

論文 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

安達 由佳*1・西脇 智哉*2・五十嵐 豪*3

要旨: 本論文では、無筋の普通強度モルタル梁の引張縁に対して、超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料（以下、UHP-FRCC）をいくつかの方法により接合した複合部材を作製し、その曲げ性能を取得した。併せて、UHP-FRCC のセメントの一部をフライアッシュに置換した複合部材についても同様の検討を行い、環境負荷と力学性能の観点から、UHP-FRCC を用いた合理的な複合部材の設計について検討した。その結果、接合面の形状を複雑化させたり、多量の鋼繊維を用いて定着した部材ほど高い靱性が得られることが確認され、フライアッシュの置換により環境負荷を低下させた場合でも、一定の力学性能が得られた。

キーワード: UHP-FRCC, 環境影響評価, ひずみ分布, 最大曲げモーメント, フライアッシュ

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示すものと定義されている²⁾。これを実現するために、水結合材比を0.2未満と極めて低く設定し、シリカフェームを併用することが多く、極めて緻密な微細構造を持つことから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。佐藤らは、UHP-FRCCを全断面の約30%を占める埋設型枠として用い、後打ちコンクリートと一体化させる手法を提案している。埋設型枠の内側に凹凸加工を施してRC梁との界面を改善することにより界面剥離が抑えられ、接合面が平滑な場合に比べて、最大荷重および最大荷重以降の耐力が大きくなることを確認している⁴⁾。山本らは、曲げを受けるコンクリート梁の引張縁の一面のみにUHP-FRCC層を設ける手法を提案している。ここでは、梁の軸方向に対して垂直方向のリブを設置することで、界面の付着の改善を試みた結果、リブにより接着強度が増大する一方、リブ形状によっては応力集中の起点となってモルタル梁母材部でのひび割れを誘発し、最大耐力が必ずしも上昇しない場合があることを指摘している³⁾。

以上の背景から、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、UHP-FRCC層を接合部の形状や鋼繊維を用いることにより作製した複合部材の曲げ性能を取得し、UHP-FRCCを一部に用いた複合部材の合理的な、すなわち、環境負荷を抑えての適用方法について検討を行った。ここでは、形状などの検討に併せて、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の両者を想定した部材設計について考察を試みた。

2. 実験概要

本検討は、曲げ部材の引張縁に設置されるUHP-FRCC層について、(a) 接合面の違いによる付着性状と複合部材としての力学性能への影響、(b) フライアッシュの使用による力学性能と環境負荷への影響、(c) これらを総合した環境影響評価に大別される。

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	0	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

表-3 モルタルおよびUHP-FRCCの力学特性

(N/mm ²)	モルタル	FA0	FA20	FA50	FA70
圧縮強度	45.1	204.7	193.4	174.3	150.7
ヤング係数	24.9×10 ³	46.4×10 ³	45.5×10 ³	42.8×10 ³	40.1×10 ³
引張強度 [※]	2.6	16.5	17.8	15.6	14.7

※モルタルは割裂試験、UHP-FRCCは一軸引張試験による

*1 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

2.1 使用材料および配（調）合

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), シリカフェーム (SF, 密度 2.20 g/cm³), フライアッシュ (FA, 密度 2.20 g/cm³, JIS A 6201 II 種, 強熱減量 1.2%) を、骨材に珪砂 6 号 (SS, 密度 2.60 g/cm³, 平均粒径 212 μm), 混和剤に高性能減水剤 (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) と長繊維 (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、針状鉱物であるワラストナイト (Wo, 密度 2.90 g/cm³) も用いた。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, 力学特性を表-3 にそれぞれ示す。

