

報告 PC合成桁橋の床版取替工法における桁と床版の完全剛結合の評価方法と設計方法の検討

周 波^{*1}・吉松 慎哉^{*2}・宇山 友理^{*3}・館岡 真仁^{*4}

要旨：本橋は、国内で実績の少ないPC合成桁橋のプレキャストPC床版による床版取替工事である。桁と床版が完全剛結合のPC合成桁橋は、床版取替後も完全剛結合とする必要がある。本橋は、桁と床版の接合面は洗い出し仕上げを行い、無収縮モルタルの充填性および接合面の接着強度試験とせん断強度試験によって、接合面に必要な付着性能が確認され、桁と床版が完全剛結合と評価した。床版の設計は、桁と床版が完全剛結合となることで、床版合成前は単純梁、床版合成後は桁と床版を一体化した連続ラーメン構造のフレーム解析により断面力を算出し、構造系変化による不静定2次力を考慮した設計方法とした。

キーワード：PC合成桁橋、床版取替え工法、コッター式継手、充填性・付着性能確認試験

1. はじめに

陣場橋（上り線）は、東北自動車道の十和田IC～小坂ICに位置し、1986年に供用を開始したPC単純合成桁橋（橋長29.070m、有効幅員9.250m）の床版修繕工事の橋梁である（表-1）。本橋は、供用開始から35年が経過し、既設RC床版下面に凍結防止剤の散布による塩害劣化が生じており、既設RC床版を撤去し、11枚のプレキャストPC床版による床版取替工事を実施することにした（図-1）。本橋のプレキャストPC床版は、床版の99%をプレキャスト化することで工期短縮と品質向上が期待できる図-2に示すコッター式継手¹⁾を用いたプレキャストPC床版（以下、コッター床版）とした。

本稿は、PC合成桁橋のプレキャストPC床版による床版取替え工法の実績が少ないため、本工事において検討した設計方法と、設計方法の妥当性を検証するために実施した無収縮モルタルの充填性・付着性能確認試験について報告する。

表-1 橋梁概要

構造形式	ポストテンション方式PC単純合成桁橋
橋梁・支間長	橋 長：29.070 m , 支間長：28.100 m
有効幅員	取替前：9.250 m , 取替後：10.010 m
斜 角	右 63° 40' 00"
横断勾配	2.000 % (↙)
縦断勾配	2.350 % (↙)
平面線形	R = 1500 m
設計荷重	取替前：TL-20 TT-43 , 取替後：B活荷重

2. 桁と床版の完全剛結合の方法

PC合成桁橋は、桁と床版が一体となった合成断面で荷重に抵抗する構造形式であるので、コッター床版による

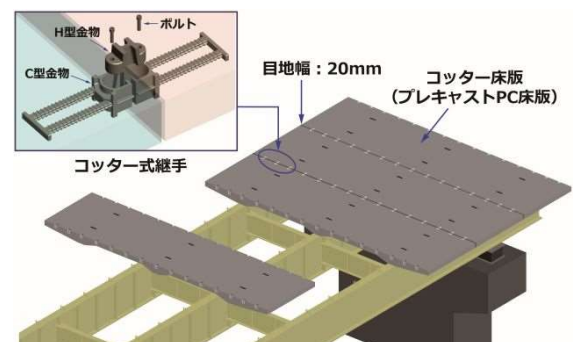


図-2 コッター床版概念図

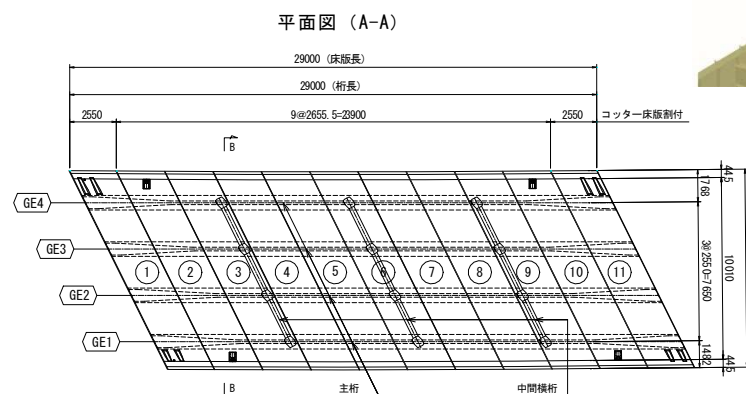


図-1 橋梁一般図

*1 (株)熊谷組 土木事業本部橋梁イノベーション事業部 工博 (正会員)

