

論文 即時脱型製品に発生する白華抑制に関する研究

大和 功一郎*¹・丸屋 英二*²・竹村 剛*³・山地 功二*⁴

要旨：即時脱型コンクリートは、流し込みコンクリートに比べて空隙が多く水が移動しやすいため白華が発生しやすい。白華の評価方法に関しては多くの研究がなされているが、即時脱型コンクリートを対象とした評価方法は少なく白華の予測は難しい。本報では建築用ブロックの白華抑制を目的として、独自に考案した水中浸せきによる可溶性成分の溶出試験およびブロック中の水の移動を考慮した透水による白華評価試験を行い、これらの試験により白華発生を評価できた。その結果、配合面ではブロックの充填率を高くすること、材料面では高炉セメント、防水剤等を使用することが有効であった。

キーワード：白華，即時脱型コンクリート，建築用ブロック，白華評価試験，水中浸せき試験

1. はじめに

即時脱型コンクリート製品は、空隙が多く、一般に白華抑制に効果があると言われている材料を用いた場合にも、白華を抑制できない場合がある。このため、白華抑制には、材料面に加えて配合面の検討が必要である。また、白華の評価方法に関しては、既に多くの研究がなされており^{1),2),3)}、一般的な白華促進試験として建材試験センターによる方法¹⁾が知られている。しかし、この方法を用いて空隙が多い建築用ブロックを評価した著者らの実験では、ブロック表面への吸水が不十分で白華が発生しにくく、屋外暴露の結果と必ずしも一致しないことがわかった。

白華はセメント硬化体中の可溶性成分が水に溶解し、この溶解液が表面に移動して表面の乾燥に伴って水分が蒸発し白色物質が析出する現象である⁴⁾。このため、白華の発生にはセメント硬化体中の白華の発生源となる可溶性成分を溶解した水の可溶性成分濃度および硬化体中の水の移動しやすさの双方が影響すると考えられる。

そこで、本報では建築用ブロック向け即時脱型コンクリートを対象に、ブロックの水中浸せきによる可溶性成分の溶出試験およびブロック中の水の移動を考慮した透水による白華評価試験方法を考案し、可溶性成分の濃度を表す「Ca²⁺イオン溶出量」と、硬化体中の水の移動のしやすさを表す「逸散水量」によって、セメント・混和材・混和剤等の材料種類および配合条件を変化させた配合について、白華発生との関係を定量的に評価した。また、屋外暴露試験により、白華評価試験方法の妥当性を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に実験に使用した材料を示す。表-2 に建築用ブロックの配合および白華抑制において期待される効果を示す。材料面では、Ca(OH)₂の低減を目的としてポゾラン系の材料、水・Ca²⁺イオンの移動の抑制を目的として白華抑制剤や防水剤などをとりあげた。配合面では、空隙の減少による水・Ca²⁺イオンの移動の抑制を目的として単位粉体量の調整による充填率を増大する方法をとりあげた。

2.2 供試体の成形

(1) 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには容量 20 リットルのパドルミキサを使用した。1 バッチの練混ぜ量は 6 リットルとした。練混ぜは、容器にセメント・混和材・骨材を投入して 60 秒間空練りした後、水および混和剤を投入して 120 秒間練混ぜる手順で行った。

(2) 供試体の成形および養生

小型加圧振動成形機（タイガーマシン製作所製）にて建築用ブロックを成形した。ブロックの充填率は、成形時の型枠へのコンクリート投入質量、または、コンクリートの単位粉体量を変化させることにより調整した。また、成形したブロックは、図-1 の条件で蒸気養生した。材齢 1 日でブロックを乾式カッターにて図-2 の位置から 100×190×30mm の寸法で切り出して供試体とした。供試体は同一ブロックから 2 体切り出し、Ca²⁺イオン溶出量測定用および白華評価試験用とした。

なお、成形したブロックについて充填率を測定した。充填率は、式(1)のとおりブロックの密度をコンクリートの単位容積質量で除して求めた。

*1 (株) 宇部三菱セメント研究所 宇部センターコンクリートグループ主任研究員 工修 (正会員)

*2 宇部興産 (株) 建設資材カンパニー監理部主席部員 (正会員)

