

フライアッシュを大量使用した UHP-FRCC の力学性能および環境影響の評価

MECHANICAL AND ECOLOGICAL PROPERTIES OF ULTRA HIGH PERFORMANCE - FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES CONTAINING HIGH VOLUME FLY ASH

鈴木 慶汰 (ライフサイクル工学分野)

Keita SUZUKI

Abstract:

Ultra High Performance - Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHP-FRCC) has successfully developed in the last decades. UHP-FRCC shows the excellent mechanical properties and durability due to its highly dense microstructures, which require a high amount of cement consumption. Replacing the cement content with high volume fly ash (HVFA) to UHP-FRCC will be an effective way to improve the ecological properties. On the other hand, HVFA tends to reduce the mechanical properties not only at the early age but also the ultimate state. In this study, the effect of HVFA replacement to cement (20, 50 and 70% by weight) was investigated. In addition, the effects of nano-silica (NS) are also tested. Compressive and uniaxial tensile test are carried out to obtain the mechanical properties, then the values of both hydration and pozzolanic reaction are also tested to describe the mechanical performances. At the same time, ecological performances are evaluated based on the proposed ecological-mechanical index (EMI). As a result, UHP-FRCC using HVFA showed high initial strength regardless of the replacement rate of FA. This is because the mechanical performance (particularly in the compressive strength) can be compensated by enough reaction ratio during steam curing. Moreover, it was confirmed that using a few amounts of NS improved the compressive properties because pozzolanic reactions could be accelerated. Based on the evaluation of the eco-mechanical index, UHP-FRCC including 20% of FA demonstrated the best eco-mechanical performances. And it was expected that UHP-FRCC with HVFA could be applied to structures with increasing the structural scale.

Keywords : *UHP-FRCC, Fly ash, HVFA, Mechanical properties, Amounts of bound water, Environmental impact assessment*

UHP-FRCC, フライアッシュ, HVFA, 力学性能, 結合水量, 環境影響評価

1. はじめに

現在我が国では、高度成長期に建設された多くの建築・土木構造物が築50年以上を迎え、今後も老朽化構造物が増加していくことが見込まれる。そのため、維持管理の合理化およびライフサイクルコストの縮減がより強く要請されている。繊維補強セメント複合材料(以下、FRCC)は、コンクリートの脆性破壊を補強し、更にひび割れの進展を抑えることで物質透過を抑制する耐久性に優れる側面がある。しかしFRCCは、トンネルの吹き付けや梁の増し打ちといった補修材としての適用例が多く、構造的な利用は必ずしも多くない。近年では、200MPa程の圧縮強度、15MPa以上の引張強度を発揮する超高強度高靱性繊維補強セメント複合材料(以下、UHP-FRCC)が開発され¹⁾、国内では橋梁や滑走路の床版等への適用例が出てきた。UHP-FRCCは極めて優れた力学性能および耐久性能を有することからも、今後の更なる構造利用が期待される。しかしながら、普通強度コンクリートと比較して骨材量が少なく、水結合材比が極めて小さいため使用セメント量が大きく、建設時点では環境側面に優れる材料と言い難い。コンクリート分野では、このような環境負荷の低減を目的として、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュ(以下、FA)の利用が推進されている。我が国ではFAのセメントに対する質量置換率は5~30%と規定されている。これはFAを大量使用することで中性化リスクの増大や²⁾、強度発現の遅延が懸念されるためであり、普通強度コンクリートの場合にFA置換率50%以上の大量使用を行った実例

