論文 PCM 吹き付け工法による CFRP グリッドを用いたハンチを有する RC は りのせん断補強および補強部界面の付着特性

山口 浩平*1・郭 瑞*2・日野 伸一*3・宮野 暢紘*4

要旨:本研究は, 樋門函体の隔壁に対する耐震補強工法の1つとして CFRP グリッドを用いた PCM 吹付け工 法を想定し,本工法によるハンチを有する RC 部材の面内のせん断補強効果を確認するために,無補強,ウ ェブのみ補強,ウェブおよびハンチ補強した3種類の試験体により,せん断補強効果について検討した。そ の結果, CFRP グリッドの有効ひずみの考え方を用いることで,せん断耐力を適切に評価できることがわかっ た。また,既設コンクリートと PCM の補強部界面の付着特性を明らかにするため,FEM 解析により検討し た。

キーワード: CFRP グリッド, PCM 吹付け, せん断補強, 付着特性, FEM 解析

1. はじめに

樋門(写真 - 1¹⁾)は河川堤防を横断して設置される 構造物で, 河川水の取水や堤内地からの排水に利用され, 出水時には河川堤防としての機能も求められる治水安 全上重要な構造物である。しかし, 東日本大震災では樋 門の多くが破壊されており、特に樋門の不等沈下などに よる隔壁の面内のせん断補強の必要性が指摘されてい る。旧基準で設計された隔壁はそもそもせん断補強筋量 が不足しており,従来工法であるコンクリート増厚工法 の場合、壁部両面のハンチを削孔し、そこに補強筋を挿 入する必要がある。しかし、ハンチは鉄筋が密に配筋さ れており、その削孔は施工上、困難となる。また、常時、 水の影響を受ける部位で,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 阻害率があまりにも大きい。これらのことを考えて,著 者らのグループは、従来の鉄筋に替えて、写真-2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 格子筋(以下,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 工法を開発してきた²⁾。本工法は,既設コンクリート表 面にグリッドを接触配置させ PCM を吹付けて一体化す るもので, 隔壁のせん断補強に適用する場合, ハンチの 削孔が不要で, 増厚量も薄くでき, さらにグリッドによ る耐腐食性の向上などのメリットを有する。

そこで本研究では、せん断補強効果を検討するために、 グリッドで補強する際の補強範囲をパラメーターとし て検討した。なお、既設コンクリートと PCM の補強部 界面の付着特性についても明らかにするため、付着特性 を考慮した数値解析により検討した。

2. 補強部界面の付着特性についての既往研究

グリッドの同一平面上の定着に関しての既往研究³⁾で は、既設コンクリートにグリッドを接触配置し、PCM 吹 付けで増厚一体化させた試験体の面内の2面引抜き試験 が実施されている。図-1に各格点の分担率のイメージを







写真-2 CFRP グリッド



図-1 同一平面上の付着特性についての既往研究³⁾

*1 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) *2 九州大学大学院 工学府都市環境システム専攻 (学生会員) *3 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) *4(株)SNC 補修事業部 博(工) (正会員) 示す。その結果,格子筋間隔を考慮せず分担率のみで必 要格点数を決める場合,グリッドの設計引張強度の1/3 の荷重が生じるときの分担率は70~80%となり,必要格 子点数は2格点となり,また分担率が90%の時の必要格 点数は3格点あれば十分であるとされている。以上より, 分担率の総和が80%以上となる格点数を有効定着長と すると,設計引張荷重の1/3の荷重のときは3格点以上 必要であることがわかっている。

3. 載荷試験および解析概要

3.1 試験体および使用材料

試験体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。基準となる無補強の P-0,グリッドにより壁 部であるウェブのみを補強した P-1,ウェブに加えてハ ンチまで補強した P-2 の 3 種類,それぞれ 1 体の試験体 を作製した。なお,せん断補強鉄筋の割合は実構造物と 同一であるが,主筋の鉄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 に試験体の形状, 配筋,グリッドによるせん断補強の概略図を,表-1,2, 3 にコンクリート, PCM,鉄筋,グリッドの材料特性値 を示す。コンクリートは実構造物を想定して設計圧縮強 度 f'ca=21N/mm²とした。なお,試験体は実構造物の 1/3 相当(実構造のハンチ高さ:300mm,試験体:75mm)のた め, P-2 のハンチでは 2 格点の定着とした。