*2 (株)熊谷組 土木事業本部橋梁イノベーション事業部

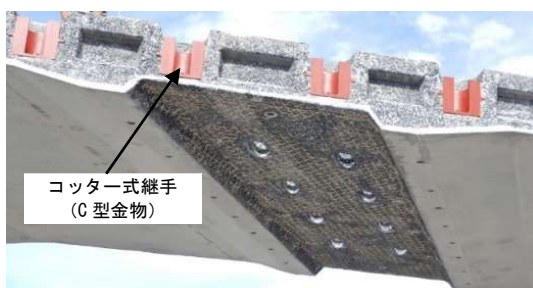
*3 東日本高速道路(株) 東北支社 建設事業部構造技術課

*4 東日本高速道路(株) 東北支社 青森管理事務所

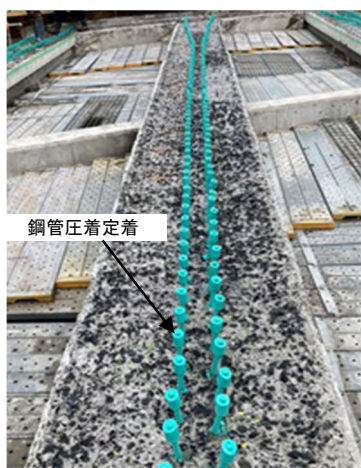
床版取替え後も桁と床版が完全剛結合とする必要がある。道路橋示方書Ⅲ（H24）²⁾では、「合成桁は、ずれ止め鉄筋を配置したとしても、せん断に対する付着切れの抑制には寄与せず、・・・(後略)」とあり、「桁と床版との付着が確保されるように、接合面のせん断応力度を算出し、許容せん断応力度を超えないことを照査する・・・(後略)」とある。このため、本橋は、桁とコッター床版の隙間に充填する無収縮モルタルにより桁と床版の付着を確保し、桁と床版の接合面に生じるせん断力に対して安全となるように検討した。

2.1 コッター床版と桁の接合面の洗い出し仕上げ

道路橋示方書Ⅲ（H24）の桁と床版の接合面のコンクリートの許容せん断応力度を算出するための付着係数は、洗い出し仕上げした場合を標準として想定している。このため、一般的に鋼橋の床版取替え工法におけるプレキャスト PC 床版の鋼桁との接合面は型枠面となっていたが、コッター床版の桁との接合面は、型枠に遅延剤を塗布し、コンクリート打設し脱型後に洗い出し仕上げを行うことにした（写真－1）。また、既設の RC 床版を撤去した桁上フランジは、ウォータージェットによる洗い出し仕上げとした（写真－2）。これにより、桁とコッター床版の隙間に充填する無収縮モルタルにより桁と床版の付着を確保することにした。



写真－1 コッター床版の接合面の洗い出し仕上げ



写真－2 桁上フランジの洗い出し仕上げとスターラップの鋼管圧着定着³⁾

2.2 無収縮モルタルの充填性確認試験

充填した無収縮モルタルが、コッター床版下面に気泡などの空隙があると付着を確保することができないので、無収縮モルタルの充填性確認試験を行った。

(1) 試験方法

充填性確認試験は、コッター床版と桁の接合面をモデル化した図－3 に示すような試験体を用いて行った。無収縮モルタル充填前、接合面には、プライマー材（吸水調整剤）を塗布し、表－2 に示す工事で使用する無収縮モルタルを充填した。養生期間は、施工工程に合わせて6日間とした。

無収縮モルタルの注入方法は、現場での施工手順に従い図－4 に示すように勾配の低い注入孔から順次注入した。また、注入後にエア抜きを目的として、振動部径28mmの棒状の高周波バイブレータで各注入孔から振動を与えた場合についても検討した。

