

論文 塩害劣化した RC 部材への耐荷力の回復を目的とした HPFRCC と繊維ネットの適用

大橋 亮介*1・前田 徳一*2・浅野 翔也*3・小林 孝一*4

要旨：塩害により劣化した RC 部材について、繊維ネットと複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）を用いた補修方法について検討した。健全な RC 部材と塩害劣化させた RC 部材に HPFRCC、繊維ネットを用いて鉄筋背面まで断面修復補修し、曲げ載荷試験を行った。その結果、HPFRCC で補修することによって降伏荷重、終局荷重が増加し、繊維ネットを併用して補修することで降伏後の荷重の低下を軽減できることが明らかになった。

キーワード：塩害, RC はり, 耐荷性能, HPFRCC, 繊維ネット

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC）は、コンクリートと鉄筋の複合材料であり、力学的に引張りに弱いコンクリートを鉄筋で補強し、錆びやすい鉄筋をコンクリートで保護する、互いの欠点を補った構造体である。

RC 中の鉄筋が塩害により腐食した場合、鉄筋断面積の減少による強度の低下、ひび割れ発生などが、RC 構造物全体としての耐荷性能低下につながる。そのため合理的な補修がより重要となってくる。

そこで、本研究では塩害により鉄筋が腐食した RC 構造物の耐荷性能低下が起こった後に、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）や、繊維ネットを用いた補修を行うことを提案し検討した。

HPFRCC は、引張応力下において複数微細ひび割れを形成し、擬似ひずみ硬化挙動を示す材料であり、ひび割れ幅が極めて小さく物質透過抑制が期待できるため¹⁾²⁾、本研究では補修、防食材料としての使用性を検討した。

繊維ネットは高強度ポリエチレン製のものを使用した。高強度・高弾性率であり、耐アルカリ性に優れ、耐候性にも優れているという特徴を有しているため、補修用材料として注目し、本研究で使用した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では、打設後 7 年経過した供試体を用いた。一部の供試体は、W/C=60%のコンクリート練り混ぜ時に CI を 12kg/m³ 混入しており、塩害による劣化がかなり進行している。材齢 28 日でのコンクリートの圧縮強度は 43N/mm²、引張鉄筋 D10 の降伏強度は 370 N/mm²、引張強度は 496 N/mm²、スターラップに用いたφ6 の降伏強度は 421 N/mm²、引張強度は 526 N/mm²である。

供試体の寸法を図-1 に示す。コンクリートに CI を含む供試体を 7 体、含まない供試体を 4 体用いた。全ての供試体は作製後 7 年間屋外で曝露した。供試体の引張側のかぶりコンクリートを引張鉄筋裏側までウォータージェットにてはつた。その際の目標はつり深さは 30mm である。写真-1 にはつった供試体の様子を示す。なお、鉄筋に断面減少が認められた場合でも鉄筋の交換、差し筋の追加は行わず、ウォータージェットにより表面の腐食生成物が除去されたところに亜硝酸塩系防錆剤を塗布するのみとして、既存の鉄筋をそのまま用いた。

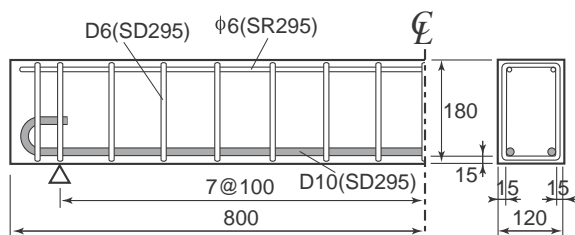


図-1 供試体概要（単位：mm）



写真-1 はつり作業後の供試体

*1 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科（正会員）
 *2 東洋紡績株式会社 スーパー繊維事業部（正会員）
 *3 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻（正会員）
 *4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授 工博（正会員）

2.2 補修材について

(1) HPRCC

繊維は、混入量 2.0%、長さ 12mm(直径 40 μ m)のポリビニルアルコール繊維と、長さ 9mm(直径 12 μ m)のポリエチレン繊維を混合して使用した。HPRCC の配合を表-1 に示す。また、HPRCC 設計・施工指針³⁾に示されている一軸引張試験により引張試験を行った。HPRCC の応力-ひずみ関係を図-2 に示す。

