論文 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

宮野 暢紘*1・山口 浩平*2・谷口 硯士*3・日野 伸一*4

要旨:本研究は, 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,本工法による RC 部材である隔壁のせん断補強効果を検討した。CFRP グリッドの定着方法は, 同一平面内の定着と同一平面に加えハンチ部を定着領域とした面外定着の2通りとし,比較検討を行った。 その結果,腹部のみを定着領域とした場合のせん断耐力の試験値は設計値を下回るが,腹部およびハンチ部 を定着領域とした場合は,現行の RC 部材のせん断耐力の設計法が適用できることを明らかにした。 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

わが国においては、将来の大震災への対策のため新設 構造物は勿論, 既設構造物においても耐震補強が必要と されている。地下または地中にある既設構造物もその例 外でなく、特に地中の RC 構造物の地震時における挙動 は、周辺地盤の変形に支配されることから、地上の構造 物より危険であると考えられる。今回検討対象とした樋 門構造物(写真-1参照)における函体でも、先の東日本大 震災では多くの構造物が損傷を受けている。樋門函体の 耐震補強設計は、横方向は地震時に周辺土と一体として 挙動すると考えられため地震時の検討は省略し、縦方向 は適切な耐震設計法を選定して行うものとされている¹⁾。 実際の事例としても、縦方向の強度不足が指摘され耐震 補強する場合がある。これら RC 構造物の多くは、コン クリート打設の施工性や隅角部の応力伝達の面からハ ンチ部を有しており、当箇所のせん断補強を行う場合は, 一般的に腹部両面のハンチ部を削孔し、補強鉄筋を腹部 に沿ってハンチ部に定着させる方法が採用される。しか し,ハンチ部内には多量の既設鉄筋が配置されており, これらを避けて削孔することは非常に困難であり、施工 する上で大きな課題となっている。

一方,耐震補強工法の1つとして CFRP グリッド(写 真-2 参照)を RC 構造物に接触配置し,ポリマーセメン トモルタル (以下, PCM)を吹付ける補強工法が確立 されている^{例えば2)}。本工法は,CFRP グリッドの特性で ある高強度・軽量を活かして人的省力化の点で優れて おり,また PCM 吹付けによって既設構造物と一体化す るためアンカー定着する必要がなく,施工速度に優れ ている。さらに,CFRP グリッドは鉄筋と異なり腐食し ないため,かぶりを小さくすることが可能で,補強断 面を小さく抑えられるため,構造面からも形状に与え る影響が小さく,維持管理が容易であることも特長に 挙げられる。加えて,CFRP グリッドは CFRP 製のシー ト状のものと比較して目付量が大きく,曲げおよびせ ん断に対する変形拘束の効果も有しており,当検討対 象に有効なせん断補強方法として期待される。

一方,これまで著者らのグループでは RC 部材を対象 とした CFRP グリッド工法を研究開発してきたが^{2),3),} ^{4),5)}, U型に成型した CFRP グリッドをハンチ部のよう な同一平面上にない定着領域,いわゆる面外定着にて 補強した時の応力伝達機構については,これまで十分 な検討がなされていないのが現状である。

そこで本研究では、CFRP グリッドによるせん断補 強効果を検討するために、図-1 に示す樋門構造物(函 体)の隔壁を切り出したせん断破壊先行型の RC はり (I桁)を作製し、これに CFRP グリッドを配置し PCM にて吹付けを施して載荷試験を実施した。CFRP グリ ッドの定着方法を、腹部のみを定着領域とした同一平 面内の定着と腹部およびハンチ部を定着領域とした 同一平 面外定着の2通りとし比較検討を行った。さらに、破 壊時の変形性状、ひび割れ性状から CFRP グリッドの 形状および面外定着がコンクリートの破壊性状に及 ぼす影響についても検討した。



*1(株)SNC 補修事業部 博(工) (正会員) *2 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) *3 新日鉄住金マテリアルズ(株)コンポジット社 トウシート部 マネージャー *4 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)