*3 宇部三菱セメント (株) 東京支店技術担当部

*4 日本興業 (株) 開発部土木開発設計室チーフ 工修 (正会員)

$$A = \frac{B}{C} \times 100 \quad (1)$$

A : 充填率(%)

B : ブロックの密度(g/cm³)

(成形直後のブロックの質量を容積で除して算出)

C : コンクリートの単位容積質量(g/cm³)

(空気量がないものとして計算により求めた値)

2.3 可溶性成分の溶出量測定および白華評価試験

前述のとおり、白華の発生には、白華の発生源となる可溶性成分を溶解した水の可溶性成分の濃度およびブロック中の空隙の水の移動しやすさが大きく影響すると考えられるため、これらの評価を以下のとおり行う。

(1) 可溶性成分 (Ca²⁺イオン) の溶出量

可溶性成分としては、Na₂SO₄、K₂SO₄、Ca(OH)₂などが挙げられる。これらのうちCa(OH)₂は空気中の炭酸ガ

表-1 使用材料

材料名		銘柄(記号)	物理的性質・主成分等
セメント		普通ポルトランドセメント(N)	密度 : 3.16 g/cm ³
		高炉セメント(BB)	密度 : 3.04 g/cm ³
		フライアッシュセメント(FB)	密度 : 2.98 g/cm ³
混和材		シラス	工業品, 密度 : 2.25 g/cm ³
		カオリン	工業品, 密度 : 2.63 g/cm ³
		石灰石微粉末	密度 : 2.70g/cm ³
骨材		石灰岩砕砂	表乾密度 : 2.70 g/cm ³ , 吸水率 : 0.76%
		7号砕石	表乾密度 : 2.54 g/cm ³ , 吸水率 : 3.36%
混和剤	可塑剤	—	ポリサッカライドおよびポリオキシエチレンアルキルフェノール界面活性剤
	白華抑制剤	抑制剤①	特殊脂肪酸陰イオン界面活性剤
		抑制剤②	高級脂肪酸塩
		抑制剤③	特殊有機微粉末および界面活性剤
		抑制剤④	ステアリン酸カルシウム, 界面活性剤他
	防水剤	防水剤①	高級脂肪酸誘導体および特殊界面活性剤
		防水剤②	変性脂肪酸塩

表-2 配合

No.	配合記号	充填率 (%)	水粉体比 (%)	単位量(kg/m ³)							期待効果
				水	セメント	混和材	骨材		混和剤		
							石灰砂	砕石	可塑剤	その他 ¹⁾	
1	N基準	82	33.0	140	425	—	1743	200	0.85	4.25	—
2	BB	82	33.0	140	425	—	1732	199	0.85	4.25	Ca(OH) ₂ の低減
3	FB	82	33.0	140	425	—	1725	198	0.85	4.25	
4	N+シラス	82	33.9	140	383	30	1743	200	0.85	4.25	
5	N+カオリン	82	33.5	140	383	35	1743	200	0.85	4.25	水・Ca ²⁺ イオンの移動の抑制
6	N+抑制剤②	82	33.0	140	425	—	1743	200	—	6.40	
7	N+抑制剤③	82	33.0	140	425	—	1743	200	—	4.30	
8	N+抑制剤④	82	33.0	140	425	—	1743	200	—	4.30	
9	N+抑制剤⑤	82	33.0	140	425	—	1743	200	0.85	1.30	
10	N+防水剤①	82	33.0	140	425	—	1743	200	0.85	12.8	
11	N+防水剤②	82	33.0	140	425	—	1743	200	0.85	4.30	空隙の減少による水・Ca ²⁺ イオンの移動の抑制
12	N+LF84	84	32.7	149	425	29	1692	200	0.85	4.25	
13	N+LF85	85	32.7	152	425	41	1668	200	0.85	4.25	
14	N+LF86	86	33.0	155	425	62	1641	200	0.85	4.25	
15	N+LF90	90	31.2	171	425	124	1537	200	0.85	4.25	
16	N+LF93	93	28.0	171	425	186	1479	200	0.85	4.25	
17	BB84	84	33.0	143	435	—	1713	199	0.85	4.25	
18	BB85	85	33.0	147	445	—	1696	199	0.85	4.25	
19	BB90	90	28.1	171	609	—	1696	—	1.22	6.09	