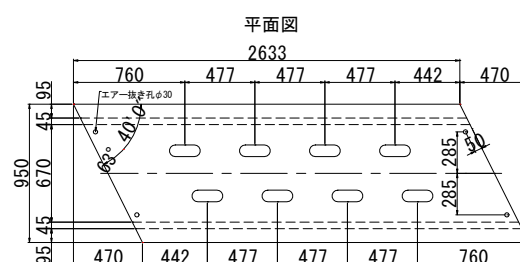
無収縮モルタルの充填性は、型枠を脱型後、試験体の切断面および側面において、コンクリート版と無収縮モルタルの接合面に隙間等がないかを目視で確認した。

(2) 試験結果

目視確認の結果、写真－3 に示すようにコンクリート版と無収縮モルタルの接合面には空隙などの隙間を確認

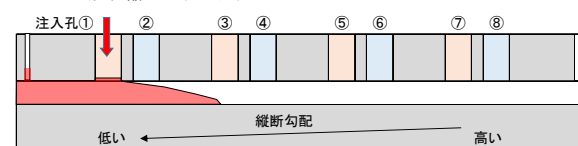
表－2 無収縮モルタル

品 名	流動性 J14 漏斗流下値	配合 水材料比
デンコブレタスコン TYPE-1	8 ± 1 秒	36.0 %

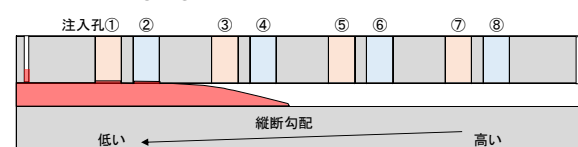


図－3 充填性確認用試験体

STEP-1 無収縮モルタル注入



STEP-2 注入孔①、②充填完了



以下、注入孔②から順次繰り返す

図－4 無収縮モルタルの充填方法

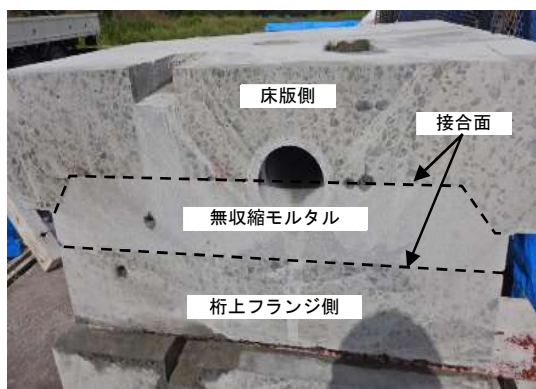


写真-3 切断面での無収縮モルタル充填確認状況

できなかったもので、充填性は良好であった。また、パイプレータの使用の有無による明確な違いはなかったが、実際の工事ではパイプレータを使用した。

2.3 付着性能確認試験

付着性能確認試験の供試体は、前述の充填性確認試験体から作成した。

(1) 接着強度試験

接着強度試験用供試体は、図-5 に示すようにプレキャスト PC 床版側（以下、床版側モデル）と桁上フランジ側（以下、桁側モデル）で鉛直方向に直径約 100mm のコアを採取した。採取したコアは、図-6 のように接合面を中心に高さが 160mm となるように整形し、供試体の上下に鋼製の引張試験用治具を接着剤で取り付けた。接着強度試験は、【NEXCO 試験方法 試験法 422-2004（付着性能試験方法）】⁴⁾ に準じて試験を行った。

接合面の接着強度は、破断荷重を接合面の面積で除して求めた。接着強度試験結果を表-3 に示す。接合面の接着強度の基準値は、構造物施工管理要領 5) の断面修復の性能照査に規定されているコンクリートとの付着性の要求性能の基準値 1.5N/mm^2 以上とした。床版側モデルおよび桁側モデルの破断状況は、接合面での破壊、鋼製治具のはく離およびコンクリートの破壊と様々であるが、接合面の接着強度は、基準値以上であった。

