

報告 RC 中空床版橋の床版打替工事における設計方法の妥当性検証

正木 守*1・渡邊 絵美*2・稲葉 尚文*3・島田 敏英*4

要旨：RC 中空床版橋の床版打替工事において、新設床版部に収縮低減型コンクリートを適用し、各種現地計測によって RC 中空床版橋の床版打替工法の設計方法と設計時の乾燥収縮度の低減方法の妥当性の検証を行った。実橋計測の結果より、新旧コンクリートは一体となって挙動していることを確認し、床版打替における設計方法は従来のフレーム計算に材齢差によるクリープ差、乾燥収縮差による不静定 2 次力を考慮することでよいことを確認した。また、2 次力による鉄筋応力の変動の割合は設計値と実測値は同程度であり、収縮低減型コンクリートを用いたことによる設計時の乾燥収縮度の低減方法は妥当であったと考えられる。

キーワード：RC 中空床版橋、床版打替、収縮低減型コンクリート、2 次力

1. はじめに

北陸自動車道の福井北 IC～丸岡 IC 間に位置する松岡高架橋は、5 径間連続 RC 中空床版橋である。供用開始から 40 年以上が経過しており、供用年数の増大、車両の大型化、凍結防止剤使用量の増加に伴いコンクリート床版の腐食・劣化が進行していることから、床版の打替が必要であった。本工事は、主版上面をウォータージェット工法で撤去し、張出し床版はワイヤーソーで切断後、新設床版部を再構築する工事であったが、改築に伴う材齢差によって改築後は合成桁と同様な挙動を示すため、新旧コンクリートの乾燥収縮差およびクリープ差による 2 次力の影響が大きくなることが分かった。その対策と

して、膨張材と収縮低減剤を使用した収縮低減型コンクリートを適用することで 2 次力の低減を図ることとしたが、道路橋示方書¹⁾において、合成桁のようにコンクリートのクリープ差および乾燥収縮差の影響を考慮する場合には乾燥収縮度を別途定めると示されているため、合成桁の挙動と収縮低減型コンクリートを適用した場合の乾燥収縮度を考慮した設計が必要であった。

本報告では、新設床版内部および既設部に各種計測機器を設置し、床版撤去時から完成後半年程度までの実橋の挙動を計測することで、設計方法の妥当性と収縮低減コンクリートを用いた効果を検証した結果について報告する。また、本工事で確認された施工に関する配慮事項も併せて示す。

2. 橋梁および床版打替工事の概要

2.1 橋梁概要

本橋の橋梁諸元を以下に示す。床版打替後の断面図を図-1、側面図を図-2 に示す。

工事名：北陸自動車道(特定更新等)九頭竜川橋他 2 橋 床版取替工事(その 1)

発注者：中日本高速道路株式会社 金沢支社 福井保全・サービスセンター

工事場所：福井県福井市玄正島町～福井県坂井市丸岡町

工期：平成 31 年 1 月 10 日～令和 3 年 4 月 28 日

構造形式：5 径間連続 RC 中空床版橋

橋長：73.4m

径間長：14.500m+3@14.800m+14.500m

有効幅員：10.000m→10.510m

横断勾配：2.500%(路肩折れ 2.000%)

床版厚：800mm

縦断勾配：0.480%(VCL=480.0m)

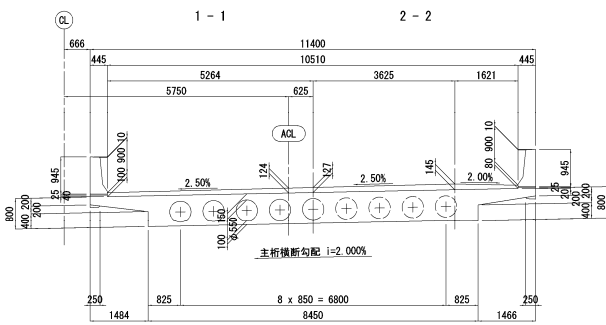


図-1 断面図

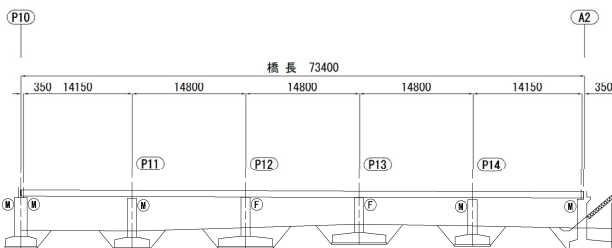


図-2 側面図

*1 (株) 富士ピー・エス 技術センターいわき研究所 工修 (正会員)

