

論文

[1169] 格子状FRPで補強したCPCはりの曲げ・せん断性状

丸岡 正知*1・石田 知子*2・辻 幸和*3・西須 稔*4

1. はじめに

近年、コンクリート中の鋼材の腐食により、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の劣化が問題となっている。その点、FRPはその耐食性の高さから鋼材に代わる補強材として関心を集めている。しかしながら、FRPは鋼材と比較して、付着力が小さいという弱点が指摘されている。そのため、付着性状を改善する研究が種々報告されている[1]～[3]。その内、格子状に成形したFRPのコンクリートとの付着は、格子交差部で確保できるため、その付着効果を大きくすることが可能である。しかしながら、格子交差部に局所的に高いせん断応力や曲げ応力が発生しやすい等の留意すべき点があり、これら格子状FRPの材料特性がはりに及ぼす影響について検討を行う必要があると考えられる。

本研究は、格子状FRPを補強材とし、せん断スパンの中央部に格子交差部を配置し、はりの曲げ・せん断性状および膨張コンクリートの使用がこれらの性状の改善効果に及ぼす効果について、格子交差部の位置および数を要因にとり、実験的検討を行った結果について報告するものである。

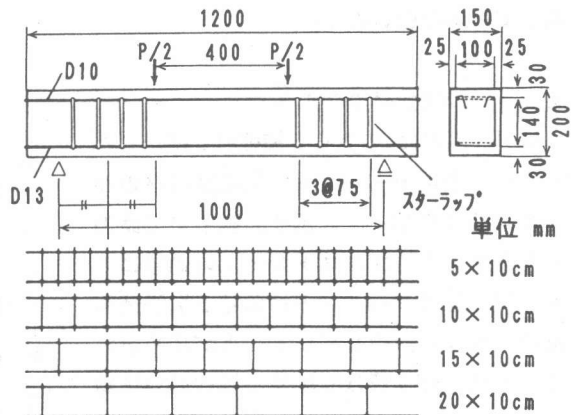
2. 実験概要

本実験で使用したFRPは炭素繊維をビニルエステル樹脂で被覆し、格子状に成形したものである。格子の間隔は5・10・15・20cmの4種類とし、引張耐力が異形鉄筋のD10、D13に相当する2種類のFRPを使用した。また比較のためにD10とD13の鉄筋を使用したRCはりも作製した。使用した補強材の力学的特性を表-1に示す。

コンクリートの配合については、水結合材比を50%および60%とし、単位水量を194kg/m³、粗骨材の最大寸法を15mm、細骨材比率を50%、スランプ15cm、空気量を

表-1 補強材の力学的特性

補強材の種類		繊維束の本数(本)	繊維の含有率(%)	総断面積(mm ²)	引張耐力(kgf/本)	引張強度(降伏強度)(kgf/cm ²)	弾性係数(kgf/cm ²)
種類	名称						
FRP	C10	42	43.3	47.1	4831	10257	1.55×10 ⁶
	C13	70	41.8	81.4	7426	9123	1.51×10 ⁶
鉄筋	D10	(SD345)		71.3	4317	(3976)	2.10×10 ⁶
	D13			126.7	7000	(3750)	2.10×10 ⁶
	φ6	(SR295)		28.3	1562	(3450)	2.10×10 ⁶



せん断スパン内中央に格子交差部を配置
図-1 はり供試体の断面形状と載荷方法

*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *2 (株)大林組、工修 (正会員)
 *3 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)
 *4 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻

4%と一定にし、単位膨張材量を0.35および50kg/m³と変化させた。各補強材との組み合わせによって、合計19体のはり供試体を作製した。はり供試体は、図-1に示すように、幅が15cm、高さが20cmの矩形断面を用いた。せん断スパン内にφ6のスターラップを4本ずつ配置し、FRP補強材はその格子交差部が一方のせん断スパン中央部にくるように配置した。

