

論文 チタンメッシュ陽極併用の連続繊維補強材で下面増厚した RC はりの曲げ性状

岡村 雄樹*1・李 春鶴*2・辻 幸和*3・谷口 碩士*4

要旨: 本研究では、チタンメッシュ陽極と炭素繊維の格子状連続繊維補強材(CFRP グリッド)を併用した CFRP グリッド陽極を開発し、下面増厚補強工法による RC 構造物の補強工法への適用を検討する。チタンメッシュ陽極と CFRP グリッドを併用した場合の RC はりの曲げ性状を確認するとともに、積層モデルによる断面解析プログラムを作成して、曲げ性状の定量化を図り、実験値との比較・検討を行った結果を報告する。

キーワード: CFRP グリッド, チタンメッシュ陽極, ポリマーセメントモルタル, CFRP の継手部, 曲げ性状

1. はじめに

チタンメッシュを用いた電気防食工法は、RC 構造物の鉄筋防食に実績がある。また CFRP グリッドを用いた下面増厚補強工法は、曲げ耐力の向上に有効であることは既に報告した^{1),2),3)}。しかし、チタンメッシュ陽極と CFRP グリッドを併用して、CFRP グリッドの格子に線状のチタンを巻きつけた CFRP グリッド陽極(陽極寿命 40 年)の実験例および実施例はない。CFRP グリッド陽極が RC はりの曲げ性状に及ぼす影響として、防食電流による CFRP グリッドの強度低下の有無が、検討し確認すべき項目として挙げられる。また、この影響によってはポリマーセメントモルタル(以下、PCM と略称する。)の剥離等を起こし、補強した RC 部材の耐力低下を生じることが懸念される。

本研究は、防食電流の通電後の RC はりの曲げ性状について明らかにするとともに、積層モデルによる断面解析プログラムを作成し、曲げ性状の定量化を図り実験値との比較・検討を行った結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 供試体の概要

RC はり供試体の概要を表-1 に、コンクリートの示方配合を表-2 にそれぞれ示す。RC はり供試体は、CFRP グリッドの継手部の有無および防食電流を変化させた 2 シリーズ(SN, SJ シリーズ)とし、合計 8 体作製した。CFRP グリッドに継手部を有する場合には、継手部が力学的性状を低下させる要因となるため、継手の有無についても検討することとした。

さらに、各シリーズにおいて防食電流による影響を把握するために、防食電流を通電しない供試体(A0)、電流量を通常の電流(15mA/m²,A15)と最も厳しい条件の電流(600mA/m²,A600)、その中間の電流(75mA/m²,A75)となるように水準を決定した供試体とし、それぞれの影響を確認することとした。供試体 S0 は、比較対象のために腐食環境下に暴露されていない健全な供試体であり、CFRP グリッドによる無補の無いものである。

表-1 RC はり供試体の概要

| シリーズ名 | 供試体名 | 補強の有無 | 継手部の有無 | 防食電流(mA/m ²) | 備考 |
|-------|---------|-------|--------|--------------------------|----------------|
| PL | S0 | なし | — | — | — |
| SN | SN-A15 | あり | なし | 15 | 通常 |
| | SN-A75 | | | 75 | 40 年分を 5 年通電相当 |
| | SN-A600 | | | 600 | 40 年分を 1 年通電相当 |
| SJ | SJ-A0 | あり | あり | 0 | — |
| | SJ-A15 | | | 15 | 通常 |
| | SJ-A75 | | | 75 | 40 年分を 5 年通電相当 |
| | SJ-A600 | | | 600 | 40 年分を 1 年通電相当 |

