

論文 CFRP 格子筋と吹付けモルタルによる梁のせん断補強

梁 俊^{*1}・宇治 公隆^{*2}・松村 翔太^{*3}・佐藤 貢一^{*4}

要旨: 近年, 高強度で耐食性に優れ, 施工性も良好な炭素繊維格子筋(CFRP 格子筋)とポリマーセメントモルタル (PCM) を用いた床版などの曲げ補強が行われるようになってきている。本研究では, この工法を梁などのせん断補強に適用した場合の補強効率を明らかにすることを目的とし, 補強 RC 梁試験体を用いた 2 点曲げ載荷実験を行い, 部材の耐荷特性ならびに CFRP 格子筋のせん断抵抗挙動を明らかにした。

キーワード: CFRP 格子筋, せん断補強, 補強効率, 吹付けモルタルの剥離

1. はじめに

近年, 既設コンクリート構造物の機能回復・向上を目的とした補修・補強工事が増えている。高強度で耐食性に優れる炭素繊維格子筋(以下 CFRP 格子筋と称する)とポリマーセメントモルタル (PCM) 吹付けとの併用による補修・補強工法は, 軽量であり, また施工が比較的容易である等の点から, 梁や床版の曲げ補強ばかりでなく, せん断補強の有効な工法にもなると期待される。CFRP 格子筋の補強性能は吹付けモルタルと既設構造物との一体性に左右されると考えられる。格子筋の定着機構およびモルタルの付着性能に関する研究は, 小林ら¹⁾ により行われており, また, 表面処理状態, 格子筋の種類, 吹付け厚さなどが CFRP 格子筋の定着に与える影響に関しては, 宇治^{2) 3) 4)} により研究が行われている。なお, これまでの研究は要素実験による研究で, CFRP 格子筋とポリマーセメントモルタル吹付けとの併用による補修・補強工法を梁のせん断補強に適用した場合の, CFRP 格子筋の定着, 吹付けモルタルと既設コンクリートの一体性, 格子筋の部材軸方向筋の存在など, 様々な要因がせん断耐荷挙動に与える影響については十分検討がなされていない。本研究では, CFRP 格子筋とポリマーセメントモルタル吹付けとの併用による補修・補強工法を梁などのせん断補強に適用した場合の補強効果を明らかにすることを目的に, 無補強の RC 梁, CFRP 格子筋で補強した補強 RC 梁試験体および鉄筋網で補強した補強 RC 梁試験体を用いた 2 点曲げ載荷実験を行い, 部材の耐荷特性ならびに CFRP 格子筋のせん断抵抗挙動について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

CFRP 格子筋には, 炭素繊維を格子状に積層成形した市販製品を使用した。格子の間隔は 50mm (CR4) およ

び 100mm (CR8) である。短繊維を混入したプレミックス湿式吹付けモルタルに SBR 系ポリマーを混入した市販の製品を本実験の吹付けモルタルとして使用した。また, 界面のドライアウトの防止, および接着性の向上のため, EVA 系エマルジョンを主成分とするプライマーを使用した。ポリマーとプライマーの品質規格を表-1 に示す。

コンクリートはレディーミクストコンクリートを使用した。目標圧縮強度 (材齢 28 日) 24N/mm² とし, 目標スランプ 12cm, 目標空気量 4.5%とした。コンクリートの配合を表-2 に, 使用したポリマーモルタルの示方配

表-1 ポリマー, プライマーの品質規格

	ポリマー	プライマー
主成分	SBR 系合成ゴムラテックス	変性酢酸ビニルーエチレン系共重合体エマルジョン
固形分	45~46 (質量%)	45~48 (質量%)
外観	乳白色液体	乳白色液体
粘度	500~1500(mPa.s)	500~2000(mPa.s)
PH	8.0~9.0	4.5~6.5
密度	1.0(g/cm ³)	1.06(g/cm ³)

表-2 コンクリートの示方配合

G _{max} mm	SL cm	W/C %	s/a %	Air %	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
20	12	58	44.2	4.5	168	290	804	1044	3.48

表-3 モルタルの示方配合単位量 (kg/m³)

水	普通セメント	無機混和材	有機混和剤	骨材	有機質ファイバ	ポリマー
234		483		966	1.45	70

*1 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 博士 (工学) (正会員)

*2 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 都市基盤環境工学専攻 博士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京 都市環境学部 都市環境学科 都市基盤環境コース

