

# 論文 ハンチを有するRCはりを対象としたPCM吹付けによるCFRPグリッドのせん断補強効果

原田 樹菜<sup>\*1</sup>・宮野 暢紘<sup>\*2</sup>・山口 浩平<sup>\*3</sup>・郭 瑞<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、樋門の函体に対する耐震補強工法の1つとしてPCM吹付けによるCFRPグリッドを用いた工法を想定し、ハンチを有するRC部材である隔壁の面内のせん断補強効果を検討した。その際のCFRPグリッドの定着領域はハンチとし、CFRPグリッドの補強量をパラメータとして検討した。その結果、有効ひずみによる算定方法により、CFRPグリッドで補強した全ての供試体のせん断耐力が設計値を上回り、せん断補強効果が明らかになった。また、CFRPグリッドの断面積が小さい方がはりの変形への追従性が良いため、CFRPグリッドの実際のひずみも大きく、有効ひずみの算定方法と合致することがわかった。

**キーワード:** CFRPグリッド, PCM吹付け, 耐震補強, せん断補強, 面外定着

## 1. はじめに

地震発生時、地震動は地下深部から地上に伝わり、表層地盤内の増幅作用によって地下から地上に伝わるにつれて大きくなる。そのため、地下構造物は地上構造物よりも安全とされていた。しかし、1995年の兵庫県南部地震では、地下構造物がせん断破壊した被害例が見られ、特に古い設計基準に基づき設計・施工されたRC構造物においてせん断破壊が先行した被害が多いことが報告されている。これ以降、設計基準の見直しが行われ曲げ破壊先行型の設計を行うことが規定されたが、先の東日本大震災でも設計基準改訂以前に設計された地下構造物は多くの被害を受けており、このようなRC構造物のせん断補強は急務である。

著者らはこれまでに地下構造物の中でも樋門構造物(写真-1)を対象とし、CFRPグリッド(写真-2)とポリマーセメントモルタル(以下、PCM)を用いたせん断補強工法の開発を行ってきた<sup>2)</sup>。この工法は、CFRPグリッドをRC部材に接触配置しPCMを吹付けて補強する工法である。また、CFRPグリッドは筋1本当りの断面積により分類され、現在CR-4(断面積6.6mm<sup>2</sup>)からCR-16(断面積100mm<sup>2</sup>)までと、使用用途や補強量に応

じて使い分けられている。

これまでの研究では、RCはりの腹部のみを定着した同一平面内の定着とハンチを定着領域とした面外定着の比較検討を行った<sup>3)</sup>。同一平面内の定着と面外定着とも、CFRPグリッドは既設部のせん断補強筋と一体となってせん断力に抵抗しており、せん断補強効果が確認された。特に腹部およびハンチを定着領域とした面外定着は、同一平面内である腹部のみの定着に比べて、既設部と補強部の一体性が良好で、十分な補強効果が得られた。一方、CFRPグリッドの定着は既往研究<sup>4)</sup>より3格点以上必要とされているが、著者らの研究<sup>3)</sup>では供試体のサイズの都合上、ハンチにおいて2格点しか確保できておらず、面外定着の応力伝達メカニズムは未解明である。また、CFRPグリッドの補強量に応じたせん断耐力の算定方法も確立されていない。

そこで本研究では、CFRPグリッドの定着領域をハンチまでとしハンチで3格点以上確保して、CFRPグリッドの補強によるせん断補強効果を検討した。既往研究と同様に図-1に示す樋門構造物(函体)を切り出したせん断



写真-1 樋門構造物<sup>1)</sup>



写真-2 CFRPグリッド(成形品)

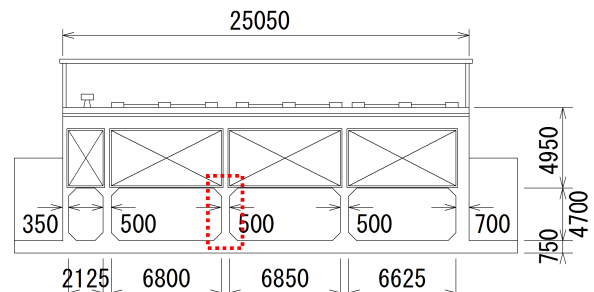


図-1 樋門構造物の断面図(一例)

