

## 既設合成桁の床版取替えにおける

### 床版－主桁作用を考慮した合理的設計法に関する研究

# STUDY ON A RATIONAL DESIGN METHOD FOR RC DECK REPLACEMENT OF AN EXISTING STEEL COMPOSITE GIRDER BRIDGE CONSIDERING COMPOSITE ACTION WITH A DECK SLAB AND STEEL MAIN GIRDERS

橋梁工学分野 小林 駿祐  
Bridge engineering Shunsuke Kobayashi

本研究では半幅員ずつの施工による合成桁の床版取替えに着目した。床版取替えを想定した骨組み解析により主桁補強量の算出を行うことによって効果的補強方法について検討し、施工時に荷重分配横桁を撤去することの優位性を示した。FEM解析ではプレキャストPC床版を用いた場合の床版と主桁の合成作用の解明および合理的な床版の撤去・架設方法について検討し、プレキャストPC床版のスタッド配置で合成桁と同様の挙動を示すことを明らかにした。

The focus of this research is to replace the deck slab of existing steel composite girder bridge by half-width replacement. A frame analysis assuming replacement of the deck slab was carried out to examine the effective reinforcement method by calculating the main girder reinforcement amount and showed the superiority of removing the load distribution crossbeam during construction. FEM analysis was conducted to elucidate the composite action with a deck slab and steel main girders when using precast PC decks and to examine how to remove and install slabs reasonably, and as a result, it was revealed that the bridge using the stud arrangement of the precast PC deck behaves like the composite steel girder bridge.

## 1. 研究背景と目的

高度成長期に建設された鋼橋は、鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の老朽化が社会問題となっており、大規模更新・修繕事業の計画が策定されている。

橋梁形式の中でも、RC床版と鋼桁を一体の抵抗断面とした合成桁橋（以下、合成桁）は、耐荷力向上といった構造上の合理性などの利点があるが、床版の部分的な取替えや全面取替えが必要となる場合、床版の撤去による断面性能の低下が著しいため、通行止めが必要となる場合が多い。道路交通網の停滞が経済に与える影響を考えれば、より合理的に合成桁の床版を更新する手法の確立が求められる。

既設橋の床版更新にあたっては、工期短縮を最優先とする傾向があり、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）を多用している。しかし、PCa床版内部のPC鋼材あるいは配筋等の関係から、箱抜き間隔が制限され、既設橋が合成桁橋であったとしても、スタッドを密に配置できないため、非合成桁として更新することが多い。

非合成桁として取り扱うためには、平成24年3月

道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編<sup>1)</sup>に準拠し、スタッドジベルは1.0 m程度以内に配置され、設計上も床版の断面抵抗を考慮しない設計を行っており、既設橋が合成桁である場合には、上フランジの断面が不足するなど、施工時あるいは完成時において、既設主桁に対して多くの部材補強あるいは当て板補強が必要となることが想定される。

平成29年11月に改訂された道路橋示方書では、非合成桁に用いるスタッドジベルの設計手法は、主桁と床版の結合部の合成作用を適切に考慮することが記述されている。ただし、その具体的な設計手法やその考え方については記載されておらず、今後の床版更新設計において、従来のみなしや仕様規定に囚われない合理的な設計手法が提示されることが喫緊の課題である。

本研究では、都市道路橋における更新事業において、交通規制を伴うことによる社会的影響が大きいと考えられる合成桁に着目する。PCa床版を用いて既設合成桁を非合成桁化する場合を検討の対象とし、社会的影響の観点から半幅員ずつ床版取替えを行う場合において、合成桁の床版取替えに必要な主桁補強量を試

設計により算出し、その傾向を把握したうえで効果的な主桁補強量を検討する。また、床版取替えに用いるPCa床版と主桁との合成挙動を解明し、合理的な床版取替え設計手法を検討する

## 2. 施工段階ステップを考慮した骨組み解析

### 2.1. 解析モデル

本研究で対象とする橋梁は、鋼単純活荷重合成桁橋である。橋梁概要図を図-1に示す。本研究では今後床版取替えの事例が増加すると考えられるPCa床版に取替える場合を想定する。路下条件の制約を考慮し、主桁補強のみで施工した場合の補強量を算出する。