表-1 HPRCC の配合

水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)			フロー (mm)	空気量 (%)
	水	結合材	繊維混入量(vol%)		
34	312	917	2	142	5.0

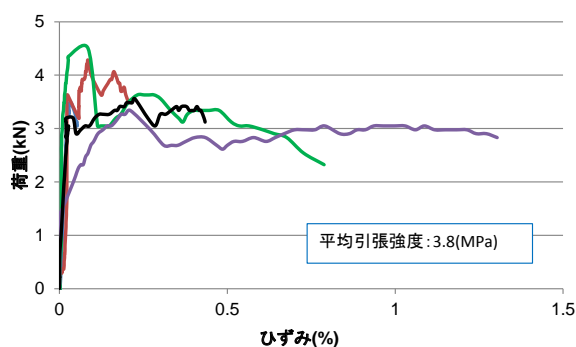


図-2 一軸引張試験結果

(2) 繊維ネット

10mm ピッチの格子状で、格子 5 本あたり 2.4kN の引張強度である。形状を写真-2 に示す。



写真-2 繊維ネット (東洋紡の HP より)

(3) 施工

ウォータージェットにてはつた供試体に積層厚が 30mm となるように HPRCC を吹き付けた。繊維ネットを用いる場合には、鉄筋が隠れる程度まで HPRCC を吹き付けた後、その上に繊維ネットを置き、さらにその上から HPRCC を吹き付けることによって、母材と HPRCC、繊維ネットの一体化を図った。供試体の一覧を表-2 に示す。

2.3 曲げ載荷試験

載荷は等モーメントスパン 300mm、せん断スパン 550mm の 2 点載荷とし、一方向曲げ載荷試験を行った。

計測項目は荷重、変位、ひずみとし、荷重はロードセルにより検出し、変位は支点、載荷点および載荷点間に等間隔で 3ヶ所に設置した高感度変位計によって検出した。

表-2 供試体一覧

供試体名	CLの混入	HPRCC	繊維ネット
CL-1-HP-NET	○	○	○
CL-2-HP	○	○	-
CL-3-HP	○	○	-
CL-4-HP-NET	○	○	○
CL-5-HP	○	○	-
CL-6	○	-	-
CL-7	○	-	-
NC-1	-	-	-
NC-4-HP	-	○	-
NC-5-HP	-	○	-
NC-6	-	-	-

曲げ載荷試験概要を図-3 に示す。曲げひび割れ幅は、等モーメントスパン間から左右に 50mm ずつ延長した 400mm の区間内で測定した。荷重が 10kN、20kN、30kN、たわみが 5mm の時点では全てのひび割れ幅を、たわみが 10mm、15mm の時点では最大ひび割れ幅のみを計測した。計測にはクラックスケール、マイクロスコープを使用した。本研究では目視およびひずみの低下によるコンクリート圧壊または鉄筋破断を確認後、載荷を終了した。

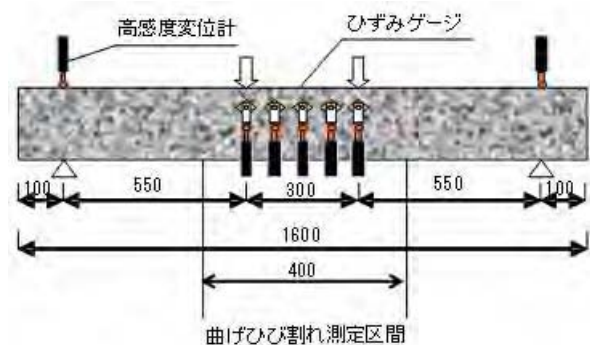


図-3 曲げ載荷試験概要 (単位: mm)

2.4 質量減少率の測定

曲げ載荷試験終了後、コンクリートをはつり、鉄筋を取り出した。載荷点と支点上で切断し、せん断スパンの引張鉄筋(供試体 1 体につき 4 本)を準備した。その後、10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に、60 $^{\circ}$ C、24 時間浸し腐食性生物を除去した。なお、除去しきれなかった腐食性生物をピックで取り除いた。そして質量および長さの測定を行い、式(1)を用いて質量減少率 C(%)を算出した。

$$C = \frac{m \cdot l_c - m_c}{m \cdot l_c} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 m :健全な鉄筋のクエン酸二アンモニウム水溶液浸

