

T 形断面を有する CPC 部材の膨張分布

宮崎大学 工学教育研究部

正会員 博士 (工学) ○ 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)

博士 (工学)

栖原 健太郎

Abstract : Distributions of expansive strain and chemical pre-stress introduced in T type cross sectional chemically pre-stressed concrete(CPC) members have been scarcely reported comparing to those of rectangular cross sectional CPC members. Experimental results of measured expansive strains are reported in T type cross sectional CPC members varying flange widths of T type cross section, and arrangements of re-bars in expansive concrete. An estimation method based on Work-done concept applied to T type cross section is also proposed. Fairly good estimated expansive strain values are gained between measured values.

Key words : T type cross section, Expansive strain, Chemically pre-stressed concrete member

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 (Chemically pre-stressed concrete) の CPC 部材における膨張率の分布は, そのケミカルプレストレスの分布とともに, 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 部材についてはほとんど報告されていない。T 形断面で重要な, フランジの両端部の膨張コンクリートの膨張力がウェブの下段に配置された鉄筋に及ぼす効果については, これまで報告されていない。

本文では, フランジの幅と鉄筋の配置方法をそれぞれ 3 種類に変化した T 形断面を有する CPC 部材の膨張率の分布を報告する。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関わらず一定であるとの仕事量の概念⁴⁾を用いて, T 形断面に適用するケミカルプレストレインの膨張率の推定方法を提案する。そして, 膨張率の推定値と実測値を比較した結果についても報告する。

2. 供試体, 使用材料および配合の概要

表-1 および図-1 に示すように, 供試体は 4 シリーズに分けて作製した。A シリーズは, 鉄筋の呼び径と位置を A-1 の矩形断面において上下対称になるように一定にして, 上部のフランジの幅と形状寸法を変化させた。B シリーズは A シリーズと同様にフランジの幅と形状を変化させたが, 鉄筋を 3 段に配置し, 矩形断面でも上下非対称

