

# 論文 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

中村 智\*1・山口 浩平\*2・Amiruddin A. Arwin\*3・谷口 碩士\*4

**要旨**：FRP グリッドを補強筋としたポリマーセメントモルタル（以下、PCM）吹付け工法は橋梁、ボックスカルバートなどの増厚補強工法として広く用いられている。しかし、現行の設計法では既設鉄筋が許容引張応力度を満足するように設計するため、FRP グリッドの補強量が多くなり可搬性や合理性に問題がある。そこで著者らは断面積の小さな FRP グリッドを 2 層接触配置した場合の曲げ補強効果および既設鉄筋が許容引張応力度を超過した際の挙動について実験的に検証した。その結果、2 層接触配置した場合および FRP グリッドが許容引張応力度を満足するように補強量を設計した場合に十分な曲げ補強効果が得られた。

**キーワード**：曲げ補強, FRP グリッド, ポリマーセメントモルタル, 吹付け工法, 2 層接触配置

## 1. はじめに

FRP グリッドを用いたポリマーセメントモルタル（以下、PCM）吹付け工法による増厚工法は FRP グリッドが高強度・軽量という長所を持つため、施工に大型機械を必要とせず、また PCM の増厚を吹付け施工で行うため、施工速度に優れるといった特徴がある。構造面からも躯体形状や重量等の面で、既設構造物に与える影響が小さく、鉄筋と異なり腐食しないため維持管理が容易であり、橋梁やボックスカルバート、樋管、トンネル内面などの補強に広く用いられてきた工法である。

一般的に FRP グリッドは可搬性に優れ、狭い場所での作業に適するが、下水道、導水トンネル等、搬入口がマンホールのように狭小な（直径 1.0m 程度）場合、通常 3.0m×2.0m 程度の大きさに成型された平板状の FRP グリッドを坑内に持ち込む際には曲げて搬入する必要がある。FRP グリッドは補強量に応じて CMR-5（断面積 13.2mm<sup>2</sup>）～CMR-16（断面積 100mm<sup>2</sup>）を選定可能であるが、筋 1 本当りの断面積が大きく、剛性の高い FRP グリッドを使用する際には、曲げて搬入することは難しく、搬入口に制限がある場合には多量の材料ロスが発生するなどの問題がある。

一方、FRP グリッドの補強量は現行の設計法では、既設引張鉄筋の許容引張応力度を満足するように設計されている。しかし、補強対象構造物の既設引張鉄筋が死荷重時でほとんど許容引張応力度状態に近い場合には、多くの補強量が必要とされ、その場合高強度である FRP グリッドの発生応力は非常に小さいため、FRP グリッド本来の性能を十分に活かさず、補強効率や経済性の面から合理的でないなどの問題がある。

そこで、本試験では写真-1、図-1 に示す水路頂版部を対象に既設構造物を模擬した RC はりを作製し、断面積の大きな FRP グリッドを 1 層接触配置した場合と同等の補強量となるように、断面積の小さな FRP グリッドを 2 層接触配置し、PCM 吹付け工法によって増厚した RC はりの曲げ試験を行い、曲げ補強効果を検証した。

また、FRP グリッドが許容引張応力度を満足するように補強量を設計して、既設引張鉄筋が許容引張応力度を超過した際の曲げ補強効果についても検証した。



写真-1 補強対象水路

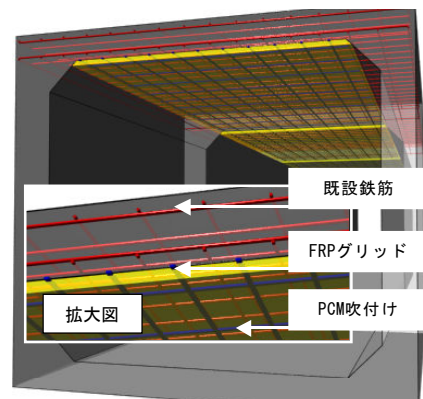


図-1 補強模式図

\*1 (株) さとうベネック 施工本部 工務部 (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 助教 博(工) (正会員)

\*3 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻博士後期課程 (正会員)

\*4 日鉄コンポジット(株) トウシート部 マネージャー (正会員)

