

論文 白華現象によるモルタル表面明度の制御とデザインへの適用性

松下 泰之^{*1}・塩沢 昌平^{*2}・吉田 貴彦^{*3}・岡本 享久^{*4}

要旨: 本研究では、強度には無関係で生成物も無害であるが外見上問題となる白華に注目し、この白華の発生メカニズムを利用してセメント硬化体表面に無彩色の濃淡デザインを付与できることを見出した。すなわち、セメント種類、養生条件の相違が、白華現象によりモルタル試験体の表面の明度変化に及ぼす影響を材齢別に明らかにし、続いて、超高強度と高耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリート(UFC)では表面の明度変化が養生条件で大幅に変化することを発見した。コンクリート製の椅子の表面にデザインを施し、約1年間屋外に放置し、白華による濃淡デザインの耐候性についても論議した。

キーワード: 白華, 配合, 養生条件, UFC, 明度, デザイン

1. はじめに

白華(はっか)とは、セメント硬化体内の水酸化カルシウム Ca(OH)_2 が余剰水と共に表面へ移動し、空気中の炭酸ガスと反応することで白色の炭酸カルシウム CaCO_3 が生成し、表面が白くなる現象である。比較的初期材齢で発生するものを一次白華、長期材齢において雨水や結露などの水分と表面の水酸化カルシウムの反応により白華現象が生じることを二次白華と呼んでいる。

コンクリートは、1.大量に使用でき、安価であること、2.各々の環境に対して耐久性があること、3.各々の現場で施工が容易であることより、建設材料として、重要な位置を占めている。しかしながら、自然界にない人工物であるため、無彩色で冷たい印象を与えやすく周辺景観との調和を害する面も有するなど、景観への悪影響が指摘される場合も多い。「白華」も悪影響の一例で、強度には無関係で生成物も無害であるが外見上問題となる場合が多く、クレームの代表例である。

本研究では、この一次白華、すなわち初期材齢においてセメント硬化体内 Ca(OH)_2 が炭酸ガスと反応することで白色の CaCO_3 が析出する現象に注目し、「コンクリート表面に発生する無彩色の白華現象の明度を人為的にコントロールできる」可能性を見出した。すなわち、セメント種類、水セメント比(W/C)の相違が白華によるコンクリート表面の明度変化への影響を明らかにした。続いて、超高強度繊維補強コンクリート(UFC)において、ある養生条件の下で明度差が大幅に変化することが分かり、この条件に基づき「コンクリート製椅子」の表面に白華によるデザインを施した。同時に、この椅子を大阪駅ビルの屋上に置き、約1年後もデザインの仕上げがほとんど変化しないことを見出し、この白華デザインの今後の可能性にも論議した。

2. 使用材料及び配合が表面明度に及ぼす影響

2.1 概要

本実験ではセメントを5種類準備し、各セメント別にW/Cが40%、50%および60%のモルタルの作製を行った後、脱型直後の供試体表面明度の測定を行い、セメントの種類とW/Cの相違が表面明度へ及ぼす影響を評価した。

(1) 目的

ここでは、使用材料や配合といった条件の相違が白華に及ぼす影響について把握することを目的とした。白華の原因物質の元となる水酸化カルシウム Ca(OH)_2 はセメントに含まれる成分から生成し、その成分含有量はセメントによって異なる¹⁾ため、セメントの種類は白華による表面明度に大きな影響を及ぼすと考えられた。また配合に関して重要となる因子は単位水量、単位セメント量、W/Cである。これらの違いにより水酸化カルシウム Ca(OH)_2 生成量が異なることから表面明度に影響すると予想した。

(2) 使用材料及び配合

表-1 使用材料

使用材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント(N)
	早強ポルトランドセメント(H)
	中庸熱ポルトランドセメント(M)
	低熱ポルトランドセメント(L)
	高炉セメントB種(BB)
細骨材	三重県宮川産 (表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:2.02%, FM:2.86)
混和剤	AE減水剤

使用した材料を表-1に示す。

*1 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (学生会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所

*3 立命館大学大学院 理工学研究科

*4 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (正会員)

