

膨張コンクリートを用いた CPC 梁の 膨張分布と力学的性状

辻 幸和*1・栖原 健太郎*2・李 春鶴*3・小竹 弘寿*4

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

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

1. はじめに

鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete) 梁に膨張コンクリートを用いた 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インの膨張ひずみが異なる。そのため、曲げモーメントとせん断力が作用する CPC 梁の優れた力学的性状は、一般の RC 梁の力学的性状に比べて大きく異なる。これまでもいくつかの実験結果が報告されているが、鉄筋の配置方法と膨張コンクリートの配合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 6 種類と 5 種類の異なる鉄筋を配置し、4 種類の膨張コンクリートの配合を変えた CPC 梁の膨張ひずみ分布、曲げひび割れ発生耐力、斜めひび割れ発生耐力ならびに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、膨張ひずみとケミカルプレストレスの分布を推定し、その後に積層モデルによる曲げ解析を行う。曲げ解析には、先に提案した鉄筋のひずみ硬化を考慮した曲げ解析方法²⁾も用い、鉄筋の降伏に基づく従来法による曲げ引張破壊耐力などと対比した結果を報告する。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て報告する。

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^{3,4)}。そして、提示する推定方法の適用範囲を広げるため、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、梁軸方向に導入されるケミカルプレストレスの斜めひび割れ発生荷重に及ぼす効果を検討するため、スターラップは配置していない。

矩形断面は、高さが 250 mm、幅が 100 mm、長さを 1 200 mm と一定にして、T 形断面は、フランジの高さが 70 mm、幅が 400 mm で、ウェブの高さが 180 mm、ウェブの幅を

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)				$\Sigma A_{si}/A_c$ (%)	$A_{si}/b_s d$ (%)
	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

A_{si} : 下段からの配置鉄筋の断面積
 A_c : コンクリートの断面積

*1 Yukikazu TSUJI : 群馬大学・前橋工科大学 名誉教授

*2 Kentaro SUHARA : デンカ (株) インフラソリューション開発研究所 主席研究員

*3 Chunhe LI : 宮崎大学 工学教育研究部 准教授

*4 Hirohisa OTAKE : デンカ (株) インフラソリューション開発研究所 所長

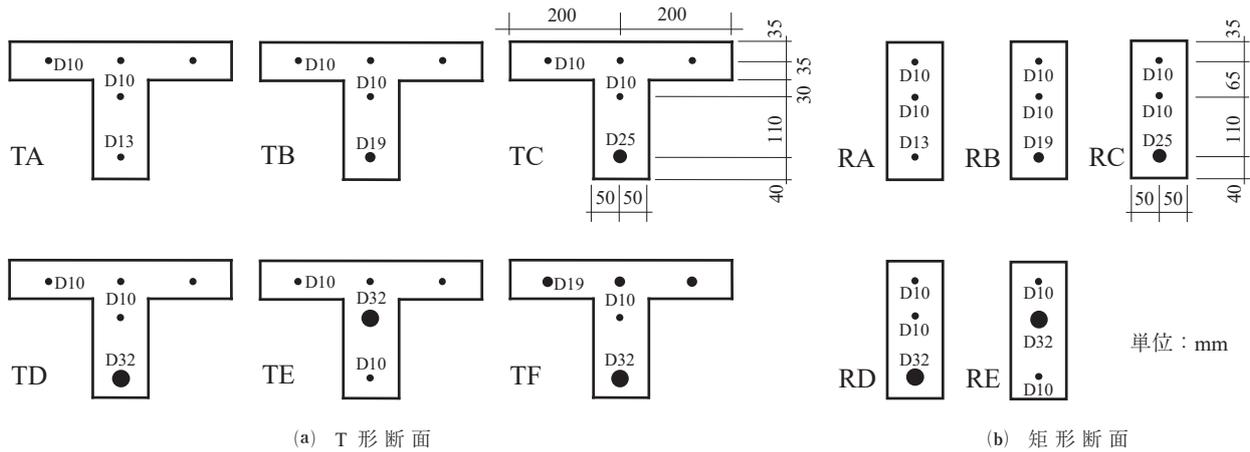


図 - 1 下段鉄筋が異なる T 形断面と矩形断面

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 TC, TD, RC, RD TE, TF, RE
								0	43.1	
								0	42.2	
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
								421	42.6	
								432	38.0	
配合 1*	50	39	165	280	50	4.0 ~ 5.5	1.5 ~ 2.0	898	39.8	TA, TB, RA, RB TC, TD, RC, RD TE, TF, RE
								982	42.4	
								949	34.9	
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
								533	57.0	
								551	61.7	
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
								482	31.9	
								482	34.7	

100 mm とした。鉄筋は 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。

部材中央部から 100 mm の位置の鉄筋表面に貼付したゲージ長が 6 mm の 2 枚のワイヤストレインゲージを用いて鉄筋の引張ひずみをコンクリートの打込み直前を起点にして計測し、その値がその位置のコンクリートの膨張ひずみと鉄筋のケミカルプレストレインに同じになるとした。引張ひずみは、2 枚の平均値とした。

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 30 型のエトリンガイト系の膨張材を用いた。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 2.62 g/cm³、粗粒率が 2.84 であった。川砂利は最大寸法が 25 mm で、表乾密度が 2.65 g/cm³、粗粒率が 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材齢 7 日の膨張率が約 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

表 - 3 鉄筋の機械的性質

呼び名	公称断面積 (cm ²)	降伏点強度 (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

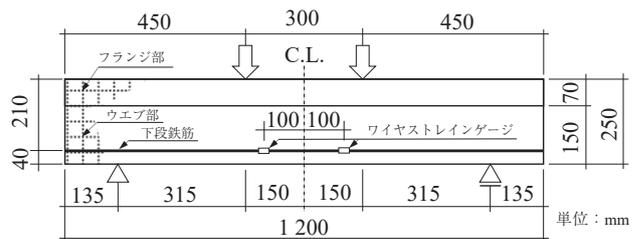


図 - 2 曲げ荷重方法 (T 形断面)

