

論文 比較的大きい断面を有す炭素繊維グリッドの重ね継手の力学的特性

宮内 克之*1・下枝 博之*2・小林 朗*3

要旨: 炭素繊維グリッドの継手の方法としては、一般的に重ね継手が用いられる。重ね継手の方法には、添接筋を設ける場合と、添接筋を設けない場合がある。CFG を耐震補強用の軸方向筋として用いた場合、その継手部分は単純引張りではなく、曲率を有した曲げ引張りの状態になるものと考えられる。そこで、CFG の重ね継手を有す RC はり試験体の曲げ試験を行い、継手部の力学的特性について検討した。その結果、平均曲率が 0.04 1/m を超えない範囲では、炭素繊維グリッドに継手を設けた場合においても、平面保持の仮定が成り立つものと考えられ、補強断面においても RC 部材断面と同様の曲げ理論を適用できることなどが明らかになった。

キーワード: 炭素繊維グリッド, 継手, 重ね継手, 曲げ補強, 乾式吹付け

1. はじめに

既設の鉄筋コンクリート (RC) 道路橋橋脚の補強方法としては、RC 巻き立て工法、鋼板巻き立て工法、連続繊維シート貼付け工法などが主に用いられている。道路橋橋脚の多くが水環境や海岸に近い地域にも多く存在すること、河川内橋脚では河積阻害率が問題となることや施工期間が限定されることなどを考慮すると、既存 RC 道路橋橋脚の補強方法としては、良好な耐久性、少ない断面増し厚、施工期間の短縮化 (良好な施工性) などが求められる。これらの特徴を併せ持つ耐震補強方法として炭素繊維グリッド (以下、CFG) とポリマーセメントモルタル (以下、PCM) の乾式吹付け工法を併用した方法が考えられる¹⁾。

一般的な RC 巻き立て工法の場合の補強による断面の増し厚 250~300 mm と比較すると、CFG を用いた耐震補強工法の場合、補強による増し厚は 40~50 mm 程度と非常に少なくできる可能性がある。したがって、CFG を橋脚の耐震補強に用いることは極めて有用なことである。しかし、CFG を補強に使用する場合、ある程度の断面積 (筋量) が必要となり、比較的大きい断面積の大きい CFG を使用する必要がある。

ところで、既存 RC 構造物に補強用の CFG を設置する場合、CFG 製造時の制約により、部材軸方向あるいは部

材軸直角方向に継手を設けなければならない場合が想定される。CFG の継手の方法としては、一般的に重ね継手が採用される。重ね継手の形式には、添接筋を設ける場合 (以下、タイプ 1, 図-1 (a)) と、添接筋を設けない場合 (以下、タイプ 2, 図-1 (b)) がある。いずれの場合においても、継手の重ね長としては、一般的にグリッド 3 格点が採用される²⁾。この 3 格点という重ね長は、CFG に一軸方向の単純引張りを与えた場合を根拠としている。しかしながら、CFG を耐震補強用の軸方向筋として用いた場合、その継手部分は単純引張りではなく、曲率を有した曲げ引張りの状態になるものと考えられる。また、せん断補強筋として用いた場合には、その拘束効果の大小も耐震性に与える影響は大である。特に橋脚基部における既設コンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈を防ぐためには、CFG の継手部分はその能力を十分に発揮し一体性を保ち、拘束効果が低下しないことが必須である。

そこで、既存 RC 道路橋橋脚の耐震補強への CFG の利用を考慮し、比較的大きい断面を有す CFG の重ね継手を有す RC はり試験体を用いた曲げ試験を行い、継手部の力学的特性について検討した。また、CFG の重ね継手部の破壊により補強部材が終局を迎えた場合、破壊形式が脆性的になる可能性が大であるため、継手部破壊後も補

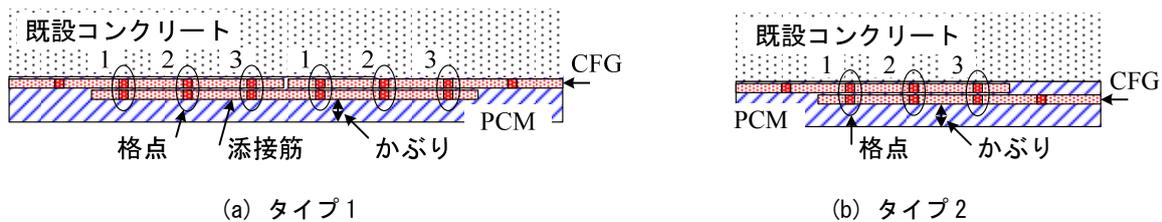


図-1 CFG の重ね継手

*1 福山大学 工学部 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 StoCretec Japan (株) 代表取締役社長