*2 (株) 富士ピー・エス 技術センター設計グループ (正会員)

*3 中日本高速道路 (株) 金沢支社 環境・技術管理部 (正会員)

*4 中日本高速道路 (株) 金沢支社福井保全・サービスセンター

2.2 床版打替工の概要

床版打替工事は図-3 に示す施工フローにて実施した。図-4 に再構築範囲を示す。床版打替時の主桁の剛性の変化によって主桁のたわみが変化するため、床版撤去前から支保工によって主桁を支持し、そのたわみをジャッキアップによってキャンセルした。

床版はつり工では主版の上面から 150mm の範囲をウォータージェット工法で撤去し、張出し床版はワイヤーソーで切断撤去した。その際、ウォータージェット工法によって主桁内の円筒型枠が損傷する箇所が発生した。これは、円筒型枠が腐食によって傷んでいたことが要因と考えられ、ウォータージェット工法の適用にあたっては、事前に十分な検討と慎重な施工が重要であることがわかった。損傷した箇所は型枠を修復し打替コンクリートを施工した。張出し床版は直角方向に PC 鋼材 (NAPP 鋼棒 20T) を標準間隔 750mm で配置し、床版上面へのひび割れの発生を防止した。

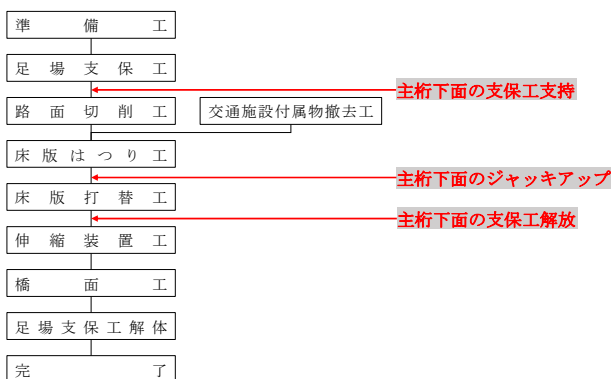


図-3 施工フロー

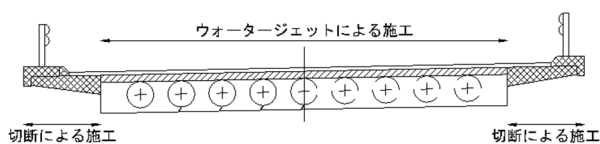


図-4 再構築範囲

3. RC 中空床版の床版打替の設計

3.1 設計方法

床版打替の設計はフレーム解析を用い、荷重は自重、新設橋面荷重、活荷重 (B 活荷重)、乾燥収縮差 (1 次+2 次)、乾燥収縮クリープ差 (1 次+2 次)、クリープ差 (1 次, 2 次) を考慮した。弾性係数比 (E_s/E_c) は 15 とした。打替後は、新設床版 ($f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$) と既設主版 ($f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$) とのクリープ差、乾燥収縮差による内部応力およびそれに対する 2 次断面力が発生する。そこで、クリープ差、乾燥収縮差による内部応力で発生した引張力は鉄筋応力に換算して足し合わせを行った。また、床版打替後の断面剛性の算出には新旧コンクリー

トの弾性係数比により換算した合成断面を用いた。中間支点上の応力度足し合わせのイメージを図-5 に示す。

3.2 乾燥収縮度の設定および計算結果

打替のコンクリートは、当初、収縮補償型の膨張コンクリートを使用する予定であったため、コンクリート標準示方書 2007 年【設計編】²⁾を参考に乾燥収縮度を設定した。式(1)に示すように、コンクリート標準示方書に示されるコンクリートの収縮ひずみの最終値 1200μ ($800\mu \times 1.5$) が、使用した膨張材の膨張ひずみ (カタログ値 150μ) によって低減した場合の比率を道路橋示方書に示される乾燥収縮度 200×10^{-6} に乗じることで求め、膨張材を使用したコンクリートの乾燥収縮度を 175×10^{-6} と設定した。

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\varepsilon_{cs} - \varepsilon_{ex}}{\varepsilon_{cs}} \times \varepsilon_{s1} \quad (1)$$