1) No.1~5, 12~19 には, 抑制剤①を使用

スと反応して水に難溶性の CaCO_3 を生成し、除去しにくく白華の原因となるため、ここでは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を対象とし、建築用ブロックのイオン交換水中への浸せき試験により、 Ca^{2+} イオン溶出量 (Ca^{2+} イオン濃度) を測定することとした。

材齢 1 日の供試体を 20°C 、1.5 リットルのイオン交換水中に浸せきさせ、5 時間後に浸せき液を採取し、イオンメータにより Ca^{2+} イオン濃度を測定した。浸せき液の採取は、予備試験にて数種類の配合について浸せき時間 5 時間と 48 時間で Ca^{2+} イオン濃度を測定した結果、濃度の順序が浸せき時間によらず変化しなかったため、短いほうの 5 時間とした。 Ca^{2+} イオン溶出量は式(2)のとおり、 Ca^{2+} イオン濃度を供試体の表面積で除して求めた。

$$D = \frac{E}{F} \times 100 \quad (2)$$

D : Ca^{2+} イオン溶出量 ($\text{mol}/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^2$)

E : Ca^{2+} イオン濃度 (mol/cm^3)、F : 供試体の表面積 (cm^2)

(2) 白華評価試験

白華評価試験は、建築用ブロック中の空隙の水の移動の駆動力を考慮した方法で行う。

コンクリート中の水の移動には、透水および吸水によるものがあると考えられる。流し込み成形の場合であれば、組織が比較的緻密なため、水みちとなる空隙は毛細管空隙が主体となり、水の移動の駆動力は表面張力による吸水が主となると考えられる。このため、従来提案されている図-3 のような吸水による白華評価方法が適用できる。

建築用ブロック向け即時脱型コンクリート中の水の移動をモデル化すると図-4 のようになると考えられる。即時脱型コンクリートの場合、水みちとなる空隙は骨材間空隙やエントラップトエアが主体となり、水の移動の駆動力は水頭差の圧力による透水が主となると考えられる。

そこで、本研究では建築用ブロックの供用状態に近付けるため、図-5 のような供試体の白華発生面 (表面) を下向きにして、供試体の上面 (裏面) から吸水性材料を介して水を供給させることにより、若干の水頭圧を作用させた透水による白華評価試験を実施することとした。

以下に白華評価試験の手順を示す。

- ①材齢 3 日において、供試体側面をエポキシ樹脂などでシールし、供試体の表面、裏面以外から水の移動がなくなるようにする。
- ②供試体の裏面にエポキシ樹脂でプラスチックケースを固定する。
- ③供試体を 5°C の蒸留水に 1 時間浸せきさせる。

