

論文 即時脱型コンクリート製品の配合に関する基礎的研究

日高 翔太*1・橋本 紳一郎*2・山本 康雄*3・山下 龍二*4

要旨:本研究では河川用の環境保全積ブロックを対象とした即時脱型コンクリート製品の配合について、フレッシュ性状試験及び硬化後の特性により検討した。その結果、即時脱型コンクリート用混和剤を用いることで型枠内への充填性が改善できるが、細骨材率が特に大きい場合、それらの改善効果が見られないことを明らかにした。また、加圧振動締固めにより算出した充填率は硬化後の圧縮強度や全白華発生率と強い相関性があり、本研究の対象とした即時脱型コンクリート製品と使用材料においては充填率を 86%以上確保することによって、表面性状や設計基準強度を満たし、白華抑制効果を期待できることを示した。

キーワード: 即時脱型コンクリート, 白華現象, 充填性, 細骨材率, 振動締固め

1. はじめに

近年の災害復旧事業や施工現場においては施工の効率化が求められており、それによりプレキャスト製品の適用機会も増加してきている。その中でも河川用ブロック等として用いられる即時脱型コンクリート製品は、加圧振動締固めを行い、即時に脱型できるため製品を短期間で大量に製造することができる。しかし、即時脱型コンクリートは製造時においてゼロスランブの状態であるため、従来のようなスランブ試験、空気量試験ではコンシステンシーを適切に評価できない。

これに対して、既往の研究^{1) 2)}では、幾つかの試験方法や配合検討方法が提案されているが、現状では即時脱型コンクリート用の配合選定時や品質確認時の試験が規格化されておらず、即時脱型コンクリート用の配合設計手法も確立されていない。そのため、使用する骨材や各製品に適した配合の選定が非常に難しく、実際の製造工場では配合のバランスより製品の外観（表面の仕上がり性状）を重視し、細骨材率を高くするなどの措置を行っている。このように最適な配合の選定が行われていない場合、実際の製品の設計基準強度を満足できないこと、充填性状が悪く製品の一部に欠けが発生するなどの問題が生じている。また、コンクリートの充填性状が悪い場合、製品の表層部に現れる白華現象が顕著になる問題も挙げられている。これらについては、既往の研究³⁾により白華現象を抑制できる充填率の目安を示しているが、使用する材料や配合によって、製造する製品の形状寸法等の結果が異なると考えられる。そこで、本研究では河川用の環境保全積ブロックを対象とした即時脱型コンクリート製品の強度や充填性、美観や白華抑制効果をみだすことができる配合をフレッシュ性状試験及び

硬化後の特性により検討した。

2. 実験概要

本研究で対象としたのは、河川用の環境保全積ブロックの即時脱型コンクリート製品であり、材齢 14 日における設計基準強度は 24N/mm²以上である。本稿では、即時脱型コンクリートに対する基礎的研究として 2 つのシリーズで検討した。シリーズ 1 では、各種混和剤が即時脱型コンクリートの充填性に及ぼす影響の検討および即時脱型コンクリート用混和剤を用い、単位水量や細骨材率を変化させた配合が即時脱型コンクリートの充填性に及ぼす影響の検討を行った。シリーズ 2 では、即時脱型コンクリート製品用の充填性を適切に評価できる手法を用い、各種配合条件の違いや振動条件の違いが充填性および硬化後の特性に及ぼす影響の検討を行った。

本検討条件で検討したのは、即時脱型コンクリートの製造後における目標強度、充填性、白華抑制、美観の 4 項目を満足する配合である。

2.1 各種混和剤の効果に関する検討（シリーズ 1）

2.1.1 使用材料および配合条件

混和剤種類が充填率に及ぼす影響の検討については使用材料を表-1、コンクリート配合を表-3 に示す。単位水量および細骨材率を一定とし、各種混和剤の添加の有無を条件とした計 4 配合について検討を行った。即時脱型コンクリート用混和剤の添加が充填性に及ぼす影響については表-1 の即時脱型コンクリート用混和剤を使用した。コンクリート配合を表-4 に示す。単位水量を 2 水準、細骨材率を 2 水準の 4 水準とし、それぞれ混和剤の有無を条件とした計 8 配合について検討した。使用する混和剤はリグニンスルホン酸塩を主成分とする AE 減水剤、ナフタレ

