

# 連続合成桁コンクリ - ト床版における

## 膨張材による引張応力の抑制効果

阪神高速道路(株) 技術部技術審査・品質管理グループ 寺岡 正人  
阪神高速道路(株) 京都建設部調査設計・審査グループ 谷口 信彦  
阪神高速道路(株) 京都建設部調査設計・審査グループ 足立 幸郎

### 要 旨

連続合成 I 桁は、床版に主桁の一部としての機能も期待することによりコスト縮減が可能であり、床版の適切な設計手法の確立による信頼性の向上に伴い、近年の実橋において多数採用される傾向にある。油小路線において、設計の合理化、コスト縮減の観点から鋼 6 径間連続合成 I 桁を試験採用することとなり、設計の結果、一部の中間支点部において死荷重時にひび割れを許容しないこととする為、膨張コンクリ - ト床版を採用することとなった。本研究では、当社で初めての連続合成 I 桁であること及び初めて膨張コンクリ - ト床版を採用することから中間支点部と施工ブロック端における応力計測を実施し、連続合成桁床版における膨張コンクリ - トの膨張効果について調査を行った。

調査の結果、収縮補償程度の膨張コンクリ - トであっても引張応力の低減に効果的であることが確認できた。

**キ - ワ - ド**：連続合成 I 桁，膨張コンクリ - ト床版膨張コンクリ - ト床版，引張応力及びひび割れ抑制

### はじめに

合成桁は、鋼桁とコンクリ - ト床版を頭付スタッドジベルにより剛結させることで床版を設計上の主桁構造の一部と考える桁構造であり、より経済的な設計が可能であることから、日本においても 1960 年代を中心に架橋実績が増加していた。

しかし、1970 年代に重量違反車両の増加や交通量の増大などによると考えられる RC 床版のひび割れ・陥没破壊が確認されるに従い、床版を桁構造の一部と考える合成桁床版では、床版が一度損傷した場合、桁全体の安定性が崩れるばかりでなく、その補修が困難であることから採用が見送られてきた。

その後、床版の研究が進み、疲労損傷に対応するだけの床版厚・鉄筋量の確保、雨水浸透防止の

ための防水層の設置、床版鉄筋における許容応力度の低減などを実施することにより、所定の強度・耐久性を有する床版の設計手法が確立された。

以上のように、床版の信頼性が向上したことから、コスト縮減が可能な連続合成 I 桁は、近年の実橋において多数採用される傾向にある。

今般、京都市道高速道路 2 号線の一部区間において、コスト縮減を目的として 6 径間鋼連続 I 桁 1 連に連続合成桁を採用するに当たり、負曲げが作用する中間支点部において、死荷重時にひび割れ発生を許容しないことを設計条件とするため、膨張コンクリ - ト床版を採用することとなった。

本研究では、当社で初めての連続合成 I 桁であること及び初めて膨張コンクリ - ト床版を採用することから中間支点部と施工ブロック端における応力計測を実施し、連続合成桁床版における実橋

レベルでの膨張コンクリートの引張応力の抑制効果（以下、膨張効果という）について調査を行った。

## 1. 対象橋梁の構造及び計測の概要

### 1-1 対象橋梁の構造諸元

- 橋梁形式；鋼 6 径間連続合成 I 桁橋
- 橋長；237.7m(36.2+3×40+41.1+40.4m)
- 幅員；19 m
- 設計荷重；B 活荷重
- 床版厚；25 cm
- 支承形式；機能分離支承

### 1-2 設計の概要

本橋梁は、「連続合成桁設計の手引き」<sup>1)</sup>に基づき設計を行い、死荷重載荷時にコンクリートにひび割れを生じさせないこと、活荷重載荷時にひび割れ幅が 0.2mm を上回らないことを条件として設計を行った。一般図を図-1 に示す。

設計の結果、P81・P85 支点の G1・G7 桁上において死荷重時のコンクリートの引張応力が、設計圧縮強度 36N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを採用しても許容値を上回り、活荷重時のひび割れ幅についてはすべての外桁、内桁において許容ひび割れ幅 0.2mm を満足できないことが判明した（表-1 参照）。そこで、桁のフランジ断面の増加による応力低減を検討したところ、大幅な鋼重増となり不経済であることから、近年、他団体に採用実績のある膨張材を用いることにより乾燥収縮ひずみを 200μ から 150μ に緩和することで、設計条件を満足することとした。