ここに、 ε_{s2} : 膨張材を使用したコンクリートの乾燥収縮度

ε_{cs} : コンクリート標準示方書に示されるコンクリートの収縮ひずみの最終値 (1200×10^{-6})

ε_{ex} : 膨張ひずみのカタログ値 (150×10^{-6})

ε_{s1} : 道路橋示方書に示される乾燥収縮度 (200×10^{-6})

膨張材を用いたコンクリートを適用した場合の橋軸方向の断面力および鉄筋応力の計算結果を図-6、図-7 に示す。主桁上縁の打替コンクリートの収縮による 2 次力により負曲げモーメントが発生した。鉄筋応力に関しては、打替コンクリートの乾燥収縮の影響が大きく、中間支点付近において制限値を超える結果となった。そこで、収縮低減剤 (収縮ひずみ低減率のカタログ値 35%) を併用して収縮ひずみの低減を図ることとし、式(2)により乾燥収縮度を 105×10^{-6} に設定した。

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\{\varepsilon_{s1} \times (1 - a/100)\} \times 1.5 - \varepsilon_{ex}}{\varepsilon_{cs}} \times \varepsilon_{s1} \quad (2)$$

ここに、 ε_{s3} : 膨張材と収縮低減剤を使用したコンクリートの乾燥収縮度

ε_{s1} : コンクリート標準示方書²⁾の式 (解

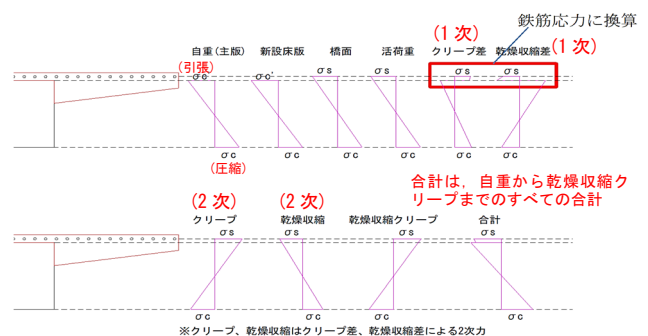


図-5 応力度足し合わせのイメージ (中間支点)

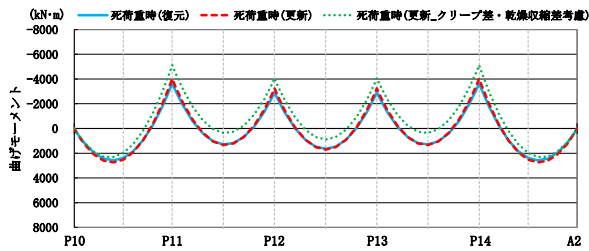


図-6 曲げモーメント

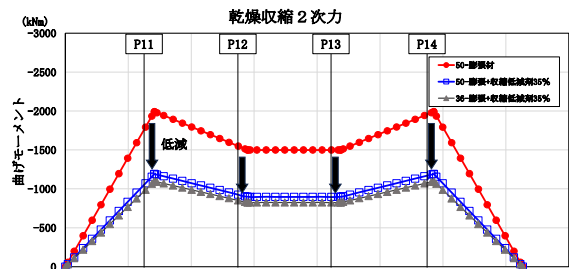


図-8 乾燥収縮による2次力の曲げモーメント

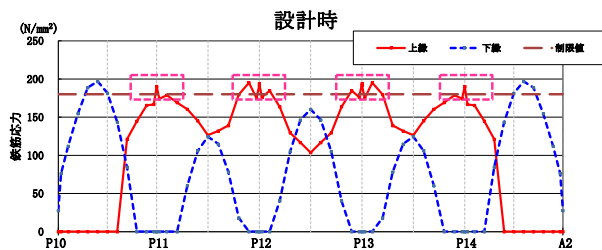
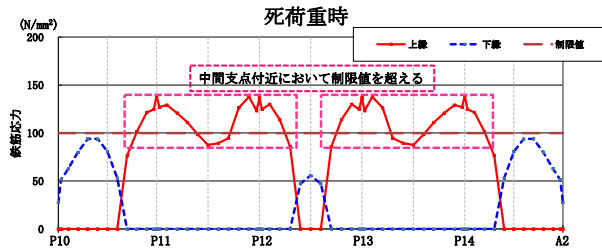