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体

供試体の種類、概略図を表-1、図-2に示す。試験はFRPグリッドの補強量および層数をパラメータとした。Type1は無補強、Type2、Type4は現行の設計法に基づき既設鉄筋が許容引張応力度(180N/mm<sup>2</sup>)を満足するように設計した。Type3、Type5は既設引張鉄筋が許容引張応力度を超過するが、FRPグリッドの許容引張応力度(400N/mm<sup>2</sup>)は満足するように本試験では補強量をType2、Type4の1/2程度として設計した。またType2、Type3はFRPグリッドを1層接触配置、Type4、Type5は2層接触配置とし、計5種類をN=3体ずつ作製した。FRPグリッドの規格はCMR5~13(高弾性型)とした。

写真-2に供試体の作製フローを示す。まず、ボックスカルバート頂版部を模擬し、軸方向引張鉄筋比を0.39%とした既設部を作製した。軸方向鉄筋、帯鉄筋共にSD295D10とし、コンクリートの設計基準強度は30N/mm<sup>2</sup>とした。次に、実施工と同条件で、PCMの付着力を確保する目的でブラスト(吸塵式)により既設部の下地処理を行い、表面の脆弱部分や油脂などの汚れを十分に取り除いた。その後、既設表面にFRPグリッドを接触配置し、リベットアンカーによって既設部との間に隙間が無いように仮固定した。なお、本試験では曲げ補強効果の確認を目的としているため、FRPグリッドはRCはりの下面全面に接触配置した。PCMの吹付け前にドライアウト防止のプライマーを塗布し、高強度型PCMを吹付けた。吹付けは2層に分けて行い、1層目で補強筋

表-1 供試体種類

Type	規格	層数 (層)	1層当り グリッド厚 (mm)	1本当り 断面積 (mm <sup>2</sup> )	筋間隔 (mm)	単位当り 補強量 (mm <sup>2</sup> /m)	増厚材	増厚量 (mm)
1	無補強							
2	CMR13	1	8.0	65.0	75	867	高強度 PCM	18
3	CMR6	1	4.0	17.5	50	350		14
4	CMR10	2	7.0	39.2	100	784		24
5	CMR5	2	3.0	13.2	75	352		16

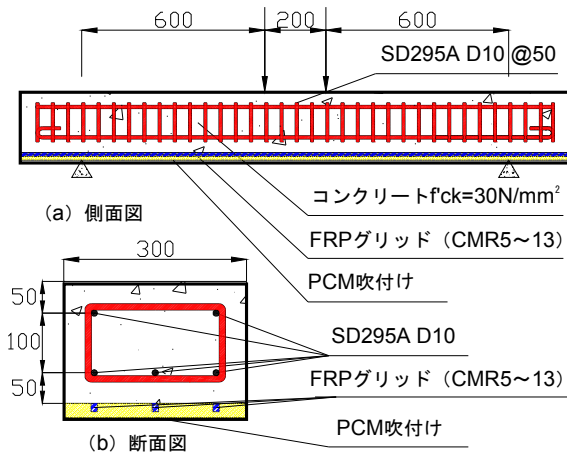


図-2 供試体概略図

の外側まで、2層目にかぶり部分を吹付けた。かぶりの厚さは10mmとし、最後に表面の凹凸をコテで修正した。

### 2.2 補強設計

表-2~4に本試験で用いた材料特性値(設計値および材料試験による実測値)を示す。PCMは供試体作製時にテストピース(試験項目ごとに3本)を採取し、載荷試験当日に材料試験を行った。FRPグリッドに関しては別途実施したメーカーによる実測値を用いた。

図-3に荷重-変位関係の設計値を示す。本試験では材料特性値の設計値を用いたものを設計値、実測値を用いたものを計算値と定義し、後者を試験結果と比較した。ひび割れ荷重Pcr、既設鉄筋降伏荷重Py、最大荷重Pmaxは道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編りに基づき算出した。Type2~Type5の補強供試体は、無補強のType1に比べて最大荷重および剛性が向上する。また、設計上の破壊形式は、Type1は圧縮縁コンクリートの圧縮破壊、その他はFRPグリッドの破断である。また、本試験では既設鉄