設計段階における膨張材の添加量の検討としては、一般的に膨張材による膨張量は添加量に比例すること、鉄筋量の平方根に比例することが知ら

表-1 詳細設計時の設計計算結果

		コンクリートの引張応力(死荷重時) σ(N/mm <sup>2</sup> )			ひび割れ幅照査 活荷重時(mm)		
		膨張材未使用 A	膨張材使用 B	膨張効果 C=A-B	膨張材未使用 D	膨張材使用 E	F=D-E
P81	外桁(G7)	2.44	2.30	0.14	0.229	0.199	0.030
	内桁(G4)	1.78	1.76	0.02	0.217	0.178	0.039
P82	外桁(G7)	2.22	2.11	0.11	0.247	0.191	0.056
	内桁(G4)	1.38	0.93	0.45	0.211	0.153	0.058
P83	外桁(G7)	2.16	2.04	0.12	0.226	0.187	0.039
	内桁(G4)	1.45	1.44	0.01	0.200	0.151	0.049
P84	外桁(G7)	1.98	1.88	0.10	0.227	0.181	0.046
	内桁(G4)	1.41	1.32	0.09	0.210	0.154	0.056
P85	外桁(G7)	2.52	2.37	0.15	0.215	0.186	0.029
	内桁(G4)	1.86	2.10	-0.24	0.198	0.161	0.037

黄色は、許容値オーバーを示す。

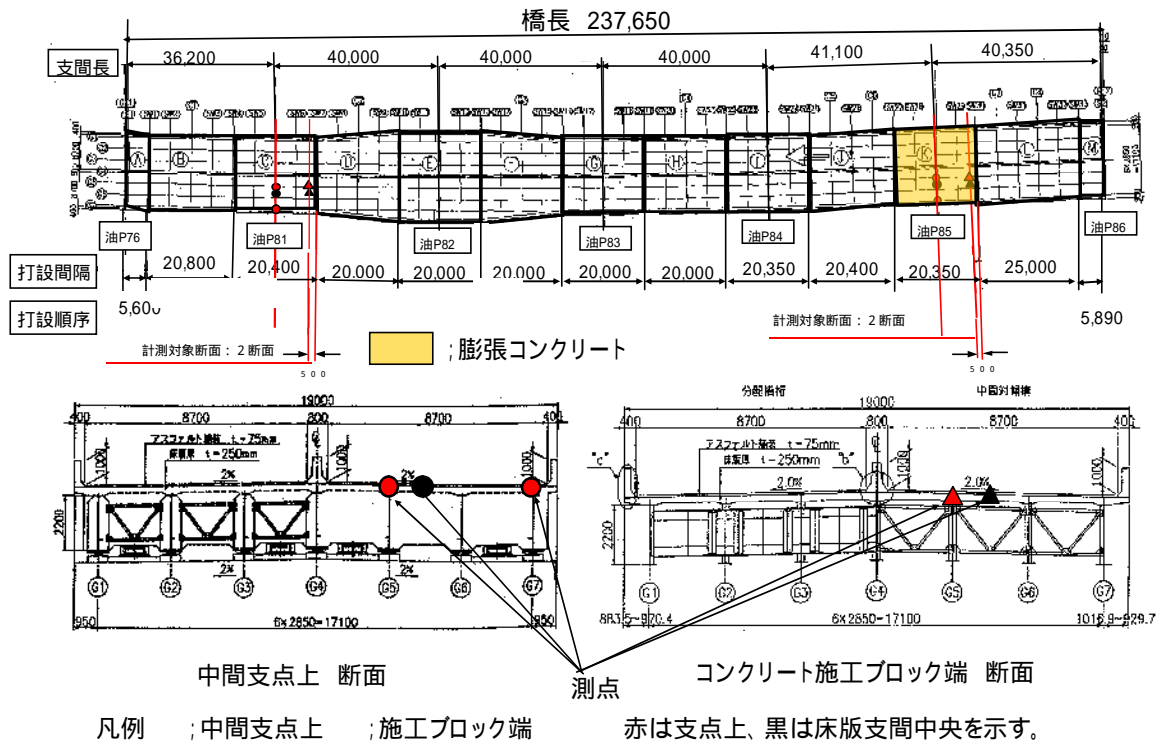


図-1 対象橋梁一般図及び計測概要図

表-2 膨張コンクリートの配合設計

呼び強度	スランブ	骨材寸法	セメント種別	W/C (%)	S/a (%)
36	8	20	普通	41	44.9
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	膨張材 (C S A)
160	360	771	992	3.9	30