施工ステップ図を図-2に示す。半幅員施工において、施工前の状態を現況、G1・G2主桁上の床版を撤去するまでをI期施工、半幅員にPC床版を架設し、G3・G4主桁上の床版を撤去するまでをII期施工とする。

### 2.2. 解析モデルおよび解析ケース

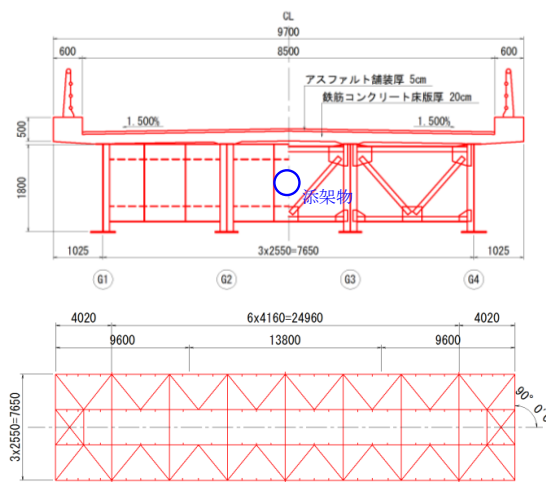
主桁、荷重分配横桁をはり要素でモデル化した。2次元平面モデルの概要図を図-3に示す。活荷重はB活荷重とする。死荷重として地覆、高欄、鋼重、ハンチ、アスファルト、床版、添加物の重量を考慮した。

解析ケースの一覧を表-1に示す。補強方針は、完成時および施工時において、それぞれの施工段階でフランジの補強による補強量を算出する方針Aと、完成時に必要となる補強を予め施工時に実施する方針Bの2方針とする。補強方法は①～③の3方法とし、①は上下フランジの増厚による補強、②は上下フランジの増厚・増幅による補強、③は上フランジのみの増厚・増幅による補強とする。解析ケースはこれらのパラメータを組み合わせた計6ケースである。

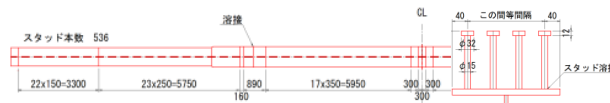
### 2.3. 施工段階における主桁補強量

各主桁に発生する曲げ応力を図-4に、I期施工時、完成時における補強量をまとめたものを表-2および表-3に示す。完成時では全ての主桁で許容応力を超過し、上フランジで補強が必要となっている。一方、施工時では、床版のある通行帯側（以下、通行帯側）の主桁で許容応力を超過している。通行帯側の主桁に着目すると、中主桁の補強量は完成時に対し小さいが、外主桁では完成時よりも大きくなっている。すなわち、外主桁の補強量は施工時で決定され、中主桁の補強量は完成時で決定される。

方法①と②を比較すると断面全体で補強を行う方が大きく補強量が低減されており、有効な方法と言える。方法③では補強量が增大しすぎるため適切でないことが分かる。方針AとBを比較すると、どの補強方法においても完成時に必要となる補強を予め施工時に



(a) 一般図および平面図



(b) スタッド配置

図-1 対象橋梁 (単位: mm)

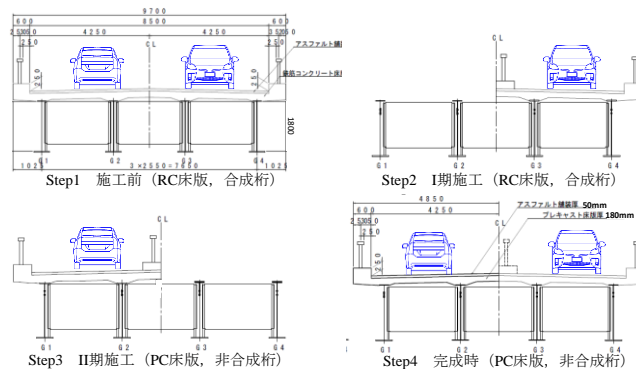


図-2 施工ステップ図 (単位: mm)