2.2 供試体の作製と試験方法

山本らの検討³⁾を参考に, 図-1 に示す幅 100 mm, 高さ 100 mm, 長さ 400 mm の梁状試験体に対し, 引張縁に厚さ 10 mm の UHP-FRCC 層を配置した複合部材を基準とした。これに, UHP-FRCC 層の断面形状と, 接合面への鋼繊維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。ここでは, UHP-FRCC 層の断面積が 1000 mm² (梁断面積の 10%) となる形状とした。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-4 に示すピッチおよび単位面積当たりの本数・面積となるように, HDR 繊維を図-3 のように設置した。図-4 に得られた各シリーズの UHP-FRCC 層の写真を示す。N の各シリーズでは, 予め HDR 繊維を厚さ 20 mm のスタイロフォームに所定の間隔で設置し, これを底板として UHP-FRCC 層の厚さが 10 mm となるように打ち込んで作製した。接合面には目粗しなど行わず, 型枠面として平滑に仕上げた。UHP-FRCC の練混ぜにはオムニミキサーを使用し, はじめに粉体および骨材を 1 分間空練りし, その後に減水剤および消泡剤を予め混練した水を投入して 6 分間練り混ぜた。得られたモルタルに OL 繊維, HDR 繊維を 1/3 ずつ投入し, 1 分間の練り混ぜを 3 回繰り返した。

4 点曲げ載荷試験は, 1000 kN 万能試験機を用いて毎秒 0.3 N/mm² の載荷速度を行った。曲げ変形は, 検長区間 60 mm のひずみゲージを図-1 に示す位置に設置し, 式(1)により算出した曲率として得た。

$$\phi = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{d_0} \quad (1)$$

ここで, ϕ : 曲率 (1/mm), $\varepsilon_1, \varepsilon_3$: ひずみゲージ[1]および[3]で計測されたひずみ (引張側を正とする), d_0 : ひずみゲージ間の距離 (= 70 mm) である。

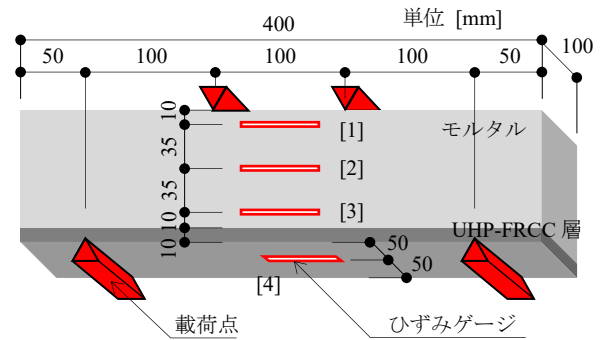


図-1 UHP-FRCC 層で補強されたモルタル梁

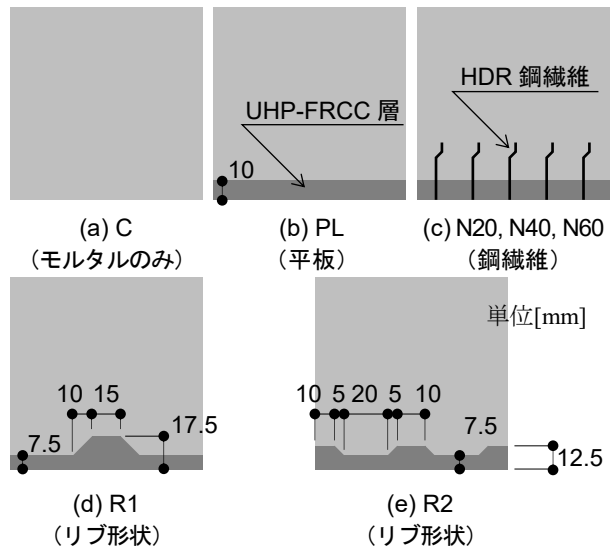


図-2 各シリーズの断面形状

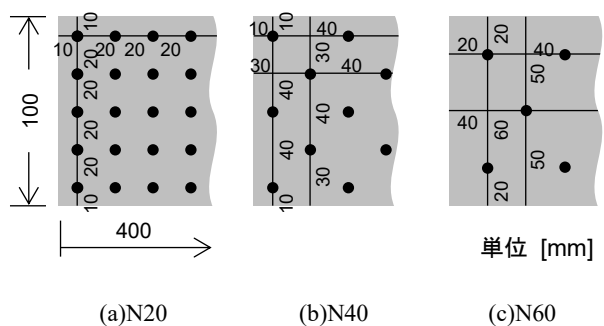


図-3 各シリーズの鋼繊維配置状況

表-4 各シリーズの鋼繊維の配置状況

シリーズ	代表ピッチ (mm)	単位面積当たりの本数 (本/m ²)	単位面積当たりの断面積比 (%)
N20	20	2500	0.028
N40	40	1250	0.014
N60	60	625	0.007