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*3 (株)ヤマウ 製造本部 品質管理部

*4 (株)ヤマウ 佐賀工場 品質管理グループ

表-1 使用材料 (シリーズ 1)

記号	種類	物理的品質
W	地下水	密度:1.0g/cm ³
C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³
S1	海砂	密度:2.58g/cm ³ , FM=2.81
S2	砕砂	密度:2.71g/cm ³ , FM=3.24
G	砕石 1505	密度:2.69g/cm ³
Ad ₁	即時脱型コンクリート用混和剤	非イオン系界面活性剤 密度:1.01g/cm ³
Ad ₂	AE減水剤	リグニンスルホン酸塩 密度:1.13g/cm ³
Ad ₃	減水剤	ナフタレンスルホン酸系化合物 密度:1.14g/cm ³

表-2 使用材料 (シリーズ 2)

記号	種類	物理的品質
W	地下水	密度:1.0g/cm ³
C	普通ポルトランドセメント	密度:3.15g/cm ³
S1	海砂	密度:2.58g/cm ³ , FM=2.81
S2	砕砂	密度:2.71g/cm ³ , FM=3.24
G	砕石 1505	密度:2.69g/cm ³
Ad ₁	即時脱型コンクリート用混和剤	非イオン系界面活性剤 密度:1.01g/cm ³

ンスルホン酸系を主成分とする減水剤, 非イオン系界面活性剤を主成分とする即時脱型コンクリート用混和剤の 3 種類である。

2.1.2 試験項目及び試験方法

(1) 振動台式コンシステンシー試験

振動台式コンシステンシー試験 (周波数: 60Hz, 振幅: 0.8mm, 圧力: 0.2MPa) については VC 振動締め試験²⁾を参考にし, 10kg の試料を φ200×240mm の鋼製型枠につめ, 重り 5kg を試料上面に設置し, 30 秒加振を行い, 試料の沈下深さより充填率を算出した。

(2) 振動締め試験

振動締め試験については, φ150×300mm の鋼製型枠を用い, 7kg の試料を容器につめ, 重り 5kg を上面に設置し, テーブル振動機 (周波数: 70Hz, 振幅: 1mm, 圧力: 0.16MPa) で 30 秒加振を行い, その時点での試料の沈下深さより充填率を算出した。

2.2 充填性および硬化後の特性に関する検討 (シリーズ 2)

2.2.1 使用材料および配合条件

シリーズ 2 で使用した材料を表-2 に示す。配合条件の違いが充填率に及ぼす影響の検討についてはコンクリート配合を表-5 に示す。既往の研究^{1,3)}を参考に, 単位水量を 3 水準, 細骨材率を 4 水準設定し, それらに混和剤を添加した計 12 配合で検討を行った。次に単位水量を一定とし, 細骨材率を変化させた時の振動条件, 上載荷重条件の違いが充填性や圧縮強度, 白華発生率に与える影響の検討に対するコンクリート配合を表-6 に示す。単位水量を一定とし, 細骨材率を 5 水準に設定した。それらに, 混和剤の添加有無の比較も含めた, 計 10 配合で検討を行った。

2.2.2 試験項目および試験方法

(1) 振動台式コンシステンシー試験, 振動締め試験

表-3 コンクリート配合 (シリーズ 1: 各種混和剤が充填性に及ぼす影響)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	Ad ₁	Ad ₂	Ad ₃
30	50	100	333	410	646	1068	-	-	-
		C×0.2%							
		C×1.0%							
C×0.75%									

表-4 コンクリート配合 (シリーズ 1: 即時脱型コンクリート用混和剤が充填性に及ぼす影響)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G	Ad ₁		
30	50	100	333	410	646	1068	-		
		140	467	367	579	957			
	80	100	333	656	1033	427			
		140	467	588	926	383			
	30	50	100	333	410	646		1068	C×0.2%
			140	467	367	579		957	
		80	100	333	656	1033		427	
			140	467	588	926		383	

