

論文 T形断面と矩形断面を有するCPC部材の膨張分布

栖原 健太郎*1・李 春鶴*2・辻 幸和*3

要旨：鉄筋コンクリート部材に膨張材を用いたケミカルプレストレストコンクリート（CPC: Chemically Pre-stressed Concrete）部材のT形断面と矩形断面について、鉄筋の配置方法を4種類に変化させたCPC部材の膨張率とその分布の実測値を、推定値とともに報告する。推定値は、膨張コンクリートが拘束体に対してなす仕事量が拘束の程度に拘わらず一定であるとした仕事量一定の仮定を用いて、T形断面にも適用するもので、その推定方法を提示する。その結果、推定値はT形断面でも実測値とよく一致し、鉄筋の膨張率であるケミカルプレストレインについても、実用的に推定できることを示した。

キーワード：膨張コンクリート、仕事量一定の仮定、T形断面、矩形断面、ケミカルプレストレイン

1. はじめに

矩形断面を有する鉄筋コンクリート部材に膨張材を用いたケミカルプレストレストコンクリート（CPC: Chemically Pre-stressed Concrete）部材の膨張率の分布については、これまで多くの実験結果が報告されている¹⁾³⁾。しかしながら、T形断面を有するCPC部材については、筆者等の実験結果⁴⁾以外には、ほとんど報告されていない。またT形断面と矩形断面を対比した膨張率の実験結果も、これまでに公表されていない。なお、膨張率は、コンクリートに導入される圧縮応力度のケミカルプレストレスに相応して曲げひび割れ発生耐力に、また引張鉄筋位置の膨張率はケミカルプレストレインと称し、曲げひび割れ幅の減少に、それぞれ効果がある。

本文では、T形断面と矩形断面について鉄筋の配置方法をそれぞれ4種類に変化させたCPC部材の軸方向膨張率の分布について、一軸拘束膨張率を一定にした水結合材比を3種類に変えた異なる配合の膨張コンクリートを適用して実験した結果を報告する。また、膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量が拘束の程度に拘わらず一定であるとした仕事量一定の仮定³⁾を用いて、鉄筋の配置方法が異なるT形断面についての膨張率の推定方法を提示するとともに、膨張率の推定値はT形断面でも矩形断面とともに実測値とよく一致することについても報告する。

2. 供試体、使用材料および配合

供試体は、表-1 および図-1 に示すように、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）を主体にして、本実験で用いた最大径の呼び名が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D10からD19に変えた

もの（TF）を追加している。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で、幅は40cm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。

膨張率の測定には、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、その平均値とした。そして、コンクリートの打込み直前から、固定抵抗法により測定した。

膨張材にはエトリンガイト系を、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。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。鉄筋は、