\*1 (株)SNC 補修事業部 (正会員)

\*2 (株)SNC 補修事業部 博(工) (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 助教 博(工) (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学府都市環境工学システム専攻 (学生会員)

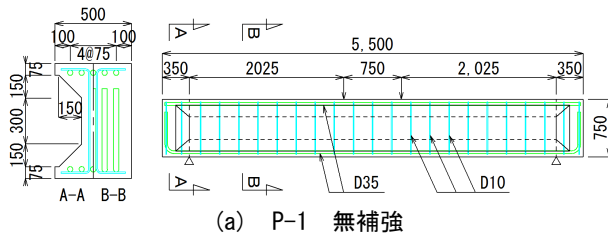
破壊先行型の RC はりを作成し、これに腹部およびハンチに添わせるよう成型した同一平面形状ではない CFRP グリッド (写真-2) を配置し、PCM にて吹付けを施し荷重試験を実施した。本実験では、CFRP グリッドの格子間隔を一定とし、CFRP グリッドの断面積の変化による補強量の違いによるせん断補強効果について検討した。

## 2. 実験概要

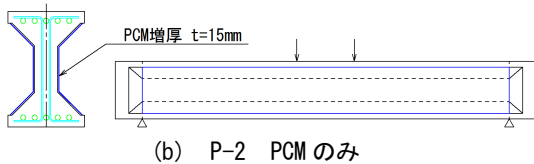
### 2.1 供試体

供試体は既設樋門の隔壁を模した RC はりとし、断面寸法(高さ×幅)750mm×500mm、スパン長 5500mm とした I 桁であり、有効高さ  $d=750\text{mm}$ 、せん断スパン  $a=2025\text{mm}$ 、せん断スパン比  $a/d=2.7$  とした。

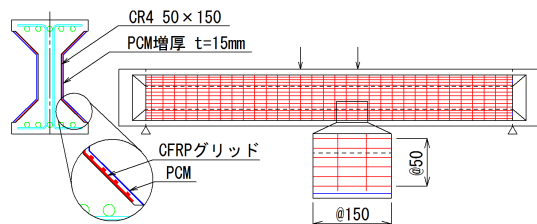
なお、せん断補強筋の鉄筋比は実構造物と同程度であるが、せん断破壊先行型とするため曲げ補強筋量は実構造物よりも多く配筋した。供試体は、無補強供試体と CFRP グリッドと PCM で補強した供試体に加え、増厚した



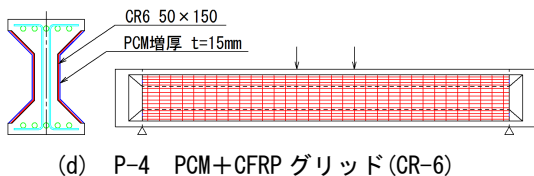
(a) P-1 無補強



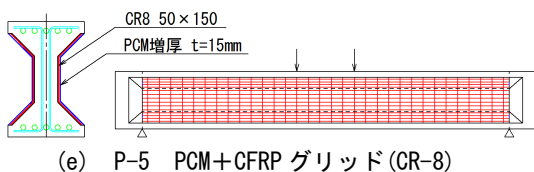
(b) P-2 PCM のみ



(c) P-3 PCM+CFRP グリッド (CR-4)



(d) P-4 PCM+CFRP グリッド (CR-6)



(e) P-5 PCM+CFRP グリッド (CR-8)

図-2 供試体概略図

PCM 単体ではせん断力に抵抗していないことを確認するために CFRP グリッドを配置しない PCM のみで補強した供試体も作製した。図-2 に供試体の形状、配筋、CFRP グリッドによるせん断補強の概略図を示す。P-1 は無補強、P-2 は腹部およびハンチを PCM で補強、P-3、P-4、P-5 は腹部およびハンチを PCM とそれぞれ CFRP グリッド CR-4、CR-6、CR-8 で補強し、計 5 種類を 1 体ずつ作製した。P-3~P-5 についての CFRP グリッドの格子間隔を一定として CFRP グリッドの補強量をパラメータとした。同一平面内の定着は既往研究<sup>4)</sup>で 3 格点必要とされており、本実験ではハンチのサイズを実構造物の 1/1 スケールとして、ハンチに 4 格点の定着を確保した。