は少ない。一方でUHP-FRCCは、混和材を大量使用した場合でも中性化リスクを抑制でき³⁾、また蒸気養生を行うことにより、十分な初期強度発現性を発揮する⁴⁾ことが報告されている。ここでは、UHP-FRCCに対してFAを大量使用(置換率50%以上)することを提案し、優れた力学特性と環境負荷低減の両立を目指す。さらに、ナノシリカ(以下、NS)の少量添加により、FA大量使用による強度低下の補償⁵⁾についても検討を行う。本研究では、FAの大量使用および少量のNSの併用がUHP-FRCCの力学性能に与える影響について実験的検討を行い、加えて結合水量により結合材の反応と力学性能の関係について評価する。また、環境負荷低減の取り組みの性能評価手法として、力学性能と環境側面を総合的に評価可能な指標⁶⁾を用いて環境影響評価を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表1に使用材料を示す。シリカフェーム(以下、SF)使用量は結合材置換率18%で一定とし、セメントに対するFAの質量置換率は、20、50、70%とした。NSは結合材重量比で2%のSF置換として、FA置換率50%、70%の場合においてのみ検討した。減水剤量を一定とした場合、FAを使用することでフロー値が増大し、置換率が大きくなるほど材料分離が懸念されるため、増粘剤を少量添加した。また表2に示す長さ、形状、アスペクト比の異なる二種類の鋼繊維を練り混ぜ

時に混練し、Kwonらの成果³⁾に基づき、体積混入率はHDR鋼繊維を1.5%、OL鋼繊維を1.0%とした。表3に調査表を示す。練り混ぜには30Lオムニミキサーを、NSの検討には10Lオムニミキサーを使用し、全材齢の試験体を同バッチで作製した。まず結合材と骨材、ワラストナイトを5分間空練りした後、予め混合しておいた水と混和剤を投入した。本練り時間はFA使用量によって変動したため、所定の流動性(Cシリーズと同程度のテーブルフロー値)が得られるまで、10~25分の間目視でフレッシュ性状を確認しながら調整を行った。本練り後、OL鋼繊維を投入し1分30秒、HDR鋼繊維投入後3分30秒練り混ぜを行った。試験体作製後、湿潤養生環境下(95%RH、温度20℃)で48時間静置し、脱型後に蒸気養生を実施した。図1に養生履歴と試験材齢を示す。蒸気養生は、15℃/hの昇温速度で90℃まで昇温させ、最高温度90℃で48時間保持し、自然放冷にて室温まで降温させた後、再び湿潤養生を行った。モルタルの試験材齢は、材齢7日(1週間)、28日(4週間)、91日(13週間)とし、NSの検討は28日材齢までとした。

2.2 圧縮試験

圧縮試験体にはφ50×100mm円柱試験体を使用し、アムスラ一式万能試験機(容量:1000kN)を用いて、毎秒0.6±0.4N/mm²で载荷を行った。ひずみ計測は、検長区間を50mmとして試験体左右の縦ひずみの平均により求めた。

2.3 一軸引張試験

一軸引張試験には図2に示すダンベル型試験体を使用し、ねじ式万能試験機(容量:30kN)を用いて、クロスヘッド変位速度0.5mm/minで载荷した⁷⁾。両端固定支持、検長区間を80mmとして、試験体の材軸と平行になる様に、高感度変位計LVDT(感度:1000×10⁻⁶ひずみ/mm)を二箇所に対称に設置した。

2.4 結合水量

測定には、载荷試験終了後の引張試験体より採取した試料から、鋼繊維を取り除き150μm以下にふるったものを使用した。所定の材齢でアセトン浸漬による水和停止を行い、24時間の105℃乾燥後、1週間以上真空乾燥を行った。結合水量の測定は、窒素環境下で、昇温速度20℃/minとした熱重量示差熱分析を行った。算出方法は105℃から1000℃までの質量減少量を加熱後の質量で除した値(W_a)について、式(1)による調査の補正を行った。

$$W_b = W_a \times \frac{M_b}{M_b + M_s + M_{wo}} \quad \text{式(1)}$$

W_b : モルタル結合水量 (%)

W_a : 105℃から1000℃までの質量減少率 (%)

M_b, M_s, M_{wo} : 結合材, S, Woの割合 (%)

表3 調査表 (単位: wt.%)

Series	結合材重量比(B)				S/B	Wo/B	W/B	SP/B	V/(W+SP)	D/B
	C	FA	SF	NS						
C	82	0	18	0	35	13	13.8	2.2	0	0.02
FA20	65.6	16.4							0.05	
FA50	41	41							0.1	
FA70	24.6	57.4							0.1	
NSFA50	41	41	16	2					0	
NSFA70	24.6	57.4							0	

