論文　CFRP グリッドを RC 部材に接触配置し PCM で増厚した補強部界面の応力伝達機構

郭　瑞[*1]・日野　伸一[*2]・谷口　硯士[*3]・山口　浩平[*4]

要旨：既設コンクリート構造物の補強工法の一つとして，既設コンクリート部材の表面に炭素繊維補強グリッド（以下，CFRP グリッド）を設置し，ポリマーセメントモルタル（以下，PCM）吹付けにより一体化する増厚工法が広く用いられている。本研究では，先に著者らが提案した付着試験方法を用いて，格子筋間隔が 3 種類の CFRP グリッドに対して平板型面内 CFRP グリッド付着強度試験を行い，CFRP グリッドと PCM ・既設コンクリート相互の付着特性および応力伝達機構を検討した。併せて，3 次元 FEM 解析により，試験結果のシミュレーションを行い，付着応力伝達機構について検討した。

キーワード：CFRP グリッド，PCM 吹付け，応力伝達機構，付着特性，FEM 解析

1. はじめに

既設 RC 部材の耐震補強の従来工法として RC 巻立て工法, 鋼板巻立て工法, 連続繊維巻立て工法などがある. 施工上の制約がない場合は RC 巻立て工法が一般的に用いられるが，補強筋の腐食防止対策が必要なため，かぶり厚は 250mm 程度が一般的であり，断面の阻害率が相対的に大きい。これらのことを考えて，従来の鉄筋に替えて，**図－1** に示すように定着が容易で耐腐食性が良好である炭素繊維グリッド（以下，CFRP グリッド）を RC 部材に接触配置しポリマーセメントモルタル（以下，PCM）吹付けによる補強工法（PCM 吹付け工法:**図－2**[1)]）が開発されてきた[2)]。

これまでに著者らは, CFRP グリッドを用いた PCM 吹付けによる既設 RC 橋脚の耐震補強工法を提案し，本工法による曲げ，せん断およびじん性補強効果を確認するため，CFRP グリッドを補強した場合の補強部界面の付着特性や必要定着長および CFRP グリッドで補強したはり部材の補強効果について検討した[3),4),5)]。

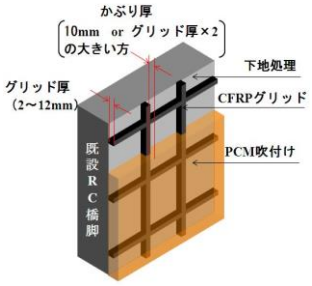
本研究では，先の一連の CFRP グリッドの検討事項を踏まえ，新たな試験体を作製し既設コンクリート，CFRP グリッドおよび PCM の付着挙動について検討し，格子筋間隔の違いや縦筋の有無による挙動の変化，CFRP グリッド間の応力伝達機構を究明することを目的とした。なお，この試験は 2 シリーズに分かれており，縦筋を有さない試験体シリーズ（FP50N，FP75N，FP100N）および縦筋を有する試験体シリーズ（FP50VH，FP50VL，FP75VH，FP100VH）の載荷試験を実施した。また，実験結果をシミュレートし，CFRP グリッドの付着特性を明らかにするため，CFRP グリッドーPCM 接触面の Bond-Slip 構成則を導入した FEM 解析を用いて検討した。

2. 平板型面内付着強度試験および解析概要

2.1 試験体および使用材料

試験体の種類を**表－1**に示す。試験体は格点数，筋間隔，縦筋有無をパラメータとした7種類(各3体）とし，増厚材には高強度PCMおよび低弾性PCMを使用した。また補強筋は全てCFRPグリッド（CR-5）を用いた。格子筋間隔を規格品である50mm，75mmおよび100mmとした。試験体形状を**図－3**, 試験体の格点部詳細を**図－4**に示す。また，CFRPグリッドの応力伝達機構を明確にする目的として，ひずみゲージを貼付けた。ひずみゲージ貼付箇所も**図－4**に示す。試験体の作製にあたっては，まず既設コンクリートを作製し, コンクリート材齢1週において表面をバキュームブラストで処理した。ブラスト材にはアルミナを使用し，投射密度は30N/mm^{2}とし，5min/m^{2}を目安に行った。その後，コンクリート材齢4週においてCFRPグリッドを設置し，プライマーを塗布しPCMのコテ塗を行った。

