

論文 鉄筋腐食によって劣化したRC部材のHPFRCCを用いた補修工法の提案

浅野 翔也^{*1}・前田 徳一^{*2}・大橋 亮介^{*3}・小林 孝一^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋腐食によって劣化した鉄筋コンクリート部材を対象とした、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC)を用いた補修工法を提案し、耐荷力、鉄筋の防食性能を比較検討した。実験では、鉄筋の質量減少率が 0%, 2.5%, 5%, 10%の供試体に、それぞれ、未補修、HPFRCC で補修、質量減少率が 5%, 10%の供試体のみ HPFRCC と繊維ネットを併用して補修し、曲げ試験を行った。その結果、本研究の範囲から鉄筋の質量減少率が 10%程度であれば、HPFRCC で断面修復を行うのみで、健全な状態の耐荷力が回復できることが確認できた。また、HPFRCC の高い防食性能を確認することができた。

キーワード：鉄筋腐食, 補修, 断面修復, HPFRCC, 繊維ネット

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物の鉄筋腐食による劣化が問題となっている。鉄筋腐食は、RC 構造物の耐荷力を低下させるため、鉄筋腐食の生じた構造物の合理的な補修工法の開発が必要不可欠である。

鉄筋腐食によって劣化した構造物を補修するにはポリマーセメントモルタルによる断面修復工法が用いられることが多いが、本研究では複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC)を用いた断面修復工法を提案する。

HPFRCC は、初期ひび割れ発生後も引張応力が上昇する「擬似ひずみ硬化特性」、微細なひび割れが複数に分散して生じる「複数微細ひび割れ発生」という特徴を有する。そのため、HPFRCC を断面修復材として使用した場合には、引張力の分担、高い鉄筋の防食性能が期待できる。鉄筋腐食の生じた RC 構造物を HPFRCC で補修した際の防食性能は、倉知ら¹⁾²⁾により明らかとなっているが、その場合の耐荷性能については明らかにされていない。そこで、本研究では、鉄筋の腐食により劣化した RC 部材に対して HPFRCC の吹付けにより断面修復した供試体の曲げ耐荷性能および、断面修復材として鉄筋防食性能を評価することとした。また、HPFRCC による引張力の分担は不十分であるため、さらに HPFRCC のひび割れ分散性を向上させるために、繊維ネットを併用する工法

についても耐荷力、変形性能を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

(1) 母材コンクリート

母材コンクリート(以下 NC)の配合を表-1 に示す。水セメント比は 55%, セメントは早強ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³), 細骨材に陸砂(密度: 2.59g/cm³), 粗骨材には碎石(密度: 2.61g/cm³)を用いた。

(2) HPFRCC

HPFRCC の配合を表-2 に示す。繊維は、混入量 2.0%, 長さ 12mm(直径 40 μm)のポリビニルアルコールと、長さ 9mm(直径 12 μm)のポリエチレン繊維を混合して使用した。HPFRCC 設計・施工指針³⁾に示されている一軸引張試験によって引張試験を行った。図-1 にその結果を示す。

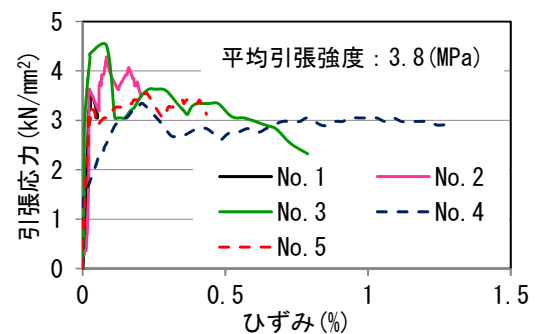


図-1 一軸引張試験結果

表-1 NC 配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤		
55	49.4	180	327	810	920	0.8175	7.0	4.6

表-2 HPFRCC 配合

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

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (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 工学部社会基盤工学科 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 准教授 博(工) (正会員)

(3) 繊維ネット

繊維ネットは高強度ポリエチレン製のものをを用いた。その形状を図-2 に示す。10mm ピッチの格子状であり、強度は格子 5 本(50mm)あたりで 2.7kN、ヤング率は 50~70kN/mm² である。なお、強度とヤング率はメーカー保証値である。