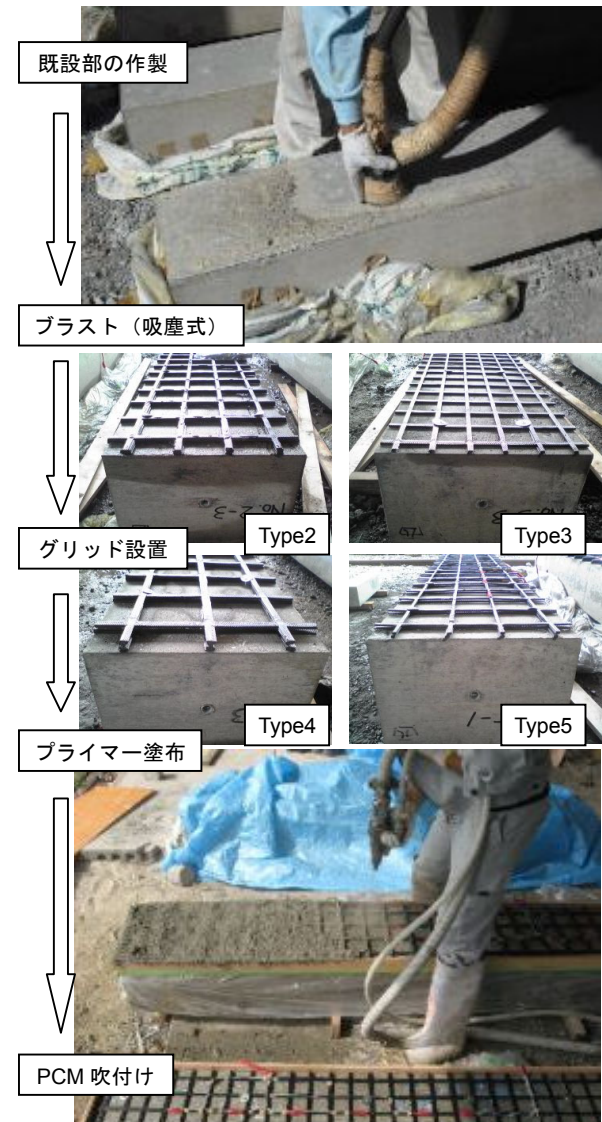


写真-2 作成フロー

筋および FRP グリッドの発生応力度を考察するため、FRP グリッドの補強量は表-5 に示す各応力状態に基づき設計した。まず、Type2、Type4 は現行の設計法に基づき、既設引張鉄筋が許容引張応力度 ( $\sigma_a=180\text{N/mm}^2$ ) を満足するように設計した。このときの設計荷重は 54.2kN、51.9kN で、グリッドの発生応力は許容引張応力度 ( $\sigma_{ga}=400\text{N/mm}^2$ ) の約 58% の 230  $\text{N/mm}^2$  程度である。Type3、Type5 は既設鉄筋が降伏強度を超過するが、グリッドは許容引張応力度を満足するように設計した。このときの設計荷重は Type2、Type4 とほぼ同一の 55.5kN、58.4kN である。旧基準で設計された構造物の既設引張鉄筋が、死荷重時に許容引張応力度を超過する場合には、安全側として既設引張鉄筋は引張力を負担せず、グリッドが許容引張応力度を満足するように設計するのが一般的で

ある。なお、本研究では実験値との比較のため、既設鉄筋は降伏後も引張力を負担するとして設計した。

### 2.3 試験方法

載荷は、片側をローラー支持、他方をピン支持として、せん断スパン 600mm で 2 点漸増載荷を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 耐力の評価

表-6 に試験結果を示す。(a)既設鉄筋許容引張応力度、(b)グリッド許容引張応力度、(d)最大荷重の各状態における載荷荷重の実験値と計算値を比較した。最大荷重は Type1 は設計で想定した通り曲げ圧縮破壊を呈し、実験値と計算値との比は 1.21 であった。Type2、Type4 は最外縁のグリッドが破断する前に既設コンクリートと PCM

表-2 コンクリートおよびモルタルの材料特性

規格		圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
コンクリート	設計	30.0	2.22	$2.80 \times 10^4$
	実測	43.6	2.85	$3.28 \times 10^4$
PCM	設計	68.2	3.16	$2.70 \times 10^4$
	実測*	36.3	3.60	-

\*ただし7日強度

表-3 鉄筋の材料特性

規格		降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)
SD295A	設計	295	-	-
	実測	372	543	28.0