図－1　CFRP グリッド

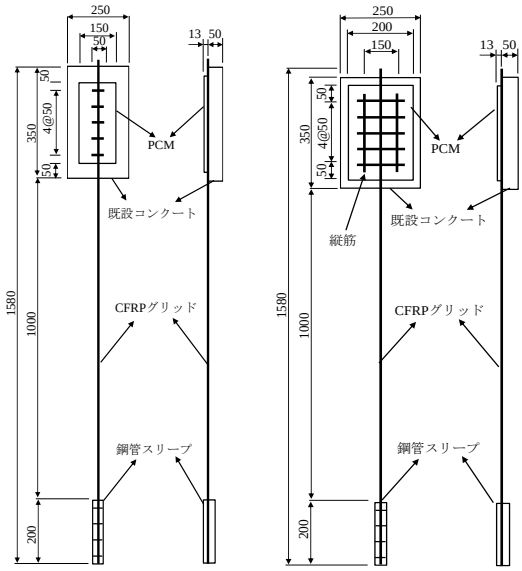


図－2 PCM 吹付け工法の補強概略図[1)]

*1 九州大学大学院　工学府都市環境システム専攻　博士後期課程　(学生会員)
*2 九州大学大学院　工学研究院社会基盤部門　教授　工博　(正会員)
*3 (株)新日鉄住金マテリアルズ　コンポジット社　(非会員)
*4（一財）橋梁調査会　博(工)　九州支部　(正会員)

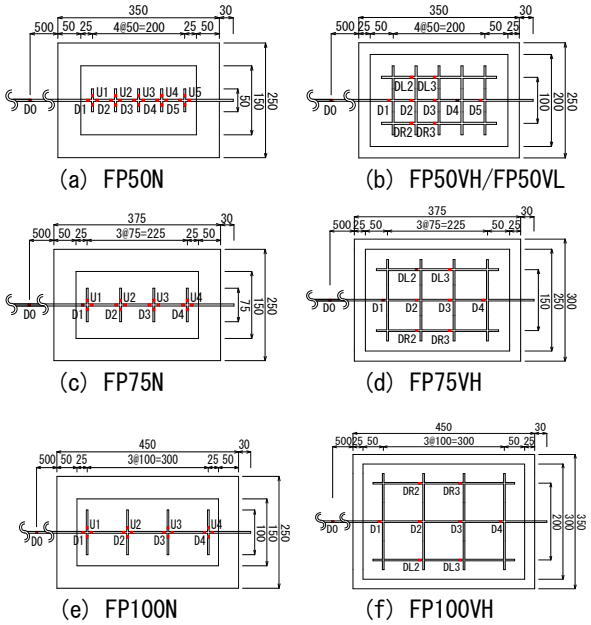
表－1　試験体種類

タイプ	グリッド			PCM 種類
	格点数	筋間隔 (mm)	縦筋有無	
FP50N	5	50	無	高強度
FP50VH			有	
FP50VL				低弾性
FP75N	4	75	無	高強度
FP75VH			有	
FP100N		100	無	
FP100VH			有	



(a) 縦筋無 (FP50N)　(b) 縦筋有 (FP50VH)

図－3　試験体形状



図－4　格点部詳細およびひずみゲージ貼付け位置

なお，本研究ではコンクリートとCFRPグリッドおよびPCMとの付着機構を検討するため，グリッドの設置には固定用のアンカーを設置しなかった。また，FP50N，FP75N，FP100NはCFRPグリッドの縦筋1本，FP50VH，FP50VL，FP75VH，FP100VHはCFRPグリッドが縦筋を有することによる横筋の拘束効果確認のためグリッドの縦筋3本とし，それぞれ4または5格点定着させ，横筋長さは筋間隔と同一とした。PCMの幅はFP50N，FP75N，FP100Nでグリッド横筋最外縁から50mm，FP50VH，FP50VL，FP75VH，FP100VHで25mmとした。また，コンクリート，PCM，CFRPグリッドの材料特性値を**表－2**に示す。

