

鉛直打継目を有する連続繊維補強材を用いた CPC はりの曲げ性状

群馬大学大学院 学生会員 ○萩原 淳弘  
 群馬大学工学部 正会員 工学博士 辻 幸和  
 群馬大学工学部 正会員 博士(工学) 李 春鶴  
 群馬大学工学部 正会員 池田 正志

1. はじめに

プレストレスは、PC 鋼材の緊張により機械的に導入する方法と膨張コンクリートの膨張エネルギーを利用して化学的に導入する方法の2方法に大別される。現在、機械的にプレストレスを導入する方法が一般的に採用されているが、化学的にプレストレスを導入する方法は、既往の研究により、導入されたケミカルプレストレスを精度良く推定できるようになったため、また、PC 鋼材や定着具などを必要とせず、比較的簡便にケミカルプレストレスを導入することができるため、近年実用化例が多くなっている。

さて、近年は、海岸などの海洋環境下に配置されているコンクリート構造物中の鋼材の腐食による早期劣化が問題となっている。鋼材は、コンクリートの優れた補強材として広く一般に用いられているが、鋼材が腐食すると、その補強効果は損なわれ、コンクリート構造物の耐力低下につながる。この腐食の問題を解決できる補強材として、連続繊維補強材 (FRP) がある。FRP は、その耐食性、非磁性、軽量化、高強度化などの観点から、鋼材に代わるコンクリートの補強材として関心を集めているが、鋼材と比較してヤング係数が小さい。しかし、膨張コンクリートを使用してケミカルプレストレスを導入することにより、この問題点を改善できることが報告されている<sup>1)</sup>。

また、コンクリート構造物の大規模化が進んでおり、新旧コンクリートの打継目が施工上避けられなくなってきたが、そこが構造物の弱点になることが多い。しかし、この問題もケミカルプレストレスを導入することにより、鉛直打継目の力学的性状を本体と同等あるいはそれ以上に保持できる<sup>2)3)</sup>。

本研究では、鉄筋および炭素繊維と耐アルカリガラス繊維による格子状 FRP を補強材に用い、鉛直打継目を曲げモーメント一定区間に設け、打継部に低添加型膨張材をセメントと置換した膨張コンクリートを使用したケミカルプレストレストコンクリート (CPC) はりの曲げ性状について、実験的に比較検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体は、幅が 150mm、高さが 200mm の矩形断面で、長さは 1200mm である。軸方向には、引張補強材に SD345 の D13 を 2 本 (以下 S と称する)、または引張耐力が SD345 の D13 に相当する格子状 FRP (C13 または G13) を配置し、圧縮補強材に SD345 の D10 を 2 本、または引張耐力が SD345 の D10 に相当する格子状 FRP (C10 または G10) を、それぞれ配置した。せん断スパンには、SD295 の D6 を加工したスターラップを 75mm 間隔で片側 4 本ずつ配置した。はり供試体の形状寸法を図-1 に示す。

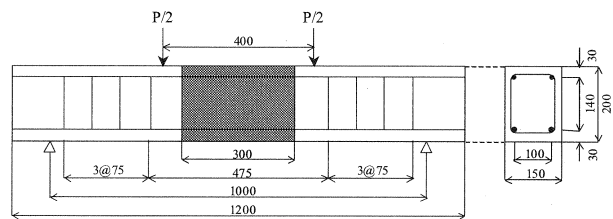


図-1 供試体の形状寸法 (mm)

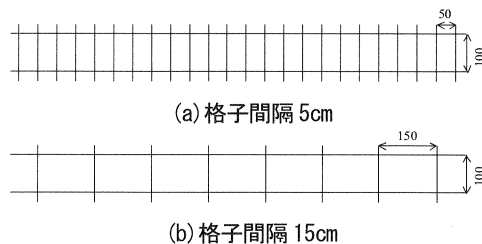


図-2 格子状 FRP の形状寸法 (mm)

補強材の種類、格子間隔、単位膨張材量を変化させた鉛直打継目を有する供試体(以下Jと称する)15体と、補強材の種類、格子間隔のみを変化させた鉛直打継目のない一体型の供試体5体との、合計20体を作製した。供試体の種類を表-1に示す。

格子状FRPは炭素繊維あるいは耐アルカリガラス繊維をビニルエステル樹脂で被覆し、二次元格子状に成型したもの(以下それぞれCFRP、CおよびGFRP、Gと称する)の2種類で、格子間隔は5cm(以下aと称する)、15cm(以下bと称する)の2種類とした。格子状FRPの形状寸法を図-2に示す。