図-7 橋軸方向鉄筋応力度(膨張材のみ)

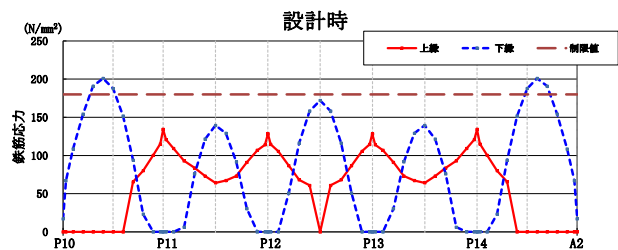
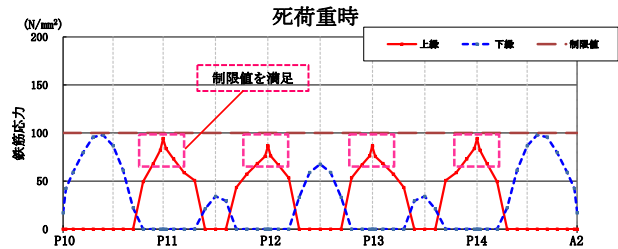


図-9 橋軸方向鉄筋応力度(収縮低減後)

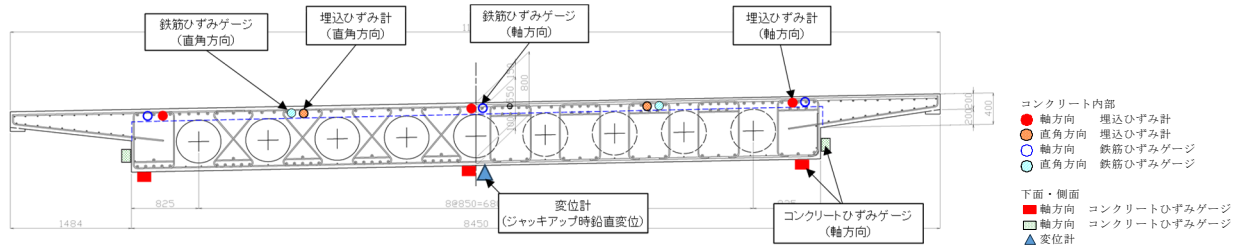


図-10 計測位置の断面図

5.2.4) に示される収縮ひずみの最大値の最終値 (800×10^{-6})

α : 収縮低減剤の低減率 (35%)

乾燥収縮の2次力による曲げモーメントの比較を図-8, 収縮低減剤を併用した収縮低減型コンクリート使用時の鉄筋応力を図-9に示す。膨張材と収縮低減剤を併用することで乾燥収縮による2次力の曲げモーメントが低減した。さらに、中間支点上上縁側は、ウェブ部に加えて、中空ボイド上の既設鉄筋 D13 を 11 本撤去して D32 を 22 本配置し、本数を増やすことで制限値を満足する結果となった。

4. 計測概要

4.1 計測の目的

新設コンクリート床版と既設コンクリートの構造一体性や、クリープ差・乾燥収縮差などの2次力の影響を確認するために、実橋の計測結果と設計計算結果を比較することにより、収縮低減型コンクリートを適用した場合

の RC 中空床版橋打替における設計方法の妥当性および収縮低減対策の効果について検証を行った。また、収縮低減型コンクリートの特性値を把握するため、先行して室内試験も実施した。

4.2 計測位置

計測区間は5径間のうち、P10~P13までの3径間とし、各径間支間中央と中間支点(P11, P12), 1/4径間, 3/4径間にゲージ類を設置した。計測位置の断面図を図-10に示す。新設コンクリート内部に埋込みひずみ計と鉄筋ゲージを設置し、また既設部下面と側面にコンクリートひずみゲージを設置した。新設コンクリート内部には埋込みひずみ計と鉄筋ひずみゲージを軸方向(断面の左側, 中央, 右側の3箇所)と直角方向(断面の左側と右側の2箇所)に設置した。既設部には下面と側面の軸方向(断面の左側と右側にそれぞれ2箇所)にコンクリートひずみゲージを設置した。また、支間中央に変位計を設置しジャッキアップ時の鉛直変位を計測した。

