

# 論文 膨張コンクリートを用いたCPCはりの曲げひび割れ幅の評価

栖原 健太郎<sup>\*1</sup>・李 春鶴<sup>\*2</sup>・芦田 公伸<sup>\*3</sup>・辻 幸和<sup>\*4</sup>

**要旨:** 膨張コンクリートを用いたCPC部材は、ケミカルプレストレスとケミカルプレストレインの導入により、曲げひび割れ発生耐力の向上や曲げひび割れ幅の低減などの特徴を持つ。本文では、仕事量一定則によりケミカルプレストレイン等を評価し、これを積層モデルに適用したCPCはりの断面解析手法について述べる。また、CPCはりの曲げひび割れ幅の制御について実験的に検証し、解析手法の整合性を検討した。その結果、膨張コンクリートの利用によるCPCはり、導入されたケミカルプレストレインの分だけ外力による引張鉄筋のひずみを小さく制御でき、曲げひび割れ幅を定量的に評価できることを明らかにした。

**キーワード:** 膨張コンクリート, ケミカルプレストレイン, CPCはり, ひび割れ, 曲げひび割れ幅

## 1. はじめに

膨張コンクリートの膨張力が、鉄筋などに拘束されると、図-1に示すように、膨張コンクリートには圧縮応力であるケミカルプレストレスが、拘束体には引張ひずみであるケミカルプレストレインが生じて、力の釣合い条件を満足する。そのため、膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材であるケミカルプレストレスコンクリート部材（以下、CPC部材）は、RC部材に比べて、①曲げひび割れ発生時の荷重が向上する、②ひび割れ発生後のひび割れ幅を小さく制御できる、③せん断耐力が向上するなどの特徴を有する。

本文では、これら膨張コンクリートを用いたCPC部材の力学的性状を評価するために、これまで報告されていない仕事量一定則と積層モデルを組み合わせた断面解析手法について提案する。また、膨張コンクリートの効果の一つである曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の制御について実験的に検証するとともに、提案した断面解析手法の整合性を検討する。

## 2. CPC部材の断面解析

### 2.1 仕事量一定則の概念

仕事量一定則<sup>1)</sup>は、「膨張コンクリートの配合および養生方法が同一であれば、拘束の程度にかかわらず膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量は一定である」とした概念である。膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量  $U$  は、式(1)で表される。

$$U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

ここに、 $U$ : 膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\sigma_c$ : ケミカルプレストレス ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\varepsilon_s$ : 拘束鋼材の長さ変化率 (ケミカルプレストレイン) (×

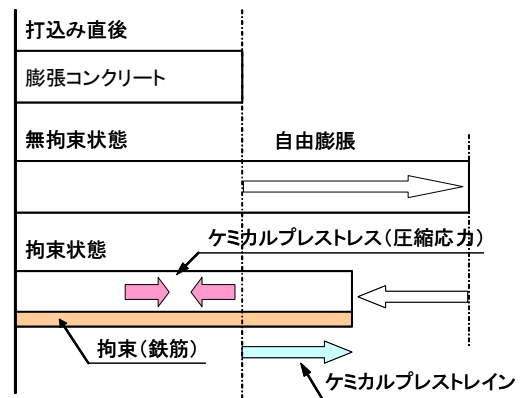


図-1 膨張コンクリートのケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレイン

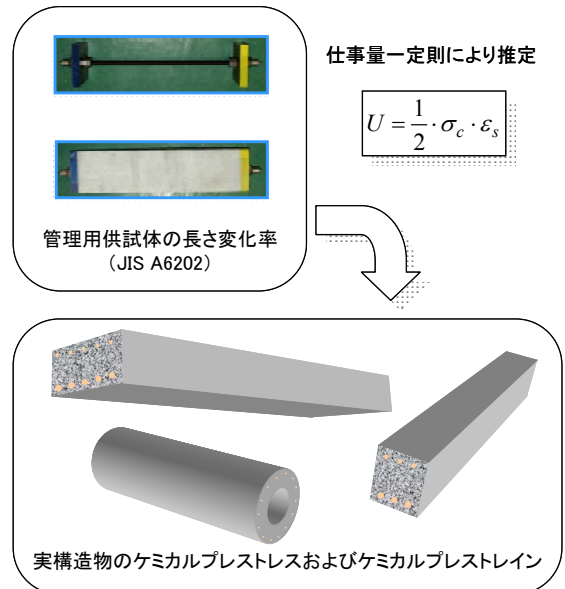


図-2 仕事量一定則の概念

\*1 電気化学工業(株) 無機材料研究部 研究員 博士(工学) (正会員)  
 \*2 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)  
 \*3 電気化学工業(株) 無機材料研究部 主幹研究員 博士(工学) (正会員)  
 \*4 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 教授 工学博士(正会員)