(2) 一面せん断強度試験

接合面のせん断強度試験は、実施工を模擬した充填性確認試験体から接合面の供試体を作成するため、接合面

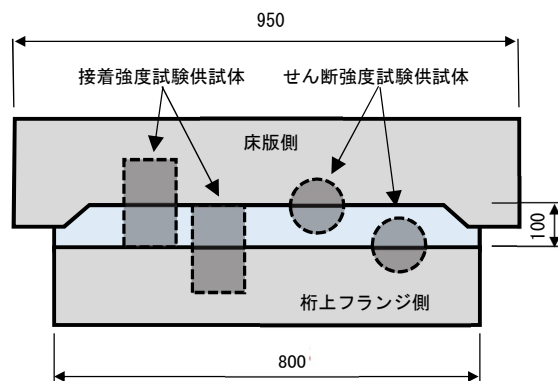


図-5 付着性能確認試験用コア削孔位置

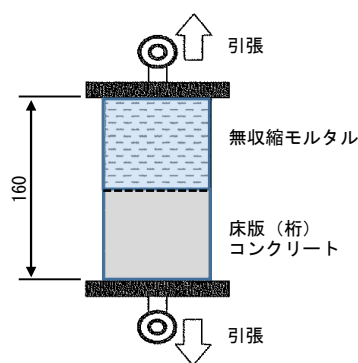


図-6 接着強度試験供試体⁴⁾

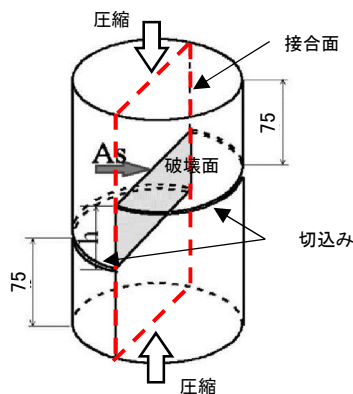
を破壊面とすることが容易にできる高橋真希子らの研究⁶⁾で行った図-7 に示す円柱供試体による一面せん断試験方法採用した。圧縮荷重を載荷する直接せん断強度試験方法は、角柱供試体ではあるが、佐藤立美の研究⁷⁾でも実用性が高くかつ整合性の高い試験方法であることが確認されている。

一面せん断強度試験用供試体は、図-5 に示すように床版側モデルと桁側モデルで、水平方向に直径約 100mm × 長さ 200mm のコアを接合面が円の中心となるように採取した。採取したコアは、図-7 のようにダイヤモンドカッターで、接合面まで上下 2 本の水平方向の切込みを入れた。一面せん断強度試験は、一軸圧縮試験機で荷重（圧縮）を載荷し、破壊面で破壊する荷重を計測した。

せん断強度は、破断荷重を破壊面の面積で除して求め

表-3 接着強度試験結果

供試体タイプ		床版側モデル				桁側モデル			
接合面の状態		遅延剤散布による洗い出し				W J 工法による表面処理			
パイプ・プレート有無		なし		あり		なし		あり	
接着強度 (N/mm ²) と 破壊位置	①	1.77	治具接着面	1.87	接 合 面	2.03	治具接着面	2.25	接 合 面
	②	2.11	接 合 面	1.75	接 合 面	1.98	治具接着面	2.12	接 合 面
	③	2.11	接 合 面	1.65	コンクリート側	1.82	接 合 面	1.97	コンクリート側
	平 均	2.00		1.76		1.94		2.11	
	基準値	σ _{ca} = 1.50 N/mm ² 以上							



図ー7 一面せん断強度試験供試体⁶⁾

た。コンクリートの許容せん断応力度と比較するため、コンクリート標準示方書 設計編⁸⁾に基づいてせん断強度の試験値から設計強度を以下の式で求めた。

せん断強度の特性値 τ_k

$$\tau_k = \tau_m - k\sigma \quad (1)$$

ここに、 τ_m ：せん断強度の試験値の平均値

k ：係数(=1.645) 特性値を下回る確率を 5%

σ ：試験値の標準偏差

せん断強度の設計強度 τ_d

$$\tau_d = \tau_k / \gamma_m \quad (2)$$

ここに、 γ_m ：コンクリートの材料係数 (=1.3)

設計せん断強度の計算結果を表ー4に示す。その結果、道路橋示方書Ⅲ(H24)で規定されている接合面におけるコンクリートの許容せん断応力度 ($\tau_{ba} = 0.03 \cdot \sigma_{ck} = 1.5 \text{ N/mm}^2$) 以上のせん断強度を確認した。