潰後の長さ1mm当たりの質量(g), l_c :腐食鉄筋の長さ(mm), m_c :腐食鉄筋の腐食生成物除去後の質量(g)である。

2.5 腐食鉄筋の断面積測定

さび腐食生成物を除去した鉄筋について、非接触式レーザー3D スキャナーを用いて、長さ100mm(目視により最も腐食の進んでいると判断される箇所的前後50mm)範囲を長さ方向に0.4mmピッチ、回転方向0.36°ピッチでスキャンした。鉄筋の表面形状を測定した上でこの区間での最小断面積を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 はり部材の荷重-たわみ関係

曲げ載荷試験により得られた荷重-たわみ関係を図-4に示す。CIを含まない健全な供試体であるNC-1とCIにより劣化しているCL-6の結果を比較すると、劣化により最大で耐荷力が約15%低下していた(図-4上)。

劣化のないNC供試体と劣化はないがHPFRCCにより補修したNC-HP供試体とを比較すると(図-4中参照)、HPFRCC

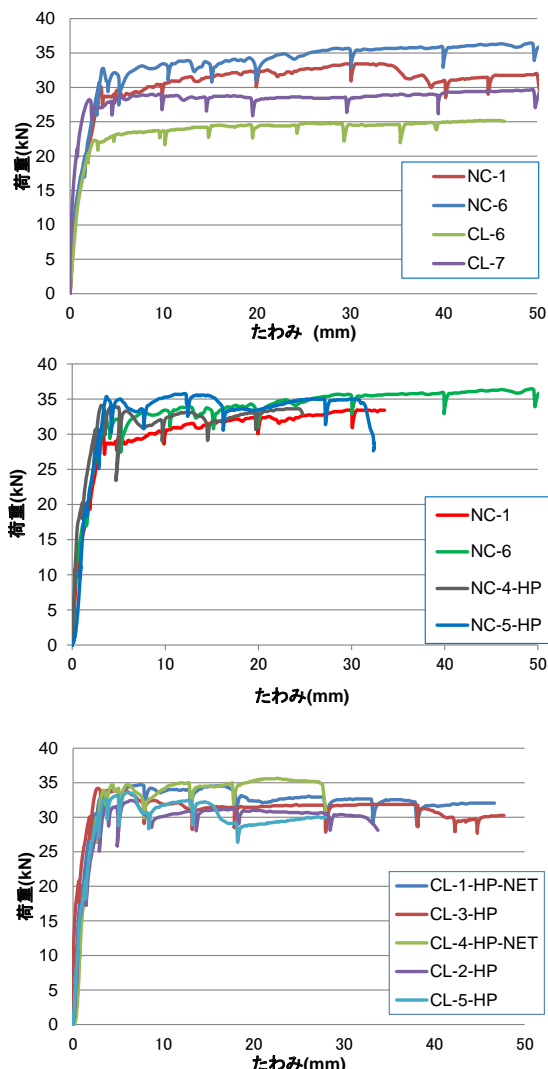


図-4 荷重-たわみ関係

で補修を行った場合には降伏荷重が増加するが、降伏後にたわみが10mm程度に到達する前に荷重が一時的に低下し、その後荷重が再び増加する傾向が見られた。これは本研究で用いたHPFRCCの引張特性に起因すると考えられる。すなわち、部材の降伏前後まではHPFRCCには複数微細ひび割れのみが生じ、断面内で引張力を分担しているために部材の降伏荷重が増加する。しかし、図-2に示したようにHPFRCCの靱性はそれほど高くないため、それ以上HPFRCCに生じるひずみが大きくなると、もはや断面内で引張力を分担することができず、荷重は低下するものと考えられる。ただし降伏後に荷重は低下するが、たわみ10mm以上の領域での荷重は未補修の供試体よりも大きい。この原因については次節以降で論じる。HPFRCCによる降伏荷重の向上効果はCLシリーズでも認められる(図-4上と下)。