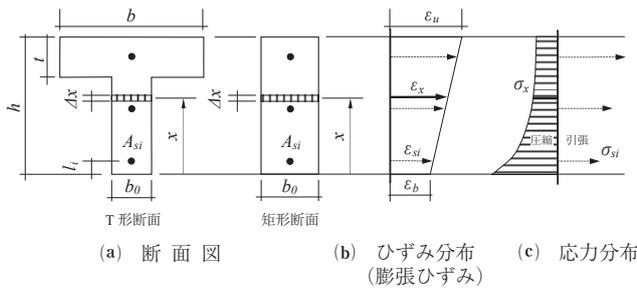


図 - 3 膨張ひずみとケミカルプレストレス (応力) の推定

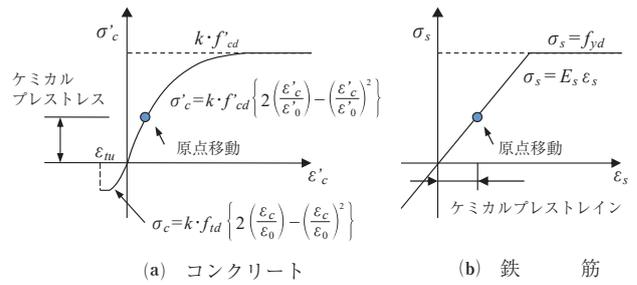


図 - 5 CPC 梁の応力 - ひずみモデル

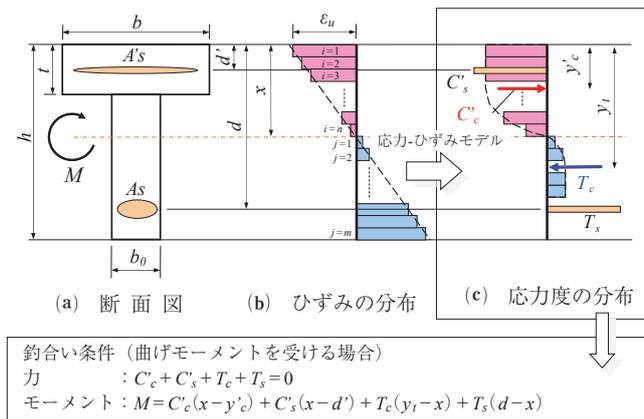


図 - 4 積層モデルによる曲げ解析

を主体にし、その値が約 900×10^{-6} の配合 1* を加えた。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/m^3 、配合 1*、配合 2 および配合 3 で 50 kg/m^3 、単位結合材量は配合 1 から配合 3 の順で 500 kg/m^3 、 330 kg/m^3 および 275 kg/m^3 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。なお、断面の名称の次に配合名を追記して、以後の梁供試体名を表している。

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 日に型枠を取り外したあと、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。その後は、湿布を取り除いて、載荷試験の材齢 28 日までには部屋に放置した。

載荷試験は、材齢 28 日において図 - 2 にしたがって行った。なお、せん断スパン a と梁の有効高さ d の a/d は 1.5 と一定に採ったのは、梁の曲げひび割れ幅を実測すること、および下段鉄筋に D32 を配置した梁がせん断破壊する場合はせん断圧縮破壊させるためである。

使用した鉄筋の機械的性質を表 - 3 に示す。計算に用いた鉄筋のヤング係数は 200 kN/mm^2 とした。JIS G 3112: 2020 (鉄筋コンクリート用棒鋼) の SD295A 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。

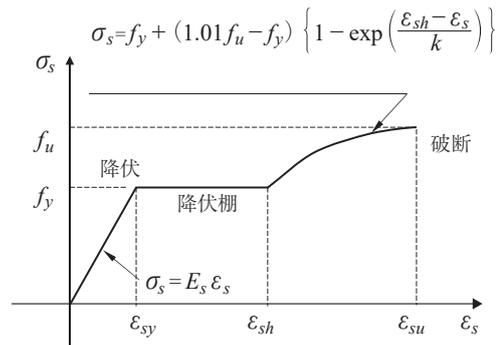


図 - 6 鉄筋のひずみ硬化を考慮した応力 - ひずみ曲線

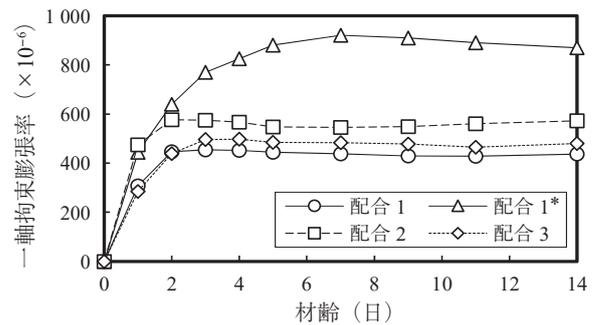


図 - 7 一軸拘束膨張率

3. ケミカルプレストレン (膨張ひずみ) とケミカルプレストレスの推定方法

CPC 梁に生じる膨張ひずみとケミカルプレストレスは、膨張コンクリートが拘束体の鉄筋に対してなす仕事量 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。この仮定により、JIS A 6202 附属書 B (参考) に規定されている一軸拘束膨張率の測定結果から算定した仕事量を基準として、実際の CPC 梁のある断面の鉄筋に対してなす仕事量が等しくなることから、CPC 梁に導入される鉄筋のケミカルプレストレンを含む膨張ひずみとケミカルプレストレスを、以下のとおり推定することができる¹⁾。すなわち、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 梁の膨張ひずみの分布は、図 - 3 に示すように、膨張ひずみが断面の高さ方向に直線分布するものと仮定^{1, 3)}し、断面内の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