備考: OL鋼繊維1 vol.%, HDR鋼繊維1.5 vol.% (略号) B: 結合材 W: 水

表1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	低熱ポルトランドセメント (密度3.24g/cm ³ , 比表面積3780cm ² /g)
フライアッシュ	FA	II種, 密度2.33g/cm ³ , SiO ₂ >45%
シリカフューム	SF	密度2.2-3.5 g/cm ³ , SiO ₂ >90%
細骨材	S	珪砂6号(最大粒径0.12mm, 表乾密度2.61g/cm ³)
ナノシリカ	NS	密度2.2-2.6 g/cm ³ , 平均粒径80nm, SiO ₂ : 99+%
減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物 (密度1.05g/cm ³)
消泡剤	D	ポリエーテル系(密度1.05g/cm ³)
増粘剤	V	セルロース系, 高粘性タイプ(密度 1.25g/cm ³)
ワラストナイト	Wo	密度2.9g/cm ³ , 繊維長50~2000μm, アスペクト比3~20

表2 鋼繊維物性

繊維名称	密度 g/cm ³	長さ mm	直径 mm	引張強度 MPa	アスペクト比
OL繊維	7.85	6	0.16	2000	37.5
HDR繊維	7.85	30	0.38	3000	78.9

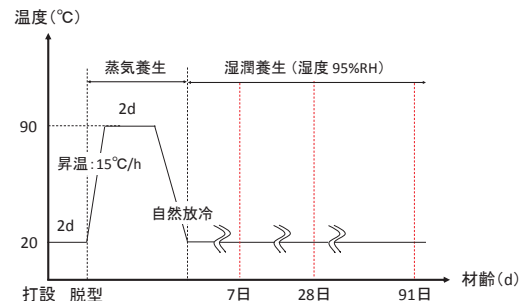


図1 養生条件・試験材齢

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮性能

図3, 図4に示すように、FA置換率50%以上で圧縮ヤング係数、圧縮強度とも低い値を示す結果となった。材齢13週までの湿潤養生期間が圧縮性能に及ぼす影響は小さいことから、FA置換率に関わらず、蒸気養生により十分な初期強度発現性が得られたことが確認できる。既往の報告³⁾によれば、最高到達温度90℃、48時間保持の蒸気養生を行った場合、その後の気中養生期間が超高強度繊維補強コンクリートの圧縮強度に与える影響はほとんどなく、材齢300日以降も強度の進展はないとしており、本検討結果と一致する。

NSを結合材重量比で2%使用した場合には、圧縮ヤング係数と圧縮強度の向上が確認された。これはSFと比較してNSの方がポズラン活性の点で優れることを表しており、ポズラン反応によるモルタルの組織緻密化が強度の向上に寄与したことが推察される。特にFAを50%使用した場合には、材齢7日の圧縮強度比で約16%向上された。

