

鉄筋の配置が異なる CPC 梁と RC 梁の力学的性状

宮崎大学 工学教育研究部 正会員 博(工) ○李 春 鶴
 NPO 法人 持続可能な社会基盤研究会 名誉会員 工博 辻 幸 和
 デンカ(株) インフラソリューション開発研究所 博(工) 栖原 健太郎

Abstract : Mechanical behaviors of chemically pre-stressed concrete(CPC) beams are reported in T type and rectangular cross sections varying re-bar arrangements and mix proportions of expansive concrete. Flexural cracking moments and diagonal cracking moments of CPC beams are increased depending degrees of chemical pre-stress which are differently introduced by the re-bar arrangement. A chemical pre-stress estimation method based on Work-done concept is also proposed combined a divided strip model flexural method. Fairly good estimated chemical pre-stress, flexural cracking moment and diagonal cracking moments of CPC beams are gained between measured values.

Key words : Chemically pre-stressed concrete beam, Mechanical behavior of CPC beam, Chemical pre-stress

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)に膨張材を用いた CPC(Chemically Pre-stressed Concrete)梁は、コンクリートの配合だけでなく鉄筋の配置方法によりコンクリートに導入されるケミカルプレストレスと鉄筋に導入されるケミカルプレストレスが異なるため、曲げモーメントとせん断力が作用する CPC 梁と一般の RC(Reinforced Concrete)梁の力学的性状は大きく異なる。これまでも幾つかの実験結果が報告されているが、鉄筋の配置方法が及ぼす統一的かつ定量的な実験と解析の結果はほとんど報告されていない。

本文では、T形断面と矩形断面にそれぞれ5種類の異なる鉄筋配置をし、3種類の膨張コンクリートの配合を変えた CPC 梁の曲げひび割れ発生耐力、斜めひび割れ発生耐力および曲げ引張破壊耐力またはせん断圧縮破壊耐力の実験結果と解析結果を報告する。解析には、膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量は一定であるとの仮定¹⁾を用い、積層モデルによる曲げ解析を行う。そして斜めひび割れ発生耐力とせん断圧縮破壊耐力は土木学会のコンクリート標準示方書に規定されている方法を用いる。

2. 供試体および実験概要

表-1 および図-1 に示すように、供試体は下段鉄筋の呼び名を4種類に変化させたT形断面(TA~TD)と矩形断面(RA~RD)を主体にした。そして、呼び名が D32 の鉄筋を中段に配置したもの(TE, RE)と、T形断面の上段鉄筋を呼び名がD10からD19に変えたもの(TF)を追加している。なお、スターループは配置していない。

矩形断面の高さは25cm、幅は10cm、長さは120cmと一定にして、T形断面のフランジの高さは7cm

表-1 断面の名称および鉄筋の配置方法

断面の名称	鉄筋の配置と量 (cm ²)				$\Sigma A_{si}/A_c$ (%)	$A_{s1}/b_x d$ (%)
	A_{s1}	A_{s2}	A_{s3}	ΣA_{si}		
TA	1.267	0.713	2.140	4.120	0.896	0.151
TB	2.865	0.713	2.140	5.718	1.243	0.341
TC	5.067	0.713	2.140	7.920	1.722	0.603
TD	7.942	0.713	2.140	10.795	2.347	0.945
TE	0.713	7.942	2.140	10.795	2.347	0.0849
TF	7.942	0.713	8.595	17.250	3.750	0.945
RA	1.267	0.713	0.713	2.693	1.077	0.603
RB	2.865	0.713	0.713	4.291	1.716	1.364
RC	5.067	0.713	0.713	6.493	2.597	2.413
RD	7.942	0.713	0.713	9.368	3.747	3.782
RE	0.713	7.942	0.713	9.368	3.747	0.340