### 2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(OPC、密度：3.14g/cm<sup>3</sup>)、細骨材は海砂(密度：2.59g/m<sup>3</sup>)を使用した。混和材は AE 減水剤を用いた。コンクリートの配合は、設計基準強度を 21N/mm<sup>2</sup> とし、水結合材比を 63%、細骨材率を 45.8% とした。示方配合を表-1 に示す。荷重試験当日に各種強度試験を実施し、その結果を表-2 に示す。吹付け用の PCM には、高強度タイプを用い、吸水防止剤としてのプライマーには、アクリル系エマルジョンを使用した。また、鉄筋は軸方向鉄筋に SD345 D35、せん断補強筋に SD295 D10 を使用した。鉄筋の材料特性値を表-3 に示す。CFRP グリッドには、腹部およびハンチに添わせるように U 型に形成された CR-4、CR-6、CR-8 の 3 種類を使用した。CFRP グリッドの格子間隔は 3 種類とも一定であり、腹部およびハンチともに横筋の格子間隔を 150mm、縦筋の格子間隔を 50mm とした。その材料特性値を表-4 に示す。

表-1 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ad*
20	63	45.8	170	270	578	250	747	308	270

\*Ad : AE 減水剤

表-2 コンクリート、PCM の材料特性値

供試体種類	材料	規格	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
無補強 PCMのみ	コンクリート	設計	21.0	3.20	-	2.35 × 10 <sup>4</sup>
		実測	23.9	3.43	2.07	2.35 × 10 <sup>4</sup>
	PCM	設計	69.9	9.00	3.16	2.70 × 10 <sup>4</sup>
		実測	54.3	9.40	-	2.45 × 10 <sup>4</sup>
補強	コンクリート	設計	21.0	3.20	-	2.35 × 10 <sup>4</sup>
		実測	24.5	3.71	2.09	2.50 × 10 <sup>4</sup>
	PCM	設計	69.9	9.00	3.16	2.70 × 10 <sup>4</sup>
		実測	51.9	7.40	-	2.45 × 10 <sup>4</sup>

### 2.3 供試体作製手順

写真-3に供試体の作製フローを示す。供試体の作製にあたっては、まずボックスカルバートの隔壁を模擬したハンチを有する既設コンクリートを作製した。軸方向鉄筋にSD345 D35を用い、帯鉄筋にSD295 D10を250mmピッチで配筋し、型枠を組み、コンクリート打設した。コンクリートの設計基準強度を $f_c=21\text{N/mm}^2$ とし、設計基準強度に達した時点で載荷試験を実施することとした。次に実施工と同様に、コンクリート表面の脆弱部や油脂などの汚れを除去しPCMの付着力を確保するため、ブラストにより下地処理を行った。その後、既設部表面にCFRPグリッドを接触配置し、リベットアンカーによっ

表-3 鉄筋の材料特性値

鉄筋径	部材	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
D35	主鉄筋 (既設部)	381	549	$2.0 \times 10^5$
D10	せん断補強筋 (既設部)	397	523	

表-4 CFRP グリッドの材料特性値 (公称値)

筋番	部材	1本当り 断面積 ( $\text{mm}^2$ )	許容引張 応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
CR-4	補強部	6.6	400	1400	$1.0 \times 10^5$
CR-6		17.5			
CR-8		26.4			



(a) 生コン打設

(b) 既設コンクリート



(c) バキュームブラスト

(d) グリッド設置



(e) プライマー塗布

(f) PCM吹付け

写真-3 供試体作製状況

て仮固定した。なお、リベットアンカーは、FRPグリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工マニュアル(案)<sup>5)</sup>より、 $10\text{本/m}^2$ 以上とした。PCM吹付けの前にドライアウト防止のためプライマーを塗布し、高強度PCMを $t=15\text{mm}$ 吹付けた。最後に、被膜養生剤を塗布して養生をした。