各接合面モデルで、せん断強度が大きい供試体と小さい供試体を表ー4から選定し、破壊面の状態を確認した。

確認した破壊面の状況とせん断強度を表ー5に示す。桁側モデルでは、接合面にエントラップトエアの量が多いとせん断強度が低下する。また、床版側モデルおよび桁側モデルに関係なく、接合面にある粗骨材の量が多いとせん断強度が大きくなる傾向があった。

3. 設計方法

3.1 断面力の算出方法

コッター床版と桁は、充填する無収縮モルタルによって付着し、完全剛結合となるので、床版合成後の死荷重による断面力は、図ー8に示すように桁と床版を一体化した連続ラーメン構造のフレーム解析により算出した。この場合、図ー9に示すようにラーメン隅角部の剛域を考慮し、床版支点部の検討位置は剛域端部とした。

床版合成前の床版自重とプレストレス 2 次力による断面力は、連続梁から連続ラーメン構造への構造系変化による不静定 2 次力を考慮した。

3.2 既設スターラップの機械式鉄筋定着

既設のスターラップは、125mm ピッチで配置されており、配置間隔の施工精度が低いので、コッター床版に箱抜き孔を開けてスターラップを床版に定着することは困難である。また、道路橋示方書Ⅲ(S53年)の規定では、「ずれ止めは、・・・(中略)・・・スターラップ、フランジの鉄筋などを、ずれ止めに転用することができる。」とある。したがって、既設橋ではずれ止め鉄筋としていたスターラップと上フランジ筋を転用せずに、施工性を考慮して桁上フランジ上面で切断した。ただし、スターラップの機能を確保するため、切断したスターラップは、図ー10に示すように鋼管圧着定着工法により桁上フランジと床版との間に機械式鉄筋定着³⁾とした。道路橋示

表ー4 一面せん断強度試験結果

供試体の種類	パイプレタの有無	せん断強度 (N/mm ²)						
		試験値					特性値 (τ _k)	設計強度 (τ _d)
		①	②	③	平均 (τ _m)	標準偏差		
床版側モデル	なし	4.24	5.89	5.62	5.25	0.723	4.06	3.12
	あり	5.96	5.68	5.74	5.79	0.120	5.60	4.30
桁側モデル	なし	6.43	6.78	6.03	6.41	0.306	5.91	4.55
	あり	6.25	5.64	5.22	5.70	0.423	5.01	3.85

表ー5 一面せん断強度試験での破壊面（接合面）の状態

供試体の種類		床版側モデル		桁側モデル				
パイプ・レタ有無と番号		なしー①	ありー①	なしー②	ありー②			
せん断強度	N/mm ²	4.24	5.96	6.78	5.64			
破断面の状態								
	大きな気泡多数あり		大きな粗骨材多数あり		大きな粗骨材多数あり		粗骨材が少ない	