供試体の長さは120cm、 d :引張鉄筋の有効高さ、 b_x :フランジの幅、 A_{si} :下段からの配置鉄筋断面積、 A_c :コンクリートの断面積

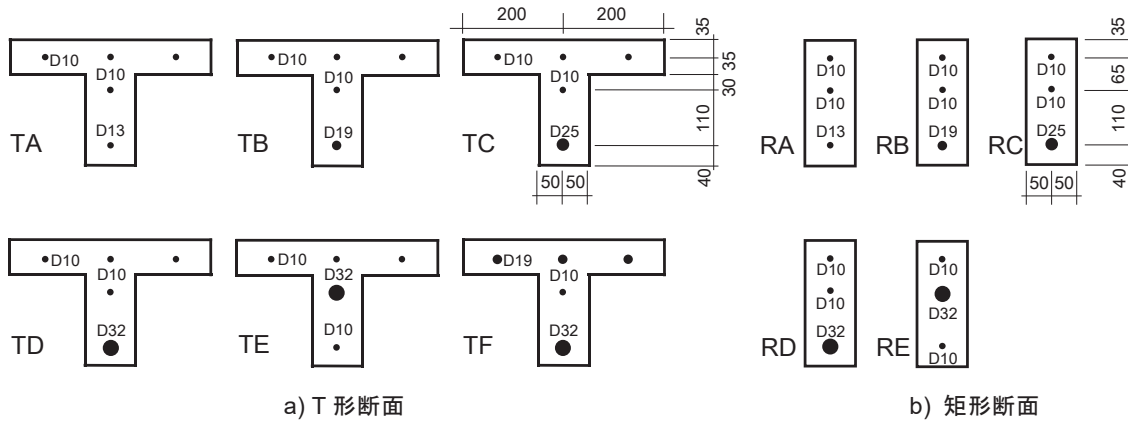


図-1 下段鉄筋が異なる T 形断面と矩形断面

表-2 コンクリートの配合, A 法一軸拘束膨張率, 圧縮強度

配合名	W/(C+E) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			スランプ (cm)	空気量 (%)	A 法一軸拘束 膨張率 (×10 ⁻⁶)	圧縮強度 (N/mm ²)	断面の名称
			W	C	E					
配合 0	50	39	165	330	0	4.0~5.5	1.5~2.0	0	40.6	TA, TB, RA, RB
								0	43.1	TC, TD, RC, RD
								0	42.2	TE, TF, RE
配合 1	50	39	165	290	40	4.0~5.5	1.5~2.0	460	42.5	TA, TB, RA, RB
								421	42.6	TC, TD, RC, RD
								432	38.0	TE, TF, RE
配合 2	36	42	180	450	50	5.5~8.0	1.5~2.0	537	58.8	TA, TB, RA, RB
								533	57.0	TC, TD, RC, RD
								551	61.7	TE, TF, RE
配合 3	60	37	167	225	50	5.0~7.0	1.5~2.0	487	29.9	TA, TB, RA, RB
								482	31.9	TC, TD, RC, RD
								482	34.7	TE, TF, RE

で、幅は 40cm で、ウェブの高さは 18cm、ウェブの幅は 10cm とした。鉄筋を 3 段に配置しており、矩形断面でも上下非対称に配置している。

使用した鉄筋の機械的性質を表-3 に示す。JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)の SD 295 A に適合するもので、呼び名が D10, D13, D19, D25, D32 の 5 種類の各異形鉄筋を用いた。

膨張率は、部材中央部から 10cm の位置の鉄筋表面に貼付したゲージ長が 6mm の 2 枚のワイヤストレーンゲージを用いて計測し、その平均値とした。

セメントには普通ポルトランドセメントを膨張材には JIS A 6202 に適合する膨張材 30 型のエトリングイト系を用いた。骨材は渡良瀬川産の川砂および川砂利を用いた。川砂は表乾密度が 2.62g/cm³、粗粒率が 2.84 であった。川砂利は最大寸法が 25mm で、表乾密度が 2.65g/cm³、粗粒率は 6.90 であった。

コンクリートの配合を配合名とともに表-2 に示す。膨張コンクリートは、JIS A 6202 附属書 B に規定されている A 法一軸拘束器具による膨張率が約 500×10⁻⁶ となる水結合材比と単位膨張材量(E)が異なる 3 種類とした。水結合材比は配合 1 の 50%を基準として、配合 2 で 36%、配合 3 で 60%とした。E は配合 1 で 40 kg/m³、配合 2 および配合 3 で 50 kg/m³、単位結合材量は配合 1~配合 3 の順で 500 kg/m³、330 kg/m³ および 275 kg/m³ とした。配合 0 は配合 1 で膨張材を用いていない普通コンクリートである。

表-3 鉄筋の機械的性質

呼び名	公称断面積 (cm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
D10	0.7133	346	508
D13	1.267	330	498
D19	2.865	356	547
D25	5.067	334	521
D32	7.942	350	548

