

論文 即脱成型平板のエフロッセンスの定量化に関する基礎的研究

長尾 敏之^{*1}・平塚 和男^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：本研究では、Ⅱ種フライアッシュ、高炉スラグ微粉末および火力発電所の脱硫石こうである二水石こうからなる粉体をセメントに置き換えて製造したノンセメント即脱成型平板のエフロッセンスの発生量を明らかにするため、エフロッセンスの促進環境下に置いた供試体の発生率から定量的に評価した。その結果、全てのエフロッセンスと不溶性のエフロッセンスの発生量を測定することにより、可溶性と不溶性のエフロッセンスを分離して評価することが可能である。ノンセメント即脱成型平板は、通常のセメント即脱成型平板に比べ、不溶性エフロッセンスの発生量が少ないこと等が明らかになった。

キーワード：エフロッセンス、即脱成型平板、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

近年、建設事業において、景観への配慮が欠かせなくなっており、自然環境や都市空間にあった土木構造物、建築構造物が多くなっている。特に、公園、街路、歩道などに使用されている即脱成型平板などのコンクリート2次製品については、景観が重要視される。しかし、コンクリート2次製品の美観上大きな問題となる原因の1つにエフロッセンスがある。

エフロッセンスとは、モルタルやコンクリート中の可溶成分を溶解した溶液が、内部から表面に移動し、表面の乾燥に伴って水分が蒸発することにより表面に析出、もしくは、空気中の炭酸ガスと結合して表面に析出した物質のことである。このエフロッセンスを、一時的エフロッセンスと永久的エフロッセンスの2つに分類すると、前者は可溶性であり、後者は不溶性であると考えられている¹⁾。

一方で、現在我が国では、電力の安定供給確保の観点から、石炭火力発電設備の増加が計画されている。それに伴い発生する石炭灰も増加傾向にあり、今後多量の石炭灰を有効利用する

ことが望まれている。著者らはこれまで、全くセメントを使用せずⅡ種フライアッシュ、高炉スラグ微粉末および火力発電所から副産される二水石こうからなる産業副産物のみを主原料とする粉体をセメント代替とした即脱成型平板(以下、ノンセメント即脱成型平板と称す。)を作製し、さらに練混ぜ水にアルカリ刺激として水酸化ナトリウムを加えることで、従来の即脱成型平板と同様の曲げ強度を実現している²⁾。

産業副産物の有効利用以外にノンセメント即脱成型平板の付加価値を高めることを目的として、本研究ではノンセメント即脱成型平板から発生するエフロッセンスを定量的に評価する実験方法を検討し、ノンセメントおよびセメント即脱成型平板の発生量の違いについて評価した。エフロッセンスの評価は通常、目視観察が一般的である。本実験では促進環境下に置いた供試体から発生するエフロッセンスの質量によって定量的に評価した。実験では養生方法や養生期間別に全エフロッセンスと不溶性エフロッセンスの質量を測定した。また、エフロッセンスの走査型電子顕微鏡観察を行った。

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 東洋工業株式会社 本社営業部 (正会員)

*3 徳島大学 工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学 工学部建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

表-1 ノンセメント即脱成型平板の配合

配合名	W/P*(%)	s/a(%)	単体量(kg/m ³)						
			水	P**			細骨材	粗骨材	NaOH ***
				FA	BS	Gypsum			
Recycle	26	75	107	273	110	27	1198	400	3%

* W/P とは水粉体比を意味する

** P とは総粉体量, FA とはフライアッシュ, BS とは高炉スラグ微粉末, Gypsum とは二水石膏のこを意味する

*** NaOH は水酸化ナトリウムを意味し, 単体水量に対する添加率を意味する

表-2 セメント即脱成型平板の配合

配合名	W/C(%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
Normal	26	75	107	410	1198	400