れており、膨張材の効果を高めようとするれば、膨張材の添加量を増やすことが考えられるが、膨張材の添加量を多くすると膨張反応による結晶体が多くなり、将来的なコンクリートとして強度低下などの懸念があることから、今回の設計ではPC床版での施工試験を行った報告（膨張材の添加量 30kg/m<sup>3</sup> で 80μ のひずみ抑制効果）<sup>2)</sup> を参照して従来の収縮補償コンクリートとして示されている 30kg/m<sup>3</sup> とした。

1-3 計測の方針

その後、床版の設計条件の見直しを行ったところ、「連続合成桁設計の手引き」に示される死荷重載荷時にひびわれを生じさせないことは床版防水工施工時までにはひび割れを生じさせないことと解釈すると、後死荷重のうち壁高欄・中央分離帯荷重のみを考慮すればよいと考えられ、詳細設計時に死荷重として考慮されている裏面板荷重（全死荷重の 10%）を考慮しないこととすれば、応力の超過率が最大でも 5% 程度である本設計では膨張コンクリートを用いなくても許容応力を満足することとなり、普通コンクリートを採用することとした。しかしながら、当社において床版に膨張コンクリートを採用した事例がないことから、P85 支点ブロックに膨張コンクリートを試験的に打設し、ほぼ同じ負曲げを受ける P81 支点の発生応力と比較することにより膨張コンクリートの効果を検証することとした。

測定位置としては、膨張効果を確認することを目的に、対象中間支点上及びこれを含む施工ブロック端付近（片側のみ）の 2 断面について比較することとし、主桁上と床版支間中央とでは鋼材（床版鉄筋、主桁）によるコンクリートへの拘束条件が異なると考えられることから、G5 桁上並びに G5～G6 桁間の床版支間中央部の 2 点にお

いて橋軸方向の鉄筋ひずみとコンクリートひずみ（床版支間中央部のみ）を計測することとした。尚、設計段階で最も大きな引張応力が発生している中間支点 G7 桁上においても橋軸方向の鉄筋ひずみを測点し、発生応力を計測することによって設計応力と比較することとした。また、施工ブロック端においては、橋軸直角方向のひずみも測定することで、支間中央部のコンクリートによる橋軸直角方向の中間支点部のコンクリートに対する拘束の影響も確認した（図-1 参照）。

計測期間は、中央分離帯及び高欄打設完了時までとした。

1-4 計測の方法

表-3 及び表-4 に選定した測点と計測器の設置数を示す。床版に発現するコンクリートのひずみは、主に鉄筋に貼付した溶接型ひずみゲージ（写真-2）で計測した鉄筋のひずみによって評価した。また、床版支間中央においては、鉄筋ひずみに加えて、埋込み型ひずみ計（写真-2）を用いてコンクリートひずみを直接計測した。また、打設条件が同じ膨張コンクリートと普通コンクリートの硬化初期段階における基本性状を確認する目的で、各々のコンクリートの打設ブロックを 1 箇所選定し、無応力容器で周囲との縁切りを行い、その中に埋込型ひずみ計を設置して無拘束状態でのコンクリートひずみを計

表-3 測定数量一覧表（中間支点上）

着眼断面 コンクリートの種類	油P81上 普通コンクリート			油P85上 膨張コンクリート			
	G5～G6 床版支間中央	G5主桁上	G7主桁上	G5～G6 床版支間中央	G5主桁上	G7主桁上	
鉄筋溶接ゲージ	上側鉄筋	1	1	1	1	1	
	下側鉄筋	1	1	1	1	1	
コンクリートひずみ計	上側	1	-	1	-	-	
	下側	1	-	1	-	-	
無応力計	鉛直	-	1	-	1	-	
コンクリート温度	上側	1	-	1	-	-	
	下側	1	-	1	-	-	
計		6	3	2	6	3	2

表-4 測定数量一覧表（施工ブロック端）

着眼断面 コンクリートの種類	油P81打設端 (P76側) 普通コンクリート		油P85打設端 (P86側) 膨張コンクリート			
	G5～G6 床版支間中央	G5主桁上	G5～G6 床版支間中央	G5主桁上		
鉄筋溶接ゲージ	橋軸方向	上側鉄筋	1	1	1	1
		下側鉄筋	1	1	1	1
	橋直方向	上側	1	1	1	1
		下側	1	1	1	1
コンクリート温度	上側	1	-	1	-	
	下側	1	-	1	-	
計		6	4	6	4	