*3 新日鉄住金マテリアルズ (株) コンポジット社 社会資本材料事業部 技術部長 (正会員)

強部材のじん性を確保するための重ね継手部の補強方法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験計画を表-1に、試験体の概要を図-2に示す。また、鉄筋およびCFGの力学的特性を表-2、3に、はり実験時におけるコンクリートとPCMの力学的特性を表-4に示す。

実験要因は、CFGの筋の太さおよび重ね継手の種類で

ある。CFGの太さとしては、一本の筋の断面積がそれぞれ65.0 mm²、100.0 mm²のCR13およびCR16の2種類を使用した。なお、格子間隔はいずれも100 mmである。CFGの重ね継手の種類として、添接筋を配置した場合(タイプ1:試験体C13W3, C16W3)と添接筋を配置せず単に重ねた場合(タイプ2:試験体C16L3)の2種類に関して検討した。CFGの重ね継手長はいずれの場合においてもグリッド3格点²⁾とした。

重ね継手部に結束を有す試験体(*B*)においては、重ね継手部の全ての格点をアラミド繊維(断面積:1.93

表-1 実験計画

試験体	CFG		継手		PCM		はりの全高さ(mm)	載荷方法
	種類	全断面積(mm ²)	形式(タイプ)	結束(有無)	吹付け厚さ(mm)	かぶり(mm)		
C13	CR13	65.0*3=195	無	—	33	24	183	単調載荷
C13W3			1	無		15		
C13W3B			1	有		15		
C16	CR16	100.0*3=300	無	—	37	26		
C16W3			1	無		15		
C16W3B			1	有				
C16L3			2	無				
C16L3B			2	有				
C13W3BC	CR13	65.0*3=195	1	有	33	15	183	片側繰返し載荷
C16W3C	CR16	100.0*3=300	1	無	37	15		
C16W3BC			1	有				
C16L3BC			2	有				

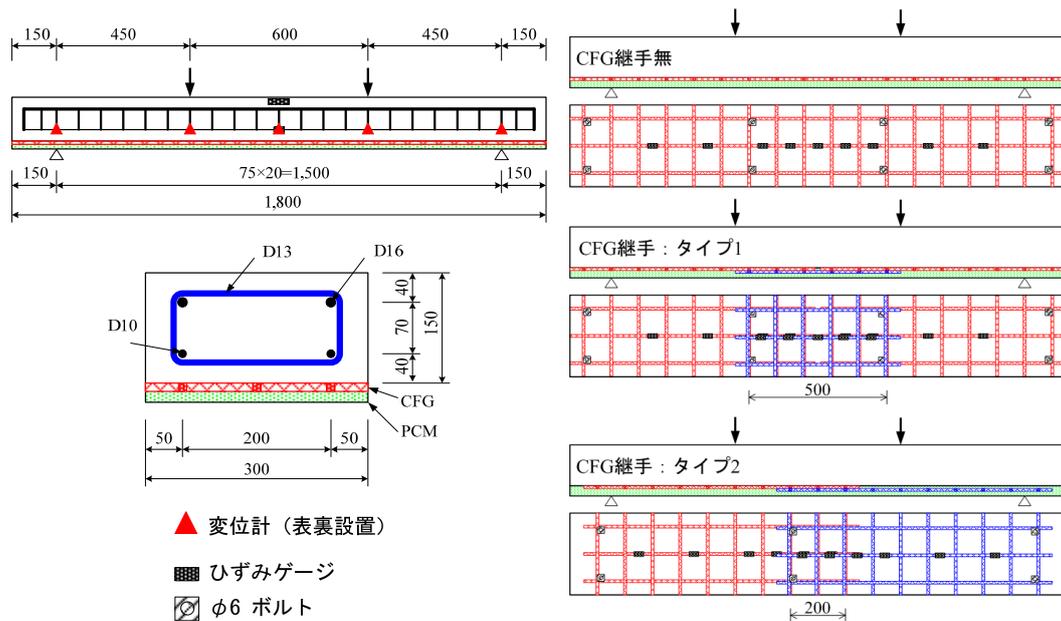


図-2 試験体の概要(単位:mm)

mm²，弾性係数：118 kN/mm²) で結束した。結束の様子を写真-1に示す。一体もので継手の無いCFGを配置した試験体 (C13, C16) と重ね継手を有す試験体に関して単調載荷試験を行った。また，繰返し荷重により結束効果の低下が想定されるため，CFG 格点の結束を有す試験体に関しては，片側繰返し載荷試験も併せて行った。