### 2.4 試験方法

載荷は両端単純支持として、せん断スパン  $a=2025\text{mm}$  の2点載荷とし、一樣な速度で載荷した。また、変位計を中央下端に3点と支点の鉛直および水平方向にそれぞれ1点設置した。さらに、ひずみゲージは、スパン中央の既設部の圧縮側および引張側の主鉄筋に設置した。また、せん断補強効果を確認するために、せん断区間のせん断補強筋およびCFRPグリッドにそれぞれ設置した。変位計の取付け位置を図-3、せん断補強筋に設置したひずみゲージの位置を図-4、CFRPグリッドに設置したひずみゲージの位置を図-5に示す。

### 3. 試験結果

#### 3.1 変形性状

破壊形態は、全供試体ともせん断破壊しており、せん断破壊形式は斜め引張破壊であった。また、全ての補強した供試体は、ひび割れ発生後からコンクリートとPCMの界面での剥離が確認された。特にPCMのみで補強し

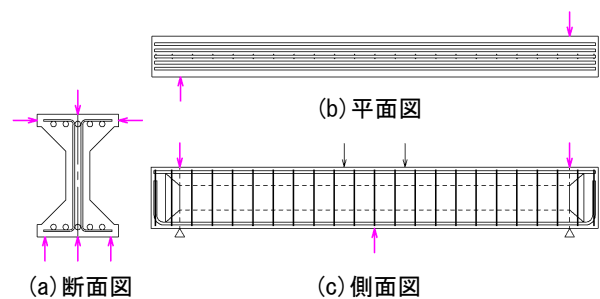


図-3 変位計取付け位置

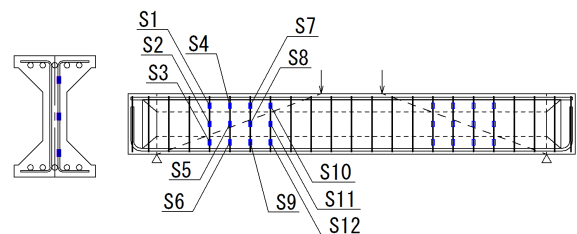


図-4 せん断補強筋ひずみゲージ取付け位置

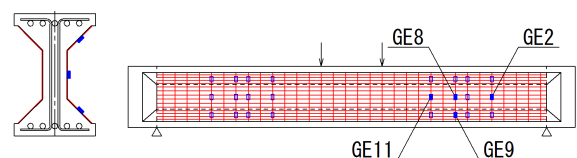


図-5 CFRPグリッドひずみゲージ取付け位置

た P-2 は荷重を始めて早い段階で支点付近の下ハンチに剥離が確認された。荷重—スパン中央たわみ関係を図-6 に示す。無補強 P-1 と PCM のみの P-2 の最大荷重は同程度で、PCM によるせん断耐力への寄与はほとんどないことがわかる。一方、CFRP グリッドと PCM で補強した供試体は、P-1、P-2 に比べて、最大荷重が 3~4 割程度増加している。また、CFRP グリッドで補強した供試体の中でも CR-4 で補強した P-3 に比べて、CR-6、CR-8 で補強した P-4、P-5 の最大荷重は、7%程度向上している。

荷重—スパン中央の主鉄筋のひずみ関係を図-7 に示す。同図の横軸のマイナス側に圧縮側の主鉄筋ひずみを、プラス側に引張側の主鉄筋ひずみを示す。引張側は 200kN を超えたあたりから、曲げひび割れにより剛性が緩やかになっている。さらに、ひずみの最大値は 1500  $\mu$  程度であり、降伏ひずみ 1905  $\mu$  を超えておらず、このことから主鉄筋の降伏以前にせん断破壊を呈したことがわかる。

荷重—既設部のせん断補強筋ひずみ関係を図-8 に示す。無補強の供試体は、200kN 程度で斜めせん断ひび割れが供試体表面に確認され、同時期にせん断補強筋のひずみも増大し、最終的には降伏したことがわかる。また、PCM のみの P-2 は、無補強の P-1 と同様の挙動を示した。グリッドで補強した P-3 は、P-1、P-2 と比較して降伏ひずみに達するまで緩やかに増大しており、作用せん断力に対してせん断補強筋と CFRP グリッドが一体となって抵抗したことがうかがえる。

