

論文 UFC パネル接着および断面修復が低強度 RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響

王 健*1・森川 英典*2・川口 哲生*3

要旨: 既設 RC 構造物においては、初期欠陥や劣化によりせん断破壊先行する可能性が危惧される場合があり、適切なせん断補強方法についての検討を行う必要がある。本研究ではせん断破壊先行型の低強度 RC はり部材に対し、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)パネル補強と断面修復を行い、それぞれがせん断耐荷機構に及ぼす影響について検討を行った。実験結果より、せん断スパン比 1.5 の場合は、断面修復材のみの補修ではせん断耐力が低下したが、UFC パネルと併用することで、RC はり部材の剛性と耐力が大きく向上し、破壊形式も改善した。せん断スパン比 2.5 の場合は、UFC パネル接着により高い補強効果が得られた。

キーワード: せん断補強, 超高強度繊維補強コンクリート(UFC), 断面修復, 低強度, RC はり部材

1. はじめに

既設 RC 構造物においては、初期欠陥による低コンクリート強度や塩害・ASR 劣化などによるスターラップ腐食やコンクリート材料劣化を考慮すると、曲げ破壊よりもせん断破壊が先行する可能性も危惧され、せん断に対する耐荷機構の検討も行うことが必要であると考えられる。既往の研究¹⁾より、コンクリート強度が低い RC 橋ではせん断破壊に対する安全性が低いことが分かっている。さらに、劣化した RC はり部材の鉄筋が腐食した場合、鉄筋の力学的性能や付着性能が低下し、脆性的なせん断破壊が先行したり、付着破壊や定着破壊などの本来望ましくない破壊形態が発生したりする可能性があり、せん断破壊に対する補修・補強工法に関して検討する必要があると考えられる。

近年、高強度、高靱性、高耐久性という特徴を有する超高強度繊維補強コンクリート(Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下、UFC)に関する研究^{2), 3)}が進められている。著者ら^{4), 5)}の研究より、UFC をパネル状に成型し、RC はり部材側面に接着するという手法を用い、低強度 RC はり部材を対象とすると、高い補強効果が得られることが確認された。ただし、鉄筋コンクリート構造物が経年劣化(塩害や ASR)した場合、内部の塩化物イオンを除去し、劣化したコンクリートを断面修復材に置き換える、断面修復工法が選定されることが少なくない。しかし、せん断耐荷機構が曲げ破壊と比べ、極

めて複雑で、その載荷方法など多くの要因に影響される。せん断破壊先行型の RC はり部材に対して、ポリマーセメントモルタル(以下、PCM)を断面修復材として補修する場合、PCM が RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響についての検討が必要である。

また、載荷条件に関して、本研究では、UFC パネル接着補強およびPCM 断面修復が低強度 RC はり部材の破壊形式およびせん断耐荷機構に及ぼす影響の評価を目的としていることを考え、せん断破壊先行型の RC はり部材を作製するためにせん断スパン比は 1.5 と 2.5 を採用した。また、既往の研究⁶⁾により、 $a/d=2.5$ の場合、せん断補強によってせん断耐力が増加し、早期に曲げ破壊で終局したため、せん断耐力の補強効果が詳細に評価されていない。そこで、本研究では、 $a/d=2.5$ の供試体では、曲げ破壊を防ぐため、いずれも CFRP シート補強を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

コンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、初期欠陥や経年による劣化を模擬するため、目標コンクリート強度を 15N/mm^2 と低強度のものに設定した。補強対象とした供試体の寸法は幅 150mm、高さ 240mm、有効高さ 200mm の矩形断面を持つ全長 1500mm とし、スパンが 1200mm である。引張鉄筋には $\phi 16$ を 3 本、圧縮鉄筋には D13 を

表-1 コンクリート示方配合

W/C (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (s/a) (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/m ³)	AE 剤 (ml/m ³)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
100	20	55	175	175	1006	830	438	153

*1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士後期課程 (学生会員)

*2 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究部建設技術チーム (正会員)