コンクリートの配合はW/Cを50%、s/aを48.6%、目標スランプを8cm、目標空気を4%と一定にした。また、打継目を有する供試体の打継部区間は300mmとした。膨張材は、エトリンサイト・石灰複合系の低添加型を用い、単位膨張材量を0kg/m<sup>3</sup>、25kg/m<sup>3</sup>、40kg/m<sup>3</sup>に採り、セメントと置換した3種類のコンクリートを使用した。表-2にコンクリートの配合および無拘束養生後の圧縮強度を示す。単位膨張材量が増加すると、材齢1日に脱型して自由膨張させた圧縮強度は低下することが確認できるが、はり供試体においては一軸方向に拘束されているためこのような著しい強度低下はない。また、補強材の力学的特性を表-3に示す。

表-1 供試体の種類

供試体名	補強材		単位膨張材量 (kg/m <sup>3</sup> )	打継目の 有無
	種類	格子間隔 (cm)		
S-0	鉄筋	-	0	無
S-0J			25	有
S-25J			40	有
S-40J			40	有
Ca-0	CFRP	5	0	無
Cb-0		15		
Ca-0J		5		
Cb-0J		15		
Ca-25J		5	25	有
Cb-25J		15		
Ca-40J		5		
Cb-40J		15		
Ga-0	GFRP	5	0	無
Gb-0		15		
Ga-0J		5		
Gb-0J		15		
Ga-25J		5	25	有
Gb-25J		15		
Ga-40J		5		
Gb-40J		15		

表-2 コンクリートの配合および圧縮強度

打込み部	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気を (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
						W	C	E	S	G		
両端部	15	8±2	4±0.5	50	48.6	182	364	-	843	985	-	49.2
0シリーズ						180	360	-	847	990	0.36	43.6
0Jシリーズ打継部						182	364	-	843	985	-	46.8
25Jシリーズ打継部						182	339	25	843	985	0.73	40.9
40Jシリーズ打継部	182	324	40	343	985	0.73	31.1					

表-3 補強材の力学的特性

補強材の種類		繊維束の本数 (本)	繊維含有率 (%)	見かけの断面積(mm <sup>2</sup> )		引張耐力 (kN/本)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
種別	名称			繊維束	樹脂			
格子状 FRP	C10	42	43.3	20.4	26.7	47.1	47.3	10.1
	C13	70	41.8	34.0	47.4	81.4	72.8	8.9
	G10	30	42.2	28.5	39.0	67.5	54.6	8.1
	G13	50	43.3	47.5	62.1	109.6	87.6	8.0
鉄筋	D10		SD345	-	-	71.3	40.5	3.9
	D13		SD345	-	-	126.7	68.6	3.7
	D6		SD295A	-	-	31.7	15.3	3.4

打継目を有する供試体の両端部は、打継面を材齢24時間でグリーンカットし、材齢14日まで湿布養生した後、打継部コンクリートを打ち込んだ。その後、打継部コンクリートの材齢3日まで水中養生し、その後湿布養生に切り換え、材齢28日まで養生した。一体型の供試体も同様に材齢3日まで水中養生し、その後湿布養生に切り換え、材齢28日まで養生した。グリーンカット断面の様子を写真-1に示す。

また、膨張材をセメントと置換した2種類の膨張コンクリートについては、A法一軸拘束供試体を作製した。A法一軸拘束供試体の形状寸法を図-3に示す。養生方法としては、はり供試体と同様の養生方法と、材齢28日まで水中養生するものの、2種類を実施した。

2. 2 膨張率およびケミカルプレストレインの測定

膨張材をセメントと置換した25Jシリーズと40Jシリーズの2種類の膨張コンクリートについては、A法一軸拘束供試体により打込み完了後から材齢28日までの間、2時間

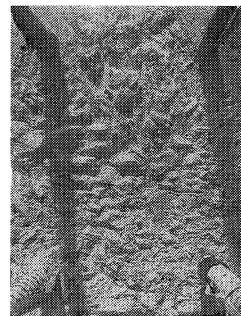


写真-1 グリーンカット断面

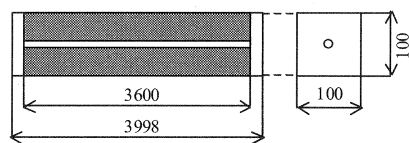


図-3 A法一軸拘束供試体の形状寸法(mm)