表-4 FRP グリッドの材料特性

規格	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 ( $\text{N/mm}^2$ )	
			設計	実測	設計	実測
CMR13	65.0	400	1200	1371	$1.65 \times 10^5$	$1.72 \times 10^5$
CMR6	17.5			1683		$2.00 \times 10^5$
CMR10	39.2			1352		$1.87 \times 10^5$
CMR5	13.2			1778		$2.12 \times 10^5$

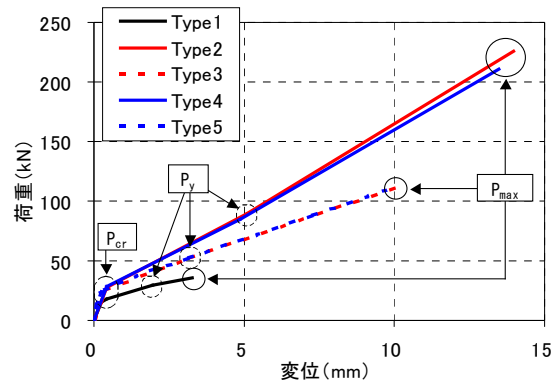


図-3 設計値

表-5 各応力状態 (設計値)

応力状態	(a) 既設鉄筋 許容応力		(b) FRPグリッド 許容応力		(c) 既設鉄筋 降伏		
	Type 1	Type 2, 4	Type 3	Type 5	Type 3	Type 5	
荷重 (kN)	17.7	54.2, 51.9	55.5	58.4	52.7	53.1	
コンクリート 応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )	5.55	10.4, 10.1	13.5	13.8	12.7	12.7	
既設鉄筋 応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )	180 = $\sigma_a$	180 = $\sigma_a$	180 = $\sigma_a$	295 > $\sigma_y$	295 > $\sigma_y$	295 = $\sigma_y$	295 = $\sigma_y$
FRPグリッド 応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )	-	229 < $\sigma_{ga}$	233 < $\sigma_{ga}$	400 = $\sigma_{ga}$	400 = $\sigma_{ga}$	361 < $\sigma_{ga}$	363 < $\sigma_{ga}$

表-6 試験結果

Type	(a) 既設鉄筋許容応力(=180 $\text{N/mm}^2$ )				(b) FRPグリッド許容応力(=400 $\text{N/mm}^2$ )				(d) 最大荷重				
	計算 (kN)	実験 (kN)	平均 (kN)	平均 計算	計算 (kN)	実験 (kN)	平均 (kN)	平均 計算	計算 (kN)	実験 (kN)	平均 (kN)	平均 計算	破壊 モード
1	17.9	29.0	27.9	1.56	-	-	-	-	45.7	55.0	55.4	1.21	曲げ 圧縮破壊
		24.8								55.6			
		30.0								55.6			
2	55.8	75.6	75.4	1.35	94.4	85.4	88.9	0.94	263	185	202	0.77	グリッド 付着破壊
		65.1				90.6				221			
		85.6				90.6				199			
		50.9				187							
3	35.3	54.7	53.6	1.52	53.0	59.6	63.3	1.19	152	190	186	1.22	グリッド 破断
		54.7				64.9				180			
		55.1				65.3				205			
		69.5				90.6				218			
4	56.6	64.9	64.9	1.15	86.1	95.3	92.2	1.07	241	218	207	0.86	グリッド 付着破壊
		60.2				90.6				196			
		39.5				65.3				145			
		39.6				60.0				184			
5	36.6	39.6	39.6	1.08	51.6	65.3	63.5	1.23	159	180	169	1.06	グリッド 破断
		-*				60.0				184			
		-*				65.3				180			

\*計測不良のため平均値から除外した。



の界面で付着破壊したため、その比は 0.77, 0.86 と 1 を下回った。本試験では Type2, Type4 は既設引張鉄筋の許容引張応力度を満足するように、グリッドの補強量を Type3, Type5 に比べて多く設置したため、補強部の剛性が極端に高くなり、変形に追従できず付着破壊したものと考えられる。グリッドが許容引張応力度を満足するように補強量を設計した Type3, Type5 は設計で想定した通りスパン中央部のグリッドが破断したため 1 以上の 1.22, 1.06 となった。また、いずれの試験結果も既設鉄筋許容引張応力時は 1.08~1.56, グリッド許容引張応力時は 0.94~1.23 であり、現行の設計法で概ね評価できた。図-4 に横軸を計算値、縦軸を実験値として結果を比較した。いずれの供試体も既設鉄筋許容引張応力時、FRP グリッド許容引張応力時での載荷荷重は計算値とほぼ一致しているが、Type2, Type4 は実験値と計算値の比が 1 を下回っており、最大荷重時に FRP グリッドが付着破壊したものと考えられる。

