超高強度高靭性繊維補強セメント系複合材料を用いた既存建築物の補修方法とその環境影響評価

RETROFITTING METHOD AND ECO-MECHANICAL ASSESSMENT FOR EXISTING BUILDINGS USING PRECAST PANEL MADE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

安達 由佳
Yuka ADACHI

As results of experimental investigations of the UHP-FRCC application to existing concrete beams, the following knowledge was obtained;

1. The mechanical performance of the beams with UHP-FRCC was greatly improved. The bond property of the joint between the existing beam and the UHP-FRCC layer affected the mechanical performance.
2. Using the precast UHP-FRCC can obtain more sufficient mechanical performance than the *in-situ* casting of UHP-FRCC.
3. The precast UHP-FRCC layer with nails can improve mechanical performance even when a part of cement is replaced with fly ash. Therefore, the proposed precast UHP-FRCC layer can be effective method for both environmental and mechanical aspects.

Keywords : *UHP-FRCC, precast panel, eco-mechanical assessment, fly ash*
UHP-FRCC，プレキャストパネル，環境影響評価，フライアッシュ

1. はじめに

一般に構造物は、調査、計画、設計、施工、維持管理という段階を経るが、このうち維持管理の占める時間は長く、そのコストも極めて大きい。構造物に対する適切な補修・補強によって長寿命化することで、より長く安全に建物を使用することができれば、構造物の解体により発生する多くの CO_2 や廃棄物などの環境負荷を低減することができる。ライフサイクルを考慮した環境負荷低減を図りつつ、構造物の力学特性を高めるために、超高強度高靭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)]を用いた既存構造物の補修方法を検討する。UHP-FRCC は、圧縮強度 150 N/mm^2 以上、引張強度が 5 N/mm^2 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、シリカフュ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/m^3 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。Talayeh 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。

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。初めに UHP-FRCC 層とモルタル層との接合面の付着性状による力学性能への影響を検討する。その後、既存の梁の補強について検討するため、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。さらに、実際の建築部材を想定するために、無筋モルタル梁を鉄筋コンクリート梁に変更し、試験体サイズを拡大し、プレキャストの UHP-FRCC 層を使った補強方法を用いて力学性能について検討を行った。また、全ての検討において、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補強方法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] プレキャストの UHP-FRCC 層を用いた補強方法による力学性能への影響、[C] 鉄筋コンクリート梁への適用の検討を行い、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と環境影響評価について検討を行った。

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/cm^3）、シリカフューム（SF、密度 2.20 g/cm^3）、フライアッシュ（FA、密度 2.20 g/cm^3、JIS A 6201II種、強熱減量 1.2%）を、骨材に硅砂 6 号（SS、密度 2.60 g/cm^3、平均粒径 212 μm）、混和剤に高性能減水剤（SP、密度 1.05

東北大学大学院都市・建築学専攻、ライフサイクル工学分野

Life Cycle Engineering Laboratory,
Dept. of Architecture and Building Science, Tohoku University

表－1　モルタルの調合表 (kg/m^3)

W	HSC	S1+S2
291.4	485.6	1456.9

表－2　コンクリートの調合表 (kg/m^3)

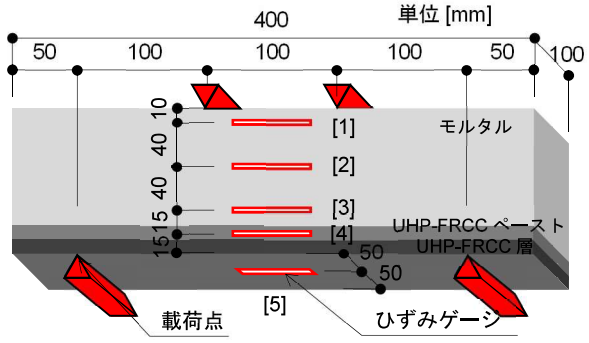
W	C	G	S1	S2	SP1
175	376	990	626	157	3.76

表－3　UHP-FRCC の調合表 (kg/m^3)