3.2 試験方法

写真-3 に載荷試験状況を,図-3 に計測機器の取付け 位置を示す。載荷は,両端単純支持として,せん断スパ ン1625mmで2点線載荷とした。また,変位計は,スパ ン中央下端のはり幅方向三箇所に配置し,また支点の変 位も測定した。ひずみゲージは,はり軸方向については, スパン中央部のコンクリートの上縁,引張側既設鉄

表-1 コンクリート, PCM の材料特性値

		圧縮強度	曲げ強度	引張強度	ヤング係数
材料	-	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	$(\times 10^4 \text{N/mm}^2)$
コンクリー	設計	21.0	3.20	-	2.35
Ի (P-0)	実測	22.4	3.05	1.04	2.44
コンクリー	設計	21.0	3.20	-	2.35
ŀ(P-1, 2)	実測	22.2	4.58	1.38	2.45
PCM	設計	69.6	9.00	3.16	2.70
	実測	72.7	10.1	-	-

表-2 鉄筋の材料特性値

鉄筋径	部材	降伏 強度 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
	5 64 64	(10,1111)	(10/1111)	(* 10 10/1000)
D32	主鉄筋 (既設部)	407	593	2.00
D10	せん断補強筋 (既設部)	388	440	2.00

表-3 CFRP グリッドの材料特性値(公称値)

筋番	部材	1本当たり 断面積	引張 強度	ヤング係数
		(mm^2)	(N/mm^2)	$(\times 10^{5} \text{N/mm}^{2})$
CR-5	補強部	13.2	1400	1.00



(a) 変位計および既設部のせん断補強筋のひずみゲージ



図-3 変位計, ひずみゲージの設置位置

筋,引張側グリッドにそれぞれ貼付した。また、せん断
方向については、せん断方向のグリッドのひずみ値は補
強効果の照査のために特に重要であるため、図-3(b)、
(c)に示すように複数箇所のひずみ値を測定した。







 f_{ck}^{*} : 圧縮強度の特性値(N/mm²) f_{tk}^{*} : 引張強度の特性値(N/mm²) d_{max} : 粗骨材の最大寸法(mm)



3.3 解析概要

解析は汎用 FEM パッケージ Diana を用いて,3 次元非 線形解析を行った。境界条件は支承位置を線支持、載荷 点は載荷板を模した面載荷とし、支承はトラス要素、載 荷板にはカーブシェル要素を用いた。荷重は、はり鉛直 方向の変位増分とした。コンクリートは三角柱、四角柱 ソリッド要素,鉄筋およびグリッドは埋込み鉄筋要素を 用いた。図-4 に解析モデルの一例を示す。図-5, 6, 7 にコンクリートおよび PCM,鉄筋,グリッドの構成則を 示す。コンクリート, PCM の圧縮側は強度試験結果を, 引張側は既往研究⁴⁾で提案されている引張軟化曲線を適 用した。鉄筋は、Von Mises の降伏条件を適用して、降 伏強度まで線形で増加し、その後は応力一定でひずみの み増加するバイリニアモデルとした。グリッドは、降伏 強度に達したら応力およびひずみがゼロになるバイリ ニアモデルとした。また、補強部界面の付着特性をモデ ル化するために、コンクリートと PCM の界面にインタ ーフェイス要素を用い、図-8に示すすべり関係を定義し た。

4. 変形性状

図-9 に荷重-スパン中央たわみ関係を示す。破壊形態 は、全試験体ともせん断破壊であった。補強した P-1、 P-2 は無補強の P-0 に比べて剛性が高くなりせん断耐力 が増加したことがわかる。また、ウェブおよびハンチ補 強の P-2 は、ウェブのみ補強の P-1 と比べて、高荷重域 での剛性がより高く、最大荷重は 14%向上している。解 析では、各試験体の剛性の変化や最大荷重を再現できて おり、せん断破壊を呈していることもわかる。