### 3.2 変形性状

荷重-スパン中央たわみ関係を図-5 に示す。Type2~Type5 の補強供試体は、いずれも無補強の Type1 に比べて最大荷重および剛性が向上した。ひび割れ荷重までは実験値と計算値は精度良く一致し、ひび割れ発生後はひび割れ断面を仮定した計算値より剛性が高くなった。

荷重-圧縮縁コンクリートひずみ関係を図-6 に示す。圧縮縁コンクリートのひずみは、曲げ圧縮破壊した Type1 を除いて圧縮破壊せずに弾性挙動を呈した。

荷重-既設引張鉄筋ひずみ関係を図-7 に、Type2~5 の荷重-補強筋ひずみ関係を図-8~11 に示す。設計荷重時 (Type2, Type4 は既設引張鉄筋が許容引張応力度となる 54.2kN, 51.9kN, Type3, Type5 は FRP グリッドが許容引張応力度となる 55.5kN, 58.4kN) においては既設引張鉄筋、既設圧縮鉄筋、FRP グリッドともに平面保持が成立し、計算値と精度良く一致した。これらより FRP グリッドを 2 層接触配置した場合にも設計通り、2 層分の曲げ補強効果が得られ、更に既設引張鉄筋の許容応力度以上の状態でも設計通りの耐荷性能が確認された。

また、Type1 は設計通り既設鉄筋が降伏し、Type2, Type4 は約 100kN, Type3, Type5 は約 80kN (既設引張鉄筋のひずみ値 1500~1700 $\mu$  前後) で、既設引張鉄筋のひずみが増加せず、FRP グリッドのひずみが増加する挙動を呈した。これは、既設引張鉄筋の降伏強度以降は FRP グリッドが引張力を負担することを示している。

図-12 に P=100kN 時のスパン中央におけるひずみ分布を示す。縦軸は断面中央部からの距離で、-100mm が圧縮縁コンクリート、+50mm が既設引張鉄筋の位置である。同図から圧縮縁コンクリート、既設圧縮鉄筋、FRP グリッドのひずみは計算値とほぼ一致し、既設引張鉄筋