各モルタルの配合を表-2に示す。なお、混和剤としてAE減水剤をセメントに対して0.5mass%添加した。

表-2 配合一覧

No	セメントの種類	水セメント比(%)	単位量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	AE減水剤
1	N	40	250	417	1594	2.09
2	N	50	250	500	1525	2.50
3	N	60	260	650	1378	3.25
4	H	60	250	467	1473	2.34
5	H	50	280	560	1398	2.80
6	H	40	300	750	1189	3.75
7	M	60	250	417	1600	2.09
8	M	50	250	500	1533	2.50
9	M	40	260	650	1385	3.25
10	L	60	250	417	1600	2.09
11	L	50	250	500	1535	2.50
12	L	40	260	650	1388	3.25
13	BB	60	250	417	1582	2.09
14	BB	50	250	500	1512	2.50
15	BB	40	260	650	1357	3.25

(3) 供試体

モルタル供試体成形用三連型枠を用い、40mm×40mm×160mmの供試体を作製する。型枠の底面に当たる面には厚さ1.0mmの塩化ビニル製板を挟み込んだ。練混ぜにはモルタルミキサーを使用し、セメントと細骨材を30秒間練り混ぜた後、水と減水剤を投入し4分間程練混ぜを行った。型枠に流し込んだ後、テーブルバイブレーターにて振動締固めを行い、ガラス板を打設面に覆い被せた。その後恒温恒湿室(気温20℃、湿度80%)で静置し2日間初期養生を行った。初期養生を終え、恒温恒湿室(気温20℃、湿度60%)にて脱型を行い、測定を開始した。

(4) 試験方法

供試体表面の明度は、接触型分光色差計を用いて、L*a*b*表色系で表した。照明、受光方式はJIS Z 8722の条件bに準拠し、測定波長範囲は400~700nm、測定波長間隔は20nm、反射率測定範囲は0~150%、分解能は0.01%、側色条件は光源D65、視野角条件10°、測定径8mmとした。

L*a*b*表色系は、CIE(国際照明委員会)で規格化されており、日本ではJIS Z 8729に規定されている。L*は明度指数であり、0から100までの範囲の値で明るさを示し、この値が高くなるほど白、低い場合は黒となる。

本実験においては白華による明度変化を評価することを目的としているため、白黒を表す明度指数(L*)を指標として評価した。

なお、明度の測定を行う箇所は各供試体の底面(打設面の対面、塩化ビニル製板型枠面)とし、同一箇所を測るように注意した。測定のタイミングは脱型直後を0分とし1分毎に行い、明度の値が収束するまで測定を行っ

た。

2.2 実験結果および考察

表-3 使用材料・配合別、明度の推移と増加量

セメントの種類	W/C		
	40%	50%	60%
	明度の推移L*(0分)→L*(400分)[増加量]		
普通	30→44[14]	32→35[3]	32→35[3]
早強	30→50[20]	32→48[16]	32→35[3]
中庸熱	29→35[6]	29→32[3]	28→32[4]
低熱	35→39[4]	35→37[2]	36→39[3]
高炉B	40→46[6]	41→43[2]	42→45[3]

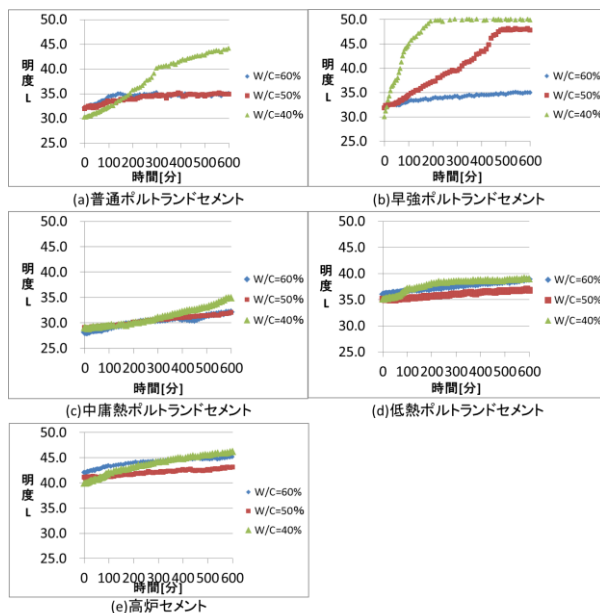


図-1 各モルタルにおける脱型後経過時間と明度の関係

表-4 セメント中の主要化合物量²⁾

セメントの種類	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
普通	50	26	9	9
早強	67	9	8	8
中庸熱	48	30	5	11
低熱	27	58	2	8