養生方法は、材令26日まで水中養生とし、材令27日目に実験室に放置し、材令28日目で支点間100cm、載荷点間40cmとして2点集中載荷による曲げ載荷試験を行った。その間、同バッチで打ち込んだA法一軸拘束供試体の膨張ひずみ、および各供試体の補強材に生じた膨張ひずみを測定した。

曲げ解析としては、部材断面を中立軸と平行に細分割する積層モデルを使用した。膨張材を置換することによって導入されたケミカルプレストレスは、仕事量一定の仮定に基づいて算定した[4]。

3. 補強材のケミカルプレストレイン

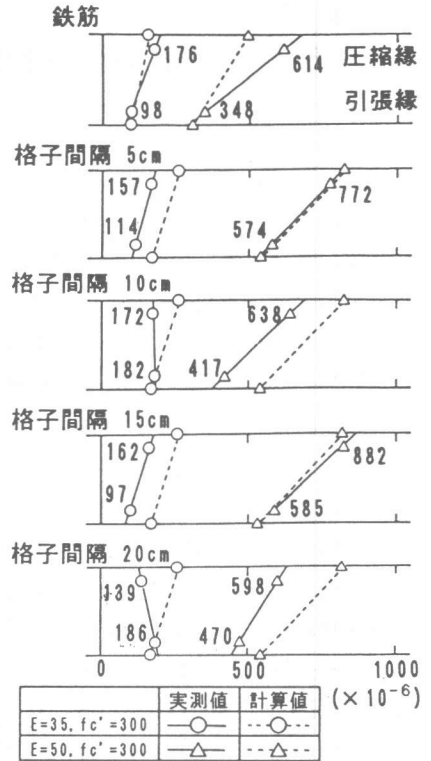
図-2に、材令28日におけるはり供試体の補強材に生じた引張ひずみであるケミカルプレストレスの実測値とA法一軸拘束供試体より推定した計算値を示す。いずれの補強材においても、計算値は実験値をよく反映していると思われる。

4. 引張補強材のひずみ

格子間隔が5cmのFRP補強材を使用した場合の、曲げモーメントと引張補強材のひずみの関係を図-3に示す。膨張材の添加に伴うケミカルプレストレスの効果により、同一曲げモーメントにおける引張補強材のひずみが減少していることが認められる。また、計算値は実験値にほぼ近い挙動を示している。

5. 曲げひびわれ発生モーメント

ひびわれ発生状況図を図-4に示す。RCはりとFRPはりを比較すると、ひびわれの発生位置に違いが認められる。すなわち、RCはりの場合、比較的均等にひびわ



Eは単位膨張材量(kg/m³)
fc'はコンクリートの設計圧縮強度(kgf/cm²)
図-2 材令28日における膨張ひずみの分布

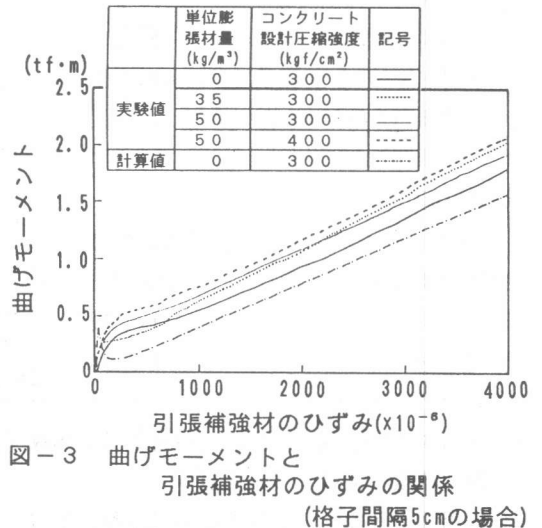


図-3 曲げモーメントと引張補強材のひずみの関係(格子間隔5cmの場合)

れが分散するのに対し、FRPはりの場合、FRP補強材の格子交差部付近よりひびわれが発生している。この原因として、コンクリートと補強材間の付着性状の違いが挙げられる。つまり、RCはりの場合、異形鉄筋とコンクリートとの付着性状は比較的良好なため、付着力がある程度大きく、鉄筋からコンクリートへ応力が均等に分散して伝達され、ひびわれははり軸方向に均等に分散する傾向にある。一方、FRPはりの場合、曲げ変形を受けると、コンクリートと補強材との付着力が小さいために、剥離およびずれを生じ、補強材からコンクリートへの応力の伝達は、格子交差部付近のコンクリートのみで主として行われ、この部分のコンクリートのみで局所的な応力が作用し、ひびわれを発生したものと考えられる。