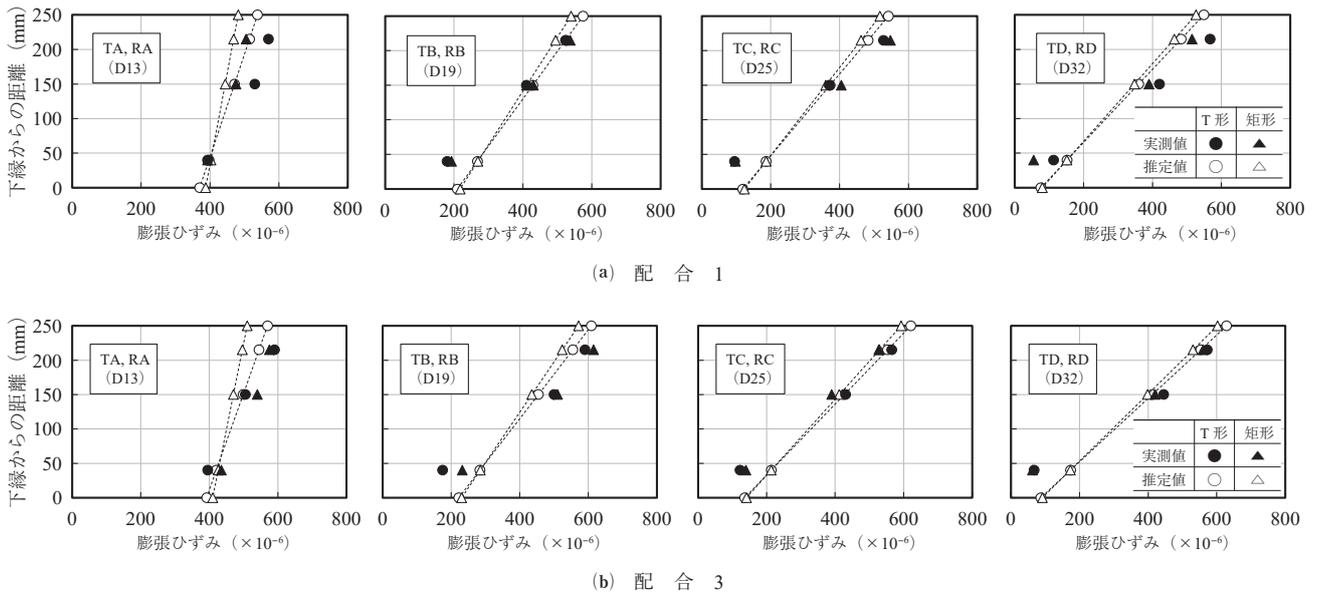


図 - 8 下段鉄筋径を変化させた T 形断面と矩形断面の膨張ひずみの分布の一例

および下縁におけるモーメントの釣合い条件から求める。その手順は、下縁の膨張ひずみの ϵ_b 、上縁の膨張ひずみの ϵ_u を、力の釣合い条件およびモーメントの釣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、その結果を元に 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スの分布をそれぞれ簡便に精度良く推定するものである。なお、矩形断面では図 - 3 に示したフランジの幅の b を b_0 に、フランジの高さの t を 0 として推定できる¹⁾。

4. 積層モデルによる曲げ解析方法

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合いから、断面応力度の算定を行う力学モデル⁴⁾である。外力を受ける前の 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ス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、コンクリート部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ス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。外力を受ける場合には、移動した原点を基準として応力およびひずみの増加量が加算される。CPC 梁では、外力を受ける前の状態を初期条件とした応力 - ひずみ曲線を積層モデルに適用することで、従来の曲げ解析方法である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⁴⁾することができる。なお、RC 梁では、収縮などの体積変化を無視できる場合には、外力を受ける前の断面内の応力およびひずみはいずれも零である。そのためコンクリートおよび鉄筋の応力 - ひずみ曲線の原点移動のないものを適用すればよい。

また、鉄筋のひずみ硬化を考慮した曲げ解析は、図 - 6 に示す鉄筋の応力 - ひずみ曲線を用いて、平均応力 - 平均ひずみの関係¹⁾を適用する。

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【設計編】に規定されている算定式⁵⁾をそれぞれ用いる。その際、部材係数 γ_b は 1.0 とする。

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の経過に伴う測定結果を図 - 7 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 日の膨張率の実測値に基づいて行った。

配合 1、配合 2 および配合 3 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 が 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。水結合材比が 50% で E が 50 kg/m^3 の配合 1* では、一軸拘束膨張率は約 900×10^{-6} と大きくなっている。

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、 E が 50 kg/m^3 の配合 1* でも小さいことが認められる。

6. 下段鉄筋量が異なる膨張ひずみの分布

T 形断面と矩形断面のそれぞれの梁について、下段の鉄筋の呼び径を変えた場合の軸方向膨張ひずみの分布例を図 - 8 に示す。図 - 8(a) は水結合材比が 50%、 E が 40 kg/m^3 の配合 1、(b) は水結合材比が 60%、 E が 50 kg/m^3 の配合 3 の場合である。

いずれの配合においても、下段の鉄筋量が大きくなると膨張コンクリートの膨張を拘束する程度が大きくなって、その位置の膨張ひずみが小さくなる。しかしながら、上段に配置した鉄筋の膨張ひずみはほとんど変化がない。その