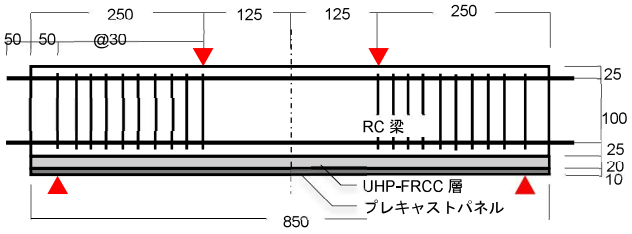
	W	LHC	SF	FA	SS	Wo	SP2	DA
FA0	201	1197	263	0	511	190	32.1	0.3
FA20	195	928	255	232	495	184	31.0	0.3
FA50	187	555	244	555	474	176	30.0	0.3
FA70	181	323	236	753	459	170	31.5	0.3

表－4　各シリーズの鋼繊維の配置状況

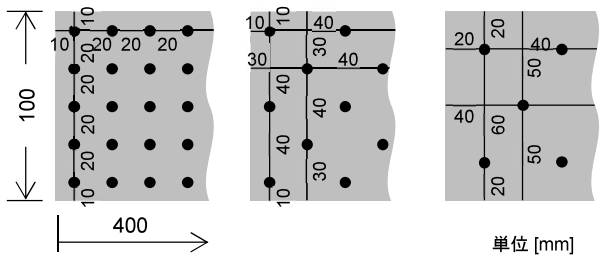
シリーズ	代表ピッチ (mm)	単位面積当たりの本数 (本/m^2)	単位面積当たりの断面積比(%)
N20	20	2500	0.028
N40	40	1250	0.014
N60	60	625	0.007



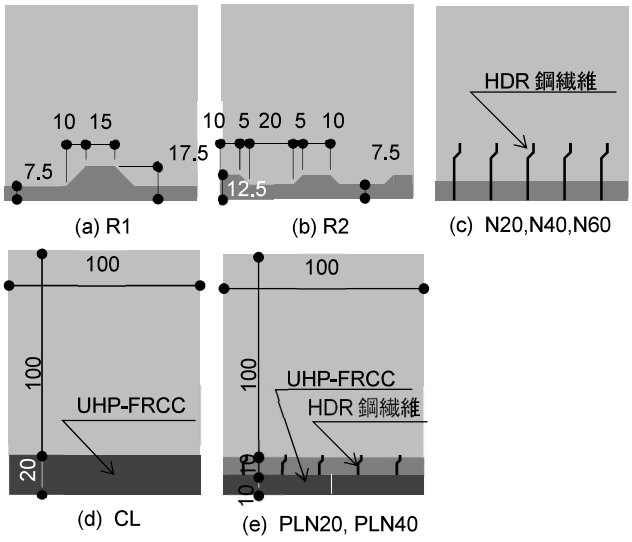
図－1　UHP-FRCC 層で補強されたモルタル梁



図－2　UHP-FRCC プレキャストパネルで補強された RC 梁



図－3　各シリーズの鋼繊維配置状況



図－4　試験体の断面性状

g/cm^3、ポリカルボン酸系）、消泡剤（DA、密度 1.00 g/cm^3）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/cm^3、繊維長 6 mm、直径 0.16 mm）と長繊維（HDR、両端フック形状、密度 7.85 g/cm^3、繊維長 30 mm、直径 0.38 mm）を使用し針状鉱物であるワラストナイト（Wo、密度 2.90 g/cm^3）も用いた。ただし、後述の UHP-FRCC 層の接着に用いた UHP-FRCC には 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。[A], [B]の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/cm^3）、および、骨材に砕砂（S1、密度 2.61 g/cm^3）と陸砂（S2、密度 2.58 g/cm^3）を重量比で 1:1 混合したものを使用した。[C]のコンクリート梁では、粗骨材に砕石（表乾密度 2.75 g/cm^3）、細骨材に S1 と S2 を重量比で 8:2 混合したものを、混和剤に AE 減水剤（標準系 I 種、密度 1.00 g/cm^3）を使用した。モルタル部、コンクリート部、UHP-FRCC 層の配（調）合を、表－1、表－2、表－3、表－4 にそれぞれ示す。また、UHP-FRCC 層に鋼繊維を配置するシリーズの鋼繊維配置状況を図－3 に示す。