2.2 载荷用供試体

本研究では、主筋の腐食量のコントロールを容易にするため、また、主筋以外の材料の劣化の影響を除くため、以下の方法で供試体を作製した。供試体は、一般的な実構造物と同程度の鉄筋比となるように設計した。

(1) 腐食鉄筋の作製

载荷用供試体の引張鉄筋は、経年による劣化を模擬するためあらかじめ 100mm×100mm×2000mm の RC 部材を作製した上で図-3 のように電食で腐食させた。鉄筋の目標質量減少率である、2.5、5、10%となるように式(1)⁴⁾を用いて通電時間を逆算し、鉄筋を腐食させた。また、腐食鉄筋には D13(SD345)を使用し、健全時の降伏強度は 381MPa である。

$$W = 0.766 \times IT \quad (1)$$

ここで、 W ：腐食量(g)、 IT ：積算電流量($A \cdot h$)である。電食させた鉄筋は、電食が完了した後、図-3 の部材からは取り出した。

(2) 質量減少率の測定

電食終了後、は取り出した鉄筋は、ウォータージェットで錆を落とした後、腐食後の質量を計測した。質量減少率の算出には式(2)を用いた。

$$C = \frac{m \times l_c - m_c}{m \times l_c} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 C ：質量減少率(%), m ：錆除去後の健全な鉄筋の長さ 1cm あたりの質量(g/cm), m_c ：錆除去後の腐食鉄筋の質量(g), l_c ：腐食鉄筋の長さ(cm)である。

(3) 载荷試験用供試体の作製

供試体の一覧、形状及び寸法を表-3、図-4 に示す。供試体は各水準 2 体ずつとした。供試体断面は、100mm×200mm、全長が 1600mm、スターラップの間隔は 60mm ピッチとした。補修を行わない NC 供試体は、断面 100mm×200mm を全て NC で打設する一体型とした。HPFRCC で補修を行う HPFRCC 供試体は、母材のコンクリート部分を 160mm の断面で作製した後、質量減少率 0、2.5、5、10%の引張鉄筋を配置し、HPFRCC を積層厚 40mm で吹付けることによって、劣化した部材に断面修復することを模擬した。また、打継面の表面処理は、母材コンクリート打設時に遅延材を打設面に散布しておき、翌日に高圧洗浄機でモルタル部分を落とすことで、ウォータージェットでの表面処理を模擬した。

繊維ネットを併用する場合には、母材に数 cm 厚で

HPFRCC を吹付け、その上に繊維ネット置き、更にその上に HPFRCC を吹き付けることで HPFRCC と繊維ネットの一体化をはかった。なお、腐食量が 5%の供試体には 100mm×1600mm の繊維ネットを 1 枚、腐食量が 10%の供試体は同じものを 2 枚用いて補修を行った。

なお、本研究に用いた供試体は、健全なコンクリート母材を用い、スターラップも腐食してないため、実際の腐食状況をより忠実に再現した場合よりも耐力が大きくなることが予想される。

(4) はりの曲げ载荷試験

曲げ载荷試験の概要図を図-5 に示す。等モーメントスパン長 300mm、せん断スパン長 550mm の中央 2 点载荷の単純漸増载荷とした。計測項目は荷重、変位、ひずみ、



図-2 繊維ネット

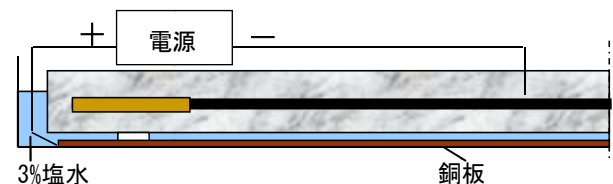


図-3 電食方法

表-3 供試体一覧

供試体 呼称	鉄筋質量 減少率(%)	HPFRCC 吹付けの有無	繊維ネット 補修の有無
0-NC	0	-	-
0-HP	0	○	-
2.5-NC	2.5	-	-
2.5-HP	2.5	○	-
5-NC	5	-	-
5-HP	5	○	-
5-net	5	○	○
10-NC	10	-	-
10-HP	10	○	-
10-net	10	○	○

