

論文 即脱成型平板の白華試験方法に関する実験的検討

長尾 敏之^{*1}・橋本 親典^{*2}・平塚 和男^{*3}・橋本 紳一郎^{*4}

要旨：本研究では、これまで著者らが提案してきた白華試験方法において、エフロレッセンス発生量に関する再現性についての検討を行った。また、即脱成型平板と普通コンクリート平板の発生率、変動係数の比較を行った。その結果、本研究の試験方法は、材齢7日の即脱成型平板を用い、浸漬日数28日での測定が、最もばらつきが少なく再現性のあるエフロレッセンスの定量的評価ができることが明らかになった。また、本試験方法の対象としては、通常の有スランプコンクリートではなく、超硬練りの即脱成型用コンクリートである。

キーワード：エフロレッセンス，白華試験，即脱成型平板，発生率

1. はじめに

公園，街路，歩道等に使用される即脱成型平板等のコンクリート2次製品において，その表面に発生するエフロレッセンスが，美観上大きな問題として挙げられる。現在，エフロレッセンス防止剤やエフロレッセンスを発生させないセメント等の開発，研究が進められている。この種の材料のエフロレッセンス防止効果を判定するためには，短期間で多量かつ均等なエフロレッセンスを再現性のある方法で発生させる試験方法の確立が必要とされている。

これまでに著者らは，セメントを全く使用しない即脱成型平板(以下，ノンセメント即脱成型平板と称す。)とセメント即脱成型平板のエフロレッセンスの発生量を定量的に評価するため，新しい白華試験方法を提案してきた¹⁾。この試験方法は，促進環境下においた供試体のエフロレッセンス発生前と発生後の質量を測定し，発生率で表すことにより，全エフロレッセンスと不溶性エフロレッセンスを分離して定量的に評価することを可能とした。

本研究では，著者らが新しく提案した試験方法のエフロレッセンス発生量に関する再現性に

ついて，同一条件における供試体の数を3体から8体に増やし，発生率の変動係数を用いて検討を行った。また，本試験方法を普通コンクリート平板に適用し，試験方法の適用範囲について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

本研究で使用した供試体の配合を表-1に示す。表中の括弧内は粉体比を表す。水酸化ナトリウム溶液は，総粉体量に対する添加率を表す。

(1) 即脱成型平板

配合名のR1，セメント，R2，R3，R4は，水粉体比26%でゼロスランプの即脱成型用コンクリートであり，II種フライアッシュ，高炉スラグ微粉末，二水石こうをセメント代替として用いたノンセメントの即脱成型平板である。

II種フライアッシュは，四国電力石炭火力発電所産であり，それぞれ産出日の異なるA～Cのフライアッシュを使用した。R1には，Aフライアッシュ(二酸化珪素：54.9%，湿分：0.04%，強熱減量：1.7%，密度：2.32g/cm³，比表面積：3460cm²/g，pH：11.45)，R2，R3にはBフライア

*1 日本道路株式会社 修士(工学) (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授 工博 (正会員)

*3 東洋工業株式会社 本社営業部 博士(工学) (正会員)

*4 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 助手 博士(工学) (正会員)

表-1 配合表

配合名	W/P(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)							
			W	P				細骨材	粗骨材	NaOH
				FA	BS	Gypsum	C			
R1	26	75	107	273(1)	110(0.4)	27(0.1)	—	1198	400	0.78%
セメント				—	—	—	410	1198	400	—
R2				195(1)	195(1)	20(0.1)	—	1217	404	5%
R3				186(1)	186(1)	37(0.2)	—	1216	404	5%
R4				195(1)	195(1)	20(0.1)	—	1215	404	5%
普通	55	41	175	—	—	—	318	724	1042	—

P：総粉体量，FA：Ⅱ種フライアッシュ，BS：高炉スラグ微粉末，Gypsum：二水石膏，
C：普通ポルトランドセメント，NaOH：水酸化ナトリウム溶液

ッシュ(二酸化珪素：56.1%，湿分：0.01%，強熱減量：1.5%，密度：2.35g/cm³，比表面積：3660cm²/g，pH：12.1)を使用した。R4はCフライアッシュ(二酸化珪素：60.3%，湿分：0.06%，強熱減量：2.1%，密度：2.32g/cm³，比表面積：4240cm²/g，pH：12.1)である。R1のBSは，比表面積が4620cm²/gであり，R2～R4に使用したBSの比表面積は8330cm²/gである。二水石膏(密度：2.29g/cm³)は，四国電力石炭火力発電所から脱硫石膏として副産されるものを使用した。