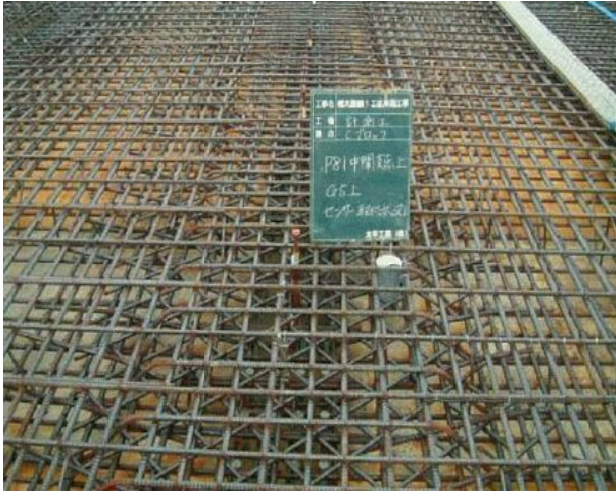


写真-1 配筋状況

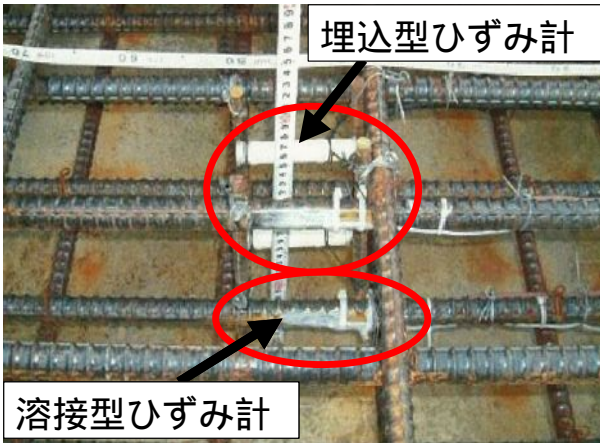


写真-2 溶接及び埋込型ひずみ計

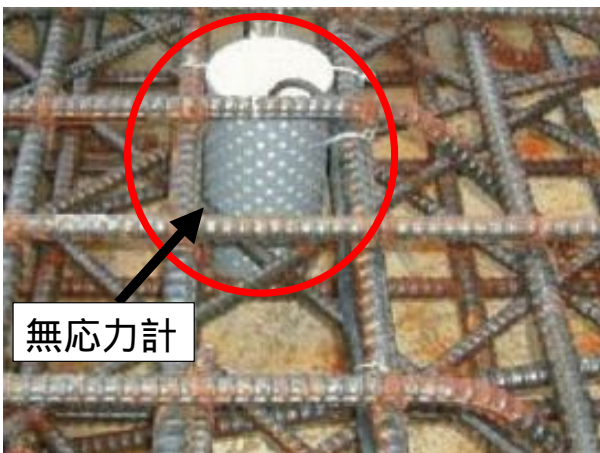


写真-3 無応力計

測した(写真-3)。

計測頻度は、打設後3日間は30分間隔、以降7日まで1時間間隔、これ以降は2時間間隔で行った。

## 2. 鉄筋およびコンクリートひずみの計測結果

鉄筋のひずみの読み値からコンクリートのひずみに換算する手法については、供試体を用いて両者のひずみを計測・比較した既往の研究<sup>3)</sup>において提案されており、今回の計測についても、中間支点上のG5~G6支間中央において、鉄筋ひずみ計とコンクリートひずみ計を並置して計測し(写真-2参照)、既往の研究との比較を行った。計測の結果、既往の研究と同様に鉄筋とコンクリートのひずみは同様な履歴を呈することが確認(図-2参照)され、鉄筋ひずみ計の読み値からコンクリートひずみを換算することが可能であることが確認された。

図-3に中間支点上G7桁上橋軸方向(上側鉄筋位置)における鉄筋ひずみ計から換算されたコンクリートひずみの経時変化を示す。当該箇所は、設計計算上最も引張応力が発生した部位である。ひずみの経時変化は、膨張コンクリート部ではコンクリート打設直後から水和反応に伴い膨張材の効果が現れ、材令約1日目程度で最大値120 $\mu$ 程度の圧縮ひずみとなった後、硬化収縮により引張に転じて材令7日目には硬化収縮によりひずみの変化が小さくなり、材令10日目には50 $\mu$ 程度