2.2 試験方法

試験方法は1000kN万能試験機を用い，試験体のCFRPグリッド突出部に設置した変位計より得られた各荷重段階におけるCFRPグリッドのすべり量を，CFRPグリッドに貼付けたひずみゲージより得られた各荷重段階におけるひずみ量を記録した。試験方法は終局まで単調載荷とし，荷重は衝撃を与えないよう，一様な速度で加えた。また，**図－5**に示すように，偏心載荷にならないように試験体の反対側に同一のコンクリートブロックを抱き合

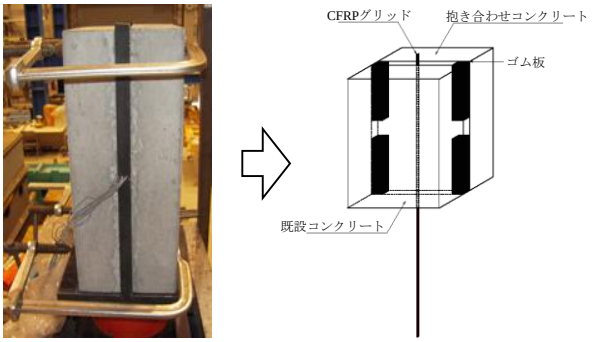
表－2　材料特性値

(a) コンクリートおよびPCM（実測値）

タイプ	圧縮強度 (N/mm^2)		ヤング係数 ($\times10^4 N/mm^2$)	
	コンクリート	PCM	コンクリート	PCM
FP50N	44.0	68.2	3.20	2.70
FP50VH		63.5		2.82
FP50VL		39.4		1.18
FP75N	44.0	68.2	3.20	2.70
FP75VH	37.1	63.5	2.69	2.82
FP100N	44.0	68.2	3.20	2.70
FP100VH	37.1	63.5	2.69	2.82

(b) CFRPグリッド（設計値）

規格	断面積 (mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times10^5 N/mm^2$)	最大ひずみ(μ)
CR-5	13.2	1400	1.00	14000



図－5　試験体設置方法

わせ，緩衝ゴムを設置することにより試験体とコンクリートブロックとの接触を防いだ。

2.3 解析概要

(1) 要素分割および境界条件

図－6に解析に用いた解析モデルの一例を示す。本解析には，汎用数値解析ソフトであるDianaを用いて，3次元非線形解析を行った。解析モデルは1/1モデルである。コンクリートおよびPCMは四角柱ソリッド要素，CFRPグリッドもソリッド要素を用いてモデル化を行った。また，CFRPグリッドとPCMの間にインターフェース要素を用いた。

解析は載荷点部の節点にY方向強制変位20mmを与えることにより実施した。収束計算にはNewton-Raphson法を採用し，収束判定条件としてはエネルギーノルムを0.5%と設定した。なお，収束条件を満足しない場合（最大反復数10回）には収束計算を打ち切り，次の解析ステップへ不釣合い力を持ち越す方法を採用した。境界条件は，支点部の節点にY方向変位成分を拘束した。

(2) 材料構成則

図－7，8にコンクリートおよびPCM，CFRPグリッドの構成則を示す。コンクリートおよびPCMの圧縮側は強度試験から得られた圧縮強度を用い，コンクリート標準示方書[7]に基づいて定式化した。また，降伏の判定にはvon Misesの降伏条件を用いている[8), 9)]。一方，引張側に関しては，コンクリート標準示方書[7]による引張軟化曲線を適用した。CFRPグリッドには**図－8**に示すような引張強度に達した後に，ひずみが増大することなく応力がゼロになるモデルを適用した。降伏強度に達したら応力およびひずみがゼロになるvon Misesモデルとした。また，CFRPグリッドとPCMの間にBond-Slipモデルによるインターフェース要素を用いた。

(3) 接触面要素に適用した付着応力－相対変位関係

本研究では，接触面に Bond-Slip モデルを適用している。これは，別途実施された付着強度試験 [10), 11)]より，CFRP グリッドとコンクリート間の付着応力－相対変位関係（τ－δ 関係）導出方法を適用することで，CFRP グリッドの表面のひずみ分布より $\tau-\delta$ 関係を導出した。位置 x における付着応力 $\tau_f(x)$は，CFRP グリッドのひずみ分布の勾配を用いて，式(1)より求めた 。

$$\tau_f(x) = t_{CFRP}(x)\frac{d\sigma_{CFRP}(x)}{dx} = t_{CFRP}(x)\cdot E_{CFRP}\frac{d\varepsilon_{CFRP}(x)}{dx} \qquad (1)$$