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

*1 デンカ株式会社 インフラソリューション開発研究所 博士（工学）（正会員）

*2 宮崎大学 工学教育研究部准教授 博士（工学）（正会員）

*3 NPO 法人 持続可能な社会基盤研究会理事長 工学博士（名誉会員）

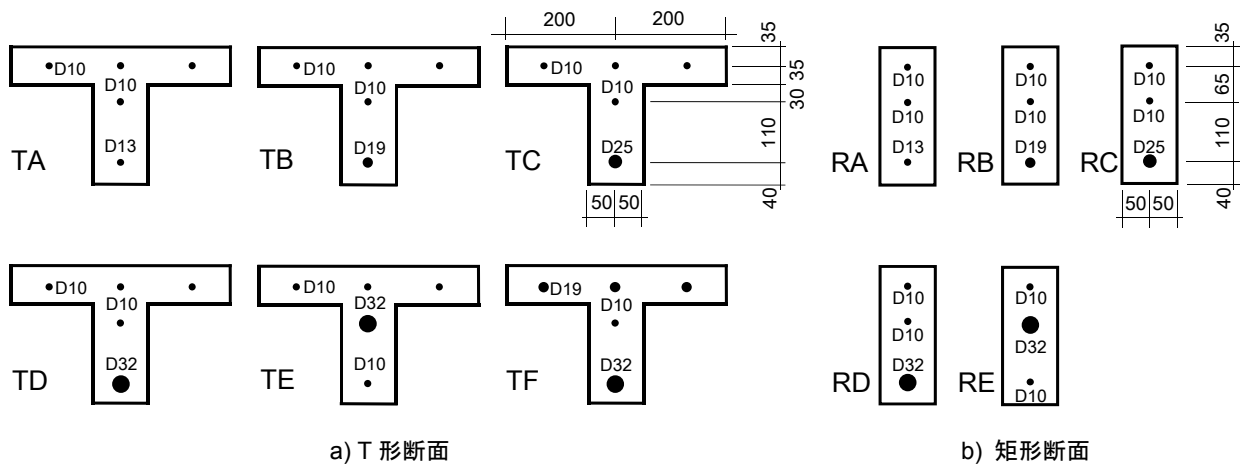


図-1 下段鉄筋が異なる T 形断面と矩形断面

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 1	50	39	165	290	40	4.0~5.5	1.5~2.0	460	42.5	TA, TB, RA, RB
										TC, TD, RC, RD
										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
										TC, TD, RC, RD
										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
										TC, TD, RC, RD
										TE, TF, RE

JIS G 3112 に適合している呼び名が 10mm, 13 mm, 19 mm, 25 mm および 32mm の各異形鉄筋を用いた。

コンクリートの配合を、用いた配合名とともに表-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 が 36%、配合 3 が 60% とした。単位膨張材量は、配合 1 が 40 kg/m^3 、配合 2 および 3 が 50 kg/m^3 、単位結合材量は、配合 1~3 の順で 500 kg/m^3 、 330 kg/m^3 および 275 kg/m^3 とした。なお、表-2 には、供試体と同様の養生を行った材齢 7 日における JIS A 6202 附属書 B に規定されている A 法一軸拘束方法による膨張率、および材齢 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した。

3. 膨張率の推定方法

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 が拘束の程度に拘わらず一定であるとした仕事量一定の仮定に基づき^{3),4)}、鉄筋が T 形断面と矩形断面の高さ方向に非対称に配置された CPC 部材に生じる膨張率の推定方法を、以下に示す。

図-2 a) に示す T 形断面と矩形断面の膨張率 ϵ_x は、膨張率が断面の高さ方向に直線分布するものと仮定し、断面の高さを h 、下縁の膨張率を ϵ_b 、上縁の膨張率を ϵ_u 、CPC 部材の下縁からの距離を x として、式(1)で与えられ、図-2 b) および c) のそれぞれの左図に示す分布となる。

$$\epsilon_x = \frac{1}{h} \{ \epsilon_b (h - x) + \epsilon_u x \} \quad (1)$$

単位体積当たりの膨張コンクリートが拘束体である鉄筋に対してなす仕事量 U は拘束の程度に拘わらず一定であるとの仮定から、CPC 部材のケミカルプレストレス σ_x は、式(1)を適用して式(2)となる。このケミカルプレストレス σ_x の分布を図化したものが、図-2 b) および