図-5には、曲げひびわれ発生モーメントとFRP補強材の格子間隔および単位膨張材量との関係を示す。補強材の格子間隔の違いによる曲げひびわれ発生モーメントへの影響については有意な差はほとんど認められない。また、単位膨張材量を増加させると、コンクリート引張縁に生じたケミカルプレストレスにより、曲げひびわれ発生モーメントは上昇する傾向がみられる。

FRPはりの曲げひびわれ発生モーメントは、RCはりのそれに比べて小さい値を示している。この原因として、FRP補強材は鉄筋に比べ弾性係数が小さいため、同一の曲げモーメントにおける引張ひずみが鉄筋よりも大きくなること、また、上記の格子交差部における局所的な応力集中による過大な引張応力が生じ、部分的なコンクリートの引張破壊をもたらされたことなどが考えられる。なお、コンクリートの設計圧縮強度を増加させたいずれのはりにおいても、曲げひびわれ発生モーメントは増大することが認められた。

6. 曲げひびわれ幅

図-6には、同一曲げモーメント(0.75 tf・m)における補強材位置の平均曲げひびわれ幅と格子間隔および単位膨張材量との関係を示す。また、最大曲げひびわれ幅については図-7に示す。平均および最

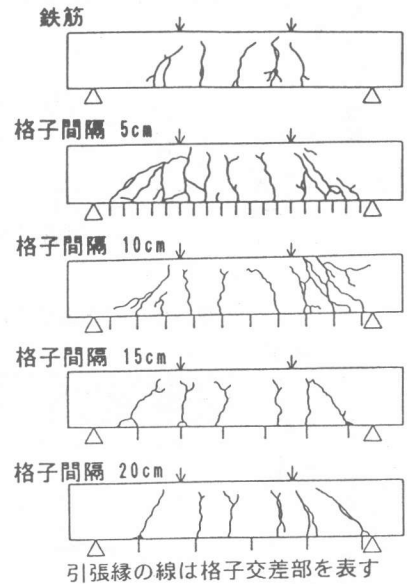


図-4 ひびわれ発生状況図
($E=50\text{kg/m}^3$, $f_c'=300\text{kgf/cm}^2$ の場合)

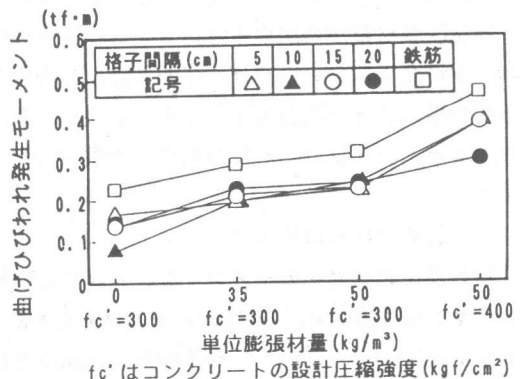
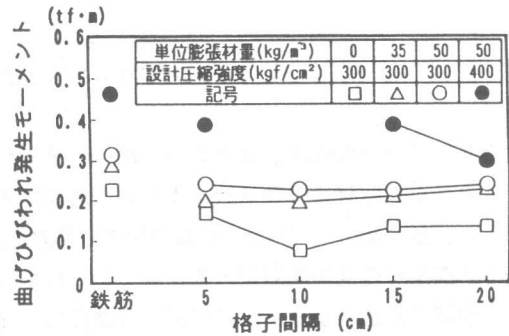