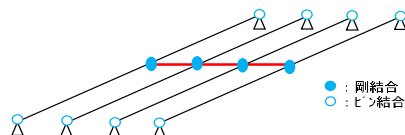


図-3 骨組み解析に用いた2次元平面格子モデル

表-1 解析ケース

ケース名	補強方針	補強方法
A-①	A	①
A-②	A	②
A-③	A	③
B-①	B	①
B-②	B	②
B-③	B	③

方針A: それぞれの施工段階で補強量を算出する場合

方針B: 完成時に必要となる補強を予め施工時に実施する場合

方法①: 上下フランジの増厚による補強

方法②: 上下フランジの増厚・増幅による補強

方法③: 上フランジのみの増厚・増幅による補強

実施することで、施工時に通行帯側の外主桁の補強量を低減させることができることがわかった。施工前の全体鋼重を1としたときの、4主桁橋の各解析ケースで得られた完成時の全体鋼重の比較を図-5に示す。ケースB-②が最も小さく、上下フランジの増厚・増

幅で補強し、かつ完成時に必要となる補強を予め施工時に実施する方法が有利であることがわかる。

## 2. 4. 応力の引継ぎを考慮した補強量

実際の施工段階ごとの補強量について検討する。II期施工においては、主桁補強部材は活荷重および補強部材と新設床版の死荷重（以下、後死荷重）にのみ抵抗するため、I期施工の状態でのG1・G2主桁に作用する断面力およびG3・G4主桁側から分配される断面力をG1・G2主桁の作用応力に足し合わせて照査を行う必要がある。完成時には同様に、II期施工後の状態で作用している応力をG3・G4主桁の作用応力に足し合わせて照査を行い、補強量を決定する。補強方針および補強方法はB-②を用いる。

II期施工時および完成時に必要となる主桁補強量を図-6に示す。補強量はG3主桁で最も大きく、107mmと非現実的な補強量である。照査時に足し合わせる応力、すなわち床版架設前に各主桁に作用する応力（以下、前死荷重）を図-7に示しているが、G3主桁における前死荷重が増大していることが分かる。II期施工の状態での通行帯側の死荷重が撤去側へ分配されるため、通行帯側に近いG3主桁でその影響が顕著に表れたためと考えられる。床版架設前に作用する応力が支配的となり、特に完成時前に作用する通行帯側からの死荷重の分配により補強量が増大することがわかった。

## 2. 5. 荷重分配横桁に着目したFEM解析

完成時において特に補強量の大きいG3主桁の応力を低減させることを目的に、荷重分配横桁を撤去した場合の解析を実施した。荷重分配横桁の中央部（G2-G3間）を撤去する場合とすべて撤去する場合は4主桁橋において同様の曲げモーメント分布となる。よって荷重分配横桁を中央のみ撤去した場合の各主桁に足し合わせる前死荷重応力を図-7に示す。また、荷重分配横桁を既設の状態（I期施工前）から撤去する場合と、完成の直前（II期施工後）に撤去する場合の補強量を算出した結果を図-8に示す。荷重分配横桁をI期施工前に撤去した場合にはG2主桁の前死荷重が増大したためG2主桁において補強量が増大した。それに対してII期施工後に撤去した場合にはG3主桁の補強量が低減され、全体として補強量を大きく低減させることができた。よって完成の直前に中央部の荷重分配横桁を撤去すると全体として補強量を低減させることができると考えられる。概要図を図-9に示す。

## 3. PCa床版の床版-主桁に関する検討

### 3. 1. 解析モデル

図-10に主桁の有限要素モデルを示す。コンクリー

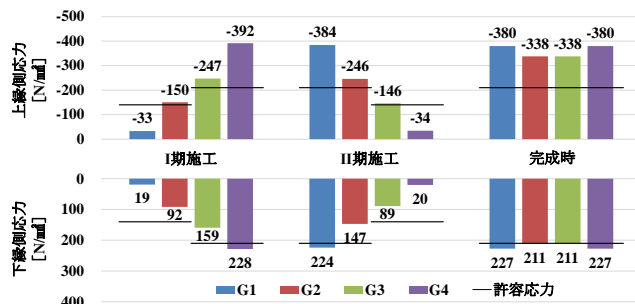


図-4 未補強時での主桁発生応力の比較

表-2 I期施工における補強量（単位：mm）

		A-①	A-②	A-③	B-①	B-②	B-③
上フランジ	撤去側	G1	0	0	0	43	21
		G2	0	0	0	34	17
	通行帯側	G3	5	4	2	34	17
		G4	51	25	88	47	21
下フランジ	撤去側	G1	0	0	0	0	1
		G2	0	0	0	0	0
	通行帯側	G3	0	0	0	0	0
		G4	4	5	0	1	3