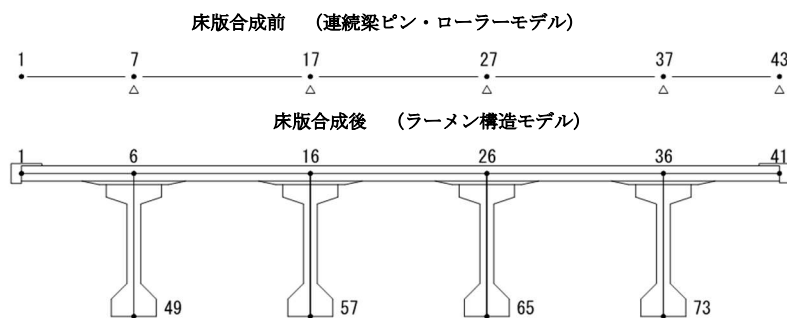


図-8 フレーム解析モデル

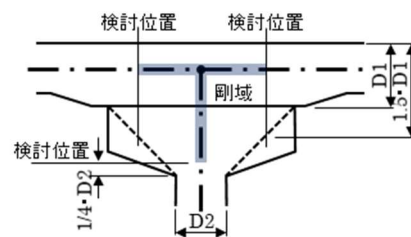


図-9 ラーメン隅角部の剛域

方書Ⅲ (H24) では、PC 部材の終局荷重作用時のせん断に対する照査は、図-11 に示すようにトラス理論に基づいて行われており、スターラップは、圧縮部のコンクリートに定着する必要がある。スターラップを桁上フランジ上面に定着しても、スターラップの機械式鉄筋定着部は、圧縮弦材の範囲内にあり、圧縮部のコンクリートに定着されているので、せん断に関する主桁の有効高は、既設橋の設計と同様に床版厚を含む高さとした。しかし、ねじりモーメントに関しては、道路橋示方書Ⅲ (H24) では、軸方向鉄筋を囲んだ範囲が有効となるため、床版厚を含まない桁のみを抵抗断面とした。

3.3 あと施工アンカーによるずれ止め鉄筋の配置

床版取替後のずれ止め鉄筋は、図-10 に示すように新たに桁上フランジにあと施工アンカーを打ち込み、桁と床版のずれ止め鉄筋とした。しかし、設計要領 第二集 橋梁設計編⁹⁾では「主桁ウェブが床版より伝達されるモーメントに対して安全であることを照査する」という規定があり、既設橋では、スターラップがその機能を果たしていた。床版取替後に配置するあと施工アンカーの鉄

筋量は、道路橋示方書Ⅲ (H24) で規定されている桁と床版の接合面の面積の 0.2% 以上とすること以外に、桁と床版の接合面に生じる曲げモーメントに対して、以下の方法により求めた必要鉄筋量以上を配置した。

- 1)あと施工アンカーの引抜き力 (T) とコンクリート支圧力 (C) の釣合い式による方法 (図-12 参照)
- 2)接合面を鉄筋コンクリート断面として設計する方法
この結果、スターラップをコッター床版に定着する箱抜きが不要となり、あと施工アンカーによるずれ止め鉄筋の鉄筋径を大きくすることで本数を減らすことができるので、コッター床版にあらかじめ設置する箱抜き孔を減らすことができた。

3.4 リブ付き床版による片持ち端部の設計

本橋では、工期短縮のため伸縮装置部を含む桁端部もコッター床版とすることにした。張出し床版の片持ち端部は、道路橋示方書Ⅲ (H24) では活荷重による曲げモーメントが 2 倍となるため、径間部の張出し床版構造に対して補強する必要がある。本橋での補強方法は、図-13 に示すようにリブ付き床版とし、部材断面高を高くする