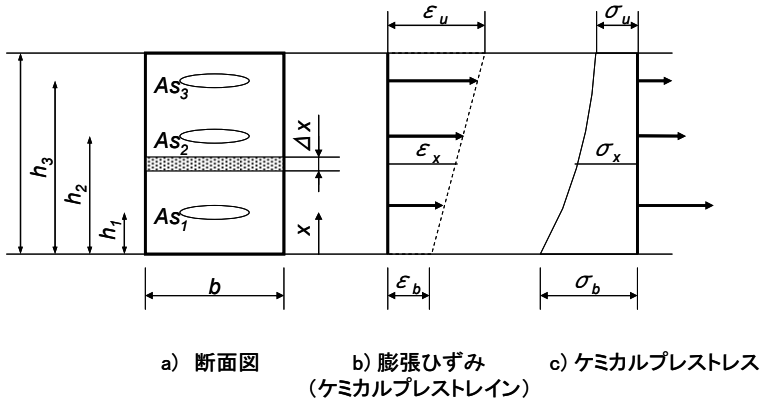
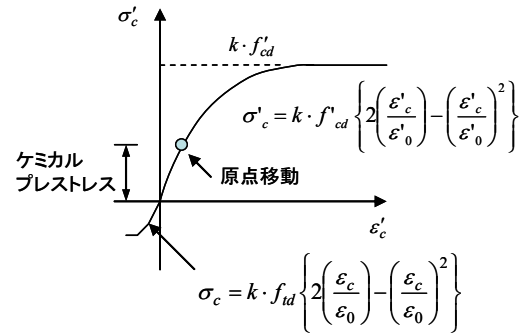


図-3 CPC部材の仕事量一定則に基づく  
ケミカルプレストレスとケミカルプレストレインの推定



a) コンクリート

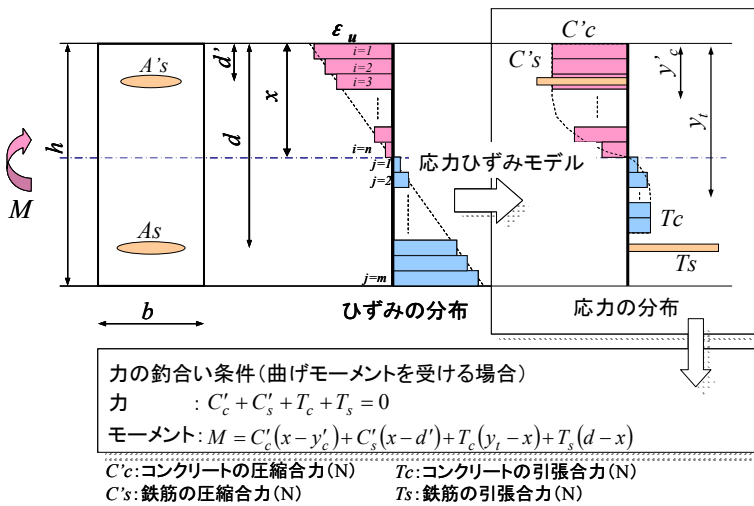


図-4 積層モデル

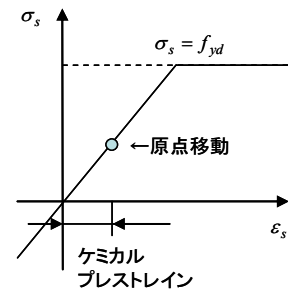
$10^{-6}$ ) である。

経時的に変化する膨張コンクリートの弾性係数やクリープ係数を必要としないため、図-2 に示すように JIS A6202 (コンクリート用膨張材) 附属書 2 (参考) の膨張試験の結果から、任意の断面の CPC 部材におけ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を推定することができる。

鉄筋が断面に対して高さ方向に非対称に配置される場合のケミカルプレストレスとケミカルプレストレインの推定手法の概念を図-3 示す。なお、ケミカルプレストレインは断面の高さ方向に直線分布するものと仮定する。CPC 部材の下縁からの距離  $x$  の位置における膨張ひずみ  $\varepsilon_x$  は、式(2)で算定される。

$$\varepsilon_x = \frac{1}{h} \{ \varepsilon_b (h - x) + \varepsilon_u \cdot x \} \quad (2)$$