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

(1) ノンセメント即脱成型平板

本研究で使用した材料は, 四国電力石炭火力発電所産のⅡ種フライアッシュ(二酸化珪素: 45.9%, 湿分: 0.04%, 強熱減量: 1.7%, 密度: 2.32g/cm³, 比表面積: 3460cm²/g), 高炉スラグ微粉末(密度: 2.86g/cm³, 比表面積: 4620cm²/g) および四国電力石炭火力発電所から脱硫石こうとして副産される二水石膏(密度: 2.29g/cm³)である。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%)を使用した。粗骨材は, 通常のコンク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 の徳島県美馬郡美馬産砕石(最大寸法: 7mm, 粗粒率: 4.9, 密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 1.70%)であり, 粒径については 5mm 以下の細骨材の粒径と一部重複する。練混ぜ水は上水道水であり, 練混ぜ水に添加した水酸化ナトリウム(液体, 濃度 24%, 密度: 1.26 g/cm³)は, 工業用の市販されているものを使用した。ノンセメント即脱成型平板の配合を表-1 に示す。この配合は, 著者らが開発した配合²⁾を用いた。

(2) セメント即脱成型平板

セメントは普通ポルトランドセメント(密

度: 3.16g/cm³, 比表面積: 3460cm²/g)を使用した。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じものを使用した。セメント即脱成型平板の配合を表-2 に示す。この配合は, ノンセメント即脱成型平板の配合における粉体量をセメントに置き換えた配合である。また, 水酸化ナトリウムは添加していない。

2.2 練混ぜ方法

50 リットル用のパン型ミキサを用いた。練混ぜは全粉体および骨材を投入して 2 分間, 練混ぜ水を加えて 4 分間とし合計 6 分間練り混ぜた。

2.3 締固め方法

締固めは, 実際に工場では小型コンクリート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。振動装置条件は, モータ回転数 50Hz, 振幅振り子 28mm, 振幅 1.4mm とし, 振動時間は予備振動 2 秒, 本振動 3 秒の計 5 秒とした。これは, 従来の即脱成型機の振動時間と同様である。

2.4 供試体寸法

曲げ強度試験用の供試体は, 即脱成型機から即時脱型された通常の 200×100×60mm の即脱成型平板である。エフロッセンス測定用の供試体は, 曲げ強度試験用の供試体 200×100×60mm の即脱成型平板を, コンクリートカッタ

一を用い、100×60×15mmの大きさに切断し1個の平板から10個のエフロレッセンス測定用供試体を作製した。なお、供試体を切断する作業は、各即脱成型平板の養生が終了した後、行った。写真-1に切断前の即脱成型平板と切断後のエフロレッセンス測定用供試体を示す。

2.5 養生方法

養生は、インターロッキングブロック舗装技術協会が必要とする曲げ強度を満足する包装養生と水中養生の2種類の養生を行った。養生期間は7日および28日とした。包装養生は、鋼製パレットに供試体をのせたままポリエチレン袋に入れて、所定の養生期間まで製品工場内に静置した。水中養生は、20±1℃の水中で養生を行った。実際に行った包装養生を写真-2に示す。

2.6 試験方法

(1) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、インターロッキングブロック舗装設計施工要領の曲げ試験に準拠して行った。曲げ強度は以下の(1)式で求めた。

$$\sigma = \frac{240}{b \times d^2} \times P \quad (1)$$

σ : 曲げ強度(N/mm²) P : 最大荷重(N)

b : インターロッキングブロック幅(mm)

d : インターロッキングブロック厚さ(mm)

(2) エフロレッセンスの測定

本研究で対象としたコンクリートは、水セメント比が30%以下のゼロスランブの即脱成型平板用コンクリートである。短い締固め時間で即脱成型させるため、水和反応が十分に進行しないと考えられる。材齢7日と材齢28日の曲げ強度の差は後掲する図-2に示す通り非常に小さい。そのため、半水浸法による質量変化は全てエフロレッセンスが原因であると仮定した。

本エフロレッセンス促進試験は、財団法人建材試験センターが発表した白華（エフロレッセンス）試験³⁾を参考に、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後の供試体の質量を測定し、発生率を算出した。供試体をエフロレッセンス促進環境に



写真-1 即脱成型平板と切断後のエフロレッセンス測定用供試体



写真-2 包装養生

移す前に100℃の乾燥炉に24時間入れ絶乾状態とし、エフロレッセンス発生前の質量を測定する。その後、供試体を図-1に示すように供試体の高さの半分まで水中浸せさせ、恒温室(温度:20±1℃,湿度55%~60%)に設置する。促進日数終了後、再び供試体を絶乾状態にしエフロレッセンス発生後の質量を測定し発生率を算出する。次に、供試体表面を流水で可溶性のエフロレッセンスを洗い流し、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質量を計測する。質量測定には、