*4 奈良建設 (株) 本部営業部 博士 (工学) (正会員)

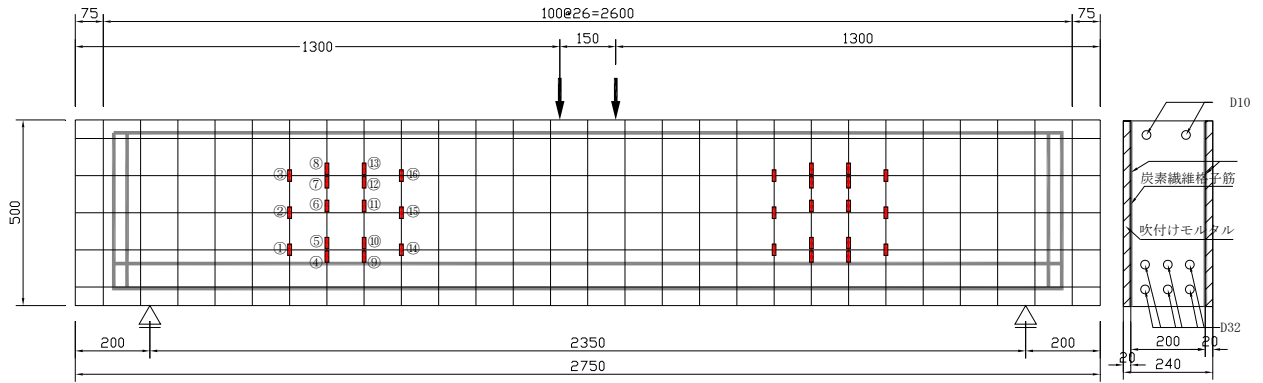


図-1 試験体の形状寸法及び配筋状況



図-2 吹付けの状況

合を表-3に示す。

実験に使用したコンクリートおよびモルタルの物性値を表-4に、CFRP格子筋および鉄筋の物性値を表-5に示す。

2.2 試験体諸元

図-1に試験体の形状寸法を、表-6に試験体諸元を示す。図-1の寸法にしたがい、試験体を6体作製した。試験体 No.1は格子筋の設置とモルタルの吹付けは行わない。なお、試験体 No.1はスターラップ筋をU型に200mmピッチで配置した。補強筋の断面積および配置間隔が補強効率に与える影響を検討するため、試験体 No.2, No.3はCR4@50mm, $A_F=6.6\text{mm}^2$ のCFRP格子筋でせん断補強した。同じように、試験体 No.4, No.5はCR8@100mm, $A_F=26.4\text{mm}^2$ のCFRP格子筋でせん断補強した。試験体 No.6はCFRP格子筋によって補強された試験体 No.4と補強効率を比較するため、縦筋の総せん断耐力を試験体 No.4のCFRP縦筋の総せん断耐力と同程度となるように、D6@30mm, $A=28.26\text{mm}^2$ の鉄筋網でせん断補強した。なお、表面処理の相違が補強効率に与える影響を検討するため、RC梁作製の6日後、試験体 No.2,

表-4 コンクリートおよびモルタルの物性値

区分	圧縮強度 N/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
コンクリート	35.8	2.21	30.1
モルタル	40.9	3.62	15.0

表-5 CFRP格子筋および鉄筋の物性値

区分	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	引張弾性率 kN/mm ²
D6	364	513	209.4
D10	366	500	206.6
D32	386	555	192.8
CR4	—	1661	102.2
CR8	—	1613	102.2

表-6 試験体諸元

試験体 No.	補強筋	表面処理	試験体寸法 (mm)
1	D6@200mm $A_F=28.26\text{mm}^2$	—	L2750×H500×W200
2	CR4@50mm $A_F=6.6\text{mm}^2$	ブラスト	L2750×H500×W240 吹付け厚：20×2面
3	CR4@50mm $A_F=6.6\text{mm}^2$	デスクダ ンター	L2750×H500×W240 吹付け厚：20×2面
4	CR8@100mm $A_F=26.4\text{mm}^2$	ブラスト	L2750×H500×W240 吹付け厚：20×2面
5	CR8@100mm $A_F=26.4\text{mm}^2$	デスクダ ンター	L2750×H500×W240 吹付け厚：20×2面
6	D6@30mm $A=28.26\text{mm}^2$ D6@200mm $A_F=28.26\text{mm}^2$	ブラスト	L2750×H500×W240 吹付け厚：20×2面