表-1 コンクリート配合

配合	W/C (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	膨張材 (kg/m ³)	s/a (%)	骨材 (kg/m ³)			高性能 AE 減水剤 (kg/m ³)	収縮低減剤 (kg/m ³)
						細骨材		粗骨材		
						粗砂	細砂			
収縮低減型コンクリート	42	162	366	20	45.0	543	233	978	調整	6
比較配合	42	162	386	-	45.0	543	233	978	調整	-

※高性能AE減水剤は目標のスランプ値となるように調整した。
 ※収縮低減剤については、単位水量に内割り添加とした。
 ※AE剤については、収縮低減剤を投入する際に、外割後添加で空気量の調整を行った。

表-2 コンクリートの特性値試験

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A1108
割裂引張強度	JIS A1113
弾性係数	JIS A1149
自己収縮ひずみ	JCI「超流動コンクリート研究委員会報告書2 [付録1]」
凝結始発試験	JIS A1147
乾燥収縮ひずみ	JIS A1129
線膨張係数	NEXCO JHS439
断熱温度上昇試験	㈱東京理工社製装置
膨張ひずみ	JIS A6202

5. 計測結果と設計値の比較

5.1 収縮低減型コンクリートの特性値

収縮低減型コンクリートの特性値を把握するため、本工事で使用した収縮低減型コンクリート配合と収縮低減対策を実施しない比較配合について室内試験を実施した。コンクリート配合を表-1に示す。収縮低減型コンクリートは実橋で施工したコンクリートと同じ配合であり、膨張材を20kg/m³、収縮低減剤を6kg/m³を使用した。膨張材はセメントの内割り添加、収縮低減剤は単位水量に内割り添加とした。比較配合は、膨張材も収縮低減剤も使用しなかった。実施したコンクリートの特性値試験一覧を表-2に示す。このほか、実橋からサンプリングしたコンクリートコアについても、圧縮強度、割裂引張強度、弾性係数について試験を行った。

乾燥収縮ひずみの試験結果を図-11、膨張ひずみの試験結果を図-12に示す。材齢364日における乾燥収縮ひずみは、比較配合よりも収縮低減型コンクリートの方が215μ小さく、その低減率は約30%であった。設計においてはコンクリート標準示方書に示される収縮ひずみの最大値の最終値(800×10⁻⁶)に対して35%の低減を見込んでいるため、収縮低減剤を用いた場合の乾燥収縮ひずみは520μであり、室内試験結果とほぼ同等であった。材齢7日における拘束膨張ひずみは、比較配合は50μの収縮ひずみを呈しているのに対して、収縮低減型コンクリートは199μの膨張となっており、膨張材の効果が確認された。室内試験結果の方がカタログ値よりも若干高い結果となったが、設計で見込んだ150μと同程度であった。