表-3 完成時における補強量（単位：mm）

		A-①	A-②	A-③	B-①	B-②	B-③
上フランジ	G1	43	21	24	43	21	21
	G2	34	17	17	34	17	17
	G3	34	17	17	34	17	17
	G4	43	21	24	43	21	21
下フランジ	G1	0	1	0	0	1	0
	G2	0	0	0	0	0	0
	G3	0	0	0	0	0	0
	G4	0	1	0	1	1	0

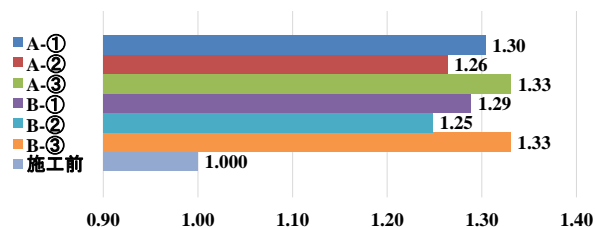


図-5 施工後の鋼重比較

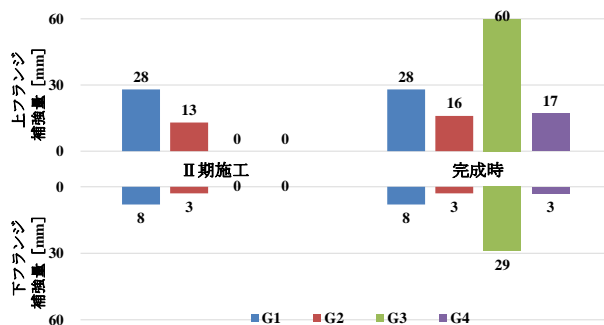


図-6 施工時および完成時の必要補強量

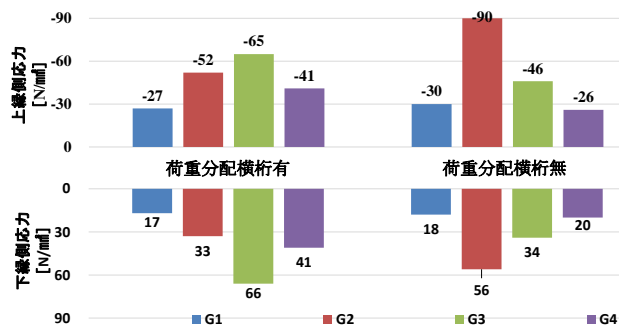


図-7 荷重分配横桁の有無による前死荷重応力の比較

ト床版は有効幅 (2050mm) の範囲をソリッド要素でモデル化し, G2 主桁をシェル要素でモデル化した. スタッドははり要素でモデル化し, 支点部から 3.3m の位置までは 150mm 間隔, それ以外の箇所はプレキャスト床版の箱抜き間隔を想定して 1000mm 間隔で配置した. スタッド下端と上フランジを節点共有とし, スタッドはコンクリート床版内に埋め込まれるように節点共有させた. コンクリート床版下面と上フランジとの間には接触後の分離を許す境界条件を与えた. 表-4, 表-5 に使用した鋼材およびコンクリートの材料特性を示す. 鋼材の材料特性は勾配 1/100 のバイリニアでモデル化した. コンクリートの構成則は圧縮側, 引張側ともに完全弾塑性とした.

### 3.2. 解析ステップおよび解析ケース

解析ステップを表-6 (a) に示す. ステップ 1 で鋼桁のみの状態で死荷重を載荷し, ステップ 2 で PCa 床版とスタッドをモデル中に追加し結合させた. ステップ 3 では床版の死荷重を載荷し, 温度を入力する. さらにステップ 4 で活荷重を載荷し, 限界状態および材料の非線形領域における挙動を確認するため, ステップ 5 以降は活荷重を増加させ, 最大荷重に達した時点で終了する解析とした.

解析ケースを表-6 (b) に示す. スタッド配置による挙動の違いを把握するため, 支点部から L/10 区間のスタッド配置間隔をパラメータとした. さらに, 橋軸直角方向の本数を減らしたケースについても検討を行った. 検討は, 外側のスタッドを残したケースと内側のスタッドを残したケースについて行った.