図-5 曲げひびわれ発生モーメントと格子間隔および単位膨張材量との関係

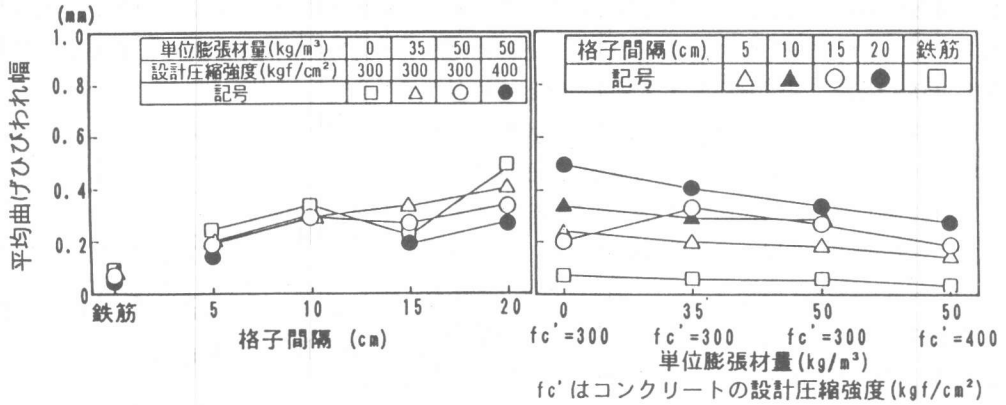


図-6 平均曲げひびわれ幅と格子間隔および単位膨張材量との関係

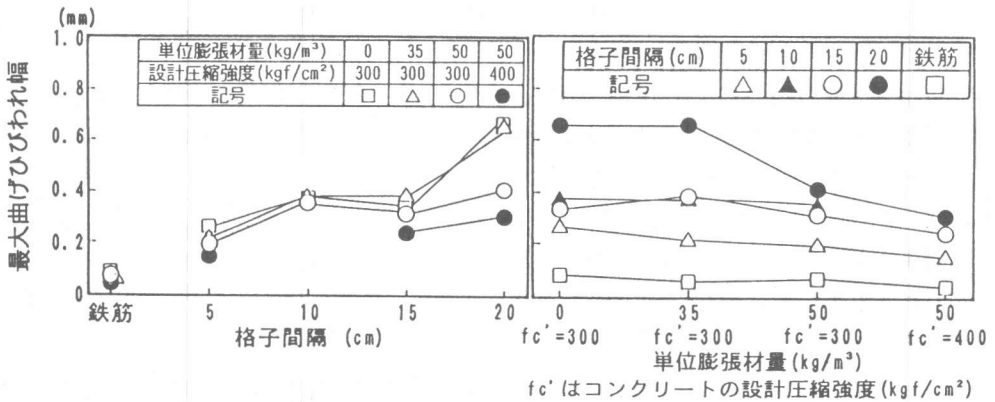


図-7 最大曲げひびわれ幅と格子間隔および単位膨張材量との関係

大の曲げひびわれ幅は、RCはりに比べ、FRPはりの方が大きくなっている。これは、FRPはりの方が補強材の弾性係数が小さいことに加え、曲げひびわれが発生している格子交差部付近では同一曲げモーメントのRCはり以上の応力が生じていることも要因として考えられる。また、FRP補強材の格子間隔が大きくなるにしたがって、曲げひびわれ幅も増加している。これは、格子間隔が大きくなると一定区間における格子交差部の数が減少し、同一曲げモーメントにおいて一箇所の格子交差部に作用する応力が増大するためであると考えられる。

単位膨張材量が増加すると、コンクリートに導入されたケミカルプレストレスが大きくなるため、平均および最大の曲げひびわれ幅は減少する傾向が認められた。なお、コンクリートの圧縮強度を増加させた場合についても併せて示した。いずれの格子間隔においても、圧縮強度を増加させると、曲げひびわれ幅は減少する傾向にあることが認められる。

7. 斜めひびわれ発生モーメント

斜めひびわれ発生モーメントを、FRP補強材の格子間隔および単位膨張材量とともに図-8に示す。単位膨張材量を50kg/m³としたものを除き、格子間隔が10cmまでは斜めひびわれ発生モーメントは増加するものの、格子間隔が15cm以上になると低下している。この原因としては、図-4に示したひびわれ発生状況と格子交差部の位置からも明らかのように、格子間隔が15cmと20cmの場合、応力集中が生じる格子交差部がせん断スパン内に一箇所しか存在せず、その位置が曲げ