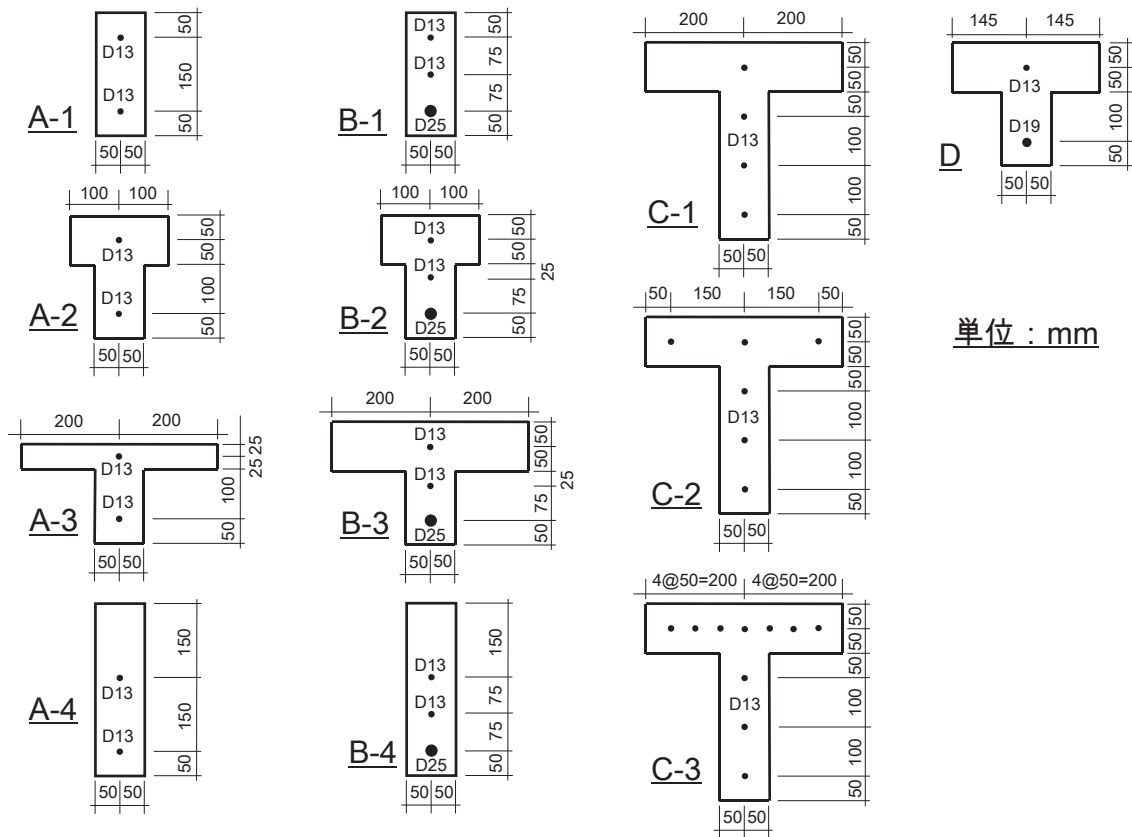
表-1 断面の名称および鉄筋の配置方法

断面の名称	鉄筋の配置と量 (cm ²)					$\Sigma A_{si}/A_c$ (%)	A_{s1}/b_xd (%)
	A_{s1}	A_{s2}	A_{s3}	A_{s4}	ΣA_{si}		
A-1	1.267	-	1.267	-	2.534	1.01	0.634
A-2	1.267	-	1.267	-	2.534	0.724	0.317
A-3	1.267	-	1.267	-	2.534	0.724	0.211
A-4	1.267	-	1.267	-	2.534	0.724	0.422
B-1	5.067	1.267	1.267	-	7.601	3.04	2.53
B-2	5.067	1.267	1.267	-	7.601	2.17	1.27
B-3	5.067	1.267	1.267	-	7.601	1.38	0.633
B-4	5.067	1.267	1.267	-	7.601	2.17	1.69
C-1	1.267	1.267	1.267	1.267	5.068	0.724	0.091
C-2	1.267	1.267	1.267	3.801	7.602	1.09	0.091
C-3	1.267	1.267	1.267	8.869	12.67	1.81	0.091
D	2.865	-	1.267	-	4.132	0.939	0.494

供試体の長さは, D シリーズの 120cm の他は 150cm,

d : 引張鉄筋の有効高さ, A_{si} : 下段からの配置鉄筋断面積, b_x : ウェブの幅,

A_c : コンクリートの断面積



単位 : mm

図-1 断面形状寸法および鉄筋の配置方法

表-2 コンクリートの配合および A 法一軸拘束膨張率

配合名	膨張材の種類	W/(C+E) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			スランブ (cm)	空気量 (%)	A 法一軸拘束 膨張率 (×10 ⁻⁶)	シリーズの名称
				W	C	E				
S	B	55	40	165	255	45	3.5~5.5	1.5~2.3	520	A シリーズ
T	A	45	42	167	321	50	5.5~9.0	1.5~2.0	520, 500	B, C シリーズ
V	A	45	42	167	331	40	9.0	2.2	350	D シリーズ

に配置している点異なる。C シリーズは、T 形断面の形状寸法を一定にして、フランジに配置する鉄筋の本数のみを変化させた。D シリーズは、T 形断面で、膨張材を少量に変化させている。

膨張材にはエトリンガイト系の A と石灰系の B を用いた。またセメント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、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、密度が 2.65g/cm³、粗粒率は 6.90 であった。鉄筋は、JIS G 3112 に適合している呼び名が 13 mm, 19 mm, 25 mm の各異形鉄筋を用いた。表-1 の鉄筋の番号は、下から上の順で、A と D シリーズが 1 番と 3 番、B シリーズが 1 番から 3 番、C シリーズが 1 番から 4 番である。

コンクリートの配合を、用いたシリーズ名とともに表-2 に示す。単位膨張材量を 40 kg/m³ から 50 kg/m³ に、単位結合材量を 300 kg/m³ と 371 kg/m³ に、水結合材比を 45% と 55% に、それぞれ変化させている。また、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も、表-2 に併記している。

コンクリートの打込みは、温度が 20±2℃、湿度が 80%RH 以上の部屋で行った。材齢 2 日に脱型した後の養生も同じ部屋において、濡れ布で覆った湿布養生とした。

膨張率の測定には、部材長さ方向中央部位置の鉄筋表面に貼付したゲージ長が 6mm のワイヤスト

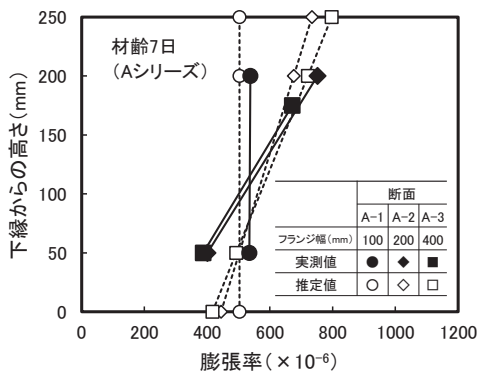


図-2 フランジ幅が膨張分布に及ぼす影響 (2 段配筋)

