

論文 超高強度高靱性繊維補強セメント系複合材料によるプレキャストパネルを用いた既存建築物の補修方法

安達 由佳*1・Oscar MANCINELLI*2, 西脇 智哉*3・Alessandro FANTILLI*4

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）を用いたプレキャストパネルによる改修を想定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 を用いた既存部材の改修方法について検討した。その結果、定着用の鋼繊維を配置した UHP-FRCC によるプレキャストパネルを用いた場合に高い力学性能が得られ、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同様の結果が得られた。

キーワード: UHP-FRCC, プレキャストパネル, 環境影響評価, 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 により既存の鉄筋コンクリート部材の断面の一部を置換することで、補強を行う方法がいくつか提案されている。

渡邊ら³⁾は、プレキャストの UFC パネルを用いた柱のせん断すべり耐力について検討している。Talayerh ら⁴⁾は、コンクリート梁の引張縁に対して UHP-FRCC を断面積の 20%部分に接着した梁の載荷試験を行い、部材の力学性能を改善できることを報告している。UHP-FRCC を引張縁に打ち込む検討⁵⁾では、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りした部材ほど高い靱性が得られることが確認された。

以上の背景から、本検討では、既存の梁部材に対してプレキャストの UHP-FRCC 層を適用することを想定し

た実験を行う。普通強度の無筋モルタル梁の引張縁に対して、UHP-FRCC 層を直接打ち込む方法と、プレキャストの UHP-FRCC 層を同様の調合の UHP-FRCC により接着する方法により得た複合部材に対して、曲げ性能について検討を行った。また、環境負荷を抑える目的で、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プレキャストの 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。

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、ペースト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、

*1 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 Dept. of Structural, Geotechnical and Building Engineering (DISEG), Politecnico di Torino, Civil Engineer, Ph. D. Student

*3 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)

*4 Dept. of Structural, Geotechnical and Building Engineering (DISEG), Politecnico di Torino, Assoc. Prof., Ph. D.

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。ただし、後述の UHP-FRCC 層の接着に用いた UHP-FRCC については、HDR 繊維を使用しなかった。また、接着層に用いた UHP-FRCC には FA 置換を行わない調合 (FA0) を用いた。母材となる梁のモルタル部には、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

図-1 に示すように、幅 100 mm、高さ 100 mm、長さ 400 mm の梁状モルタル試験体に対し、曲げ試験の際に引張縁となる部分に UHP-FRCC 層を適用する。ここでは、UHP-FRCC 層の断面積が 2000 mm² (梁断面積の 16%) となる形状とした。図-2 に示す断面形状の模式図のように、複合部材としての梁成が 120 mm とし、UHP-FRCC 層の適用方法をパラメータとした。

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 分間の練混ぜを 3 回繰り返した。

UHP-FRCC 層の適用方法は、これを直接打ち込むことにより作製する CL シリーズ (図-2(b)) と、厚さ 10 mm のプレキャストの UHP-FRCC 層を、アンカーとねじによりモルタル梁へ固定した後、この隙間に UHP-FRCC ペーストを流し込むことにより接着した PL シリーズ (図-2(c)) の 2 種類とした。PL シリーズの試験体作製手順の詳細を図-4 に示す。いずれの場合も、図-4(a) に示すようにモルタル梁の梁底にはエアーチャッパを使って目荒らしを施した。

CL シリーズについては、硬化したモルタル梁の周囲に型枠を設置し、厚さが 20 mm となるように UHP-FRCC を流し込んで試験体を得た。打込み後は、既存コンクリート構造物への適用を意図して、蒸気養生は行わずに気中養生とした。PL シリーズについては、既往の検討⁵⁾を参考に、付着用の鋼繊維として予め HDR を一面に設置した、厚さ 10 mm の UHP-FRCC 層をプレキャストパネルとして準備した。ここでは、付着用 HDR を図-3 および表-4 に示す配置・使用量として、N20 と N40 の 2 シリーズとした。この UHP-FRCC によるプレキャストパネルは、予め 20mm に切断した HDR 繊維を厚さ 10 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 の打込み厚さが 10 mm となるように作製した。打込み後は材齢 2 日で脱型し、90 °C・48 時間の蒸気養生を施した。