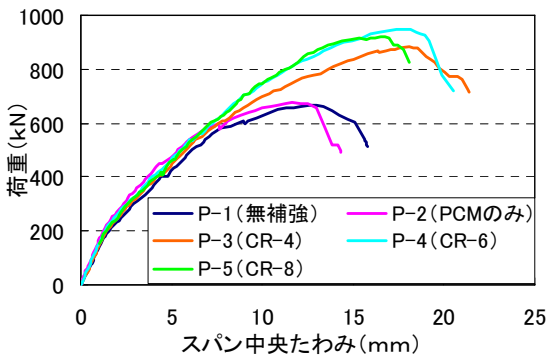


図-6 荷重—スパン中央たわみ関係

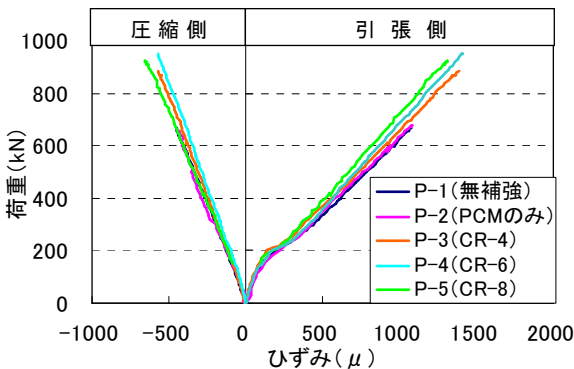
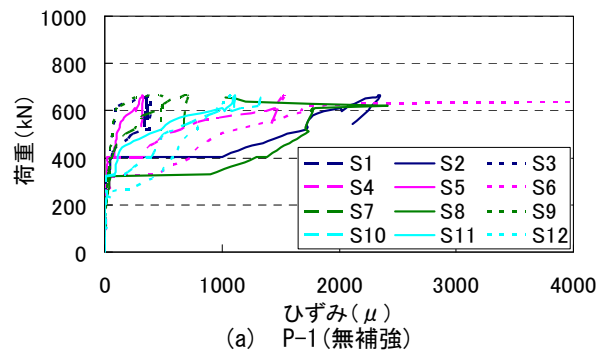


図-7 荷重—主鉄筋のひずみ関係

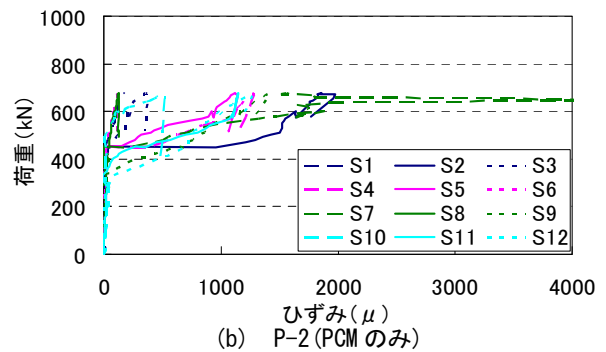
### 3.2 ひび割れ性状

最大荷重時のひび割れ性状を図-9 に示す。全ての供試体において、まず載荷点直下にひび割れが発生した。次いで支点と載荷点とを結ぶ線上に斜めせん断ひび割れが発生し、荷重の増加に伴いひび割れ長さ、幅が進展した。終局時には上縁コンクリートの一部が圧壊した。