2本配置した。端部での定着を確保するため支点の外側には密なせん断補強を行い、引張鉄筋は支点端部で180度フックにより定着した。なお、本試験では昭和40年代以前の既存RC橋を想定し、引張鉄筋に丸鋼を用いた。コンクリートの材料特性と鉄筋の材料特性を表-2、表-3に示す。

また、混和剤には流動性と空気量を調整するためにAE減水剤(ポゾリス No.70)とAE剤(ポゾリス No.303A)を用いた。そして、コンクリート打設後2週間の湿布養生を行った。本研究では、せん断スパン比が異なるRCはり部材の耐荷機構に対して、PCM断面修復とUFCパネル接着補強の影響を検討するため、供試体を2つのシリーズに分けた。本実験における供試体一覧を表-4に示す。

Group 1は供試体が3体、せん断スパン比が2.5である。せん断スパン比2.5については、様々な破壊形式になり得ることを想定している。Group 1で使用した供試体概要および鉄筋のひずみゲージ貼付位置を図-1に示す。ま

表-2 コンクリート材料特性

Group	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
Group 1	18	19.8	2
Group 2	18	19.0	2

表-3 鉄筋材料特性

Group	鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
Group 1	D13	375	545
	φ 16	320	465
Group 2	D13	385	564
	φ 16	333	465

た、本グループでは供試体の曲げ破壊を防止するため、CFRPシートの接着を標準としている。

Group 2では、過積載車両などによりRCはり部材端部に大きなせん断力が作用する場合や、低せん断スパン比の実構造部材を模擬するため、せん断スパン比を1.5とした。Group 2の供試体概要および鉄筋のひずみゲージの貼付位置を図-2に示す。

2.2 UFC パネル

UFCパネルの力学的特性を表-5に示す。使用したUFCは、直径0.2mm、長さ15mmの短鋼繊維を2vol.%混入したものである。図-3にUFCパネルアンカー施工位置を示す。本研究では接着方法としてアンカー注入方式を採用した。接着方法は、アンカー施工前に、母材コンクリートおよびUFCパネル接着面をディスクグラインダーにより研磨し、目荒らしを施した。その後、母材コンクリートに穴をあけてアンカーを打ち込み、母材コンクリートとパネル間に座金を用いて3mmの隙間をあけてボルトで固定した。その後接着剤を充填し、UFCとRCの一体化を図った。接着材の材料特性を表-6に示す。

表-4 供試体一覧

	供試体	コンクリート強度 (N/mm ²)	PCM圧縮強度 (N/mm ²)	UFC	CFRP	a/d
Group 1	N2.5	18	-	-	-	2.5
	P2.5		20	O		
	P2.5UFC					
Group 2	N1.5	18	-	-	O	1.5
	P1.5		17	O		
	P1.5UFC					

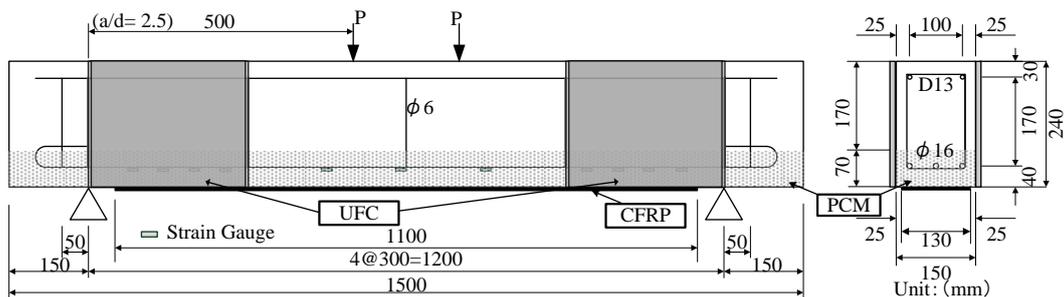


図-1 供試体寸法およびひずみゲージ位置(Group 1)

