

論文 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発

国枝 稔^{*1}・Ahmed Kamal^{*2}・中村 光^{*3}・Eugen Brühwiler^{*4}

要旨：短繊維を用いたセメント系材料に関しては、超高強度材料（圧縮強度 200MPa クラス）および超高韌性材料（引張ひずみで 2%程度）が開発されている。さらに、両者を併せ持つ材料の開発により、補修等への適用の可能性が広がると考えられる。本研究では、耐久性能と力学性能のトレードオフに着目し、超高強度ひずみ硬化型セメント系材料を開発した。引張試験および透気試験に着目して検討することで、既存の超高韌性材料に比べて透気係数が小さく、ひび割れ幅も小さい材料開発の可能性が示された。

キーワード：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料, UHP-SHCC, 韌性, 耐久性, 透気試験

1. はじめに

近年、短繊維補強セメント系複合材料の高性能化が積極的に進められている。この高性能化は、図-1 に示すように、(1) Engineered Cementitious Composites (ECC)¹⁾のように引張靱性を格段に向上させること（超高韌性材料とよぶ）、または(2) Reactive Powder Concretes (RPC)²⁾のように超高強度化および耐久性を格段に向上させること（超高強度材料とよぶ）、とに大別できる。(1)を得るためには、繊維とマトリックスの付着を確保した上で、マトリックスを脆弱にする必要があり、(2)では、マトリックスを緻密（高強度）にする必要があるため、両者はトレードオフの関係にあるといえる。力学特性と耐久性の両者を要求性能にあわせて最適化することで、構造物全体の合理的な設計に結びつけることが可能と思われる。

本研究では、超高韌性材料と超高強度材料の中間的な特性を持つ材料である、超高強度ひずみ硬化型セメント系材料 (Ultra High Performance - Strain Hardening Cementitious Composites, UHP-SHCC) を開発することを目的とする。その際、力学性能に関しては、既存の引張試験や

曲げ試験により評価し、耐久性能に関しては、透気試験を利用してその性能評価を行うこととした。

2. 透気試験の概要

コンクリートの耐久性は、物質移動に対する抵抗性に関連しているといっても過言ではない。本研究では、Torrent Permeability Tester (TPT)³⁾による透気係数を指標として利用する。この試験方法は、コンクリート表層部（かぶり）の緻密性（品質）を評価する非破壊的な手法として利用されている⁴⁾。なお、コンクリートに関しては、水の移動と空気の移動に相関があることが、Bamforth⁵⁾およびTorrentら³⁾によって示されている。

TPT の試験装置を、写真-1 に示す。チャンバー、計測器、計測センサーおよび真空ポンプから構成される。なお、鉄筋の腐食等に関連するコンクリートの比抵抗 ρ を四点電極法 (Wenner 法) によって計測し、Torrentら³⁾によって提案されている、コンクリート品質に関する分類方法に従って評価を行うこととした。

*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工学) (正会員)

*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*4 Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL) Professor, Dr. Sc

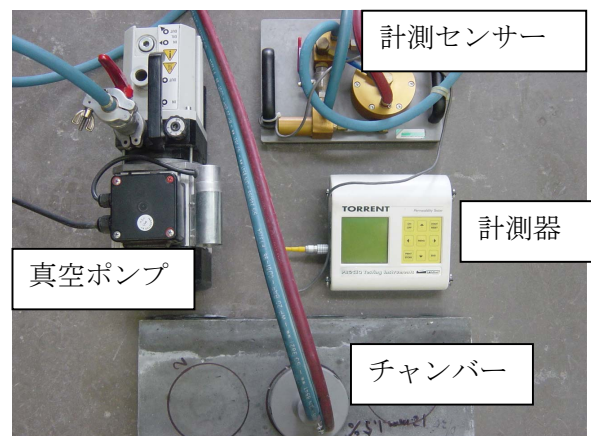
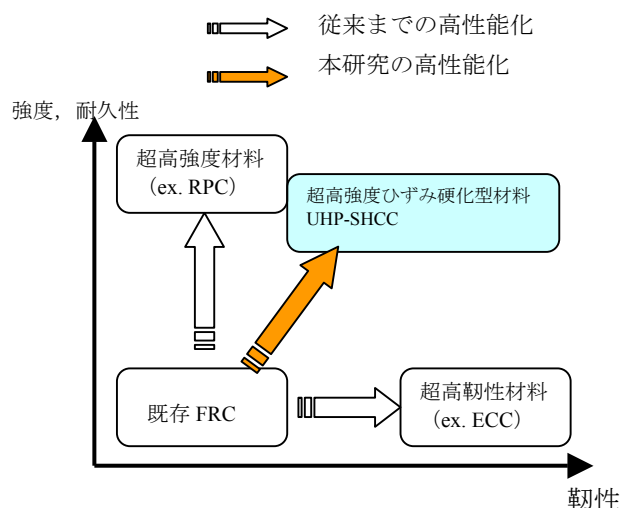