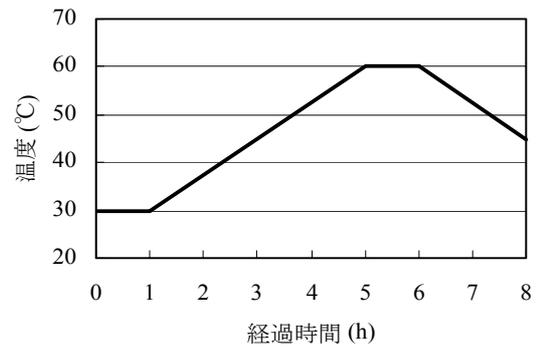


図-1 蒸気養生条件

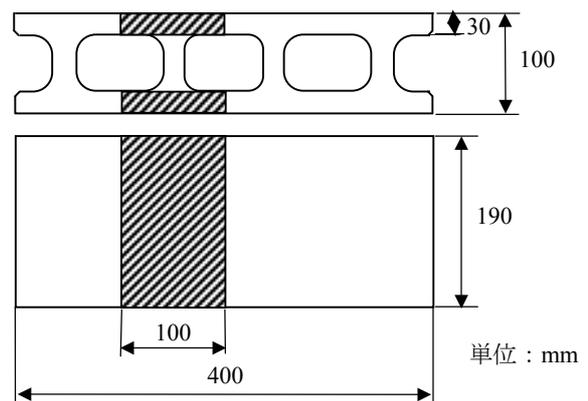


図-2 供試体の切り出し位置

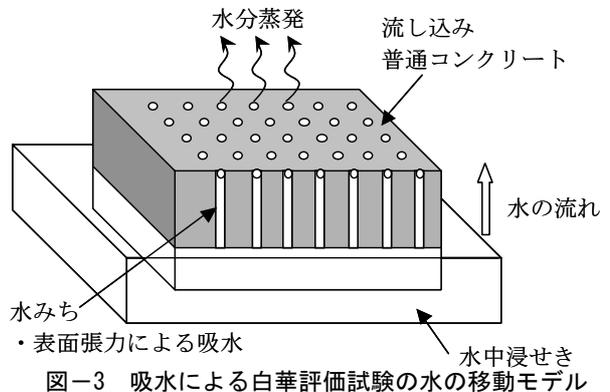


図-3 吸水による白華評価試験の水の移動モデル

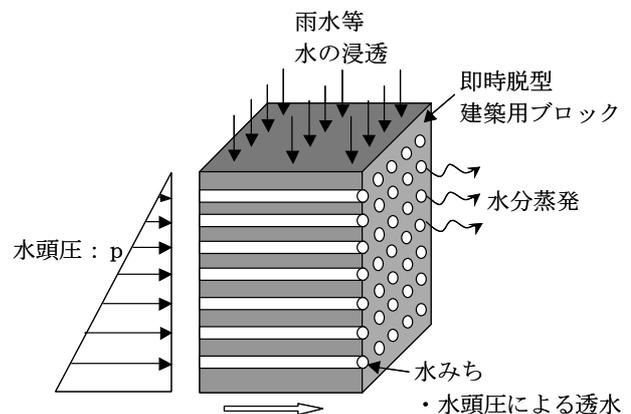


図-4 建築用ブロックの水の移動モデル

- ④ 供試体を濡れたタオルで拭き、ケースの中にスポンジなどの吸水性材料を入れて、ケースに蓋をする。
- ⑤ ケースと蓋との間をビニールテープ等でシールし、質量を測定する。
- ⑥ 供試体の表面を下向きにして、温度 5℃、相対湿度 30%の恒温恒湿機に静置する。
- ⑦ 24 時間後、供試体を恒温恒湿機から取り出し、質量を測定し、⑤の時点からの減少分の水量を吸水性材料を介して供給する。
- ⑧ ⑤～⑦を計 7 回行い、その後、20℃、30%の恒温室にて 3 日間乾燥させる。

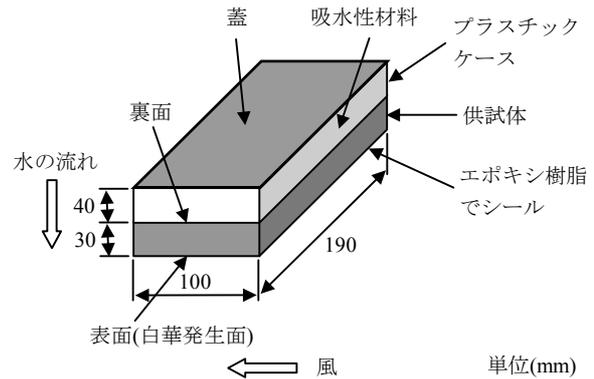


図-5 白華評価試験概要

上記試験終了後、目視によって白華発生状況を観察した。白華の評価は写真-1 のとおり 3 段階とした。なお、ブロック中の水の移動状態を把握するため、供試体の表面（白華発生面）から逸散した水量の総量（逸散水量）を測定した。逸散水量は、上述、白華評価試験手順の⑦で供給した水の総量で表される。

(3) 屋外暴露試験

白華評価試験の妥当性を検証するために、白華評価試験にて効果の認められた配合で実機成形機にて製造した建築用ブロックを用いて屋外暴露試験を行った。暴露開始時期は白華が発生しやすい冬季(11~12月)とした。なお、ブロックは室内試験と同一条件で蒸気養生をして、工場場内に1ヶ月間保管した後暴露した。