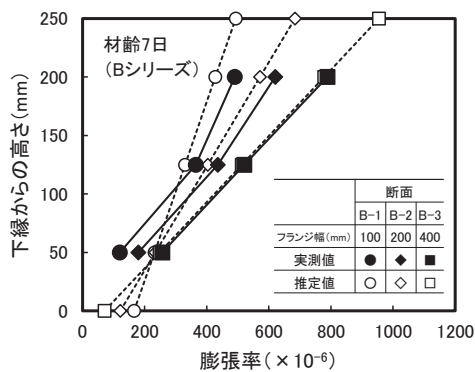


図-3 フランジ幅が膨張分布に及ぼす影響 (3 段配筋)

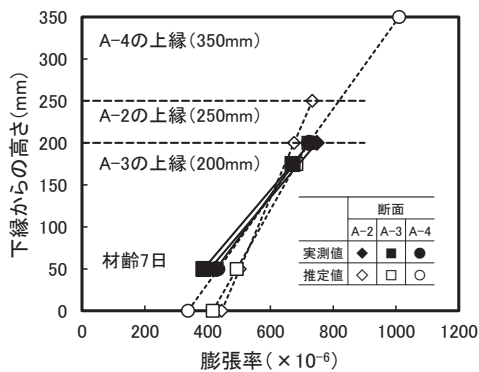


図-4 フランジの形状寸法が膨張分布に及ぼす影響 (2 段配筋)

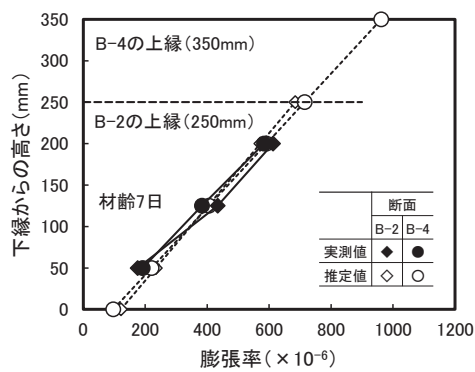


図-5 フランジの形状寸法が膨張分布に及ぼす影響 (3 段配筋)

レインゲージを用いた。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。

3. フランジ幅の影響

断面のフランジの幅と形状寸法を変えた場合の軸方向膨張率を図-2 に示す。厚さが 10cm と 5cm のフランジを、矩形断面からその 4 倍までその幅を増加させた場合である。なお、鉄筋は呼び名が D13 を 2 段で、下面から同じ距離の一定にしている。この図から明らかなように、鉄筋を断面図心に関して対称に配置した矩形断面の A-1 の場合には、軸方向膨張率が高さ方向に一樣な分布を示しているが、フランジ幅が増加するとフランジ部分の鉄筋比が減少するため、この部分の膨張率が増加している。それに対して、ウェブの鉄筋の軸方向膨張率は、フランジの鉄筋の膨張率が増加して膨張率の勾配が生じたため、少し減少している。

図-3 には、フランジの幅のみを変化させた場合の軸方向膨張率の分布を示している。基準とした矩形断面 B-1 が、図-2 の A-1 に比べて、高さ方向に偏心して非対称に、多量の鉄筋を配置したため、軸方向膨張率は全体に少し小さくなって、矩形断面 B-1 でも上段の鉄筋の膨張率が下段の鉄筋に比べて大きくなっている。この断面の上部にフランジ部分を追加して T 形断面にすると、膨張勾配は大きくなっている。そして、フランジ幅が増加すると、膨張勾配は大きくなっている。また、3 段に配置した鉄筋の膨張率は、T 形断面においても矩形断面と同様に、高さ方向にほぼ直線分布をしている。

4. フランジの形状が異なる膨張分布

フランジの形状が異なる場合の膨張分布を求めるため、幅が 10cm、高さが 25cm の矩形断面 A-1 と

B-1 に、断面積が 100cm^2 のコンクリートを横方向に追加した T 形断面の A-2 と B-2、並びに縦方向に追加した矩形断面 A-4 と B-4 のそれぞれの軸方向の膨張分布を示したのが、図-4 と図-5 である。