No.4ならびにNo.6は吹付け面に投射密度 30kg/m²を目安としてスチールブラストを行い、試験体 No.3, No.5 はディスクサンダーで処理した。

表面処理を行った吹付け面の凹凸状態を、レーザー変位計を用いて 23.4mm/s で 100mm 区間を等速直線運動させ、1ms ごとに測定して定量化した。レーザー変位計より得られたデータから表面のうねりなど、表面形状の影響を取り除き、表面の粗さを求め、機械分野で用いられる「中心線平均粗さ R_{ave}²」を求め⁵⁾、表面処理の相違を比較した。表面処理が終了後、試験体の両側面にせん断補強筋を取付け、厚さ 20mm のモルタルを吹付けた。図-2 に吹付けの状況を示す。試験体は吹付け施工後 28 日間現場にて湿布養生を行い、32 日目から載荷試験を行った。なお、すべての試験体は、十分な曲げ耐力を有するよう、鉄筋比を 4.78%とした。

2.3 試験方法

載荷は、2000kN 油圧ジャッキを用いて、曲げひび割れ発生まで漸増させ、曲げひび割れ発生後 5kN 程度まで除荷し、再度加力を行い、斜めひび割れ発生後再び 5kN 程度まで除荷し、その後終局まで漸増載荷させた。載荷速度は P=0.6kN/sec とした。なお、載荷は 2 点集中載荷で試験を行った。図-3 に試験状況を示す。

載荷時には、格子筋のひずみ、支点、部材中央変位、コンクリートひずみ（スパン中央の上縁、下縁）、軸鉄筋ひずみ（スパン中央下段）を適宜測定した。格子筋のひずみゲージの貼付け位置は図-1 の通りである。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

図-4 に各試験体のひび割れ状況を、表-7 に各試験体の曲げひび割れ荷重、せん断ひび割れ荷重、終局荷重の計算値および実測値と破壊形態を示す。試験体 No. 1 ~No.5 はせん断破壊を呈した。試験体 No.1（無補強）で