表-3に各供試体の材料、配合別の脱型後400分間における明度の推移、明度の増加をまとめたものを示す。また、図-1は、各W/Cにおける各セメント別の脱型後経過時間と明度の関係を示す。

普通ポルトランドセメントを使用したモルタルにおいて、明度が脱型後経過時間と共に線形的に上昇した。また、早強ポルトランドセメントを使用したモルタルは脱型後経過時間が200分までに明度が急激に上昇した後、収束した。脱型後600分間において、中庸熱、低熱、高炉セメントにおいては著しい明度の上昇がみられなかった。

セメント中の主要化合物量の一例を表-4に示す。主要化合物のうち白華の原因物質であるCa(OH)₂は、主にC₃SおよびC₃SとH₂Oとの反応により生成される。今回の実験からは表-3の明度の増加と表-4のC₃Sに相関が確認された。すなわち、単位セメント量を考慮した各供試体中に含まれるC₃Sの含有量と明度の正の相関を示した。次に配合による違いに着目した結果について述べる。普通ポルトランドセメントを使用したモルタルにおいてはW/Cが40%時のみ明度が大きく上昇した。また、早強ポルトランドセメントを使用したモルタルはW/Cが40、50%時、明度は大きく増加した。このことより、上記の2種のセメントに関しては、水セメント比が低いため、単位セメント量が多くなるにつれて明度の増加が確認できた。一方、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント(B種)使用時において、W/Cの違いによる変化はみられなかった。従って、今回の実験では水和反応が早く進む普通、早強ポルトランドセメントは明度が早期に増加し、反応が遅い中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメント(B種)は明度の上昇が、脱型後600分間において確認できなかった。

3. UFCにおける養生条件と表面明度の関係

3.1 概要

ここでは、UFCにおける養生環境の違いが白華に及ぼす影響を把握することを目的とした。養生とは、セメント硬化体が十分硬化するまで、温度や水分含有量を管理することである。また、白華はセメント硬化体表面のCa(OH)₂とCO₂との反応であり、表面の乾燥に伴い白色のCaCO₃が析出する。従って、養生環境の違い、すなわち管理される温度、湿度等により、白華の現れ方に大きな差異が生じると考えた。そこで本実験では気中、水中の違い、さらに温度、湿度の異なる養生環境を準備し、それぞれの明度推移を明らかにした。

(1) 使用材料

本実験では、早強ポルトランドセメントなどと同様、早期に水和反応が進行することに注目し、UFCを使用した³⁾。使用材料は水道水(W)、高性能AE減水剤(SP)、有機繊維(FO、φ0.2×15mm)および超高強度繊維補強コンクリート用の標準配合粉体(DP、密度2.85g/cm³)とした。また、繊維の混入率は2.0Vol%とした。

(2) 配合

表-5 UFCの示方配合

W	DP	SP	FO	繊維混入率	繊維
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(vol%)	
178	2231	29	39	2.0	有機繊維

配合を表-5に示す。なお、この配合は製造会社が推奨する標準的な配合である。

(3) 供試体

型枠には木材を使用し、寸法100mm×400mm×20mmの供試体を作製した。なお、型枠の底面部には厚さ1.0mmの塩化ビニル製板を挟み込んだ。まず、標準配合粉体をミキサーに投入した後、練混ぜを開始し、直後に高性能減水剤と水道水の混合液を投入した。練混ぜ開始300秒後から約30秒かけて徐々に繊維を投入し、練混ぜ開始から480秒後に練混ぜを終了した。その後、打込みを行った。また打込み後は、打設面からの水分の逸散を防ぐため、打設面にはラップを貼り付けた。打込み後は、室内常温下にて48時間初期養生を行い、その後脱型を行った。

(4) 養生環境

供試体は表-6に示す5種類の環境でそれぞれ養生を行った。なお試験体No.2の養生環境は2章の実験における養生条件と同様である。No.4およびNo.5における水槽内の水は、ヒーターにて温め、その水温調整を同社デジタルファインサーモDG3Pにて行った。