3. 実験結果

3.1 付着性状と力学性能

UHP-FRCC 層の接合方法を変えた供試体の曲げ試験結果を、図-5~8 に曲げモーメントと曲率の関係として FA 置換率ごとに示す。また、FA 置換率の影響を確認するため、置換率ごとの N20 シリーズの曲げ試験結果を図-9 に示す。

図-5 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。やや複雑な形状とした R2 や、接合面に鋼繊維を配置した N シリーズでは、接着面での剥離は生じないまま UHP-FRCC 層で曲げひび割れが生

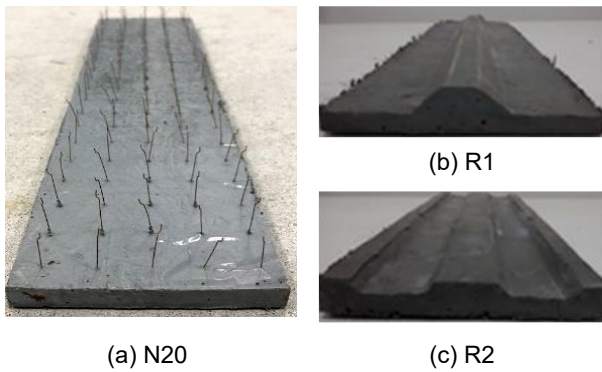


図-4 得られた UHP-FRCC 層

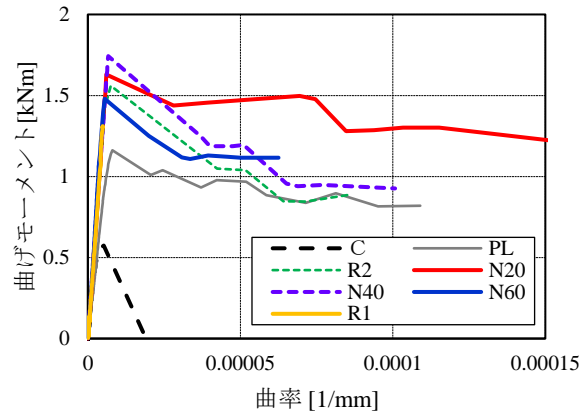


図-5 曲げモーメントと曲率の関係 (FA0)

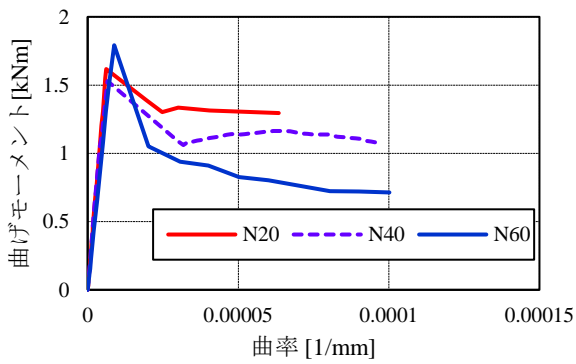


図-6 曲げモーメントと曲率の関係 (FA20)

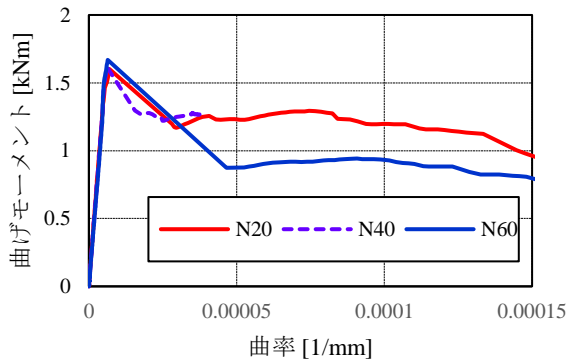


図-7 曲げモーメントと曲率の関係 (FA50)