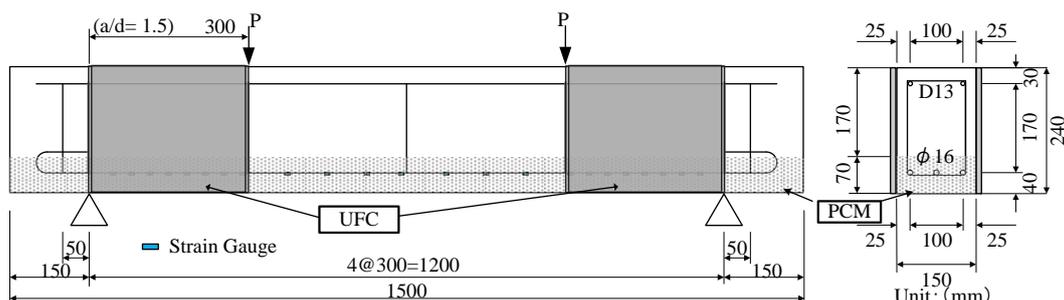


図-2 供試体寸法およびひずみゲージ位置(Group 2)

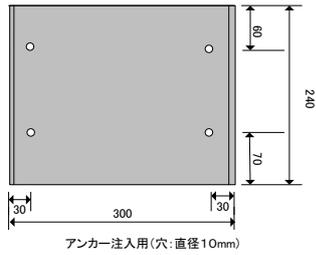


図-3 UFC パネルアンカー施工位置

2.3 PCM

実構造物に対して PCM 断面修復を行う際、引張鉄筋の裏側までコンクリートをはつり取るものと考えられる。そこで、断面修復を考慮した供試体については引張鉄筋の裏まで確実に PCM が打設され、鉄筋位置で界面が形成されることがないように補修部分の厚さを約 70mm と設定し、供試体を上下逆の状態です定の厚さまでコンクリートを打設した。その後、打ち継ぎ処理を行い、PCM を打設した。手順として、コンクリートを打設してから 2 時間後に遅延剤を散布し、翌日に表面を洗浄した後、PCM を打設した。

2.4 CFRP シート

Group 1 では供試体の曲げ破壊を防止するため、CFRP シート補強を施した。CFRP シートの材料特性を表-7 に示す。シート接着方法は、母材コンクリートのシート接着面をディスクグラインダーで研磨し、アセトン処理を行う。次にプライマーを塗布して 1 日養生し、パテを塗布厚さ 1mm で施工する。パテ硬化後、CFRP シートを接着樹脂により含浸および接着し、脱泡ローラにより脱泡した後に上塗りを施した。その上に離型シートをかぶせ、表面を均一に整えて養生を行った。

2.5 測定項目および荷重試験方法

測定項目は荷重、中央点および支点の変位、コンクリートおよび UFC パネルの主ひずみおよびその角度、各種鉄筋ひずみである。2000kN 万能試験機により単純支持された供試体に対して 2 点に線荷重を静的に荷重した。ひび割れは荷重中に目視により観察し随時記録を行った。

3. 実験結果および考察(Group 1)

3.1 荷重試験結果の比較

荷重試験結果を表-8 に示す。基準供試体 N2.5 に対して断面修復供試体 P2.5 は最大荷重、初期剛性ともにやや

表-5 UFC パネルの材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	210
割裂引張強度 (N/mm ²)	10.8
静弾性係数 (kN/mm ²)	54
密度 (g/cm ³)	2.55

表-6 接着剤の材料特性

圧縮強さ (N/mm ²)	88.8
引張強さ (N/mm ²)	56.2
圧縮弾性率 (kN/mm ²)	3.0
引張せん断接着強さ (N/mm ²)	22.1

表-7 CFRP シートの材料特性

繊維目付 (g/m ²)	600
設計厚さ (mm)	0.333
引張強度 (N/mm ²)	4490
引張弾性係数 (kN/mm ²)	263
破断ひずみ (μ)	17180

増加する結果となった。一方で、PCM と UFC パネルと併用した供試体 P2.5UFC で大きな補強効果が確認された。最大荷重が 51%、初期剛性が 35%程度上昇したことがわかる。