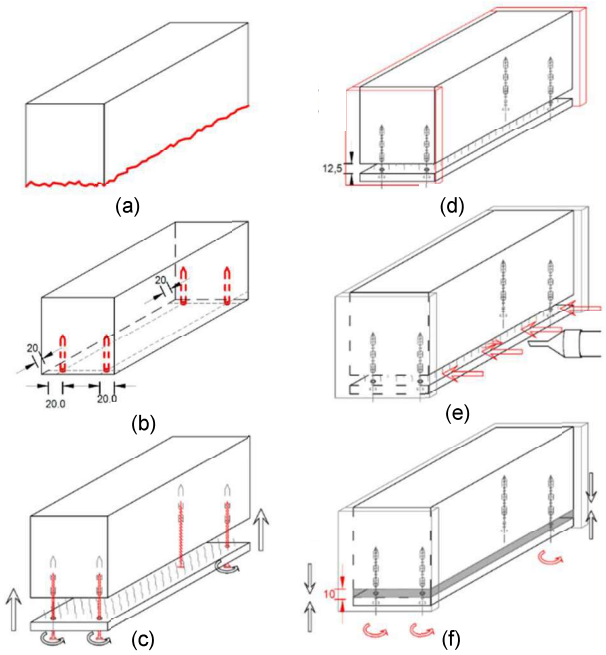
2.2.　供試体の作製と試験方法

[A], [B]の検討に用いる無筋のモルタル梁は、いずれも幅 100 mm、高さ 100 mm、長さ 400 mm である。これに対して、[C]の検討では、せん断補強筋と主鉄筋を配置した幅 125 mm、高さ 125 mm、長さ 850 mm の RC 梁を用いた。試験体を図－1、図－2 に示す。この試験体に対して、曲げ試験の際に引張縁となる部分に UHP-FRCC 層を適用する。UHP-FRCC 層はそれぞれ断面積を[A]では梁断面積 10%、[B], [C]では 16%となる形状とした。UHP-FRCC 層の適用方法をパラメータとした。主要な断面性状を図－4 に示す。図－4 (a)～(c)は[A]、(d), (e)は[B]の断面性状である。

UHP-FRCC の練り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 分間の練混ぜを 3 回繰り返した。

UHP-FRCC 層の適用方法は、[A]は付着性状を変化させた UHP-

FRCC 層を先に作製し、その上からモルタル層を打ち込むことで試験体を得た。[B], [C]の PL シリーズの作製手順を図－5 に示す。既存の梁を作製後、図－5(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－5(c)に示すように、このアンカーと同じ、端部から 20mm 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－5(d)のように、既存梁とプレキャスト UHP-FRCC 層を接着層の隙間を開けてねじで固定した。このようにして得た層間に、モルタルを注入した。接着層のモルタルは、UHP-FRCC のプレキャストパネルから HDR を除いた高強度モルタルである。この状態で図－5(f)に示すようにねじを締めこみ、全体の梁成を調整した。この手順で、プレキャストパネルと既存梁の間隙部分で、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。



図－5　試験体の作製手順

全ての検討において、4 点曲げ載荷試験を行った。1000kN 万能試験機を用いて、[A], [B]では毎秒 0.3 N/mm^2 の荷重制御で、[C]では同じ載荷速度を目標に手動調整にて載荷を行った。曲げ変形は、[A], [B]ではひずみゲージ、[C]では変位計から算出したひずみを用いて、式(1)により算出した曲率として得た。

$$\emptyset = \frac{\varepsilon_5 - \varepsilon_1}{d_0} \qquad (1)$$

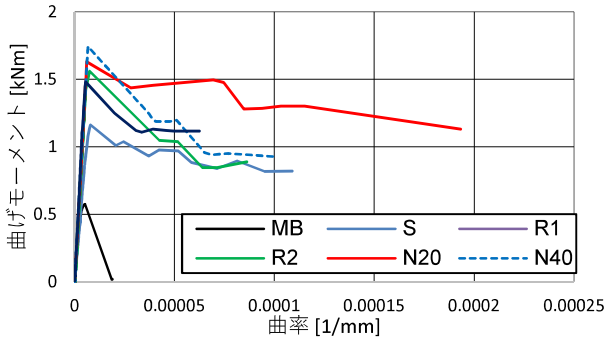
ここで、ϕ：曲率（1/mm）、ε_1：ひずみ（圧縮側）、ε_5：ひずみ（引張側）、d_0：ひずみの距離である。