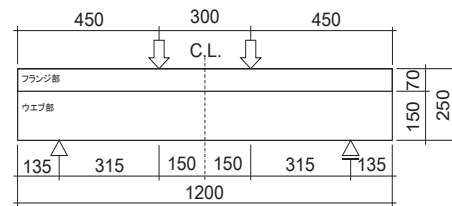


図-2 曲げ載荷方法 (T 形断面の例)

なお、表-2には梁供試体と同様の養生を行った材齢7日におけるA法一軸拘束器具による膨張率と材齢28日における圧縮強度を併記している。

コンクリートの打込みは温度が $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度が80%RH以上の部屋で行った。材齢2日に脱型した後、同じ部屋において湿布で覆って湿布養生を材齢14日まで行った。そのあとは、湿布を取り除き、載荷試験の材齢28日までは部屋に放置した。載荷試験は図-2にしたがって行った。

3. ケミカルプレストレイン (膨張率) とケミカルプレストレスの推定方法

膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量 U が拘束の程度にかかわらず一定であるとした仕事量一定の仮定¹⁾に基づいている。そして、鉄筋を断面の高さ方向に非対称に配置したT形断面と矩形断面を有するCPC梁に生じる膨張率とケミカルプレストレスは、図-3に示すように、膨張率が断面の高さ方向に直線分布するものと仮定^{1),2)}し、鉄筋の引張力と膨張コンクリートの圧縮力との力の釣合い条件および下縁における力のモーメントの釣合い条件から求めた。すなわち、下縁の膨張率の ϵ_b 、上縁の膨張率の ϵ_u を力の釣り合い条件を満たすように収束計算を行う逐次計算法により求め、そのあとCPC梁のケミカルプレストレスの分布とケミカルプレストレインの分布をそれぞれ簡便に精度良く推定できる。なお、矩形断面では図-3に示した b を b_0 に、 $t=0$ として推定できる。