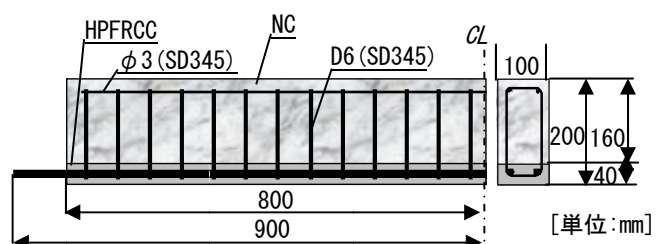


図-4 供試体形状および寸法 (HPFRCC 供試体)

ひび割れの進展状況とした。荷重はロードセル、ひずみはひずみゲージ、変位は高感度変位計、ひび割れの進展状況はマイクロスコープにて計測した。変位は、支点、載荷点、等モーメントスパン間に等間隔で設置した合計7ヶ所で計測した。曲げひび割れ幅は、等モーメントスパン間から左右にそれぞれ5cm延長した40cmの区間で測定した。荷重が15kN、30kN、45kN、たわみが5mmの際は、対象区間全てのひび割れの幅を、たわみが10mm、15mmの際は最大ひび割れ幅のみ計測した。また、曲げ載荷試験は、ひずみゲージによって計測しているコンクリートの圧縮ひずみが低下し始めたら終了した。

2.3 塩水散布用供試体

図-4と同様の供試体に図-6のように治具を装着し、上部ボルトを締めることによって曲げひび割れを導入した。HPFRCCの積層厚は、無積層、30mm、40mmとしたが積層厚が30mmの供試体のみは、断面寸法が100mm×190mmである。積層厚30mm、40mmの場合の引張鉄筋のかぶりは、それぞれ12mm、22mmであり、かぶりが鉄筋の防食性能に与える影響を検討した。HPFRCC積層無のNC供試体は、0.2mmの曲げひび割れが入るまで上部ボルトを締めてひび割れを導入した。HPFRCC供試体は、NC供試体と同じたわみ量になるまで上部ボルト締め、ひび割れを導入した。それぞれの供試体に入れたひび割れ幅を表-4に示す。ただし、ここに示したひび割れは、目視で確認できるもののみであり、HPFRCC供試体には、ここに示した以外にも多数の微細なひび割れが生じている。6時間毎に5分間、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を散布し、60日間塩水散布を行った後に鉄筋をはつり出し、プラニメーターで鉄筋の腐食面積を測定して鉄筋の防食性能を評価した。

2.4 付着強度試験

文献5)に従って実施した付着強度試験に用いた供試体を図-7に示す。コアドリルを用いて、供試体に、直径50mm、深さ60mm(HPFRCCの積層厚40mm)の切込みを100mm間隔で3本入れた。切込みを入れた部分に、直径50mmの鋼製アタッチメントをエポキシで接着し、硬化後、付着強度試験を実施した。また、付着強度試験は、供試体1体あたり3ヶ所、供試体3体の合計9箇所で行った。

3.実験結果および考察

3.1 付着強度試験結果

付着強度試験結果、および付着破壊箇所、を表-5に示す。付着強度試験を行った9個所のうち、4個所は破壊面にHPFRCC部が含まれていたが、何れもHPFRCCと母材の界面を横断した破壊でありHPFRCCと母材の界面で破壊した供試体は無かった。また、いずれの試験個