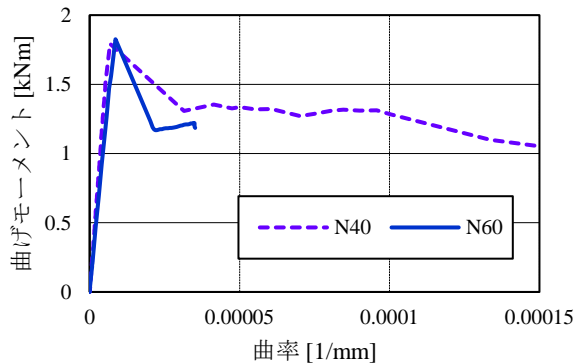


図-8 曲げモーメントと曲率の関係 (FA70)

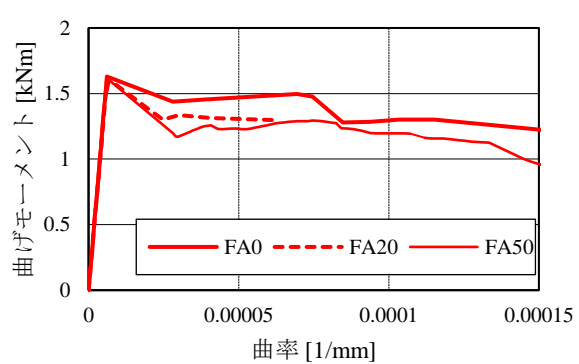


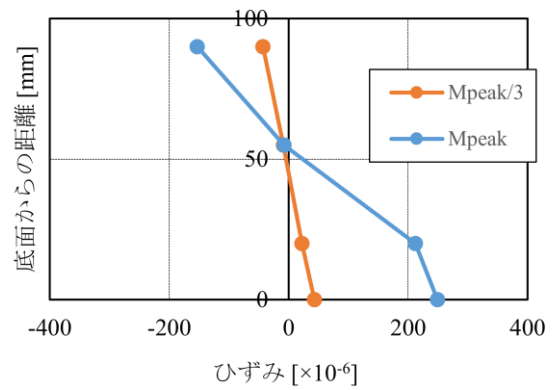
図-9 曲げモーメントと曲率の関係 (N20)

じ、高い曲げ強度が得られた。また、図-6~8にはFA置換率ごとに曲げモーメントと曲率の関係を示す。ここでは、最も大きい補強効果が得られたNシリーズについて記載している。また、図-9には、N20について、FA置換率ごとの曲げモーメントと曲率の関係を示す。これらの図や表-4からは、Nシリーズはいずれの場合も最大曲げモーメントが約1.7kNm程度まで増大する一方で、鋼繊維本数の多いN20はN40、N60と比較して、ポストピーク後の靱性が高い傾向が見られ、鋼繊維の使用により靱性の改善が可能なが分かる。ただし、鋼繊維本数を減らしたN60ではR2と概ね同等の靱性となった。また、FA置換率に着目すると、最大曲げモーメントについてはほぼ一定である一方で、FA置換率の増大に伴ってポストピーク後の靱性が低下する傾向が見られる。