表-5 コンクリート配合 (シリーズ 2: 配合条件の違いが充填率に及ぼす影響)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	Ad ₁
30	50	100	333	410	646	1068	C×0.2%
		120	400	389	612	1013	
		140	467	367	579	975	
	60	100	333	492	775	855	
		120	400	466	735	810	
		140	467	441	695	766	
	70	100	333	574	904	641	
		120	400	544	857	608	
		140	467	514	810	575	
	80	100	333	656	1033	427	
		120	400	622	980	405	
		140	467	588	926	383	

表-6 コンクリート配合 (シリーズ 2: 振動条件の違いが充填率や硬化後の特性に及ぼす影響)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	Ad ₁
30	50	100	333	410	646	1068	-
	60			492	775	855	
	65			533	839	748	
	70			574	904	641	
	80			656	1033	427	
	50	100	333	410	646	1068	
	60			492	775	855	
	65			533	839	748	
	70			574	904	641	
	80			656	1033	427	

シリーズ 1 と同様に行った。

(2) 自動ランマ締め試験

自動ランマ締め試験については, マーシャル試験²⁾を参考にし, φ150×170mm の鋼製型枠に 3.5kg の試料を投入し, 自動ランマで 50 回突き固めを行い, その時点での

$$W_{全} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad [1]$$

$$W_{不} = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad [2]$$

$W_{全}$: 全白華発生率(%)

$W_{不}$: 不溶性白華発生率(%)

W_1 : 白華発生前の供試体の絶乾質量(g)

W_2 : 白華付着供試体の絶乾質量(g)

W_3 : 不溶性白華付着供試体の絶乾質量(g)

試料の沈下深さより充填率を算出した。

(3) 加圧振動締固め試験

上載荷重を 0.01, 0.05Mpa の 2 水準, 振動時間を 5, 30 秒に変化させた計 4 水準を検討した。試験手順は, 3kg の試料を鋼製型枠 (φ100×200mm) に投入後, 上載荷重を付与すると同時に振動締固め (周波数: 75Hz, 振幅: 1mm) を行った。その後, 沈下深さを測定することにより充填率を算出した。

(4) 充填率算出および圧縮強度試験

圧縮強度試験に用いる供試体の作製方法は, 試料を所定量, 1 層詰めで鋼製型枠 (φ100×200mm) に投入後, 上載荷重を 0.05Mpa, 振動時間を 30 秒とし振動締固めを (周波数: 75Hz, 振幅: 1mm) を付与し作製した。充填率は, 供試体の単位容積質量を測定し, その値を計画配合より算出した理論上の単位体積重量で除して充填率を算出した。圧縮強度試験 (JIS A 1108:2006 に準拠) は材齢 3, 7, 14 日とし, 養生方法は恒温室 (気温: 20℃, 湿度: 60%) にて気中養生とした。

(5) 白華促進試験

圧縮強度試験と同様の供試体を作製し, 養生終了後に供試体を φ100×20mm に切断し, 既往の研究⁴⁾⁵⁾を参考に白華促進試験を行った。また, 白華促進試験を行うための供試体の養生期間は 7 および 14 日とし, 所定の養生期間まで恒温室にて気中養生 (気温: 20℃, 湿度 60%) を行った。以下に白華促進試験の手順を示す。

- 100℃の乾燥機に 24 時間入れ, 白華発生前の供試体絶乾質量 W_1 を測定する。
- 供試体絶乾質量 W_1 測定後, 供試体の高さの半分まで蒸留水に浸漬させ, 温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度 60% の環境条件下の恒温室に設置する。
- 浸漬日数終了後, 供試体を絶乾状態にし, 白華発生後の供試体絶乾質量を測定し, 全白華発生率を算出する。
- 供試体の表面についての可溶性成分を水道水で 5 秒程度洗い流す。
- 供試体を絶乾状態にし, 不溶性白華発生率を測定する。