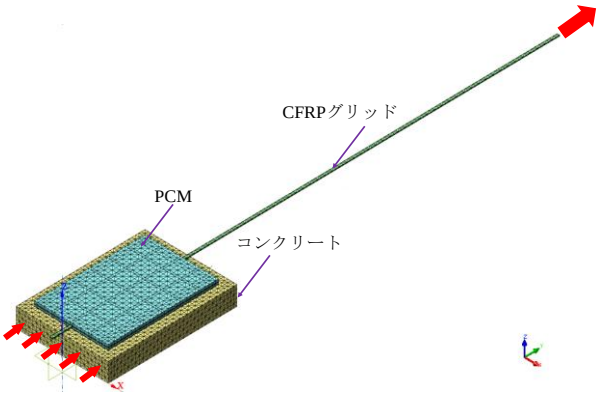
ここで，

$\sigma_{CFRP}(x)$：位置xにおけるCFRPの引張応力(N/mm^2)

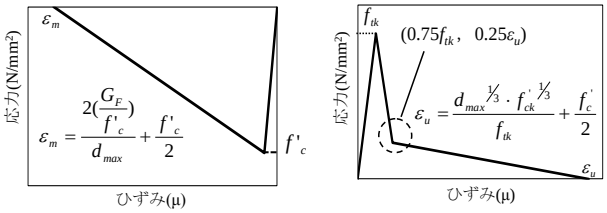
$t_{CFRP}(x)$：位置xにおけるCFRPの厚さ(mm)

E_{CFRP}：CFRPの弾性係数(N/mm^2)

$\varepsilon_{CFRP}(x)$：位置xにおけるCFRPのひずみ



図－6　解析モデル（FP50VH）



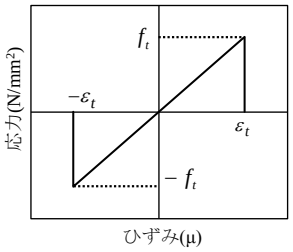
ここで，

f'_c：圧縮強度の特性値(N/mm^2)，　f_{tk}：引張強度の特性値(N/mm^2)

d_{max}：粗骨材の最大寸法(mm)，G_F：破壊エネルギー(N/m)

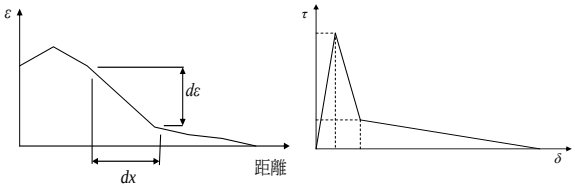
(a) 圧縮側　　(b) 引張側

図－7　コンクリートおよび PCM の構成則



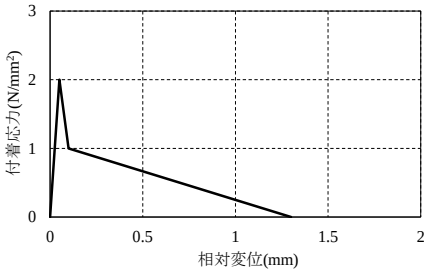
ここで，f_y：降伏強度(N/mm^2)，　f_t：引張強度(N/mm^2)

図－8　CFRPグリッドの構成則



(a) 付着応力算出方法　　(b) τ－δ 関係

図－9　τ－δ 関係算出方法



図－10　算出したBond-Slipモデルの構成則

また，位置xにおける相対変位$\delta(x)$はCFRP端部から位置xまでのひずみ分布を積分し，式(2)より求めた。

$$\delta(x) = \int_0^x \varepsilon_{CFRP}(x)dx \qquad (2)$$

τ－δ 関係算出方法を**図－9** に示す。ひずみ分布は，ひずみゲージによる計測値を直線で近似している。従って，付着応力はその直線の傾き（**図－9(a)**），相対変位は直線下の面積から得られる。そして，2 つの隣り合うゲージ貼付け位置の中央の位置で τ－δ 関係（**図－9(b)**）が得られる。本研究では，3 箇所のうち平均的な挙動を示した 1 箇所より得られた値をその試験体の τ－δ 関係として採用した。また，試験結果より算出した τ－δ 関係が付着応力および相対変位を低下点途中までしか算出できない場合は τ－δ 関係の直線化の面積が界面剥離破壊エネルギーとなることから，試験より得られた界面剥離破壊エネルギーと同一になるように推定した。**図－10** に上記の算出方法で得た τ－δ 関係および本解析で使用した τ－δ 関係を示す。