表-2 コンクリートの配合

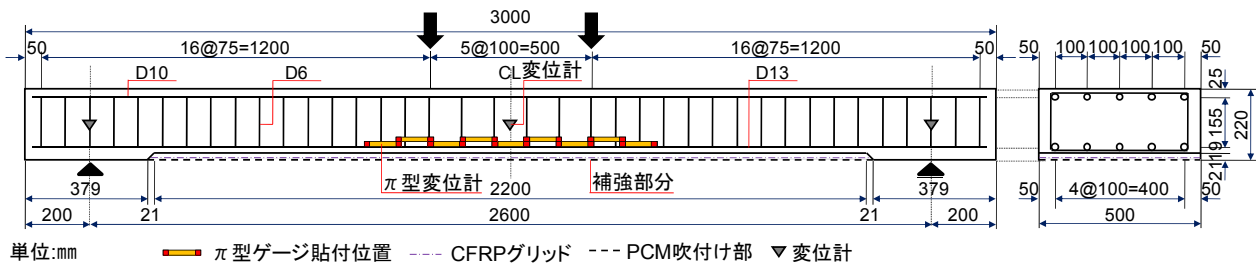
| 設計基準強度(N/mm ²) | スランブ(cm) | 水セメント比(%) | s/a(%) | 単位量(kg/m ³) | | | | |
|----------------------------|----------|-----------|--------|-------------------------|-----|-----|------|------|
| | | | | セメント | 水 | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 |
| 20 | 8 | 59 | 46.5 | 241 | 154 | 880 | 1014 | 2.89 |

*1 前橋工科大学 工学部社会環境工学科准教授 工学博士 (正会員)

*2 宮崎大学 工学教育研究部准教授 博士(工学) (正会員)

*3 前橋工科大学 学長 工学博士 (正会員)

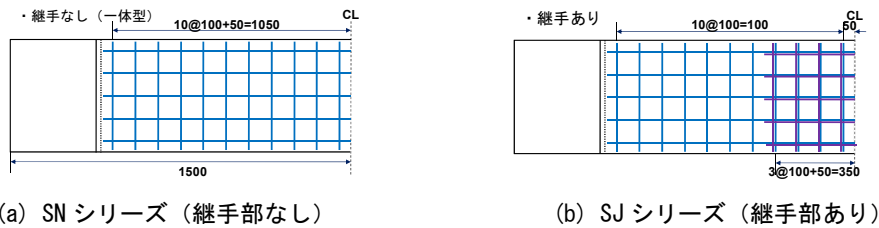
*4 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンポジット社 マネージャ



(a) 供試体の正面図

(b) 供試体の断面図

図-1 供試体の形状寸法および計測位置



(a) SN シリーズ (継手部なし)

(b) SJ シリーズ (継手部あり)

図-2 CFRP グリッドの配置状況

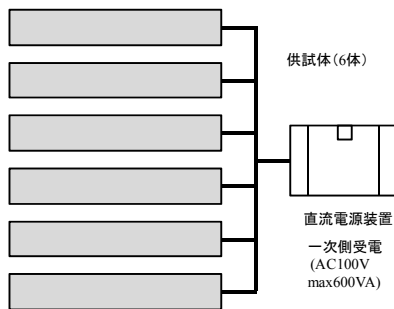


図-3 直流電源装置



写真-1 防食電流の通電状況



写真-2 荷重試験状況

CFRP グリッドの配置方法の違いとして、継手部の無い供試体の SN シリーズは、下面に、格子間隔が 100mm×100mm (公称断面積: 39.2mm²) の幅が 500mm、長さが 2100mm の一体型 CFRP グリッドを下縁から 15mm の位置に配置した。継手部を有する供試体の SJ シリーズは、幅が 500mm、長さが 1050mm の 2 枚の CFRP グリッドを配置した際、スパン中央に生じる継目を覆うように幅が 500mm、長さが 800mm の継手用 CFRP グリッドを、下側から重ね合わせて配置した。

供試体の形状寸法および計測位置を図-1 に、CFRP グリッドの配置状況を図-2 にそれぞれ示す。高さが 220mm、幅が 500mm、長さが 3000mm とし、コンクリートの設計基準強度は 20 N/mm²、鉄筋を SD295A とした。腐食環境を与えるため、打込み時に塩分を 6kg/m³ 添加し、材齢 28 日まで湿布養生を行った。

その後、実構造物における使用を模擬するため、材齢 28 日において、初期損傷として 1 次荷重を行った。1 次荷重は、コンクリートの引張力を無視した弾性計算による引張鉄筋の引張応力度が 300 N/mm² に達するまで荷重し、供試体にはひび割れを発生させた。

PCM と RC はり供試体の付着が良好になるように、供

試体下面をブラスト工法により研掃した。ブラスト処理にはサンドブラストを用いて、粗骨材が見えるまで削り、凹凸を設けた状態にした。その後、供試体下面に CFRP を配置し、PCM を吹き付け、下面増厚補強を行った。養生は、材齢 28 日まで湿布養生を行った。