細骨材は，香川県さぬき市多和産細砂(粗粒率：3.21，密度：2.60g/cm³，吸水率：1.03%)を使用し，粗骨材は，通常のコングリートに用いる粒径5mm以上の粗骨材とは異なり粒径2～7mmの徳島県美馬市産砕石(最大寸法：7mm，粗粒率：4.9，密度：2.60g/cm³，吸水率：1.70%)であり，5mm以下の細骨材の粒径と一部重複する。水酸化ナトリウム溶液(試薬，濃度25%，8mol/l)は，W工業株式会社製のものを使用した。

セメント即脱成型平板は，Rの配合における粉体量を普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³，比表面積：3460cm²/g)に置き換えた配合である。細骨材，粗骨材および練混ぜ水は，ノンセメント即脱成型平板と同様である。

(2) 普通コンクリート平板

配合名に「普通」と記されている普通コンクリート平板は，普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³，比表面積：3290cm²/g)，細骨材(徳

島県阿南市下大野町産，粗粒率：2.84，密度：2.62g/cm³，吸水率：1.30%)，粗骨材(徳島県鳴門市撫養町木津中山，粗粒率：7.00，密度：2.56g/cm³，吸水率：2.23%)を使用し，スランプ16cm，空気量1.5%を目標としたものである。

2.2 締固め方法

即脱成型平板は，実際に工場で即脱成型平板の試作機として用いられている即脱成型機を使用した。振動時間は予備振動2秒，本振動3秒の合計5秒とした。従来の即脱成型機の振動時間と同様である。普通コンクリート平板は，即脱成型平板と同様の寸法の型枠を作製し，フレッシュ状態のコングリートを型枠に打ち込み，棒バイブレータを用い締固めを行った。

2.3 供試体寸法

曲げ強度試験用の供試体は，即脱成型平板，普通コンクリート平板とも200×100×60mmである。白華試験用の供試体は，200×100×60mmの供試体を，コンクリートカッターを用い，100×60×15mmの大きさに切断したものである。R1とセメント即脱成型平板は1体の即脱成型平板から8体の白華試験用供試体を作製し，R2～R4はそれぞれ2体の供試体から6体ずつ作製，普通コンクリート平板は1体から6体作製した。なお，供試体を切断する作業は，試験開始材齢に達した後に実施した。

2.4 養生方法

即脱成型平板の養生は，包装養生である。包

装養生は、ポリエチレン袋に入れ、所定の材齢まで製品工場内に静置するものである。普通コンクリート平板の養生は、 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ の水中で水中養生を行った。また、試験開始材齢は即脱成型平板、普通コンクリート平板ともに7日、28日の2種類とした。

2.5 白華試験方法

著者らが新しく提案した試験方法¹⁾は、蒸留水を用いてエフロレッセンスの発生を促進させ、エフロレッセンス発生前と発生後の質量を測定し、発生率を算出し定量的に評価するものである。以下に本研究の試験方法の手順を記す。

- (1)開始材齢が終了した即脱成型平板と普通コンクリート平板を白華試験用供試体(100×60×15mm)に切断する。
- (2)100℃の乾燥機に24時間入れ、エフロレッセンス発生前の供試体絶乾質量を測定する。このとき各浸漬日数の供試体(各測定日で8個。)を準備する。
- (3)供試体の高さの半分まで蒸留水に浸漬させ、温度 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度55～60%の環境条件の恒温室に設置する。浸漬方法を図-1に示す。
- (4)浸漬日数終了後、供試体を絶乾状態にし、エフロレッセンス発生後の供試体絶乾質量を測定し、全エフロレッセンス発生率を算出する。
- (5)供試体表面を水道水で約5秒間流し、可溶性のエフロレッセンスを洗い流す。
- (6)供試体を絶乾状態にし、不溶性のエフロレッセンスのみが付着した供試体として、不溶性エフロレッセンス付着供試体絶乾質量を測定し、不溶性エフロレッセンス発生率を算出する。