3. 結果および考察

3.1 荷重と変位の関係

試験および解析結果を**表－3** に示す。全ての試験体とも，PCM に埋め込まれていない箇所の CFRP グリッドの破面であった。また，荷重と変位の関係を**図－11** に示す。**図－11(a)** より，PCM の種類に関わらず縦筋を有する FP50VH，FP50VL 試験体の荷重と変位の関係は両者で類似した挙動を示しており，終局荷重作用時の CFRP グリッドの許容引張応力度（設計引張強度の 2/3）付近で変位が増大した。また，FP75VH 試験体の変位が 1.0mm～1.5mm の間でグラフの傾きが急激に増加していることより，その時点で CFRP グリッドの格点が直交性を喪失しながらも，最終的に CFRP ロッドは埋め込み部ではなく直線部で破断したことが確認された。

図－11(b) より，FP100N，FP100VH 試験体の解析により設計引張強度の 1/3（6.0kN）の荷重まで，荷重と変位の関係に大きな差異は見られなかった。これは，格子筋間隔が増大するに伴い，1 格点目が荷重を大きく負担していることに起因すると考えられる。また，解析において縦筋を有する試験体は縦筋を有さない試験体に比べグラフの傾きが急になり剛性が高い傾向にある結果となったが，格子筋間隔の違いによる剛性の変化は見られなかった。

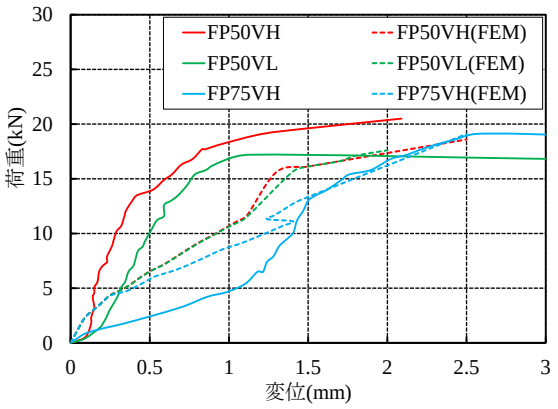
3.2 応力伝達機構

(1) 格点数とひずみの関係

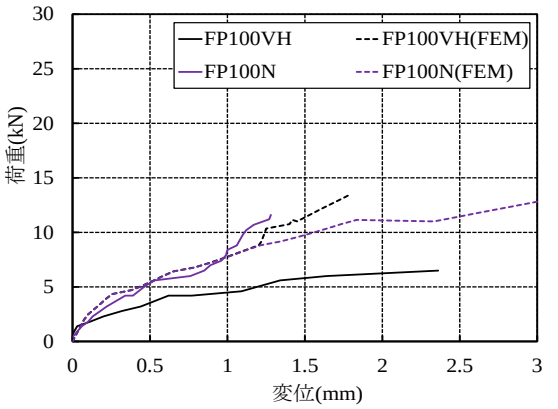
図－12 に設計引張強度の 2/3（12.0kN）の荷重が生じる際の CFRP グリッドの縦筋のひずみ分布を示す。ひず

表－3　試験および解析結果

TYPE	最大荷重 平均(kN)		最大ひずみ 平均(μ)		破壊性状
	試験	FEM	試験	FEM	
FP50VH	21.9	18.5	16277	13850	母材破断
FP50VL	17.7	17.5	11991	12841	母材破断
FP75VH	19.1	18.5	14615	13050	母材破断
FP100VH	17.0	15.2	12025	11380	母材破断
FP100N	15.6	13.1	14313	12090	母材破断