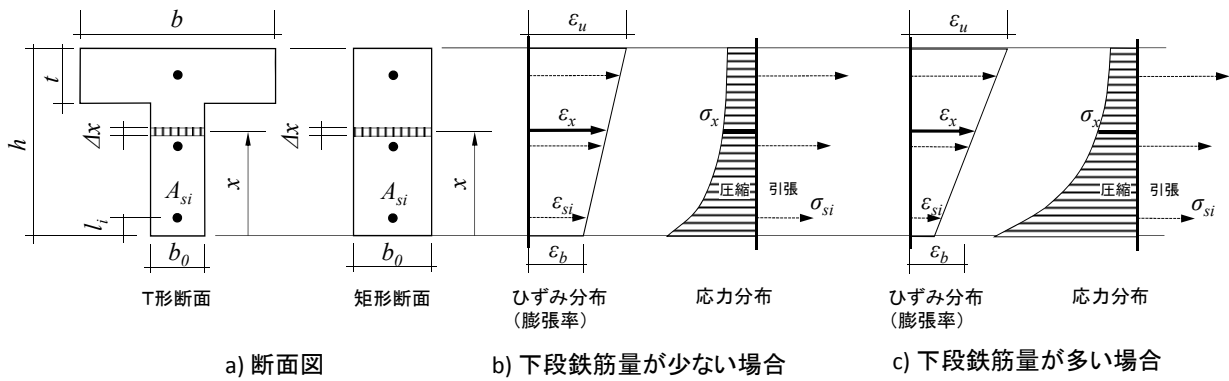


図-2 推定方法の概念図

c)のそれぞれの右図である。

$$\sigma_x = \frac{2U}{\epsilon_x} = \frac{2Uh}{\epsilon_b(h-x) + \epsilon_u x} \quad (2)$$

次に、ウェブの幅を b_0 、フランジの幅を b 、鉄筋 i の鉄筋断面積を A_{si} 、鉄筋のヤング係数を E_s として、鉄筋の引張力と膨張コンクリートの圧縮力との力の釣り合い条件から式(3)が、下縁におけるモーメントの釣り合い条件から式(4)が、それぞれ成立する。

$$b_0 \int_0^{h-t} \sigma_x dx + b \int_{h-t}^h \sigma_x dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \epsilon_{si} E_s = 0 \quad (3)$$

$$b_0 \int_0^{h-t} \sigma_x x dx + b \int_{h-t}^h \sigma_x x dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \epsilon_{si} E_s l_i = 0 \quad (4)$$

式(3)および式(4)に、式(2)を代入して整理したものが、式(5)および式(6)となる。

$$2Uh \left\{ b_0 \int_0^{h-t} \frac{1}{\epsilon_b(h-x) + \epsilon_u x} dx + b \int_{h-t}^h \frac{1}{\epsilon_b(h-x) + \epsilon_u x} dx \right\} - \sum_{i=1}^n A_{si} \epsilon_{si} E_s = 0 \quad (5)$$

$$2Uh \left\{ b_0 \int_0^{h-t} \frac{x}{\epsilon_b(h-x) + \epsilon_u x} dx + b \int_{h-t}^h \frac{x}{\epsilon_b(h-x) + \epsilon_u x} dx \right\} - \sum_{i=1}^n A_{si} \epsilon_{si} E_s l_i = 0 \quad (6)$$

式(2)において ϵ_b および ϵ_u を仮定して、式(5)および式(6)を満足させる ϵ_b および ϵ_u を逐次計算法などにより求める。そして、CPC 部材のケミカルプレストレスの分布を式(2)で、ケミカルプレストレインの分布を式(1)で、それぞれ簡便に精度良く推定できる。図-2 には、1 番下段の鉄筋が少量と多量の場合の膨張率とケミカルプレストレス

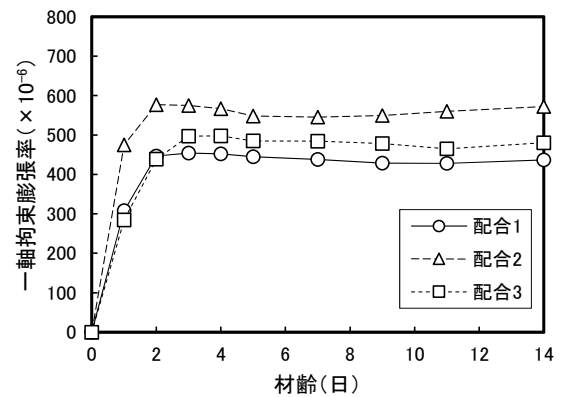


図-3 一軸拘束膨張率

の分布の概念図を対比して示している。

なお矩形断面では、図-2 に示した b を b_0 に、 $t=0$ として、推定できる。

4. 一軸拘束膨張率および圧縮強度

A 法一軸拘束供試体における膨張率の材齢に伴う測定結果を、図-3 に示す。供試体と同様に湿布養生したもので、3 回に分けた膨張コンクリートの平均値で示している。3 回に分けた 3 本の一軸拘束膨張率の平均値を表-2 に示しているが、それらのばらつきは小さい。