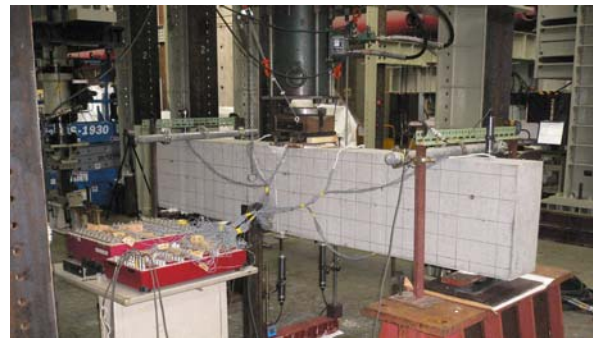


図-3 試験状況

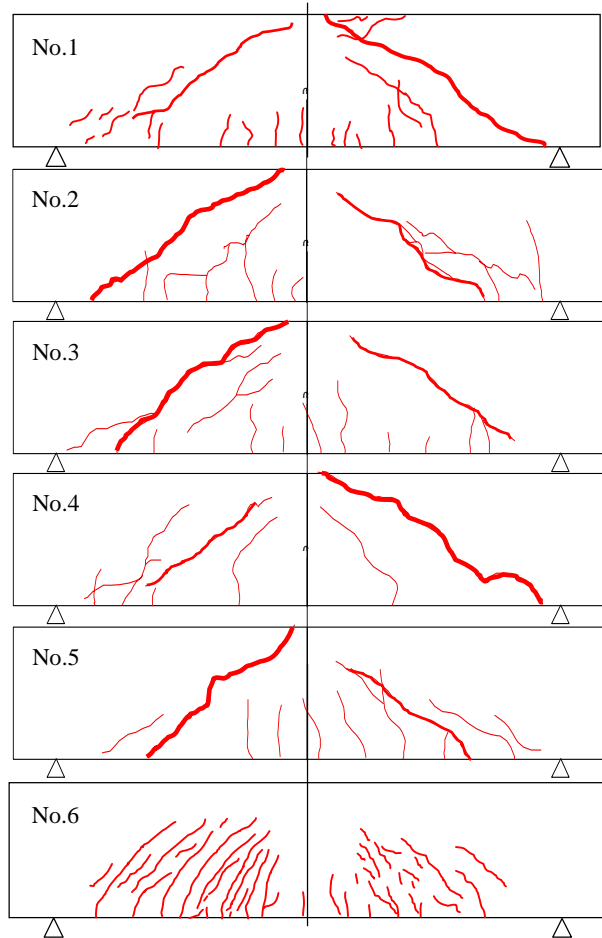


図-4 ひび割れ状況

表-7 載荷実験結果

No.	補強筋 (mm)	表面処理		曲げひび割れ発生荷重		せん断ひび割れ発生荷重		せん断終局荷重		補強効率 (%)	破壊形態
		処理方法	R _{ave} (mm)	(kN)		(kN)		(kN)			
				計算	実測	計算	実測	計算	実測		
1	D6@200	なし	—	64	110	272	220	449	450	—	せん断破壊
2	CR4@50 格子	ブラスト	0.053	104	120	327	300	709	588	53	せん断破壊
3	CR4@50 格子	ディスクサンダー	0.198	104	100	327	320	709	677	88	せん断破壊
4	CR8@100 格子	ブラスト	0.053	104	100	327	340	1036	631	31	せん断破壊
5	CR8@100 格子	ディスクサンダー	0.198	104	124	327	359	1036	736	49	せん断破壊
6	D6@200+D6@30 格子	ブラスト	0.053	104	110	327	310	1213	889	58	圧縮破壊

は荷重 300kN において、せん断ひび割れが、試験体の上面から 100mm 程度の位置まで進展し、ひび割れ幅も 2mm を越える程度まで拡大した。終局荷重 450kN の時点で、載荷部周辺に圧壊の様子は見られなかった。試験体 No.2～No.5 (炭素繊維格子筋で補強) は荷重 320kN 程度でせん断ひび割れが試験体の上面から 100mm 程度の位置まで進展し、その後はせん断ひび割れ周辺に新たに細かいせん断ひび割れを発生しながら終局荷重まで至り、せん断破壊した。なお、試験体 No.1 との相違点は、終局荷重が相違するほかに、載荷部周辺に小範囲の圧縮破壊部が発見されたことである。試験体 No.6 (鉄筋網補強) は 310kN で微細なせん断ひび割れが発生し、荷重の増加とともにせん断スパン全体に分散してあらたなひび割れが発生した。載荷中において、顕著なひび割れ幅の増加は見られなかった。荷重約 890kN で突然試験体が破壊した。なお、載荷部周辺のコンクリートは圧壊していた。

3.2 終局荷重

図-5 に各試験体の曲げひび割れ発生荷重、せん断ひび割れ発生荷重および終局荷重を示す。図から分かるように、補強後の試験体は吹付けしたモルタルにより断面積が大きくなったため、曲げひび割れ発生荷重、せん断ひび割れ発生荷重が試験体 No.1 に比べて若干大きくなっている。なお、CFRP 格子筋により補強された試験体の終局荷重は補強方法の相違によりそれぞれ 138～286kN 増加した。鉄筋網により補強された試験体の終局荷重の増加分は、同程度のせん断面積を持つ CFRP 格子筋で補強された試験体 No.4 を上回る 439kN であった。

ブラストで表面処理した試験体 No.2, No.4 は終局荷重が 588kN, 631kN であり、ディスクサンダーで表面処理した試験体 No.3, No.5 の終局荷重 677kN, 736kN よりそれぞれ小さくなっている。これは、表-7 に示すように、試験体側面の粗さを示す中心線平均粗さ R_{ave} がディスクサンダーで処理した方 (0.198mm) がブラストで処理した方 (0.053mm) より 3 倍以上大きいことが影響したと考えられる。なお、ディスクサンダーによる値が大きくなったのは表面部のセメントペースト部が取り除かれ、微細気泡が露出したためである。以上のように、CFRP 格子筋による試験体のせん断補強は有効であることがわかる。

3.3 補強効率の評価

計算による載荷能力の増加分に対する実際の載荷能力の増加分の比を補強効率と定義した。CFRP 格子筋および鉄筋網により補強された各試験体の補強効率を式 (1) により評価した。