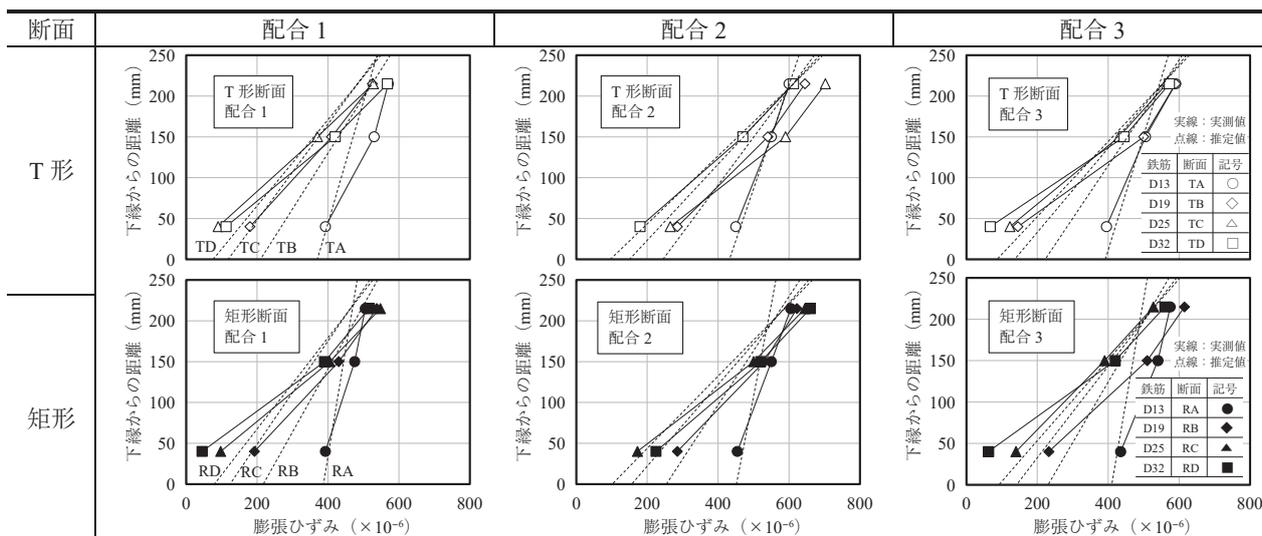


図 - 9 下段鉄筋量の影響

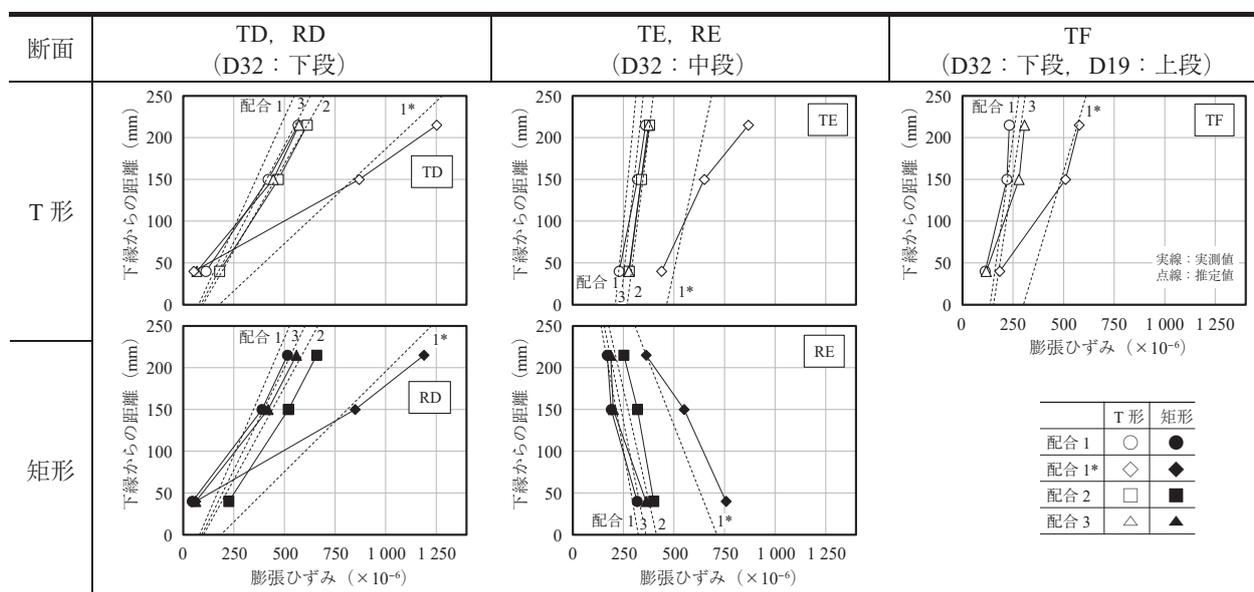


図 - 10 D32 の鉄筋の配置位置等の影響

ため、軸方向膨張ひずみ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。

このような膨張ひずみ分布の現象は、T形断面と矩形断面ともに同様の傾向にある。両断面ともに、膨張ひずみがほぼ等しく、膨張勾配もほぼ同じになっている。

図 - 8 には、膨張ひずみの推定値を点線で示している。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計画したようにほぼ等しくなっていることが認められる。総体的に実測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多いほど、上段に配置した鉄筋の膨張ひずみの実測値は推定値よりも少し大きくなり、また、下段鉄筋の膨張ひずみの実測値は推定値より少し小さくなっている。

この現象は、下段の鉄筋量が多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ひずみは小さくなるが、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、生じる膨張ひずみはそれらのひずみの分が小さくなって実測されている³⁾。

なお、図 - 8 の (a) と (b) を比較すると、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、配合 3 のコンクリートは、ケミカルプレストレスによる圧縮される弾性ひずみとクリープひずみが配合 1 に比べて大きくなり、実測される膨張ひずみが小さくなることの影響を

大きく受ける配合と予想される³⁾。しかしながら図 - 8 (b)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ひずみに並びに膨張勾配は、図 - 8 (a)とほぼ同様であることが認められる。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 - 8 (a)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ひずみに及ぼす影響を、図 - 9に示す。推定値は点線で示すが、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、その位置の膨張ひずみ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ひずみ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 - 8と同様に認められる。