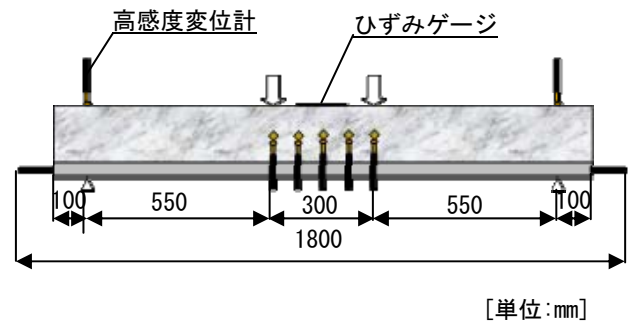


図-5 載荷試験



図-6 塩水散布供試体

表-4 塩水散布供試体に入れたひび割れ幅

積層圧	供試体位置	ひび割れ幅 (mm)							
無積層	上	0.10	0.10	0.06	0.10	0.20	0.15	0.10	
	下	0.04	0.08	0.10	0.08	0.06	0.10		
HPFRCC 30mm	上	0.04	0.04	0.04	0.04				
	下	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04		
HPFRCC 40mm	上	0.04	0.04	0.02	0.02				
	下	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

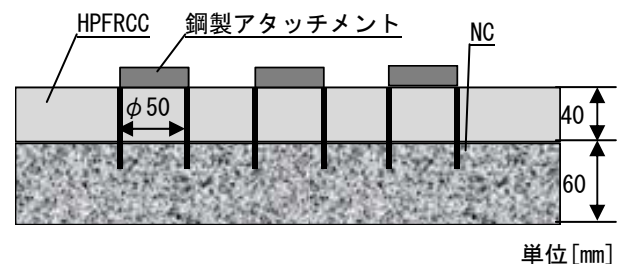


図-7 付着試験に用いた供試体

表-5 付着試験結果

試験No.	付着強度 (N/mm ²)	破壊箇所
1	2.03	母材
2	2.02	HPFRCC/母材
3	2.24	HPFRCC/母材
4	2.03	HPFRCC/母材
5	2.14	母材
6	2.24	母材
7	2.34	HPFRCC/母材
8	2.01	母材
9	2.12	母材

所も 2.0N/mm^2 以上の高い付着力を保っていた。以上のことから、HPFRCC と NC の付着は良好であることが確認された。

3.2 載荷試験

(1) ひび割れの進展

表-6 に、腐食率 10% の NC 供試体、HPFRCC 供試体、HPFRCC と繊維ネットを併用した供試体のひび割れの幅と本数を示す。なお、ひび割れ幅は、荷重が 15kN、30kN、45kN、たわみが 5mm、10mm、15mm に達した際に計測している。表-6 より、HPFRCC で補修することで、微細なひび割れが複数に分散すること、繊維ネットを併用することで更に微細となり、ひび割れ分散性が向上していることが分かる。しかし、鉄筋が降伏して以降は、HPFRCC で補修した供試体、繊維ネットで補修した供試体共に、ひび割れ本数が増加することは無く、局所的にひび割れ幅が増大していく傾向を示した。

(2) 荷重-たわみ関係

図-8 に、各供試体の荷重-たわみ関係を示す。全ての水準において、それぞれ 2 体ずつ載荷試験を行っているが、それらの間の差は小さかったため、1 体の結果のみ示す。

図-8 より、HPFRCC で補修したことによって、いずれの供試体においても、降伏荷重、終局荷重、最大荷重が未補修の供試体よりも大きくなっており、HPFRCC による耐荷力の向上がみられた。

また、表-6 に示したように、たわみがある程度大きくなると、HPFRCC 積層部分のひび割れ幅も局所的に非常に大きくなり、ひずみ軟化し HPFRCC は引張力を分担しなくなる。このことから、局所的なひび割れの拡大が生じて以降は、荷重が低下していくと思われたが、鉄筋降伏以降も荷重の低下が見られなかった。これは、HPFRCC の高い付着力が原因と考えられる⁵⁾。NC は、ひび割れ付近で鉄筋との付着破壊を生じて鉄筋の抜け出しが起これ、ある程度の区間の鉄筋のひずみが一様に増大するのに対し、HPFRCC は付着力が高く、鉄筋との一体性を保たれる材料であるため、HPFRCC で補修した供試体の鉄筋は、未補修の供試体の鉄筋に比べて、局所的により大きなひずみが発生する。このことから、HPFRCC で補修した供試体の鉄筋は、ひずみ硬化が生じ、高い応力が生じているため見かけ上、耐荷性能が高くなっているものと考えられる。