CLシリーズにてHPFRCCと繊維ネット両者を用いた場合には、荷重、部材降伏後のたわみの増加に伴う荷重の低下が比較的小さかった。これは繊維ネットにより、大変形後もHPFRCCにおけるひび割れの拡大とひずみの局所化が抑制されたためであると考えられ、次々節で詳しく検照する。

3.2 鉄筋の性状

鉄筋の質量減少率と部材の最大荷重を表-3に、またその両者の関係を図-5に、鉄筋の質量減少率と鉄筋の最小断面積の関係を図-6に、鉄筋の最小断面積と部材の最大荷重の関係を図-7に示す。ただし、本研究の鉄筋の質量減少率および最小

表-3 鉄筋の質量減少率と最大荷重

供試体名	平均質量減少率(%)	最大荷重(kN)
CL-1-HP-NET	7.48	34.69
CL-2-HP	8.46	32.44
CL-3-HP	5.38	31.85
CL-4-HP-NET	5.77	35.67
CL-5-HP	6.68	33.61
CL-6	12.01	25.19
CL-7	7.59	29.64
NC-1	0.00	33.42
NC-4-HP	0.00	34.1
NC-5-HP	0.00	35.08
NC-6	0.00	38.22

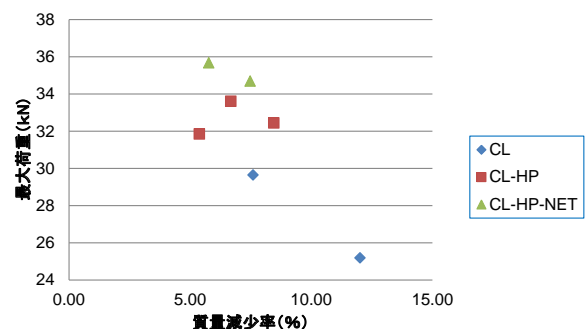


図-5 最大荷重-質量減少率関係

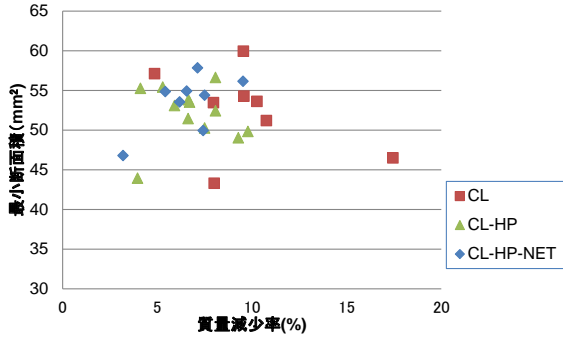


図-6 最小断面積-質量減少率関係

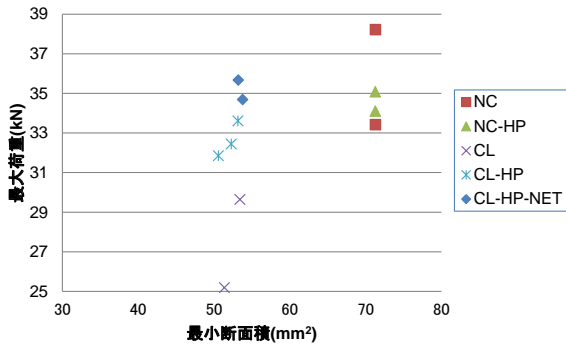


図-7 最大荷重-最小断面積関係

断面積はせん断スパンの鉄筋4本の平均値である。本来、曲げ耐荷性能は等モーメントスパン内の鉄筋性状に依存するが、等モーメントスパン内の鉄筋は荷重後の残留変形が大きい。そのため、HPFRCCによる補修を実施した供試体について、ウォータージェットによるかぶりののはつり取りを実施し