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

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
圧縮強度	45.1	204.7	193.4
ヤング係数	24.9×10 ³	46.4×10 ³	45.5×10 ³
引張強度*	2.6	16.5	17.8

*モルタルは割裂試験、UHP-FRCC は一軸引張試験による

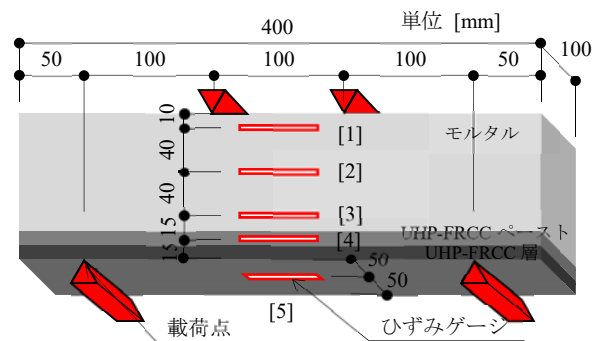


図-1 UHP-FRCC 層で補強されたモルタル梁

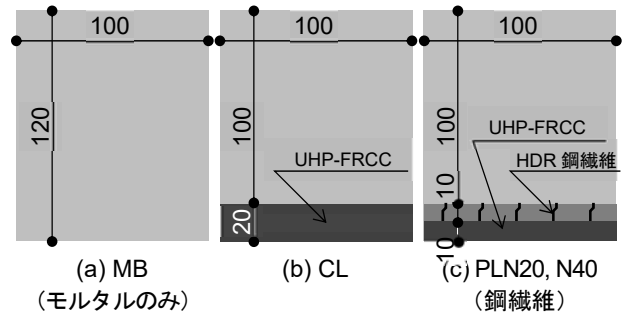


図-2 各シリーズの断面形状

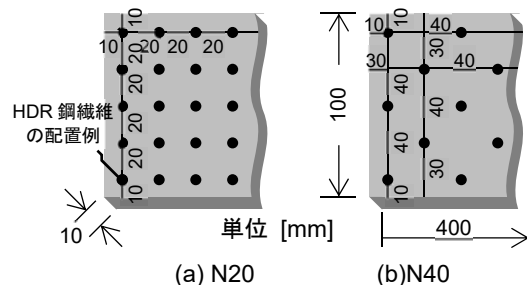


図-3 各シリーズの鋼繊維配置状況

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

ここで、図-4 に従って PL シリーズの試験体作製手順の詳細を述べる。モルタル梁には、図-4(b)に示すように、UHP-FRCC によるプレキャストパネルを固定するためのねじを受けるアンカーを設置した。UHP-FRCC によるプレキャストパネルには、図-4(c)に示すように、このアンカーと同じ、端部から 20 mm の位置にねじ設置のための穴を準備しておく。これらを利用して、図-4(d)のように、モルタル梁とプレキャスト UHP-FRCC 層を、隙間が約 12.5 mm となるようにねじで仮固定した。このようにして得た層間に、図-4(e)に示すように UHP-FRCC によるプレキャストパネルとモルタル梁の隙間にモルタルを注入した。ここで注入のために用いたモルタルは、プレキャストパネルに用いた UHP-FRCC から、長繊維である HDR を除いた高強度モルタルである。この状態で図-4(f)に示すようにねじを締め込み、全体の梁成が 120 mm となるように調整して、プレキャスト UHP-FRCC 層が接着された試験体を得た。このことにより、プレキャストパネルとモルタル梁の間隙部分で、高強度モルタルが隙間なく充填されることを期待している。これらの手順によって高強度モルタルを注入して試験体を得た後は、試験まで気中養生とした。