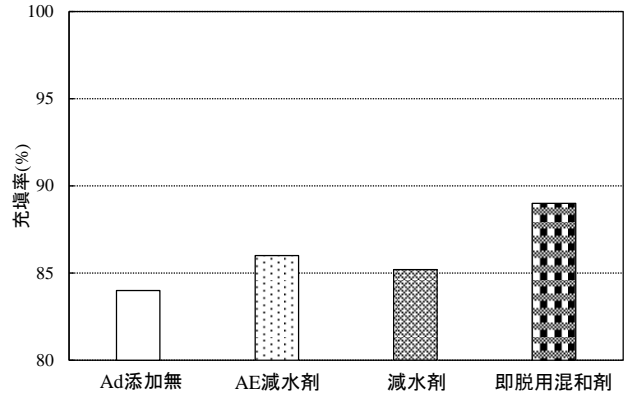


図-2 振動台式コンシステンシー試験結果 (シリーズ 1)

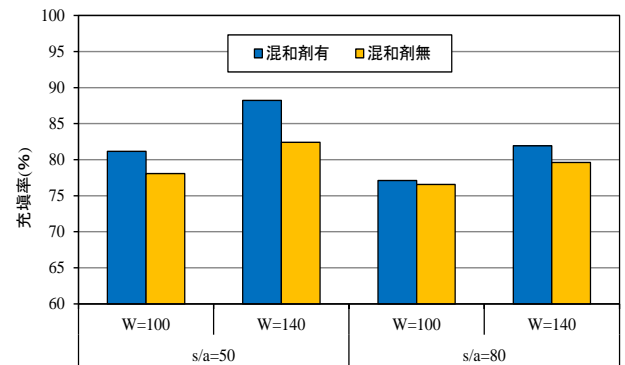


図-3 振動締固め試験結果 (シリーズ 1)

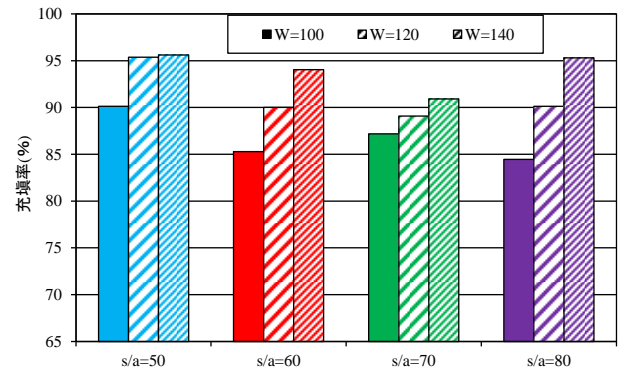


図-4 自動ランマ締固め試験結果 (シリーズ 2)

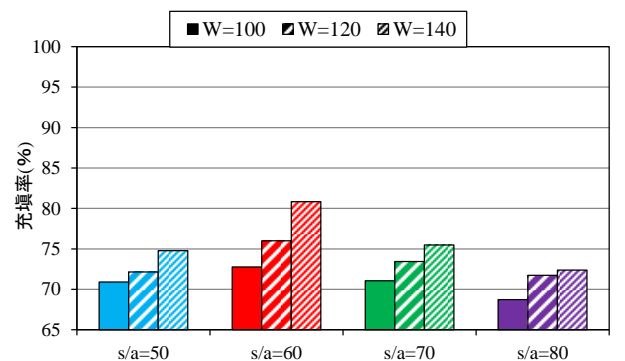


図-5 振動台式コンシステンシー試験結果 (シリーズ 2)

浸漬日数は91日までとし、7日毎に測定を行った。全白華発生率および不溶性白華発生率には[1], [2]式より算出した。本研究では浸漬日数14日までの結果を報告する。

3. 結果及び考察

3.1 各種混和剤の効果に関する検討 (シリーズ1)