これらのことから、CPC梁の断面形状および鉄筋の配置が同じ場合、同一の一軸拘束膨張率であれば、水結合材比が36%から60%と配合の異なる膨張コンクリートを用いても、CPC梁の膨張ひずみ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より、膨張コンクリートの材齢28日の圧縮強度が20 N/mm²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/mm²程度、矩形断面で0.85 N/mm²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と考えられる。

図 - 10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) の膨張ひずみの分布を、TD, RDとあわせて示す。点線で示す膨張ひずみの推定値は、下縁において配合1, 配合3, 配合2の順番で大きくなる。

T形断面ではD32の鉄筋を下段から中段に移動すると、下段鉄筋の膨張ひずみは増加し、上段鉄筋の膨張ひずみは減少して、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

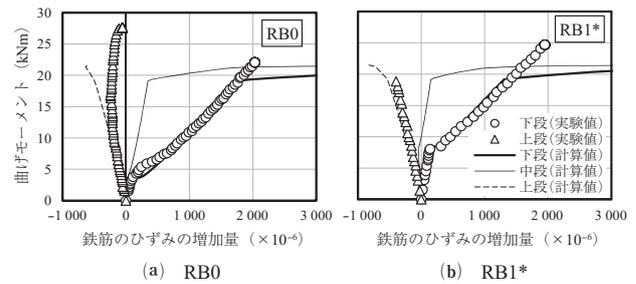


図 - 11 下段鉄筋のひずみの増加量と外力モーメントの関係

位置の膨張ひずみの減少が著しくなって、膨張勾配が逆になっている。このことは、断面内におけるD32が膨張を拘束する程度に相違があることを示すものであり、点線で示す推定値にも現れている。

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、その位置の膨張ひずみが小さくなって、下段鉄筋の膨張ひずみ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は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、膨張ひずみの分布および膨張勾配を制御することができる。

7. 鉄筋のひずみの増加量と外力モーメントの関係

鉄筋のひずみの増加量と外力モーメントの関係を、図 - 11に示す。RB0とRB1*を対比して、下段鉄筋の実験値と計算値を示す。RB0のRC梁に、膨張コンクリートを適用したCPC梁のRB1*は、コンクリート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耐力が増加している。その増加の程度はケミカルプレストレスに相当する。

外力モーメントの増加に伴う下段鉄筋のひずみの増加量は、図 - 11に示すように、曲げひび割れが発生した後も小さくなっている。そしてこの減少程度は、下段鉄筋に導入されたケミカルプレストレスに相当する。したがって、曲げひび割れ幅も、下段鉄筋のひずみの増加量に応じて減少させることができる。

下段鉄筋の降伏により中立軸が上昇して圧縮縁が圧壊する曲げ引張破壊耐力の計算値は、RC梁とCPC梁とほぼ同じになることも認められる。その際に、下段鉄筋の降伏に伴って、中段鉄筋も降伏して曲げ引張破壊に至ることも、計算値は示している。これらケミカルプレストレスの導入は、10章に述べるように、斜めひび割れ発生耐力も増加させる。

なお、上段鉄筋のひずみの増加量は、マイナスのまま圧縮側を示し、下段鉄筋の降伏後もその絶対値は増加している。この現象は11章において後述する。

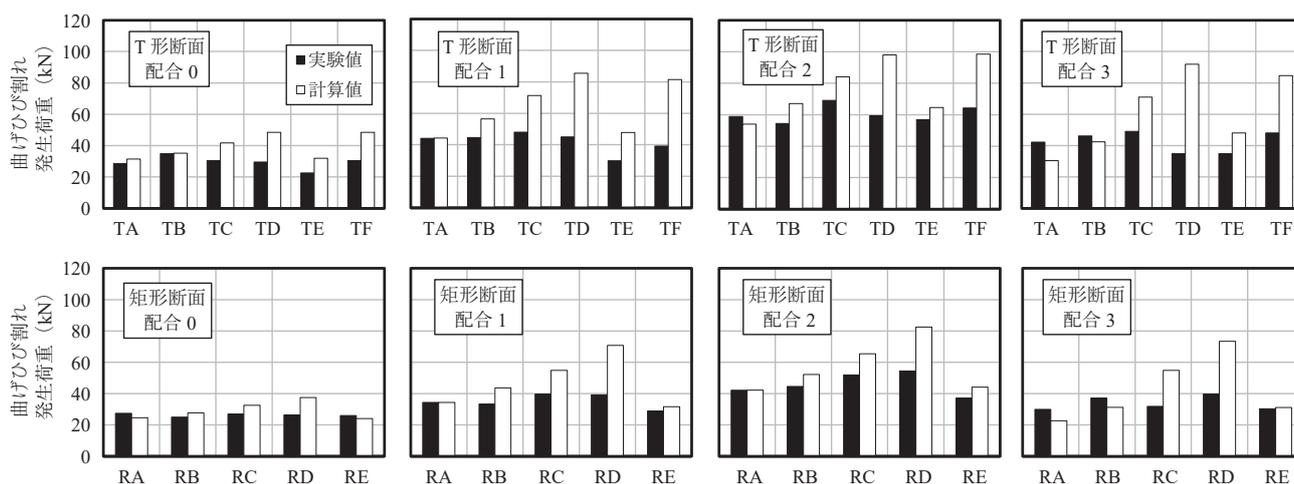


図 - 12 曲げひび割れ発生荷重

8. 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は、最初の曲げひび割れが発生したがその曲げひび割れ発生荷重を、実験値と計算値について、図 - 12 に対比して示す。曲げひび割れは、下面に貼付したゲージ長 60 mm のワイヤストレーンゲージのひずみの急変点とした。