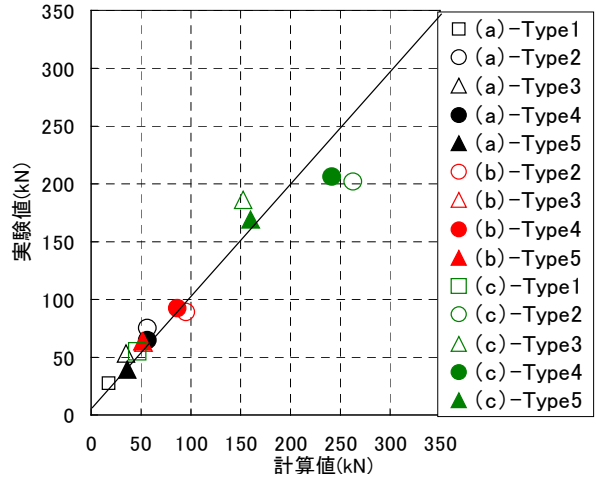


図-4 試験結果比較

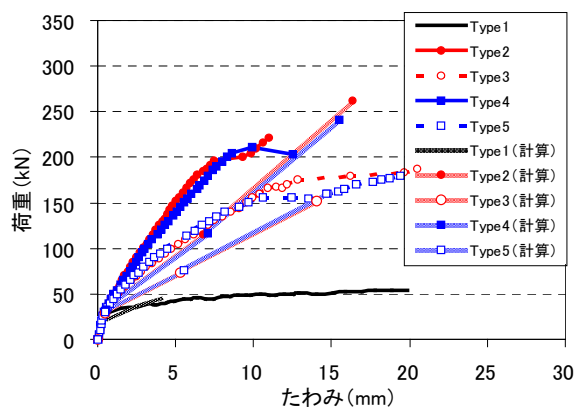


図-5 荷重-スパン中央たわみ関係

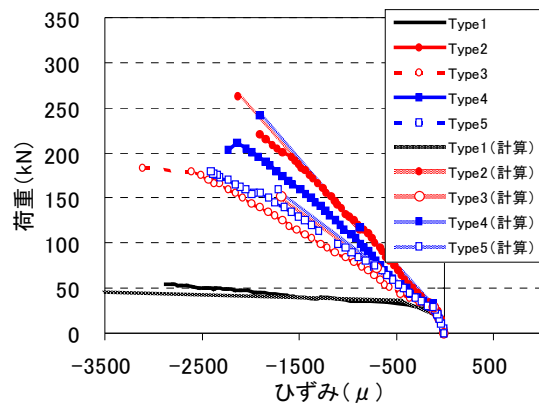


図-6 荷重-圧縮縁コンクリートひずみ関係

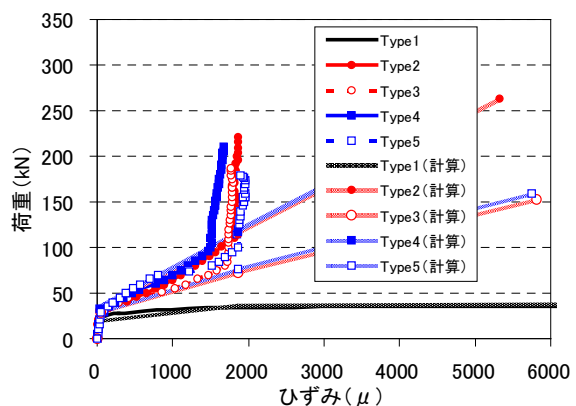


図-7 荷重-既設引張鉄筋ひずみ関係

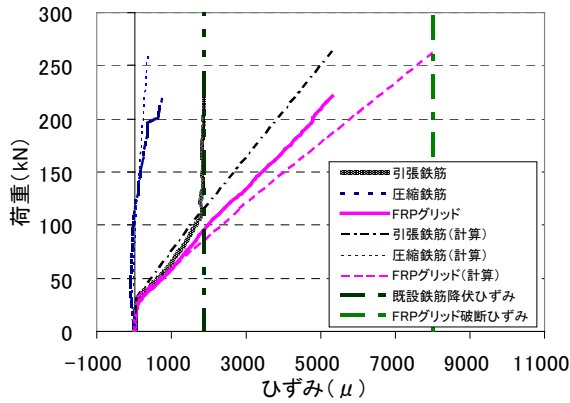


図-8 荷重-補強筋ひずみ関係 (Type2)

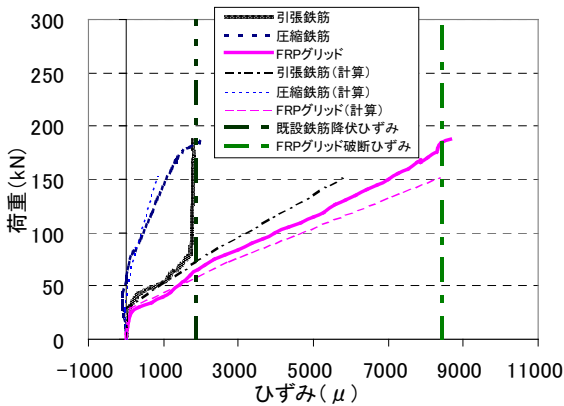


図-9 荷重-補強筋ひずみ関係 (Type3)

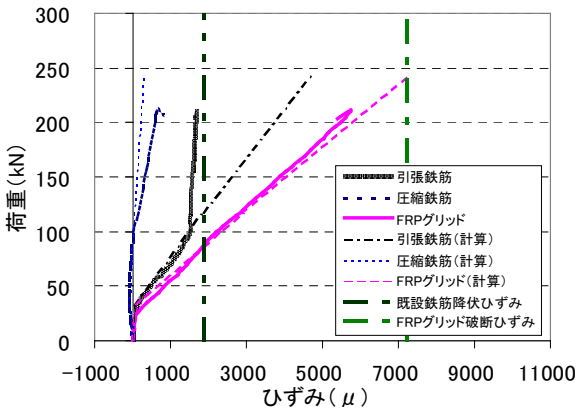


図-10 荷重-補強筋ひずみ関係 (Type4)