図-2 に、各混和剤を使用した振動台式コンシステンシー試験の結果を示す。試験の評価には、混和剤の効果を明確にするために試料の量が多く、振動条件が小さい振動締固め試験を適用した。AE 減水剤や減水剤を使用した場合は、混和剤を使用しない場合の充填率と同程度であり、これらの混和剤では即時脱型コンクリートのようなゼロスランプのフレッシュ性状の改善には期待できないと考えられる。また、練上がり直後において AE 減水剤や減水剤を使用した配合は、コンクリート表面の乾燥がみられたのに対し、即時脱型コンクリート用混和剤を使用した配合は、水分を保った状態であった。本研究では、即時脱型コンクリート用混和剤を用いて、配合条件や振動条件が充填率や硬化後の特性に及ぼす影響について検討することとした。

図-3 に振動締固め試験の結果を示す。同一の単位水量において $s/a=50\%$ の配合は、混和剤による充填性の改善効果を確認できたが $s/a=80\%$ の配合の充填率では、混和剤による充填性の改善効果を確認できなかった。これは単位細骨材量が多いことによって、混和剤による分散性が低減したためであり、即時脱型コンクリートの配合の条件により混和剤の効果が異なることを示した。また、単位水量が多い配合では、充填率が比較的高くなることを確認した。

3.2 充填性に関する検討 (シリーズ2)

図-4 に自動ランマ締固め試験の結果、図-5 に振動台式コンシステンシー試験の結果、図-6 に振動締固め試験の結果を示す。図-4 の自動ランマ締固め試験では、加振を行わないため、加圧だけでは即時脱型コンクリートの配合の条件の違いを明確に示すことは出来なかった。図-5、図-6 の結果より $W=100\text{kg/m}^3$ の配合の充填率に比べ、 $W=140\text{kg/m}^3$ のすべての配合において充填率は高くなった。これは単位セメント量が増加したことにより、締固まり易く充填率が高くなったと考えられる。振動締固め試験は振動台式コンシステンシー試験に比べ、全体的に充填率が高い傾向にある。また、 s/a の減少に伴い充填率は高くなる傾向であった。しかし、 $s/a=50\%$ の場合、 $s/a=60\%$ に比べ充填率が低い結果となった。これは、単位粗骨材量が多くなることによって、粗骨材同士が噛み合いを引き起こしたためであり、充填率に寄与する配合条件の境界が、 $s/a=50\%$ と $s/a=60\%$ であったと考えられる。 $W=140\text{kg/m}^3$ 、 $s/a=60\%$ の配合に着目した場合、他の配合に比べて5%程度高い結果を示しており、充填率によりそれらの特性を示すことができた。また、振動締固め試験は、振動台式コンシステン

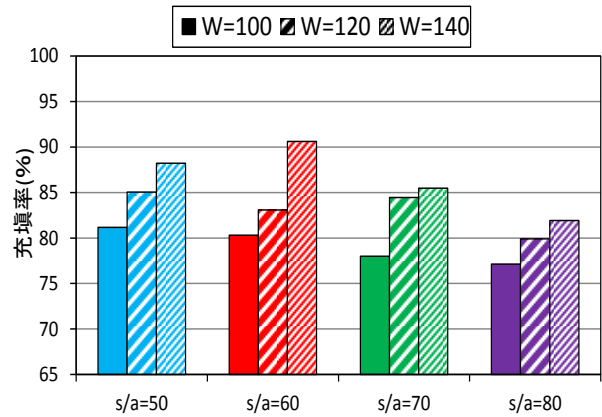


図-6 振動締固め試験結果 (シリーズ2)

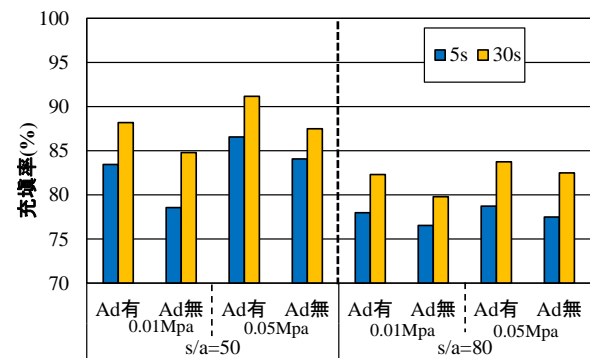


図-7 加圧振動締固め試験結果 (シリーズ2)