ひびわれが進展して斜めひびわれの発生し易い位置に近かったこと、せん断スパン内の格子交差部の数が少ないため一箇所の格子交差部への応力集中が増大したことが考えられる。

斜めひびわれ発生モーメントと単位膨張材量との関係においては、単位膨張材量を 35kg/m^3 置換することにより、格子間隔が 15cm のはりを除き、ケミカルプレストレスの導入効果により斜めひびわれ発生モーメントは上昇している。しかしながら、単位膨張材量が 35kg/m^3 から 50kg/m^3 に増加すると、斜めひびわれ発生モーメントは低下する傾向にある。この原因として、いずれの格子間隔においても、斜めひびわれはせん断スパン中央付近より発生しており、斜めひびわれ発生の制御に効果的なスターラップの有効本数が減少すること、また、ケミカルプレストレスの効果以上に単位膨張材量の増加に伴うコンクリート圧縮強度の低下による影響が大きかったことが考えられる。

格子間隔が 15cm のはりに関しては、単位膨張材量が増加するに従い、斜めひびわれ発生モーメントは低下する傾向にある。これは、せん断スパン内に応力集中が生じる格子交差部が一箇所しか存在せず、また、支点および載荷点直下に格子交差部が存在することにより、斜めひびわれを誘発し易く、コンクリートの圧縮強度の低下の影響が大きかったためと考えられる。なお、斜めひびわれの進展は格子交差部をせん断スパン中央に配置した側で卓越し、破壊もその部分で生じた。

8. 破壊モーメントおよび破壊形式

表-2に、破壊形式および破壊モーメントの実験値と計算値を示す。RC はりは、いずれの配合においても曲げ引張破壊となり、計算値は実験値とほぼ等しい値を示した。格子間隔が 5cm のFRP はりは膨張材を 35kg/m^3 置換することによって生じるケミカルプレストレスの導入効果により、せん断圧縮破壊からせん断スパン内補強材破断となり、破壊モーメントは上昇した。また、格子間隔が $5\cdot 10\cdot 15\text{cm}$ のはりにおいて、単位膨張材量を 50kg/m^3 とするとせん断スパン内補強材破断からせん断圧縮破壊となり破壊モーメントは低下している。この原因として、格子間隔を問わず、斜めひびわれはせん断スパン中央付近より発生しているため、斜めひびわれ進展の制御に効果的なスターラップの有効本数が減少すること、また、ケミカルプレストレスの効果以上に、単位膨張材量の増加に伴うコンクリート圧縮強度の低下による影響が大きかったことが考えられる。

FRP はりの計算値と実験値の比較を行うと、積層モデルを使用してFRPの断面積をそのまま補強材断面積として用いた計算値は、いくつかの場合に危険側を示している。しかしながら、弾性係数が小さいことを考慮して断面積を減少させた換算断面積を補強材の断面積として用いた

