

先打ちしたウェブ部上に膨張コンクリートを用いた非対称断面を持つ T形断面CPC梁の膨張分布

NPO法人持続可能な社会基盤研究会 理事長 辻 幸和

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、ひび割れの制御は重要な課題である。ケミカルプレストレストコンクリート(CPC:Chemically pre-stressed concrete)は、膨張材を収縮補償の用途に比べ多く配合する。これにより鉄筋には、膨張側の体積変化を多く生じさせる膨張コンクリートとの付着によって、ケミカルプレストレインと称する引張ひずみが、その位置の膨張コンクリートの膨張ひずみと同量発生する。この時、内部拘束体である鉄筋と外部拘束体である隣接部材によって拘束されているコンクリートにはケミカルプレストレスと呼ばれる圧縮応力が導入されるため、曲げひび割れ発生耐力はケミカルプレストレスに相当する分増加する。また、曲げひび割れ発生後に生じる鉄筋の引張ひずみは、ケミカルプレストレインと外力を受けた鉄筋の引張ひずみの増加量を合計した値になるため、外力を受けた鉄筋の引張ひずみの増加量をケミカルプレストレインに相当する分低減することができ、部材の曲げひび割れ幅を小さく制御することができる。このように、CPC梁は優れた力学的性状を持つが、実構造物へ適応するには導入されるケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインの精度の高い把握が重要である。これまでの研究¹⁾では、内部拘束体である非対称に配置された鉄筋が膨張分布に及ぼす影響は明らかとされているが、実構造物においては、隣接する部材からの外部拘束の影響も考慮する必要がある。

本研究では、T形断面において先打ち部材としてのウェブ部を打ち込んだ後に、非対称な鉄筋配置を持つフランジ部を打ち込むことで、非対称断面を持つCPC梁の部材間の拘束を再現し、その膨張分布の実測値と推定値から外部拘束体の影響についても検討した結果を報告する。

2. 供試体および使用材料と配合の概要

梁供試体の断面形状寸法と鉄筋の配置を図-1に示す。断面の形状はT形断面とし、ウェブ部の形状寸法を変化させたTA, TB, TCの3種類の供試体を用いた。鉄筋が配置された列を供試体の左からそれぞれA列, B列, C列, D列とし、鉄筋が配置された段を上からE段, F段, G段, H段, I段, J段としている。また、フランジ部と十分に付着させる目的で、端部から100mm間隔で2本ともう一端から150mm間隔で2本のスターラップを配置している。ウェブ部上部に打ち込むフランジ部はA列にD19の鉄筋2本を、他の列にD10の鉄筋2本をそれぞれ配置されたものとし、全断面で同一の形状寸法とした。

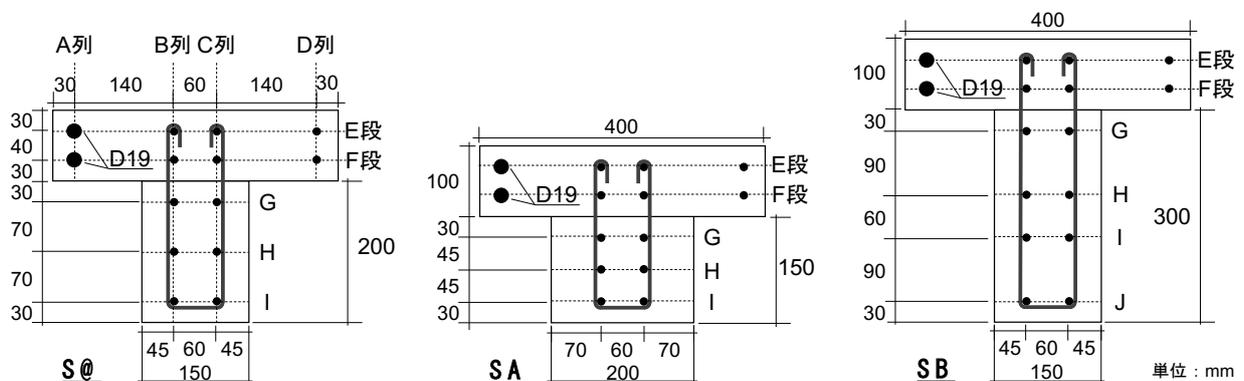


図-1 供試体の断面形状寸法と鉄筋の配置図

本文では、膨張コンクリートによる引張力によって鉄筋に生じた引張ひずみを、その位置の膨張ひずみと称する。膨張ひずみの測定は、供試体の軸方向中央部より、両端側それぞれ100mmの位置の鉄筋表面に貼付したゲージ長が6mmのワイヤストレインゲージを用いて測定し、その平均値を用いた。