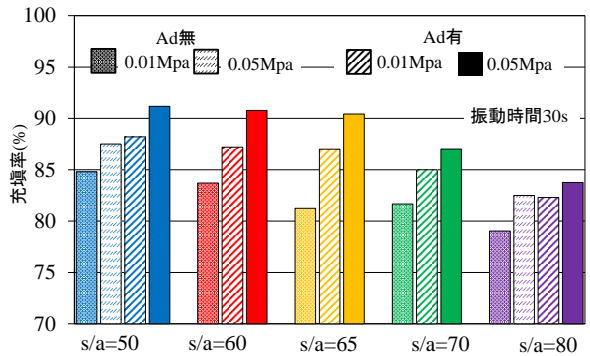


図-8 各細骨材率における充填率算出結果 (シリーズ2)

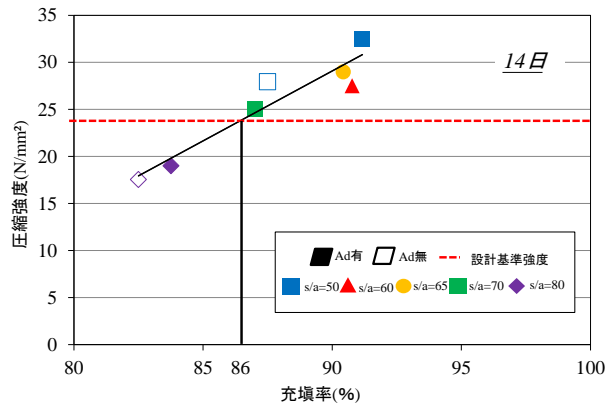


図-9 圧縮強度と充填率の関係 (シリーズ2)

シー試験に比べ上載荷重, 周波数, 振幅ともに高く, 全ての配合条件において充填率が 10%程高い値を示したが, 各配合の充填率は同様の傾向を示した。

以上から即時脱型コンクリート製品の配合選定における充填性の評価には加圧と振動の両方の条件が必要であり, これにより配合条件の違いによる充填率を定量的に示すことができる。

3.3 充填性と硬化後の特性に関する検討 (シリーズ 2)

図-7 に表-4 で検討した混和剤の添加有無による加圧振動締め試験結果, 図-8 に振動締めを 30 秒付与した場合の各細骨材率における充填率算出結果を示す。混和剤無添加の配合に対し, 混和剤を添加した配合は, 充填率が增加し混和剤の効果を確認することができた。それらは, s/a の違いで比較した場合についても, 同様に混和剤の効果を確認することができた。しかしながら, s/a の大きい配合に対しては, 混和剤の効果が低くなる結果を示した。また, 上載荷重が小さい場合には, その傾向が顕著に表れた。上載荷重を 0.05MPa にした場合でも, 同様の傾向はみられたが, s/a=50, 60, 65%において, 90%以上の充填率を確保できることを確認した。以上から即時脱型コンクリートにおいて, 同一の振動条件であっても, 上載荷重によって充填率や混和剤の効果が異なる。

図-9 に材齢 14 日における圧縮強度試験結果と充填率の関係, 図-10 に各材齢の圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度試験用に用いた供試体の充填率は, 供試体作製時の充填率とほぼ同程度であった。充填率と圧縮強度は相関性がみられ, 材齢 14 日で設計基準強度の 24N/mm² 以上を満足するには, 充填率が 86%以上必要であった。また, 各材齢の圧縮強度試験では, 細骨材率が低くなるにつれ, 圧縮強度が高くなる傾向にあった。s/a=80%の圧縮強度は初期材齢から 14 日までの強度の伸びも少なかった。検討の配合においては s/a=50~70%の範囲内で, 設計基準強度を満足できることが確認された。