### 3.3. 解析結果

#### 3.3.1. 中立軸位置の検討

各ケースにおける断面応力分布を図-11 に示す. 図は全て L/4 点のものであり, それぞれの段階の応力分布から死荷重および温度荷重による応力を差し引いた活荷重応力分布を示している. どのケースにおいても, 中立軸はほぼ合成桁の位置にあり, 現在用いられているプレキャスト床版による非合成桁でも, 合成桁と同様の挙動を示していることがわかる. また, 活荷重倍率を 3 倍以上としても, 中立軸位に変化はなかった.

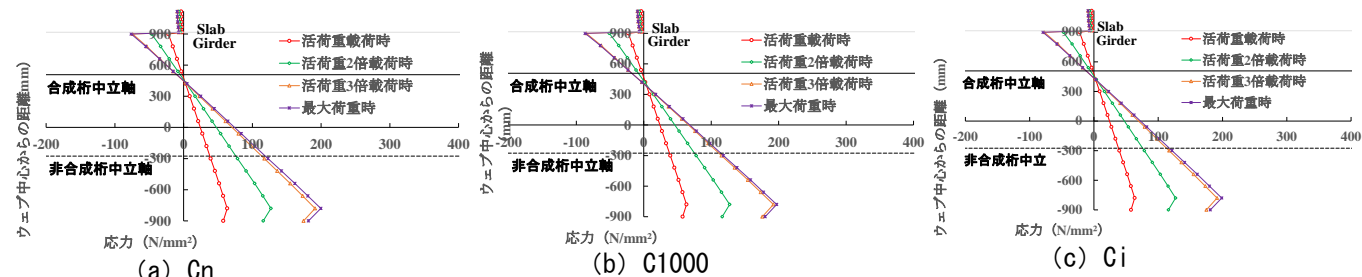


図-11 L/4 点における活荷重応力分布

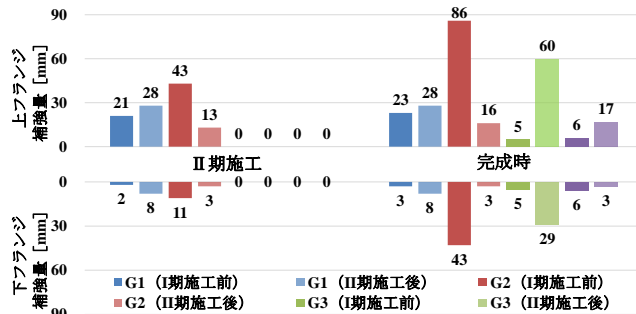


図-8 荷重分配横桁を撤去した場合の必要補強量

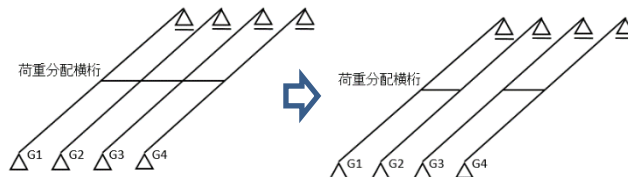


図-9 荷重分配横桁の中央を撤去した場合の概要図

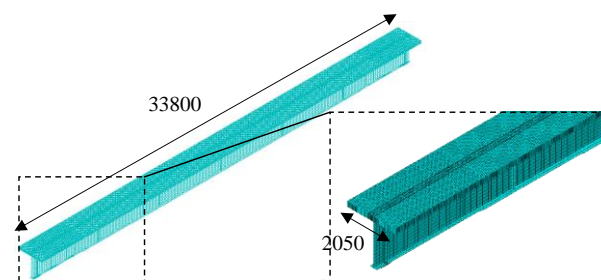


図-10 主桁 FEM モデル (単位 : mm)

表-4 鋼材の材料特性

	材質	要素	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	降伏点	ひずみ硬化係数 (N/mm <sup>2</sup> )
主桁	SM490Y	シェル要素	200000	0.3	355	E/100
荷重分配横桁					235	
対傾構	SS400	はり要素				
補剛材						
スタッド						
ソールプレート		ソリッド要素				完全弾性