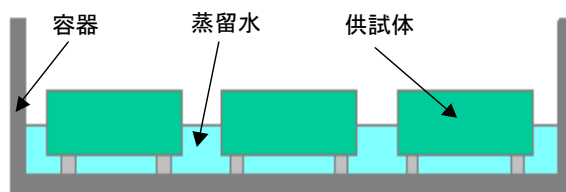


図-1 促進方法

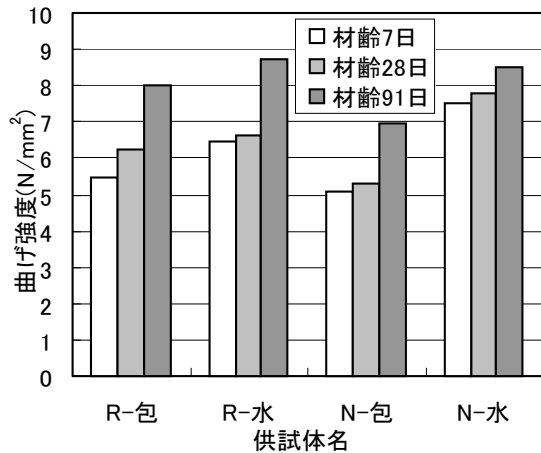


図-2 曲げ強度試験

0.001g まで測定能力のある上皿電子天秤を使用し、測定結果は3個の供試体の平均とした。なお、促進日数は、7日、28日および91日とした。

全エフロレッセンスの発生率は以下の(2)式で求めた。

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

$W_{全}$: 全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の絶乾質量(g)

W_2 : 全エフロレッセンス付着供試体の絶乾質量(g)

不溶性エフロレッセンスの発生率は以下の(3)式で求めた。

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

$W_{不}$: 不溶性エフロレッセンス発生率(%)

W_3 : 不溶性エフロレッセンス付着供試体の絶乾質量(g)

(3) 走査型電子顕微鏡観察

供試体表面に発生したエフロレッセンスを、走査型電子顕微鏡で観察し、2次電子像の写真撮影を行った。また、蛍光X線装置を用い、元素分析を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 曲げ強度試験

図-2 に各供試体の曲げ強度試験結果を示す。

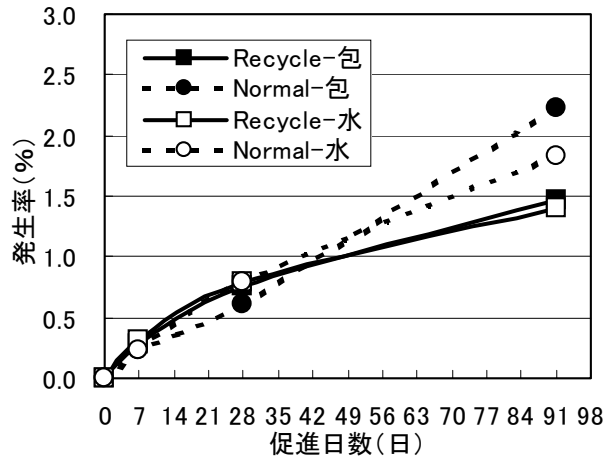


図-3 7日間養生した供試体の全エフロレッセンス発生率

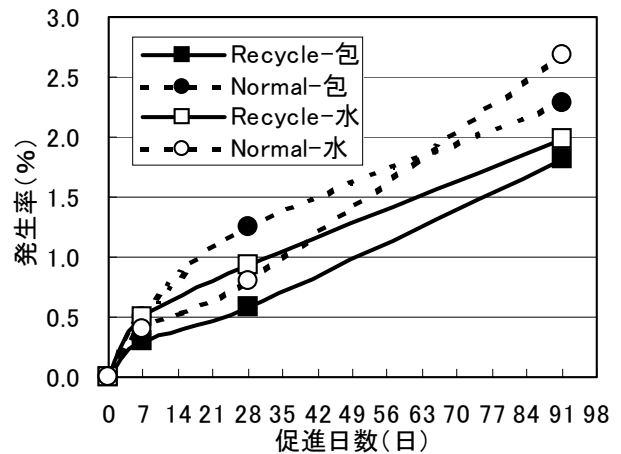


図-4 28日間養生した供試体の全エフロレッセンス発生率

図中に示した供試体名は、ノンセメント即脱成型平板(Recycle)とセメント即脱成型平板(Normal)、および包装養生(包)と水中養生(水)を意味する。本研究に使用した各供試体は、いずれも材齢7日で5N/mm²以上であり、インターロッキングブロック舗装技術協会が必要とされる曲げ強度5N/mm²満たしている。