供試体の中央部分において安定した軸方向の膨張ひずみを生じさせる定着区域を確保する目的で、供試体の全長はフランジ幅の3倍となる1200mmとした。TAはウェブ部の幅が150mm、高さが200mmとし、TBはウェブ部の幅が200mmで高さが150mmとしており、ウェブ部の体積をTAと同一として接着面積を変更した。TCはウェブ部の幅が150mmで高さが300mmとしており、接着面積がTAと同様であるが、ウェブ部の高さを1.5倍に変更している。

表-1に本研究で用いたコンクリートの配合を示す。水結合材比と細骨材率は既往の研究²⁾の配合を参考として、それぞれ50%と39%とし、単位膨張材量を35kg/m³とした。

表-1 コンクリートの配合

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
		水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
50	39	165	295	35	748	1179	1.103

表-2 A法一軸拘束膨張率と圧縮強度および静弾性係数

	養生	TA-W	TA-F	TB-W	TB-F	TC-W	TC-F
A法一軸拘束 膨張率(×10 ⁻⁶)	湿布	583	557	427	421	628	669
	水中	586	603	431	433	623	666
圧縮強度 (N/mm ²)	湿布	39.5	44.0	42.2	46.6	45.3	41.7
	水中	39.1	44.2	42.7	45.0	43.8	40.7
静弾性係数 (kN/mm ²)	湿布	42.2	41.1	40.6	43.7	39.6	41.9
	水中	43.7	41.2	40.4	43.3	38.3	41.6

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、骨材は粗骨材と細骨材ともに大分県津久見産の石灰石である。膨張材にはJIS A 6202 に適合する20型のエトリンガイト・石灰複合系の膨張材を用いた。また鉄筋には、呼び名がD10とD19のSD345異形鉄筋を用いた。

供試体は梁供試体の部材ごとに6本のJIS A 6202 附属書Bに規定されているA法一軸拘束試験体および圧縮強度試験体を同時に作製した。表-2にA法一軸拘束試験体の材齢7日における膨張率と材齢28日における圧縮強度および静弾性係数を示す。打込みは20±2℃に調節された養生室内に材料を運搬して実施した。その後、同様の環境で養生し、材齢1日で脱型を行った。ウェブ部はフランジ部との付着向上のため、脱型後すぐに写真-1に示すように、表面をウォータージェットによって洗い出しを行い、打込みを行った養生室内で湿布養生をした。その後、材齢29日目にフランジ部を打ち込んだ。3本のA法一軸拘束試験体と圧縮強度用試験体は、脱型後すぐに供試体と同様の養生室にて湿布養生を行った。残りのA法一軸拘束試験体と圧縮強度用試験体は、20±2℃の水中養生を行った。

表-3 ウェブ部の拘束鉄筋比と導入されたケミカルプレストレス

断面名称	TA	TB	TC
拘束鉄筋比 (%)	1.43	1.43	1.27
ケミカルプレストレス (N/mm ²)	1.39	1.02	1.41

3. 一軸拘束膨張率とウェブ部のケミカル

プレストレス

図-2に、湿布養生したA法一軸拘束試験体の平均膨張率と材齢の関係を部材ごとに示す。図より、膨張反応は材齢7日までに収束していることが確認できるため、以降の供試体膨張ひずみの検討においては、材齢7日を基準に検討を行った。

また、TAとTCと同時に作製したA法一軸拘束試験体の膨張率はおおむね同様の値を示しているが、TBと同時に作製したA法一軸拘束試験体は膨張率が200 μ 程度小さい値となっている。そこで、材料保管時の室温と湿布養生をさせた拘束試験体の平均膨張率の関係を図-3に示す。図より、材料保管時の室温と膨張率の間にはある程度の相関関係が確認できる。打込み時の材料温度が変動することによって、セメントおよび膨張材の反応に差が生じたため、同配合で膨張率が異なる結果となったことが推察されるが、詳細については今後の検討課題である。

表-3には、鉄筋の膨張ひずみに基づいて、ウェブ部の拘束鉄筋比と材齢28日の導入されたケミカルプレストレスを示す。いずれの断面にも1N/mm²程度の均一なケミカルプレストレスが導入されている。