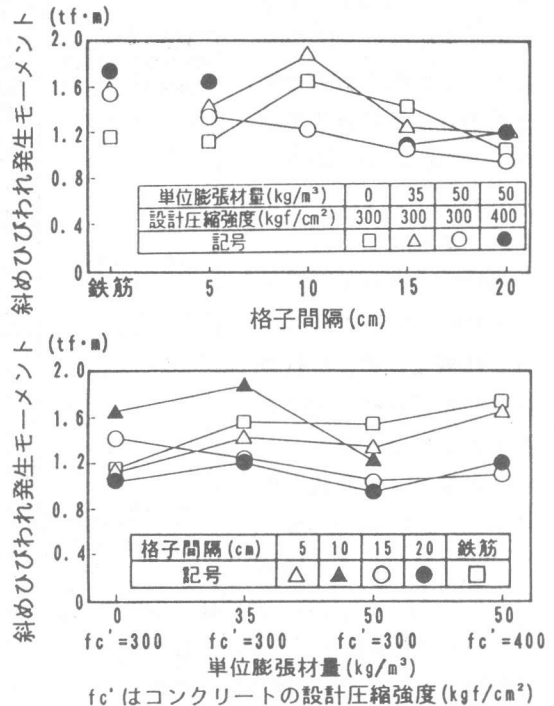


図-8 斜めひびわれ発生モーメントと格子間隔および単位膨張材量との関係

場合、すべてにおいて安全側となった。よって、設計計算を行う際には、安全性を重視し換算断面を用いる必要があると思われる。

9. まとめ

本研究において、次のことが明らかとなった。

(1) 仕事量の概念に基づき求めた補強材に生じるケミカルプレストレインの推定値は、実験値を良く反映するものであった。

(2) 格子状FRPを補強材として使用した場合、

曲げひびわれは格子交差部付近より発生し、曲げひびわれ発生モーメントはRCはりに比べ低下する。この原因として格子交差部への応力集中が挙げられる。また、格子間隔の違いによる曲げひびわれ発生モーメントへの影響は明確には認められなかった。

(3) 膨張材の置換により、同一曲げモーメントにおける補強材のひずみの増分を減少させることが可能となり、それに伴い曲げひびわれ発生モーメントは増加し、また、曲げひびわれ幅は減少した。

(4) 格子状FRPを補強材とした場合、一般に膨張材の置換は斜めひびわれ発生にある程度効果的であったが、単位膨張材量およびせん断スパン内の格子交差部の位置と数により効果が期待できない場合がある。

なお、このような格子格子状FRPの格子交差部の位置や数が曲げ・せん断性状に及ぼす影響は、本実験で採用したはりの断面形状寸法において特に顕著に現れてたもので、スラブになると緩和されるものと考えられる。

本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究(C) (課題番号 04650418)および総合研究(A) (課題番号 04302040 研究代表者 角田與史雄 北大教授)によるものである。

参考文献

- 1) 小沢一雅・関島謙蔵・岡村 甫：FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No. 2 pp. 269-274、1987. 6
- 2) 辻 幸和・斉藤 等・関島謙蔵・小川広幸：FRPで補強したコンクリート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. 10、No. 3 pp. 547-552、1988. 6
- 3) 丸岡正知・辻 幸和・吉田 誠・石田知子：FRP材を用いたケミカルプレストレスコンクリートはりの力学的性状、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、Vol. 1、pp. 265-270、1992
- 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

表-2 破壊形式および破壊モーメント

単位 膨張材量 (kg/m ³)	設計コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	補強材種類 および 格子間隔	破壊モーメント 実験値 (tf·m)	破壊 形式	破壊モーメント計算値			コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)
					積層モデル		せん断	
					換算断面	示方書※		
0	300	鉄筋	1.82	△	1.79 △		1.89	328
		F 5cm	1.85	□	2.26	1.66	1.73	
		R 10cm	2.10	◎				
		P 15cm	2.31	◎				
		20cm	1.80	◎				
		◎						
35	300	鉄筋	1.88	△	1.76 △		1.87	303
		F 5cm	2.64	◎	2.25	1.65	1.71	
		R 10cm	2.32	◎				
		P 15cm	2.18	◎				
		20cm	1.82	◎				
		◎						
50	400	鉄筋	1.79	△	1.75 △		1.85	271
		F 5cm	2.45	□	2.23	2.65	1.69	
		R 10cm	2.16	□				
		P 15cm	1.98	□				
		20cm	1.83	□				
		□						
50	400	鉄筋	1.79	△	1.80 △		1.90	344
		F 5cm	2.78	◎	2.28	1.67	1.73	
		R 15cm	2.10	◎				
		P 20cm	1.80	◎				
				◎				
		◎						

△ 曲げ引張破壊 □ せん断圧縮破壊 ◎ せん断スパン内補強材破壊

※示方書：せん断耐力はコンクリート標準示方書(設計編)の式(6.3.2)より算定した。