図-1 短繊維補強材料の開発動向のイメージ

写真-1 Torrent Permeability Tester の構成

表-1 各材料の示方配合

シリーズ	水結合 材比 W/B	砂結合 材比 S/B	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						
				水	セメント	細骨材	混和材 ^{*1}	混和剤 1 ^{*2}	混和剤 2 ^{*3}	繊維
UHP-SHCC	0.22	0.050	10.0	330	1198	75	300	44.9	-	24.3
N-SHCC	0.450	0.652	8.0	384	599	557	255	5.99	1.9168	26

*1：UHP-SHCC はシリカフューム，N-SHCC はフライアッシュ

*2：高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）

*3：増粘剤（セルロース系）

3. 実験概要

3.1 使用材料および練混ぜ方法

本研究では，UHP-SHCC，および W/B=0.45 のひずみ硬化型セメント系材料（N-SHCC）の2種類を対象として実験を行った。

(1) UHP-SHCC

本研究で使用した UHP-SHCC の示方配合を表-1に示す。W/B=0.22 とし，セメントには，ポルトランドセメント（CEM I，52.5，密度：3.14g/cm³），セメント質量の20%をシリカフューム（ブレイン：120,000cm²/g，密度：2.2g/cm³）にて置換した。細骨材には，粒径0.5mm以下の硅砂（密度：2.68g/cm³），繊維には，高強度ポリエチレン（PE）繊維（直径：0.012mm，密度：0.97g/cm³，弾性係数：88GPa，引張破断強度：2700MPa）を用い，長さ3mmのものを体積比で0.5%，長さ6mmのものを2.0%混入した。混和

剤には，高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系，密度1.06g/cm³）を結合材の3.0%混入した。