T 形断面と矩形断面の両断面において、膨張コンクリート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、いずれの配合においても、計算値に比べて実験値が小さくなる傾向が認められ、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。湿布養生から載荷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 - 9 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は大きく推定されるが、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の主要原因と考えられる。

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比較すると、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 - 12 に対比して示したように、RC 梁と比較した 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。

9. CPC 梁の曲げひび割れ幅

曲げひび割れは、図 - 2 に示した曲げモーメント一定区間に最初に生じた。その後荷重の増加により一定区間に 2 番目の曲げひび割れが生じ、その後はせん断スパンにも曲げひび割れが生じた。

下段鉄筋の引張ひずみの増加量と曲げひび割れ幅の関係を図 - 13 に示す。矩形断面において、曲げひび割れ幅は下段鉄筋の側面位置で 50 mm のゲージ長のコンタクト型ひずみ計により、曲げモーメント一定区間で測定した最大から 2 本の平均値を示している。なお曲げひび割れ幅は、コンタクト型ひずみ計を用いて手動で測定したため、T 形断面ではフランジが邪魔になって、精度の良いデータが得られなかった。

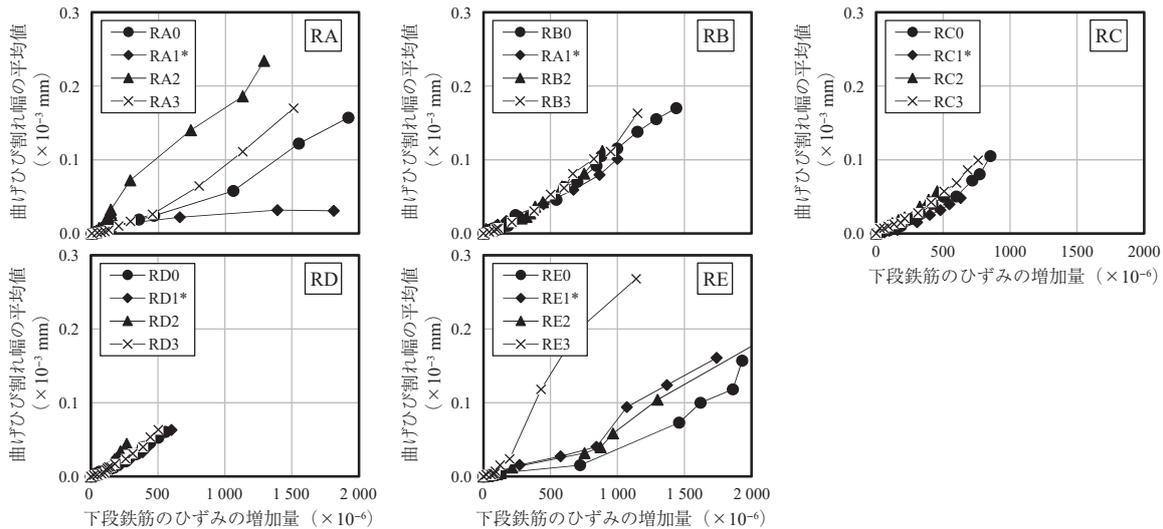
図 - 13(a) は、各断面ごとに配合を要因として整理したものである。下段鉄筋が D19 の RB, D25 の RC, D32 の RD の断面では、膨張コンクリートの使用の有無、異なる配合においても、曲げひび割れ幅は下段鉄筋の引張ひずみの増加量にほぼ比例して増加していることが認められる。すなわち、同一の外力モーメントに対して下段鉄筋の引張ひずみの増加量は、下段鉄筋に導入されたケミカルプレストレンの量だけほぼ小さくなるため、曲げひび割れ幅は、その分小さくなるのである。なお、下段鉄筋が D13 の RA, D10 の RE は曲げひび割れ幅のばらつきが大きく、安定していない。

各配合ごとに下段鉄筋を要因として図示したのが、図 - 13(b) である。下段鉄筋の引張ひずみの増加量に対応する曲げひび割れ幅は、D19, D25, D32 とともにほぼ同じであることが認められる。D13 と D10 についてばらつきが大きいことは、図 - 13(a) と同様である。

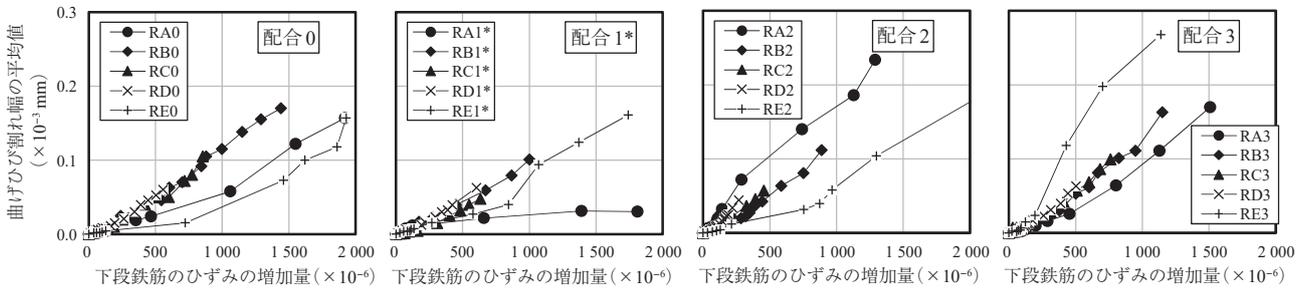
10. CPC 梁の斜めひび割れ発生荷重

CPC 梁と RC 梁はともに、せん断スパンに生じた曲げひび割れが発達した後に、載荷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 - 14 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。