図-10 に荷重-せん断補強筋ひずみ関係を示す。P-1, P-2 では、せん断補強筋に加えてグリッドひずみも併せ て考察した。無補強の P-0 は、200~300kN 付近で斜めせ ん断ひび割れが試験体表面に確認されたが、同図(a)か らも、荷重 300kN 程度からせん断ひび割れに伴うひずみ の増加が確認された。一方、P-1、P-2 は、荷重 400kN 程



度まではせん断補強筋とグリッドがほぼ同じ挙動を示 しており,既設部と補強部が一体化していることがわか る。しかし,それ以降は両者の挙動は異なり,一体性が 失なわれ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 と比較して降伏ひずみ に達するまで緩やかに増大している傾向であり,グリッ ドもせん断力に抵抗していることを示唆している。

5. ひび割れ性状

図-11 に最大荷重時のひび割れ性状を示す。各試験体 とも、まず載荷点直下にひび割れ幅の小さな曲げひび割 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てひび割





れ長さ,ひび割れ幅が進展し,最終的にはコンクリート の上縁の一部が圧壊した。また P-1 と P-2 を比較すると, P-2 は P-1 に比べひび割れ本数,ひび割れ幅とも概ね少 なく、ひび割れ発生位置はハンチからの進展が抑制され ていることを目視により確認した。これは、ハンチのグ リッドがせん断力を負担していることに加え, ハンチに 発生したひび割れをグリッドと PCM によって面で抑え ているためであると考えられる。また, FEM のひび割れ 図は最大荷重時の主応力コンターであり, 試験結果と概 ね同様の傾向を示した。また P-2 に比べて P-1 は, はり の上下のハンチの応力が大きく、このことからもひび割 れによる損傷が大きいことがわかった。試験終了後に PCM をはつり、グリッドの破断状況や PCM の剥離状況 を確認した結果を写真-4に示す。P-1のグリッドは破断 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 のグリッドは,破断や剥離はなく, P-1 に比べて格点部の変形が小さかった。また,ハンチのグリッドおよび PCM についても破断や剥離は確認されなかった。

6. 数値解析による補強部界面の付着特性の検討

ハンチまで補強していない P-1 は、補強部界面に剥離 が生じたので、補強部界面の付着特性について数値解析 により検討した。図-12 に相対変位検討位置を示す。補 強試験体 P-1, P-2 に対して、コンクリート上縁から 140mm、325mm、375mm、425mm、510mmの位置をそ れぞれ H1, A, B, C, H2とする。それらの各位置にお いて、補強部界面をはさんでコンクリート側に 5mm, PCM 側に 5mm の 10mm 離れた箇所の補強部界面の接線 (面内) 方向の相対変位について検討した。

図-13 に荷重-相対変位関係を示す。同図(a) より, ウェブ(A, B, C)では,ハンチまで補強していない P-1 は, 荷重 500kN 程度で相対変位が急増して,その界面が剥離 したことが再現されている。一方,ハンチまで補強した P-2 は荷重 600kN 程度まで相対変位はほとんど生じず, 終局時のコンクリート, PCM の破壊により最終的には相 対変位が若干生じた。

同図 (b) より, ハンチ (H1, H2) における P-1 と P-2 の比較では, ハンチが PCM だけで増厚されてグリッド の配置されていない P-1 は, 低荷重時から相対変位は線 形的に増加傾向にあり, 終局時には急増している。一方, ハンチにグリッドが配置されている P-2 は, 終局時まで



(a) ウェブのみ (P-1)



(b) ウェブおよびハンチ(P-2)写真-4 CFRP グリッドの損傷状況

相対変位は急増していない。このことは、図-11 (b-2) と同図 (c-2) の上下側のハンチに発生する応力の違い とも整合しており、ハンチまでグリッドを配置すること により、補強部界面の付着特性が向上して十分な定着力 が確保されていることが示唆された。