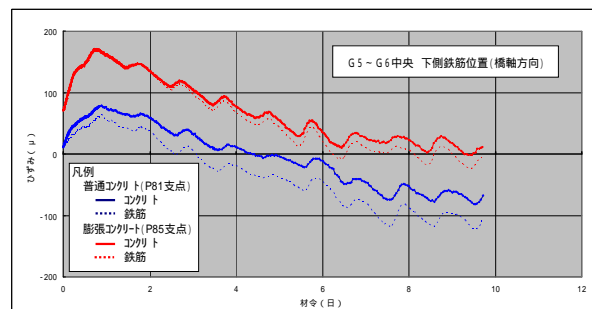


図-2 コンクリートと鉄筋ひずみの経時変化(橋軸方向)

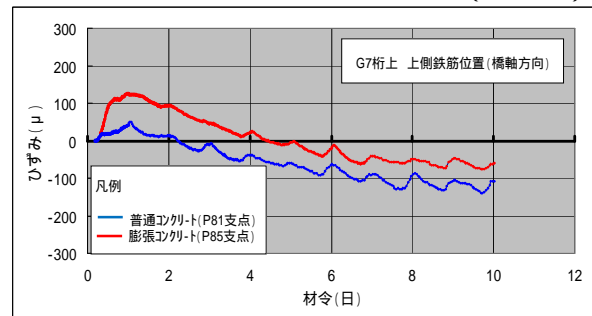


図-3 コンクリートひずみの経時変化(橋軸方向)

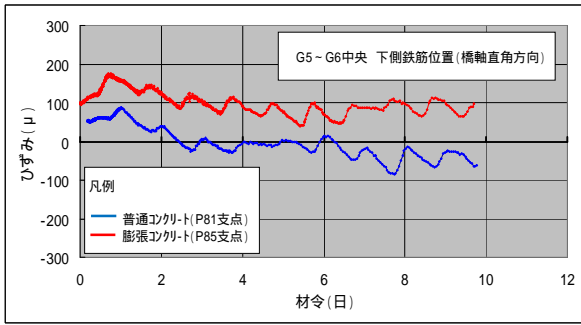


図-4 コンクリートひずみの経時変化(橋軸直角方向)

の引張ひずみでほぼ一定となっていることが分かる。一方、普通コンクリートについては、水和と硬化収縮は膨張コンクリートと同様の過程を辿るが、材齢10日目には100μ程度の引張ひずみとなっている。このことから、G7桁上では、50μ程度のひずみ差が確認できた。

図-4に施工ブロック端部G5~G6床版支間中央部における橋軸直角方向の鉄筋計から換算されたコンクリートひずみの経時変化図を示す。この箇所は、先行打設された支間中央部の拘束の影響が最も懸念される部位である。ひずみの経時変化は、膨張コンクリート部で最大で180μ程度の圧縮ひずみとなった後、G7桁上と同様の過程を辿っていることが分かる。この部位では、材齢10日目での膨張コンクリート(90μ程度の圧縮ひずみ)と普通コンクリート(50μ程度の引張ひずみ)のひずみ差は140μ程度であった。このことから、膨張材の効果は硬化収縮が拘束される部位に対して、より大きな効果を発揮することが分かる。

### 3. 設計値と計測値の比較

表-5は、コンクリート打設後から高欄および中央分離帯が打設された時点までの期間において、コンクリートの引張応力の最大値を各部位毎に示したものである。コンクリートに発生する応力は、既往の研究事例<sup>3)</sup>に従って算出し、拘束状態と無拘束状態のひずみ差を利用して、これに弾性係数を乗じて算出した(下記式参照)。

$$c = [E_c(t_i + t_{i-1})/2 \times \{(i(t_i) - m(t_i)) - (i(t_{i-1}) - m(t_{i-1}))\}]$$

ここで、

- c : コンクリートに発生する応力
- $E_c(t_i)$  : 有効弾性係数
- $i(t_i)$  : 拘束を受けたコンクリートの打ち込みから  $t_i$  時間後の鉄筋ひずみ
- $m(t_i)$  : 無拘束と仮定するコンクリートの  $t_i$  時間後のコンクリートひずみ