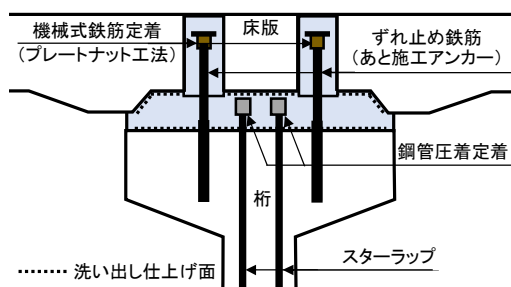


図-10 桁と床版部との接合部の構造

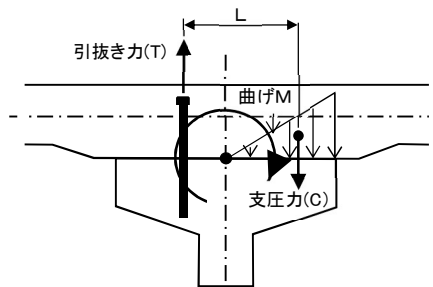


図-12 釣合い式による方法

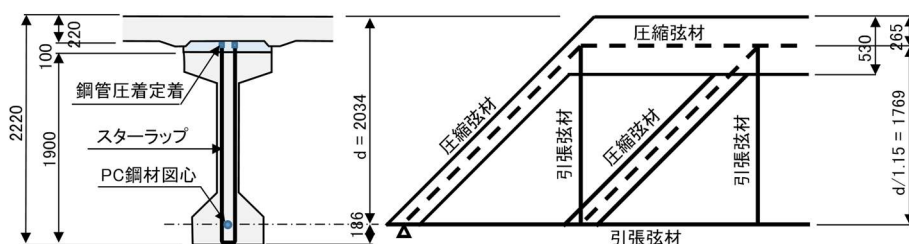


図-11 トラス理論における解析モデル

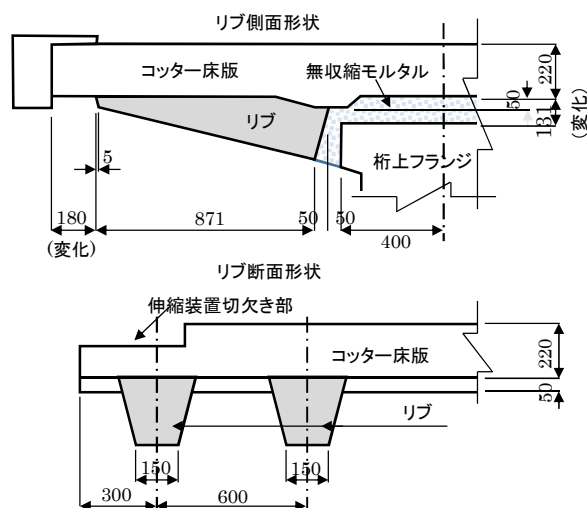


図-13 片持ち端部のリブ付き床版

ことで、活荷重による床版上縁の引張応力度の低減を図り、床版の断面図心を下げ、PC 鋼材の偏心量を大きくして、床版上縁のプレストレスによる圧縮応力度を大きくすることにした。

4. まとめ

PC 合成桁橋において、コッター床版による床版取替え工法の実施するにあたり、無収縮モルタルの付着による桁と床版の完全剛結合の施工方法を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 充填する無収縮モルタルと床版および桁の接合面は、道路橋示方書Ⅲ（H24）の打継目の規定にしたがってコンクリートの洗い出し仕上げ等を行えば、付着性能に必要な接着強度とせん断強度が得られ、桁と床版は、完全剛結合と評価した。ただし、洗い出し仕上げを行っていない接合面や既設橋のように桁と床版コンクリートの接合面での比較検証が必要と思われる。
- (2) 桁と床版が完全剛結合となることで、プレキャスト PC 床版の設計は、桁と床版を一体化した連続ラーメン構造のフレーム解析による設計方法が可能となる。
- (3) 桁と床版の付着は、無収縮モルタルにより確保したため、スターラップと上フランジ筋を切断した。あと施工アンカーによるずれ止め鉄筋は、コッター床版にあらかじめ設置する箱抜き孔を減らすことができ、鋼材配置が容易となり、施工性を向上するこ

とができた。

- (4) 活荷重による曲げモーメントが 2 倍となる張出し床版の片持ち端部は、リブ付き床版の採用により、桁端部のコッター床版を含めたフルプレキャストで施工が可能となった。

5. おわりに

本工事は、施工実績が少ない PC 合成桁橋のプレキャスト PC 床版による床版取替工事であり、鋼橋の床版取替工事とは違い、桁と床版を完全剛結合とする必要がある。このため、改めて道路橋示方書の考え方を確認し、桁と床版が完全剛結合とする施工方法とその確認方法および設計方法を提案した。本報告が今後の同種工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 渡邊輝康，櫻井正之，原健悟，駄原剛弘：コッター式継手を用いた橋梁用プレキャスト PC 床版の設計・施工技術の開発，第 30 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.615-620，2021
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 Ⅲ コンクリート橋編，pp.259-262，2012.4
- 3) 学校法人金沢工業大学，中日本高速道路株式会社，オリエンタル白石株式会社：特許 6845456，コンクリート橋のプレキャスト床版への取替方法，登録日 2021.3.2
- 4) 東日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法，pp.26-28，2020.7
- 5) 東日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，pp.Ⅲ-38-Ⅲ-40，2020.7
- 6) 高野真希子ほか：コンクリートの実用せん断強度の定式化と RC はりのせん断圧縮破壊強度算定への適用性，日本大学生産工学部研究報告 A，第 36 巻第 1 号，pp.41-47，2003.6
- 7) 佐藤立美：コンクリートのせん断強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.417-422，2008
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，pp.36-37，2017
- 9) 東日本高速道路株式会社：設計要領 第二集 橋梁建設編，pp.8-41，2016.8