CFG の設置面をウォータージェットで目荒しを行った後，PCM を乾式で吹き付けた。継手を有す試験体では，かぶり厚が 15 mm となるように吹付け厚さを決定した。

2.2 実験方法

実験は 4 点对称の単調載荷または片側繰返し載荷とし，変位制御方式で行った。片側繰返し載荷においては，スパン中央変位が 1.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 mm において，除荷と載荷を繰り返した。同一変位での繰返し載荷の回数は 3 回とした。実験中は，支点，載荷点，スパン中央の変位およびコンクリート，鉄筋，CFG のひずみを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

図-3 に荷重～スパン中央変位関係を示す。写真-2 に実験終了後における試験体の破壊の様子を示す。

継手を有さない試験体 C13, C16 においては，せん断ひび割れが発生した際に一時的に荷重が低下した。その後，荷重が再び増大し最大荷重に達した後，せん断ひび割れが大きく発達し，荷重が急激に低下した。最終的な破壊形式は，せん断圧縮破壊であった。C13 では，CFG の破断が確認された。

タイプ 1 の重ね継手を有す試験体 C13W3, C16W3 においては，添接筋の一端で発生したひび割れが添接筋と本体の CFG との界面に沿って進行し，添接筋が本体の CFG から剥離した。タイプ 2 の単に CFG を重ねた試験体 C16L3 では，外側の CFG の端で発生したひび割れが内外

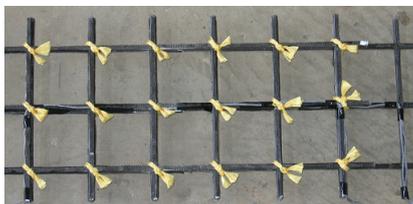


写真-1 格点結束の状況



(a) C16W3 : タイプ 1

(b) C16L3 : タイプ 2

写真-2 試験体の破壊状況

表-2 鉄筋の力学的特性

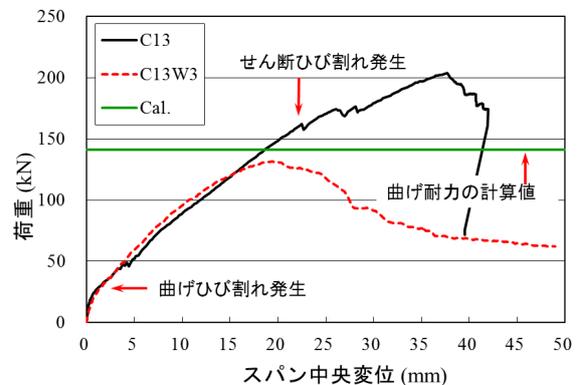
鉄筋種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16(SD345)	411	578	200
D13(SD345)	402	563	200
D10(SD295A)	380	546	200

表-3 CFG の力学的特性

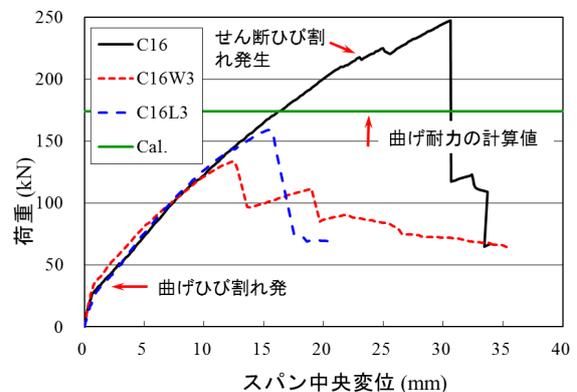
CFG	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	格子筋 1 本の断面積 (mm ²)
	実測値 特性値	実測値 特性値	
CR13	1,592	102.5	65.0
	1,400	100.0	
CR16	1,579	102.3	100.0
	1,400	100.0	