表-6 養生環境

No.	1	2	3	4	5
養生環境	気中		水中		
温度(°C)	20	20	20	55	90
湿度(%)	60	80	-	-	-

(5) 試験方法

各供試体の塩化ビニル製板を剥がすと速やかにテープとしてアクリル粘着剤を使用した塩化ビニル製テープを供試体底面部に図-2のように貼付を行った。また図-2中の数字は気中、水中に曝す時間を表している。各供試体にテープを貼付した後、速やかに各養生場所に設置を行うものとした。設置を終えた時間を養生開始時刻とし、6時間経過毎に水中の供試体に添付されているテープをピンセットにより順に剥がしていき、48時間経過するまで繰り返した。

ここで養生中にテープを剥がしていく様子の一例として、養生環境No.1の様子を写真-1に示す。48時間経過後各供試体全てのテープを剥がし終えたら、テープが貼付されていた箇所の明度を測定した。

明度の測定には2章における試験と同様に接触型分光色差計を用いて、L*a*b*表色系で表わした。なおNo.3、No.4、No.5は表面が乾燥した後、測定を行うものとした。これは、セメント硬化体において水分を含んでいる状態であると色が変わるという報告からの対策である⁴⁾。

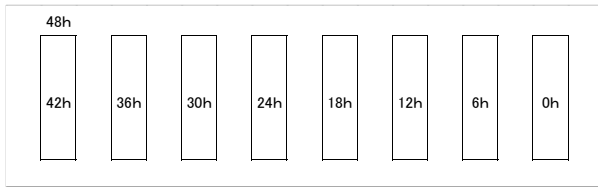


図-2 テープ貼付箇所と曝露時間の関係

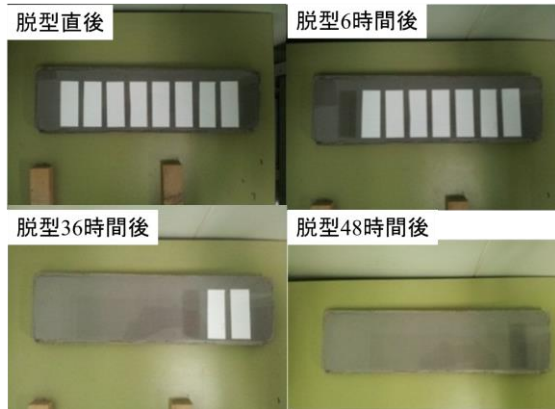


写真-1 養生環境 No. 1 の様子

3.2 実験結果及び考察

図-3 に脱型後経過時間と表面明度の関係を、以下に養生環境毎に結果及び考察を示す。

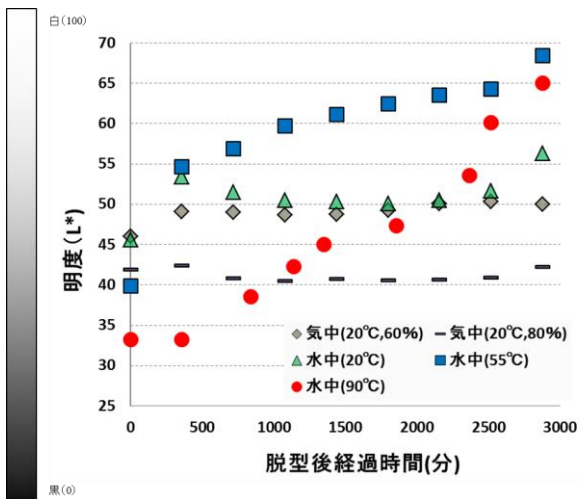


図-3 養生環境別 表面明度の経時変化

(1) 気中養生について

No.1 について、脱型後経過時間の経過と共に明度が 5 程度上昇し、その後 6 時間以内にその値が収束することがわかった。

次に No.2 について、明度は曝露時間の経過に係らず 42 前後の値となった。曝露開始からその値が変化していない理由としては、高湿度であったということに起因すると考えられる。図-4 は No.2 における脱型後 48 時間経