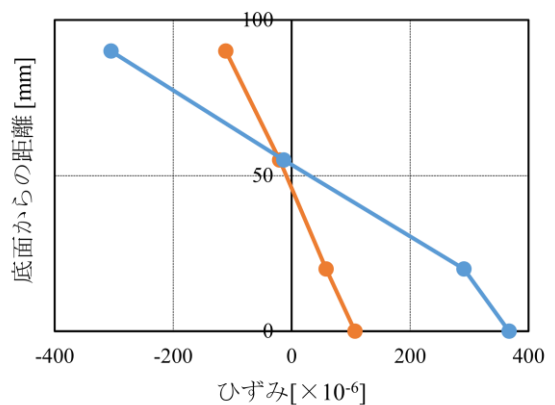
このときの、曲げ性能について考察するため、図-10に曲げモーメントが最大時の1/3に到達した時点($M_{peak}/3$)と、最大曲げモーメント時(M_{peak})の梁断面内のひずみ分布を示す。モルタルのみのC、および、R1の場合は、 $M_{peak}/3$ の時点では平面保持が成立しているものの、 M_{peak} ではUHP-FRCC層底面で計測されたひずみはモルタル部分と比較して小さくなっており、平面保持が成立していない。これは、UHP-FRCC層がモルタルから剥離したことにより、引張縁に配置されるUHP-FRCC層の引張応力が緩和されたためと考えられる。この一方で、N20の場合には $M_{peak}/3$ 、 M_{peak} のいずれにおいても平面保持が成立していることが確認できる。また、表-5に各シリーズの $M_{peak}/3$ 時および M_{peak} 時の、接合面に生じているせん断応力を示す。このせん断応力は、梁底(図-1でのひずみゲージ[4])とUHP-FRCC層の直上(同[3])で計測されたひずみから、それぞれのヤング係数を乗じて得た引張応力の差分として計算した。 $M_{peak}/3$ 時のせん断応力はどのシリーズも概ね同等の値を示しているが、 M_{peak} 時のせん断応力は、R1と比較してNの各シリーズでは大きな値を示した。すなわち、接合面での剥離は生じずに、平面が保持されたためにせん断応力が増加したと考える。これらの結果から、鋼繊維を用いて付着性状を改善することで、引張縁に配置されたUHP-FRCC層がモルタル部分と一体化し、曲げ性能を向上させたと考えられる。

ここで、N20、N40、N60に着目する。図-11には、各試験体のひずみ分布と破壊性状を示す。それぞれのグラフに、最大曲げ応力時までひび割れが発生せず、一体となって変形すると仮定した場合のひずみ分布を、理想値として併せて示した。鋼繊維を用いたいずれの試験体も、最大曲げモーメント時まで概ね平面保持が成立しており、理想値との差が小さい。

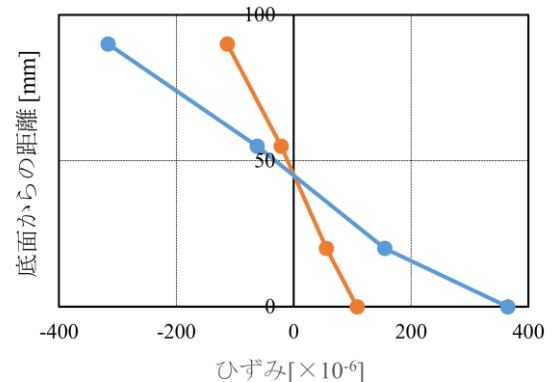
最大曲げモーメント到達後の曲率 $4.0 \times 10^{-5} 1/mm$ まで



(a) C



(b) R1



(c) N20

図-10 最大曲げモーメント時のひずみ分布

表-5 各シリーズの接合面におけるせん断応力

シリーズ	$M_{peak}/3$ 時のせん断応力 (N/mm ²)	M_{peak} 時のせん断応力 (N/mm ²)
R1	3.5	10.0
N20	3.6	13.1
N40	3.2	12.8
N60	3.1	13.2