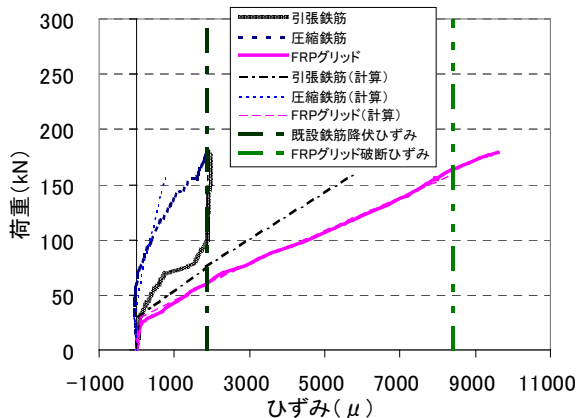


図-11 荷重-補強筋ひずみ関係 (Type5)

のひずみは計算値よりも低い値を示した。また、図-13に Type4, Type5 の P=150kN 時の等曲げ区間 (スパン中央, 載荷点直下) ひずみ分布を示す。いずれもスパン中央部において、既設引張鉄筋は降伏ひずみに達していないが、載荷点直下では降伏ひずみに達している。これらの挙動は、本試験と同様に CFRP シートや CFRP 板などの部材を用いて RC はりを曲げ補強した既往研究<sup>2), 3), 4)</sup>でも確認されており、「鉄筋降伏荷重から最大耐力に至るまでは引張主筋ひずみはほとんど増加せず CFRP シートのひずみが急増し、引張応力の負担割合が増加し、最大耐力を向上させる」とあるように、等曲げ区間での既設引張鉄筋降伏後のひずみの計測値は安定しない傾向にあることが本試験でも伺えた。本試験ではひずみゲージがスパン中央部の既設引張鉄筋の局所ひずみを測定しているので、ひび割れ幅の大きな箇所 (載荷点直下) で鉄筋が先に降伏したものとも推測される。一方、FRP グリッドは降伏しないため鉄筋降伏後も安定して荷重増加に伴いひずみが直線的に増加した。

図-14に P=100kN 時の FRP グリッドの軸方向ひずみ分布を示す。いずれも計算値とほぼ一致している。また、スパン中央から 400mm~600mm (支点) 区間に着目すると、Type2, Type4 は Type3, Type5 と比較すれば、FRP

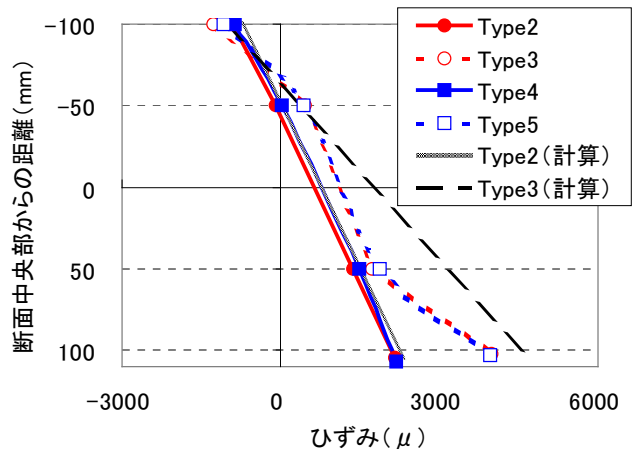


図-12 スパン中央のひずみ分布 (P=100kN)

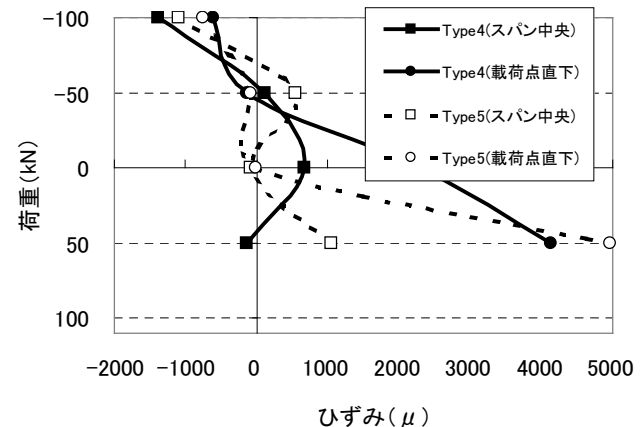


図-13 等曲げ区間のひずみ分布 (P=150kN)