3.　実験結果

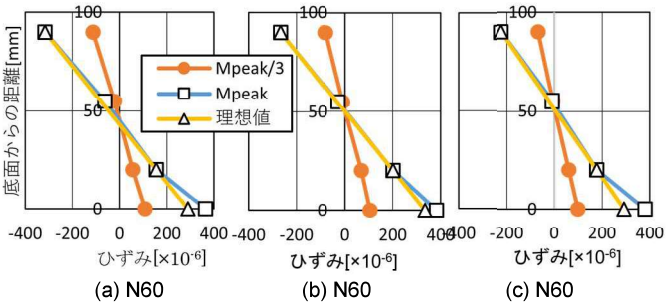
3.1.　[A] 接合面形状が付着性状と複合部材の力学性能へ与える影響

UHP-FRCC 層の接合方法を変えた供試体の曲げ試験結果を曲げモーメントと曲率の関係として図－6 に示す。UHP-FRCC 層を適用し、接合面を複雑化させた R、N シリーズの力学特性が向上した。また、曲げ性能について考察するため、図－7 に N20、N40、N60 の曲げモーメントが最大時の 1/3 に到達した時点（Mpeak/3）と、最大曲げモーメント時（Mpeak）の梁断面内のひずみ分布を示す。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。

よって、接合面を複雑化させ付着性状を高めることで、モルタル層と UHP-FRCC 層が一体となって動き、力学性能が向上することが示された。



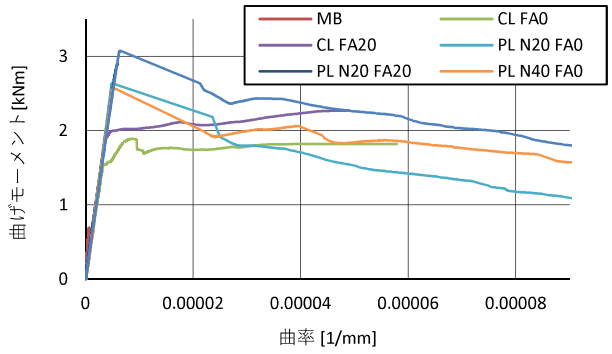
図－6　モルタル梁の曲げモーメントと曲率の関係



図－7　ひずみ分布

3.2.　[B] プレキャスト UHP-FRCC 層を用いた補強方法による力学性能への影響

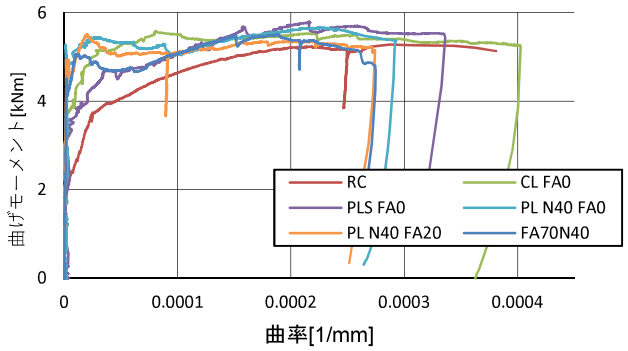
梁底に異なる方法によりプレキャスト UHP-FRCC 層を適用した試験体の曲げ試験の結果を図－8 に示す。UHP-FRCC 層を直接打ち込み、蒸気養生を施さなかった CL よりも、鋼繊維を設置した UHP-FRCC によるプレキャストパネルを適用した PL N20、PL N40 シリーズでは最大曲げモーメントがさらに増大している。プレキャストパネルに蒸気養生が施されたことで、UHP-FRCC として十分な強度が得られた一方で、既存構造物への現地での適用を意図した CL シリーズでは蒸気養生による強度発現が得られなかったためと考えられる。プレキャストパネルを先に作製し、蒸気養生を施す方法がより有効な補修方法であると示された。PL シリーズは、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た。付着性状を高めたプレキャストの UHP-FRCC を後から設置する方法でも、梁の力学性能を向上させることができ、構造物の補修方法への応用が期待できる結果となった。