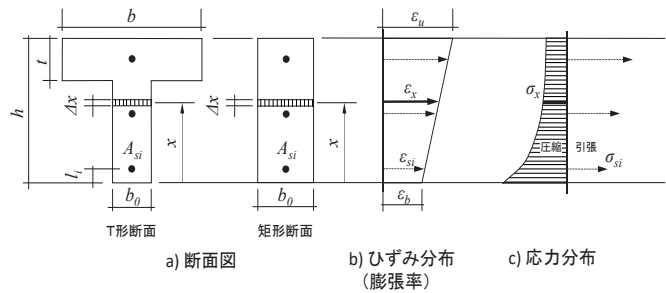


図-3 膨張率とケミカルプレストレス (応力) の推定

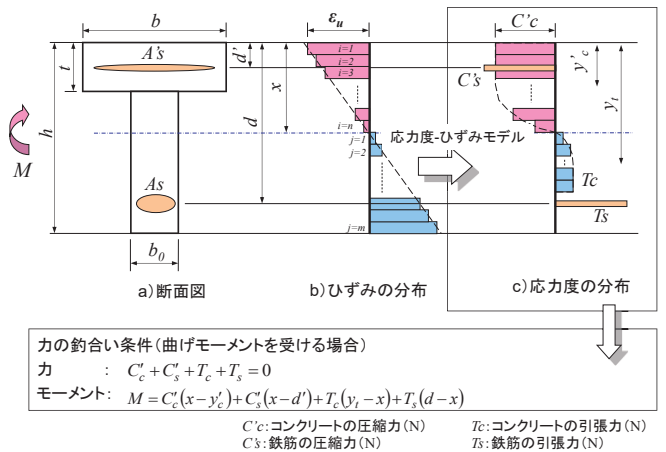


図-4 積層モデルによる曲げ解析

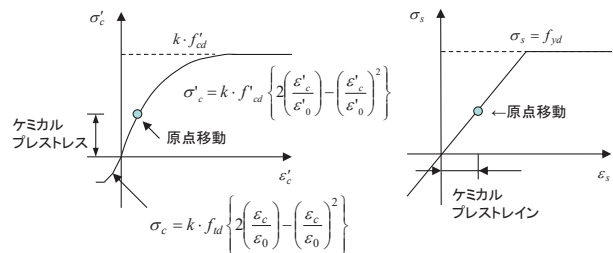


図-5 CPC梁の応力-ひずみモデル

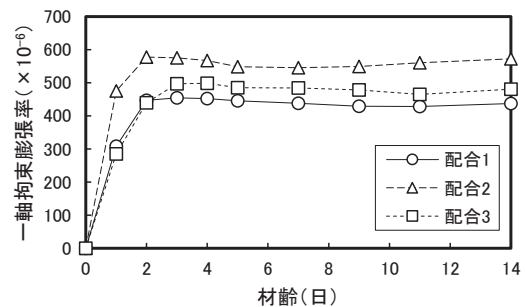


図-6 一軸拘束膨張率

4. 積層モデルによる曲げ断面解析の手順

図-4に示す積層モデルは、梁断面を高さ方向に分割した有限の微小要素の力の釣り合いから、断面応力度の算定を行う力学モデル³⁾である。CPC梁は、コンクリートのケミカルプレストレスと鉄筋のケミカルプレストレインに応じた応力度が釣り合った状態にあり、図-5に示すように、コンクリート領域ではケミカルプレストレスの分だけ、鉄筋ではケミカルプレストレインの分だけコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線の原点がそれぞれ移動した状態となる。この応力-ひずみ曲線を積層モデルに適用することで、曲げモーメントを受けるCPC梁の断面応力度と断面耐力を算定した。

斜めひび割れ発生耐力とせん断圧縮破壊耐力は、土木学会コンクリート標準示方書に規定されてい

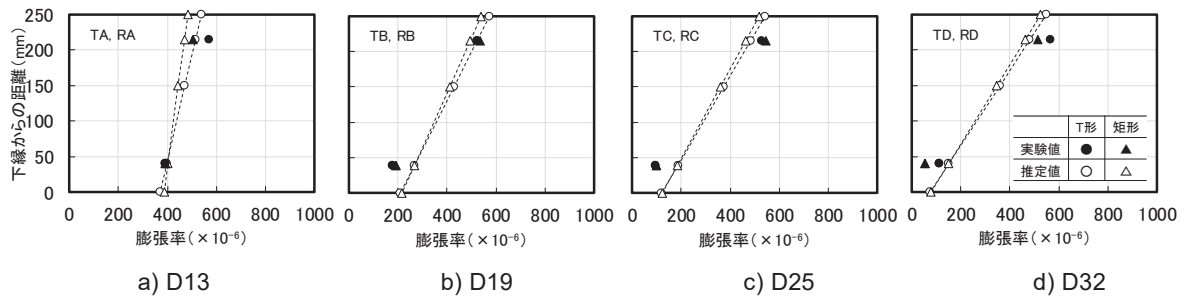


図-7 T形断面と矩形断面の膨張率の分布 (配合 1)

る算定式⁴⁾をそれぞれ用いた。その際、部材係数 γ_b は 1.0 とした。

5. 一軸拘束膨張率および圧縮強度

A 法一軸拘束器具における膨張率の材齢に伴う測定結果を図-6 に示す。梁供試体と同様に湿布養生したもので、3 回に分けて作製した膨張コンクリートの平均値を示している。この図より、一軸拘束膨張率の増加は材齢 3 日までが著しく、そのあとはほぼ一定になっている。また、そのあとの検討は材齢 7 日の膨張率の実験値に基づいて行った。

各配合の一軸拘束膨張率は $500 \times 10^{-6} \pm 100 \times 10^{-6}$ の範囲に生じている。なお、このような一軸拘束膨張率を生じさせるために、水結合材比が 50% の配合 1 では E は 40 kg/m^3 で可能であった。しかしながら、配合 2 と配合 3 では E が 50 kg/m^3 となった。

表-2 に示すように、膨張コンクリートの圧縮強度は、水結合材比にそれぞれ対応した値で、膨張による強度低下は小さいことが認められる。

6. 下段鉄筋量が異なる膨張分布

T 形断面と矩形断面のそれぞれについて、下段の鉄筋の径を変えた場合の軸方向膨張率の例を図-7 に示す。すべての供試体は水結合材比が 50%、E が 40 kg/m^3 の配合 1 である。

下段の鉄筋量が大きくなると膨張を拘束する程度が大きくなって、その位置の膨張率が小さくなる。しかしながら、上段に配置した鉄筋の膨張率はほとんど変化がない。そのため、軸方向膨張率の高さ方向の変化を表す膨張勾配は、下段の鉄筋量の増加に応じて急勾配になっている。この現象は、T 形断面と矩形断面ともに同様の傾向にあり、両断面ともに膨張率がほぼ等しく、膨張勾配もほぼ同じになっている。