コンクリート標準示方書に示されている機械式プレストレスと同じ導入効果がケミカルプレストレスにもあるとし



(a) 同一断面における配合の影響



(b) 同一配合における断面の影響

図 - 13 曲げひび割れ幅と下段鉄筋のひずみの増加量の関係

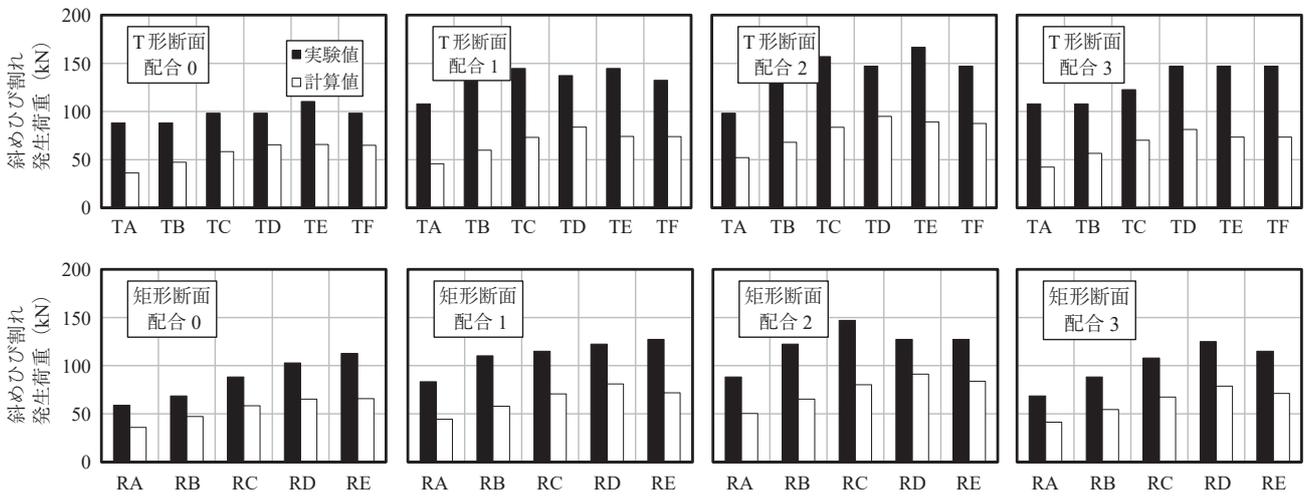


図 - 14 斜めひび割れ発生荷重

て算定した計算値は、実験値に比べて小さくなっているが、CPC 梁の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 梁の計算値と実験値の差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により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唆される。

また、一軸拘束膨張率はほぼ同じであるが、水結合材比

が異なる配合 1、配合 2 および配合 3 の CPC 梁の斜めひび割れ発生荷重は、少しばらつきはあるものの、同一断面における実験値と計算値の差は、水結合材比の影響は少なく、いずれの CPC 梁でもほぼ同等であることが認められる。

11. CPC 梁と RC 梁の破壊形式と破壊荷重

図 - 15 には、破壊荷重の実験値と計算値を示す。大半

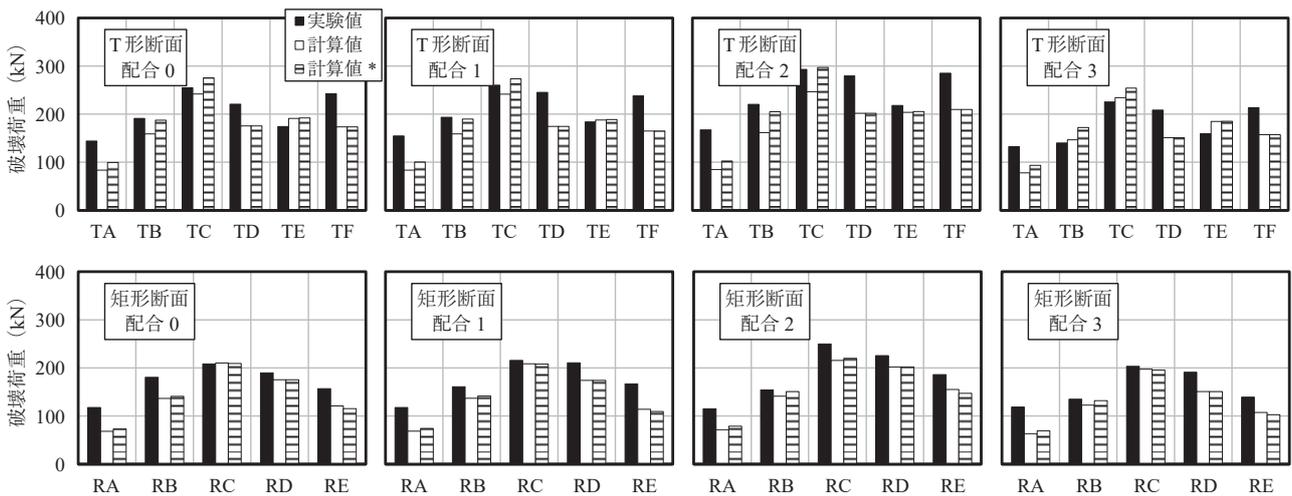


図 - 15 破壊荷重 (凡例の「計算値*」がひずみ硬化を考慮した場合)

