

超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料の合理的な適用方法の検討とその環境影響評価

Study on rational application methods of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites and its environmental assessment

ライフサイクル工学研究室 安達 由佳

Life Cycle Engineering Lab. Yuka Adachi

1 はじめに

超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料 (Ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composites, 以後UHP-FRCC) (例えば¹⁾)とは、圧縮強度150 N/mm²以上、引張強度が5 N/mm²以上の極めて高い力学性能を持ち²⁾、従来の繊維補強セメント複合材料 (FRCC) に比べて優れた耐久性を示す。一方で、このような特性を得るためには単位セメント量を1000 kg/m³以上と極めて大きく取ることが一般的で、実構造物への適用を考えると、全断面をUHP-FRCCとすると高コストかつ炭素排出量などの環境側面からも合理的ではない。このことから、UHP-FRCCにより通常の鉄筋コンクリート梁の断面の一部を置換する方法がいくつか提案されている^{3,4)}。

本検討では、無筋の普通強度モルタル梁の引張縁に対して、接合面の形状変更や鋼繊維使用による接合部の補強を行ったUHP-FRCC層を適用した複合部材の曲げ性能を取得し、その合理的な設計方法について検討した。併せて、UHP-FRCCのセメントの一部をフライアッシュと置換した複合部材についても同様の検討を行い、力学性能と環境負荷を両立させるための部材設計について考察を試みた。

2 実験概要

本検討では、使用材料として、UHP-FRCC層には結合材に低熱ポルトランドセメント (LHC, 密度3.24 g/cm³)、シリカフューム (SF, 密度2.20 g/cm³)、フライアッシュ (FA, 密度2.20 g/cm³) を、骨材として珪砂6号 (SS, 密度2.60 g/cm³, 平均粒径212 μm)、混和剤として高性能減水剤 (SP, 密度1.05 g/cm³, ポリカルボン酸系)、消泡剤 (DA, 密度1.00 g/cm³) を用いた。また、長さの異なる2種類の鋼繊維として短繊維 (OL, ストレート形状, 密度7.85 g/cm³, 繊維長6 mm, 直径0.16mm)、および、長繊維 (HDR, 両端フック形状, 密度7.85 g/cm³, 繊維長30 mm, 直径0.38mm) を使用し、これに加えて針状鉱物であるワラストナイト (Wo, 密度2.90

表-1 モルタルの調合表 (kg/m³)

W	HSC	S1+S2
291.4	485.6	1456.9

表-2 UHP-FRCC の調合表 (kg/m³)

	W	LHC	SF	FA	SS	Wo	SP	DA
FA0	201	1197	263	-	511	190	32.1	0.3
FA20	195	928	255	232	495	184	31.0	0.3
FA50	187	555	244	555	474	176	30.0	0.3
FA70	181	323	236	753	459	170	31.5	0.3

g/cm³) を用いた。モルタル部には、早強ポルトランドセメント (HSC, 密度3.14 g/cm³)、および、骨材に砕砂 (S1, 密度2.61 g/cm³) と陸砂 (S2, 密度2.58 g/cm³) を重量比で1:1混合したものを使用した。モルタル部、UHP-FRCC層の配 (調) 合を表-1、表-2にそれぞれ示す。

図-1に示すような幅100 mm、高さ100 mm、長さ400 mmの梁状試験体に対して、引張縁に厚さ10 mmのUHP-FRCC層を配置した複合部材を基準に、UHP-FRCC層の断面形状の変更と、接合面への鋼繊維の配置をパラメータとした。断面形状の模式図を図-2に示す。UHP-FRCC層の断面積が1000 mm² (梁断面積の10%) となるように形状を決定した。RシリーズはUHP-FRCC層にリブを用いることで、接合面の付着を高めている。付着用の鋼繊維を用いるN20, N40, N60の各シリーズについては、表-3に示すピッチと単位面積当たりの本数となるように設置した。

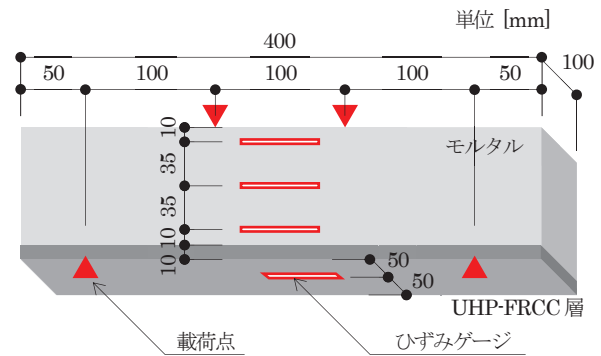


図-1 UHP-FRCC層で補強されたモルタル梁

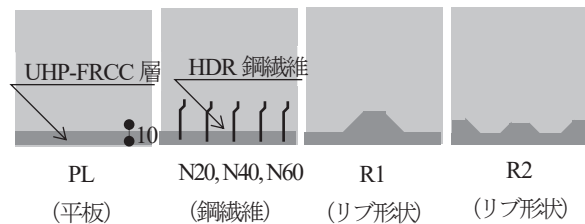


図-2 各シリーズの断面形状

表-3 各シリーズの鋼繊維の配置頻度

シリーズ	代表ピッチ (mm)	単位面積当たり本数 (本/m ²)
N20	20	2500
N40	40	1250
N60	60	625

3 実験結果

図-3および表-4に示されるように、UHP-FRCC層を配置した場合には、いずれのシリーズについてもモルタルのみの

Cと比較して、最大曲げモーメント、および、曲げ靱性が大きく増大していることが確認できる。また、UHP-FRCC層を平板としたPLよりも、接合面の形状を変えたRシリーズ (R1, R2)、および、接合面を鋼繊維で接合したNシリーズ (N20, N40, N60) の場合には曲げモーメントが増大している。さらに、Nシリーズの方がRシリーズよりも大きな曲げモーメントが得られ、曲げ性能が向上していることがわかる。すなわち、UHP-FRCC層の適用によって曲げ性能が向上する一方で、単純な形状のPLやR1ではモルタル部分との十分な接合強度が得られなかったものと考えられる。