図-7 には、点線で推定値を示している。推定に用いた仕事量 U には、表-2 に示した A 法一軸拘束膨張率をそのまま用いた。T 形断面と矩形断面の両断面における点線で示した推定値はほぼ等しくなっていることが認められる。基本的に実験値は推定値とほぼ等しくなっているが、詳細には下段配置の鉄筋量が大きいほど、上段に配置した鉄筋の膨張率の実験値は推定値よりも少し大きくなり、また、下段鉄筋の膨張率の実験値は推定値より少し小さくなっている。その現象は、下段の鉄筋量が大きいほど顕著になっている。推定値は前述したように、膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量 U は、拘束の程度にかかわらず一定であるとの仮定に基づいている。したがって、拘束の程度が大きい部分の膨張コンクリートに生じる膨張率は小さくなるが、導入される圧縮応力度のケミカルプレストレスは大きくなる。すなわち、ケミカルプレストレスが大きくなると、圧縮される弾性ひずみは大きくなり、かつ圧縮クリープひずみも大きくなるため、生じる膨張率はそれらのひずみの分が小さくなって実測されている¹⁾。

7. CPC 梁の曲げひび割れ発生荷重

図-2 に示した曲げモーメント一定区間に生じた曲げひび割れ発生荷重を、膨張材の使用の有と無の配合1と配合0について、図-8a)に対比して示す。T形断面と矩形断面の両断面において、膨張材を用いてコンクリート下縁に導入されたケミカルプレストレスにより、曲げひび割れ発生荷重がいずれの鉄筋の配置でも増加している。

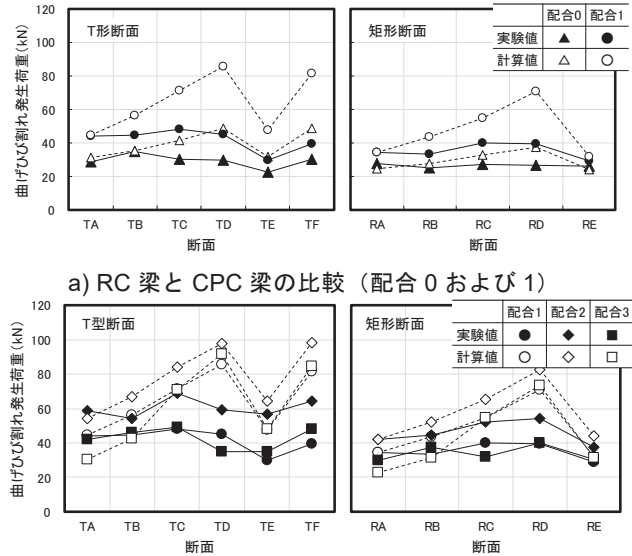
また、配合0と配合1のいずれでも計算値に比べて実験値が小さくなる現象が認められ、この差が下段に配置した鉄筋が太いほど著しくなっている。湿布養生から荷重試験までは実験室内で放置していたため、この期間の乾燥収縮が鉄筋に拘束されて、下縁に生じる引張応力度が下段に配置した鉄筋が太いほど大きくなったことが原因と考えられる。

さらに、図-7 に示したように、下段に配置した鉄筋が太くなるほど下縁に導入されたケミカルプレストレスの実験値は推定値ほど導入されなかった。そのため、曲げひび割れ発生荷重の実験値が計算値ほど大きくならなかったことも、主原因と考えられる。

図-8b)には、一軸拘束膨張率はほぼ同じであるが、水結合材比が配合1と異なる配合2と配合3のCPC梁の曲げひび割れ発生荷重の実験値を、計算値とともに示している。水結合材比が異なっても、T形断面と矩形断面において、図-8a)に対比して示すように、RC梁と比較してCPC梁の曲げひび割れ発生荷重の増加分はケミカルプレストレスの導入により得られていることが認められる。