7. 有効ひずみを用いたせん断耐力の評価

補強試験体のせん断耐力について、グリッドの保有せん断耐力は式(3)により算出した⁵⁾。ここで、 γ_b は1.15として設計値を算出した。 $y = A_w \cdot \varepsilon_{w'} \epsilon_{fwd} \cdot (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s \cdot z / \gamma_b$ (3)

- A_w : 区間 S_s におけるグリッドの総断面積(mm²)
- E_w : グリッドのヤング係数(N/mm²)
- *α*_s:グリッドが部材軸となす角度
- *S*_s: グリッドの配置間隔(mm)
- ここに,終局限界状態におけるせん断方向のグリッド







表-4 せん断耐力の比較

のひずみの設計用値 *ε_{fwd}は*,文献 5)による有効ひずみ, **式(4)**により求めた。

 $\varepsilon_{fwd} = [f'_{mcd} \cdot p_w \cdot E_{fu} / (p_{web} \cdot E_w)]^{0.5} \times 10^{-4}$ (4)

 $p_w = A_s / (b_w d)$, $p_{web} = A_w / (b_w S_s)$

 b_w : 部材の幅(mm)

*α*_s: グリッドが部材軸となす角度

 A_S : 主筋の断面積(mm²), d: 有効高さ(mm)

 E_{fu} : 引張補強筋(主鉄筋)のヤング係数(N/mm²)

表-4 にせん断耐力の比較を示す。実験値と設計値の比 は、いずれも 1.00 以上であり、有効ひずみを考慮すれば 安全側に評価できることがわかる。ただし、 P-1 の実験 値と設計値の比は P-2 のそれより小さいため、これは前 述のようにグリッドの定着力不足に起因するものであ り、終局時に補強部界面に剥離が生じたためである。

図-14 に P-1, P-2 の最大荷重までの各計測位置のひず みの最大値の分布を示す。また,破線の値は,最大ひず みの平均値である。これははりの高さおよび軸方向の全 ての計測位置の平均値であるが,ウェブのみ補強 P-1 よ り,ウェブおよびハンチ部補強の P-2 のグリッドの最大 ひずみの平均値が小さく,このことは P-2 の方が付着特 性が良かったことに起因するものと推察される。

また, P-1 および P-2 のひずみについて図-15 にまとめ た。同図中には実験値に加えて,式(4)から算出され る設計上の有効ひずみと FEM 結果を示している。ここ で,P-1 の設計上の有効ひずみは実験値と同値であるこ とがわかる。また,P-2 については,両者に数百マイク ロの違いがあるものの,ほぼ同じであると考えられる。 また,FEM においても,P-1 の最大ひずみの平均値の方 が P-2 のそれに比べて大きな傾向と実験を再現しており, 補強部界面の付着性状の違いが明らかになった。





8. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 隔壁の補強領域をウェブのみとした場合は、ウェブ に加えてハンチも補強した場合に比べて、せん断耐 力および剛性はやや劣る傾向にある。これは、ハン チまで補強した場合は、ハンチで十分な定着力を確 保できることに起因する。
- (2) CFRPグリッドによりウェブおよびハンチを補強した試験体のせん断耐力は、無補強のものに比べ向上し、設計値および解析値と同等であった。また有効ひずみの考え方を用いることで、実際のグリッドに発生するひずみを適切に評価できる。
- (3) CFRP グリッドの必要定着長は面内定着3格点とされているが、本研究のように面外定着においても準用できることわかった。
- (4) 補強部界面の付着特性をモデル化することにより、 グリッドに発生するひずみや破壊性状,さらに補強 部界面の付着特性を再現した。

参考文献

- 1) 福井鐵鋼(株)http://www.tecco.co.jp/business/
- 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、2013.7
- 秋山攻樹、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, 2011.4
- コンクリート委員会:コンクリート標準示方書,設 計編,2008.3
- 5) 土木学会:連続繊維補強を用いたコンクリート構造 物の設計・施工指針(案)[設計編], 1996.9