ここに、 $h$ : 断面の高さ (mm)、 $\varepsilon_b$ : 下縁の膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_u$ : 上縁の膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ ) である。



b) 鉄筋

図-5 CPC部材の応力-ひずみモデル

式(2)で得られた膨張ひずみを式(1)の仕事量一定則に代入し、ケミカルプレストレスの分布を得る基礎式が得られる。また、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。

$$b \int_0^h \sigma_x dx - \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cdot \varepsilon_i \cdot E_s = 0 \quad (3)$$

$$b \int_0^h \sigma_x \cdot x dx - \sum_{i=1}^n A_{s_i} \cdot \varepsilon_i \cdot h_i \cdot E_s = 0 \quad (4)$$

ここに、 $b$ : 部材断面の幅 (mm)、 $A_{s_i}$ : 鉄筋  $i$  の鉄筋断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $E_s$ : 鉄筋の弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ ) である。

式(2)において  $\varepsilon_b$  および  $\varepsilon_u$  を仮定して、式(3)および式(4)を満足させる  $\varepsilon_b$  および  $\varepsilon_u$  を求めることにより、CPC 部材の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分布を簡便に精度良く評価できる。なお、矩形以外

の断面では、式(3)および式(4)の幅  $b$  を修正すれば良い。

## 2.2 積層モデルによるCPC部材の断面応力の評価

仕事量一定則により得られたケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを積層モデルに適用することで、曲げモーメントあるいは曲げモーメントと軸方向力の作用を受けるCPC部材の断面応力度や断面耐力を算定することができる<sup>2)</sup>。

積層モデルの概念を図-4に示す。積層モデルは部材断面を有限の微小要素に分割したモデルであり、微小要素の力の釣合いから断面応力度の算定を行うものである。このモデルの適用には、コンクリートおよび鋼材の応力とひずみの関係を適切に定める必要がある。

CPC部材は、コンクリートのケミカルプレストレスと、鋼材のケミカルプレストレインに応じた応力とが釣り合った状態にある。これを応力とひずみの関係に当てはめると、CPC部材は、普通コンクリートを用いたRC部材の応力-ひずみ曲線の原点を移動させた状態で釣り合っている。すなわち、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、鋼材ではケミカルプレストレインの分だけ原点がそれぞれ移動した状態となる。原点を移動した応力-ひずみ曲線を積層モデルに適用することで、CPC部材の断面応力度や断面耐力を算定することができる。なお、コンクリートの引張側の応力-ひずみ曲線は、コンクリートの引張強度を用いて、圧縮側と相似形で表現した。

## 2.3 せん断耐力

RC部材のせん断耐力  $V_{yd}$  は、コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_{cd}$  とせん断補強筋の受け持つせん断耐力  $V_{sd}$  の和で表される。土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>では、コンクリートの受け持つせん断耐力を、コンクリートのせん断強度と有効断面積との積に、引張鉄筋の有効高さに関する係数、鉄筋比に関する係数およびデコンプレッションモーメントに関する係数をそれぞれ乗じて算出する方法を採用している。

デコンプレッションモーメントは、図-6に示すように、設計曲げモーメント  $M_d$  に対する引張縁において、軸方向力  $N_d$  によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメントである。

CPC部材では、コンクリートの部分には圧縮応力であるケミカルプレストレスが軸方向力と同じように作用しており、デコンプレッションモーメントが増加する。結果として、コンクリートが受け持つせん断耐力  $V_{cd}$  が増加する。