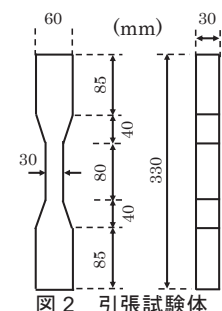


図2 引張試験体

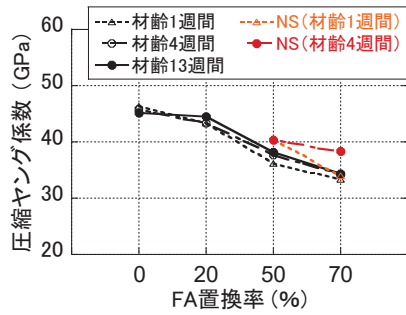


図3 圧縮ヤング係数

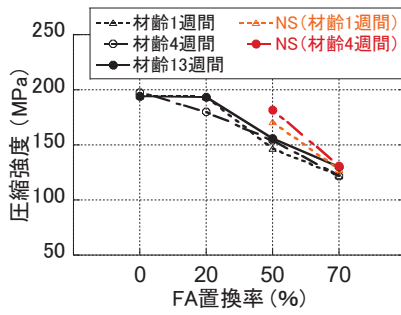


図4 圧縮強度

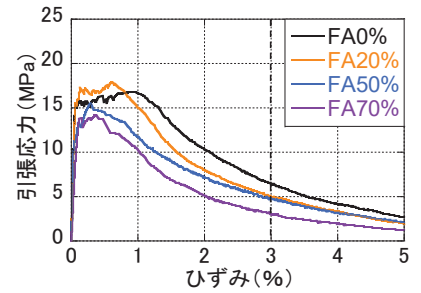


図5 引張応力-ひずみ曲線

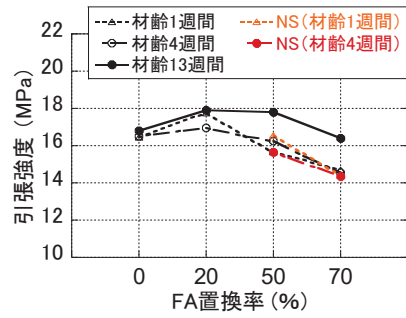


図6 引張強度

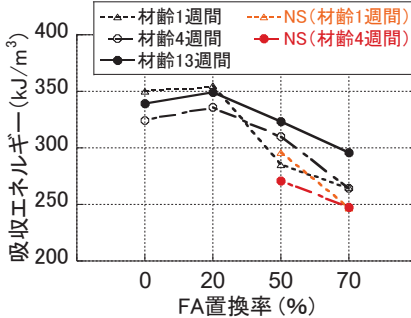


図7 吸収エネルギー

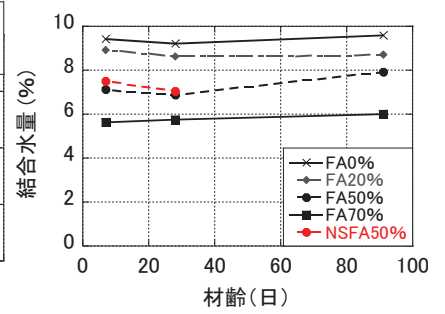


図8 結合水量

3.2 引張性能

図5に引張応力-ひずみ曲線の代表的な測定結果を示す。応力-ひずみ曲線から引張強度(図6)、吸収エネルギー(図7、ひずみ0-3%区間の応力-ひずみ曲線下の面積から算出)を求めた。その結果、圧縮試験結果と比較して、FAの大量置換を行った場合でも引張強度および吸収エネルギーは維持される傾向が確認できる。例えばFA70%置換における材齢7日圧縮強度は、FA無使用と比較して約37%低い一方で、引張強度低下は約11%に留まっている。So *et al.*⁹⁾によれば、UHP-FRCCの使用混和材について、SF単体よりもSF、FA、高炉スラグ微粉末といった複数の混和材を組み合わせることで、圧縮強度に対する曲げ強度比と割裂引張強度比が向上したと報告している。またここで用いるUHP-FRCCは、異なるスケールのひび割れを架橋することで優れた引張、曲げ性能を発揮するものである。FAを大量使用した場合に高い引張性能が発揮されたのは、モルタルの強度によらず、繊維のひび割れ架橋効果が十分に発揮されたことによるものと考えられる。

また、今回NSの少量添加による引張性能の向上は確認されなかった。引張応力下における擬似ひずみ硬化挙動、軟化挙動は、鋼繊維の引抜け挙動に大きく影響されるため、NS使用によりモルタルマトリックスの強度は向上された一方で、モルタル内における鋼繊維の力学的挙動に与える影響は小さかったことが推察される。Shaikh *et al.*⁹⁾の結果によれば、SFのかわりにNSを少量使用することで、鋼繊維の付着強度は強くなる一方で、モルタルから引抜けるまでの吸収エネルギーは必ずしも向上傾向を示していない。この報告からも、NSの存在はUHP-FRCCの引張性能の向上には寄与しないこと推察される。

3.3 結合水量

図8に結合水量の試験結果を示す。結合水量はFA置換率が大きくなるほど小さく、また湿潤養生期間における結合水量の変化はほとんど見られなかった。このことから、FA置換率によらず、