なお、本試験は同一供試体から発生するエフロレッセンスの積算量を求めるものではなく、所定の浸漬日数でエフロレッセンス発生量を測定した供試体は廃棄し、新たな供試体を用いて次の所定の浸漬日数のエフロレッセンス発生量を測定した。写真-1に白華試験中の供試体群を示す。質量測定には、0.001gまで測定可能な上皿電子天秤を使用した。ばらつきが極端に大きい測定値を排除するため、(1)式を用い統計学的



写真-1 白華試験中の供試体群

に可能な測定値の棄却を行った。測定値が8つの場合、 T_0 が2.17以上の測定値は棄却した。

浸漬日数は、7日、28日および91日とし、所定の浸漬日数後すぐにエフロレッセンスの質量を測定した。

全エフロレッセンス、不溶性エフロレッセンスの発生率は、以下の(2)、(3)式を用い算出を行った。

$$T_0 = \left| x_R - \bar{x} \right| / s \quad (1)$$

x_R : 測定値
 \bar{x} : 平均値
 s : 標準偏差

$$W_{全} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

$$W_{不} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

$W_{全}$: 全エフロレッセンス発生率(%)

$W_{不}$: 不溶性エフロレッセンス発生率(%)

W_1 : エフロレッセンス発生前の供試体絶乾質量(g)

W_2 : 全エフロレッセンス付着供試体絶乾質量(g)

W_3 : 不溶性エフロレッセンス付着供試体絶乾質量(g)

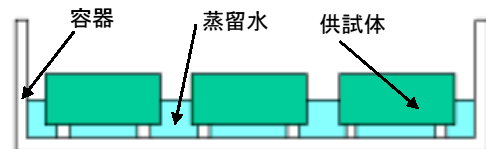


図-1 浸漬方法

3. 試験結果および考察

3.1 曲げ強度試験結果

図-2に曲げ強度試験結果を示す。インターロッキングブロック舗装設計施工要領の曲げ強度

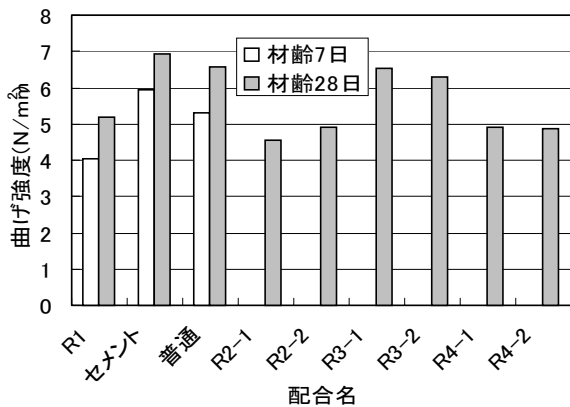


図-2 曲げ強度試験結果

試験方法に準拠して行った。

R2-1~R4-2 は、R2~R4 の配合でそれぞれ 2 体ずつ即脱成型平板を作製した。図中のハイフン後の数字は供試体 1 回目、2 回目を意味する。R(ノンセメント即脱成型平板)において、R3-1、R3-2 は、材齢 28 日で 6N/mm^2 以上であり、最も高い強度を示した。R3 の配合で石こうの添加率を大きくしたことが原因であると考えられる。R1, R2, R4 の曲げ強度は同程度であるが、それぞれの配合が異なる。産出日が異なれば A, B および C フライアッシュの物理的性質および化学成分が強度に与える影響が異なるが、明確な要因については今後の検討が必要である。本研究で使用した供試体は、植生用の品質規格である 4N/mm^2 を満足しており、いずれも実用化において必要な品質規格を満たすものである。

3.2 白華試験結果

(1) 即脱成型平板の発生率

発生率の例示の 1 つとして図-3 に材齢 7 日の R1 の全エフロレッセンス実測値を示す。後掲する図-6 より、各浸漬日数の変動係数は 10%~18% の範囲でありばらつきはないと考えられる。図-4、図-5 に実測値を平均した材齢 7 日、28 日の供試体の全エフロレッセンスおよび不溶性エフロレッセンス発生率と浸漬日数の関係を示す。凡例の 7, 28 は材齢を表し、全は全エフロレッセンス、不は不溶性エフロレッセンスを表す。全エフロレッセンスについては、材齢 7 日の供試体の方が、材齢 28 日の供試体に比べ、ノ