引張応力が最大となったのは、主桁上ではコンクリートの種類によらず3日目付近であり、床版支間中央では膨張コンクリート施工部で8日目、普通コンクリート施工部で5日目付近であった。また、上・下鉄筋位置で比較すれば、コンクリートの種類や位置に係わらず下側が上側に比べて大きい傾向が認められる。これらは、桁によってコンクリートの硬化収縮が拘束され、下側鉄筋位置においては、より桁の影響を受けることによるものと考えられる。

計測時は裏面板荷重が載荷されていない為単純な比較はできないが、表-3より、膨張コンクリートの使用に伴う設計上の膨張効果と中間支点上G5、G7桁上上側鉄筋位置の膨張コンクリート部と普通コンクリート部の引張応力差による膨張効果を比較すると、計測値の方が設計で期待した膨張効果の倍以上大きいことが分かる。このことから、設計上の安全率を加味すると設計における膨張材の評価は妥当であると考えられる。

表-5 コンクリートの最大引張応力(N/mm<sup>2</sup>)

測定部位			普通コンクリート A(P81)	膨張コンクリート B(P85)	膨張効果 C=A-B	設計における膨張効果 (表-1より)
中間支点上	G7桁上	橋軸方向	上側鉄筋位置 1.30	0.10	1.20	0.14(P81)及び 0.13(P85) 0.02(P81)及び -0.24(P85)
		下側鉄筋位置 3.50	0.90	2.60		
	G5桁上	橋軸方向	上側鉄筋位置 1.80	0.10	1.70	
		下側鉄筋位置 2.10	0.50	1.60		
	G5-G6支間中央	橋軸方向	上側鉄筋位置 0.40	0.20	0.20	
			下側鉄筋位置 1.20	0.40	0.80	
施工ブロック端	G5桁上	橋軸方向	上側鉄筋位置 1.24	0.13	1.11	
			下側鉄筋位置 1.62	0.14	1.48	
		橋軸直角方向	上側鉄筋位置 3.34	0.42	2.92	
			下側鉄筋位置 1.91	0.19	1.72	
	G5-G6支間中央	橋軸方向	上側鉄筋位置 0.77	-0.05	0.82	
			下側鉄筋位置 0.90	-0.07	0.97	
		橋軸直角方向	上側鉄筋位置 2.00	0.22	1.78	
			下側鉄筋位置 6.21	2.43	3.78	

ちなみに、過去の計測事例と比較すると、実橋での計測例<sup>4)</sup>(多良見橋; 鋼4径間連続非合成1桁, 膨張材 35kg/m<sup>3</sup>)ではケミカルプレストレスの最大値が 1.1 N/mm<sup>2</sup> 程度であり、供試体(合成桁床版; 膨張材 50kg/m<sup>3</sup>)の载荷試験報告<sup>5)</sup>では 0.9 N/mm<sup>2</sup> 程度であったことから、これらとほぼ同程度の膨張効果が確認された。

#### 4. 目視によるひび割れ調査の結果

本床版の施工は、支間中央部を先行して打設し、負曲げが入る中間支点部を後行打設するよう13ブロックに分けて施工を行った。最終ブロック打設60日後にひび割れの目視調査を、床版上面及び下面について行った。ひび割れ分布を図-5、床版上面のひび割れのスケッチ図を図-6に示す。尚、これらひび割れは最大でも 0.15mm 以下の微細なひび割れであり、コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針<sup>6)</sup>に定める中間程度の環境において補修の必要の無いものである。

図-5より、床版のひび割れ総数は155あり、中間支点部のRC横桁との境界部、支間中央部と中間支点部の打継目部にひび割れが集中している事が分かる。一方、図-6よりひび割れの方向性を見ると、橋梁中心に近いと橋軸方向に、端部に近づくにつれて斜め方向にひび割れが発生している事が分かる。また、表-3における中間支点部のG5桁とG7桁の発生応力を比較すると外桁で

あるG7桁の発生応力の方が大きいこと、施工ブロック端の橋軸方向と橋軸直角方向の応力を比較すると橋軸直角方向の応力が大きいことから、計測結果の傾向とひび割れの発生傾向が一致していることが分かる。以上のことから、床版に発現したひび割れは、RC横桁や打継目によって、打設されたコンクリートの硬化収縮が拘束されることによるものと考えられ、図-7に示す床版のひび割れ発生 の推定メカニズムが考察される。一方、膨張コンクリート施工部ではひび割れが確認されなかった。また、表-3の施工ブロック端での計測値に基づく膨張効果を見ると、硬化収縮が拘束される部位(橋軸直角方向)の方が、拘束されない部位(橋軸方向)よりも大きいことから、計測結果からも膨張材の使用による膨張効果により硬化収縮の拘束によるひび割れの発生を抑制していることが分かる。