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。

$$\phi = \frac{\varepsilon_5 - \varepsilon_1}{d_0} \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 曲率 (1/mm), $\varepsilon_1, \varepsilon_5$: ひずみゲージ[1]および[5]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 (= 105 mm) である。

3. 実験結果

3.1 付着性状と力学性能

梁底に異なる方法により UHP-FRCC 層を適用した供試体の曲げ試験の結果を、曲げモーメントと曲率の関係として図-5 に示す。図-6 には、各シリーズの最大曲げモーメントの結果を示す。

図-5 および図-6 に示されるように、UHP-FRCC 層を適用した CL および PL シリーズは、モルタルのみの MB 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加していることが確認できる。また、UHP-FRCC 層を直接打ち込み、蒸気養生を施さなかった CL よりも、鋼繊維を設置した UHP-FRCC によるプレキャストパネルを適用した PL N20, PL N40 シリーズでは最大曲げモーメントがさらに増大している。これは、プレキャストパネルには蒸気養生が施されたことで UHP-FRCC として十分な強度が得られた一方で、既存構造物への現地で

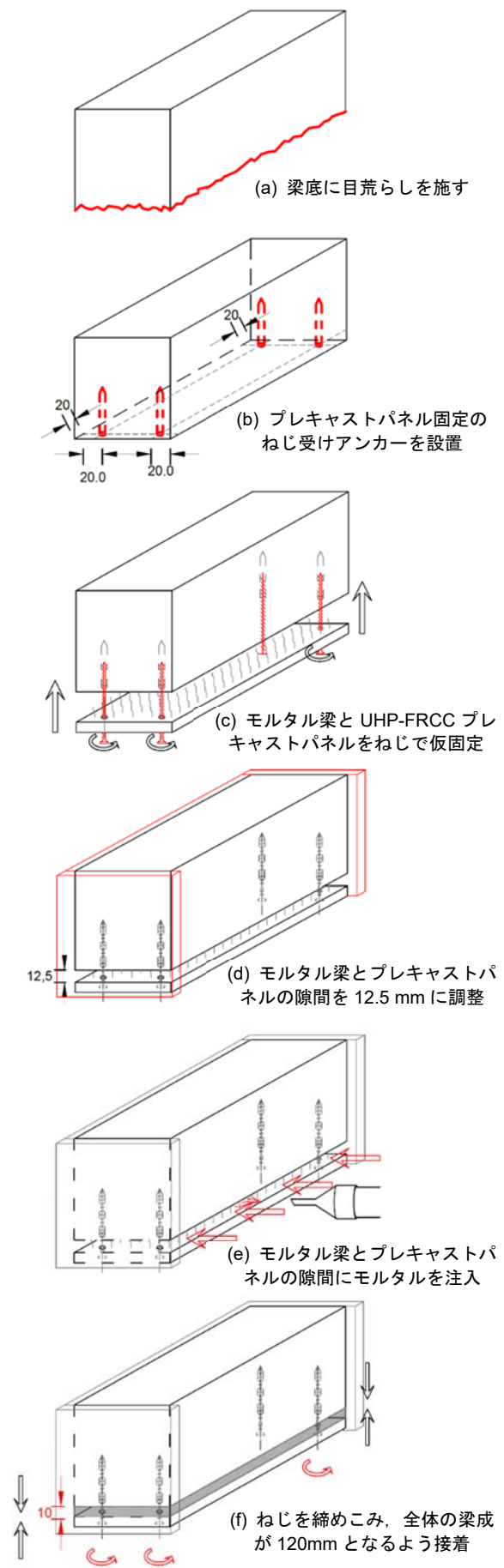


図-4 PL シリーズの試験体作製手順

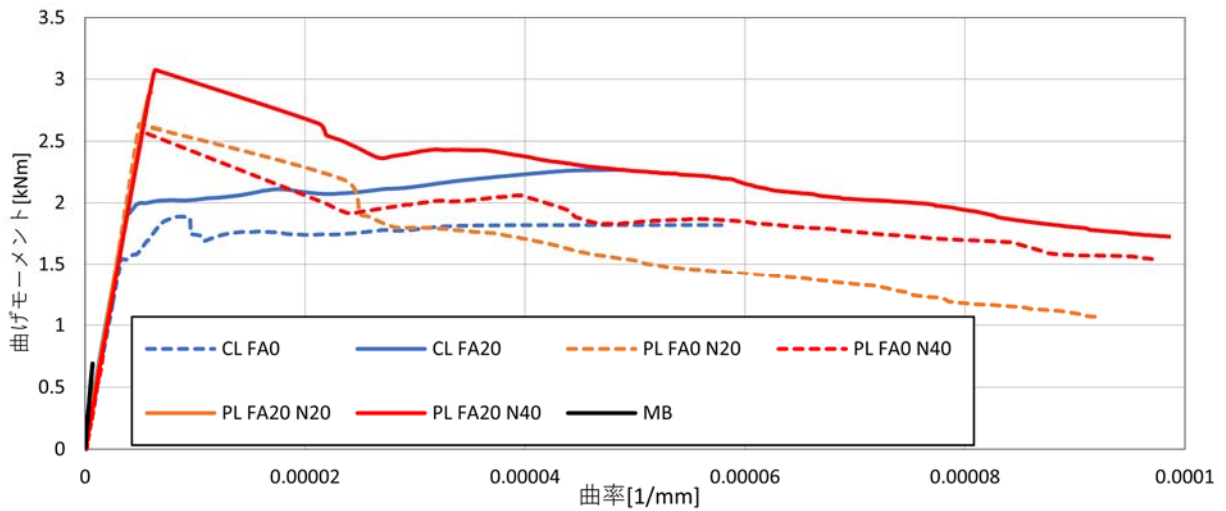


図-5 曲げモーメントと曲率の関係

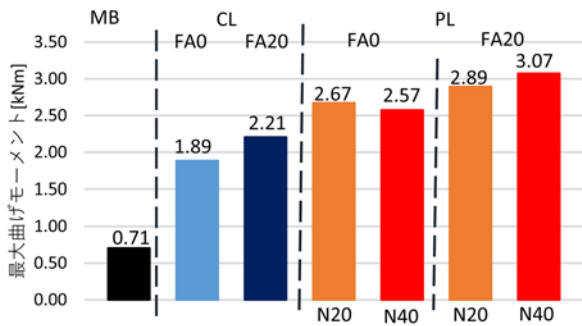


図-6 各シリーズの最大曲げモーメント



図-7 せん断破壊した試験体 (FA0 N20 シリーズ)