防食電流のための直流電源装置の設置を図-3 に示す。写真-1 は、2 年間防食電流を通電させた供試体の設置状況を示したものである。

2 次荷重として、静的曲げ荷重試験 (支点間距離 2600mm、等モーメント区間 500mm) を 1 次荷重と同様に行った (写真-2 参照)。

2.2 使用材料

鉄筋および CFRP グリッドの力学的特性を表-3 に示す。引張鉄筋に D13 (公称断面積: 126.7 mm²)、圧縮鉄筋に D10 (公称断面積: 71.33 mm²) をそれぞれ 5 本ずつ配置した。せん断補強筋には D6 (公称断面積: 31.67

表-3 鉄筋およびCFRPの力学的特性

| 補強材の種類 | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (x10 ³ N/mm ²) |
|--------|---------------------------|---------------------------|---|
| D13 | 366 | 525 | 1.90 |
| D10 | 377 | 517 | 1.87 |
| D6 | 375 | 528 | 1.89 |
| CFRP | — | 1794 | 1.81 |

mm²) を使用し、せん断スパン内は 75 mm 間隔に、等曲げモーメント区間内は 100mm 間隔にそれぞれ配置した。

2.3 載荷および測定方法

載荷は、支点間隔が 2600 mm の 2 点単純支持とし、載荷点間隔を 500mm の 2 点載荷とした。たわみの測定に変位計を設置し、曲げひび割れ幅の測定には長さが 100 mm の π 型ゲージを、コンクリートのひずみの測定には長さが 60 mm のワイヤストレインゲージをそれぞれ貼付して、計測を行った。配置位置を図-1 に示す。

3. 積層モデルによる RC はりの断面解析

CFRP を下面に配置した RC はりの曲げ性状を定量的に検討するため、図-4 に示す積層モデルの概念を用い、コンクリートと鉄筋およびCFRP の付着を完全付着、コンクリート躯体とPCM も完全付着とそれぞれ仮定して、はりの断面解析を行った。その場合、はり供試体の圧縮縁から引張縁までのひずみを直線分布とする平面保持が成り立つものとした。

コンクリートおよび鉄筋の圧縮域、引張域の構成則はともに、土木学会コンクリート標準示方書に記載されている最も一般的な構成則を用いた。また、本研究で使用した連続繊維補強材のCFRPは構成則がまだ確立されていないため、図-5 に示す応力-ひずみ直線を用いた。すなわち、CFRP の引張強度まで線形関係を保ち、その後破断を生じると仮定して解析を行った。

曲げひび割れ幅の算出には、式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書に記載されている算定式を用いた。

$$W = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_{csd} \right] \quad (1)$$

ここに、 k_1 ：鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数（異形鉄筋の場合は 1.0）、 k_2 ：コンクリート品質がひび割れ幅に及ぼす係数、 k_3 ：引張鋼材の段数の影響を表す係数、 c ：かぶり(mm)、 c_s ：鋼材の中心間隔(mm)、 ϕ ：鋼材径(mm)、 σ_{se} ：鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加分(N/mm²)、 E_s ：鋼材の弾性係数(N/mm²)、 ε_{csd} ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値(今回は湿潤養生を十分に行ったため、収縮の影響は小さいものとして 0 とした。)である。