表-5 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
24	2.4	25000	1.67

表-6 解析ステップおよび解析ケース

(a) 解析ステップ (b) 解析ケース

ステップ	概要	ケース名	L/10区間のスタッド間隔	備考
1	鋼桁死荷重載荷	Cn	150mm	現在使用されている配置
2	床版架設	C300	300mm	スタッド間隔300mm
3	床版死荷重載荷+温度入力	C600	600mm	スタッド間隔600mm
		C1000	1000mm	スタッド間隔1000mm
4	活荷重載荷	Co	150mm	外側のスタッドのみ
5以降	活荷重載荷倍率の増加	Ci	150mm	内側のスタッドのみ

### 3.3.2. スタッドに作用するせん断力

各ケースにおけるスタッドに作用するせん断力を図-12に示す。図中のプロットはスタッドの基部のものであり、スタッドの列ごとに最もせん断力が高いスタッドのものを抽出している。Cnを見れば、1倍の活荷重載荷時点で許容せん断力を上回っている。しかし降伏せん断力は超過しておらず、設計荷重レベルではスタッドの破壊はないと考えられる。300mm 間隔よりも大きくすると、設計荷重時点で降伏せん断力を超過しているものが確認できる。

スタッドの橋軸直角方向の本数を減らした場合は内側のみに配置した場合、降伏に近いスタッドはあるものの、その数はわずかであり、内側にスタッドのスタッドを配置する方が、外側に配置する場合よりも破壊されるスタッドが少ないと考えられる。スタッドの総本数は 300mm 間隔のものと同様であるため、スタッド配置は、橋軸方向間隔の影響が大きいと考えられる。よって合成桁相当のスタッド間隔では、橋軸直角方向のスタッド本数を削減できると考えられる。

## 4. 床版取替え時の床版-主桁作用に関する検討

### 4.1. 解析モデル

コンクリート床版および支点部のソールプレートは 8 節点ソリッド要素、その他鋼部材（主桁、荷重分配横桁、中間対傾構、端対傾構、鉛直補剛材、水平補剛材）は 4 節点シェル要素でモデル化し、スタッドははり要素でモデル化した。既設橋のスタッドは図-1に示す通りに配置した。それ以外の箇所は 1000mm 間隔でスタッドを配置した。図-13に全橋有限要素モデルおよびそのスタッド配置を示す。

### 4.2. 床版-主桁間の合成作用の検討

#### 4.2.1. 解析ステップ

解析ステップを表-7に示す。骨組み解析同様、I期施工、II期施工、完成時に着目し、半幅員の床版を撤去した場合の影響について検討する。解析は 10 ステップに分かれている。まず、死荷重、活荷重を現況のモデルに載荷する。P1 荷重は支間中央に載荷する。ステップ3では交通規制の状態を再現する。撤去側の床版の活荷重を無効にし、通行帯側のみに活荷重が載荷

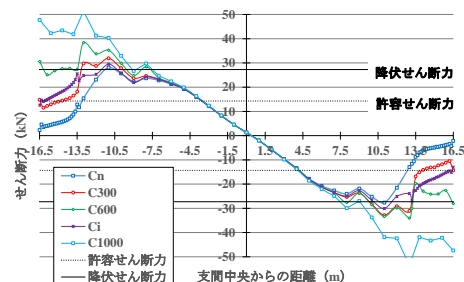


図-12 スタッドのせん断力分布

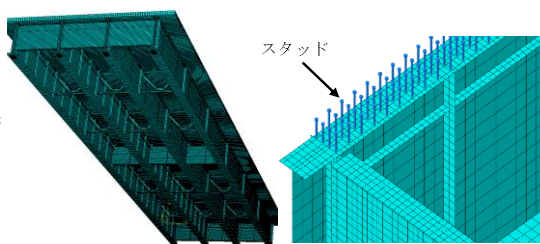


図-13 全橋 FEM モデル

された状態とする。その後床版を半幅員撤去し、その状態を I 期施工とする。これを反対側も行い、完成となる。

### 4.2.2. 既設床版側の断面応力分布

現況の合成桁の解析モデルと、I期施工時における既設 RC 床版残置側 (G3・G4 主桁) の支間中央および 1/4 支間位置の G3 主桁ウェブに発生する応力度に着目した。高さ方向分布図を図-14に示す。I期施工は合成桁の RC 床版が半分撤去された状態であるが、図より橋軸方向の断面における中立軸は、撤去前の合成桁と同じであることが確認された。そのため、半幅員施工する際の I 期施工 (片側の床版が撤去された状態) においては、撤去されていない側の既設主桁は現状の合成桁相当として取り扱うことは可能であると考えられ、主桁補強量の低減が期待できる。