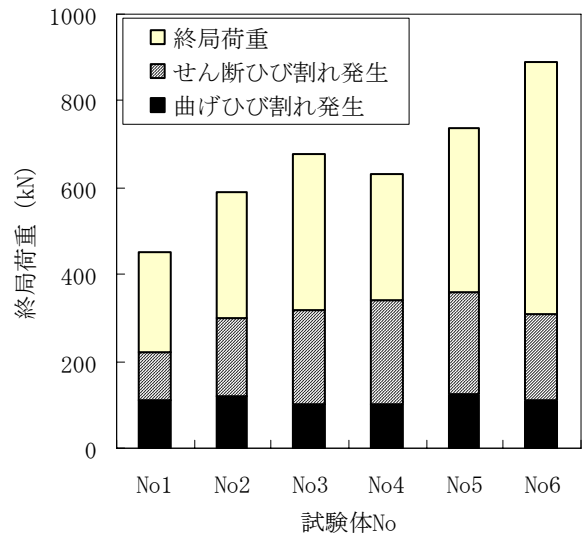


図-5 各試験体の終局荷重

$$\gamma = \frac{V'_{cs} - V'_{cs0}}{V_{cs} - V'_{cs0}} \times 100\% \quad (1)$$

ここに、

γ = 補強効率(%)

V_{cs} = 終局荷重の計算値(kN)

V'_{cs} = 終局荷重の測定値(kN)

V'_{cs0} = 基準試験体の終局荷重(kN)

試験体の曲げ破壊を防止するため、試験体の主鉄筋の鉄筋比を 4.78% とした。結果的に試験体 No.2～No.5 はせん断破壊を呈した。なお、試験体が圧縮破壊するならば、CFRP 格子筋のせん断補強効率が十分であることを意味するので、試験体 No.6 もせん断破壊の検討対象とした。したがって、本研究においては CFRP 格子の縦筋および鉄筋網の縦筋をスターラップ筋として計算した荷重を式-1 の補強後の試験体の終局荷重の計算値 V'_{cs} とした。

図-6 に補強した各試験体の補強効率 (黒い棒) を示す。なお、各試験体の単位長さ当りのせん断補強筋の面積が相違するため、各試験体の補強効率を直接比較するのは適切ではない。そこで比較係数 α を各試験体の補強効率に乗じて比較した。比較係数 α を式 (2) に示す。

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

$$\rho = A_{SV} / S$$

ここに、

α = 比較係数

ρ = 試験体単位長さ当りの補強筋の断面積(mm²/mm)
 ρ_0 = 比較する試験体中単位長さ当りの補強筋の断面積
 の最大値(mm²/mm)
 A_{sv} = 補強筋の断面積(mm²)
 S = 補強筋のピッチ(mm)

図-6 に補強した各試験体の比較係数を乗じた後の補強効率 (灰色棒) を示す。

図-7 に試験体 No.3 の破壊側格子筋の縦筋のひずみを示す。各試験体の CFRP 補強筋の縦筋のひずみを確認した結果、ひずみが一番大きい試験体 No.3 を含むすべての試験体の CFRP 縦筋の最大ひずみが降伏ひずみの半分以上であった。これは試験体が終局荷重時に CFRP 筋の補強効果が十分に活かされていないことを意味する。図-6 に示すように、格子筋の縦筋のピッチが大きい試験体 No.4, No.5 の補強効率は、ピッチが小さい、それぞれ試験体 No.2, No.3 とほとんど変わらないが、中心線平均粗さ R_{ave} が大きい試験体 No.3, No.5 の補強効率は、 R_{ave} が小さい、それぞれ試験体 No.2, No.4 より 20%大きくなっている。これは、CFRP 格子筋の補強効果において試験体の表面処理が大きな影響を及ぼしていると言える。なお、試験体 No.6 は中心線平均粗さ R_{ave} が試験体 No.2, No.4 と同じで、試験体 No.3, No.5 より小さいがその補強効率 (スターラップ筋の補強効果除去) は試験体 No.2, No.4 より補強効率が 25%、試験体 No.3, No.5 よりは 7%大きくなっている。これは、吹付けモルタの接着力と CFRP 格子の引張り強度のほかに試験体のせん断抵抗力を支配する要因が存在することを示唆している。

CFRP 格子筋により補強されたすべての試験体は、支点付近の吹付けモルタルの剥離により破壊している。図-8 にその一例を示す。斜めひび割れが支点付近まで進展すると、ひび割れと縦筋端部との距離が小さく、すなわち、格子縦筋の定着長が短くなり、格子筋の引抜き力を受け持っていたモルタルがコンクリートから剥離したと見られる。CFRP 格子の横筋はせん断効果が小さいため、次々と剥離を生じ、モルタルの剥離面積がある程度に達した時点で構造的安定を保てず試験体が破壊したと推測される。CFRP 格子と同じせん断面積を持つ鉄筋網で補強した試験体 No.6 は横筋の剛性が大きく、せん断抵抗力が CFRP 筋より大きいため図-6 に示すように補強効率が大きくなったと考えられる。すなわち、CFRP 格子筋部材端部での縦筋の定着と横筋のせん断力が試験体のせん断耐力を左右する可能性があることが明らかとなった。試験体が破壊されるメカニズムおよび支点付近の CFRP 筋が引き抜けないようにすることが今後の課題になると考えられる。