2. 試験概要

2.1 供試体

供試体形状は,既設構造物を模した RC はりとし,断 面寸法(高さ×幅)を 650×400mm, スパン長 3450mm と した I 桁である。供試体の設計は,有効高さ d=650mm, せん断スパン a=1625mm, せん断スパン比 a/d=2.75 とし た。なお、せん断補強鉄筋の割合は実構造物と同一であ るが、主筋量はせん断破壊先行型とするため実構造物よ りも多く配筋した。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。供試体は, 無補強の P-0, 腹部のみを CFRP グリッドと PCM にて補 強した P-1, また腹部およびハンチ部を CFRP グリッド と PCM にて補強した P-2 の計 3 種類をそれぞれ 1 体作 製した。なお、CFRP グリッドの補強量は、実構造物の 補強筋量と同一とした。また、同一平面内の CFRP グリ ッドの定着は、既往の研究3より3格点必要であるが、 本供試体は実構造物の 1/3 相当(実構造のハンチ高 さ:300mm, 供試体:75mm)のため P-2 のハンチ部では, 2 格点の定着(詳細は図-2(c)を参照)とした。ただし、設計 上の保有せん断力は、CFRP グリッドはハンチ部で十分 に定着されているもの、すなわち終局時の CFRP グリッ ドは引張破断するものとして算出した^{6),7)}。ここで, P-1, P-2 の設計上の保有せん断力の内訳は、コンクリート 250kN, せん断補強鉄筋 227kN, CFRP グリッド 253kN である。

2.2 使用材料

セメントに普通ポルトランドセメント(OPC,密度: 3.14 g/cm³),細骨材は海砂(密度:2.59 g/cm³),粗骨材は 砕石(密度:2.76 g/cm³)を使用した。混和剤は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/mm²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。載荷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。また,鉄筋は軸



表-1 コンクリートの示方配合

Gmax	W/C	s∕a	単位量 (kg/m ³)						
(mm)	(%)	(%)	W	С	S1	S2	G1	G2	Ad
20	63	45.8	170	270	578	250	747	308	2.70

*Ad:AE 減水剤

表−2 コンクリート, PCM の材料特性値							
大士 半江	坦坎	圧縮強度曲げ強度		引張強度	ヤング係数		
17 14	况旧	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)		
コンクリート	設計	21.0	3.20	-	2.35×10^{4}		
(P-0)	実測	22.4	3.05	1.04	2.44×10^{4}		
コンクリート	設計	21.0	3.20	-	2.35×10^{4}		
(P-1,2)	実測	22.2	4.58	1.38	2.45×10^{4}		
PCM	設計	69.6	9.00	3.16	2.70×10^{4}		
	実測	72.7	10.1	-	-		

表-3 鉄筋の材料特性値

鈝笜 径	部材	降伏強度	引張強度	ヤング係数			
政制任	61414	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm^2)			
D32	主鉄筋(既設部)	407	593				
D10	せん断補強鉄筋 (既設部)	388	440	2.0 × 10 ⁵			
D6	組立筋	346	494				

表-4 CFRP グリッドの材料特性値

筋番	部材	1本当り 断面積	許容引張 応力度	引張強度	ヤング係数
		(mm ²)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
CR5	補強部	13.2	400	1400	1.0×10 ⁵

方向鉄筋にSD345D32, せん断補強鉄筋にSD295 D10, 組 立用の鉄筋はD6を使用した。鉄筋の材料特性を表-3に示 す。CFRPグリッドには,炭素繊維を格子状に積層成形し た格子間隔(高さ×幅) 50mm×150mm (ハンチ部: 25mm ×150mm)のCR5を使用した。物性値を表-4に示す。吹付 け用のPCMには,高強度タイプを用いた。物性値を表-2 に示す。また,吸水防止剤としてプライマーには,アク リル系エマルジョンを使用した。

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。まず,隔壁を模 擬した既設コンクリートを作製した。軸方向鉄筋に SD345D32 を用い、はりのせん断補強筋に SD295D10 を @250mm ピッチで配筋し、型枠を組み、コンクリートを 打設した。コンクリートの設計基準強度は f'c=21N/mm² と設定し、設計強度に達した時点で載荷試験を実施した。 次に,実施工と同様に,コンクリート表面の脆弱部を除 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て仮固定した。なお、 リベットアンカーは CFRP グリッド工法研究会設計施工 マニュアルにより 10 本/m² とした。PCM 吹付け前にドラ イアウト防止の目的でプライマーを塗布し,高強度 PCM を t=13mm 吹付けた。PCM の吹付け厚みは、かぶり厚さ 10mm+グリッド厚みより t=13mm とした。最後は表面を コテで均し、皮膜養生剤を塗布して養生を行った。



a) 既設コンクリート



b)バキュームブラスト

c2) グリッド設置 (P-2)

e) PCM 吹付け



c)グリッド設置 (P-1)



d) プライマー塗布

写真-3 供試体作製フロー



載荷試験状況を写真-4 に示す。載荷は、両端単純支持 として、せん断スパン a=1625mm で 2 点載荷とした。荷 重は PCM やグリッドに衝撃を与えないように一様な速 度で加えた。また、変位計は中央下端に 3 点と支点上端 にそれぞれ 1 点設置した。さらに、ひずみゲージは、既 設部上縁側のスパン中央と既設部主鉄筋の下縁側のス パン中央に設置した。また、せん断補強効果を確認する ために、せん断補強筋および CFRP グリッドのせん断区 間にそれぞれ設置した。計測機器の取付け位置を図-3 に 示す。