3.2 荷重-たわみ関係

図-4 に各供試体の荷重とたわみの関係を示す。基準供試体 N2.5 と比べ、P2.5 は剛性が初期段階でより高いが、約 80kN 付近でせん断ひび割れが発生するために低下した。基準供試体 N2.5 と比べて P2.5UFC は終始、高い剛性を確保している。

3.3 引張鉄筋のひずみ分布

図-5 に各供試体の引張鉄筋のひずみ分布を示す。基準供試体 N2.5 では付着割れに対する抵抗が小さく、約 80kN で急激に引張鉄筋端部の付着すべりが生じた。しかし、P2.5、P2.5UFC では、補修や補強を施すことで端部に発生したひずみの増加が抑制され、付着破壊が発生する荷重が大きくなった。また、供試体 P2.5UFC の場合、引張鉄筋のひずみは全体的に小さく、特に端部のひずみの抑制が顕著であることから高い付着破壊抑制効果を発揮したと考えられる。

3.4 ひび割れ性状

図-6 に各供試体の終局時のひび割れ性状を示す。なお、太線で示したひび割れは破壊において支配的となったひび割れである。

基準供試体 N2.5 において、低強度コンクリートと丸鋼の付着が弱いと、顕著な付着ひび割れが生じてしまい、せん断引張破壊に至った。供試体 P2.5 の場合、鉄筋の付着破壊を抑制したが、PCM と母材の境界で付着ひび割れ

表-8 荷重試験結果(Group 1)

供試体	最大荷重 P _{max} (kN)	補強効果	初期剛性(50kN 荷重時) (kN/mm)	補強効果	破壊形式
N2.5	104.7	-	67.9	-	Shear tensile failure
P2.5	112.5	7%	74.4	10%	PCM interfacial debonding
P2.5UFC	157.6	51%	91.8	35%	Shear compression failure (arch)

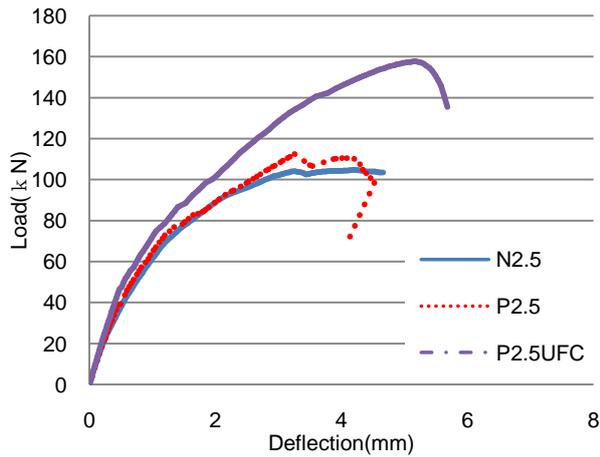


図-4 荷重-たわみ関係(Group 1)

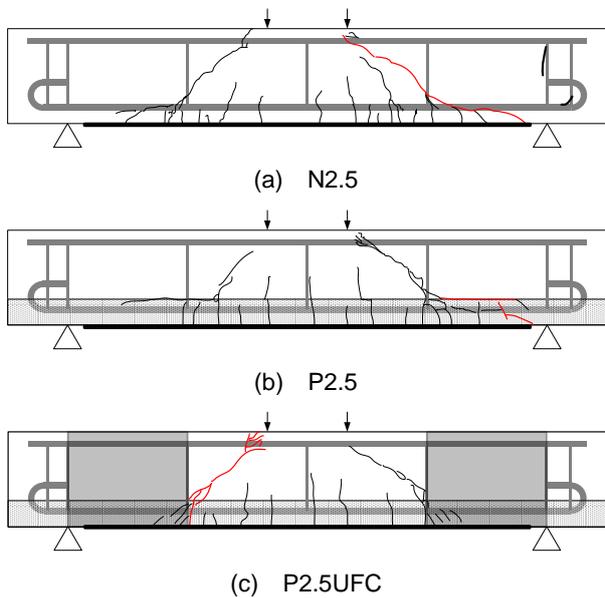


図-6 ひび割れ性状(Group 1)