練混ぜには，容量50リットルの一軸パン型ミキサーを使用した。

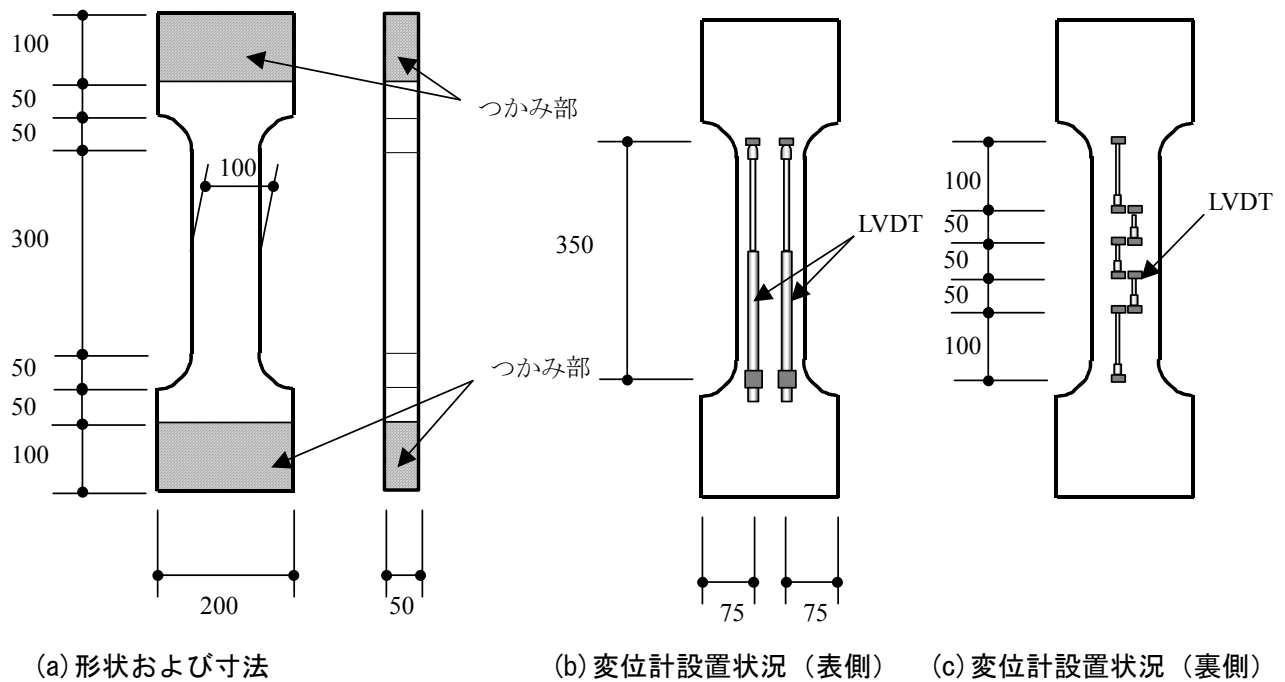
(2) N-SHCC

本研究で使用した N-SHCC の示方配合を表-1に示す。なお，この配合は，関田らによって最適化された配合⁶⁾を参考にした。W/B=0.45 とし，セメントには，ポルトランドセメント（CEM I，52.5，密度：3.14g/cm³），セメント質量の30%をフライアッシュ（密度：2.2g/cm³）にて置換した。細骨材には，粒径0.5mm以下の硅砂（密度：2.68g/cm³），繊維には，ポリビニルアルコール（PVA）繊維（長さ：12mm，直径：0.04mm，密度：1.30g/cm³，弾性係数：40GPa，引張破断強度：1690MPa）を，体積比で2.0%混入した。混和剤には，高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系，密度：1.06g/cm³）をセメントの1.0%，セルロース

表－２ 作製した供試体一覧

試験の種類	引張	曲げ	圧縮	透気
供試体寸法	200 × 700 × 50mm のダンベル（試験 断面：100×50mm）	200 × 500 × 50mm のプレート	φ 110×220 の円柱	200 × 500 × 30mm および 100mm の プレート*
供試体数(体)	5	4	3	1

*UHP-SHCC は 30mm，N-SHCC は 100mm を使用



図－２ 引張試験用供試体の概要

系増粘剤をセメントの 0.32% 混入した。

練混ぜには、UHP-SHCC 同様、容量 50 リットルの一軸パン型ミキサーを使用した。

3.2 作製した供試体

(1) 圧縮、引張、曲げ試験

本研究で作製した供試体一覧を表－２に示す。圧縮試験用供試体には、φ 110×220mm の円柱供試体を 3 体作製した。引張試験用供試体には、図－２に示すダンベル型の試験体を 5 体作製した。試験区間の供試体断面は、50×100mm である。曲げ試験用供試体には、厚さ 50mm、幅 200mm、長さ 500mm の供試体を 4 体作製した。

(2) 透気試験用供試体

透気試験で用いた供試体は、幅 200mm、長さ 500mm とし、UHP-SHCC については厚さ 30mm、

N-SHCC については厚さ 100mm とした。

3.3 試験方法

(1) 圧縮、引張、曲げ試験

すべての供試体は、打設後 2 日で脱型し、その後、材齢 21 日まで恒温室内（20℃，RH60%）にて養生を行った。その後、実験室内にて、試験の準備を行い、圧縮試験については材齢 28 日、引張試験については、材齢 26 日～28 日、曲げ試験については材齢 29 日にて試験を実施した。

引張試験に関しては、図－２ (a) のように供試体の両端部をエポキシ樹脂にて試験機に接着し、両端固定の条件で載荷（載荷速度：0.2mm/min）を行った。なお、試験時には検長 350mm の変位を変位計（精度：0.01mm）にて計測するとともに、図－２ (c) に示すように、局所的な変形を計