HPFRCC に加え、繊維ネットを併用して補修することで、特に腐食率 10% の場合に、最大荷重、変形性能が大きくなっており、HPFRCC のみで補修するよりも、補修効果が高くなっている。これは、表-6 より、繊維ネットがひび割れの局所化を抑制し、分散させているためと考えられる。また、腐食率 5% の供試体と比較して腐食率

表-6 ひび割れの幅と本数

未補修供試体					
	荷重 (kN)		変位 (mm)		
	15	30	5	10	15
最大ひびわれ幅 (mm)	0.028	0.080	0.353	1.400	1.700
平均ひび割れ幅 (mm)	0.027	0.061	0.199		
ひび割れ本数 (本)	2	3	3		

HPFRCC で補修した供試体					
	荷重 (kN)		変位 (mm)		
	30	45	5	10	15
最大ひびわれ幅 (mm)	0.015	0.046	0.089	0.350	0.900
平均ひび割れ幅 (mm)	0.018	0.030	0.032		
ひび割れ本数 (本)	2	8	21		

HPFRCC と繊維ネットで補修した供試体					
	荷重 (kN)		変位 (mm)		
	30	45	5	10	15
最大ひびわれ幅 (mm)	0.021	0.032	0.050	0.057	0.850
平均ひび割れ幅 (mm)	0.016	0.025	0.033		
ひび割れ本数 (本)	3	10	28		

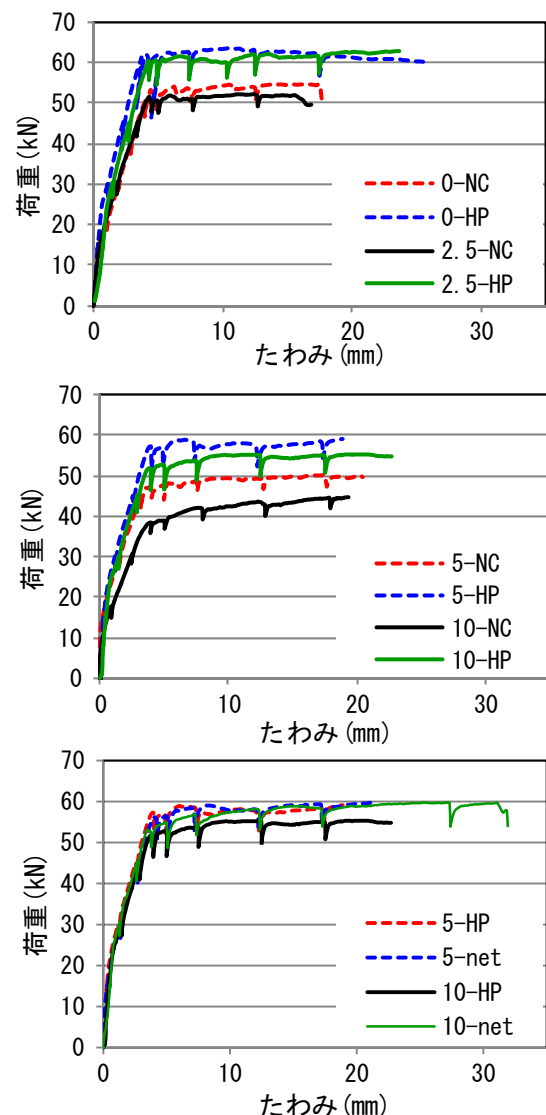


図-8 荷重-たわみ曲線

10%の供試体の方が、繊維ネットの効果が高いのは鉄筋の腐食が進行することで鉄筋の断面積のばらつきが大きくなり、鉄筋の断面欠損が大きな箇所断面には局所的に大きなひずみが発生するため、鉄筋と比較して弾性率の小さな繊維ネットの効果がより発揮でき、耐荷力、変形性能が増大したと考えられる。