3.2 エフロレッセンスの測定

(1) 全エフロレッセンス

7日間養生した供試体と28日間養生した供試体の促進日数と全エフロレッセンス発生率の関係を図-3、図-4に示す。

促進日数91日において7日間養生を行ったノンセメント即脱成型平板の平均発生率は約

1.4%であり、セメント即脱成型平板は約 1.9%である。また、28 日間養生を行ったノンセメント即脱成型平板は約 2.0%であり、セメント即脱成型平板は約 2.5%である。このことから、全エフロッセンスの発生量はノンセメント即脱成型平板の方が少ない。

促進日数 28 日において、7 日間養生を行った供試体については養生方法や養生期間による差は見られず、28 日間養生を行った供試体は、水中養生ではセメント、ノンセメント供試体の差は見られなかったが、包装養生では、ノンセメント供試体の方がエフロッセンスの発生が多く見られた。

91 日間促進させるとノンセメント即脱成型平板の方がセメント即脱成型平板に比べ、養生方法や養生期間にかかわらず、発生率が小さくなった。これはノンセメント即脱成型平板の方がエフロッセンスの要因物質が少ないと考えられるが、今後さらに検討する必要がある。包装や水中による養生方法の違いによるエフロッセンスの発生量に大差は見られなかった。一方、28 日間養生した供試体の方が、7 日間養生した供試体より、発生率が大きくなった。

(2) 不溶性エフロッセンス

不溶性のエフロッセンスの結果を図-5、図-6 に示す。

7 日間養生を行った供試体は、促進日数 28 日までは、養生方法や促進日数にかかわらず、ノンセメントとセメントの即脱成型平板の発生率に大差は見られなかったが、28 日間養生を行った供試体は若干のばらつきが見られた。

促進日数 91 日になると 7 日間養生、28 日間養生ともにノンセメント即脱成型平板の方がセメント即脱成型平板に比べ、養生方法や養生期間にかかわらず、発生率が小さくなった。これは(1)の結果とほぼ同様の傾向を現している。

以上の結果より、エフロッセンスの促進環境下に置いた供試体のエフロッセンス発生前と発生後の質量を測定することにより、全エフロッセンスと不溶性のエフロッセンスの発

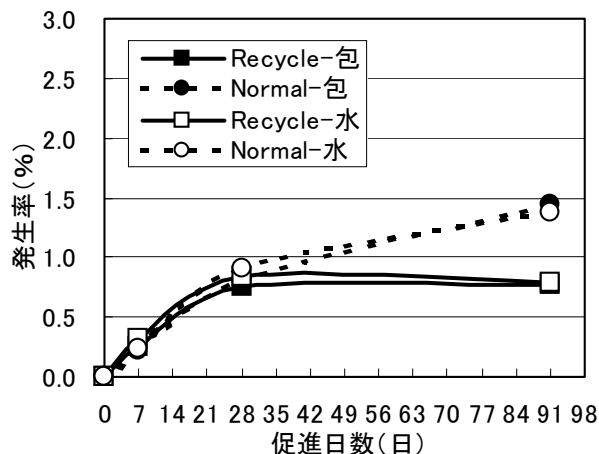


図-5 7 日間養生した供試体の不溶性エフロッセンス発生率

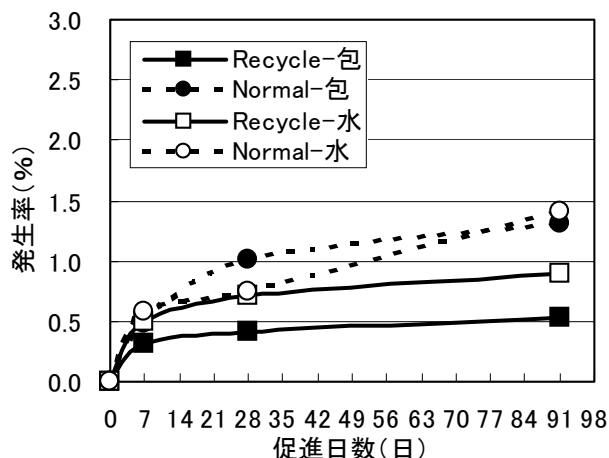


図-6 28 日間養生した供試体の不溶性エフロッセンス発生率

表-3 促進日数 91 日の可溶性および不溶性エフロッセンス発生率 (%)