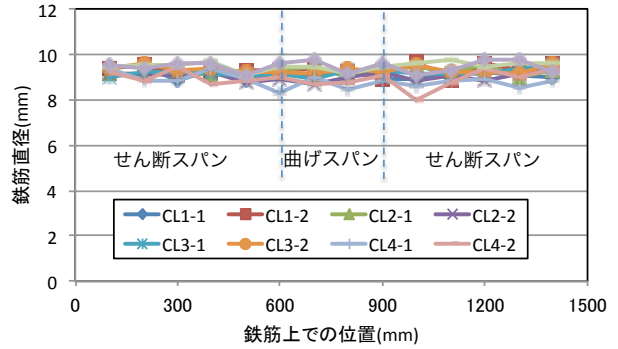


図-8 引張鉄筋の全長にわたる直径の分布

た直後に、引張鉄筋の全長にわたってノギスを用いて直径の分布を簡易的に測定した。その結果を図-8に示すが、せん断スパンと曲げスパンで腐食による鉄筋直径の減少量、およびその分布性状に顕著な差は見られなかった。そのため、図-6および図-7では、部材の等モーメントスパン内ではなく、せん断スパンでの鉄筋質量減少率、最小断面積で代用した⁴⁾。

鉄筋の質量減少率が10%で部材の耐荷力が約15%低下している。鉄筋の質量減少率以上に耐荷力が低下しているのは図-6に示すように、例えば鉄筋の質量減少率が8%程度でも、最小断面積が3/4程度まで減少している場合があるためである。ただし、図-5から質量減少率が大きい供試体ほど最大荷重が小さいという大まかな傾向は見られる。等モーメントスパン内の鉄筋での質量減少率が測定できるとさらに信頼性のある結果が得られると推測できる。