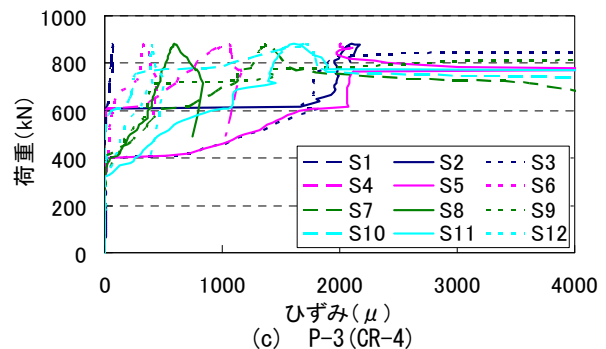
P-1、P-2 の両者を比較するとひび割れ本数、ひび割れ幅ともに同程度で、PCM による補強効果はほとんどないことがわかった。CFRP グリッドで補強した P-3、P-4、P-5 を比較すると、CFRP グリッドの断面積が小さくなるほどひび割れ幅が大きかった。しかし、CR-8 で補強した P-5 は、CFRP グリッドの剛性が高く他の供試体に比べひび割れ本数が多かった。試験終了後に CFRP グリッドのひずみが特に大きかった箇所を中心にはつり作業を行い、CFRP グリッドの破断状況を確認した。はつり箇所を図-9 中の (A)、(B)、(C) に、その観察結果を写真-4 に示す。P-3 の CFRP グリッドは腹部に設置したひずみゲージ GE8 が 1112  $\mu$ 、ハンチに設置したひずみゲージ GE9



(a) P-1 (無補強)



(b) P-2 (PCM のみ)



(c) P-3 (CR-4)

図-8 荷重—せん断補強筋ひずみ関係



が 10872  $\mu$  を示していた。このひずみゲージ付近での CFRP グリッドの破断は見られなかったが、せん断ひび割れ直上にて CFRP グリッドの格点部が直角性を失い、損傷している箇所が確認された。P-4、P-5 も同様に CFRP グリッドの破断はなかったが、P-4 では腹部に設置したひずみゲージの GE8 が 7327  $\mu$ 、GE11 が 7188  $\mu$  示しており、せん断ひび割れの直上にあった。P-5 も同様に腹部に設置したひずみゲージ GE2 が 6511  $\mu$  を示しており、せん断ひび割れの直上にあった。なお、いずれも既設コンクリートと PCM の界面の剥離は見られなかった。

### 3.3 せん断耐力の評価

せん断耐力の比較を表-5 に示す。無補強の P-1 と PCM のみで補強の P-2 の設計値の差は 39kN であるのに対し、試験値は 12kN と設計値の 3 分の 1 程度の差しか生じなかった。これは、PCM の増厚部は無筋状態であるのに対し、PCM を RC 理論に基づく PCM 部の保有せん断耐力として計算値を算出している為であると考えられる。

表-5 中の設計値①は、道示 V<sup>(6)</sup> のせん断耐力式を用いて算出したもので CFRP グリッドの最大ひずみを破断ひずみ 14000  $\mu$  とした場合のせん断耐力である。試験値と設計値①の比は P-1~P-3 において 1.0 以上であり、安全側に評価できる。一方、P-4、P-5 においては、試験値と設計値①の比が 1.0 を下回り、危険側の評価となった。

ここで、図-10 はせん断方向の CFRP グリッドの各計測点でのひずみの最大値であるが、破断ひずみ 14000  $\mu$  より小さな値でせん断破壊していることがわかる。そこ