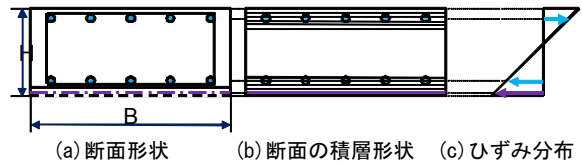


図-4 積層モデルの概要

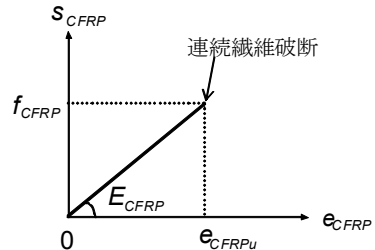


図-5 CFRPの構成則

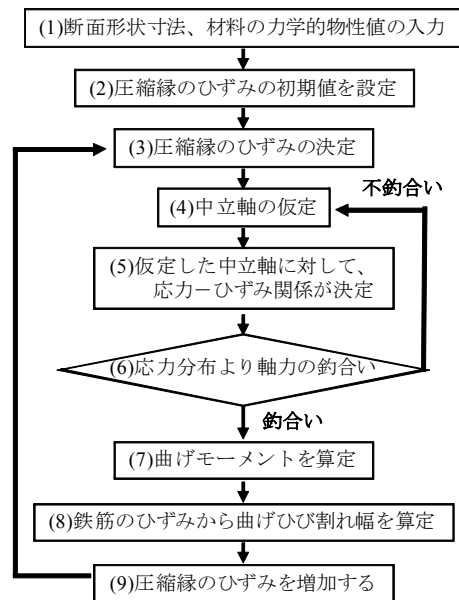


図-6 解析フロー

断面解析プログラムの概要については、図-6 に示すとおりである。圧縮縁のひずみを設定し直し、補強材とコンクリートの軸方向力が等しくなるように、中立軸を繰り返し計算で求め、その時の曲げモーメントと補強材のひずみや曲げひび割れ幅を算定する。そして、圧縮縁のひずみを増分して設定し、同様の計算を、圧縮縁のひずみが終局ひずみに達するまで行うものである。

4. 曲げひび割れ発生荷重、引張鉄筋の降伏荷重および最大荷重

曲げひび割れの発生荷重、引張鉄筋の降伏荷重、最大荷重および破壊形式を表-4 に示す。表において曲げひび割れ発生荷重とは、2 次載荷試験を行った際の引張縁のひずみの急変点から求めたものである。

表-4 各荷重の実験値、解析値および破壊形式

| シリーズ名 | 供試体名 | 補強の有無 | 継手部の有無 | 防食電流 (mA/m ²) | 荷重(kN) | | | | | | 破壊形式* |
|-------|---------|-------|--------|---------------------------|------------|------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | 曲げひび割れ発生荷重 | | 引張鉄筋降伏荷重 | | 最大荷重 | | |
| | | | | | 実験値 | 解析値 | 実験値 | 解析値 | 実験値 | 解析値 | |
| PL | S0 | なし | — | — | 7.3 | 8.3 | 81.7 | 80.0 | 93.8 | 83.6 | B |
| SN | SN-A15 | あり | なし | 15 | 34.3 | 28.0 | 102.8 | 102.3 | 167.5 | 147.5 | B |
| | SN-A75 | | | 75 | 38.8 | | 102.1 | | 182.7 | | B |
| | SN-A600 | | | 600 | 30.8 | | 100.7 | | 173.7 | | B |
| SJ | SJ-A0 | あり | あり | 0 | 32.5 | — | 106.6 | — | 141.6 | — | P |
| | SJ-A15 | | | 15 | 33.2 | | 104.5 | | 146.1 | | P |
| | SJ-A75 | | | 75 | 31.1 | | 110.1 | | 147.1 | | B |
| | SJ-A600 | | | 600 | 32.9 | | 110.8 | | 153.7 | | B |

*B-曲げ引張破壊, P-ピーリング破壊

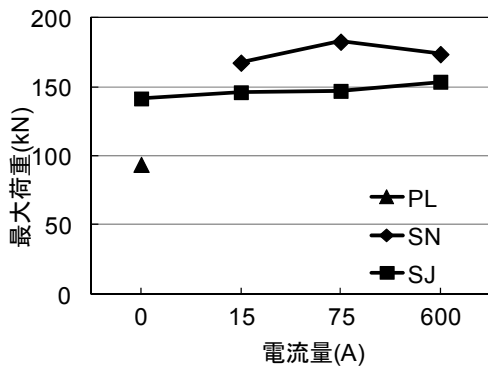


図-7 最大荷重と継手部の有無および電流量との関係



(a) SJ-A0 の鉄筋



(b) SJ-A600 の鉄筋

写真-3 破壊後の鉄筋の腐食状況

継手部の有無や電流量の違いによる最大荷重の関係を図-7に示す。CFRP グリッドで補強した供試体は、継手部の有無にかかわらず、無補強の供試体 S0 に比べ各荷重が 1.5 倍以上増加したことから、CFRP グリッドによる補強工法の効果が確認できた。また、継手部を有する供試体は、継手部の無い供試体よりも最大荷重が約 2 割程度小さかった。これは既往の研究にも報告されているように、継手部端部に応力が集中したため継手部に剥離が生じ、耐力低下に至ったと考えられる³⁾。