表-4 コンクリートおよび PCM の力学的特性

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	備考
コンクリート	29.0	2.17	27.1	—
PCM	79.8	5.98	33.4	C13*用
	58.9	5.09	32.8	C16*用

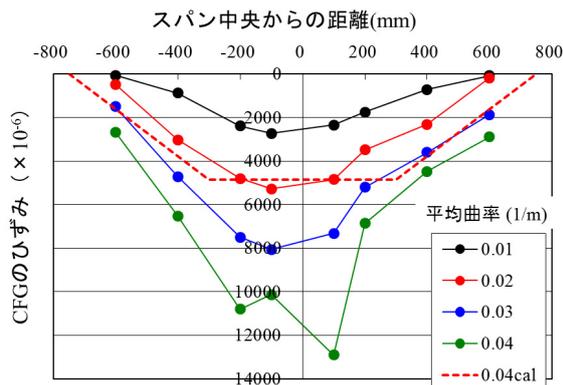


(a) C13 シリーズ

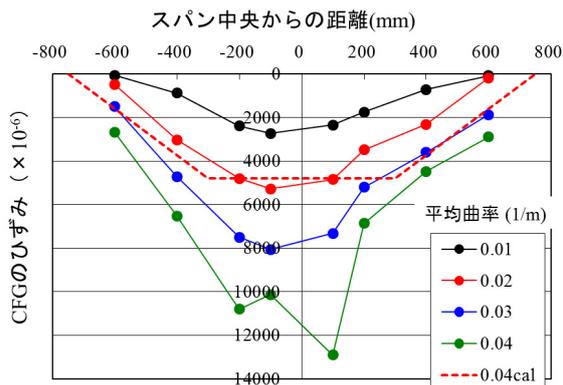


(b) C16 シリーズ

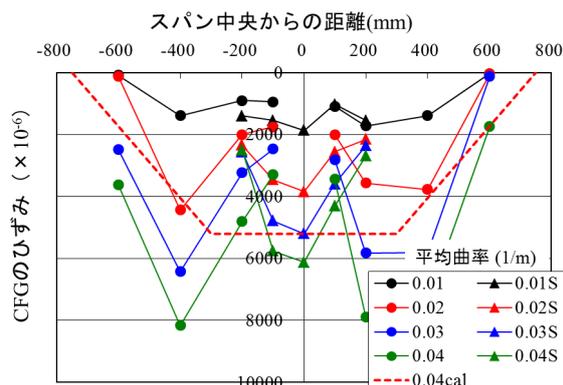
図-3 荷重～スパン中央変位関係



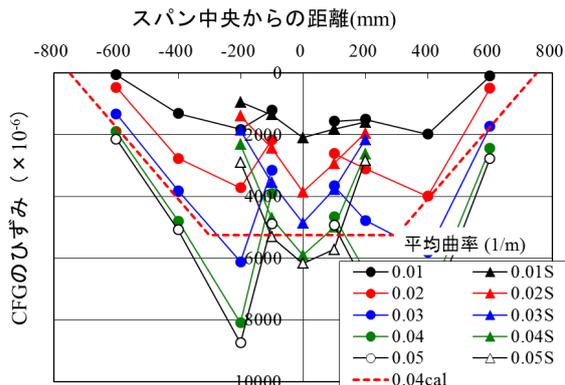
(a) C13



(a) C16



(b) C13W3



(b) C16W3

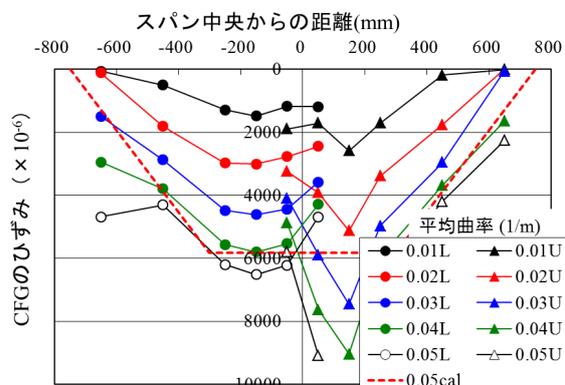
図-4 部材軸方向のCFGのひずみ分布 (C13 シリーズ)