毎に膨張率を測定した。

また、はり供試体に生じる膨張ひずみであるケミカルプレストレインを測定した。ケミカルプレストレインの測定は、はり供試体作製時に補強材の中央位置に貼付しておいたゲージ長が6mmのワイヤーストレインゲージを用いて行った。0シリーズと0Jシリーズについては、打込み完了後から材齢3日までの間、2時間毎に測定を行った。25Jシリーズと40Jシリーズについては、打込み完了後から材齢28日までの間、2時間毎に測定を行った。

2. 3 曲げ載荷試験

はり供試体の載荷試験は、載荷点間距離が400mm、支点間距離が1000mmの対称2点集中静的漸増載荷試験とした。測定項目は、はり側面の引張補強材位置における曲げモーメント一定区間のひび割れ幅である。ひび割れ幅の測定は、測定長が100mmの $\pi$ 型変位計を用いて行った。

3. 実験結果

3. 1 膨張率

膨張材を使用した25Jシリーズと40Jシリーズの2種類の膨張コンクリートについて、計測開始からの経過時間とA法一軸拘束供試体により測定した膨張率の関係を図-4に示す。膨張率は材齢3日程度まで著しく増加し、その後は徐々に増加した。また、材齢28日における単位膨張材量と膨張率の関係を図-5に示す。単位膨張材量が25kg/m<sup>3</sup>から40kg/m<sup>3</sup>に増加すると、膨張率は約3倍になっている。

はり供試体と同様に湿布養生するものと水中養生するものとの2種類の養生を実施した。若干水中養生したものの膨張率は大きくなったが、その差は微小であった。

3. 2 ケミカルプレストレイン

膨張材を使用した25Jシリーズと40Jシリーズについては、ケミカルプレストレインも膨張率と同様に材齢3日程度まで著しく増加し、その後は徐々に増加していく傾向が認められた。

材齢28日におけるはり供試体に生じたケミカルプレストレインの分布を図-6に示す。0シリーズおよび0Jシリーズは、膨張材を使用した25Jシリーズおよび40Jシリーズと比較するといずれも小さく、収縮しているものもあり、一定の傾向はなかった。

一方、25Jシリーズおよび40Jシリーズは、顕著にコンクリートの膨張によるケミカルプレストレインの導入が認められる。ケミカルプレストレインは、膨張率と同様に、40Jシリーズは25Jシリーズと比較して3倍程度になっている。また、引張補強材より圧縮補強材に大きいケミカルプレストレインが生じている。ケミカルプレストレインの大きさは、25JシリーズではFRPの補強材の影響は明瞭でないが、40Jシリーズの場合は、Gシリーズが最も大きく、Cシリーズ、Sシリーズの順に小さくなっていることが明瞭である。これは、各補強材のヤング係数は鉄筋が最も大きく、CFRP、GFRPの順に小さいためである。

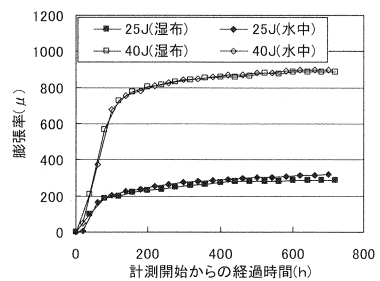


図-4 経過時間-膨張率

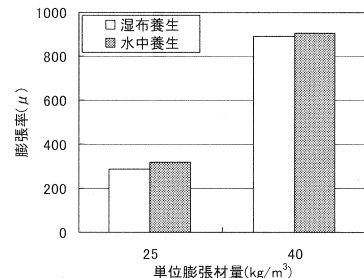


図-5 単位膨張材量-膨張率

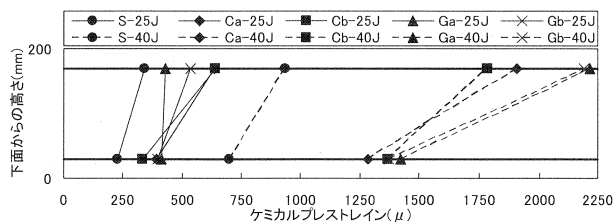


図-6 ケミカルプレストレインの分布

これらのことから、はり供試体のコンクリートに導入されたケミカルプレストレスは、25J シリーズよりも40J シリーズが大きく、また、圧縮補強材側よりも引張補強材側に大きく、40J シリーズの場合、圧縮補強材側に導入されたケミカルプレストレスはSシリーズが最も大きく、Cシリーズ、Gシリーズの順に小さくなると推定できる。