測するために、5箇所（最上段および最下段：検長 100mm，中段 3 箇所：検長 50mm）に変位計（精度：0.01mm）を取り付けた。

曲げ試験に関しては、スパン 420mm の 3 等分点曲げ载荷とし、スパン中央部のたわみを変位計（精度：0.01mm）を用いて計測した。

(2) 透気試験

透気試験用供試体についても、材齢 21 日までは恒温室内（20℃，RH60％）にて養生を行った後、実験室内にて湿布養生を行い、透気試験の前日に気中にて乾燥させた。

透気試験は、各板状供試体につき 3 箇所にて計測を行った。なお、各計測値は、材料種類別に幾何平均を求め、平均値とした。

4. 実験結果

4.1 スランプフローおよび空気量

各材料のスランプフローおよび空気量の測定結果を示す。UHP-SHCC および N-SHCC では、スランプフローがそれぞれ 40×35cm，48×47cm であった。また、UHP-SHCC および N-SHCC の空気量は、それぞれ 10.0％，8.0％であった。

4.2 圧縮、曲げおよび引張強度

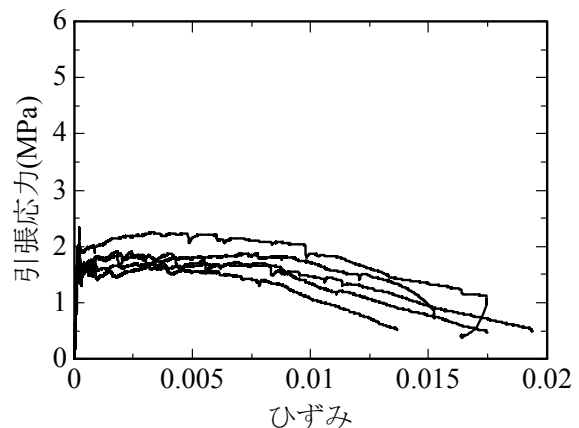
UHP-SHCC および N-SHCC の圧縮、曲げおよび引張強度をまとめて表－3に示す。なお、参考までに、UHP-SHCC については、圧縮強度試験時に計測された弾性係数も示す。UHP-SHCC の圧縮強度は 83MPa であり、通常の SHCC に比べて強度が高いことが分かる。曲げ強度および引張強度についても、UHP-SHCC では、N-SHCC のそれらに比べて約 2 倍となった。

4.3 引張応力－ひずみ関係

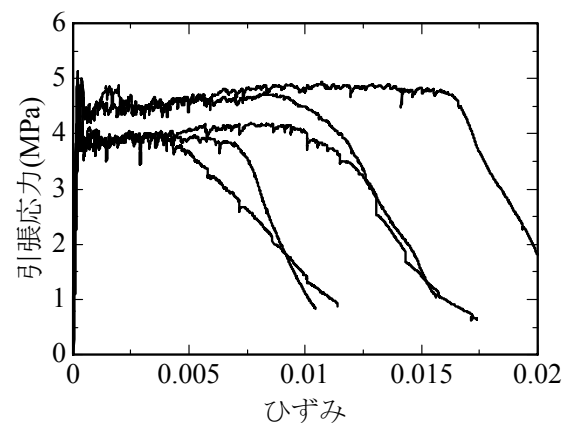
図－3，4に、試験断面 50×100mm のダンベル型供試体の引張試験から得られた N-SHCC ならびに UHP-SHCC の応力－ひずみ関係（検長：350mm のデータを使用）を示す。UHP-SHCC の引張強度は、先述のとおり、N-SHCC の約 2 倍であるが、約 1%程度までひずみ硬化を呈しながら変形していることが分かる。ただし、UHP-SHCC では、終局時ひずみ（応力が大幅に

表－3 強度試験結果一覧

供試体の種類	圧縮 (MPa)	弾性係数 (GPa)	曲げ (MPa)	引張 (MPa)
UHP-SHCC	83	25.3	12.9	4.35
N-SHCC	20.2	-	6.90	1.91