本文では、これらの方法により得られた算定結果を解析値として取り扱い、以下に述べる実験結果との対比を行う。

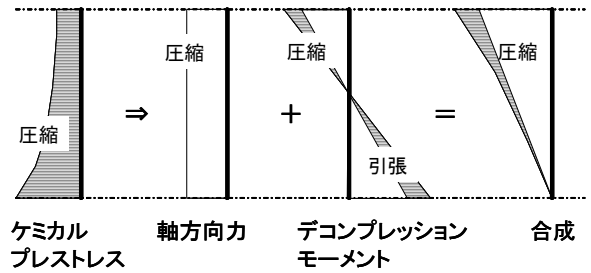


図-6 デコンプレッションモーメントの概念

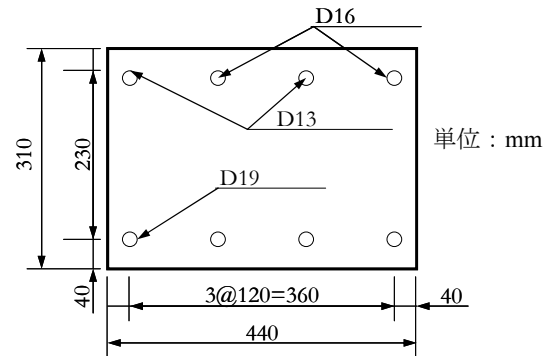


図-7 断面図

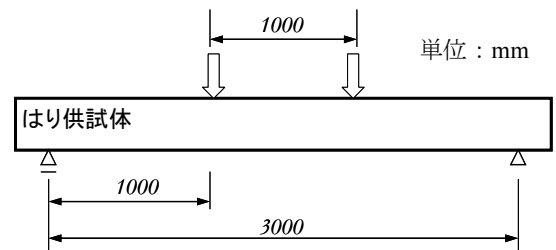


図-8 供試体および荷重方法

表-1 コンクリートの配合

	水結合 材比 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材
RC	47	49	168	357	0	904	955
CPC	45	48	168	313	60	879	967

セメントの種類：普通ポルトランドセメント  
Gmax：20mm，スランプ：8cm，空気量：2.0%

## 3. 実験概要

### 3.1 供試体

CPC部材の曲げおよびせん断性状の把握を目的として、図-7に示す断面形状および寸法の鉄筋コンクリートはり（RC部材）とCPCはりを作製した。実験のばらつきを検討するために、それぞれ3体ずつの合計6体を作製した。

供試体の断面は、高さが310mm、幅が440mmで、引張鉄筋にはD19を4本、圧縮鉄筋にはD16およびD13

表-2 破壊荷重および破壊形式

	実験結果			解析値		
	主鉄筋降伏時 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊形式	曲げ破壊時の 荷重 $P_m$ (kN)	せん断破壊時の 荷重 $P_v$ (kN)	$P_v / P_m$
RCはり	246.1	268.6	せん断	253.0	226.2	0.89
	243.8	297.5	せん断			
	237.4	293.9	曲げ引張			
CPCはり	252.4	303.9	曲げ引張	255.5	269.3	1.05
	241.2	293.6	曲げ引張			
	238.2	309.3	曲げ引張			

をそれぞれ2本ずつ配置した。鉄筋には、SD295Aを用いた。なお、鉄筋の降伏強度は372N/mm<sup>2</sup>であった。

供試体の養生は、一次養生として蒸気養生を施した後、材齢28日における載荷実験までを二次養生として気乾養生を施した。蒸気養生は、コンクリートを打ち込んでから4～5時間後に開始し、昇温速度は1時間当たり20℃とした。また、65℃で4時間保持した後、自然冷却し、材齢1日で脱型した。

コンクリートの配合を表-1に示す。膨張材にはエトリングイト系の膨張材を用いて、セメントの内割で60kg/m<sup>3</sup>を混和した。はり供試体と同様の養生を行った載荷実験時の圧縮強度は、普通コンクリートで41.9MPa、膨張コンクリートで46.2MPaであった。また、膨張コンクリートの膨張率は、JIS A6202におけるA法一軸拘束器具の材齢7日で650×10<sup>-6</sup>を示した。

### 3.2 載荷条件および測定項目

載荷条件は、図-8に示す等曲げモーメント区間を1m有する3等分載荷とした。載荷は、一次載荷、二次載荷および破壊までの3回に分けて実施した。一次載荷の荷重の上限値は、RC部材の引張鉄筋のひずみが1000×10<sup>-6</sup>となる荷重とし、同様に二次載荷では1500×10<sup>-6</sup>とした。

測定項目は、等曲げモーメント区間内の引張鉄筋、圧縮鉄筋、コンクリートの圧縮縁および引張縁のひずみとした。いずれもワイヤストレインゲージを用いてデータロガーにより計測をした。また、曲げひび割れ幅は、供試体側面の等曲げモーメント区間内における引張鉄筋の有効高さの位置に連続して設置した標点距離100mmのパイ型変位計を用いて、計測した。