5.2 床版打替工法における支保工の必要性

床版部の撤去によって主桁の剛性が小さくなるためた

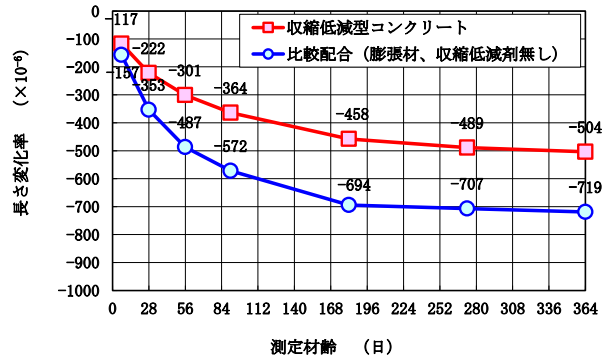


図-11 コンクリートの乾燥収縮ひずみ

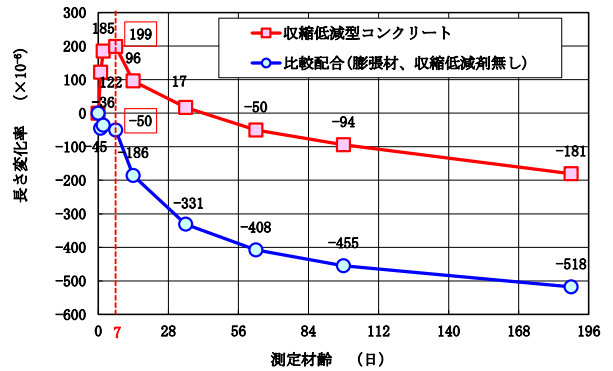


図-12 コンクリートの拘束膨張ひずみ

わみが生じる。また、改築後の死荷重の増加により床版打替後のたわみは打替前よりも大きくなるため、主桁下縁の鉄筋応力が制限値を満足しなくなる。そこで、床版をはつる前から打替床版コンクリート打設完了までは主桁下面を支保工で支持することでたわみの発生を抑制し、また、床版打替後のたわみが打替前のたわみと同等となるように床版撤去後にジャッキアップを行ってから新設床版部のコンクリートを打設した。ジャッキアップの実施結果を表-3に示す。また、撤去時からジャッキダウンまでの主桁下面のコンクリートひずみを計測した結果、床版撤去時に支間中央において169~193μのひずみの変動が確認された。これは支保工のなじみによるものと考えられ、なじみによって主桁下縁に生じたと考えられる鉄筋応力を下面のコンクリートひずみの計測値から計算した。床版撤去時の下縁鉄筋応力の設計値となじみ分を考慮した鉄筋応力の結果を図-13に示す。支保工のなじみによって25~29N/mm²程度の鉄筋応力が増加することが確認された。本工事でジャッキアップを実施しているため、このなじみ分はキャンセルされているが、

表-3 ジャッキアップ結果

径間	設計値					実測値
	既設たわみ ^{※1}			施工時たわみ		
	自重	橋面	自重+橋面	撤去後自重 ^{※2}	必要ジャッキアップ量 ^{※3}	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
P10-11	3.2	0.6	3.7	4.9	-5.0	-6.9
P11-12	1.1	0.2	1.3	1.7	-1.8	-2.9
P12-13	1.8	0.3	2.2	2.8	-2.9	-3.1
P13-14	1.1	0.2	1.3	1.7	-1.8	-2.5
P14-A2	3.2	0.6	3.7	4.9	-5.0	-6.1

※1 既設の自重および橋面荷重によるたわみは既設断面にて算出
 ※2 撤去後およびジャッキアップによるたわみは床版撤去後の断面にて算出
 ※3 ジャッキアップ量の実測値は支間中央に設置した変位計にて管理