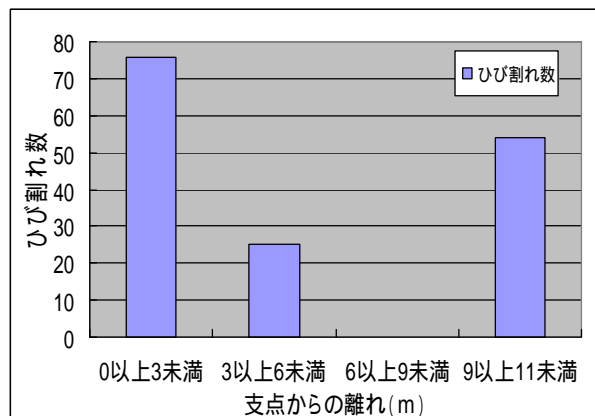


図-5 ひび割れ分布図

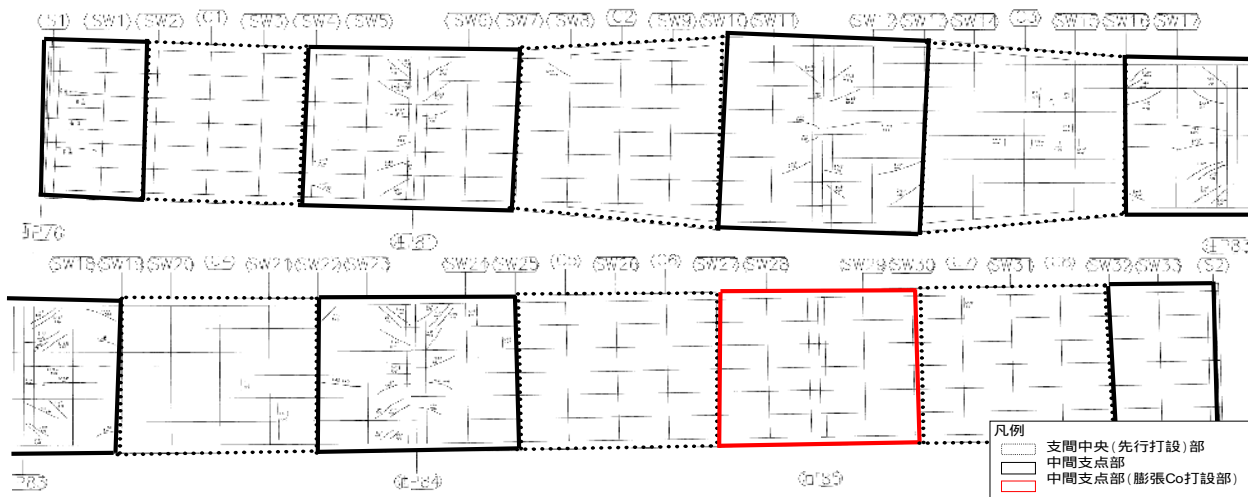


図-6 ひび割れのスケッチ図(床版上面)