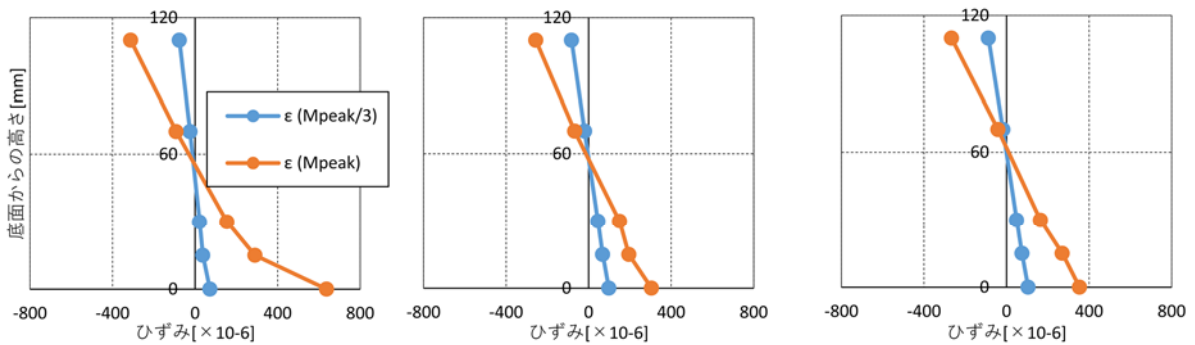


図-8 ひずみ分布と破壊性状

の適用を意図した CL シリーズでは蒸気養生による強度発現が得られなかったためと考えられる。PL シリーズについても、層間に注入したモルタル部分には蒸気養生が

施されていないが、本検討の範囲では曲げ強度の向上に寄与が可能であったことが確認できる。この一方で、曲げ靱性に着目すると、ポストピーク後は CL シリーズと

比較して PL シリーズではやや脆性的な挙動を示している。このことは、層間に注入したモルタル部分に空隙が見られる場合があり、付着強度がやや小さかったことが原因と考えられる。

図-5 より、破線で示される FA を使用しない FA0 シリーズと、実線で示される FA によりセメントの 20% を置換した FA20 シリーズを比較すると、FA20 シリーズでは圧縮強度が FA0 シリーズより低いにも関わらず、FA0 シリーズと同等の曲げ強度を発揮することが確認できる。この傾向は、CL, PL いずれのシリーズであっても共通して見られた。これは、表-3 にも示されるように、FA 置換を行った UHP-FRCC では、圧縮強度が低下する一方で引張強度の低下が限定的である⁹⁾ことから理解できる。本検討のように、引張縁に UHP-FRCC を用いる場合においては、FA 置換率の増大による力学性能の低下を改善しつつ、環境負荷を抑えた調合の適用が可能であると考えられる。

今回の実験では、曲げ破壊を想定して図-1 に示すようにひずみゲージを取り付けて変形を計測したが、特に PL N20, PL N40 シリーズでは、図-7 に示すようにせん断破壊が生じた供試体が複数見られた。この一方で、CL シリーズではこのようなせん断破壊が生じた供試体は見られなかった。せん断破壊が生じた場合には、最大曲げモーメント後の曲率が測定できなかったため、ポストピークの挙動は示されていない。ここで用いたモルタル梁は無筋としているため、引張縁に配置した UHP-FRCC 層が設置されたことで、曲げに伴う引張応力に対して十分な補強が行われ、せん断破壊が生じたものと考えられる。このことは、図-6 の最大曲げモーメントを比較すると CL よりも高い、最大曲げモーメントが得られていることから確認できる。

このときの、補強方法の有効性について考察するため、図-8 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、および、破壊性状を示す。CL, PL いずれのシリーズも $M_{peak}/3$ の時点では、ひずみ分布の状況から平面保持が成立していると考えられる。 M_{peak} の時点に着目すると、PL シリーズでは平面保持が概ね成立しており、十分な付着強度を有しているものと考えられる。この一方で、CL シリーズでは引張縁でのひずみが直線分布から外れており、剥離する傾向が見られた。図-8 に示される破壊性状の写真からは、いずれのシリーズも接合面での明確な剥離が生じることなく、曲げひび割れが発生しているが、PL シリーズで採用したプレキャスト UHP-FRCC 層ではより十分な付着を得られることが確認できる。

これらの結果から、引張縁に配置された UHP-FRCC 層

表-6 各シリーズの試験体 1 体当たりの CO₂ 排出量

シリーズ	CO ₂ 排出量(kg)		
	CL	PL N20	PL N40
FA0	0.19	0.24	0.21
FA20	0.16	0.23	0.19

表-7 各シリーズの CO₂ 排出量の削減率

シリーズ	FA0 に対する削減率(%)		
	CL	PL N20	PL N40
FA0	-	5.20	5.99
FA20	16.78	13.59	14.38

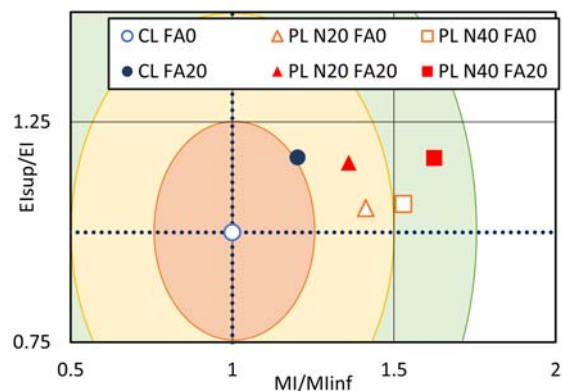


図-9 最大曲げモーメントとフライアッシュ使用による環境影響の評価

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。すなわち、本検討で提案する既存の梁を模したモルタル梁に対して、UHP-FRCC によるプレキャストパネルを設置する補修方法は、力学性能を改善させる有効な適用方法と考えられる。