支間中央部のうち、スタッドジベル位置における応力度分布とスタッドジベル中心位置における主桁ウェブの発生応力度を図-15に示す。この図より、水平補剛材位置で応力度の変化はあるものの、中立軸はスタッドジベル位置とスタッドジベル中心位置で相違がなく、非合成桁でスタッドジベルの配置間隔として 1.0m を配置しておくこと、中立軸の改善を期待できることに加え、曲げモーメントが最も大きく作用する支間中央部付近の橋軸方向の中立軸は、一定の高さを保持できることが期待されると考えられる。

## 4.3. 実施工を再現した FEM 解析

### 4.3.1. 解析ステップ

床版をパネル割りし、順に撤去した場合を想定する。道路運搬<sup>2)</sup>の都合上、最大でも撤去幅は 4m とした。解析は Case A と Case B の 2 ケースとした。Case A は端部から順に RC 床版を撤去し、全て撤去した後に PCA 床版を架設するケースである。Case B は 1 パネルずつ撤去と架設を交互に行うケースである。検討は I 期施工の状態で行った。表-8に解析ステップを示す。表には端部を始点として撤去する床版パネルの幅を示しており、そのパネルをどの解析ステップで撤去・架設するかを示している。2 ケースの概要図を図-16に示す。

表-7 解析ステップ

ステップ	概要	解析結果の抽出
1	死荷重載荷	
2	活荷重載荷	現況
3	左側交通規制	
4	左側RC床版撤去	I期施工
5	左側PC床版架設	
6	右側交通規制	
7	左側交通解放	
8	右側RC床版撤去	II期施工
9	右側PC床版架設	
10	右側交通解放	完成時

### 4.3.2. 床版撤去・架設順序による影響

図-17に、各ステップでの上下フランジの応力の変動を示す。図のプロットは、上下フランジの橋軸方向応力であり、それぞれ最大値となった箇所を抽出している。Case Aでは支間中央付近を撤去した場合に上フランジの応力が最大となっている。Case Bにおいても同様に、支間中央付近を撤去した際に上フランジで最大の応力が発生した。Case AとCase Bを比較すると、Case Bの方が最大応力は小さく、主桁への負担が小さいことがわかる。

### 5. 結論

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 合成桁の床版取替えにおいては、半幅員施工時に通行帯側の外主桁に断面力がより分配され、外主桁では完成時よりも補強量が増大する。
- 2) 床版取替えでは完成時の断面諸元を考慮し、完成時に必要な補強を予め施工時に実施することで、それぞれの施工段階で補強量を決定する場合よりも補強量が低減される。
- 3) 床版架設前に作用する応力が補強量に対して支配的となるため、荷重分配横桁を撤去することは、

通行帯側の外主桁に前死荷重による断面力を分配しない構造となり、主桁補強量の低減効果が認められる。

- 4) プレキャスト床版のスタッド配置間隔で合成桁相当の床版-主桁作用を発揮する。支点部からL/10区間のスタッドは間隔が広ければ広いほど中立軸位置の低下を引き起こすが、橋軸直角方向の配置の影響は小さくスタッド本数の削減が可能である。
- 5) 合成桁を半幅員施工で床版取替え工事を実施する場合、撤去しない床版側の主桁-床版間は、合成桁と同等の断面抵抗性能を有している。
- 6) 床版撤去時、支点部から順に撤去し、全て撤去した後に架設するより、部分ごとに撤去と架設を交互に繰り返す取替え方法の方が主桁への負担は小さく、支間中央付近の床版を撤去した際に最大の応力が発生する。