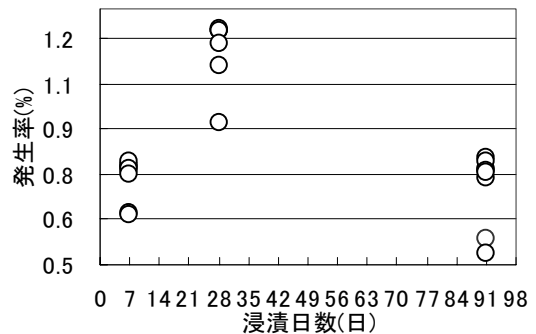


図-3 材齢 7 日 R1 の実測値

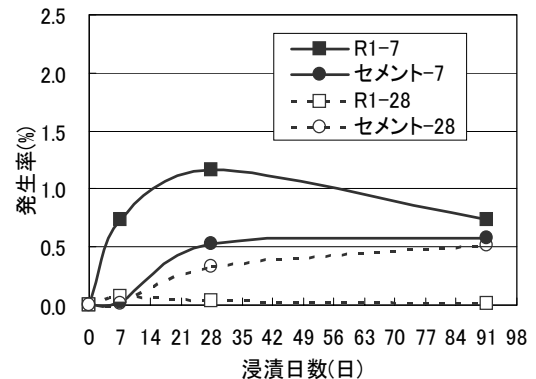


図-4 全エフロレッセンス発生率

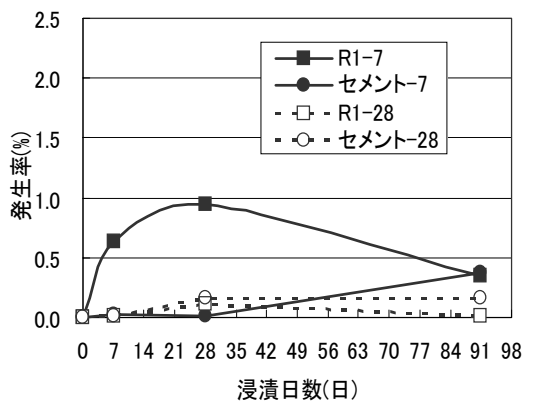


図-5 不溶性エフロレッセンス発生率

ンセメント、セメントに関わらず、発生率が大きくなった。これは、コンクリート 2 次製品メーカーの報告より、現場施工において養生の材齢期間が数日で短い場合に出荷した即脱成型平板ほどエフロレッセンス発生に関する報告が多いという事実と一致する。

R1-7 の浸漬 91 日が 28 日に比べ発生率が小さくなっているのは同一即脱成型平板片ではあるが、同一供試体ではないため、ばらつきがあると考えられるが今後の検討が必要である。不溶性エフロレッセンスについては、浸漬日数 7 日、28 日において、R1-7 以外の差は見られなかった。