CFGの界面に沿って進行し、外側のCFGが剥離した。

重ね継手を有す試験体 C13W3, C16L3 における最大荷重は、実材料強度を使用しコンクリート標準示方書³⁾に基づいて計算した、CFGの継手を有さない試験体の曲げ耐力 (以下、曲げ耐力の計算値) の約 90%であった。C16W3 では約 75%であった。試験体 C13, C16 の破壊形式は、せん断圧縮破壊であり、最大荷重は曲げ耐力の計算値よりも約 40%大きくなった。

3.2 部材軸方向のひずみ分布

図-4, 5に、部材軸方向のCFGのひずみ分布を曲げスパンの平均曲率との関係で示す。平均曲率は、スパン中央および載荷点に設置した変位計によるたわみ量を用いて、3点を通る円の曲率として求め、部材表裏の平均値を使用した。また、曲げ理論により算出したCFGのひずみを示す。継手を有さない試験体 C13, C16 においては、ひび割れ発生による局所的なひずみの増大はあるものの、平均曲率が 0.04 1/m 程度までは、理論値と同じくほぼ台形分布をしていることがわかる。タイプ 1 の継手を有す試験体 C13W3, C16W3 においては、平均曲率が 0.04 1/m 程度までは CFG の継手が十分に機能していることがわかる。平均曲率が 0.04 1/m のときのスパン中央における添接筋のひずみは、C13W3 で $6,120 \times 10^{-6}$ 、C16W3 で $5,910 \times 10^{-6}$ であった。これらの値は、CFG の終局ひずみの約



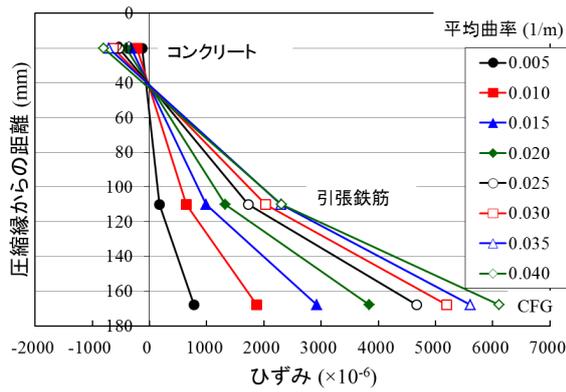
(c) C16L3

図-5 部材軸方向のCFGのひずみ分布 (C16 シリーズ)

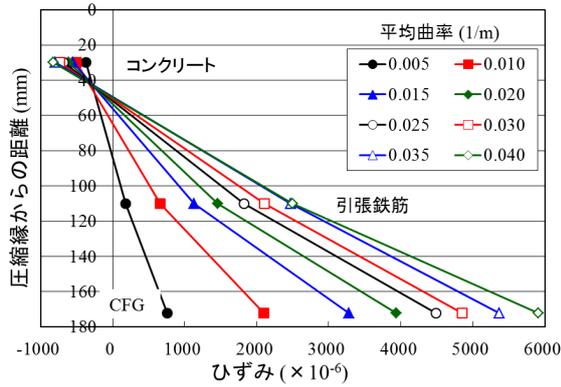
40%に相当する。一方、タイプ 2 の継手を有す試験体 C16L3 では、平均曲率が 0.05 1/m 程度までは継手が十分に機能していることがわかる。また、平均曲率が 0.05 1/m のときのスパン中央における CFG のひずみは $6,000 \sim 6,500 \times 10^{-6}$ 程度であった。これは CFG の終局ひずみの約 40%に相当する。

3.3 部材断面内におけるひずみの分布

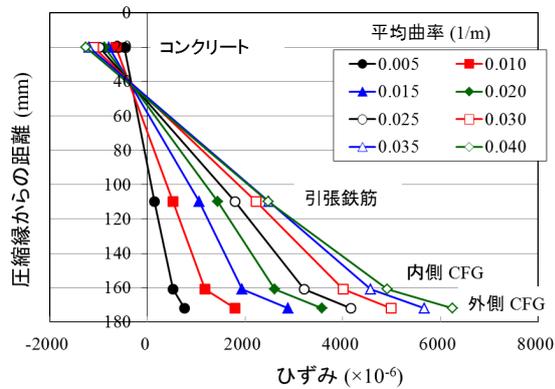
図-6は、継手を有す試験体について、スパン中央における部材横断面内のひずみの分布を示したものである。平均曲率が 0.04 1/m を超えない範囲では、部材断面内におけるひずみはほぼ直線分布を示していることがわかる。すなわち、平均曲率が 0.04 1/m を超えない範囲では、CFG