3.2 力学性能と環境影響評価

インベントリデータ⁹⁾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、表-6 に示す。さらに、FA0 の配(調)合を用いた CL を基準とした場合の CO₂ 排出量削減率を表-7 に示す。また、各シリーズの最大曲げモーメントを表-8 に示す。ここでは、Fantilli⁸⁾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-9 に CL FA0 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-9より、すべての結果は第一象限に相当する領域に位置し、CL FA0を基準とした場合には、フライアッシュの置換により環境指標が改善されるとともに、3.1で確認された接合面での改善により、力学特性が向上したことが確認できる。図-9において、第一象限の中では原点からの距離が横軸で大きいほど力学性能が、縦軸で大きいほど環境影響が優れていると評価できる。力学性能の指標と環境指標を併せて評価するために、図中に示した同心円を用いて区分すると、PLN20シリーズはいずれも1.25~1.50の範囲(図-9黄色エリア)に、PLN40シリーズはいずれも1.50~1.75の範囲(図-9緑エリア)に分布している。このことから、PLN40が力学性能、環境影響ともに有効であることがわかる。また、PLN40 FA20が原点に相当するCL FA0からの距離が最も遠く、本検討の範囲内では、接合面をN40とし、FA置換を行ったUHP-FRCC層が、力学性能と環境指標の両側面から最も有効であると評価できる。

表-8 各シリーズの最大曲げモーメント

シリーズ	最大曲げモーメント(kNm)		
	CL	PL N20	PL N40
FA0	1.89	2.67	2.89
FA20	2.21	2.57	3.07

4. まとめ

本研究では、既存の梁部材に対してUHP-FRCC層を適用する補修方法を想定し、この適用方法としてプレキャストパネルをモルタルにより接着させる方法を検討した。また、環境負荷を抑える目的で、UHP-FRCCのセメントの一部をフライアッシュと置換し、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) 既存のモルタル梁にUHP-FRCC層を用いて補修を行った梁では、モルタルのみの梁と比較して最大曲げモーメントが増大し、曲げ性能が大きく向上することが確認された。
- 2) 既存のモルタル梁に、直接UHP-FRCC層を打ち込

む方法と、UHP-FRCCによるプレキャストパネルを接着する方法では、プレキャストパネルを用いたシリーズの方がより十分な付着が得られ、剥離が発生することなく供試体の破壊に至った。そのため、最大曲げモーメントを比較すると、UHP-FRCCによるプレキャストパネルを用いたシリーズでの向上がより大きい結果となった。

- 3) セメントの一部をフライアッシュに置換した場合でも、曲げ性能が低下することなく、力学性能が保たれることが確認された。よって、UHP-FRCCを用いた補修方法は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) 渡邊秀和ら：プレキャストUFCパネル接着面のせん断すべり耐力に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.41, No.2, pp. 913-918, 2019
- 4) Talayeh Noshiravani, Eugen Bruhwiler: Rotation capacity and stress redistribution ability of R-UHPFRC-RC composite continuous beams: an experimental investigation, *Material and Structures*, Vol. 46, No. 12, pp. 2013-2028, 2013.
- 5) 安達由佳ら：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, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 41, No. 1, pp. 317-322, 2019
- 6) 鈴木慶汰ら：フライアッシュを大量に使用したUHP-FRCCの力学特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 41, No. 1, pp. 303-308, 2016
- 7) 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
- 8) 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, pp. 282-290, 2013.