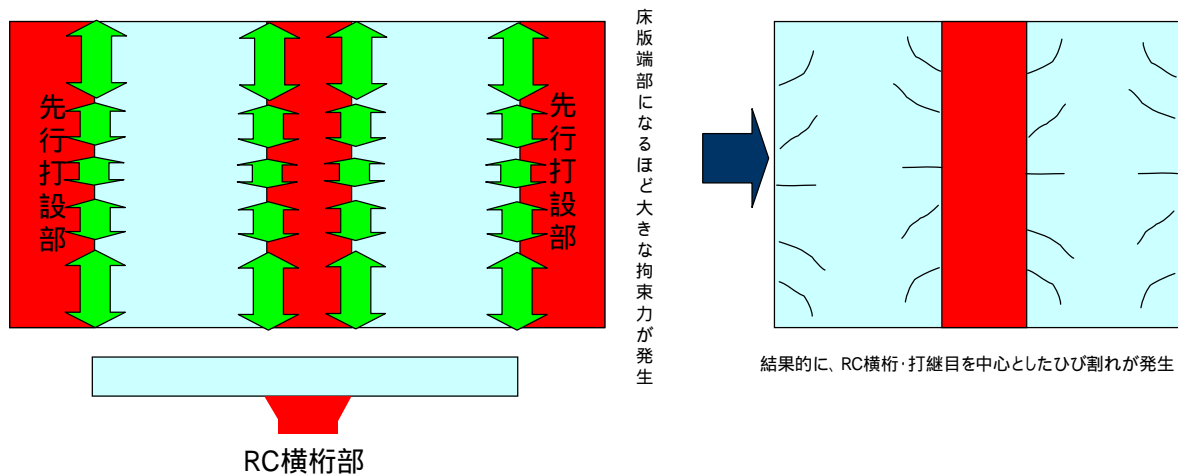


図-7 ひび割れ発生の推定メカニズム図

これらの結果を踏まえ、今後同様な構造のコンクリート床版を設計・施工する際には、後行打設される床版ブロックのコンクリートの硬化収縮によるひび割れ抑制を考慮する必要があると考えられる。

## 5. まとめ

連続合成I桁において、中間支点部に膨張材を試験的に採用し、実橋における応力計測及びひび割れの目視を行った結果、以下の事が分かった。

鉄筋のひずみとコンクリートのひずみはほぼ同様なひずみ履歴を辿り、本橋においても、既往の研究と同様に鉄筋ひずみからコンクリートひずみへの換算が可能であった。

膨張コンクリートのひずみの経時変化は、材齢1日目に膨張材のケミカルプレストレスのピークを迎え、その後引張に転じて材齢10日目にほぼ一定のひずみとなる事が確認できた。また、膨張材の膨張効果は、コンクリートの硬化収縮が拘束される部位に対して、より大きい事が分かった。計測結果に基づく膨張材の膨張効果は、

設計時に期待した効果よりも十分に大きく、設計上の安全率を加味すると設計時の膨張材の使用による乾燥収縮ひずみの緩和評価は妥当であり、既往の文献と比較しても同様の効果があることが確認できた。このことから、収縮補償程度の膨張コンクリートであっても引張応力の低減に効果的であることが分かった。

本橋梁における目視による床版のひび割れ調査の結果、ひび割れの84%はコンクリートの硬化収縮が拘束される中間横桁と打継目部に集中しており、今後の設計・施工時に、後行打設される床版ブロックのコンクリートの硬化収縮によるひび割れ抑制を考慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：連続合成桁設計の手引き（案）；H16.3
- 2) （社）日本橋梁建設協会、（社）プレストレス・コンクリート建設業協会：長支間場所打ちPC床版施工試験報告書（短期）；H14.3
- 3) 高瀬，中本：コンクリート床版における膨張材効果の評価方法に関する考察；駒井技報 vol22

- 4) 増田, 岡, 木曾: 鋼橋における膨張コンクリート床版の特性; 日本道路公団試験所報告 vol127
- 5) 辻, 岡村: 膨張コンクリートによる鋼合成桁床版の改善に関する基礎研究; コンクリート工学 Vol20, 1982
- 6) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 技報堂, 1987

## EFFECT OF EXPANSIVE ADMIXTURE IN REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB

Nobuhiko TANIGUCHI, Yukio ADACHI and Masato TERAOKA

Continuous composite I girders are often used in bridges in recent years since reliability has been improved and cost reduction enabled by the establishment of appropriate design techniques for floor slabs which are expected to function as part of the main girder. It has been decided to adopt experimentally a six-span continuous composite I steel girder in the Aburano-koji Route from the viewpoint of design effectiveness and reduced cost. With no tolerance against cracking under dead load suggested at some middle supports, expansive concrete was adopted for floor slabs at the design stage. This was the first introduction of a continuous composite I girder and expansive concrete floor slabs at Hanshin Expressway Co., Ltd. In the current study, stress was measured at the middle supports and the block ends to evaluate the expansion effect of the expansive concrete in the continuous composite girder slabs. This study confirmed that expansive concrete of shrinkage compensation level is adequately effective in tensile stress reduction and successfully controls drying shrinkage.

寺岡 正人



阪神高速道路株式会社  
技術部技術審査・品質管理グループ  
Masato TERAOKA

谷口 信彦



阪神高速道路株式会社  
京都建設部調査設計・審査グループ  
Nobuhiko TANIGUCHI

足立 幸郎



阪神高速道路株式会社  
京都建設部調査設計・審査グループ  
Yukio ADACHI