評価：○（白華発生せず）



評価：△（部分的に白華発生）



評価：□（全体的に白華発生）

写真-1 白華の評価基準

3. 実験結果および考察

3.1 Ca²⁺イオン溶出量と逸散水量

図-6 に各種材料を使用した場合の Ca²⁺イオン溶出量と逸散水量との関係を示す。

Ca²⁺イオン溶出量および逸散水量が小さいものは、白華の発生が少ない傾向にあり、逸散水量が 100cm³ 以下であれば、ほとんどの場合において白華の発生は認められなかった。以下に Ca²⁺イオン溶出量および逸散水量について要因毎に整理する。

(1) セメント種類および混和材種類の影響

図-7 に充填率を一定とした場合の、セメント種類および混和材種類を変えた供試体の Ca²⁺イオン溶出量と逸散水量との関係を示す。

Ca²⁺イオン溶出量は、高炉セメント B 種（以下、BB）を用いた場合、普通ポルトランドセメント（以下、N）を用いた基準配合よりも小さくなり、白華の発生も少なくなった。また、逸散水量は、フライアッシュセメント B 種（以下、FB）、または、カオリンやシラス等の混和材を用いた場合に小さくなり、白華の発生も少なくなった。以上から、ポゾラン系等の混和材は、白華抑制効果があることが確認できた。

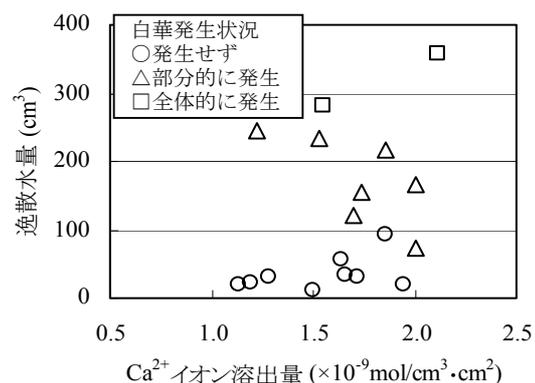


図-6 Ca²⁺イオン溶出量と逸散水量

(2) 混和剤種類の影響

図-8 に充填率を一定とした場合の、白華抑制剤および防水剤の種類を変えた供試体の Ca²⁺イオン溶出量と逸散水量との関係を示す。

Ca²⁺イオン溶出量は、各混和剤を用いた場合ともに、

基準配合よりもやや小さくなり、白華の発生も基準配合よりも改善された。逸散水量は、銘柄によって異なり、防水剤系の混和剤を用いた場合は逸散水量が大幅に低減され、白華の発生は認められなかった。このことから、水の移動を抑制できる防水剤系混和剤の使用が有効な白華抑制対策となることがわかった。

(3) 充填率の影響

図-9にNおよびBBについて、単位粉体量（単位セメント量）を変化させることにより充填率を変化させた場合の充填率とCa²⁺イオン溶出量との関係を示す。充填率の調整は、Nについては単位セメント量を一定として石灰石微粉末を変化（以下、N+LF）させることで行った。BBについては単位セメント量を変化させることで行った。

Ca²⁺イオン溶出量は、N+LFの場合、充填率が大きいほど小さくなり、白華の発生が少なくなる傾向が認められた。BBを用いた場合、充填率に関わらずCa²⁺イオン溶出量に変化はみられなかった。これは、Nの場合、単位セメント量を一定として、石灰石微粉末を増加させることで充填率を大きくさせていることから、供試体に含まれるセメント由来のCa²⁺イオンの量は充填率に関わらず一定であり、充填率が高くなるとCa²⁺イオンが溶出しにくくなるためと考えられる。BBの場合は、単位セメント量を増加させることで充填率を大きくさせていることから、充填率を大きくすると空隙が減少する一方で、供試体に含まれるCa²⁺イオンの量が多くなるため、充填率に関わらずCa²⁺イオン溶出量に変化がみられなかったものと考えられる。このことから、充填率が同じでもCa²⁺イオン溶出量は、材料種類、単位粉体量等により異なる場合があり、Ca²⁺イオン溶出量のみでは白華を評価できないことがわかった。

図-10にN・BBの単位粉体量（単位セメント量）を変化させることにより充填率を変化させた場合およびその他の材料を用いた場合における、充填率と逸散水量との関係を示す。