電流量の違いによる最大荷重には、あまり差がなかったこ

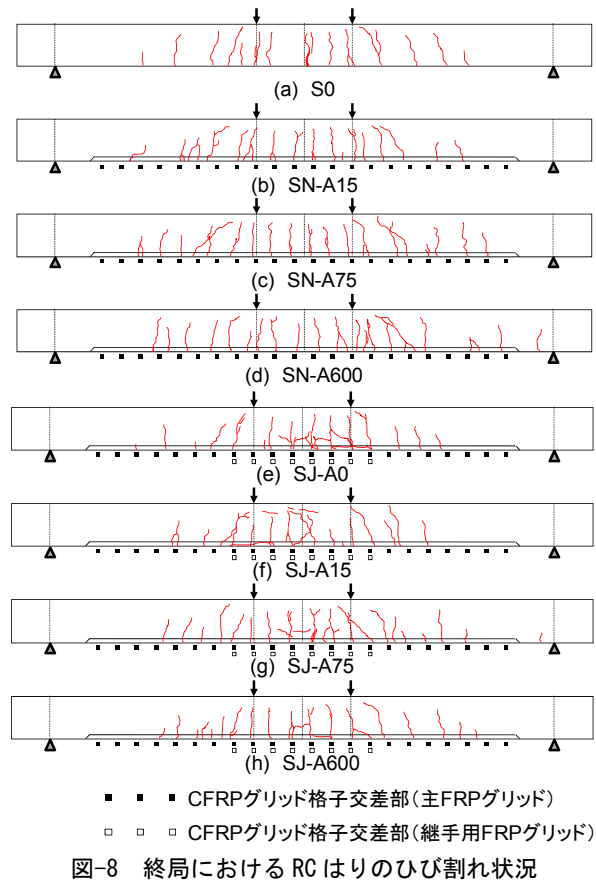


図-8 終局における RC はりのひび割れ状況

とから、防食電流を多く通電しても、CFRP グリッドの損傷はほとんどなかったと推測できる。

破壊後に取り出した供試体 SJ-A0, SJ-A600 の鉄筋の腐食状況を、写真-3 に示す。防食電流の通電の有無にかかわらず、鉄筋の腐食に特に顕著な差は見られず、防食電流の効果は確かめられなかった。これは、RC はりに及ぼす腐食環境が厳しくなかったために、鉄筋の腐食の進行具合に特に大きな変化がなかったと考えられる。

5. ひび割れの発生状況と破壊形式

各供試体の終局時における RC はりのひび割れ状況を図-8 に示す。曲げひび割れ間隔が、ほぼ等間隔に発生していることから、曲げひび割れ発生は、CFRP グリッ

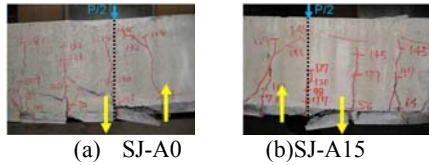


写真-4 終局状態におけるRCはりのひび割れ状況

下の格子交差部の位置に沿うように発生したことが認められる。これは、CFRP グリッドの格子交差部に応力が集中し、等間隔にひび割れが発生したものと考えられる。防食電流量の違いによる影響はあまり小さくなく、同様のひび割れ状態になっていることが認められる。

継手部の無い一体型 CFRP グリッドで補強した SN シリーズでは、4 体の RC はり全てで、曲げひび割れが圧縮側に進展し、曲げ引張破壊に至った。継手部を有する CFRP グリッドで補強した SJ シリーズでは、防食電流量の多い供試体 SJ-A75, SJ-A600 では SN シリーズと同様に曲げ引張破壊した。