4. 膨張ひずみ分布

図-4に、フランジ部の打込み後7日経過時の、つまり材齢35日の各断面形状における軸方向膨張ひずみの高さ方向の分布を示す。この時、膨張ひずみの測定起点はフランジ部打込み終了直後としている。また、TAのB列I段の鉄筋のひずみは計測が不良であったためその計測結果を省いている。図より、断面形状寸法によらず、膨張ひずみは高さ方向に直線分布を示している。また、A列に配置された拘束の大きいD19鉄筋の影響で、左右方向の膨張ひずみに差ができており、その膨張勾配は列同士ではほぼ平行に分布している。さらに、ウェブ部下段であるTA、TBのI段とTCのJ段に注目すると、膨張ひずみは零以下となっている。これは、ウェブ部上段がフランジ部の膨張によって引張を受けた結果であり、その影響が下段にまで及んでいることが原因である。つまり、ウェブ部全体がフランジ部の拘束体として作用している。A法一軸拘束膨張率がほぼ同じ値であるTAとTCを比較した場合、TCのフランジ部の膨張ひずみがTAに比べて小さくなっている。これは、ウェブ部の体積が大きいTCはTAに比べて、より大きな拘束を受けることが原因である。また、各断面の列ごとに着目した場合、最も拘



写真-1 表面処理後のウェブ部上面

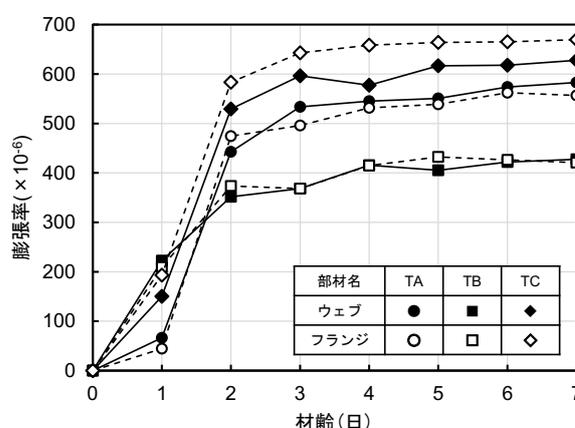


図-2 湿布養生したA法一軸拘束膨張率の部材ごとの経時変化

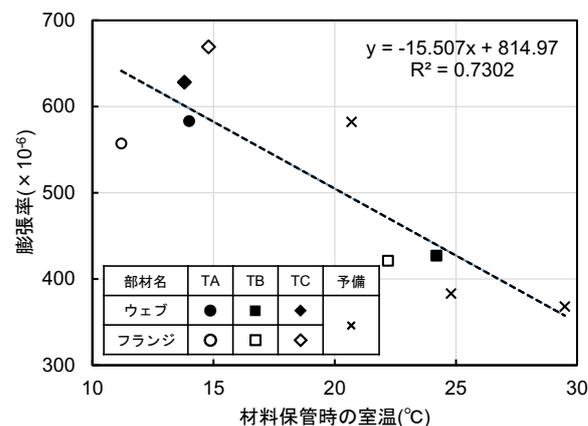


図-3 拘束試験体の膨張率と材料保管時の室温の関係

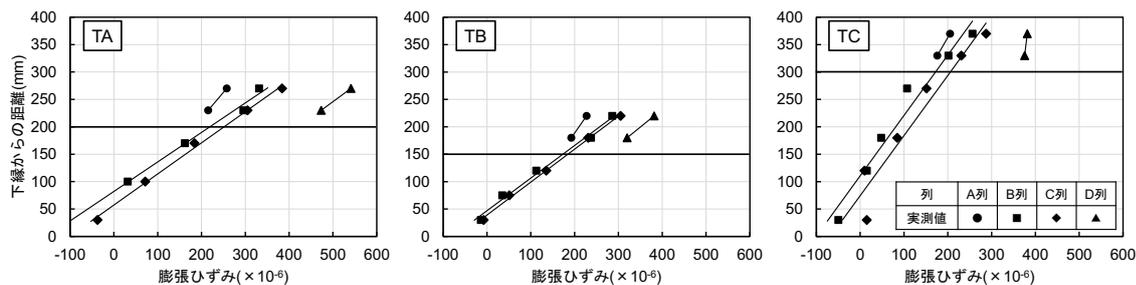


図-4 供試体の軸方向膨張ひずみの高さ方向の分布

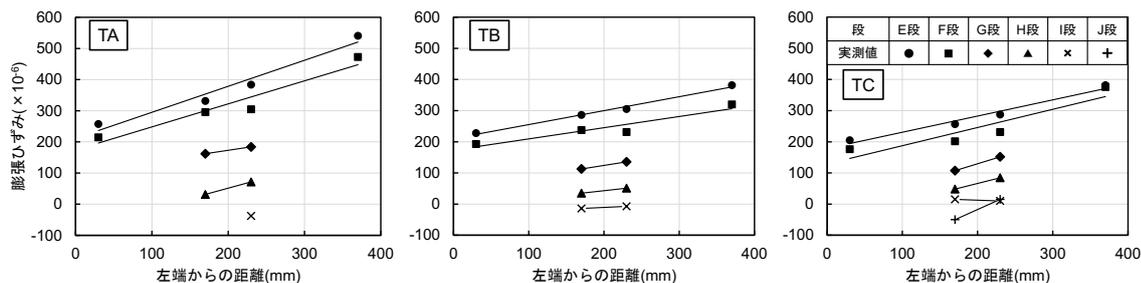


図-5 供試体の軸方向膨張ひずみの幅方向の分布

束の影響が小さいと考えられるD列の膨張ひずみが大きくなっている。