また未補修の供試体よりも補修を行った供試体の方が最

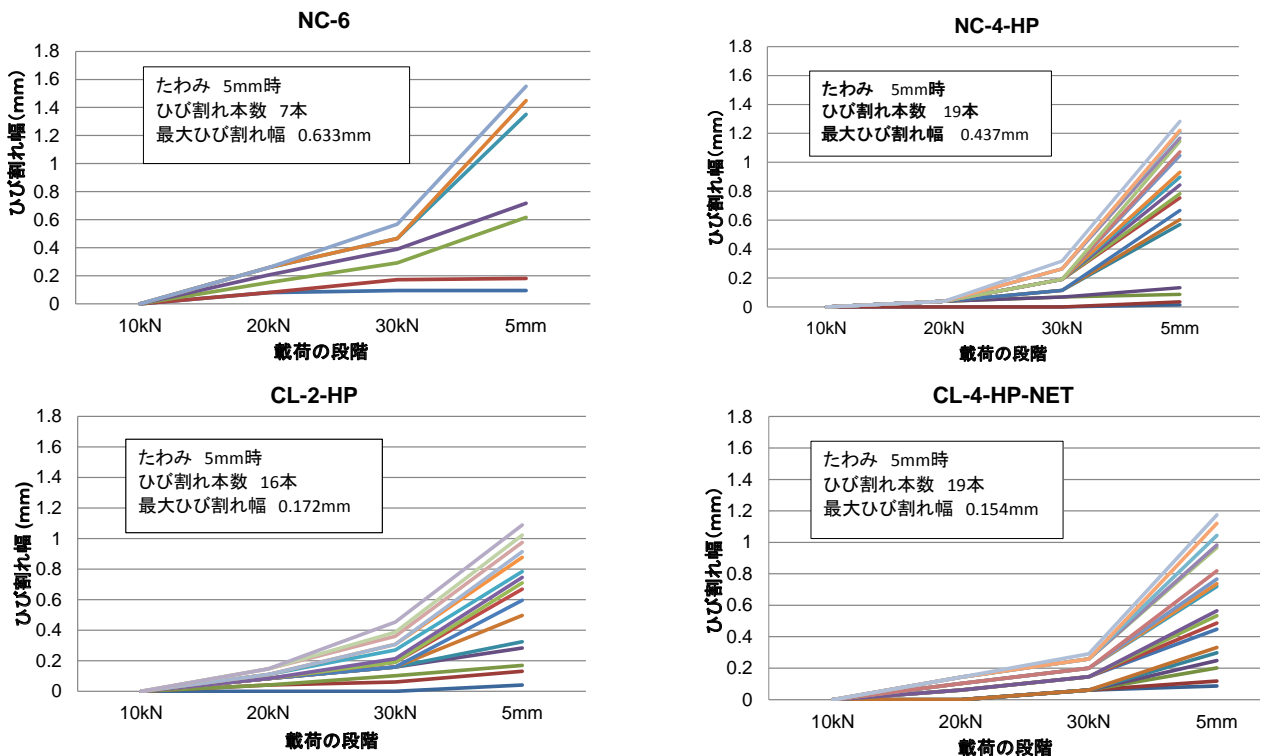


図-9 荷重の段階とひび割れの推移



写真-3 載荷試験後の NC 供試体

大荷重は大きく、さらに HPFRCC と繊維ネットを併用した場合の方が最大荷重は大きくなった。また CL 供試体については圧縮側に配置した組立て鉄筋に腐食が生じ、これがかぶりコンクリートにひび割れを発生させたため、圧縮側のコンクリートが荷重の早い段階で剥離する傾向にあったことも、ばらつきの大きな原因となっていると考えられる。また 図-7 に示す部材の最大荷重と鉄筋の最小断面積との間に良い相関が得られなかったのは、せん断スパンの鉄筋のデータを使用しているためであることが原因と考えられる。

3.3 ひび割れ幅

曲げ載荷試験時に測定したひび割れ本数とひび割れ幅を 図-9 に示す。未補修である NC-6 と HPFRCC にて補修した NC-4-HP を比較した場合では、ひび割れ本数が HPFRCC を用いて補修した NC-4-HP の方が多く見られた。ひび割れ幅については、部材降伏前には HPFRCC を用いて補修した供試体の方が小さい。このことから HPFRCC の特性である複数微細ひび割れの特徴が確認できた。また、降伏後については、NC-4-HP においても大きなひび割れが発生した。載荷試験後の NC 供試体と NC-HP 供試体のひび割れの様子を写真-3、写真-4 に示す。したがって、この段階になると、HPFRCC は引張力を分担していない。にもかかわらず、前々節で述べたように、荷重は NC-4-HP の方が大きいという結果も得られている。これは、古くから繊維補強コンクリートに対して言われているように⁵⁾、HPFRCC と鉄筋との付着が強固であ

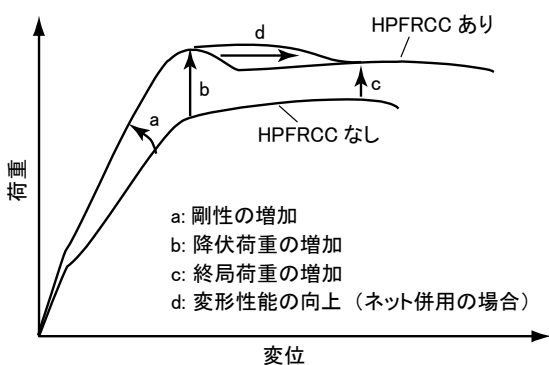


図-10 HPFRCC で断面修復した RC はり部材の荷重-変位関係



写真-4 載荷試験後の NC-HP 供試体

ることに起因していると考えられる。すなわち、通常のコンクリートの場合では、ひび割れ近傍で鉄筋との付着が破壊されるため、ひび割れ前後数 cm の範囲の鉄筋が比較的均一のひずみを有している。それに比べ HPFRCC では、付着破壊の範囲が狭いため、極めて狭い範囲の鉄筋に非常に大きなひずみが生じることとなる。そのため、鉄筋のひずみ硬化の影響で鉄筋に生ずる応力が大きくなり、部材は大きな変形の下では高い耐荷力を示すものと考えられる⁹⁾。

次に、CL-2-HP と CL-4-HP-NET を比較した場合では、最大ひび割れ幅が繊維ネットを補修した CL-4-HP-NET の方が小さく、繊維ネットの効果によりひび割れが小さくなったと考えられる。

3.4 HPFRCC と繊維ネットの効果

HPFRCC、繊維ネットを用いて、鉄筋の背面まで断面修復することが部材の荷重-変位関係に与える影響に関する説明図を 図-10 に示す。HPFRCC を用いると、HPFRCC の引張抵抗により、部材の剛性が向上し(図-10 中の a)、降伏荷重が増加する(図-10 中の b)。その後、HPFRCC のひび割れ拡大とひずみ軟化にともない、一時的に荷重は低下するが終局荷重は HPFRCC を適用しない場合よりも大きい(図-10 中の c)。コンクリートと HPFRCC 内部の鉄筋の応力-ひずみ関係を 図