図より、一軸拘束膨張率の増加は材齢 3 日までが著しく、その後はほぼ一定になっている。この図から、後の膨張率の検討では、材齢 7 日の実測値に基づいて検討した。

3 種類の配合の一軸拘束膨張率は 500×10^{-6} に対して、 $\pm 100 \times 10^{-6}$ 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 では単位膨張材量は 40 kg/m^3 で可能であった。しかしながら、配合 2 と配合 3 では単位膨張材量が 50 kg/m^3 となった。

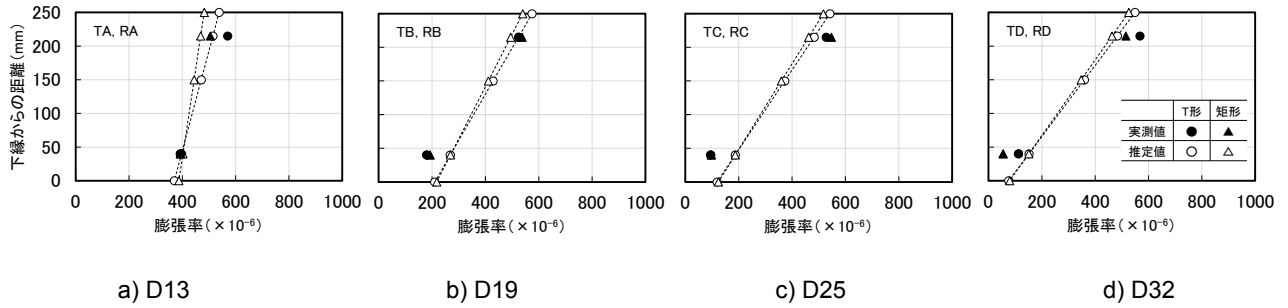


図-4 T形断面と矩形断面の膨張率の分布（配合1）

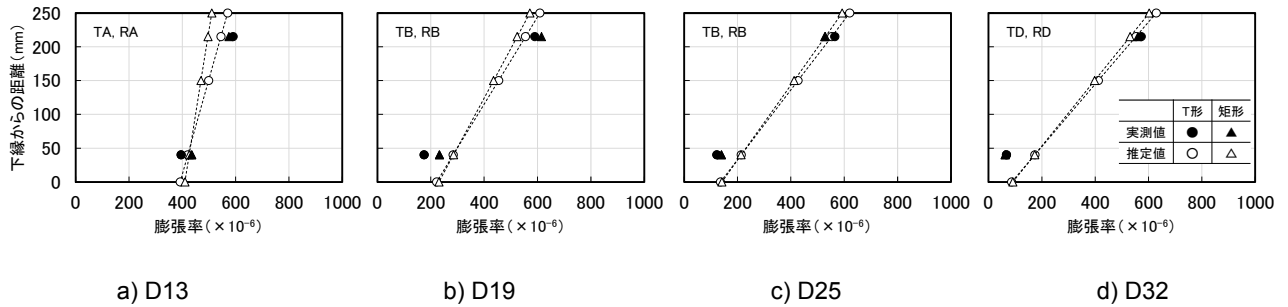


図-5 T形断面と矩形断面の膨張率の分布（配合3）

表-2に、供試体と同様の湿潤養生を行った材齢28日における圧縮強度を示す。一軸拘束膨張率が 500×10^{-6} 程度に膨張した膨張コンクリートの圧縮強度は、膨張による強度低下が小さく、圧縮強度は、水結合材比にそれぞれ対応した値を示している。

5. 下段の鉄筋量の影響

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一例を図-4に示す。配合は、水結合材比が50%で、単位膨張材量は 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-4には、破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推定値はほぼ等しくなっていること、また、実測値は推定値とほぼ等しくなっていることがわかる。