図-4 は、鉄筋を断面図心に対して対称に配置した矩形断面 A-1 を基準にしたものであるため、断面 A-2 および断面 A-4 は、それぞれ幅が 10cm 、高さが 15cm のウェブに、断面積が 200cm^2 のフランジを横方向および縦方向にそれぞれ追加したものであって、フランジの形状が及ぼす影響が最も大きく現れるものである。この図にはまた図-2 に示したように、断面 A-2 に比べ、フランジ幅を 2 倍に、フランジの厚さを 0.5 倍にし、断面積を同じく 200cm^2 とした断面 A-3 についても示している。フランジの形状をこの様に幅と厚さを 2 倍にいずれに変化させても、上段および下段の鉄筋が膨張を有効に拘束することができ、その結果生じた膨張率にほとんど変化が無いことが認められる。したがって、膨張勾配もほとんど等しく、変化が小さいことも認められる。

図-5 は、鉄筋を上下方向に偏心させて非対称に配置した矩形断面 B-1 を基準に、図-4 と同様に、等断面積のフランジ部分を横方向に追加した断面 B-2 と、また縦方向に追加した断面 B-4 としてそれぞれ示したものである。上段、中段、下段のいずれの鉄筋の膨張率も、両断面ではほぼ等しくなっていることが認められる。したがって、膨張勾配もほとんど等しく、変化が小さいものとなっている。

5. フランジに配置した鉄筋量の影響

T 形断面ではフランジ部分の膨張率が著しく大きくなり、コンクリートの品質が過大な膨張により低下する恐れがある。そのため、この部分に鉄筋を追加配置する対処が必要になる場合がある。図-6 は、このように配置した鉄筋量が軸方向の膨張率に及ぼす影響を示したものである。

フランジ部分に配置した鉄筋量が多くなると、この部分の膨張率が減少する。しかしながら、下段の鉄筋の膨張率の変化は少なく、膨張勾配も緩和している。そして断面 C-3 に示すように、フランジ部分に多量に鉄筋を配置すると、この鉄筋の軸方向膨張率が、下段の鉄筋よりも小さくなり、一般的な T 形断面の場合とは逆な膨張分布になっている。