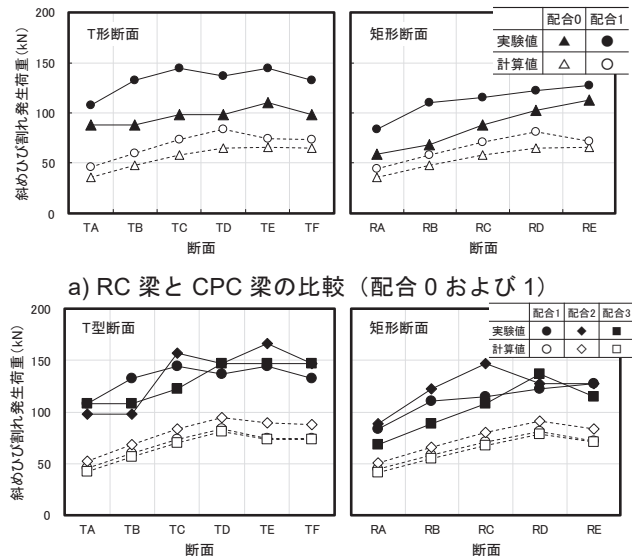
8. CPC 梁の斜めひび割れ発生荷重

CPC梁とRC梁はともに、発生した曲げひび割れが発達した後に、荷重点に向かって斜め方向にひび割れが発生した。その斜めひび割れ発生荷重の実験値を、コンクリート標準示方書に規定されている計算値とともに図-9 a) に示す。梁の軸方向のケミカルプレストレスの導入により、斜めひび割れ発生荷重が配合0のRC梁に比べて配合1のCPC梁での実験値では増加することが、曲げひび割れ発生荷重と同様に認められる。計算値は実験値に比べて小さくなっているが、ケミカルプレストレスの導入効果を考慮した計算値と実験値の差は、RC梁の場合とほぼ同等であることも認められる。このことはコンクリート標準示方書の計算式では、ケミカルプレストレスの導入効果を算定できていることが示



b) 水結合材比の異なる CPC 梁の比較 (配合1, 2 および 3)

図-8 曲げひび割れ発生荷重



b) 水結合材比の異なる CPC 梁の比較 (配合1, 2 および 3)

図-9 斜めひび割れ発生荷重

唆される。図-9 b) には、水結合材比が異なる CPC 梁の斜めひび割れ発生荷重を示す。少しばらつきはあるものの、実験値と計算値の差は、水結合材比が異なった配合 2 と配合 3 の CPC 梁でもほぼ同等である。

9. CPC 梁の破壊形式と破壊荷重

図-10 には、破壊荷重の実験値と計算値を示す。大半の梁供試体は、下段に配置した鉄筋が降伏した後に上縁のコンクリートが圧壊した曲げ引張破壊を生じたが、D32 を配置した T 形断面と矩形断面は、斜めひび割れが発達して圧縮部のコンクリートが圧壊するせん断圧縮破壊を生じた。

配合 0 の RC 梁と配合 1 の CPC 梁の曲げ引張破壊荷重およびせん断圧縮破壊荷重は、実験値と計算値それぞれほぼ同じ値となっている。CPC 梁の破壊荷重は、導入されたケミカルプレストレスは影響しないため、RC 梁と同じ値になる。図-10 b) に示すように、水結合材比が異なって圧縮強度が異なる CPC 梁において、圧縮強度が大きい梁ほど破壊荷重の実験値は一般に大きくなっている。計算値も実験値と同様な圧縮強度の及ぼす影響を示しているが、曲げ引張破壊が顕著な TA と RA の断面では圧縮強度の及ぼす影響が小さくなっている。

10. おわりに

本稿では、これまでほとんど報告がない T 形断面と矩形断面を有する膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリートの CPC 梁における軸方向膨張率の分布、曲げひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重、破壊形式と破壊荷重について、主として下段に配置した鉄筋量を変化させた実験結果を報告した。そして、膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量一定則の仮定に基づく CPC 梁のケミカルプレストレインの推定値と実験値とを比較した結果並びにケミカルプレストレスも考慮した曲げひび割れ発生荷重と斜めひび割れ発生荷重の計算値を実験値と対比して報告した。計算値は実験値とほぼ一致しており、実用的に仕事量一定則の仮定により膨張コンクリートの使用効果を推定できる。

本報告が、今後の膨張コンクリートの用途の拡大で基礎になる任意の断面形状寸法に積極的にケミカルプレストレスを導入することに際しての定量的な評価について、参考になれば幸甚である。

参考文献

- 1) 辻幸和:ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法, コンクリート工学, Vol. 19, No. 6, pp. 99~105, 1981. 6
- 2) 李春鶴, 辻幸和, 栖原健太郎: T 形断面を有する CPC 部材の膨張分布, プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集, pp. 485~490, 2018. 11
- 3) 栖原健太郎, 岡村雄樹, 辻幸和, 吉野亮悦: 有効高さが異なる RC 梁と CPC 梁の曲げひび割れ幅, セメント・コンクリート論文集, No. 66, pp. 326~331, 2013. 2
- 4) 土木学会 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018. 3