図-9 に、荷重-たわみ関係のたわみ 6mm までの拡大図を示す。なお、2.5-HP の供試体のみ初期勾配が異なっているが、これは供試体の載荷時の下面が HPFRCC 吹付け面であり凹凸があったため、載荷初期に供試体が支点上で若干移動したためである。未補修の供試体と HPFRCC で補修した供試体を比較すると、HPFRCC で補修した供試体の方が、剛性が高くなっていることが分かる。また、鉄筋の降伏は、概ねたわみが 4mm 前後であることが確認できる。

3.3 最大荷重と質量減少率の関係

はりの曲げ載荷試験で得られた各供試体の最大荷重とその計算値を表-7、最大荷重と質量減少率との関係を図-10 に示す。耐力計算は簡易的に行い、鉄筋の断面積は腐食により均一に減少すると仮定し、鉄筋の質量減少率が 10% の場合は単純に鉄筋の断面積を 90% として計算し、HPFRCC で補修した場合には一軸引張試験より得られた引張強度の 3.8MPa に HPFRCC の積層断面積を乗した値である引張分担力 15.2kN を加え、繊維ネットで補修した場合には引張耐力のメーカー公称値である 4.8kN を引張分担力に加えた。

本研究では鉄筋腐食によって劣化した構造物を簡易的に模擬した供試体を用いているが、表-7 の計算値、平均最大荷重がある程度一致していることから、本研究で用いた供試体と鉄筋腐食によって劣化した実構造物には妥当性があるといえる。HPFRCC で補修することで、腐食率 2.5% の供試体は 7.3kN、5% の供試体は 8.2kN、10% の供試体は 11.0kN 最大荷重が向上し、腐食率が大きくなるほど、HPFRCC による耐荷力の回復効果が大きくなっている。これは、鉄筋の腐食が進行するほど、鉄筋の断面積が減少し、その部分に高い応力が発生するため、3.2(2) で述べたような鉄筋のひずみ硬化現象が起きやすくなっていると考えられる。ただし、その場合には鉄筋に局所的に極めて大きなひずみが発生するため、例えば本研究の場合よりもさらに劣化が進行した場合や、地震時の柱のような大変形を想定した試験を行い、変形やじん性について調査する必要があると考えられる。

しかし、本研究の範囲からは、0-NC と 10-HP の供試体の最大荷重がほぼ同じことから、10% 程度の質量減少率ならば、HPFRCC で断面修復を行うことで、健全な状態の耐荷力を回復させることができることが明らかになった。

表-7 供試体ごとの最大荷重と質量減少率

供試体 呼称	最大 荷重 (kN)	平均最大 荷重 (kN)	最大荷重の 計算値 (kN)	質量 減少率 (%)
0-NC-1	54.7	54.8	55.9	0.0
0-NC-2	55.0			0.0
0-HP-1	63.5	62.8	64.8	0.0
0-HP-2	62.1			0.0
2.5-NC-1	53.9	53.0	54.5	3.2
2.5-NC-2	52.1			3.1
2.5-HP-1	57.8	60.3	63.4	2.9
2.5-HP-2	62.8			2.9
5-NC-1	50.2	50.4	53.1	5.4
5-NC-2	50.7			5.4
5-HP-1	57.9	58.7	62.0	5.0
5-HP-2	59.4			5.0
5-net-1	59.7	59.8	64.8	5.1
5-net-2	60.0			4.9
10-NC-1	45.4	45.3	50.3	10.2
10-NC-2	45.2			10.3
10-HP-1	57.3	56.3	59.2	9.7
10-HP-2	55.3			9.6
10-net-1	57.9	58.8	62.0	9.6
10-net-2	59.7			9.8