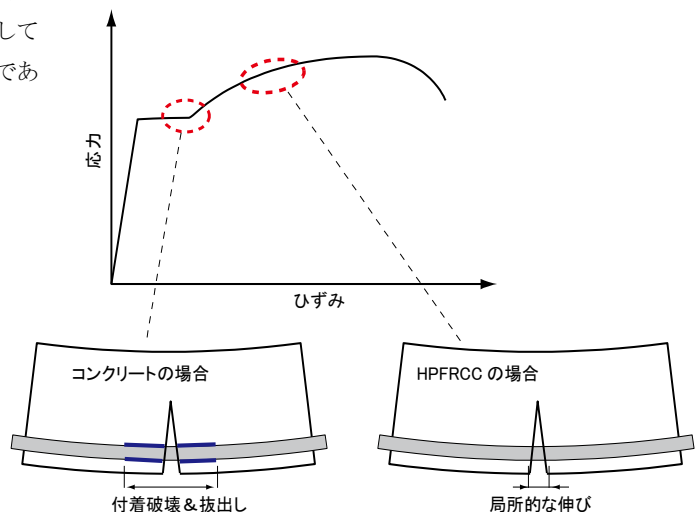


図-11 HPFRCC 中の鉄筋の応力-ひずみ関係

-11 に示す。コンクリートの場合、ひび割れにより起こる付着破壊が広範囲にわたり、鉄筋が抜け出ることにより、ひび割れ近傍の鉄筋には一様なひずみ、応力が発生する。それに比べ、HPFRCC の場合は、付着破壊の範囲が狭く鉄筋に大きなひずみが生じる。そのため、鉄筋にはひずみ硬化が生じ、HPFRCC にひずみが生じて以降も高い耐荷力を維持できたと考えられる。さらに繊維ネットを併用することにより降伏後の荷重の低下が軽減される(図-10 中の d)。繊維ネット併用により HPFRCC におけるひび割れの局所化が軽減されたためであると考えられる。繊維ネットを併用して補修した場合には、降伏後も耐荷力が低下することなく変位が増大し、変形性能が向上するため、大変形においても有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、塩害劣化した RC 部材に対して吹付け HPFRCC と繊維ネットを用いて鉄筋背面まで断面修復補修を行い、部材の耐荷性状への影響について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) HPFRCC によって断面修復することにより部材の降伏荷重、終局荷重の増加が確認できた。また、HPFRCC と繊維ネットの併用により降伏後の荷重の低下が軽減された。
- (2) 鉄筋の質量減少率が大きいほど、最大荷重が小さくなった。
- (3) HPFRCC に生じた複数の微細なひび割れの一部には、部材降伏後に局所化と拡大が生じたが、繊維ネットがあると HPFRCC のひび割れ分散に寄与し、最大ひび割れ幅は小さくなった。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(A)21246072, 代表者:下村匠)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 倉知星人, 加藤善史, 小林孝一, 六郷恵哲: 繊維混入率が HPFRCC の塩分透過抑制機能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 2) Koichi Kobayashi, Takashi Iizuka, Hoshito Kurachi and Keitetsu Rokugo: Corrosion Protection Performance of High Performance Fiber Reinforced Cement and Concrete, Cement & Concrete Composites, Vol.32, pp.411-420, 2010
- 3) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, 2007.3
- 4) 倉知星人, 佐藤孝史, 小林孝一, 六郷恵哲: 塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 5) 例えば, 小柳洽, 六郷恵哲, 岩瀬裕之: コンクリート中の鉄筋の応力ひずみ関係と曲げを受ける RC はりの終局挙動, 土木学会論文集, 第 384 号/V-7, pp. 83-92, 1987.8
- 6) 水田武利, 稲熊唯史, 林承燦, 六郷恵哲: HPFRCC により下面増厚した RC 部材の曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008