最高温度90度、継続時間48時間の蒸気養生期間内で結合材の反応が大きく促進されることが推察される。また図9に示す結合水量と圧縮強度の関係から、セメントの水和反応やFA、SFのポズラン反応と圧縮強度の間には高い相関があることが確認された。一方で、FA50%置換においてNSを使用した場合、結合材の反応量に対して圧縮強度が高くなる結果となった。既往の研究によればNS使用による総空隙量の減少、空隙構造の微細化が報告されており^{10,11)}、NSのポズラン反応による効果に加え、マイクロファイバー効果により硬化体組織全体が緻密化されたことが考えられる。

4. 環境影響の評価

4.1 環境負荷

ここでは、地球温暖化防止、環境負荷低減といった要求事項を、性能項目として材料設計の段階で組み込むことを目的として、UHP-FRCCの環境影響の定量評価を行う。測定する環境負荷物質は、二酸化炭素(CO₂)、窒素酸化物(NO_x)、硫酸酸化物(SO_x)、ばいじん(PM)と設定した。UHP-FRCCの構成材料のインベントリデータ¹²⁾を用いてインベントリ分析を行い、さらにLIMEによる統合手法¹³⁾によって、環境負荷量を算出した。図10に環境負荷量の算出結果を示す。FA置換により、温室効果ガスおよび大気汚染物質を含む環境負荷物質の排出量を低減できることが確認された。

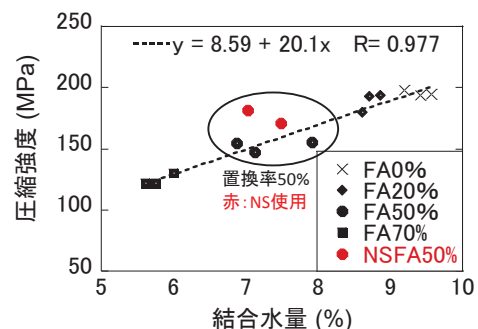


図9 結合水量と圧縮強度の関係

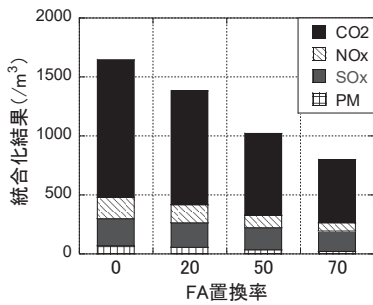


図 10 統合化評価結果

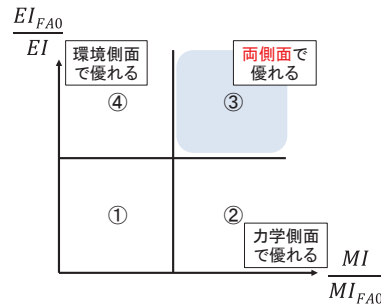


図 11 領域区分による性能評価

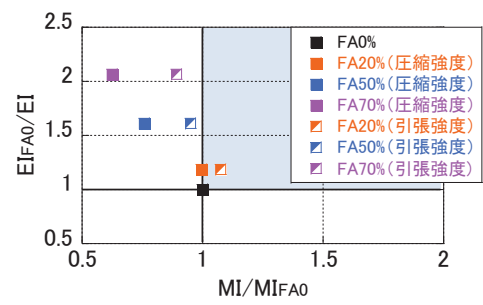


図 12 置換率 0%を基準とした性能評価

4.2 環境影響評価結果

図 11 ④に示す手法を用いて、環境負荷量および実験値（圧縮強度、引張強度）をもとに、環境負荷量（EI）と力学性能（MI）の両側面から、FA 置換率 0%の UHP-FRCC に対する性能評価を行った。図 12 に示すように、FA 置換率 0%と比較して、置換率 20%において環境側面と力学性能の両側面で優れた性能を有する。置換率 50%以上は環境負荷の低減が得られる一方で、力学性能を低減させてしまう結果となった。