6. フランジ幅方向における軸方向膨張率の分布

フランジ幅方向における軸方向膨張率の分布を、断面 C-2 および C-3 について求めた結果を、図-

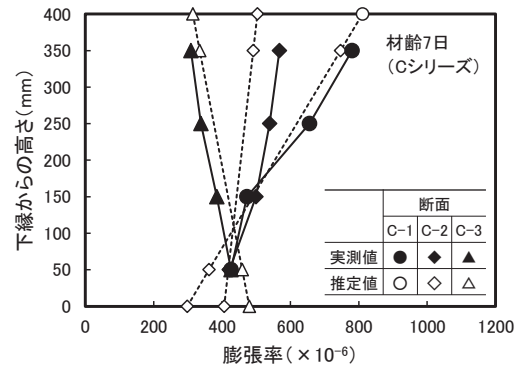


図-6 フランジに配置した鉄筋量が膨張分布に及ぼす影響

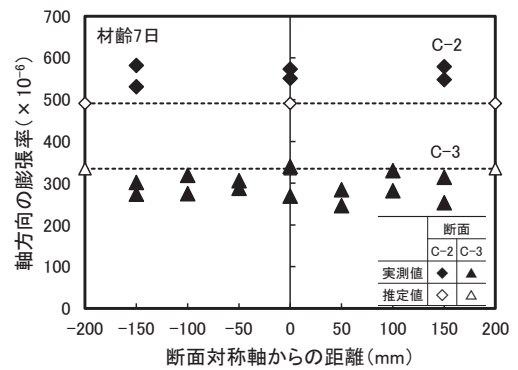


図-7 フランジ幅方向における軸方向の膨張分布

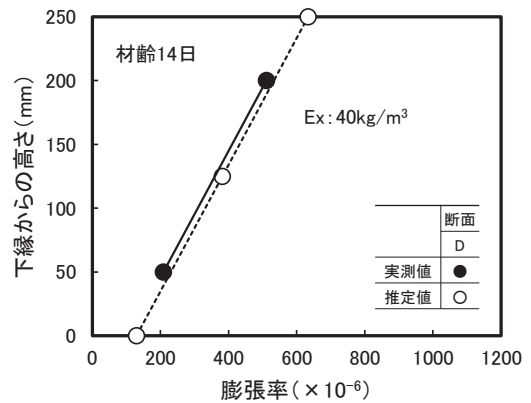


図-8 膨張材が少量の CPC 部材の膨張分布

7 に示す。少しばらつきがあるが、軸方向膨張率は、フランジ幅方向に一樣な分布を示すことが認められる。すなわち、本実験で用いた断面形状寸法は、フランジ幅がウェブ幅に比較して著しく大きくはないものの、断面形状が左右対称で、かつ鉄筋も左右対称に配置されている T 形断面の場合、軸方向膨張率は、フランジ幅方向にほぼ一樣な分布となり、対称軸における膨張率がフランジの値を代表しているといえるのである。

7. 膨張材が少量の膨張率分布

膨張材の使用量が 3.~6. で述べたよりも少ない CPC 部材の膨張率を図-8 に示す。断面 D の T 形断面である。エトリングait系の A の単位膨張材量を 40 kg/m³ と少なめに使用

して、A 法の軸拘束膨張率が 350 x 10⁻⁶ と膨張エネルギーの比較的少ない膨張コンクリートを用いた場合である。図-3 の場合と比較して、膨張率が小さくなるとともに、これらの値を結んだ膨張勾配も緩やかになっている。

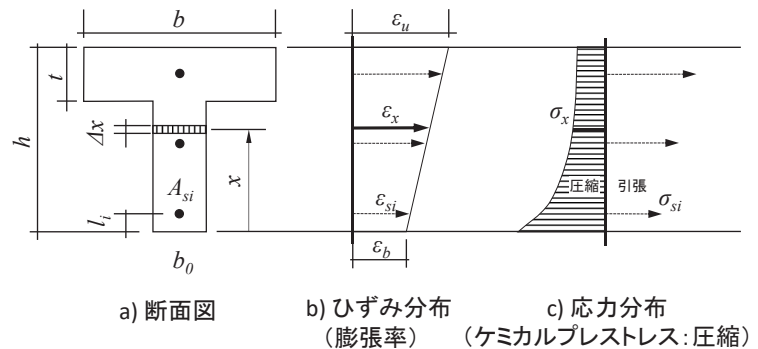


図-9 推定方法の概念図

8. 膨張率の推定値

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関わらず一定であるという仕事量一定則の仮定に基づき⁴⁾、鉄筋が T 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、以下に提案する。なお、CPC 部材において鉄筋に生じる膨張率はケミカルプレストレイン、コンクリートに導入される圧縮応力度はケミカルプレストレスと称する。

図-9 a) に示す T 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、式(1)で与えられ、図-9 b) に示す分布となる。

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

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 は拘束の程度にかか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-9 c) である。

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

次に、ウェブの幅を b_0 、フランジの幅を b 、その厚さを t 、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、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から式(3)が、下縁におけるモーメントの釣合い条件から式(4)が、それぞれ成立する。

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

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

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。

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

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

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、それぞれ簡便に推定できる。

図-2 から図-8 において、ケミカルプレストレインの膨張率の推定値も破線で示している。表-2 に示した JIS A 6202 附属書 B に規定されている A 法による基準となる一軸拘束膨張率の値を、そのまま用いて推定した。

実測値に比べて、少し精度の悪い推定値もあるが、フランジの幅と形状寸法、鉄筋の配置方法が異なる T 形断面についても、推定値は実測値と良く対応した値になっている。少し精度の悪い推定をしている場合については、今後検討を進めていきたい。

9. おわりに

本稿では T 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 部材の軸方向膨張率の実測値とともに推定値を、以下の通り報告した。

- 1) T 形のフランジの幅を、ウェブ幅の 4 倍まで増加すると、それに伴いフランジの膨張率が増加して、膨張勾配が大きくなる。
- 2) 軸方向の膨張率は、高さ方向に直線分布する。
- 3) フランジ部分の幅と厚さをそれぞれ 2 倍に変化しても、断面積が同じであれば、膨張分布はほぼ同じになる。
- 4) 仕事量一定則の仮定に基づく CPC 部材の膨張率の推定値は、実測値にほぼ一致した。

参考文献：

- 1) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第 235 号，pp.111～124，1975.3
- 2) 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
- 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) 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