図－3 応力－ひずみ曲線（N-SHCC）



図－4 応力－ひずみ曲線（UHP-SHCC）

低下する時のひずみ）が 0.005～0.017 の範囲にあり、供試体間のばらつきがやや大きい。写真－2，3に、N-SHCC と UHP-SHCC の終局時のひび割れ発生状況を示す。N-SHCC では、約 1%の終局時ひずみを呈しており、複数ひび割れも観察されるものの、その範囲は限られている傾向にあった。一方、UHP-SHCC では、試験区間内においてひび割れが分散しているものが多い、かつ一本あたりのひび割れ幅も N-SHCC に比べると小さい。UHP-SHCC のひび割れ幅が小さくなった要因として、(1)繊維混入量が N-SHCC に比べてやや多いこと、(2)PVA 繊維の剛性が



写真-2 N-SHCC のひび割れ性状

写真-3 UHP-SHCC のひび割れ性状(左: 全体, 右: 拡大)

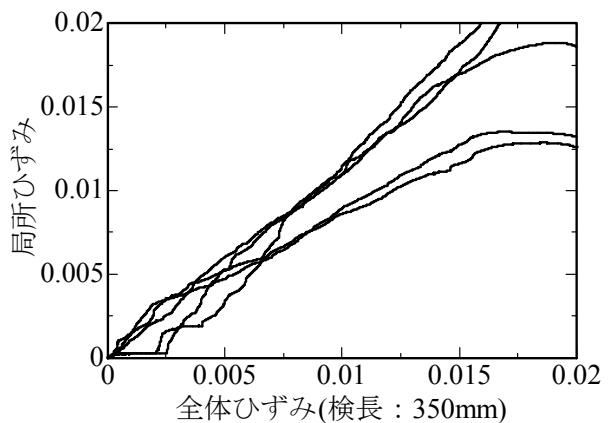
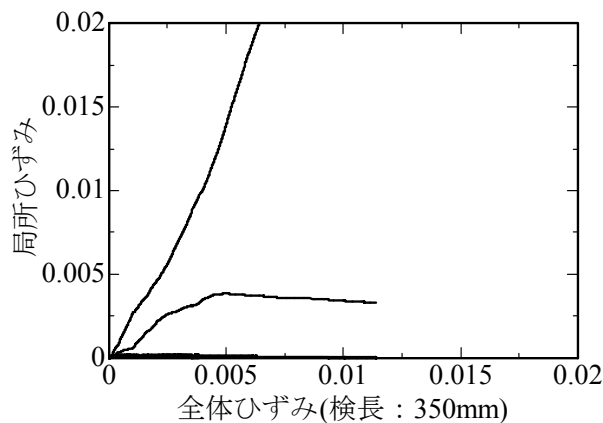


図-5 UHP-SHCC 内の局所ひずみ (左図: 局所破壊した場合, 右図: ひび割れが分散した場合)

40GPa であるのに対して, PE 繊維の剛性が 88GPa であること, が挙げられる。さらに, マトリックスの高強度化に伴う付着特性の変化も考えられる。なお, 図-4 に示された引張強度の値が, 既往の研究結果と同程度であり, 力学性能の向上が確認できないように見受けられる。Kanakubo⁷⁾は, 両端固定でしかも断面が比較的大きな供試体 (文献 7 では直径 100mm の円柱供試体) による引張強度が, 両端固定でなく, かつ薄い供試体によるその 1/2 程度以下になることを示しており, 本実験の結果もこのような影響が含まれていると推察される。

図-5 に, 検長 350mm での全体ひずみと, 図-2 (c) に示された変位計で計測された局所ひずみの計測結果の関係を示す。なお, UHP-SHCC において, ひび割れが良く分散したものと, しなかったものについて示す。これによると, よく分散したものについては, 5 箇所計測された

局所ひずみは場所によらず増加していくのに対し, ひび割れが分散していないものについては, 2 箇所のみ値が大きくなっていることが分かる。また, N-SHCC に関しても, 後者と同様の傾向にあった。

