で実施した。第 12 図に上り線の PCa 床版取替時の交通規制 (ステップ 4) の様子を示す。対面交通規制時には、中央分離帯防護として警察および管理者との協議に従い完全分離型プレキャストコンクリート防護柵を設置した。また、インターチェンジ直近であるため仮設 B ランプを施工し交通運用を図った。

### 4.2 PCa 床版の施工

#### 4.2.1 既設 RC 床版の撤去

既設 RC 床版は、中間支点上から両橋台方向に撤去を行った。第 13 図に剥離装置による既設 RC 床版の撤去を示す。本橋は非合成桁構造であるため剥離装置を用いて



第 11 図 施工フロー  
 Fig. 11 Flowchart for construction work

実施した。撤去する RC 床版に吊り装置を設置し、所定の範囲をカットで切断・分離させた後、上フランジ上のスラブ止めを強制的に破断させ鋼桁から剥離させるものである。

#### 4.2.2 新設 PCa 床版架設

PCa 床版の架設は、架設に要する工程を短縮する目的で 220 tf クレーン 2 台を用いて実施した。既設 RC 床版



第 4 表 交通規制ステップ  
Table 4 Traffic control steps

ステップ	規制時間	規制箇所	主な作業
1	6:00 ~ 翌 16:00 (34 時間)	上り線 走行車線	仮設 B ランプの施工
2	1 日目 6:00 ~ 3 日目 6:00 (48 時間)	下り線 走行車線	路肩部段差修正工, 仮設防護柵設置工, 仮路面標示工ほか
3	3 日目 6:00 ~ 6 日目 6:00 (72 時間)	上下線 追越車線	車線シフト, 仮設 B ランプの施工, 仮設防護柵の設置ほか
4	6 日目 6:00 ~ 32 日目 6:00 (624 時間)	上下線 走行車線 追越車線	床版撤去工, 床版取替工, 壁高欄設置工, 伸縮装置撤去・設置工ほか
5	32 日目 6:00 ~ 34 日目 6:00 (48 時間)	上下線 追越車線	車線シフト, 仮設 B ランプ復旧, 仮設防護柵撤去ほか
6	34 日目 6:00 ~ 36 日目 6:00 (48 時間)	下り線 走行車線	路肩部段差修正工 (復旧), 非常駐車帯の復旧, 仮設防護柵の撤去ほか
7	6:00 ~ 翌 16:00 (34 時間)	上り線 走行車線	仮設 B ランプの復旧 (完了)



第 12 図 RC 床版取替時の交通規制 (ステップ 4)  
Fig. 12 Traffic control during construction



第 13 図 剥離装置による既設 RC 床版の撤去  
Fig. 13 Removal of existing RC slab

を中間支点部から両橋台側に向かって撤去後, 順次新設 PCa 床版の架設を実施した. PCa 床版の RC ループ継手部の鉄筋コンクリートあご部分が接触しないよう, 所定の高

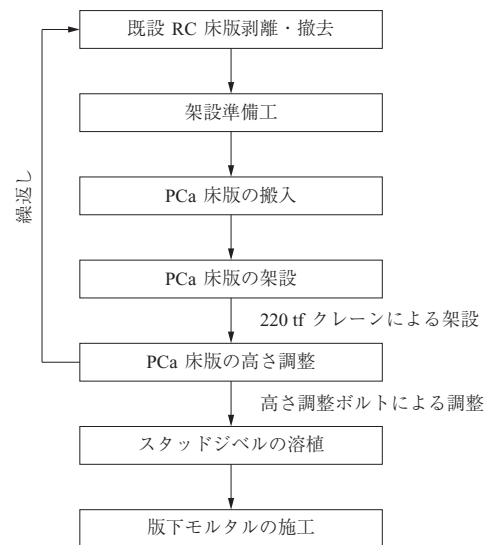
さ近くまで降ろした後, 水平 (橋軸) 方向にスライドさせて所定の位置へ設置した. 第 14 図に PCa 床版の架設フローを, 第 15 図に PCa 床版の架設状況を示す.

#### 4.2.3 接合部および現場打ち PCa 床版部の施工

PCa 床版の接合は RC ループ継手を採用した. 継手部のコンクリートは, 収縮によるひび割れ防止のため膨張コンクリートとした. 使用したコンクリートの設計基準強度は, PCa 床版と同等とするため 50 N/mm<sup>2</sup> とし, 交通規制開放時には設計基準強度以上であることを確認した. また, 本橋は斜角を有しているため, 僅かの範囲ではあるが現場打ちコンクリート部がある. 現場打ち部のコンクリートは, 設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> の超速硬コンクリートとした. 伸縮装置付近の桁端部の PCa 床版敷設状況を第 16 図に, 現場打ちコンクリート打設状況を第 17 図に示す.

## 5. 結 言

東北自動車道綱木川橋床版補強工事 (プレキャスト PC



第 14 図 PCa 床版架設フロー  
Fig. 14 Flowchart for slab replacement work



第 15 図 PCa 床版の架設状況  
Fig. 15 Installation of PCa slab





第 16 図 桁端部の PCa 床版敷設状況  
Fig. 16 PCa slab and expansion joint at girder end

床版を用いた床版取替工事)について報告した。

本工事の設計では複雑な平面線形かつ 36 ~ 40 度の斜角に対応するため、床版に与える主桁たわみ差の影響を適切に評価することが課題であった。この課題に対しては FEM で全橋モデルの解析を行い、床版への影響を調べることで対応した。

高耐久かつ急速施工が求められる壁高欄では、PCa 床版の端部を立ち上げ、さらに架設前に地覆部を構築することで、耐久性の確保と施工の迅速化を実現できた。

高速道路の対面交通規制、交差道路との関係による工種の時間制限などの制約条件下で、過去に例のない斜角部も含めた PCa 床版による床版取替を行い、2014 年 4 月に無事竣工を迎えた。

本報告が、本橋のように床版形状が複雑な橋梁における PCa 床版による取替工事の今後の一助となれば幸いである。

最後に、集中工事ではあるが、交差道路との関係から、床版取替は夜間のみとなる制約のなか、工期内で床版取替を完了することができたことは、関係各位の努力の結果で



第 17 図 現場打ちコンクリート打設状況  
Fig. 17 Pouring of CIP concrete at girder end

あり、ご助力いただいたすべての方に感謝を申し上げます。

### 参 考 文 献

- (1) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁建設編 7 章鋼橋 2012 年 7 月 pp. 30 - 47
- (2) 公益財団法人土木学会：2007 年制コンクリート標準示方書（2007 年制定）設計編 2008 年 4 月 pp. 34 - 37
- (3) 一般財団法人高速道路技術センター：第二東名高速道路 鋼桁の新技术に関する調査研究 少数主桁橋設計・施工指針（案）フォローアップ検討報告書 2000 年 3 月 pp. 121 - 122
- (4) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 床版 設計・施工マニュアル（案）1999 年 5 月 pp. 28 - 29
- (5) 公益財団法人土木学会：2009 年制定複合構造標準示方書 2009 年 12 月 pp. 60 - 64
- (6) 公益財団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編 2012 年 3 月 pp. 284 - 285