3. 3 曲げひび割れ

3. 3. 1 曲げひび割れ発生位置

最初の曲げひび割れが発生した位置を表-4 に示す。最初の曲げひび割れは、ほとんどの供試体において打継目に発生したのに対して、単位膨張材量が  $40\text{kg/m}^3$  である40J シリーズの供試体では、5 体中 2 体において載荷点直下に発生した。これは、膨張材を使用したことにより打継部コンクリートにケミカルプレストレスが導入されたとともに、打継目の付着性状が改善され、端部の普通コンクリートに曲げひび割れが生じたことによる。

表-4 曲げひび割れ発生位置

供試体名	最初の曲げひび割れ発生位置	供試体名	最初の曲げひび割れ発生位置
S-0	曲げモーメント一定区間	S-0J	打継目
Ca-0	曲げモーメント一定区間	Ca-0J	打継目
Cb-0	曲げモーメント一定区間	Cb-0J	打継目
Ga-0	曲げモーメント一定区間	Ga-0J	打継目
Gb-0	曲げモーメント一定区間	Gb-0J	打継目
S-25J	打継目	S-40J	載荷点直下
Ca-25J	打継目	Ca-40J	載荷点直下
Cb-25J	打継目	Cb-40J	打継目
Ga-25J	打継目	Ga-40J	打継目
Gb-25J	打継目	Gb-40J	打継目

3. 3. 2 曲げひび割れ発生モーメント

曲げひび割れ発生モーメントを図-7 に、0 シリーズの曲げひび割れ発生モーメントを基準とした曲げモーメント比を図-8 に示す。曲げひび割れ発生モーメントは、補強材に生じたケミカルプレストレンに対応しては

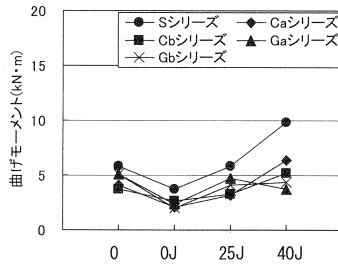


図-7 曲げひび割れ発生モーメント

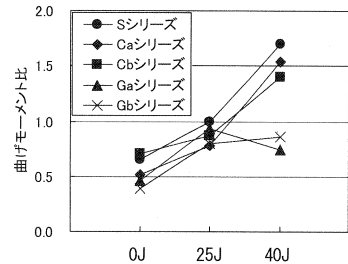


図-8 曲げひび割れ発生モーメント比

り供試体下縁に導入されたケミカルプレストレスにより、S、Cシリーズは単位膨張材量が増加するに従って大きくなっている。また打継目の無い一体型の0シリーズと比較して、打継目を設けた0Jシリーズはすべて小さくなっているが、40Jシリーズのうち補強材にGFRPを用いたはり以外は、1.5倍程度まで増加している。

補強材の違いによる比較では、FRPを補強材に用いたCa、Cb、Ga、Gbシリーズは鉄筋を補強材に用いたSシリーズより小さかった。

また、鉛直打継目を有する供試体は、打継部に膨張コンクリートを使用することにより、補強材にFRPを用いても、鉄筋を用いた打継部に普通コンクリートを使用したものとはほぼ同等の値を示す。

3. 3. 3 曲げひび割れ幅が0.1mm到達時の曲げモーメント

曲げひび割れ幅が0.1mmに到達したときの曲げモーメントを図-9 に、0シリーズの曲げひび割れ幅が0.1mmに到達したときの曲げモーメントを基準とした曲げモーメント比を図-10 に示す。曲げひび割れ幅が0.1mmに到達したときの

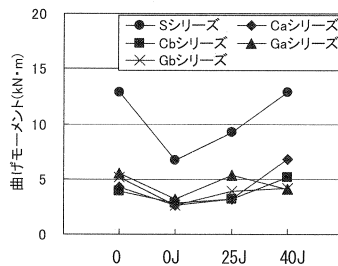


図-9 ひび割れ幅0.1mm到達時の曲げモーメント

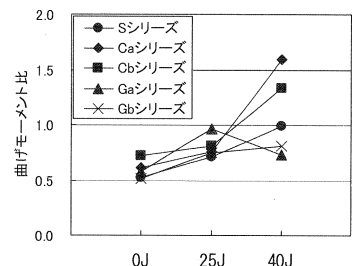


図-10 ひび割れ幅0.1mm到達時の曲げモーメント比

曲げモーメントも、曲げひび割れ発生モーメントとほぼ同様の傾向を示すが、FRP を補強材に用いた供試体は曲げひび割れ発生モーメントとほとんど変わらないのに対し、鉄筋を用いた供試体は大きくなっていることがわかる。