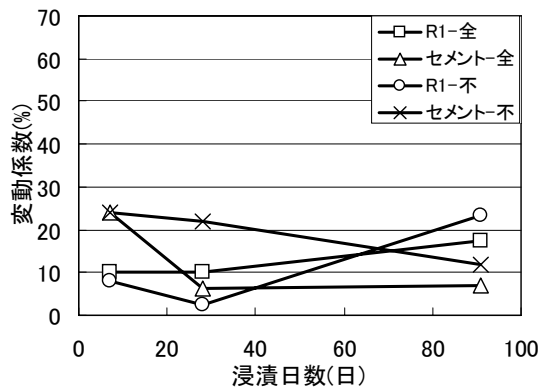


図-6 材齢 7 日の変動係数

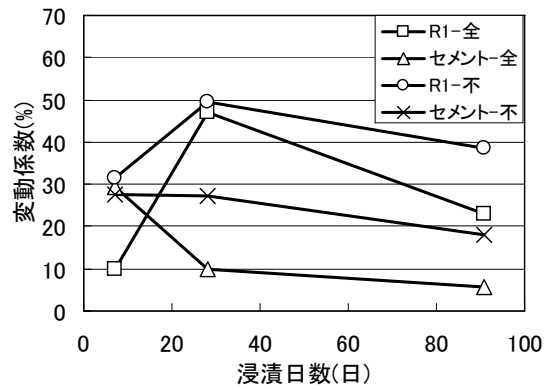


図-7 材齢 28 日の変動係数

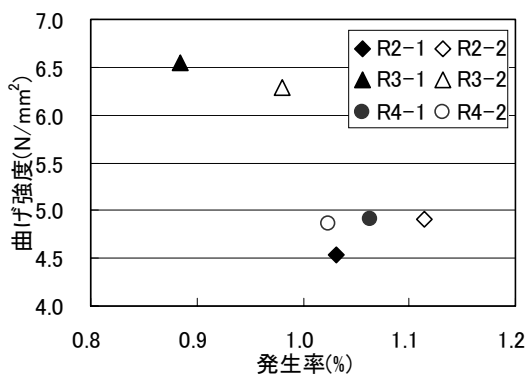


図-8 曲げ強度と全エフロレッセンス発生率

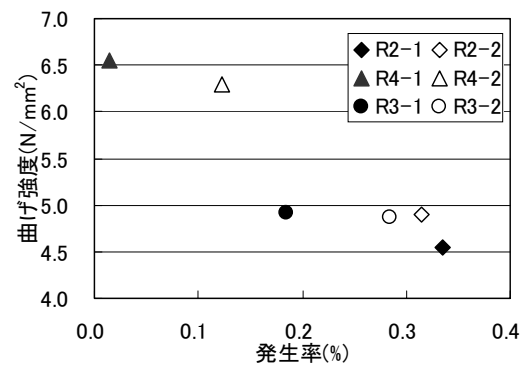


図-9 曲げ強度と不溶性エフロレッセンス発生率

(2) 即脱成型平板の変動係数

材齢 7 日および材齢 28 日の変動係数と浸漬日数の関係を図-6、図-7 に示す。材齢 7 日の変動係数は、全ての浸漬日数において、3%~25%の範囲であった。材齢 7 日の浸漬日数 28 日の変動係数は、浸漬日数 7 日、91 日に比べ小さく、最も小さい値となった。材齢 28 日の変動係数は、5%~50%であった。材齢 7 日の変動係数に比べると、R1 の全エフロレッセンスの浸漬日数 7 日とセメントの不溶性エフロレッセンスの浸漬日数 91 日は同程度であったが、その他全ての供試体は変動係数が大きくなった。材齢 28 日まで養生するとエフロレッセンス発生要因物質が水和反応に使用され、それ以後の浸漬日数においても発生量が小さく、その結果変動係数が大きくなると考えられる。

(1)と(2)の結果より、即脱成型平板のエフロレッセンスの発生量を再現性のある方法で評価するには、材齢 7 日の即脱成型平板を用い、浸漬日数 28 日で測定するのが、最も適切であると言える。以後の実験では、この条件を採用した。

(3) 即脱成型平板の配合別評価

材齢 7 日、浸漬日数 28 日の実験条件で、R2~R4 の配合供試体を 2 体ずつ用い、エフロレッセンス発生率について検討を行った。図-8、図-9 に全エフロレッセンスおよび不溶性エフロレッセンス発生率と曲げ強度の関係を示す。凡例の配合記号の後の番号は同一配合の一回目と二回目を意味する。全エフロレッセンス、不溶性エフロレッセンスともに曲げ強度が大きくなるにつれ、発生率が小さくなった。強度が増加することにより供試体表面が密実になり、エフロレッセンスの発生が抑制されたと考えられる。曲げ強度とエフロレッセンス発生量には負の相関性がある。

次に、図-10、図-11 に全エフロレッセンスと不溶性エフロレッセンスの変動係数を示す。全エフロレッセンスの変動係数は、9%~26%の範囲であった。全エフロレッセンスについては、材齢 7 日で浸漬日数 28 日が再現性のある材齢および測定日であることを確認することができた。