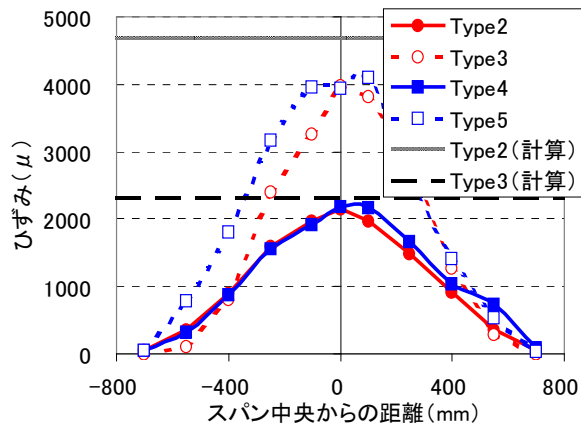


図-14 FRP グリッド軸方向ひずみ分布 (P=100kN)

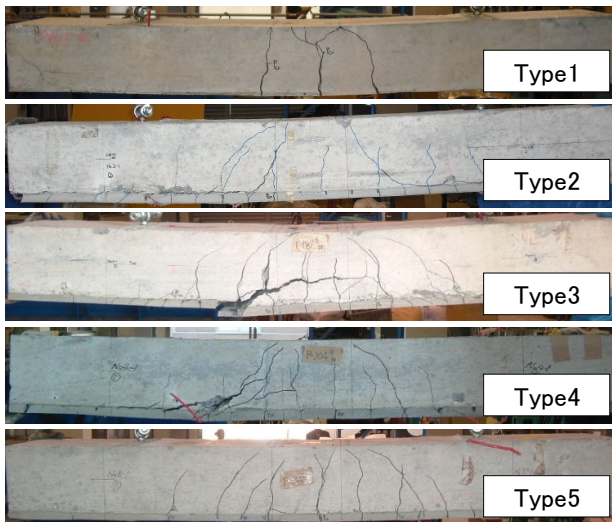


写真-3 ひび割れ性状



(a) FRP グリッド付着破壊 (Type2)



(b) FRP グリッド破断 (Type3)

写真-4 破壊性状

グリッドのひずみ分布がやや下に凸となっており、はり端部が剥離の様相を呈していたが Type3, Type5 は上に凸となり、剥離の兆候が見受けられなかった。

### 3.3 ひび割れ性状

写真-3 にひび割れ性状を写真-4 に破壊性状の一例を示す。無補強の Type1 は既設引張鉄筋の降伏後、圧縮縁コンクリートの圧縮破壊に至った。Type2~Type5 は Type1 に比べひび割れが分散しており、主としてスパン中央部、両載荷点直下の 3 本のひび割れが卓越した。試験時の観察により、ひび割れ幅はスパン中央部より載荷点直下の方が大きいことが確認された。Type2, Type4 は FRP グリッドが母材の破断に至る前に既設コンクリートと PCM の界面で付着破壊し、試験終了時に界面でのひび割れが確認された。Type3, Type5 は FRP グリッドが母材の性能を十分に発揮し、設計で想定した通りにスパン中央部で FRP グリッドが破断した。

### 4. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- (1) 現行の設計法により補強設計した Type2, Type4 は、設計荷重レベルでは設計通りの曲げ挙動を呈したが、終局時には設計上想定した FRP グリッドの破断前に FRP グリッドが付着破壊した。
- (2) FRP グリッドの許容引張応力度を満足するように補強設計した Type3, 5 は、(1)のような付着破壊ではなく、設計上想定した FRP グリッドの引張破壊で終局に至り、引張強度が高い FRP グリッドの性能が十分に発揮された。
- (3) FRP グリッドを 2 層接触配置させた場合でも、FRP グリッドは一体となって曲げ補強筋として機能しており、2 層分の曲げ補強効果が得られた。

以上より、PCM 吹付け工法による 2 層接触配置されたグリッドを用いた RC はりの曲げ補強効果が確認された。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編，2002.3
- 2) 木村耕三，小島克朗，平田亮，土屋好男：CFRP 板による RC 補強部材の曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.2，pp.267-272，1997.5
- 3) 鹿毛忠継，梶田佳寛：RC はりの CFRP シートによる曲げ補強効果に及ぼす浮きの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.1，pp.425-430，1998.5
- 4) 小林朗，佐藤靖彦，高橋義裕，立石 晶洋：FRP スtrandシート の材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1561-1566，2008.5