4.4 透気試験結果

図-6 に, UHP-SHCC と N-SHCC の材齢 28 日の時点での透気試験結果 (比抵抗 ρ も含む) を示す。なお, N-SHCC では, フライアッシュを用いており, 長期にわたって緻密化が期待できることから, 材齢 91 日での試験結果も併せて示す。なお, W/C が 0.52 程度のコンクリートの場合, 図中の Medium の領域 (材齢 389 日で $kT=0.9 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, $\rho=9 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$) になるというデータも得られている⁴⁾。

UHP-SHCC では, kT が $0.007 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, ρ が $138 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ であった。一方, N-SHCC では, kT が $1.210 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, ρ が $5.39 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ であり,

UHP-SHCCの方が、極めて透気係数が小さいことが分かる。また、比抵抗 ρ についても、UHP-SHCCの方が極めて大きい結果となった。なお、コンクリートの場合、 $10\sim 20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 程度以上であれば、内部の鉄筋腐食の可能性が小さいと言われている⁸⁾ことから、UHP-SHCCでは鋼材の腐食に対する抵抗性も高いことが推察される。なお、材齢91日でのN-SHCCの透気試験結果では、 $kT=0.452\times 10^{-16}\text{m}^2$ 、 $\rho=20.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ であり、材齢28日の試験での値に比べれば、透気係数 kT は小さくなり、比抵抗 ρ は大きくなっている。

5. まとめ

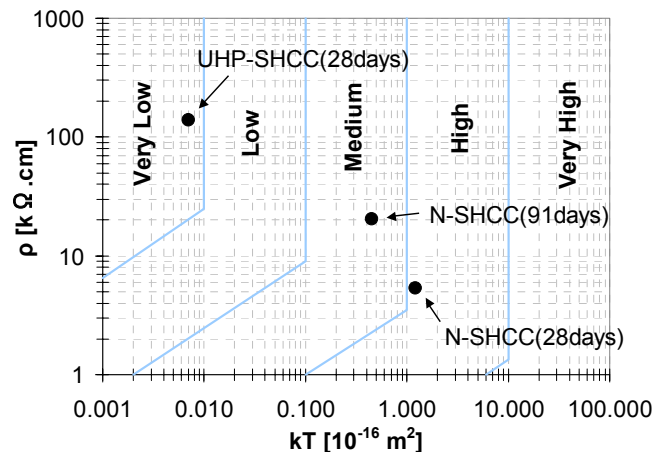
本研究では、材料の力学性能と耐久性能とを最適化した繊維補強セメント系材料を開発するにあたり、引張試験および透気試験に着目して検討することを試みた。これにより、従来からのSHCCに比べて透気係数が小さく、ひび割れ幅も小さい材料開発の可能性が示された。この手法により、用途に応じた要求性能を満足するように材料開発を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、筆頭著者が日本学術振興会特定国派遣研究者として滞在した期間（平成18年3月～平成19年1月）に実施した内容である。滞在中にご協力いただいた関係諸氏に対し深く謝意を表します。本研究で用いた繊維は東洋紡(株)および(株)クラレに、混和剤は(株)エヌエムビーにそれぞれご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Li, V.C.: From Micromechanics to Structural Engineering –The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Structural Engineering/ Earthquake Engineering, JSCE, Vol.10, No.2, pp.37s-48s, 1993
- 2) Richard, P. and Cheyrezy, M.: Composition of



図－6 透気試験の結果

- reactive powder concretes, Cement and Concrete Research. Vol.25, No.7, pp.1501-1511, 1995
- 3) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. Materials and Structures, 25, pp.358-365, 1992
 - 4) Denarié, E., Maître, M. and Conciatori, D.: Air Permeability Measurements for the Assessment of the in Situ Permeability of Cover Concrete, Proc. of International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 2005
 - 5) Bamforth, P.B.: The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. Magazine of concrete research, Vol.39, No.138, pp.3-11, 1987
 - 6) 関田徹志ほか: 曲げ試験を用いた高靱性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討, 鹿島技術研究所年報, 第 52 号, pp.131-132, 2004
 - 7) Kanakubo, T.: Tensile Characteristics Evaluation Method for Ductile Fiber-Reinforced Cementitious Composite, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.1, pp.3-17, 2006
 - 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術'05, pp.167-169, 2005