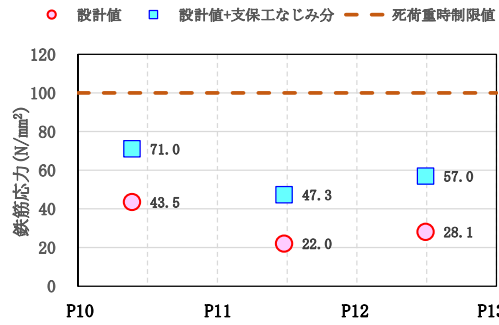


図-13 床版撤去時の下縁鉄筋応力

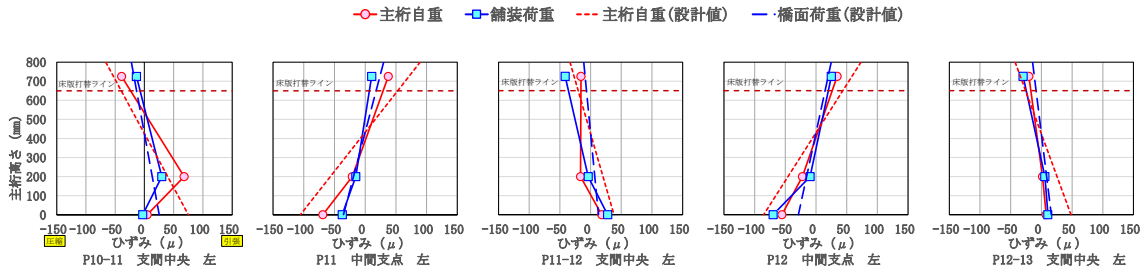


図-14 コンクリートひずみ分布

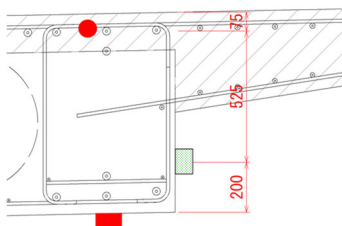


図-15 高さ方向計測位置

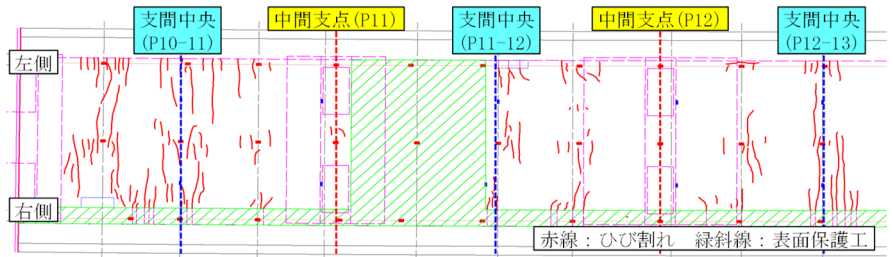


図-16 橋梁下面ひび割れ状況

仮受けの支保工の設置は自重による変形が起きないように、あらかじめジャッキアップを行って荷重を載荷するなど、施工方法を工夫する必要があることを確認した。

5.3 新旧コンクリートの構造一体性

実橋計測から得られた主桁左側のコンクリートのひずみ分布を図-14に示す。コンクリートのひずみ分布は図-15に示す位置に設置した既設部下面と側面のコンクリートひずみゲージ、新設コンクリート内部の埋込ひずみ計の3点の計測結果を用いている。図中の主桁自重は支保工撤去前後のひずみ変化量、舗装荷重は舗装施工前後のひずみ変化量から算出した。また、図中に示した設計値は全断面有効とした場合のコンクリートひずみの結果を参考値として示している。

主桁左側では、支間中央は上縁が圧縮、下縁が引張、中間支点は上縁が引張、下縁が圧縮となる傾向を示し、連続桁の挙動を示していることを確認した。新設部と既設部の境界面は埋込ひずみ計と側面のコンクリートひずみゲージの間に存在しているため、この区間のひずみ分布の勾配が設計値のひずみ分布の勾配と同じ方向であれば新旧コンクリートの構造一体性は確保されていると判断できる。支間中央、中間支点ともに両区間の勾配は概

ね設計値と同じ方向を示しているため、新旧コンクリートの構造一体性は確保されていると考えられる。また、実橋の挙動が設計値と同様の挙動を示していることから、床版打替における設計は、従来のフレーム計算にクリープ差および乾燥収縮差の2次力を考慮する方法で良いことを確認した。なお、支間中央の既設部下面に設置したコンクリートひずみゲージの計測結果は、P12-13支間中央右を除き、ほとんどの箇所設計値よりも小さくなった。図-16に示すように、本橋はRC構造であり、工事着手時点で主桁下面全体にひび割れが発生していた。ひび割れ注入による補修は行われておらず、ひび割れによりコンクリートの応力が鉄筋に移行したため、支間中央の下面ひずみの計測結果は設計値よりも小さい傾向であったと考えられる。

5.4 膨張材と収縮低減剤の効果

新設部の鉄筋に設置したひずみゲージの計測結果より、主桁自重、橋面荷重、2次力による鉄筋の応力成分を算出し、設計値と比較を行うことで実橋での収縮低減対策の効果を確認した。表-4に死荷重時の上縁の軸方向鉄筋応力を示す。ここでの鉄筋応力の設計値は、実橋から採取したコンクリートコアから得られた弾性係数と新設

表-4 上縁軸方向鉄筋応力の設計値

	(N/mm ²)				
	P10-P11	P11	P11-P12	P12	P12-P13
主桁自重	90.8	55.4	104.0	51.6	104.6
橋面荷重	30.6	18.6	34.9	17.4	35.1
2次力	-21.1	22.6	-104.6	19.7	-71.1
死荷重時	100.3	96.7	34.3	88.7	68.6

表-5 150日時点の設計値

	(N/mm ²)			
	P11		P12	
	最終値	150日時点	最終値	150日時点
主桁自重	55.4	55.4	51.6	51.6
橋面荷重	18.6	18.6	17.4	17.4
2次力	22.6	18.8	19.7	16.3
死荷重時	96.7	92.9	88.7	85.3

表-6 鉄筋応力の設計値と実測値の比較

	(N/mm ²)									
	設計値	P11 実測値				設計値	P12 実測値			
		左側	中央	右側	平均		左側	中央	右側	平均
主桁自重	55.4	39.1	34.8	37.4	37.1	51.6	39.4	23.7	46.4	36.5
橋面荷重	18.6	9.2	7.0	14.8	10.3	17.4	3.6	1.8	3.6	3.0
2次力 (クリープ, 乾燥収縮)	18.8	8.9	12.4	15.0	12.1	16.3	11.8	6.9	17.6	12.1
合計 (死荷重時)	92.9	57.2	54.2	67.2	59.5	85.3	54.8	32.4	67.6	51.6