図-11 に配合条件の違いによる混和剤の添加有無における浸漬日数と全白華発生率の関係, 図-12 に養生期間の違いによる浸漬日数と全白華発生率の関係を示す。混和剤を添加した配合は, 添加しない配合に比べ全白華発生率は低い。これは, 混和剤を添加することによって試料が締め固まり易くなり, 充填率が向上したためだと考えられる。また, 細骨材率の増加に伴い全白華発生率は高くなっており, 浸漬日数 7 日以降においてその差は顕著に表れている。養生期間 7 日の配合に比べ 14 日間養生を行った配合は, 全白華発生率が低い。これは, 養生期間が長くなることでコンクリートの内部構造が緻密化し, 水分の逸散水量が減少したためだと考えられる。

図-13 に浸漬日数 14 日における全白華発生率と充填率の関係, 図-14 に浸漬日数 14 日における全白華発生率

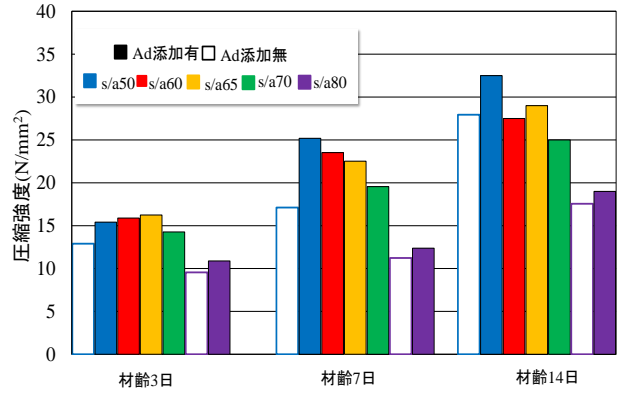


図-10 圧縮強度と材齢日数の関係(シリーズ 2)