が進展して PCM 界面剥離で終局した。一方、パネル接着供試体 P2.5UFC の場合、コンクリートと PCM の顕著な界面付着破壊はほとんどみられなかった。結局、斜めひび割れの発達による圧縮域の減少に伴う圧縮域の圧壊によって終局した。

4. 実験結果および考察(Group 2)

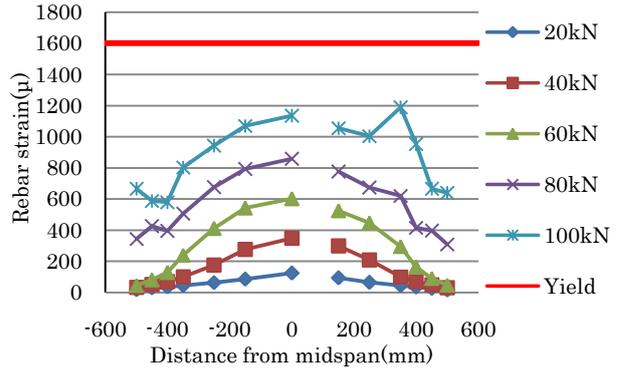
4.1 荷重試験結果の比較

表-9 に荷重試験より得られた各供試体の最大荷重、初期剛性と破壊形式を示す。供試体 P1.5 が基準供試体 N1.5 と比べ、断面修復することにより初期剛性が 63% 増加したが、最大荷重が 14% 程度低下した。それに対して、PCM と UFC パネルの併用補強供試体 P1.5UFC は、最大荷重、初期剛性ともに大幅に増加した結果となった。

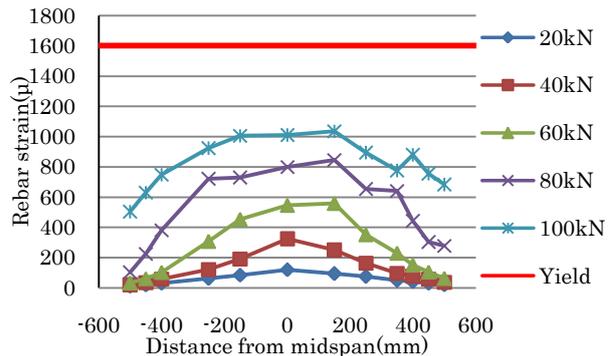
4.2 荷重-たわみ関係

図-7 に各供試体の荷重とたわみの関係を示す。

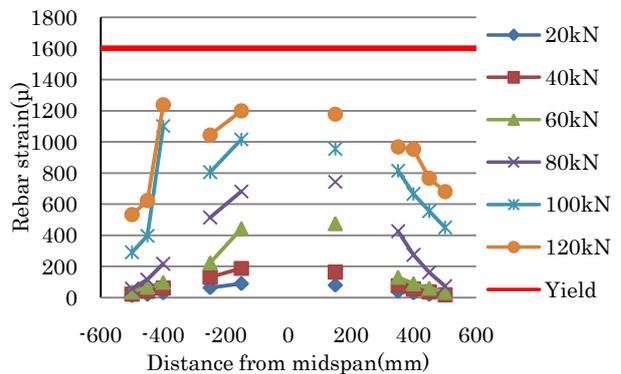
供試体 P1.5 が N1.5 と比べ、最初に非常に高い剛性が



(a) N2.5



(b) P2.5



(c) P2.5UFC

図-5 引張鉄筋ひずみ分布(Group 1)

見られるが、ひび割れが発生する際に剛性が急激に低下することが荷重中に確認された。また、供試体 P1.5 においては、アーチ機構が形成できず、最後に脆性的な破壊に至った。基準供試体 N1.5 と比べて P1.5UFC は終始、高い剛性を確保した上で、せん断ひび割れと付着ひび割れを抑制して曲げ破壊で終局した。