続いて、供試体の幅方向の膨張ひずみ分布を図-5に示す。図より、断面形状寸法によらず、膨張ひずみ分布は幅方向に直線に分布している。各断面の膨張勾配を比較した場合、A列に配置したD19鉄筋による拘束の影響は、ウェブ部の形状寸法の違いによって異なることが分かる。すなわち、TAとTCを比べた場合、TCの膨張勾配がTAに比べて緩やかとなっている。A列の膨張ひずみはそれほど差がないものの、D列ではTCの膨張ひずみが小さい値を示している。元々拘束の大きいA列に比べて、拘束の小さいD列はウェブ部の拘束の影響を受けやすいため、膨張勾配に差が生じたと考えられる。

5. 膨張ひずみの推定値と実測値の比較

図-6に、フランジ部打込み終了時を測定起点としたときの材齢35日の軸方向膨張ひずみの高さ方向の分布について、実測値と推定値を示す。推定値は単位体積当たりの膨張コンクリートが拘束鉄筋といった拘束体に対してなす仕事量が、コンクリートの配合および養生が同一であれば、実用的な範囲において鉄筋量と配筋方法等の拘束の程度によらず一定値であるという仕事量一定の仮定^{1), 3)}を用いて、供試体と同時に作製して同様の養生を行ったA法一軸拘束試験体の膨張率から算出した。また、外部拘束については、内部拘束体である鉄筋と同様に付着が充分にあると考えて推定した。

図より、TA、TB、TCはそれぞれ実測値と推定値はある程度一致していることが認められる。TAとTBに着目した場合、D列の実測値と解析値が大きく離れている。そこで、幅方向の膨張ひずみの分布を推定値とともに図-7に示す。図より、D列の実測値と推定値が一致していないのは膨張勾配に差が生じているためであると考えられる。TA、TBでは実測値が推定値に比べて大きい値を示していることから、推定値がウェブ部による外部拘束の影響を過大評価している可能性があると考えられる。TA、TBを比較したとき、TBの方が推定値と実測値の差は少ない。ウェブ部の断面二次モーメントを考えたとき、TBのウェブ部の高さが低く、フランジ部に対するウェブ部の拘束が小さくなる。ウェブ部の拘束力の影響が過大に評価されていると、ウェブ部の拘束力が小さい場合に過大評価の影響は減少する。その