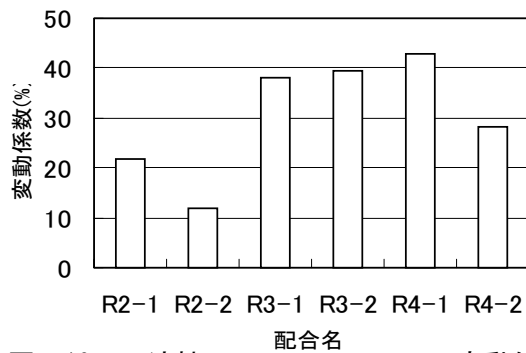


図-10 不溶性エフロレッセンスの変動係数

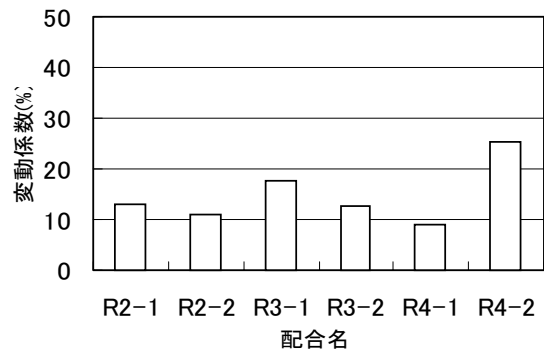


図-11 全エフロレッセンスの変動係数

不溶性エフロレッセンスの変動係数は、11%～45%の範囲であり、全エフロレッセンスに比べ大きくなった。供試体表面を洗い流す作業において、手作業で行うため流水の圧力などの影響が考えられるため、今後の検討課題である。以上より、強度が大きくなれば、エフロレッセンスの発生率は小さくなり、強度の増進が見られる配合を用いることによりエフロレッセンスを抑制できることが分かった。

(4) 普通コンクリート平板の発生率と変動係数

有スランプコンクリートを用いた平板のエフロレッセンス発生量に関する実験結果として、図-12、図-13 に発生率および変動係数と浸漬日数の関係を示す。材齢7日の全エフロレッセンスは0.5%であり、その他の条件の供試体は、0.3%以下の発生率であった。特に不溶性エフロレッセンスは非常に小さい値であった。変動係数は、5%～55%であり、即脱成型平板の材齢7日の変動係数に比べ、大きな値となった。有スランプコンクリートは十分に締固めが行われるため密実なコンクリートとなる。普通コンクリート平板は、発生率が小さく絶対値が小さいため、変動係数が大きくなる。したがって、普通コンクリートのエフロレッセンスの定量化を本試験方法で評価することは難しい。

4. まとめ

(1) 本試験方法を用い、エフロレッセンスの評価を行う際には、材齢7日の即脱成型平板を用い、浸漬日数28日での測定が、最もばらつきが少な

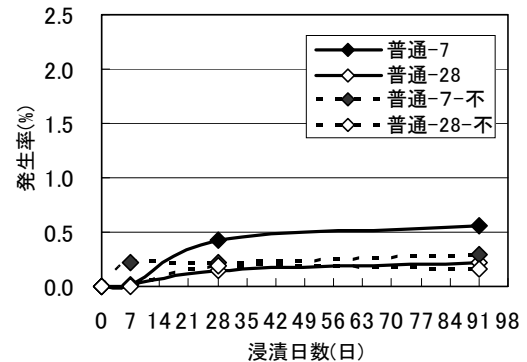


図-12 普通コンクリート平板の発生率

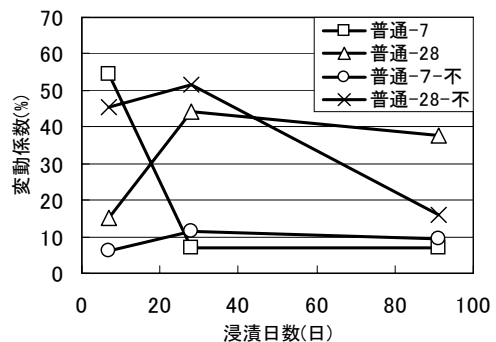


図-13 普通コンクリート平板の変動係数

く再現性のある定量的評価ができる。

(2) 普通コンクリート平板ではなく、即脱成型平板にのみ適用できる試験方法である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会平成17年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号: 17360205, 研究代表: 橋本親典) に基づき実施されたものであることを付記し、感謝の意を表します。

参考文献 1)長尾敏之, 平塚和男, 橋本親典, 渡辺 健: 即脱成型平板のエフロレッセンスの定量化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.27, No.1, pp.235-240, 2005.6