図-1に示したように、T形断面において、厚さが7cm

のフランジをその幅が矩形断面幅の4倍の40cmにして、フランジ部に矩形断面の3倍の上段鉄筋を配置することにより、矩形断面とほぼ同様な膨張分布を得ることができる。このことは、3.で提示した膨張率の推定方法で予測しており、その推定値が実測値と近似していることが確認された。

図-4の実測値と推定値を詳細に比較する。下段鉄筋の膨張率の実測値は推定値より少し小さくなっていることが、その鉄筋量が大きいほど顕著になっている。また、下段鉄筋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測値は、推定値よりも少し大きくなっている。

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、拘束の程度に拘わらず一定であるとの仮定に基づいている。したがって、図-2に概念図で示したように、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、かつクリープひずみも大きくなっており、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るのである³⁾。

図-5には、水結合材比が60%で、単位膨張材量は 50 kg/m^3 の配合3を用いて下段の鉄筋量を変えたT形断面と矩形断面の膨張率の分布を、図-4と同様に整理した

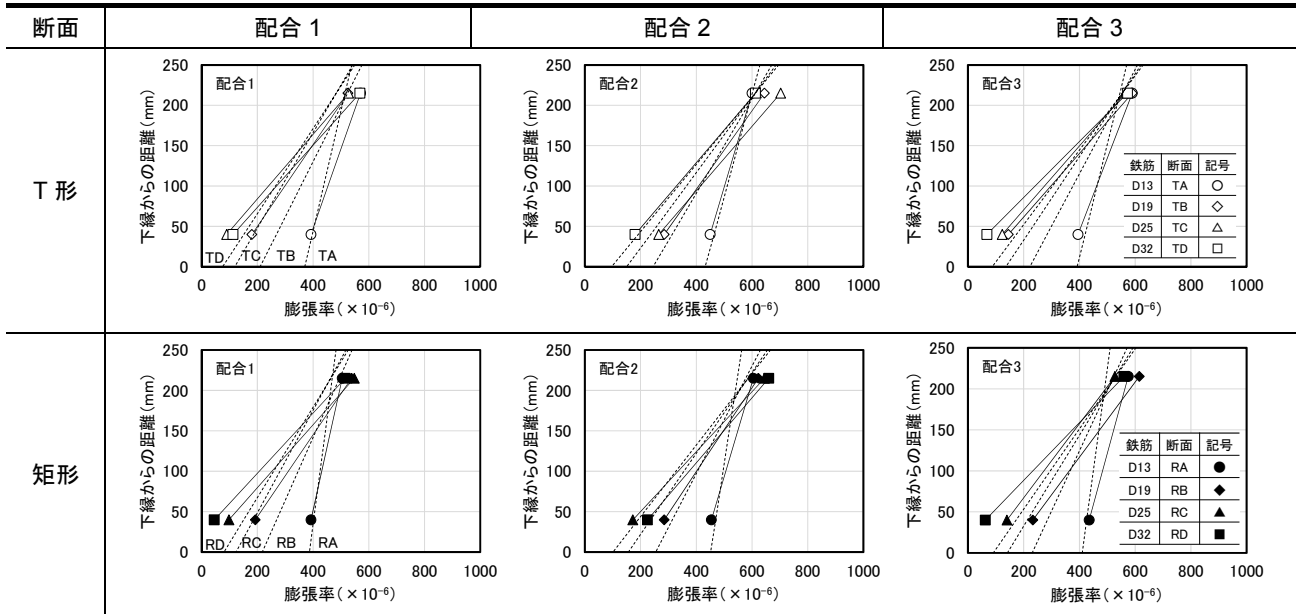


図-6 下段鉄筋量の影響

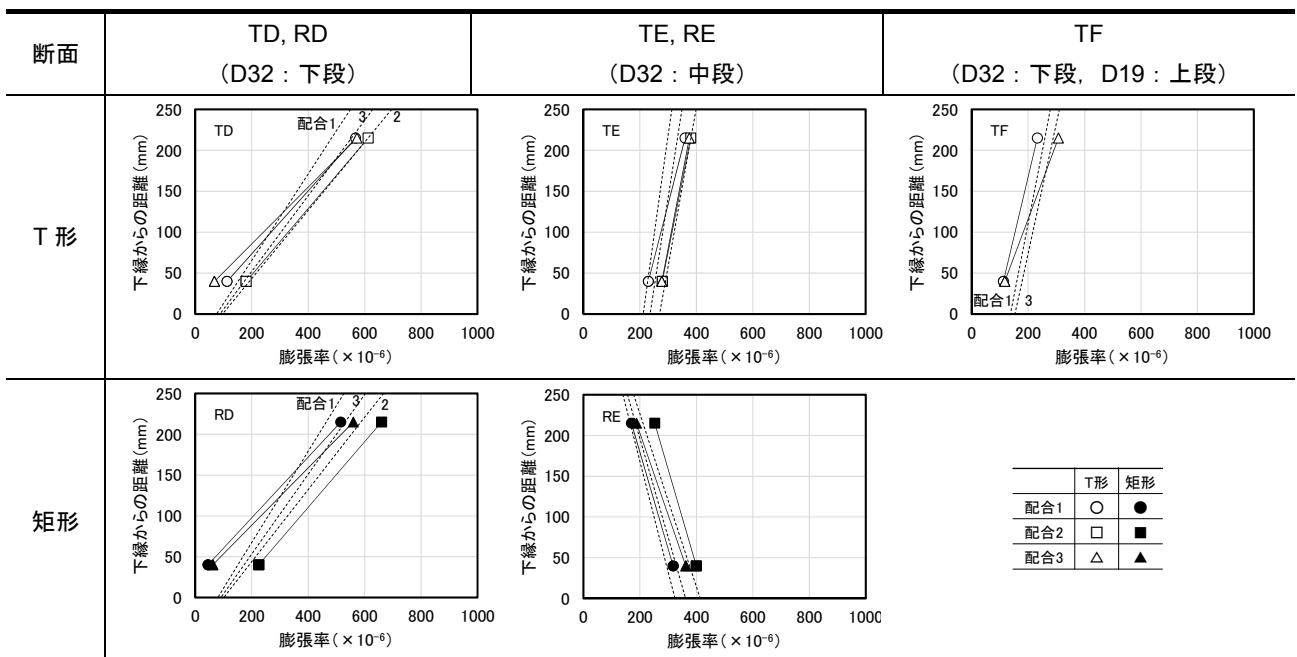


図-7 D32 の鉄筋の配置位置等の影響

ものである。配合3のコンクリートの材齢28日の圧縮強度は、表-2に示したように、配合1に比べて約10 N/mm²小さい。したがって、ケミカルプレストレスの大きさによる圧縮される弾性ひずみとクリープひずみが大きく影響を受ける配合と予想される³⁾。

しかしながら図-5からは、T形断面と矩形断面における下段の鉄筋量が及ぼす下段と上段の鉄筋の膨張率ならびに膨張勾配は、図-4とほぼ同様であることがわかる。また、実測値が推定値と少し異なることへの下段の鉄筋量が及ぼす影響についても、図-4と異なるとは認められないのである。

配合ごとに、T形断面と矩形断面において下段に配置する鉄筋量が膨張率に及ぼす影響を、図-6に示す。推定値は破線で示すが、下縁における推定値は大きいものからT形断面ではTA, TB, TC, TD, 矩形断面ではRA, RB, RC, RDである。この傾向は、実測値でも同様である。

先に述べた配合1と配合3だけでなく、水結合材比が36%で単位膨張材量が50 kg/m³の配合2についても、同様な分布が、実測値と推定値についても認められる。すなわち、下段に配置されている鉄筋が太いと、その位置の膨張率は小さくなるものの、上段に配置されている鉄