一方、継手部を有する供試体の SJ-A0, SJ-A15 でも、CFRP グリッドの格子交差部から曲げひび割れが発生しているが、継手部端部に曲げひび割れと斜めひび割れが介在してコンクリートがブロック化し、そのブロック化したコンクリート片によって下面増厚部が下方に押し下げられ剥離が起り、ピーリング破壊が生じた。このように、CFRP グリッドに継手部が有る場合、ピーリング破壊を起こすことがある。これは、継手部の CFRP グリッド端部に局部的せん断応力が集中すること、曲げひび割れと斜めひび割れが介在し下方に押し下げられるピーリング作用によると考えられる。ピーリング破壊の様子を写真-4 に示す。この写真より、ブロック化したコンクリート片には、増厚部の PCM だけでなくコンクリートも含まれていることがわかる。これは、躯体底面と吹付けモルタルの付着が十分に確保されたことによると考えられる。

6. RC はりのたわみ

図-9 は、補強された供試体と無補強の供試体 S0 の荷重とたわみの関係を示したものである。この図より明らかなように、補強することによりたわみが抑制され、下面増厚の補強効果が得られている。また、継手部の無い一体型 CFRP グリッドの供試体 SN シリーズおよび継手部を有する供試体 SJ シリーズとともに、防食電流量の影響をほとんど受けずに、ほぼ同等のたわみとなった。

7. 平均曲げひび割れ幅

継手部を有する供試体 SJ シリーズの平均曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-10 に示す。平均曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区間に貼付した 5 個の π 型ゲ

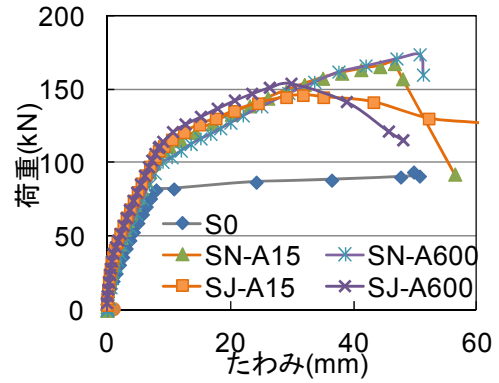


図-9 荷重とたわみの関係

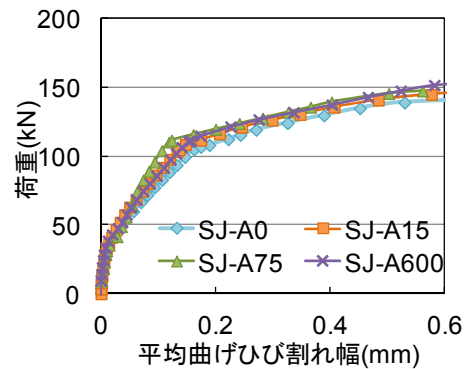


図-10 平均曲げひび割れ幅と荷重の関係

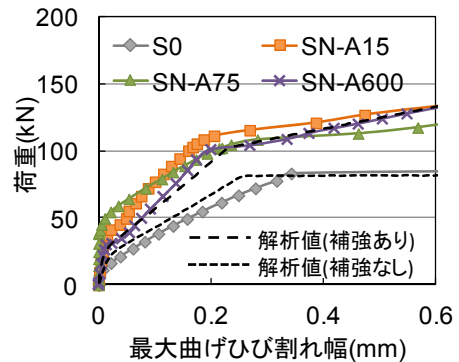


図-11 最大曲げひび割れ幅と荷重の関係

ジの平均値とした。

防食電流を通電することによって、通電していない供試体 SJ-A0 と比べて、平均曲げひび割れ幅が少し小さくなった。しかし、防食電流量の違いによる平均曲げひび割れの値には、あまり差みられなかった。また、継手部の無い一体型 CFRP グリッドの供試体 SN シリーズでも、防食電流量が変化しても、平均曲げひび割れ幅はほとんど変化しなかった。これらは、前述したように、RC はりに与える腐食環境が厳しくなかったと考えられる。

8. 最大曲げひび割れ幅

継手部の無い一体型 CFRP グリッドの供試体 SN シリーズの最大曲げひび割れ幅の実験値と荷重の関係を図-11 に示す。最大曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区

間内に貼付した π 型ゲージで測定したうちの、最大値を示したものとした。

引張鉄筋が降伏するまでの荷重段階において、供試体 SN-A15 に比べて供試体 SN-A75 は、最大曲げひび割れ幅が少し小さくなった。また、電流量の最も多い供試体 SN-A600 の最大曲げひび割れ幅が最も大きくなった。しかしながら、防食電流量が変化しても最大曲げひび割れ幅の変化は小さかった。