過後の明度と、脱型後 3 か月間、気温 20°C、湿度 60% の場所に静置させておいた後の明度の推移を表したものである。脱型後 3 か月が経つと明度は 10 程度増加しており、乾燥に伴う白華の進行による明度の上昇が起きたと考えられる。この結果からもわかるように、セメント硬化体は高湿度下 (80%) では白華が進行せず、低湿度 (60%) では白華が生じやすい。

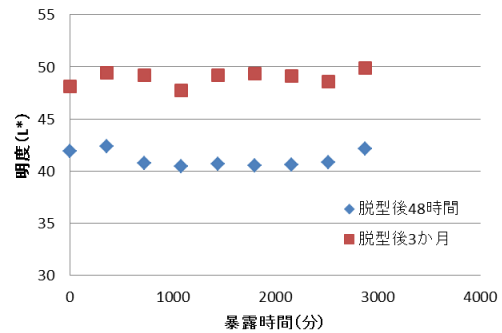


図-4 表面乾燥による明度の変化

(2) 水中養生について

No.3 について、図-3 より脱型後 2880 分間においては脱型後経過時間と明度の増加割合には相関が確認できなかった。しかし、同配合において 20°C の水中に 1 週間養生させた供試体の表面明度は 70 程度まで上昇することが確認できた。このような現象が起きた原因として、水和反応の進行度 (水和率) の違いによるものと考えられる。

No.4 では脱型後経過時間 360 分で明度が急激に上昇し、48 時間経過時の明度値は全ての環境において一番大きな値となりその後収束した。

次に No.5 は脱型後経過時間が増すにつれ明度は線形的に増加していることが確認された。

今回、供試体の試料として使用した UFC はシリカフェーム等を含む混合セメントが使用されており、高温養生により温度と養生時間の積算温度の関係からその性能が発現するとされている⁵⁾。

以上のことから、水中における明度の推移には、供試体の水和率により異なる。また、高温養生を行うことで明度の増加にはある程度の規則性が出てきて、線形的なものになった。さらに、測定結果における明度の差から塩化ビニル製テープを表面に貼付することで白華を抑制し、明度の差をつくりだせることが確認できた。

4. 白華デザインを施した UFC 製椅子の作製

4.1 概要

2.における白華抑制手法、3.の養生方法の違いによる明度変化の結果から、白華によるデザインに表現の幅を保

持させ、またより明瞭なものを形成する際に必要となる諸条件を表-7に示す。

表-7 良質な白華デザインを形成するための条件

使用材料	・UFCの使用
養生環境	・水温90℃の水中養生
白華抑制手法	・養生中にはがれないテープの使用
	・脱型後速やかにテープを貼付
	・養生時間別にテープを順次はがす

これらの条件を元に白華によるデザインを施して、UFC製の椅子の製作を行った。これは、本項までに論じてきた手法、研究成果、白華デザインにおける屋外での耐候性評価を目的とした。

(1) 使用材料および配合

使用材料、配合は3.で使用したUFCと同様のものとした。使用材料を検討するにあたり、2.におけるNo.2の配合を用いたモルタルと3.の配合におけるUFCの表面を比較する。写真-2からも確認できるように、普通モルタルは色ムラを生じながら次第に全体の明度が増していくが、UFCは脱型後、常に表面全体が一様にムラなく明度が増加した。そのため、デザイン製品を作製する材料としてUFCを採用した。



写真-2 表面性状の変化の様子

(2) 型枠

コンクリート製品メーカーに委託し、鋼製の型枠を作製し、座面に当る型枠底部には塩化ビニル製板を貼り付

けた。

(3) 明度推移のデータ収集

目標とする白華デザインを形成させる上での予備実験として、製品と同一の配合で供試体を作製し、90℃の水中養生中の表面明度の推移をデータとして集めた。今回は3.におけるNo.5供試体で得たデータを使用した。

(4) 白華抑制用テープの作製

製品には図-5の様なデザインを採用し、テープはカッティングテープを取り扱う印刷店にて作製の委託をした。実際に使用したテープを写真-3に示す。使用したテープはアクリル粘着剤を使用した塩化ビニル製テープである。