逸散水量は、N・BBの単位粉体量、その他の材料種類に関わらず充填率が大きいほど小さくなり、白華の発生が少なくなる傾向が認められた。充填率を84%以上になると、逸散水量は100cm³以下となり、白華の発生はほとんどの場合認められなかった。充填率を大きくすると、逸散水量、すなわち、供試体中の水の移動が少なくなり、Ca²⁺イオンを溶解した水の流出が少なくなり、白華の発生が少なくなると考えられる。これは、Ca²⁺イオン溶出量が高くても、水の移動が少なければ白華の発生は少なくなることを表している。

以上から、白華発生にはCa²⁺イオン溶出量と逸散水量の双方が関係するものの、逸散水量の影響が支配的であ

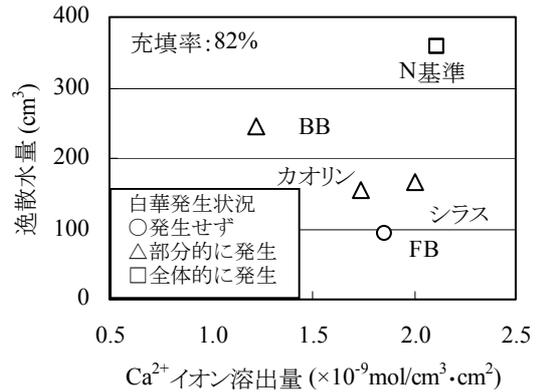


図-7 セメント種類および混和材種類の影響

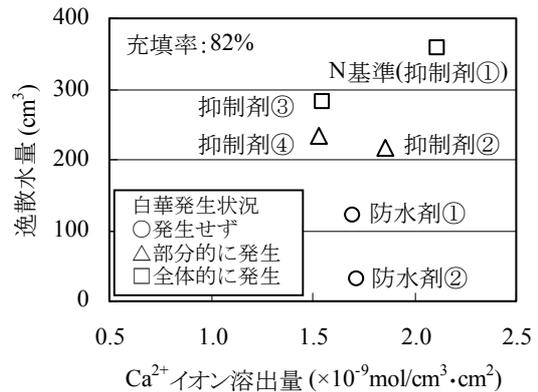


図-8 混和剤種類の影響

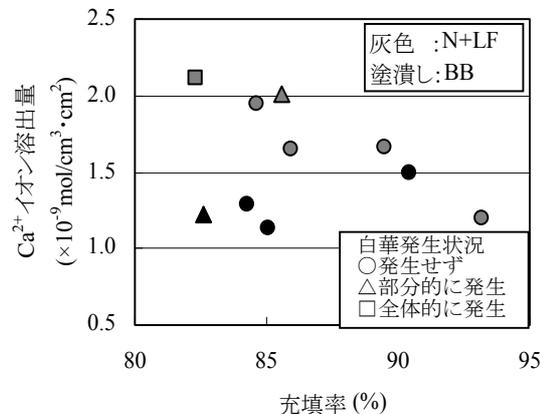


図-9 充填率とCa²⁺イオン溶出量

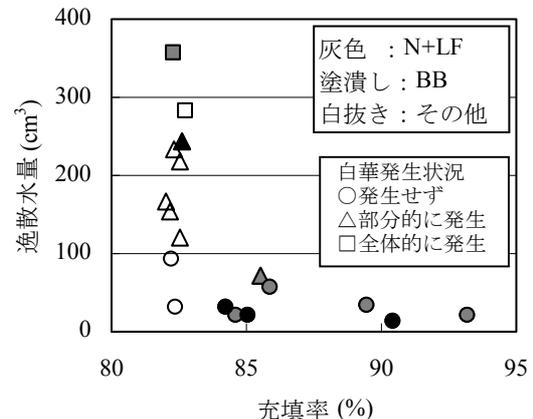


図-10 充填率と逸散水量

ることが確認された。

図-11 に各種材料を使用した場合の、充填率とコンクリート中の単位ペースト容積との関係を示す。

充填率と単位ペースト容積との関係はほぼ線形であり、充填率を大きくするためには単位ペースト容積を大きくすることが効果的であることが確認された。上述した白華発生を抑制できる充填率である84%以上とする場合は、単位ペースト容積を290L/m³以上にする必要がある。