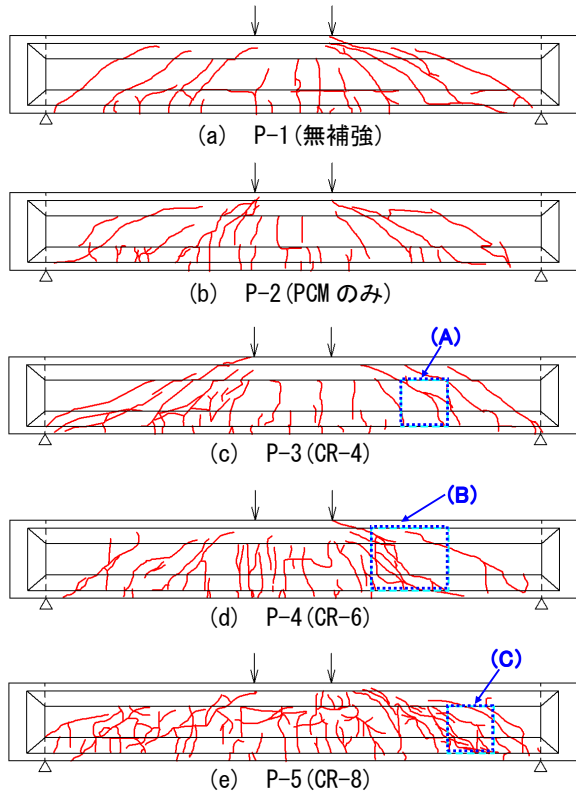


図-9 ひび割れ性状

で、CFRP グリッドが、剥離などにより破断ひずみまで達しないとしてせん断耐力の評価するため、設計値②では有効ひずみ<sup>7)</sup>の考え方を適用した。式(1)の  $V_{con}$  はハンチの断面を考慮したコンクリート、 $V_{pcm}$  は PCM、 $V_{st}$  はせん断補強筋、 $V_g$  はグリッドが受け持つせん断力を示す。

$$V = V_{con} + V_{pcm} + V_{st} + V_g \quad (1)$$

ここで、 $V_g = A_w \cdot E_w \cdot \varepsilon_{fwd} \cdot \frac{Z}{s}$

$A_w$  : 区間  $s$  におけるグリッドの総断面積

$E_w$  : グリッドのヤング係数、 $\varepsilon_{fwd}$  : 有効ひずみ

$Z$  : 有効高さ、 $s$  : グリッドの配置間隔

$$\text{また、} \varepsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w}} \times 10^{-4}, \quad f'_{mcd} = \left( \frac{h}{0.3} \right)^{\frac{1}{10}} \cdot f'_{cd}$$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$h$  : 部材の高さ(m)、 $p_w$  : せん断補強筋の引張鋼材比

$E_{fu}$  : せん断補強筋のヤング係数、 $p_{web}$  : グリッドの引張鋼材比、 $E_w$  : グリッドのヤング係数、 $f'_{mcd}$  : 寸法効果を考慮したコンクリートの設計圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

試験値と設計値②の比は全ての供試体において 1.0 を大きく上回っており十分安全側の評価となった。これは有効ひずみの考え方は棒部材に対するものであり、今回対象とした供試体は面でせん断力に抵抗したためであると考えられる。特に、CFRP グリッドの断面積の小さいものほど供試体の変形に追従し、せん断力に抵抗したことがわかる。

せん断方向の CFRP グリッドのひずみと CFRP グリッドの断面積の関係を図-11 に示す。CFRP グリッドの有効ひずみと試験値ほぼ同等の値を示している。しかし、この試験値は最大ひずみの平均であり、前述したように 6000  $\mu$  ~ 10000  $\mu$  程度ひずんでいる箇所も多数存在した。そこで、無補強の供試体の試験値と設計値の比  $\gamma$  が 1.31