(a) FP50VH，FP50VL，FP75VH



(b) FP100VH，FP100N

図－11　荷重－変位関係

み分布は**図－4**に示すD0をひずみ測定位置0格点と定義し，順次D1～D4orD5位置のひずみ値をグラフ上にプロットした。

図－12より，格点数の増加に伴いひずみ値が減少して，格点数毎にCFRPグリッドに引張力が伝達していることが確認できた。このことより，応力伝達範囲はグリッドに作用する引張力がPCM を介してCFRPグリッドからPCMを介して既設コンクリートに引張力が伝達していることが明らかとなった。

試験結果では，終局荷重作用時(12.0kN)において，FP50VH試験体は最終格点でひずみがほぼゼロとなった。しかし，FP50VL試験体は最終格点においてもひずみが1000～2000μ程度であった。これは，母材破断と同時にPCMの剥離に至ったFP50VL試験体は，追従性の良い低弾性PCMを増厚材に使用したことに起因しており，CFRPグリッドからPCMに伝達された引張力が，既設コンクリート界面の付着応力に達したことによる破壊であると考えられる。

一方，数値解析では，試験結果と比較してほぼ線形挙動となる。また，**図－12**(b)より，縦筋を有するFP100VH試験体は縦筋無しFP100N試験体と比較して，端部から2格点目までひずみが急激に増加していることより，縦筋を有する試験体の方が付着応力を次格点に多く伝達していることが示唆される。

(2) 分担率

全体のひずみ値から各格点部が負担しているひずみ値を除した割合をひずみエネルギー分担率と定義した。**図－13** にひずみエネルギーによる分担率，分担率の算出方法を式(3)，式(4)に示す。

$$S = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{4or5} A_i} \times 100 \tag{3}$$

$$A_i = \frac{1}{2} \times (D_{i-1} + D_i) \times h_i \tag{4}$$

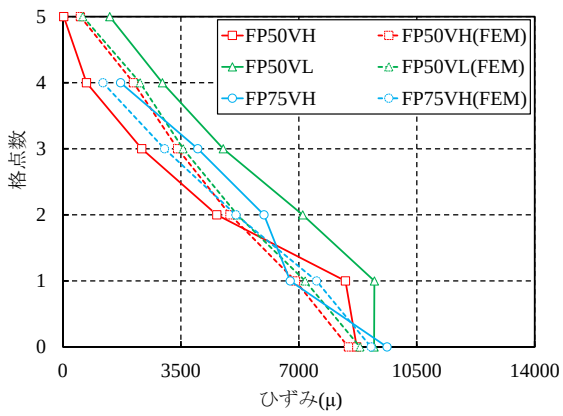
ここで，

S：分担率(%)

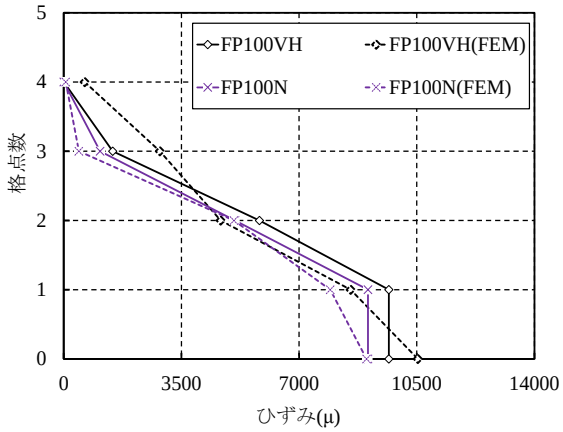
h_i：格子筋間隔(mm)

Di：計測点におけるひずみ値(μ)

図－14 より設計引張強度の 2/3（12.0kN）の荷重が生じる際の FP100N，FP100VH 試験体の 1 格点目の分担率は 67%，43% （解析値：65%，44%）となり，縦筋を有する FP100VH 試験体の方が 1 格点目の分担率が縦筋無し FP100N 試験体より小さく，それにともない 2 格点目以降の分担率が大きくなる傾向にある結果となった。また，FP50VH，FP75VH，FP100VH 試験体の 1 格点目の分