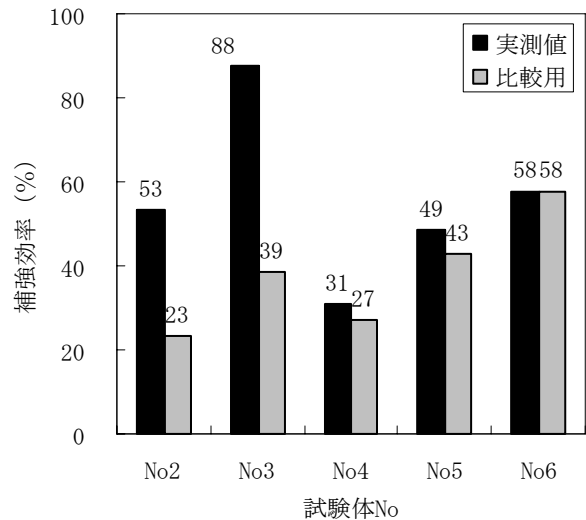


図-6 各試験体の補強効率

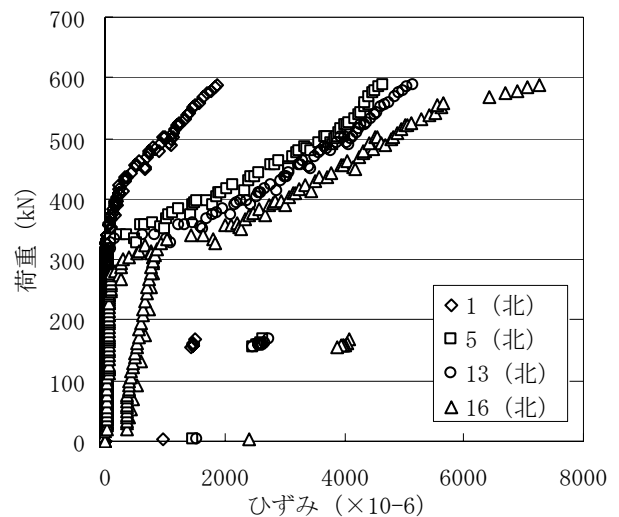


図-7 試験体 No.3 の破壊側格子筋縦方向ひずみ



図-8 支点付近の剥離状況

6. まとめ

CFRP 格子筋と PCM を用いた補修・補強工法を梁部材のせん断補強に適用した場合の耐荷挙動について検討した。その結果、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 適切に界面の処理を行うことで、CFRP 格子筋と PCM を用いた補修・補強工法が梁のせん断補強に効果が期待できる。
- (2) 部材端部での縦筋の定着がせん断耐力を左右する可能性がある。
- (3) 格子の横筋の剛性を高め、せん断能力を上げることで CFRP 格子筋と PCM を用いた補修・補強工法のせん断補強効率を上げられる可能性がある。

参考文献

- 1) 小林朗, 佐藤靖彦, 阿部篤史:埋込型 FRP 格子筋の付着特性はり部材のせん断補強効率, コンクリートの補修・補強アップグレード論文報告書, 第4巻, pp.401-408, 2004.10
- 2) 笠倉亮太, 宇治公隆, 梁俊, 佐藤貢一:CFRP 格子筋と吹付けモルタルを用いて補強した RC 梁のせん

断耐荷特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No..2, pp.853-858, 2007.7

- 3) 宇治公隆, 笠倉亮太, 佐藤貢一, 小林朗:炭素繊維格子筋と吹付けモルタルにより補強した RC 部材の耐荷特性, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.111-112, 2005
- 4) 大池幸史, 宇治公隆, 國府勝郎, 笠倉亮太:既設コンクリート部材における CFRP 格子筋せん断耐荷重挙動, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.57-58, 2006
- 5) 槇谷貴光, 香取慶一, 林静雄:コンクリートの打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17,N0.2, pp.171-176, 1995