## 4. 実験結果

### 4.1 破壊荷重ならびに破壊形式

はり供試体の破壊時の結果を表-2に示す。

RCはりの3体のうち2体は、引張鉄筋が降伏した後、支承近くの曲げせん断ひび割れが進展して、急激な荷重低下を示した。このことより、せん断破壊と判断し



a) 鉄筋コンクリートはり (RCはり)



b) CPCはり

写真-1 破壊状況

た。また、RCはりの1体およびCPCはりの3体は、曲げ引張破壊となった。破壊時の状況の代表例を写真-1に示す。なお、曲げ引張破壊時の荷重は、いずれも約300kNであったが、せん断先行の破壊時の荷重もほぼ等しい値であった。

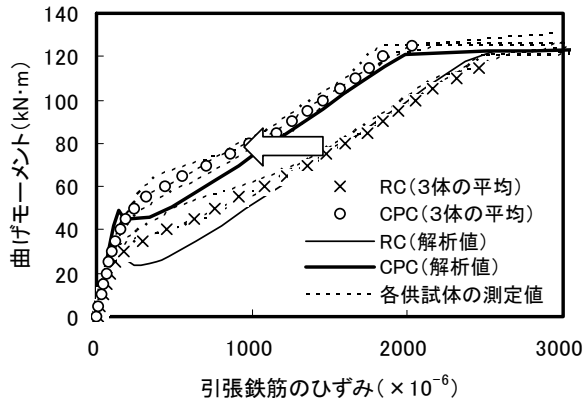
表-2には、曲げ破壊時の荷重 $P_m$ 、せん断破壊時の荷重 $P_v$ の解析値を示す。また、せん断破壊時の荷重 $P_v$ を曲げ破壊時の荷重 $P_m$ で除した値 $P_v / P_m$ を併記する。 $P_v / P_m$ は、1.0以上であれば曲げ破壊が先行し、1.0未満であればせん断破壊が先行する指標である。

表-3より、RCはりの $P_v / P_m$ は0.89であり、設計上、せん断破壊が先行する可能性が高い。一方、CPCはりでは、 $P_v / P_m$ が1.05であり、曲げ引張破壊が先行する。実験結果より、RCはりではせん断破壊が、CPCはりでは曲げ引張が先行する破壊形式を得た。CPCはりには、主に軸方向に導入されたケミカルプレストレスにより、PCはりと同様にデコンプレッションモーメントを増加させ、コンクリートが受け持つせん断耐力が大きくなったことを示唆した結果である。

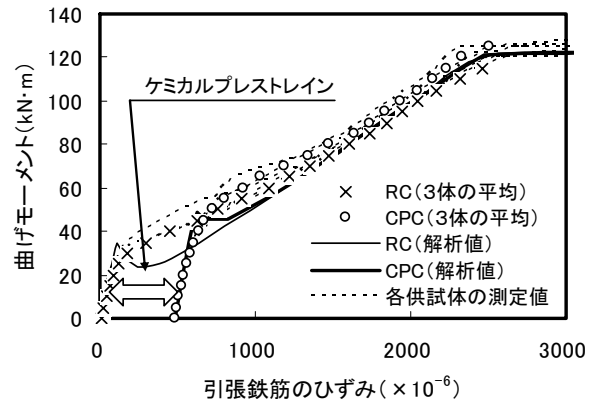
主鉄筋の降伏時および破壊時の荷重は、膨張材の有無の影響は認められなかった。主鉄筋の降伏や曲げ耐力は、引張側の鉄筋の降伏やコンクリートの圧縮性状にそれぞれ支配されるためである。