3.2 屋外暴露試験

表-3 に屋外暴露試験結果を示す。写真-2 に屋外暴露試験状況を示す。N を用いた基準配合は、暴露期間1

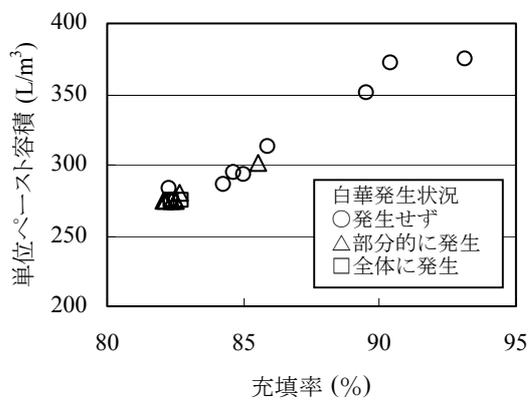
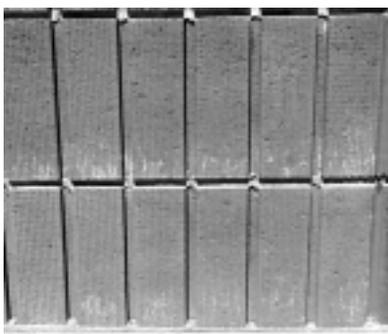


図-11 充填率と単位ペースト容積

N 基準 (配合 No. 1)



BB90 (配合 No. 19)

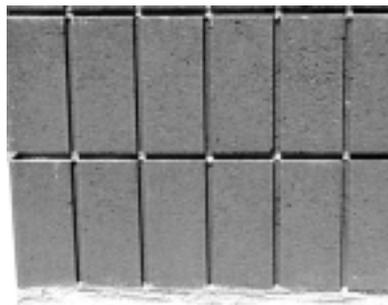


写真-2 屋外暴露試験状況

ヶ月にて白華が発生した。一方、屋内での白華評価試験において白華抑制効果が認められた BB90 (セメントに BB を用いて充填率を 90%とした配合) については、暴露数年経過しても白華は認められなかった。

表-3 屋内白華評価試験と屋外暴露試験の比較

No.	記号	屋内試験	屋外暴露	
		発生状況	発生状況	発生時期
1	N 基準	□	□	1ヶ月後
19	BB90	○	○	—

注) 白華発生状況：○ 発生せず，□ 全体に発生

4. まとめ

建築用ブロック向け即時脱型コンクリートの白華抑制を目的として、独自に考案した水中浸せきによる可溶性成分の溶出試験およびブロック中の水の移動を考慮した透水による白華評価試験によって、配合条件を変化させて各種材料の白華抑制効果を確認した。以下に知見を示す。

- (1) 白華の発生には、可溶性成分の濃度 (Ca²⁺イオン溶出量) と逸散水量 (水の移動量) が関係し、特に逸散水量の影響が支配的である。これらの値を小さくすることが白華抑制には効果的である。
- (2) ブロックの充填率は逸散水量に影響を及ぼし、充填率を 84%以上とすることで、逸散水量は大幅に低減し、白華抑制効果が高い。
- (3) 充填率を高くするには、単位セメント量の増加や石灰石微粉末等の使用で、単位ペースト容積を多くすることにより効果が認められた。
- (4) 高炉セメントは、Ca²⁺イオン溶出量を低減させる作用により白華を抑制する効果が認められた。
- (5) 防水剤系の混和剤は、逸散水量を低減させる作用により白華を抑制する効果が認められた。
- (6) 屋内白華評価試験と屋外暴露試験との白華発生状況を比較し、屋内にて白華抑制効果が認められた配合は、暴露数年経過しても白華が認められなかった。

5. 参考文献

- 1) 真野孝次：セメント系材料の白華試験方法の検討，建材試験情報，No.7，pp.14-19，1982
- 2) 西純二ほか：エフロレッセンスの防止方法に関する2,3の実験，セメント技術年報 38，pp.509-512，1984
- 3) 橋本親典ほか：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集，Vol.27，No.1，pp.235-240，2005
- 4) 笠井芳夫ほか：コンクリート総覧，技術書院，1998.6