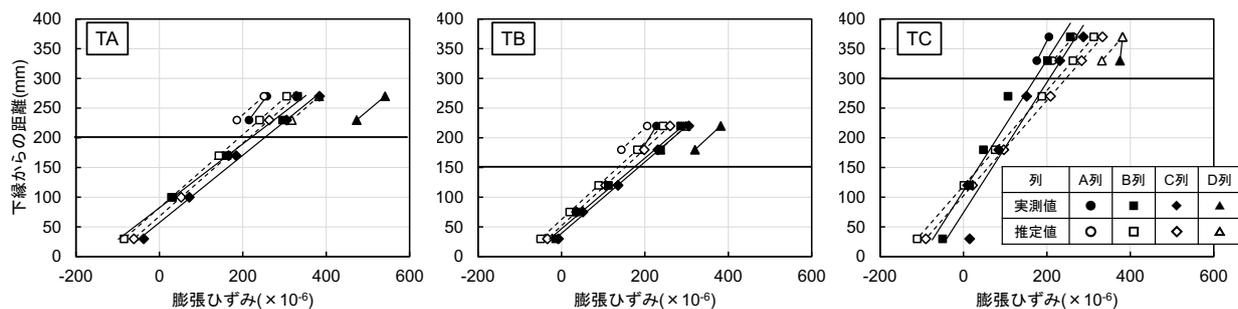


図-6 供試体の軸方向膨張ひずみの高さ方向の分布と推定値

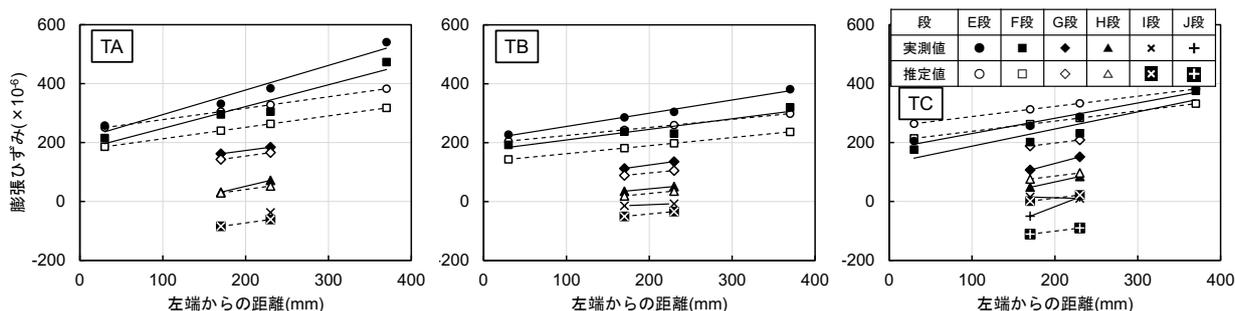


図-7 供試体の軸方向膨張ひずみの幅方向の分布と推定値

結果、TBはTAに比べて推定値が実測値に近い値を示したと推察される。さらに、TAとTCを比較したとき、TCの方が推定値と実測値との差は少ない。TCはウェブ部の高さは高いものの、ウェブ部の拘束鉄筋比が表-3に示したように、TAでは1.43%に対してTCでは1.27%と小さいため、拘束が小さくなる。その結果、上述したように推定値と実測値の差が減少したと考えられる。

また、もう一つの要因として、フランジ部の膨張により、ウェブ部にひび割れが発生して十分にフランジ部を拘束することができなかった可能性もあげられる。材齢35日段階で目視では確認できなかったものの、フランジ部の膨張によりウェブ部に導入される引張力はケミカルプレストレスによって打ち消される値を考慮してもTAで 6.37N/mm^2 、TBで 4.48N/mm^2 、TCで 4.59N/mm^2 であると推定されている。一方で、圧縮強度から推定される引張強度が 3.1N/mm^2 から 3.4N/mm^2 である。そのため、目視では確認できないひび割れが内部に発生していたことも考慮する必要があると考えられる。TBとTCはTAに比べて、発生する引張応力が小さいためウェブ部がフランジ部を十分に拘束することができ、推定値と実測値がある程度一致していると推察される。

6. まとめ

ウェブ部の形状寸法を3種類に変化させ、その上に非対称断面を持つフランジ部を打ち込むことによって、非対称断面を持つT形断面CPC梁が受ける外部拘束と内部拘束の影響を、高さ方向と幅方向の膨張ひずみ分布を用いて検討した結果を報告した。さらに、推定値と実測値を対比した。本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 非対称断面を持つCPC部材は、外部からの拘束を受けた場合でも、膨張ひずみは高さ方向と幅方向に直線分布を維持する。
- (2) 外部拘束体であるウェブ部の形状寸法を変化させたとしても、部材全体が拘束体として働くことが確認された。

- (3) 推定値と実測値を比較した場合、推定値はおおむね一致した。
- (4) 拘束の小さい位置で推定値と実測値との間に差がみられたが、原因として推定値では外部拘束体の影響を十分に考慮することができていない可能性と目視では確認できないひび割れが発生したことによって、フランジ部を十分に拘束することが出来なかった可能性が示唆される。
- (5) 打込み時の材料温度が膨張コンクリートの膨張性状に影響を与える可能性が示唆される。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験の実施に御協力を頂いた宮崎大学の真木大介様と山崎裕太様、ご助言を頂いた国立鹿児島工業高等専門学校の方井賢太郎准教授、実験器具を貸与していただいた広島大学の半井健一郎教授に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 栖原健太郎, 辻幸和, 李春鶴, 西崎辰治, 五十嵐数馬, 神頭峰磯: 膨張コンクリートを用いた対称軸の無いCPC部材の膨張ひずみ分布の推定方法, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol. 77, No. 2, pp. 25-36, 2021
- 2) 栖原健太郎, 辻幸和, 李春鶴: 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, Vol. 41, No. 1, pp. 1517-1522, 2019
- 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

本報告の出典は、「西崎辰治、李春鶴、栖原健太郎、辻幸和：先打ちしたウェブ部上に非対称断面を持つT形断面CPC梁の膨張分布、プレストレストコンクリート工学会 第30回シンポジウム論文集, pp. 321-326, 2021. 10」である。