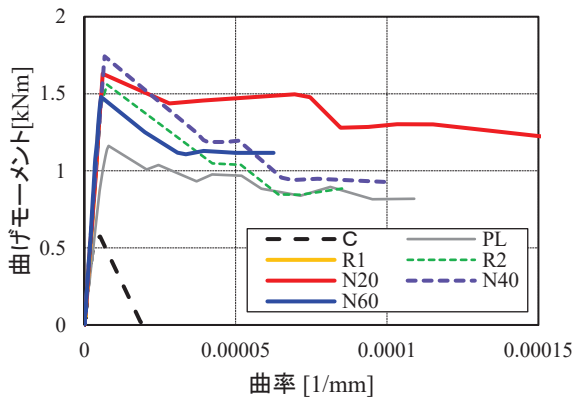
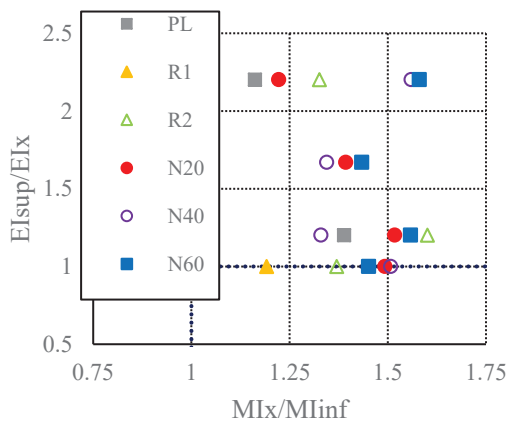
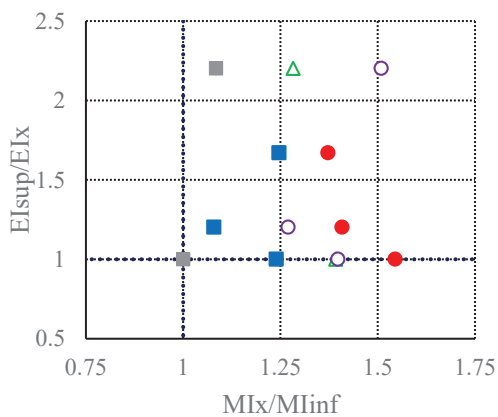


図-3 各シリーズの曲げモーメントと曲率の関係



(a) 最大曲げモーメントの場合



(b) 破壊エネルギーの場合

図-4 梁の力学性能とフライアッシュ使用による環境影響の評価

Fantilli ら⁹⁾の提案する力学性能とインベントリデータ⁹⁾から算出したCO₂排出量を併せて評価可能な指標を用い、図-4にFA0 平板を基準とした場合の関係を示す。ここでの縦軸は環境指標であり、CO₂排出量削減効果を示し、横軸は(a)図では最大曲げモーメント、(b)図では破壊エネルギーに基づいて力学特性を指標化して示している。図-4より、ほとんどの結果は第一象限に位置し、PLと比較して接合面の改善により力学特性が向上するとともに、フライアッシュの置換により環境指標も改善されることが確認できる。N60 シリーズは最大曲げモーメント到達後の靱性が低いため、(b)図では必ずしも力学性能指標の改善率は大きくない。これらの結果からは、接合面をN20 およびN40 とし、FA 置換率を大きく取ったシリーズがUHP-FRCC 層の有効な適用方法として考えられる。

4 まとめ

UHP-FRCC 層を用いたモルタル複合梁の曲げ性状と環境影響評価を検討した結果、下記に示す知見を得た。

- 1) UHP-FRCC 層とモルタル部材の接合面の形状を複雑化し、付着強度を改善した梁では、平滑な接合面とした場合に比べて最大曲げモーメントが大きくなり、曲げ性能が向上することが確認された。
- 2) 接合面に定着鋼繊維を用いた場合、さらに最大曲げモーメントが大きくなり、最大曲げモーメント到達後も平面保持が成立し、高い靱性が得られること確認された。ただし、この特性を得るためには、1250 本/m (N40 相当) 程度の鋼繊維を用いる必要がある。
- 3) フライアッシュ置換率を大きくした場合でも、定着鋼繊維を用いた場合は、平滑な接合面の場合に比べて曲げ性能が大きく向上することが確認された。定着鋼繊維を併用することで、環境負荷を抑えつつ、複合部材の力学特性を改善することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Sukmin Kwon, et al.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, *ACI Materials Journal*, Vol.111, No.3, pp. 309-318, 2014
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004
- 3) 山本拳大ら: RC 梁部材の一面に設けた UHP-FRCC 埋設型枠が曲げ耐力に与える影響についての考察, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.2, pp.175-180, 2017
- 4) 佐藤あゆみら: 超高強度繊維補強コンクリート埋設型枠を用いたRC 梁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.38, No.1, pp.2361-2366, 2016
- 5) 日本コンクリート工学会: コンクリート環境のテキスト, セメントの LCI データの概要(2010.7)
- 6) Fantilli, A.P., Chiaia, B.: The Work of Fracture in the Eco-Mechanical Performances of Structural Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 11, No. 10, p. 282-290, 2013.