(a) C13W3



(b) C16W3



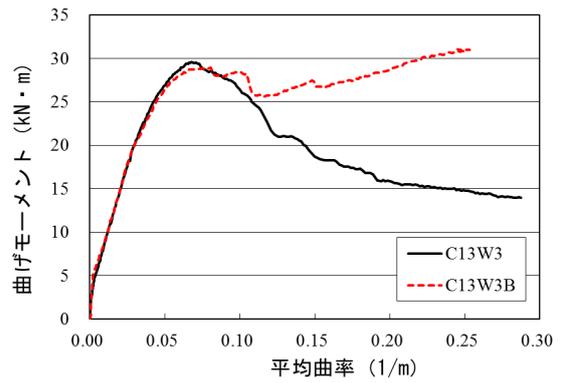
(c) C16L3

図-6 スパン中央における部材断面内のひずみの分布

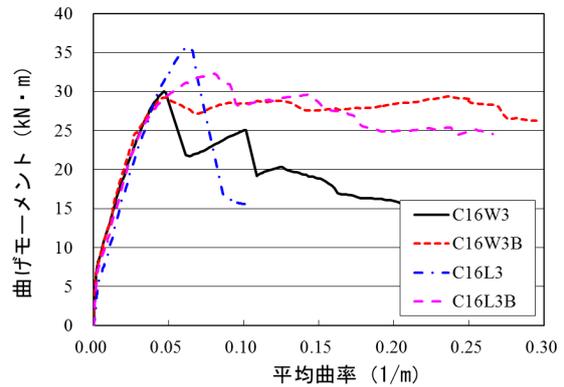
の継手を有す断面においても平面保持の仮定が成り立つものと考えられ、RC部材断面と同様の曲げ理論を適用できるものと考えられる。

3.4 継手部における格点結束の効果

継手部におけるCFGの格点を、アラミド繊維で結束した試験体と結束していない試験体の曲げモーメント～平均曲率の関係を図-7に示す。継手部の格点を結束していない試験体C13W3、C16W3、C16L3では、最大曲げモーメントに達した後耐力が低下した。一方、継手部の格点を結束した試験体C13W3B、C16W3B、C16L3Bでは、一旦耐力が低下したものの、その後も大幅な耐力の低下は無



(a) C13シリーズ



(b) C16シリーズ

図-7 継手部の格点を結束した試験体の曲げモーメント～平均曲率関係

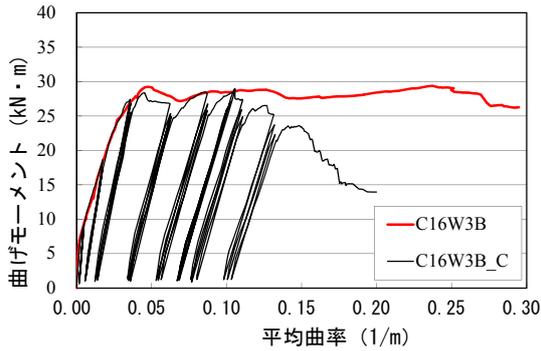
く、平均曲率が0.25 1/mという大変形時においても、最大曲げモーメントの約80%を低下することはなかった。このことより、CFGの継手部においてCFGの格点同士をアラミド繊維で結束することは、CFGの重ね継手が力学的な機能を失った後も継手の安全性を確保する役割を十分に果たすものと考えられる。

3.5 格点の結束に及ぼす繰返し载荷の影響

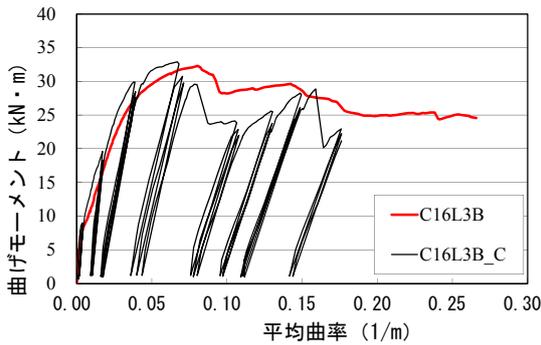
図-8に、継手部の格点を結束した場合に関して、単調载荷の場合と片側繰返し载荷の場合の、曲げモーメント～平均曲率の比較を示す。片側繰返し試験を実施した試験体では、平均曲率が0.07~0.10 1/mを超えたあたりから耐力の低下がみられた。しかし、平均曲率が0.05 1/mを超えない範囲では、繰返し荷重を受けることの影響は少ないと考えてよさそうである。