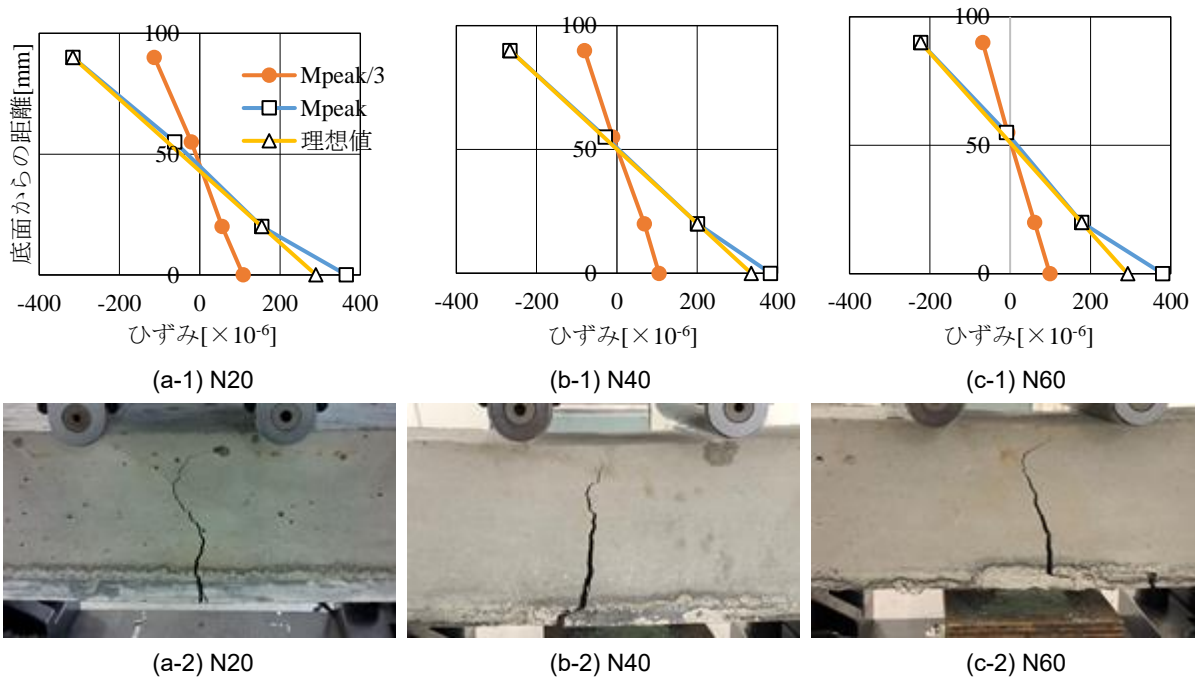


図-11 ひずみ分布と破壊性状

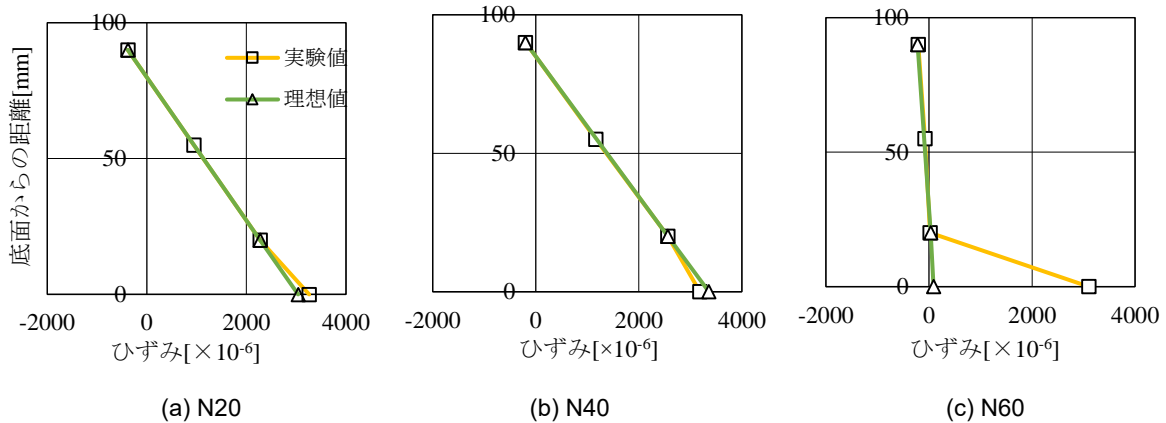


図-12 最大曲げモーメント到達後のひずみ分布

の N20, N40, N60 のひずみ分布を図-12 に示す。図-12 より、N20, N40 では最大曲げモーメント到達後も平面保持が成立していることから、この変形量においても接合面での剥離は発生せず、モルタル部のひび割れが抑制されて高い靱性が得られていることがわかる。これらのことから、本実験の範囲内では、N40 に相当する単位面積当たりの断面積比 0.014% 程度の鋼繊維を用いることにより、初期ひび割れ発生後も UHP-FRCC 層は剥離することなく性能を発揮する一方で、より高い靱性を得るためには、N20 に相当する単位面積当たりの断面積比 0.028% の鋼繊維を用いることが効果的であると考えられる。