3. 3. 4 曲げひび割れ発生モーメントと曲げひび割れ幅が0.1mm 到達時の曲げモーメントの比

曲げひび割れ幅が0.1mm に到達したときの曲げモーメントを曲げひび割れ発生モーメントで除した曲げモーメント比を図-11 に示す。0J シリーズと比較して、25J、40J シリーズの供試体は曲げモーメント比が小さくなっている。これは、膨張材を使用したことによりケミカルプレストレスが導入されたことで、最初の曲げひび割れが発生した時点での曲げモーメントが大きくなったものの、その後の曲げひび割れの発達が著しくて、その幅がすぐに0.1mm に到達したということを示している。特にこの傾向は、補強材に鉄筋を用いた供試体に顕著に認められ、FRP を用いた供試体はそれぞれの差が小さかった。このことから、曲げひび割れ発生モーメントにはコンクリートに導入されたケミカルプレストレスの及ぼす影響が大きく、曲げひび割れの発達には補強材に生じたケミカルプレストレンの及ぼす影響が大きいと考えられる。

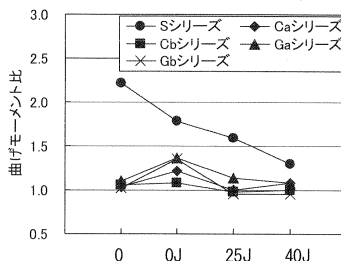


図-11 ひび割れ発生時とひび割れ幅0.1mm 時の曲げモーメント比

3. 3. 5 曲げひび割れ発達状況

曲げひび割れの発達状況の例を図-12 に示す。打継目を設けた供試体は、打継目位置に曲げひび割れが発生した。また、鉄筋を補強材に用いた供試体は曲げひび割れがほぼ均等に分散する傾向が認められたが、FRP を用いた供試体は格子交差部に曲げひび割れが発生した。この傾向は打継目の有無、単位膨張材量に関係なく認められた。

一般に異形鉄筋と比較すると、FRP とコンクリートの付着は小さいが、その中でも格子状 FRP は格子交差部で付着を確保できるため、付着性状は改善される。しかし、ほとんどの付着を格子交差部で受け持つため、格子交差部に高い応力が集中してしまい、曲げひび割れがそこに発生するという特徴があることを確かめることができた。

3. 4 破壊モーメントおよび破壊形式

破壊モーメントを図-13 に、破壊形式を表-5 に示す。また、各破壊の様子を写真-2 に示す。

破壊モーメントについては、鉄筋を補強材に用いた供試体は打継目の有無、単位膨張材量に関わらず、ほぼ等しい値となったが、FRP を補強材に用いた供試体は一定の傾向が認められなかった。

破壊形式については、鉄筋を補強材に用いた供試体はすべて曲げ引張破壊になったのに対し、FRP を補強材に用いた供試体は、斜めひび割れが発生し、せん断圧縮破壊になりやすい傾向が認められた。これは、FRP は強度と比較して曲げ剛性が小さく、塑性域がなくて降伏することがないためである。また、GFRP はヤング