写真-4 載荷試験状況



(a) P-0 無補強 ひずみゲージ



(b) P-1 腹部補強



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であった。荷重 -スパン中央たわみ関係を図-4 に示す。補強した P-1, P-2 の供試体は,無補強の P-0 と比較して最大荷重が 2 ~3 割程度向上した。また,腹部およびハンチ部を補強 した P-2 は,腹部を補強した P-1 と比べて高荷重域での 剛性が高く,最大荷重は 14%向上している。

荷重-ひずみ関係を図-5 に示す。計測位置はいずれも スパン中央である。同図の左側に圧縮縁のコンクリート のひずみを,また右側に引張縁の主鉄筋のひずみをプロ ットした。圧縮縁のコンクリートのひずみは,いずれも 斜めせん断ひび割れが卓越するまでは弾性挙動を呈し たが,斜めせん断ひび割れが進展して以降は,非線形挙 動となり一部圧壊もみられた。一方,引張縁主鉄筋のひ ずみは最大 1500 μ 程度で,主鉄筋の降伏ひずみ 2035 μ を下回っており,主鉄筋は降伏していないことがわかる。

荷重-せん断補強鉄筋ひずみ関係を図-6,7,8に示す。 なお P-1,P-2 においては、同位置付近の CFRP グリッドの ひずみも計測した。無補強の P-0 は、200kN~300kN で 斜めせん断ひび割れが供試体表面に確認されたが、これ はコンクリート保有せん断力(229kN)とほぼ同じレベル であった。また、同時期にせん断補強鉄筋のひずみも急 激に大きくなり、応力が伝達していることが確認され、 その後、せん断補強筋は降伏ひずみ1940 μに達した。一 方, せん断補強を施した P-1, P-2 においてせん断補強筋 と CFRP グリッドのひずみは、鉄筋の降伏強度に達する まで同じ傾きで増加し、既設部と補強部が一体化してい ることが確認された。また、P-1 および P-2 のせん断補 強筋のひずみは、P-0 と比較して鉄筋の降伏ひずみに達 するまで緩やかに増大している傾向にあり、代わりに CFRP グリッドのひずみがせん断補強筋と同様に増大し, CFRP グリッドもせん断力を負担していることを示して いる。

ここで, P-0 の最大荷重(548kN)および P-1 の最大荷重 (640kN)とその 1/2 の荷重時の部材高さとひずみ分布の関 係を図-9に示す。腹部を補強した P-1 は,部材高さ 325mm, つまり断面中央部にて最もひずみが大きく,せん断力を 負担していることが明らかとなった。この位置は,後述 でも考察する終局時の斜めひび割れ発生位置と一致し ている。一方,腹部およびハンチ部を定着した P-2 は, 部材高さ 225mm で最もひずみが大きく,荷重の増加に 伴って腹部およびハンチ部でせん断力に抵抗している ことが明らかとなった。CFRP グリッドをハンチ部で面 外定着することにより,CFRP グリッドと既設コンクリ ートが十分に一体化されて,その結果 P-2 の方が P-1 に 比べて発生ひずみが小さく抑えられたと考えられる。







3.2 ひび割れ性状

最大荷重時のひび割れ性状を図-10 に示す。無補強の ものは、まず載荷点直下にひび割れ幅の小さい曲げひび 割れが発生し、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、荷重が増加するにつれひび割 れ長さ、ひび割れ幅が進展した。最終的には上縁コンク リートの一部が圧懐した。腹部を補強した P-1 およびハ ンチ部を補強した P-2 のひび割れ性状も同様の傾向を示 した。なお両者を比較すると、P-2 は P-1 に比べひび割 れ本数,ひび割れ幅ともおおむね少なく,ひび割れ発生 位置はハンチ部からの進展が抑制されていることがわ かった。これは、ハンチ部の CFRP グリッドがせん断耐 力を負担していることに加え, ハンチ部に発生したひび 割れを CFRP グリッドと PCM によって面で抑えている ためであると考えられる。試験終了後に PCM をはつり 出し, CFRP グリッドの破断状況や PCM の剥離状況を確 認し,写真-5,6に観察結果を示す。P-1のCFRPグリッ ドは破断には至っていないが、せん断ひび割れ直上にて 剥離と CFRP グリッド格点部が直角性を失っている箇所 が見られた。また、既設部と補強部の界面では一部に PCM の剥離も確認された。一方, P-2の CFRP グリッド は,破断や剥離は無く, P-1 に比べてグリッド格点の変 形が小さかった。また、ハンチ部の CFRP グリッドおよ び PCM についても破断や剥離は確認されなかった。