本検討では、材料レベルにおける性能評価に加え、軸圧縮力を受ける柱部材について、普通コンクリート（設計基準強度 24N/mm²）を基準とした構造部材レベルにおける性能評価を行った。軸圧縮力のみを受ける、高さ 4 m の柱部材を対象とし、受け持つべき圧縮力は 5 階建ての一般的な RC 建築物を想定して 10 MN とした。ここでは、長期許容応力度として圧縮強度の 1/3 を用いた。図 13 に、普通コンクリート（NC）を基準とした性能評価の比較を示す。材料レベルで考えた場合、UHP-FRCC は普通コンクリートに比べて単位体積あたりの環境負荷が大きい。一方で柱部材を考える場合、UHP-FRCC は部材の断面積を縮減でき、大きな環境負荷低減効果が得られる。FA を置換率 50%以上で使用する場合には、環境負荷低減効果を得るために、圧縮部材の断面積を大きくする必要がある。このときの FA 置換率 0%に対する柱厚さの比は、置換率 50%で 1.14 倍、置換率 70%で 1.26 倍となる。FA を使用した UHP-FRCC を適用する場合には、本検討で扱った力学性能や環境影響側面に加え、構造体の規模や意匠性とのバランスを考慮して FA 置換率の選定を行う必要がある。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) UHP-FRCC に用いられるセメントの 50%を FA で置換することにより、圧縮強度低下は確認されるものの、高い初期強度発現性を発揮した。また NS の少量添加により、圧縮性能が大幅に向上された。
- 2) FA を使用した場合、圧縮性能と比較して優れた引張性能を発揮し、FA の置換率に関わらず、繊維のひび割れ架橋効果が十分に発揮されたことが推察された。
- 3) セメント、SF、FA といった結合材は、湿潤養生期間よりも、蒸気養生期間で大きく促進される。
- 4) FA を 50%以上大量使用することで、大きな環境負荷低減効果が得られる。
- 5) FA を 20%使用した UHP-FRCC は、力学性能および環境側面の両側面で優れた性能を有する。

構造部材レベル

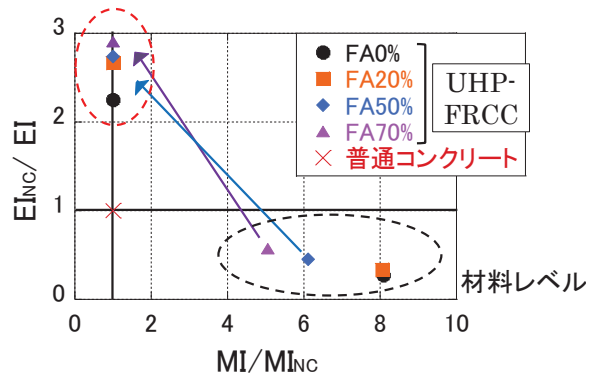


図 13 普通コンクリートを基準とした性能評価
(圧縮強度の比較)

- 6) FA 置換率を 50%以上とした UHP-FRCC は、構造体規模を大きくすることで環境負荷低減が得られる。

参考文献

- 1) Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T., Mihashi, H.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.11, pp.309-318, 2014
- 2) 本田悟, 椎葉大和: フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.23, No.2, 2001
- 3) 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), *コンクリートライブラリー113*, 2004
- 4) Roux, N., Andrade, C., Sanjuan, M. A.: Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.8, pp.1-8, 1996
- 5) Shaikh, F. U. A., Supit, S. W. M., Sarker, P.K.: A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes, *Materials and Design*, Vol.60, pp.433-442, 2014
- 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, pp.282-290, 2013
- 7) 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), *土木学会コンクリート委員会*, 2007
- 8) So, H., Janchivdorj, K., Yi, J., Jang, H., So, S.: Strength and Microstructure of Reactive Powder Concrete Using Ternary Pozzolanic Material, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.13, No. 1, pp.48-57, 2013
- 9) Shaikh, F. U. A., Shafaei, Y., Sarker, P. K.: Effect of nano and micro-silica on bond behaviour of steel and polypropylene fibres in high volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, Vol.115, pp.690-698, 2016
- 10) Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., Durães, L.: The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete, *Material and Design*, Vol.59, pp.1-9, 2014
- 11) Zhang, M. H., Islam, J., Peethamparan, S.: Use of Nano-Silica to Reduce Setting Time and Increase Early Strength of Concretes with High Volumes of Fly Ash or Slag, *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, pp.650-662, 2012
- 12) *コンクリートの環境テキスト(案)*, *日本コンクリート工学会*, 2013
- 13) 土木学会: *コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)*, *コンクリートライブラリー125*, 2005