図－8　[B] 曲げモーメントと曲率の関係

3.3.　[C] 鉄筋コンクリート梁への適用の検討

RC 梁の梁底に UHP-FRCC 層を適用した供試体の曲げ試験結果を、図－9 に示す。[A], [B]の検討と同様に、プレキャストパネルに鋼繊維を配置した PL N シリーズが他のシリーズと比べて、降伏荷重が向上する結果が得られた。試験体サイズを拡大し、鉄筋を配置した梁にも、付着性状を高める補修方法が有効であることがわかった。付着性状が向上することで、UHP-FRCC 層が応力を負担し、梁の変形を抑えることで、鉄筋が降伏するのを抑制したため、曲げ性能が大きく向上したと考えられる。



図－9　[C] RC 梁の曲げモーメントと曲率の関係

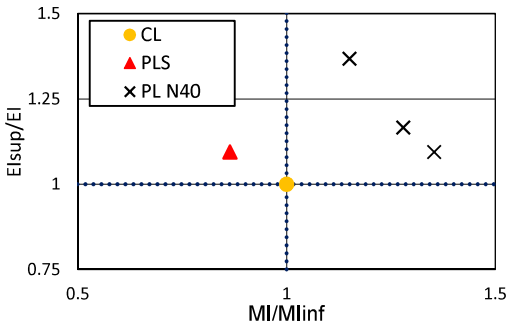
3.4.　環境影響評価

フライアッシュの置換による環境影響への負荷と、力学性能、環境負荷を併せた環境影響評価について EMI を用いて検討した。ここでは、[A], [B]の検討を応用した[C]の環境影響評価を示す。図－10 に環境影響評価を示す。環境負荷量は、インベントリデータ [5]を用いてインベントリ分析により評価した。本検討では構成する材料製造に伴う環境負荷量のみを考慮した。試験体ごとの CO_2 排出量を**表－5** に示す。ここでは、Fantilli ら [6]の提案する力学性能と CO_2 排出量を併せて評価可能な指標を用いている。ここでの縦軸は環境指標であり、基準とするシリーズの CO_2 排出量を分子に、各シリーズの CO_2 排出量を分母として計算した CO_2 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、逆に基準シリーズの降伏点を分母に、各シリーズの降伏点を分子として、力学特性を指標化して示している。そのため、基準とした CL FA0 が基準座標(1, 1)として示される。

鋼繊維を用いたシリーズは、第一象限に位置し、基準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。PL N40 が力学性能、環境影響ともに有効であると考える。したがって、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－5　各シリーズの CO_2 排出量の削減率

シリーズ	FA0 に対する削減率(%)		
	CL	PLS	PL N40
FA0	—	8.68	8.34
FA20			14.38
FA70			26.85



図－10　[C] 環境影響評価

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実験を行った。環境影響評価と力学性能とを併せて検討した結果、下記に示す知見を得た。

1) 既存梁部材と UHP-FRCC 層との接合面の付着性状を高めることで、梁全体の力学性能を大きく向上させることができる。
2) 既存梁部材に、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、UHP-FRCC 層が剥離することなく供試体の破壊に至った。UHP-FRCC によるプレキャストパネルを用いたシリーズは蒸気養生が施されることで、十分な強度発現が得られるため、より高い力学性能を得られることが確認された。
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、鋼繊維を用いたシリーズは、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、鋼繊維を配置した UHP-FRCC 層のプレキャストパネル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有効的な補修方法であると考えられる。

参考文献

1) Kwon, S., et al.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cemet-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, et al.: 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) 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
6) Fantilli, A.P., et al.: 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.