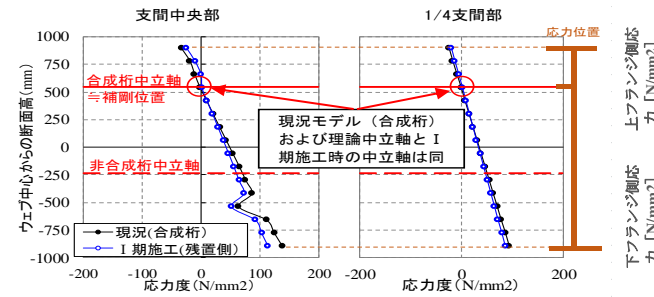


図-14 I期施工時における応力分布

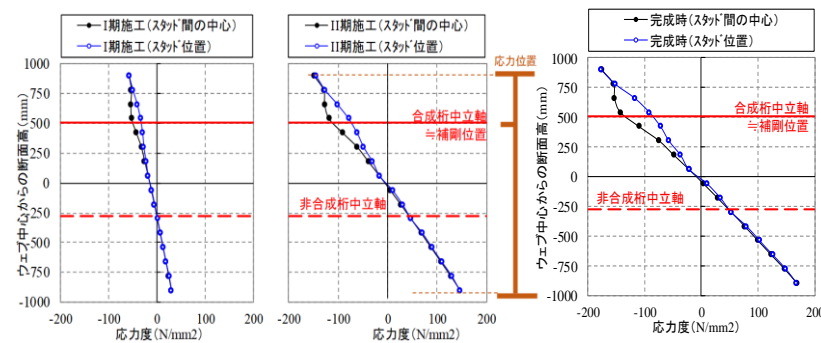


図-15 一般部とスタッド位置での応力分布の比較

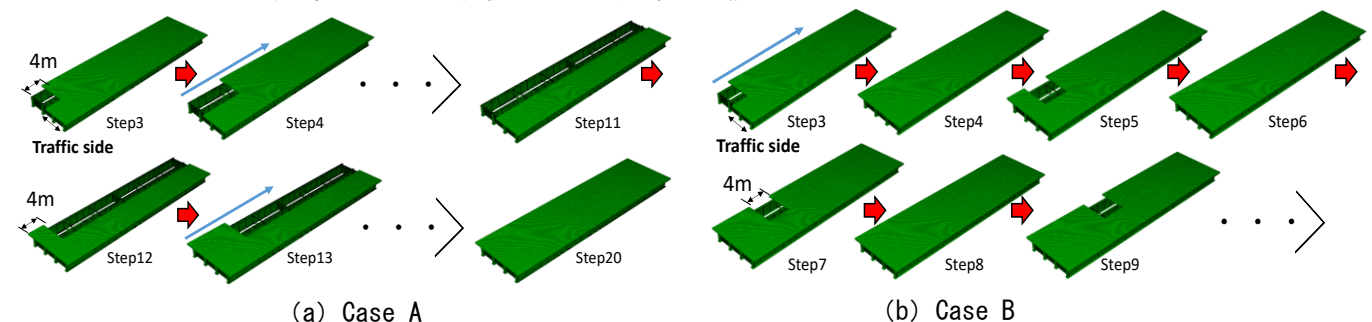


図-16 床版取替えステップ概要図

### 参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I～V編，社団法人
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧 改訂版，1980.8

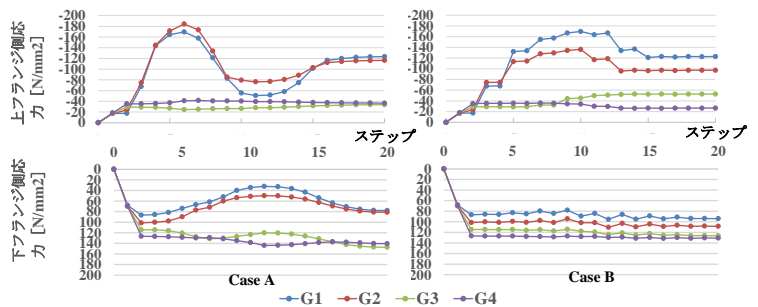


図-17 ステップによる応力の変動

表-8 床版撤去・架設順序

Case	範囲	0-3m	3-7m	7-11m	11-15m	15-19m	19-23m	23-27m	27-31m	31-34m
A	撤去	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6	Step 7	Step 8	Step 9	Step 10	Step 11
	架設	Step 12	Step 13	Step 14	Step 15	Step 16	Step 17	Step 18	Step 19	Step 20
B	撤去	Step 3	Step 5	Step 7	Step 9	Step 11	Step 13	Step 15	Step 17	Step 19
	架設	Step 4	Step 6	Step 8	Step 10	Step 12	Step 14	Step 16	Step 18	Step 20