供試体名	7日間養生		28日間養生	
	可	不	可	不
Recycle-包	0.7	0.8	1.3	0.5
Normal-包	0.8	1.4	1.0	1.3
Recycle-水	0.6	0.8	1.1	0.9
Normal-水	0.5	1.4	1.3	1.4

生量を定量的に評価することが可能であると考えられる。

表-3 に促進日数 91 日における可溶性エフロッセンスと不溶性エフロッセンスの発生率を示す。28 日間包装した場合、可溶性エフロッセンスの発生量は、ノンセメント即脱成型平

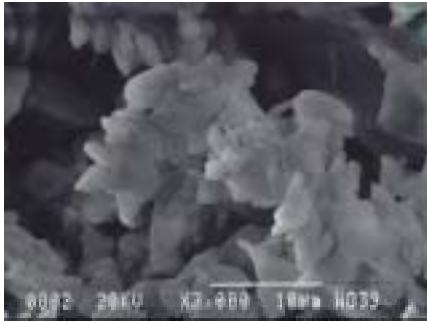


写真-3 ノンセメント供試体表面の可溶性エフロレッセンス



写真-4 セメント供試体表面の不溶性エフロレッセンス

板、セメント即脱成型平板ともに同程度であるが、不溶性エフロレッセンスの発生は、ノンセメント即脱成型平板の方が少ない。

3.3 走査型電子顕微鏡観察

28日間包装養生を行い、促進日数91日で採取したノンセメント供試体とセメント供試体から発生したエフロレッセンスの走査型電子顕微鏡写真を写真-3、写真-4に示す。写真-3に示すノンセメント即脱成型平板は角ばりが無く比較的丸い形状である。一方、写真-4に示すセメント即脱成型平板のエフロレッセンスは針状結晶であり、明確に結晶構造が異なる。

ノンセメント即脱成型平板のエフロレッセンスを元素分析した結果、S(イオウ)とNa(ナトリウム)の存在が確認され、可溶性アルカリ塩が多く含まれていると考えられる。これに対して、セメント即脱成型平板のエフロレッセンスの元素分析した結果では、Ca(カルシウム)の存在が確認され、炭酸カルシウム塩の成分であると考えられる。

表-3に示す通り、両即脱成型平板ともに、可溶性と不溶性のエフロレッセンスを含むが、ノンセメント即脱成型平板のエフロレッセンスの72%が可溶性であり、セメント即脱成型平板の57%が不溶性である。ノンセメント即脱成型平板で可溶性エフロレッセンスが多い理由は、溶解度の高い硫酸ナトリウムを主体とするためであり、逆に、セメント即脱成型平板で不溶性エフロレッセンスが多い理由は、溶解度の小さい炭酸カルシウムを主体とするためと考えられる。ノンセメント即脱成型平板で硫酸ナトリウ

ムを生じやすいのは水酸化ナトリウムを配合しているためと考えられる。一方、セメント即脱成型平板で炭酸カルシウムを生じやすいのは、フライアッシュや高炉スラグ微粉末と比べCaの含有量の多いセメントを主原料としているためと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で、得られた結果を以下にまとめる。

- (1) エフロレッセンスの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のエフロレッセンスの発生量を定量的に評価することが可能である。
- (2) ノンセメント即脱成型平板はセメント即脱成型平板に比べ、不溶性のエフロレッセンスが少ない。

参考文献

- 1)石村進：メンソソリーモルタルの潜在白華試験法の報文についての検討，小野田研究彙報，第12巻，第43号，第1冊，pp.91，1960
- 2)平塚和男，寺石弘，橋本紳一郎，橋本親典：産業副産物をセメント代替とした即脱成型平板の研究，コンクリート工学年次論文報，vol.26，No.1，pp.1485-1490，2004.7
- 3)真野孝次，飛坂基夫，熊原進：セメント系材料の白華試験方法の検討，財団法人建材試験センター，pp.14-19，1982.7