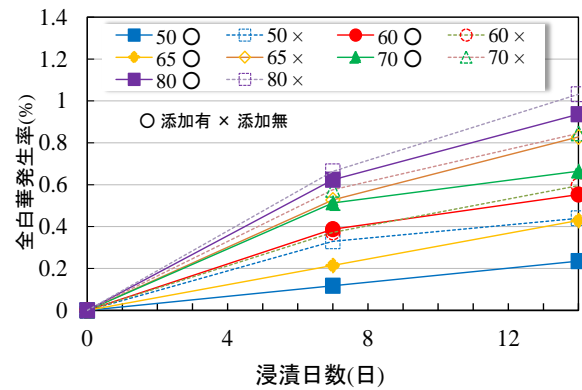


図-11 配合条件の違いによる浸漬日数と全白華発生率の関係

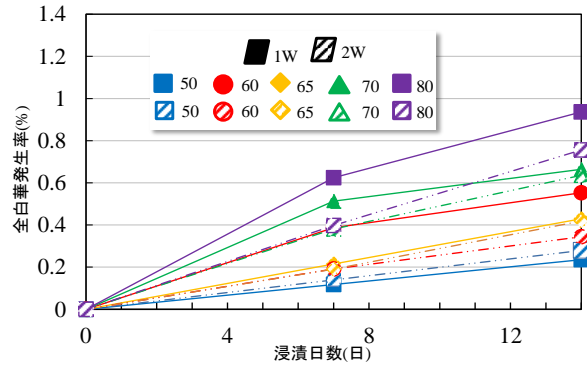


図-12 養生期間の違いによる浸漬日数と全白華発生率の関係

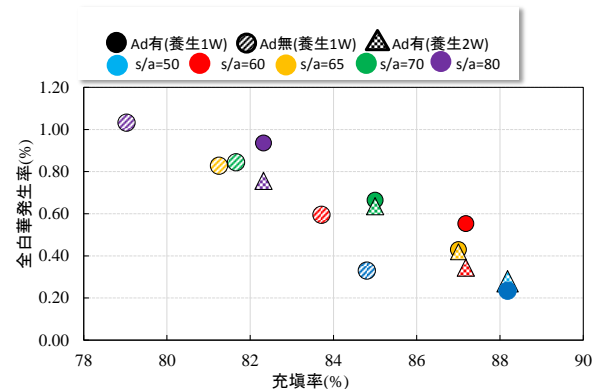


図-13 浸漬日数 14 日における白華発生率と充填率の関係

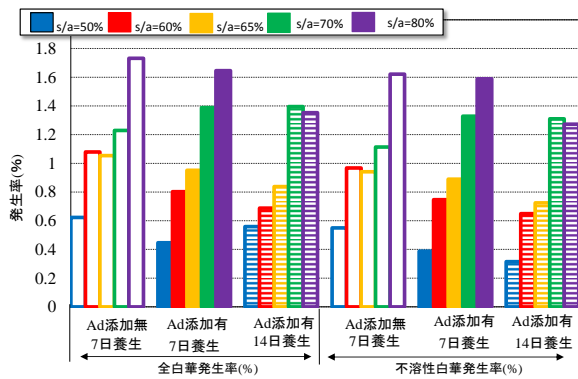


図-14 浸漬14日における白華発生率

写真-1 表面性状および白華発生状況

細骨材率(%)	50	65	80
供試体表面層部の表面性状			
浸漬7日における白華発生状況			
充填率(%)	88.2	87.0	82.32
白華発生率(%)	0.12	0.21	0.62

*白枠:白華発生部分 表面性状 5mm以上の空隙を確認→良好ではないと判断

および不溶性白華発生率の結果を示す。白華発生率は充填率の違いによって大きく異なり、充填率が低くなるほど、白華発生率は高い値を示した。また、材齢14日で設計基準強度の24N/mm²以上を満足する充填率の86%を基準とした場合、全白華発生率は全体の白華発生率の半分以下まで低減できることが分かった。図-14より、混和剤無添加の配合に対し、混和剤を添加した配合は、全白華発生率が低い傾向にある。これは、混和剤を添加することによって充填率が向上しコンクリートの内部空隙率が小さくなることにより、水分の逸散水量が減少し白華発生率の低下に繋がったと考えられる。この傾向は、不溶性白華発生率についても同様であった。養生日数については、7日間の養生を行った場合と14日間の養生を行った場合では、白華発生率に差がみられ、14日間養生を行った配合の方が白華発生率は低くなった。これは、養生期間が長くなることで、コンクリートの内部構造が緻密化し、水分の逸散水量が減少することによって白華発生率が減少したためだと考えられる。

写真-1に各配合条件の供試体の表面性状、白華発生状況を充填率や全白華発生率とともに示す。供試体の表面

性状は、s/a=50で空隙が確認されたが、s/a=65以上を確保することで表面性状が良好になることを確認した。また、圧縮強度と白華発生率は、充填率を86%以上確保することにより白華発生率を50%以下に抑制でき、材齢14日の圧縮強度も設計基準強度を満たすことが確認できたことから、本検討においてはW/C=30%、W=100kg、s/a=65%が本検討条件を満足できる配合と言える。

以上から、本研究の対象とした即時脱型コンクリート製品と使用材料においては、充填率を86%以上確保することによって、表面性状や設計基準強度を満たし、白華抑制効果を期待できる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 即時脱型コンクリート用混和剤を用いることで、型枠内への充填性が改善される。しかし、配合の細骨材率が高くなるにつれ、それらの改善効果が小さくなる。
- (2) 河川用の環境保全積ブロックを対象とした即時脱型コンクリート製品のコンシステンシーの評価は、加圧振動締めを適切に付与することにより、充填率を定量的に評価できる。
- (3) 充填率は、圧縮強度や全白華発生率と強い相関性があり、本研究の対象とした即時脱型コンクリート製品と使用材料においては、充填率を86%以上確保することによって表面性状や設計基準強度を満たし、白華抑制効果を期待できる。

5. 参考文献

- 1) 國府勝郎, 上野敦: 締めめ仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.109-118, 1996.2
- 2) 國府勝郎, 牛島栄, 森博嗣: 委員会報告「超固練りコンクリート研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.1, pp.29-38, 1998
- 3) 大和功一朗, 丸屋英二, 竹村剛, 山地功二: 即時脱型製品に発生する白華抑制に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.507-512, 2008
- 4) 長尾敏之, 橋本親典, 平塚和男, 橋本紳一郎: 即脱成型平板の白華試験方法に関する実験的検討: コンクリート工学会年次論文集, Vol.28, No.1, pp.263-268, 2006
- 5) 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