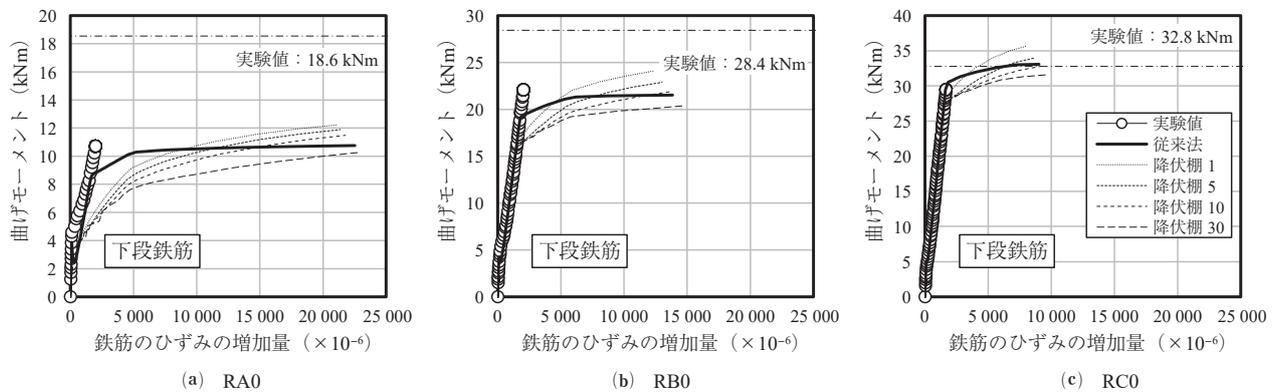


図 - 16 降伏棚を要因とした鉄筋のひずみの増加量と曲げモーメントの関係

の梁供試体は、下段に配置した鉄筋が降伏した後上縁のコンクリートが圧壊した曲げ引張破壊を生じた。しかしながら、D32を下段に配置したT形断面のTDとTFならびに矩形断面のRDは、実験計画の段階で予測していた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の実験値は、分担する鉄筋の引張力が同じため、また分担する圧縮部分の力がほぼ同じためにはほぼ同じ値となっている。またせん断圧縮破壊荷重の実験値も、両梁は同じ理由でほぼ同じ値となっている。すなわち、CPC梁のこれら破壊荷重は、導入されたケミカルプレストレスが曲げ引張破壊荷重とせん断圧縮破壊荷重にほとんど影響を及ぼさないため、RC梁と同じ値になる。

図 - 15 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。特に、せん断圧縮破壊荷重に及ぼす圧縮強度の影響が著しくなっている。

計算値も実験値とほぼ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。そしてこれら断面の計算値は、実験値に比べて小さくなっており、RA

の断面では50%程度も小さい場合があることが認められる。

この計算値は、引張鉄筋の降伏点強度が一定のまま、中立軸が圧縮側に移動して、圧縮縁のコンクリートが圧壊する曲げ引張破壊荷重についての従来の積層モデルによる。これに対して4章に提案した引張鉄筋が降伏棚を過ぎてひずみ硬化域に達していることを考慮した積層モデル方法による計算値を、図 - 15 に計算値*として、追加して示す。計算における鉄筋のひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{sh} を降伏ひずみの8.7~9.4倍の0.015とした場合である⁵⁾。また、降伏棚を要因とした鉄筋のひずみの増加量と曲げモーメントの関係を、図 - 16 に示す。なお、凡例の降伏棚の数値は、鉄筋のひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{sh} を降伏ひずみ ϵ_{sy} の倍数として表記したものである。また、図中にそれぞれの破壊時の曲げモーメントの実験値を併記している。図 - 16 より、ほかの断面に比べて引張側の鉄筋比が小さいRA0では、かなり早い荷重段階でひび割れ面における下段鉄筋の降伏が生じ、その後の曲げモーメントの増加に伴い、従来法に比べて急に下段鉄筋のひずみの増加量が増える曲線を描いて、従来法で求めた曲げモーメントを超えて破壊に至っている。すなわち、RA断面では、ひずみ硬化を考慮した計算値は従来法による計算値に比べてとくに大きくなり、

実験値に近づいている。そして、従来法に比べてひずみ硬化を考慮した計算値が大きくなることは、下段に鉄筋をD19配置した梁には著しくなる場合があり、下段鉄筋にD25を配置した梁とさらに下段鉄筋が太くなる梁には認められなくなる。

12. おわりに

本文では、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ひずみの分布、曲げひび割れ発生荷重、曲げひび割れ幅、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、仕事量一定の仮定に基づく推定値または積層モデルによる計算値と対比した。本文の範囲で、次のことがいえる。

- (1) 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の仮定に基づくCPC梁の鉄筋に導入された引張ひずみのケミカルプレストレインの推定値は、実測値とよく一致している。そのため曲げひび割れ幅は、推定されたケミカルプレストレインに相当する分小さくなる。
- (2) 仕事量一定の仮定に基づくコンクリートに導入された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に及ぼす計算値は、実験値とほぼ良く対応している。
- (3) 仕事量一定の仮定により推定する方法は、積層モデル

による曲げ解析方法を伴って、実用的に膨張コンクリートを用いたCPC梁の曲げ性状に関する使用効果を簡便に推定できる。

- (4) 曲げ引張破壊荷重とせん断圧縮破壊荷重は、それぞれ引張鉄筋が担当する引張力と圧縮側のコンクリートが担当する圧縮力の影響を主として受けるため、CPC梁とRC梁はほぼ等しくなることが確かめられた。
- (5) 引張鉄筋の量が比較的少ないCPC梁とRC梁の曲げ引張破壊の耐力の計算には、鉄筋が降伏域を超えてひずみ硬化域に達したことを考慮した方法も適用することができる。

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) 辻 幸和，栖原健太郎，李 春鶴，小竹弘寿：鉄筋のひずみ硬化を考慮したCPC梁の曲げ性状，プレストレストコンクリート論文，Vol.62，No.6，pp.117-126，Nov.2020
- 3) 栖原健太郎，李 春鶴，辻 幸和：T形断面と矩形断面を有するCPC部材の膨張分布，コンクリート工学年次論文集，pp.1517-1522，2019.7
- 4) 李 春鶴，辻 幸和，栖原健太郎：鉄筋の配置が異なるCPCはりの力学的性状，プレストレストコンクリート工学会第28回シンポジウム論文集，pp.741-746，2019.11
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.3

【2020年7月10日受付】



刊行物案内

PC 津波防災シンポジウム講演論文集 「津波防災のためのPC構造物の可能性を探る」

平成27年8月

定 価 3,666 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 3,000 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会