筋位置の膨張率の変化は小さくなっている。そして下段鉄筋の鉄筋量が大きくなると、膨張勾配が急勾配になっている現象は、図-4 および図-5 と同様に認められる。

これらのことから、CPC 部材の形状および鉄筋の配置が同じ場合、同一の膨張率であれば、配合の異なる膨張コンクリートを用いても、CPC 部材の膨張率の分布はほぼ同じになることが確認された。また、仕事量一定の仮定に基づく推定値は、実測値とほぼ一致することも確認された。このような膨張勾配の実測値は、膨張コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度が 20 N/mm^2 程度の差が弾性ひずみとクリープひずみにより膨張勾配に及ぼす影響は、断面に導入されるケミカルプレストレスの下縁と上縁の差が弾性ひずみとクリープひずみにより膨張勾配に及ぼす影響の程度に比べて非常に小さいことを示唆するものである。本実験の材齢 7 日において導入される下段鉄筋に一番太い D32 を配置した断面の場合で、断面に導入されるケミカルプレストレスの下縁と上縁の推定値の差は、T 形断面で 0.91 N/mm^2 程度、矩形断面で 0.85 N/mm^2 程度であった。今後、この現象の解明を進めていく。

なお、膨張材の単位量が過剰に多い場合や、セメントの単位量が膨張材の単位量に比べて極端に小さい場合など、膨張率が過剰となってコンクリート硬化体の強度が著しく低下する場合には、導入されるケミカルプレストレスの相違が弾性ひずみとクリープひずみに及ぼす影響が大きくなり、推定の精度が悪くなる。

6. D32 鉄筋の配置位置などの影響

図-7 に、一番太い鉄筋の呼び名が D32 の位置を中段に移動した場合 (TE, RE) と、T 形断面のフランジ部に D19 を配置した場合 (TF) の膨張率の分布を、TD, RD とあわせて示す。破線で示す膨張率の推定値は、下縁において配合 1, 配合 3, 配合 2 の順番で大きくなる。

D32 の鉄筋を下段から中段に移動すると、T 形断面では下段鉄筋の膨張率は増加し、上段鉄筋の膨張率は減少して、膨張勾配が全体に緩やかになることが、推定値とともに実測値でも認められる。矩形断面では、上段鉄筋位置の膨張率の減少が著しくなって、膨張勾配が逆になっている。

また、T 形断面のフランジ部に D10 から D19 の太い鉄筋を配置した T 形断面 (TF) では、その位置の膨張率が小さくなって、下段鉄筋の膨張率が大きくなることにより、膨張勾配が緩くなっている。このように緩やかな膨張勾配となることが推定値で予想されたが、実測値でも

確かめられた。

これらの結果から、T 形断面においても、矩形断面と同様に、拘束となる鉄筋の配置を変えることで、膨張率の分布および膨張勾配を制御することができる。

7. まとめ

T 形断面と矩形断面を有する鉄筋コンクリート部材に膨張コンクリートを用いた CPC 部材に生じる軸方向膨張率を、下段配置の鉄筋量を 4 種類に採って、3 種類の配合について実施した実験結果を報告した。その結果をまとめると、次の知見が得られた。

- (1) 下段に太い鉄筋を配置すると、その部分の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ったが、上段に配置の鉄筋の膨張率はほとんど変化がなかった。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、下段に太い鉄筋を配置すると著しくなる。その現象が、T 形断面と矩形断面のいずれにおいても同様に認められる。
- (2) T 形断面のウェブ部に配置する一番太い鉄筋の位置、およびフランジ部に配置する鉄筋量を変化させた場合の膨張率と膨張勾配は、矩形断面の場合と同様に変化することが認められる。
- (3) 仕事量一定の仮定を用いた CPC 部材の膨張率の推定方法に基づく推定値は、T 形断面でも矩形断面と同様に実測値とよく一致した。この推定方法により、鉄筋の配置方法が膨張率に及ぼす影響を T 形断面についても、実用的に推定できる。

参考文献

- 1) 辻幸和, 岡村甫: 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, Vol.20, No.2, pp.73~87, 1982.2
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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