9. 実験値と解析値の比較

図-11 中には、供試体 SN シリーズおよび無補強の供試体 S0 における最大曲げひび割れ幅と荷重についての解析値も追記している。また、防食電流を $600\text{mA}/\text{m}^2$ 通電したはりの解析値と実験値を図-12 に示す。なお、図中の実験値は、CFRP グリッドに継手部が無い場合と有る場合について示してある。

断面解析プログラムでは、断面のみで解析を行うため、継手の有無のモデル化は困難であったので、継手の無い CFRP グリッド一体型の供試体の解析値と示している。解析値はまた、4 章に示したように、鉄筋の腐食量が少なく防食電流量の違いによる差があまり見られなかったため、供試体 3 体を同一条件として算出した。

図-11 より明らかなように、実験値と解析結果はほぼ一致しているが、無補強の供試体 S0 において、引張鉄筋の降伏までの曲げひび割れ幅の値に少し差があり、解析値よりも実験値が少し大きかった。1 次荷重によって発生させた初期ひび割れが、2 次荷重において進展し、ひび割れ幅が増加したことによると考えられる。

一方、防食電流を通電したはりの結果をみると、最大曲げひび割れ幅と平均曲げひび割れ幅ともに、継手部なしのほうが継手部ありよりも少し大きくなっている。そして、CFRP グリッドに継手部を有さない場合には、解析値と実験値はほぼ同程度の値を示している。

10. まとめ

新しく考案したチタンメッシュ陽極を併用した CFRP グリッドで下面増厚補強した RC はり供試体を用いて、防食電流も最大で $600\text{mA}/\text{m}^2$ を 2 年間通電した後に荷重実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 防食電流を通電しても、曲げひび割れ発生荷重やたわみには違いがほとんど認められなかった。
- 2) 電流量の違いによる最大荷重にも、あまり差がなかったことから、防食電流を多く通電しても、CFRP グリッドの損傷および RC はりの耐力低下に影響を及ぼさないことが認められた。
- 3) 引張鉄筋が降伏する前までは、継手の有無が曲げ補強効果に及ぼす影響はほとんどなかった。しかし、

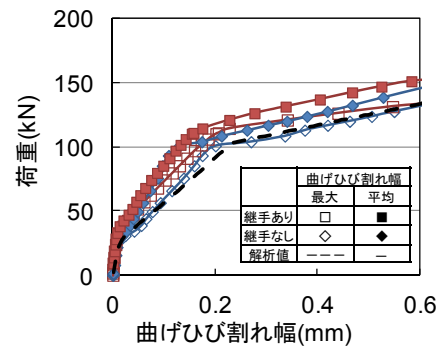


図-12 最大と平均曲げひび割れ幅 [SN-A600 (継手なし) と SJ-A600 (継手あり)]

引張鉄筋が降伏した後においては、継手部がない供試体と比較すると、継手部のあるはりの曲げ剛性が低下し、また継手部端部に比較的大きな剥離応力が生じるため、継手部に剥離が生じ、最大耐力が低下した。

- 4) 積層モデルによるはりの曲げ解析値は、最大曲げひび割れ幅の実験値にほぼ一致した。
- 5) RC はりに与える腐食環境が厳しくなかったため、防食電流量が最も少ない供試体と最も多い供試体ともに、鉄筋の腐食量が少なく、腐食の進行具合に変化がなかった。

謝辞

本研究の実施には、当時群馬大学工学部建設工学科に在籍の大石学（現在、戸田建設株式会社）氏に御援助を頂いた。また、供試体の作製および荷重試験を行うにあたり、ドービー建設工業株式会社森田誠司氏、住友大阪セメント株式会社川俣孝治氏には、多大なご協力を賜りました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小田切芳春, 辻 幸和, 岡村雄樹, 小林朗: 継手部を有する連続繊維補強材による下面増厚した RC はりの疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1915-1920, 2003.7
- 2) 佐藤貢一, 小田切芳春, 辻幸和: 継手部を有する連続繊維補強材による RC はりの下面増厚補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1735-1740, 2004.7
- 3) 辻幸和, 小田切芳春, 岡村雄樹, 佐藤貢一: 継手部を有する連続繊維補強材を用いた RC はりの補強効果, 土木学会論文集, Vol.78, pp.67-80, 2005