3.3 せん断耐力の評価

ひび割れ荷重 Pcr,初降伏荷重 Py₀,曲げ終局荷重 Pu およびせん断耐力 Ps を算出した^{6),7)}。試験結果を表-5, 図-11 に示す。試験値と計算値の比は,無補強および P-2 において 1.0 以上であり,道示 V⁶⁰のせん断力式を適用す れば,安全側に評価できる。一方,P-1 においては,試 験値と計算値の比が 0.88 となった。これは,前述のよう に CFRP グリッドの定着不足に起因するものであり,終 局時に既設部と補強部の界面に剥離が生じたことを示 唆している。



図-8 荷重-鉄筋ひずみ関係(P-2)



図-10 ひび割れ性状



写真-5 破壊後の CFRP グリッドの状況 (P-1)



写真-6 破壊後の CFRP グリッドの状況 (P-2)

/#≣≠/★	면다	P _{cr}	P _{y0}	Pu	Ps	Ps :
供試件	項日	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	試験/計算
P-0	試験	131	-	-	548	1.20
(無補強)	計算	126	780	860	458	1.20
P-1	試験	161	-	-	640	0.00
(腹部補強)	計算	193	854	916	727	0.00
P-2	試験	180	-	-	727	
(腹部+ ハンチ部補強)	計算	193	858	925	730	1.00

表-5 試験結果



以上のことから, RC はりにおいて腹部のみを CFRP グリッドと PCM で定着した場合は,現行の RC はりのせ ん断耐力の設計法が必ずしも一致しないことがわかっ た。一方,腹部およびハンチ部まで定着した場合は,現 行の設計法が適用可能であることが示唆された。ただし, 付着力や定着長などを含めた面外定着の応力伝達メカ ニズムの詳細は明らかにすることができなかったため, 今後の検討が必要とされる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) CFRP グリッドにより腹部のみを定着領域とした 供試体のせん断耐力は,無補強のものに比べ向上 したものの,現行の設計法の計算値の比が 0.88 と やや小さく,安全側のものとは言えなかった。
- (2) CFRP グリッドにより腹部およびハンチ部を定着 領域とした供試体のせん断耐力は、無補強のもの に比べ向上し、計算値と同等であった。現行の設 計法が適用できることが確認され、樋門の函体に おけるせん断補強工法として期待できた。
- (3) 定着方法に関わらず、CFRP グリッドは既設部のせん断補強鉄筋に代わりせん断力を負担しており、 せん断補強効果が確認された。特にハンチ部の CFRP グリッドは、既設部と一体化することで腹部

およびハンチ部でせん断力に抵抗した。

(4) 既往の研究より CFRP グリッドの必要定着長は面 内定着3格点としたが、本研究のように面外定着 においても2格点以上であることがわかった。な お、面外定着の応力伝達メカニズムについては明 らかにできなかったため、今後の研究課題とする。

謝辞

本研究は, FRP グリッド工法研究会の新工法開発研 究テーマの一環として実施致しました。研究を遂行す るにあたっては,渡邉弘史氏(当時,同協会メンバー), 原田樹菜氏(㈱SNC)をはじめ FRP グリッド工法研究会 の方々には多大な協力を頂きました。ここに深く感謝 致します。

参考文献

- (財)国土技術研究センター:柔構造樋門設計の手引 き、山海堂,2007.
- 渡邊弘史,日野伸一,山口浩平:2層接触配置した CFRP グリッドの付着強度に関する実験的研究,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1411-1416,2009.7
- 秋山功樹、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
- 4) 山口浩平,日野伸一,中村智:PCM 吹付け工法に よる補強部界面の付着特性およびはりのせん断補 強効果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.1285-1290, 2008.7
- 中村智、山口浩平、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、コンクリート工学年次論 文集, Vol.31, No.2, pp.1429-1434, 2009.7
- 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:コンクリート標準示方書[構造性能照査 編],2010.3