3.6 継手を有す部材の曲げ耐力と変形能

図-9は、各試験体の最大荷重と曲げ耐力の計算値との比を示したものである。CFGの継手を有す試験体においては、継手のタイプ、継手部における格点の結束の有無および片側繰返し载荷の影響はそれほど大きくはなく、C16W3で、その比率は約70~80%、C16L3およびC13W3で約80~90%であった。



(a) C16W3B (継手：タイプ1)



(b) C16L3B (継手：タイプ2)

図-8 繰返し載荷の影響

また、最大荷重時（試験体 C16W3B, C13W3B において、荷重が最初のピークに達する点とした。）の平均曲率を図-10 に示す。最大荷重時の平均曲率は、C16W3 で 0.04 1/m 程度、C16L3 で 0.05~0.07 1/m 程度、C13W3 で 0.06~0.07 1/m であった。

4. まとめ

比較的太い筋の炭素繊維グリッドの継手性能に関して、RC はり試験体を用いた載荷試験を行い、その力学的挙動について検討した。

実験より得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 本実験の範囲では、部材軸方向の炭素繊維グリッドのひずみ分布は、タイプ1の継手を有す場合で平均曲率が 0.04 1/m、タイプ2の継手を有す場合で平均曲率が 0.05 1/m までは、曲げ理論による曲げモーメントの分布形状と同じく、ほぼ台形の分布形状を示した。
- (2) 部材横断面内におけるひずみ分布は、平均曲率が 0.04 1/m を超えない範囲では、ほぼ直線分布を示した。このことより、本実験の範囲では、炭素繊維グリッドに

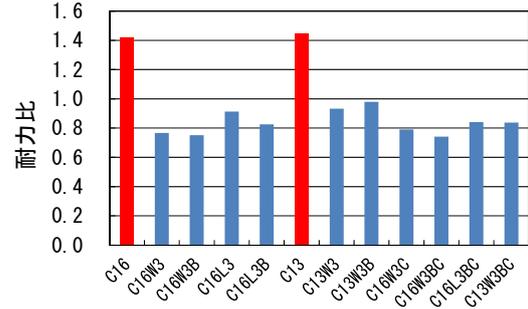


図-9 耐力比（最大荷重／曲げ耐力の計算値）

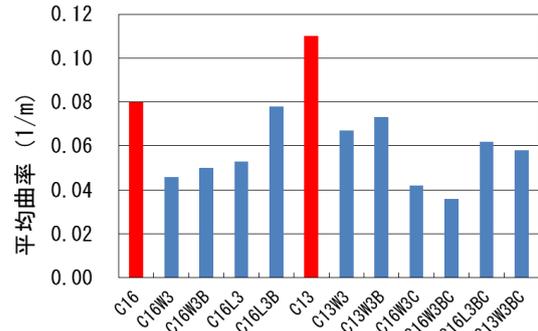


図-10 最大荷重時の平均曲率

継手を設けた場合においても、平面保持の仮定が成り立つものと考えられる。

- (3) CFG の継手部において CFG の格点同士をアラミド繊維で結束することは、CFG の重ね継手が力学的な機能を失った後も継手の安全性を確保する役割を十分に果たすものと考えられる。
- (4) 継手のタイプによらず、継手部の格点をアラミド繊維で結束することにより、繰返し荷重を受けることの影響は少ないと考えてよさそうである。
- (5) 継手のタイプ、継手部における格点の結束の有無および片側繰返し載荷が最大荷重に及ぼす影響はそれほど大きくはなく、いずれの試験体においても、最大荷重の曲げ耐力の計算値に対する比は 70~90 %程度であった。

参考文献

- 1) 炭素繊維グリッドと乾式吹付け工法を用いた補強における橋脚躯体基部の拘束効果について、宮内克之、下枝博之、小林 朗、コンクリート工学年次論文集、Vol.34, No.2, pp.1333-1338, 2012.7
- 2) 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）、2001.4
- 3) (社) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]、2007