4.3 引張鉄筋のひずみ分布

図-8 に各供試体の引張鉄筋のひずみ分布を示す。なお、ひずみゲージの一部断線のため、データの欠落がある。

供試体 N1.5 において、90kN までは端部にはほとんどひずみが生じていないが、120kN になると急激に増加し、最大荷重時は中央部よりも大きな値を示した。

供試体 P1.5 が N1.5 と比べると、せん断領域において引張鉄筋のひずみは全体的に抑制されたが、120kN から

表-9 載荷試験結果(Group 2)

供試体	せん断耐力(二羽式) V_{max} (kN)	最大荷重(実験) P_{max} (kN)	補強 効果	初期剛性(50kN 載荷時)(kN/mm)	補強 効果	破壊形式
N1.5	136	196.1	-	108.5	-	Shear compression failure (arch)
P1.5	-	169.2	-14%	177.0	63%	Shear compression failure
P1.5UFC	-	273.6	46%	173.0	59%	Flexural failure

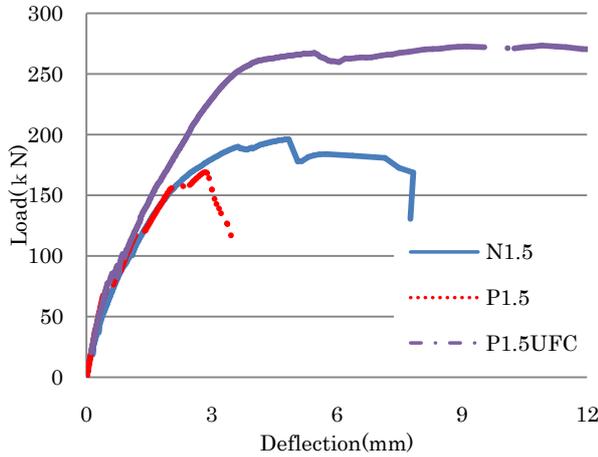


図-7 荷重-たわみ関係(Group 2)

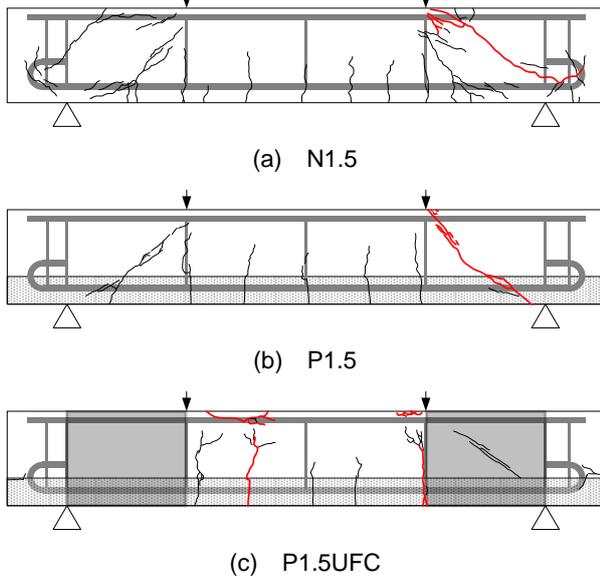


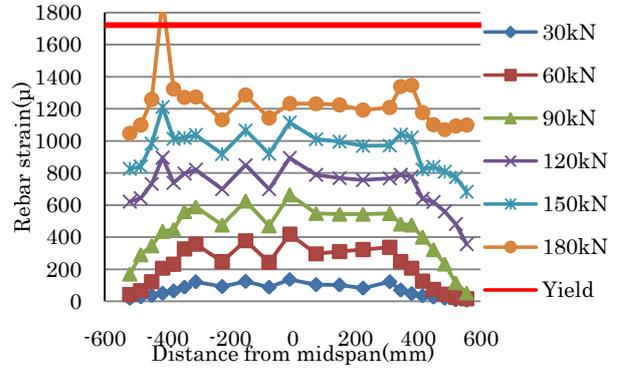
図-9 ひび割れ性状(Group 2)