### 4.2 引張鉄筋のひずみ

図-9に、引張鉄筋のひずみの実測値と解析値を示す。図-9 a) は、曲げモーメントによる引張鉄筋のひずみの

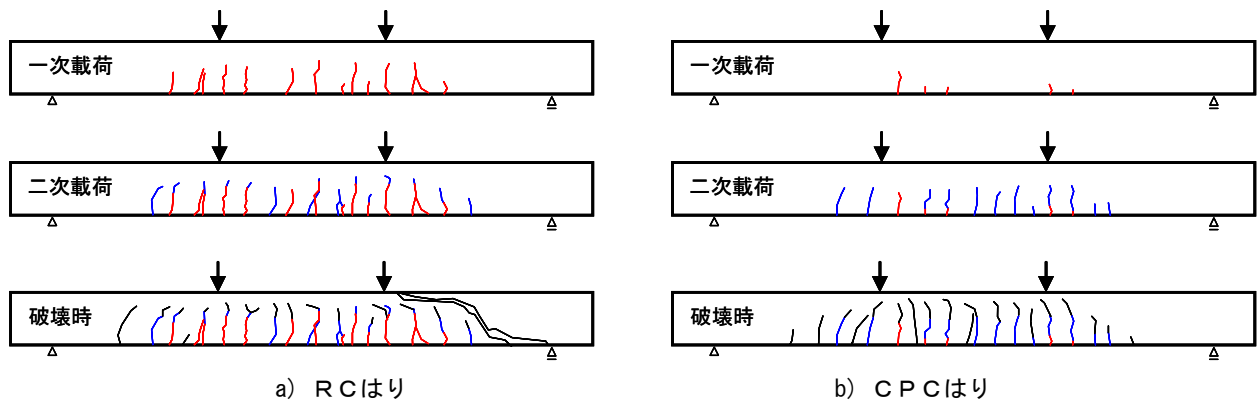


a) 引張鉄筋のひずみ



b) 引張鉄筋のひずみ (原点を考慮)

図-9 引張鉄筋のひずみ



a) RCはり

b) CPCはり

図-10 ひび割れ状況

増分で、図-9 b) は、曲げモーメントを受ける前のケミカルプレストレインを考慮した場合の引張鉄筋のひずみの増分で整理したものである。解析値は、JIS A6202 の A 法一軸拘束器具の長さ変化率を  $600 \times 10^{-6}$  とし、提案した手法を用いて算定した。

図-9 a) より、同一の曲げモーメントを受ける場合、CPC はりの引張鉄筋のひずみの増分は、RC はりに比べて  $500 \times 10^{-6}$  程度小さい。この値は、図-9 b) から明らかなように、外力を受ける前に引張鉄筋に導入されたケミカルプレストレインの効果により、仕事量一定則と積層モデルを組み合わせた解析値ともほぼ一致する。

#### 4.3 ひび割れ性状

##### (1) ひび割れ性状

図-10 に、ひび割れ状況の代表例を示す。図-10 より、CPC はりのひび割れは、同一の曲げモーメントを受ける RC はりに比べて、本数が少なく、破壊時にも斜めひび割れが卓越していない。はり供試体の軸方向に対して圧縮応力であるケミカルプレストレスが導入されたためと考えられる。

##### (2) ひび割れ幅

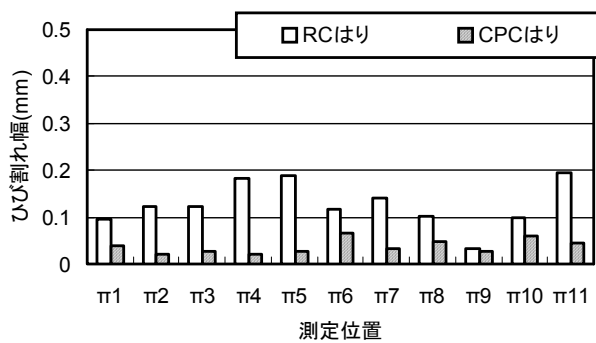
一次载荷および二次载荷の各段階において、1 m の等

曲げモーメント区間に発生した曲げひび割れ幅の分布の代表例を図-11 示す。

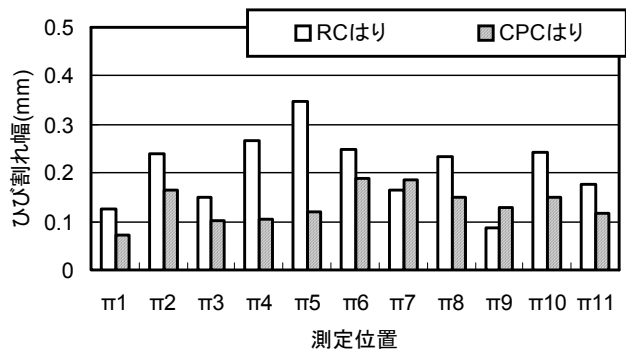
一次载荷において、RC はりでは 0.2mm に達する曲げひび割れ幅が確認された。一方、CPC はりの曲げひび割れ幅は、その殆どが 0.1mm 以下であった。二次载荷では、RC はりで 0.3mm を超過する曲げひび割れが確認されたが、CPC はりはいずれも 0.2mm 未満の曲げひび割れ幅であった。また、CPC はりの曲げひび割れ幅は、ケミカルプレストレインの効果により、ばらつきが小さく、1 m の等曲げモーメント区間における分布もほぼ一様であるのに対し、RC はりでは、ばらつきが大きく局所的にひび割れが集中する結果となった。