3.2 力学性能と環境影響評価

インベントリデータ³⁾を用いて、UHP-FRCC 層の材料

製造時にかかる CO₂ 排出量を計算し、FA0 の配 (調) 合を用いた PL を基準とした場合の CO₂ 排出量削減率を表-6 に示す。また、各シリーズの最大曲げモーメントを表-7 に示す。ここでは、Fantilli ら⁹⁾の提案する力学性能と CO₂ 排出量を併せて評価可能な指標を用い、図-14 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、基準とする PL の CO₂ 排出量 (EI_{sup}) を分子に、各シリーズの CO₂ 排出量 (EI) を分母として計算した CO₂ 排出量削減効果を示している。また、横軸は力学性能の指標であり、基準とする PL の最大曲げモーメント (MI_{inf}) を分母に、各シリーズの最大曲げモーメント (MI) を分子として、力学特性を指標化して示している。これらをグラフ上にプロットすることにより、領域区分を用いて環境影響評価を力学性能と併せて視覚

的に行うことが可能となる。ただし、原点に相当する位置は (1, 1) となることに注意が必要である。図-14 より、ほとんどの結果は第一象限に相当する領域に位置し、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。また、最大曲げモーメントを力学性能指標として用いているため、N60 がいずれの使用でも有効であるが、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、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。

表-6 各シリーズの CO₂ 排出量の削減率

シリーズ	総排出量 (kg)	FA0 に対する削減率(%)			
		PL, R1, R2	N20	N40	N60
FA0	0.4840		-12.91	-6.46	-3.23
FA20	0.4013	17.08	4.16	10.62	13.85
FA50	0.2874	40.61	27.69	34.15	37.38
FA70	0.2175	55.05	42.14	48.60	51.83

表-7 各シリーズの最大曲げモーメント(kNm)

シリーズ	FA0	FA20	FA50	FA70
PL	1.15	1.60	—*	1.34
R1	1.37	—*	—*	—*
R2	1.58	1.84	—*	1.53
N20	1.68	1.64	1.60	1.41
N40	1.74	1.53	1.55	1.79
N60	1.67	1.79	1.65	1.82

※ 取得データなし

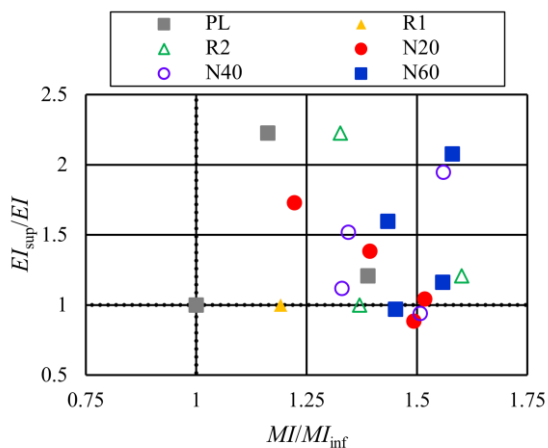


図-14 最大曲げモーメントとフライアッシュ使用による環境影響の評価

4. まとめ

本研究では、UHP-FRCC 層を用いたモルタル梁の曲げ性状について実験的な検討を行った。また、UHP-FRCC に対してフライアッシュ置換を行い、環境影響評価を併せて検討した結果、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、接合面の形状を複雑化させた梁よりも、さらに最大曲げモーメントが大きくなった。また、鋼繊維を用いた梁では、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、N40 相当程度 (単位面積当たりの断面積比 0.014%) 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) Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T. Mihashi, H.: 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, 高橋典之, 西脇智哉: 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, 御手洗駿, 武田浩二, 村上聖: 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.