左側の鉄筋ひずみの急激な増加が確認された。また、P1.5UFC の場合、高い荷重段階まで引張鉄筋ひずみの抑制が見られ、最後に載荷点付近の鉄筋が降伏したことで終局した。

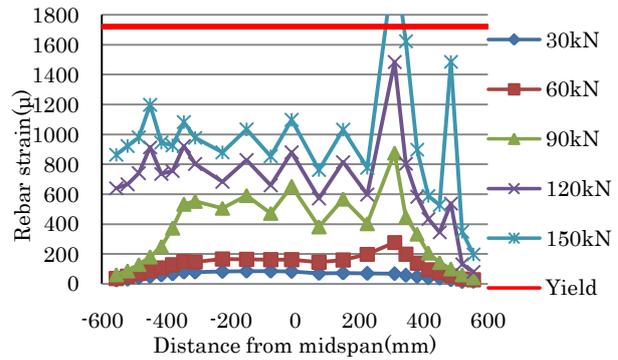
4.4 ひび割れ性状

図-9 にひび割れ図(Group 2)を示す。太線で示したひび割れは破壊において支配的となったひび割れである。

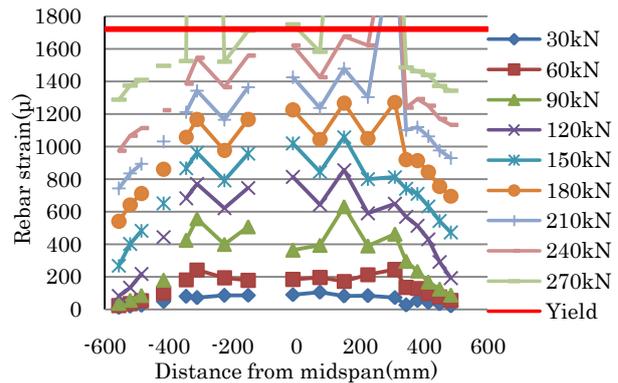
基準供試体 N1.5 の場合、せん断領域のスターラップ付近で緩やかな曲げせん断ひび割れが生じた後、引張鉄筋に沿って付着ひび割れが発生した。その後、載荷点と定着部と繋ぐようなせん断ひび割れが発生し、アーチ機構が



(a) N1.5



(b) P1.5



(c) P1.5UFC

図-8 引張鉄筋ひずみ分布(Group 2)

形成した。供試体 P1.5 において、PCM と鉄筋の付着性が母材より優れているため、定着部の付着ひび割れが進展しなかったが、スターラップ付近の曲げせん断ひび割れと引張鉄筋沿いの付着ひび割れが抑制され、アーチ機構に移行せず、急激なせん断ひび割れによって終局に至った。パネル接着供試体 P1.5UFC の場合、急激なせん断ひび割れを抑え、曲げ破壊に至った。

5. 各補修補強効果の評価

5.1 PCM 断面修復が RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響

せん断スパン比が 2.5 である RC はり部材において、PCM 断面修復により、最大荷重と初期剛性の増加や、鉄筋付着破壊の抑制など、補修(補強)効果が確認された。一方、せん断スパン比が 1.5 の場合、PCM 断面修復により、曲げせん断ひび割れと引張鉄筋沿いの付着ひび割れが抑制され、アーチ機構に移行せず脆性的な破壊に至り、せん断耐力の低下が確認された。従って、低せん断スパン比を有する RC 構造に対して断面修復する際、せん断耐荷性能の照査を十分に検討する必要がある。