図-12 に、計測されたひび割れの中から最大の値の最大曲げひび割れ幅を、解析値とともに示す。解析値は、提案した手法により得られた引張鉄筋のひずみの増分を、土木学会コンクリート標準示方書に記載されている曲げひび割れ幅の算定式に代入して求めたものである。

図-12 より、曲げひび割れが発生してから引張鉄筋の降伏に至るまで、CPC はりの曲げひび割れ幅は、同一の曲げモーメントを受ける RC はりに比べて小さく、ばらつきも小さいことが確認できる。導入されたケミカル



a) 一次載荷



b) 二次載荷

図-11 一次載荷および二次載荷におけるひび割れ幅

プレストレインにより、外力に対する引張鉄筋のひずみの起点が補償されて小さくなったためである。

### (3) 解析値との比較

図-12より、RCはりの最大曲げひび割れ幅の実測値は、解析値に比べて大きい。RCはりでは、局所的なひび割れの集中や突発的に大きなひび割れに進展するなど、曲げひび割れの発生が安定しない<sup>4)</sup>ことが主な原因と考えられる。一方、CPCはりの実測値は解析値よりも小さく、安全側の評価である。CPCはりに導入されたケミカルプレストレインが、曲げひび割れの安定に寄与していると考えられる。

以上より、CPCはりでは、導入されたケミカルプレストレインに応じて、曲げひび割れ幅を小さく制御することができ、また、仕事量一定則によりケミカルプレストレインを簡便に評価し、これを積層モデルによる断面解析手法に適用することで、曲げひび割れ幅を適切に評価できると考えられる。

## 5. まとめ

鉄筋コンクリートはりに膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを導入したCPCはりの曲げひび割れ性状を、解析と実験により検討した結果から、次の知見が得られた。

- (1) CPCはりは、ケミカルプレストレインが引張鉄筋に導入されているため、曲げひび割れの分散が一樣となるとともに、曲げひび割れ幅を小さく制御することができる。
- (2) 曲げひび割れ幅の低減量は、膨張コンクリートにより導入された引張鉄筋のケミカルプレストレインに相当する。また、このケミカルプレストレインは、仕事量一定則の概念を用いることで簡便に精度良く評価できる。
- (3) 膨張コンクリートにより導入されたケミカルプレストレスは、機械的に導入したプレストレスと同様に、せん断耐力を向上させる効果があり、その効果は、デコンプレッションモーメントの増加分として評価でき

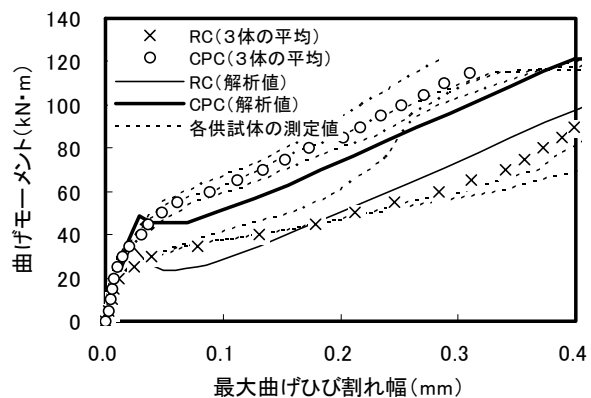


図-12 最大曲げひび割れ幅

る。

- (4) ケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを仕事量一定則の概念で評価し、これを積層モデルに適用することで、膨張材を用いたCPC部材の力学的性状を設計に反映できる。

**謝辞:** 本文の作成にあたり、供試体の作製など、全国ボックスカルバート協会の皆様より多大なご助力をいただきました。記して御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 辻幸和:ケミカルプレストレスの推定方法について、セメント技術年報 XXV II, pp.340-344, 1973
- 2) 栖原健太郎:膨張材によるケミカルプレストレインを考慮したCPC部材の限界状態設計法, 群馬大学大学院学位論文, 2008
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書 設計編, 2007年制定
- 4) 有賀大峰・辻幸和・池田正志・杉山隆文:鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅性状の統計的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.715-720, 2006