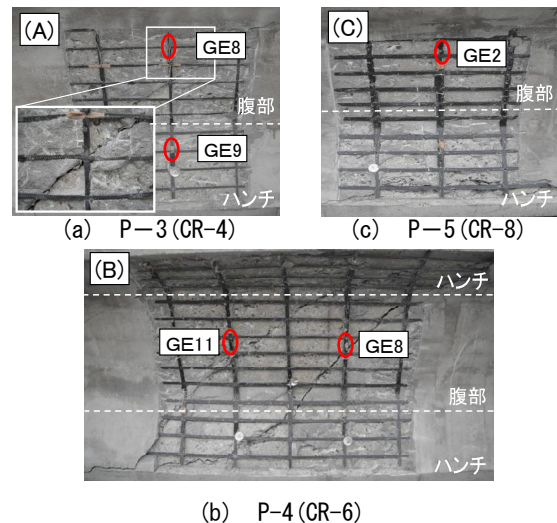


写真-4 試験後の CFRP グリッドの状況

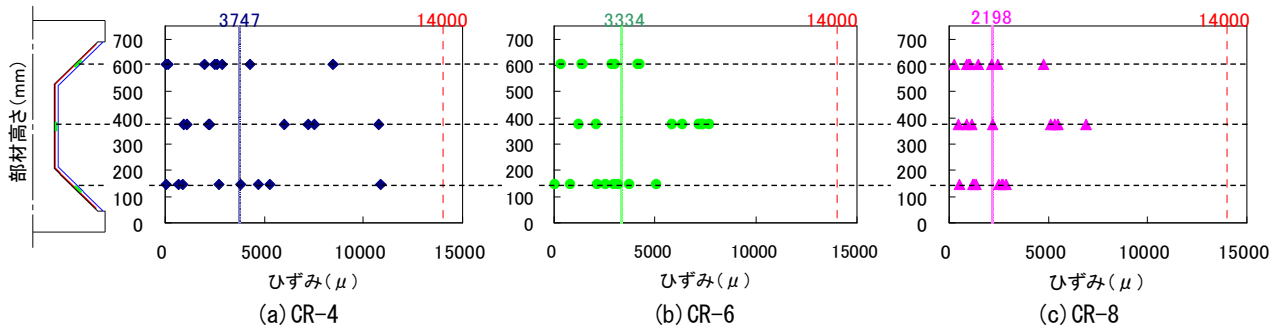


図-10 せん断方向のCFRPグリッドのひずみ

表-5 せん断耐力の比較

供試体	設計値① (kN)	設計値② (kN)	試験値 (kN)	試験値/ 設計値①	試験値/ 設計値②
P-1 (無補強)	509	-	665	1.31	-
P-2 (PCMのみ)	548	-	677	1.24	-
P-3 (CR-4)	715	629	885	1.24	1.41
P-4 (CR-6)	998	676	949	0.95	1.40
P-5 (CR-8)	1230	698	922	0.75	1.32

であったことから、試験値と設計値の比  $\gamma$  が 1.31 の場合の有効ひずみをも併せて、図-11 に示した。CFRP グリッドの断面積が小さいほど、実験から算出された有効ひずみは大きくなるのがわかった。このことは、例えば CR-4 を用いた P-3 であれば、せん断耐力の算定に用いる CFRP グリッドの有効ひずみを 8000  $\mu$  程度としても 1.31 の安全率は確保できるということである。有効ひずみの考え方を今回のようなせん断耐力に面で抵抗する場合に適用すると、十分すぎる安全側の評価となるため、今後は面部材に対する有効ひずみの考え方の検討も必要であろう。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 現行の設計法による CFRP グリッドの有効ひずみと、測定された試験値の平均はほぼ同値であった。
- (2) 測定された CFRP グリッドの試験値は 6000  $\mu$  ~ 10000  $\mu$  程度ひずんでいる箇所も多数存在した。
- (3) RC はりを CFRP グリッドによりせん断補強することで、十分な補強効果が得られた。今回対象とした CFRP グリッドの中では CFRP グリッドの断面積が小さい方が変形への追従性が良いことがわかった。
- (4) 有効ひずみの考え方をを用いることでせん断耐力の評価は可能であるが、十分すぎる安全の評価となってしまった。今後、CFRP グリッドの様な面で抵抗する場合の有効ひずみの算定法についても検討が必要である。

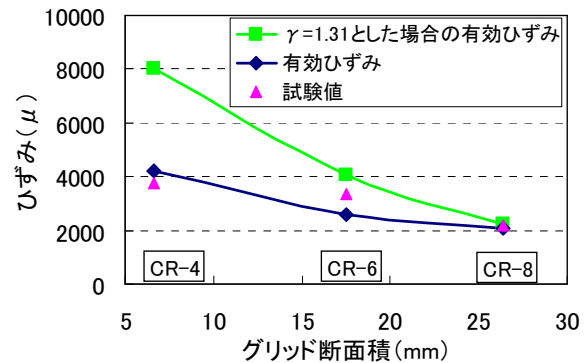


図-11 せん断方向 CFRP グリッドのひずみと CFRP グリッド断面積の関係

#### 参考文献

- 1) 福井鐵鋼㈱ <http://www.tecco.co.jp/business/>
- 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, pp.1423-1428, 2013.7
- 3) 宮野暢紘, 山口浩平, 谷口硯士, 日野伸一: CFRP グリッドによるせん断補強 RC はりの耐荷性状に関する実験的検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, pp.347-348, 2013.9
- 4) 松山功樹, 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, 土木学会構造工学論文集, Vol.57A, pp.1-9, 2011.3
- 5) FRP グリッド工法研究会: FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修補強 設計・施工マニュアル(案), 2007.7
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.3
- 7) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 1996.9