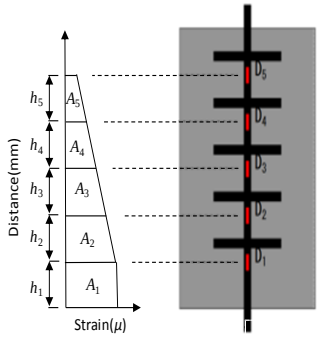


（a）FP50VH，FP50VL，FP75VH

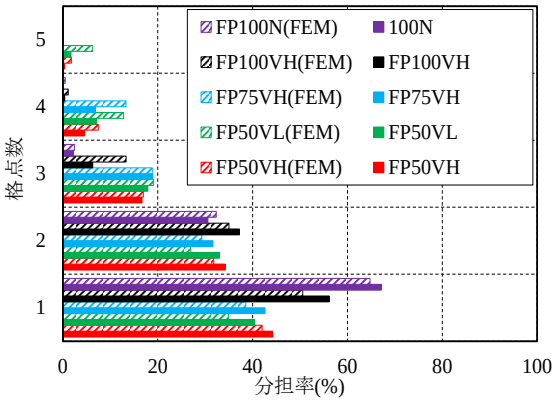


（b）FP100VH，FP100N

図－12　格点数－ひずみ関係（P=12.0kN）



図－13　ひずみエネルギーによる分担率



図－14 終局荷重作用時（P=12.0kN）の分担率

担率は, 44%, 40%, 43%および 56%（解析値 : 42%, 35%, 39%および 51%）となり，各試験体では差異が見られない。なお, FP100VH 試験体の分担率は増加しているため, 縦筋を有する試験体においても，格子筋間隔が大きくなるにつれて分担率も増大する傾向となった。

4. まとめ

本研究では，PCM 吹付け工法の補強筋と PCM との付着特性に着目して，実施工で標準的に用いられる CFRP グリッド（CR-5）を用いて新規の付着強度試験を実施した。得られた知見は以下のとおりである。

(1) 荷重と変位の関係より，縦筋を有さない試験体は引抜けによる破壊と破断による破壊の両者が進行した挙動を示す傾向が多い結果となる。

(2) 数値解析による荷重と変位の関係より，縦筋を有する試験体は縦筋を有しない試験体に比べ付着剛性が高い傾向になる結果となった。しかし, 両者とも格子筋間隔の違いによる剛性の変化は見られなかった。

(3) 縦筋を有する試験体においても，格子筋間隔が大きくなるにつれて分担率も増大する傾向となった。

(4) 全てのタイプで 1 格点目，2 格点目と順番にひずみ値が減少し，格点数毎に CFRP グリッドに引張力が伝達していることが確認できる。

参考文献

1) 杣山功樹，山口浩平，中村智，日野伸一:CFRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による補強部界面の応力伝達機構および既設 RC 橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1042-1051，2011

2) 宮野暢紘， 山口 浩平， 谷口硯士， 日野 伸一:PCM 吹付けによる CFRP グリッドを用いた RC はりのせん断補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2，pp.1423-1428，2013

3) 中村智，山口浩平，Amiruddin Arwin，谷口硯士:PCM 吹付け工法による 2 層接触配置された CFRP グリッドを用いた RC はりの曲げ補強効果，Vol.31，No.2，pp.1429-1434，2009

4) 中村智，Amiruddin Arwin，渡邉弘史，谷口硯士，日野伸一，山口浩平 : CFRP グリッドを用いた PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁シンポジウム論文報告集，pp.51-58，2009

5) 中村智，日野伸一，山口浩平，佐藤貢一 : PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の段落とし部の耐震補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.30，No.3，pp.1171-1176，2008

6) 九州大学，RC 構造物のポリマーセメントモルタル吹付け補修・補強工法協会 : PCM 吹付け工法による既設 RC 橋脚の耐震補強実験報告書，2007

7) 土木学会 : コンクリート標準示方書［設計編］, 2013.3

8) THORENFELDT, E., TOMASZEWICZ, A., JENSEN, J. J: Mechanical Properties of High-Strength Concrete and Applications in Design. Proc. Symp. Utilization of High-Strength Concrete (Stavanger, Norway) (Trondheim, 1987)

9) FEENSTRA, P. H: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology (1993)

10) 金久保利之，中場和正，吉田智基，吉澤弘之：連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力ーすべり関係の提案，コンクリート工学論文集，Vol.12，No.1，pp.33-43，2001

11) 上田多門，三井雅一，上原子昌久：コンクリート構造物の補強技術研究委員会報告，コンクリート工学論文集，Vol.25，No.1，2003