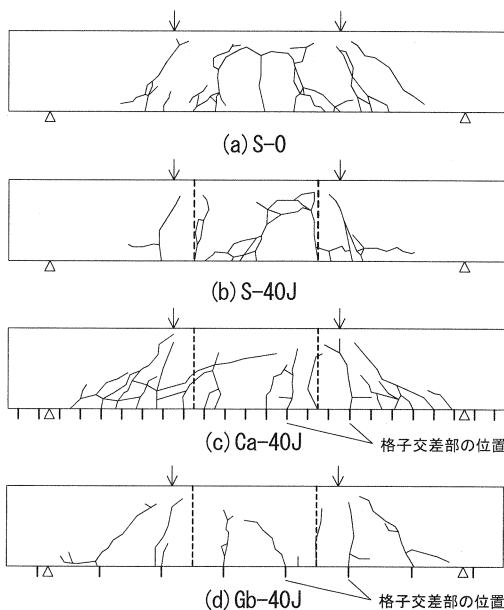


図-12 曲げひび割れ状況

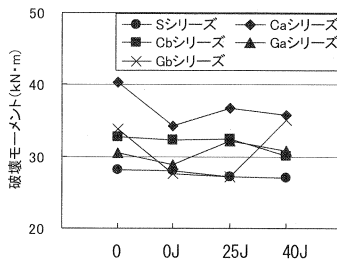


図-13 破壊モーメント

係数が小さいため、ひずみが大きくなり、補強材が破断する前にコンクリート圧縮縁が圧壊する曲げ圧縮破壊になったものが多かった。CFRP はヤング係数が GFRP と比較して大きい、変形能力が小さいため、補強材破断型の曲げ破壊になったものがあった。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下のことを確認した。

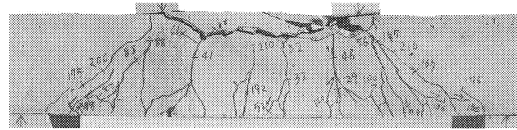
- (1) 単位膨張材量が増加すると膨張率は大きく増加する。補強材のケミカルプレストレンおよびコンクリートに導入されるケミカルプレストレスは、補強材の断面積とヤング係数の影響を受ける。
- (2) 打継部に膨張コンクリートを使用すると、コンクリート全断面にケミカルプレストレスが導入され、曲げひび割れの抑制効果が期待できる。その効果は、補強材に鉄筋またはCFRP を用いた場合、単位膨張材量が増加することにより顕著になるが、GFRP を用いた場合は膨張材の使用効果が小さくなる。
- (3) 打継部に単位膨張材量が  $40\text{kg/m}^3$  の膨張コンクリートを使用し、補強材に鉄筋またはCFRP を用いた場合、曲げひび割れ発生モーメントおよび曲げひび割れが  $0.1\text{mm}$  に到達するときの曲げモーメントは、打継目のない一体型の供試体と同等以上の値を示す。
- (4) ケミカルプレストレスは、曲げひび割れ発生モーメントに及ぼす影響は大きい、曲げひび割れの発達に及ぼす影響は小さい。
- (5) 格子状FRP を補強材に用いると、格子交差部に高い応力が集中し、そこに曲げひび割れが発生しやすくなる。また、斜めひび割れが発達し、せん断圧縮破壊になりやすくなる。

表-5 破壊形式

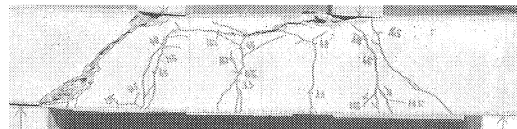
供試体名	破壊形式	供試体名	破壊形式
S-0	曲げ引張破壊	S-0J	曲げ引張破壊
Ca-0	せん断圧縮破壊	Ca-0J	せん断圧縮破壊
Cb-0	曲げ圧縮破壊	Cb-0J	補強材破断型曲げ破壊
Ga-0	曲げ圧縮破壊	Ga-0J	曲げ圧縮破壊
Gb-0	せん断圧縮破壊	Gb-0J	せん断圧縮破壊
S-25J	曲げ引張破壊	S-40J	曲げ引張破壊
Ca-25J	せん断圧縮破壊	Ca-40J	曲げ圧縮破壊
Cb-25J	せん断圧縮破壊	Cb-40J	せん断圧縮破壊
Ga-25J	曲げ圧縮破壊	Ga-40J	曲げ圧縮破壊
Gb-25J	せん断圧縮破壊	Gb-40J	曲げ圧縮破壊



(a) 曲げ引張破壊



(b) 曲げ圧縮破壊



(c) せん断圧縮破壊

写真-2 破壊の様子

〔謝辞〕

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B)、課題番号 17360202、代表者：辻 幸和 群馬大学教授)を受けて実施したものである。

〔参考文献〕

- 1) 丸岡正知、石田知子、辻 幸和、西須 稔：格子状FRP で補強したCPC はりの曲げ・せん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 1005-1010 (1993)
- 2) 西須 稔、小向広一、辻 幸和：FRP を補強材に用いた打継目を有するCPC はりの力学的性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp. 1209-1214 (1994)
- 3) 松浪康行、西須 稔、杉山隆文、辻 幸和：異なる位置に鉛直打継目を設けてFRP を補強材に用いたCPC はりの力学的性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 2、pp. 989-994 (1995)