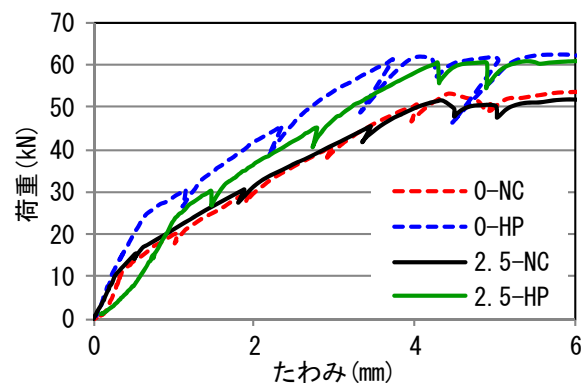


図-9 荷重-たわみ関係のたわみ 6mm までの拡大図

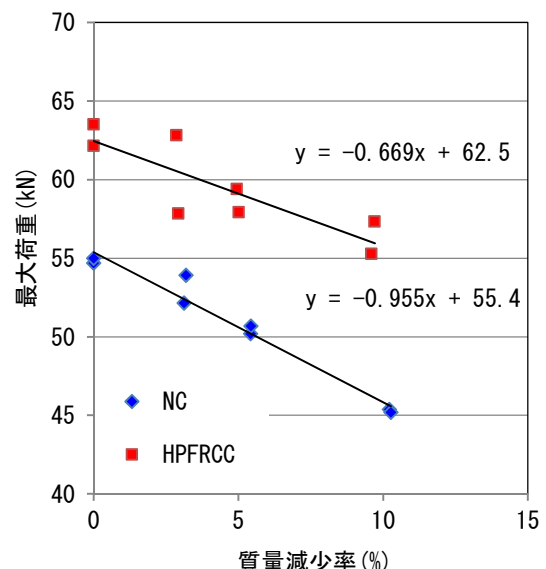


図-10 最大荷重と質量減少率の関係

3.4 塩水散布試験結果

表-8 に塩水散布試験の結果を示す。供試体には鉄筋が 2 本入っており、それらを鉄筋 A、鉄筋 B として区別している。なお、今回は鉄筋の腐食面積の測定は、鉄筋が腐食しやすい下側に曝露された供試体のみ測定した。NC 供試体の腐食面積率が 4% であるのに対し、HPFRCC 供試体は、鉄筋が全く腐食していなかった。これは HPFRCC に発生するひび割れが極めて微細であるためと、HPFRCC は NC に比べて、W/C、W/B が低く、内部構造が緻密であるため、塩化物イオンが主鉄筋まで到達しなかったためと考えられる。また、ひび割れを導入した際のたわみは約 2.5mm であり、図-9 から、鉄筋が降伏する前の段階のおおよそ使用限界状態にあると判断される。このことから、使用限界状態において、HPFRCC は高い防食性能を有していることが確認できた。

4. まとめ

本研究では、鉄筋腐食によって劣化した RC 部材の、HPFRCC を用いた補修工法として、鉄筋の裏側までウォータージェットではつり、HPFRCC を吹き付けて断面修復する工法を提案し、耐荷力、鉄筋の防食性能を比較検討した。また、繊維ネットの併用した場合の耐荷力も検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1)HPFRCC で補修することにより、ひび割れが微細に分散し、繊維ネットを併用することで更にひび割れが微細に分散するが、鉄筋降伏以降はひび割れ本数が増加することはない、局所的にひび割れ幅が増大していく。
- (2)鉄筋の質量減少率が 10% 程度であれば、HPFRCC で断面修復を行うのみで、健全な状態の耐荷力を回復させる。
- (3)繊維ネットは、特に腐食が進行し、見かけの鉄筋比がある程度小さくなった場合に効果を発揮し、耐荷力を回復させる。
- (4)HPFRCC は高い防食性能が確認でき、特に使用限界状態のひび割れが微細に分散する状態であれば、極めて高い防食性能を有する。
- (5)以上のことから、本研究で提案した補修工法は、大変形性能を求められない、はり部材への補修工法において特に有効である。

表-8 塩水散布試験結果

積層厚 (mm)	鉄筋呼称	腐食 面積 (cm ²)	腐食 面積率 (%)	平均腐食 面積率 (%)
0	鉄筋A	27.6	4.32	3.97
	鉄筋B	23.0	3.61	
30	鉄筋A	0.0	0.0	0.0
	鉄筋B	0.0	0.0	
40	鉄筋A	0.0	0.0	0.0
	鉄筋B	0.0	0.0	

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, HoshitoKurachi and KeitetsuRokugo : 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) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 5) 土木学会: 土木学会規準 JSCE-K 561-2003, コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案), 2003
- 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