5.2 UFC パネル接着補強が RC はり部材のせん断耐荷機構に及ぼす影響

せん断スパン比が 2.5 である RC はり部材において、破壊に支配的なひび割れが全て UFC パネル間で発生した。これより、見かけのせん断スパンが短くなり、耐荷性能の向上効果が発揮されたと考えられる。また、本研究の供試体では引張鉄筋形状として丸鋼を用いているため、斜めひび割れの進展に伴いアーチ機構に移行しやすいことが考えられる。図-10 に示すようなタイド・アーチ的な耐荷機構に移行後、UFC パネル接着による見かけのせん断スパン短縮の効果によりアーチリブ・コンクリート(ストラット)に大きな圧縮力が作用し、それに伴いタイドバーの役割を担う引張主鉄筋にも大きな引張力が作用する。CFRP シート曲げ補強のために、曲げ破壊に至らず、せん断破壊で終局した。ただし、その前提となる UFC パネル接着による引張鉄筋の端部領域の付着性能補強効果について今後の研究課題として検討する必要がある。また、せん断スパン比が 1.5 の場合、急激なせん断ひび割れを抑え、曲げ破壊に至った。つまり、補強対象である RC はり部材に対し、PCM 断面修復と UFC パネル接着補強を併用した場合、高い補強効果が得られると考えられる。特に、過積載車両の影響を受ける RC はり部材や、低せん断スパン比を有する RC はり部材に対して断面修復する必要がある場合、せん断補強の実施の必要性を慎重に検討することが望ましいと考える。

6. まとめ

本研究では、UFC パネル接着および PCM 断面修復が低強度 RC はり部材の破壊形式およびせん断耐荷機構に及ぼす影響の評価を目的として、せん断スパン比が異なる二つシリーズの低強度 RC はり部材に対して UFC パネル接着補強と PCM 断面修復を行い、載荷試験を実施した。以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) せん断スパン比が 2.5 である RC はり部材において、UFC パネル接着補強による顕著なせん断補強効果

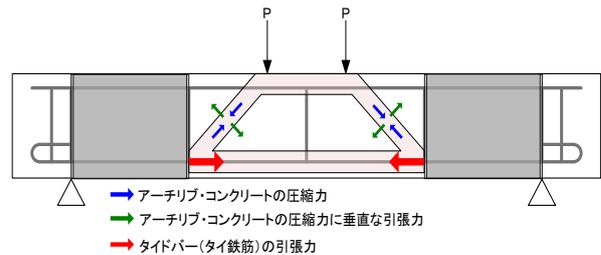


図-10 ディープビームのタイド・アーチ機構

としては、見かけのせん断スパン比が短くなることによる効果と接着部分の引張主鉄筋の付着破壊を抑制する効果が確認された。

- (2) 低せん断スパン比(1.5)の RC はり部材に対して PCM 断面修復を行う場合、曲げせん断ひび割れと引張鉄筋沿いの付着ひび割れを抑制することにより、アーチ機構に移行せず、脆性的な破壊に至り、せん断耐力の低下が確認された。
- (3) 低せん断スパン比(1.5)の RC はり部材に対して PCM 断面修復と UFC パネル接着補強を併用する場合は、最大荷重、初期剛性ともに大幅に増加する結果となり、急激なせん断ひび割れの発生を抑え、破壊に支配的なひび割れを UFC パネル間に抑制させ、曲げ破壊で終局した。

参考文献

- 1) 狩野裕之, 森川英典, 湯浅康史: 現場試験に基づいた塩害 RC 橋のせん断安全性評価と特性分析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, Vol.8, pp.145-152, 2008.10
- 2) Shah SP, Rangan VB: Fiber reinforced concrete properties, ACI, vol.68, pp.126-135, 1971
- 3) Habel K, Viviani M, Denarie E, Bruhwiler E: Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, CemConcr Res, vol.36(7), pp.1362-1370, 2006
- 4) 瀬戸亮太, 森川英典, 藤永亜里沙, 友村圭祐, 川口哲生: UFC パネル接着および CFRP シート接着による RC 部材のせん断補強効果, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集報告集, Vol.10, pp.371-378, 2010.10
- 5) 王健, 森川英典, 川口哲生: 低強度 RC 部材に対する UFC パネル接着せん断補強の性能評価解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集報告集, Vol.12, pp.1-8, 2012.11
- 6) 松田豊樹, 森川英典, 瀧靖文, 川口哲生: ASR が生じた RC はり部材のせん断耐荷機構と UFC パネル接着による補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.995-1000, 2010.7