コンクリートの弾性係数の実測値で断面剛性を計算し、鉄筋応力を再計算した結果である。

設計値の鉄筋応力は、主桁自重、橋面荷重、2次力による曲げモーメントよりそれぞれの応力成分を算出した。図-17 は中間支点 (P12) の鉄筋ひずみの実測値を示したものである。支保工撤去時、壁高欄・舗装荷重が載荷されたときのひずみをそれぞれ主桁自重、橋面荷重のひずみとした。材齢 150 日以降の平均ひずみから、主桁自重および橋面荷重による鉄筋ひずみを引いたものを 2次力による鉄筋ひずみと仮定した。それらの実測ひずみと鉄筋の弾性係数を乗じることで実測値の鉄筋応力成分を算出した。

また、設計値の 2 次力は最終値であるため、図-11 に示した乾燥収縮ひずみの室内試験結果を基に低減した。低減率は収縮低減型コンクリートの 364 日の実測値 (-504 μ) と近似曲線から計算した 150 日時点の計算値 (-419 μ) の比より 0.83 とした。設計値の 2 次力を低減した結果を表-5 に示す。

中間支点上に着目した鉄筋応力の設計値と実測値の比較結果を表-6 に示す。実測値の鉄筋応力の合計は設計値に対して 60%程度であったが、合計値に対する 2 次力の割合は、中間支点 (P11) では設計値が 20%、実測値が 20%、中間支点 (P12) では設計値が 19%、実測値が 23%であり、設計値と実測値は同程度であった。以上より、鉄筋応力成分のうち、2 次力の成分の割合が同程度であったため設計で想定した乾燥収縮度は妥当であったと考えられる。

6. まとめ

RC 中空床版橋の床版打替工事において、新旧コンクリートのクリープ差や乾燥収縮差による影響を小さくするために、新設コンクリートに膨張材と収縮低減剤を用いた収縮低減型コンクリートを適用し、室内試験および

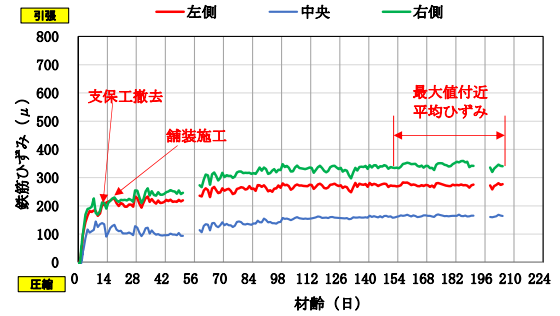


図-17 中間支点 (P12) 鉄筋ひずみ

実橋計測によって、設計方法の妥当性の検証および膨張材と収縮低減剤の効果について確認した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 床版打替の施工においてウォータージェット工法を採用する場合、事前の検討と慎重な施工が重要であることを確認した。また、床版撤去時には支保工による支持の必要があるが、仮受けの支保工の設置は自重による変形が起きないように、あらかじめジャッキアップを行って荷重を載荷するなど、施工方法を工夫する必要があることを確認した。
- 2) 室内試験によって収縮低減型コンクリートの特性値を確認した結果、設計で設定した膨張材による膨張ひずみと収縮低減剤による収縮ひずみの値は実測値と同程度であり、設計値の妥当性を確認した。
- 3) 実橋に設置した埋込ひずみ計とコンクリートひずみゲージの計測結果と設計値の比較より、新旧コンクリートは一体となって挙動していることを確認し、床版打替における設計は従来のフレーム計算でクリープ差、乾燥収縮差による 2 次力を考慮する方法が妥当であることを確認した。
- 4) 実橋に設置した鉄筋ひずみゲージから求めた鉄筋応力成分と設計値の比較により、2 次力によるものと考えられる鉄筋応力成分の比率は実測値と設計値は概ね一致していることから、設計で想定した乾燥収縮度は妥当であることを確認した。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 コンクリート橋・コンクリート部材編, pp.46-53, 2017.11
- 2) (公社) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 設計編, p45, 2008.3