図-5 デザインサンプル 写真-3 デザインテープ

(5) 打込み

練混ぜはオムニミキサーにて8分行き型枠にUFCを打ち込み、バイブレーターにより空気を抜いた。その後湿らせた布を被せ48時間初期養生を行った。

(6) 仕上げ

(3)で得た表面明度推移のデータに基づき、目標のデザインの表面明度に対応する時間に各箇所のテープを順次剥がしながら、水中養生は全体で48時間行った。図-5のデザインと写真-4からも、再現性の高いものが仕上がった。テープを剥がした時にコンクリート表面に接着剤は残存していなかった。



写真-4 養生中（左）及び養生終了直後（右）の様子

(7) 大阪駅ビル広場への供用

写真-5に実際に供用されている様子を示す。なお、供用開始する前に、座面にフッ素樹脂のコーティングを行い、耐候性への対策をとった。供用環境は写真-5の通り屋外であり、大阪駅ビル最上階に位置するため雨風、日射等による劣化の要素が多く揃う場所である⁶⁾。また、

実際に椅子を利用して頂いたことから摩擦等も起きていたのではないかと推測される。



写真-5 大阪駅屋上への椅子の設置状況

4.2 観測結果

写真-6は製作直後の表面の様子と供用9か月後の表面の様子を比較したものである。



写真-6 表面性状の変化(左：供用前，右：供用後)

目視による評価では、多少の明度の低下は確認されたものの、一様に明度が低下していたためか、デザインとしてははっきりと模様が認識できた。また、多少の色ムラや傷が確認されたが、これは利用者による表面のすり減り等が起きたためであると考えられる。

5. 結論

白華現象の利用によるモルタル表面明度の制御とデザインへの適用性に関する本研究の範囲内で得られた成果を以下に示す。

- (1) セメント種類と W/C の変化が初期材齢時における脱型直後の白華による表面明度の変化は、セメントの C₃S 含有量が多いほど、また W/C が小さいほど大きくなった。
- (2) 最近、注目されている超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の脱型後の単位時間における表面明度の変化率は、水中養生下で温度が高く水和率が促進されるほど著しくなり、しかもその明度は材齢とともに

に線形的に増加した。一方、気中養生下では、水中養生ほど変化率は小さくなるものの、周りの湿度の影響を受け、高湿度ほど大きい。

- (3) UFCにおいて、脱型直後に高粘着テープを貼付し水との接触を絶ち、水温 90℃の水中養生の条件下でテープの剥がすタイミング (時間差) によりモルタル表面の明度をコントロールすることができた。このコントロール技術よりコンクリート製の椅子表面に文字や模様を描き、表面に簡易な表面保護を施した後、1年間駅ビル屋上に自然暴露させても椅子表面デザインの明度の劣化は殆どなかった。
- (4) 以上より、「白華」現象を用いたモルタル表面に明度差による濃淡を主体とする「デザイン」を描きたい場合、「1.UFCの利用、2.90℃の水中養生中にはがれないテープを脱型後速やかに貼付、3.90℃の水中養生を行い、4.表現したい濃淡デザインに沿ってテープを時間差により剥がす。」ことにより実現可能である。

謝辞：本研究は、連名者の塩沢昌平氏が立命館大学在学中の修士論文とその後の実験成果を取りまとめたものである。UFCの配合、打設方法などについて、太平洋セメントの後藤英仁氏および河野克哉氏、立命館大学・客員研究員の明石知樹氏および中川隆一氏より貴重なご意見を賜りました。また、UFC製の椅子の作製にあたり、強度解析や型枠の作製等を御協力頂いた丸栄コンクリート工業の皆様、椅子の自然暴露実験に快く要望を承諾して下さいました大阪駅ターミナルビル株式会社の皆様に、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) セメント協会：わかりやすいセメント化学, pp.50-51, 1993
- 2) セメント協会：セメントの常識, 2013.4
- 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), pp.65-67, 2004
- 4) 太平洋セメント (株)：CEM'S「質問箱第44回：, コンクリートの肌」, 2013.7
- 5) 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)」の概要, pp.8, 2005
- 6) 大塚歩, 三浦千佳子, 浅本晋吾, 睦好宏史：屋外暴露されたコンクリートの収縮性状に対する日射および降雨の影響, コンクリート工学, Vol.30, No.1, pp.501-506, 2008