

論文 材料条件の違いが即時脱型コンクリートの充填性と硬化特性に及ぼす影響

日高 翔太*1・橋本 紳一郎*2・山本 康雄*3・山下 龍二*4

要旨:本研究では細骨材の種類や粒度, 表面水の状態が即時脱型コンクリート製品の充填性やその他の性状に及ぼす影響について検討した。その結果, 実積率の低い細骨材を用いた場合, 充填性や圧縮強度が低下することを示した。また, 物理的性質の異なる細骨材を用いた場合においても充填率を確保することによって, 目標強度や曲げ強度, 表面性状を満たし白華抑制効果を満足できることを示した。更に, 表面水率の補正を適切に行うことで, 即時脱型コンクリート製品の充填性や強度への影響はないことを確認した。

キーワード: 即時脱型コンクリート, 充填性, 圧縮強度, 白華現象, 表面水率

1. はじめに

近年, 施工現場においては生産性向上の観点からプレキャスト製品の適用機会が増加し, それに伴い製造工場の製品の出荷も増加してきている。プレキャスト製品の中で, 即時脱型コンクリート製品は加圧振動締固め後に即時に脱型できるため, 製品を短期間で大量に製造し, 出荷することができる利点がある。しかし, 即時脱型コンクリートは, 製造時においてゼロランプの状態であるため, 通常のコンクリートのようなスランプ試験ではコンシステンシーを適切に評価できない。これらに対して, 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, コンクリート製品としての高い性能を満足できる配合よりも製品の外観を重視する等の独自の評価を行う傾向にある。そのため, 目標強度を満足できない場合や充填性状が著しく悪く製品の一部に欠けが生じる場合, 充填不足により製品の表層部に白華現象が顕著に表れる場合がある。

これらに対して, 著者ら³⁾は河川用環境保全積ブロックの即時脱型コンクリート製品を対象とし, 充填性と圧縮強度, 白華抑制効果, 美観性の関係をフレッシュ性状および硬化後の特性により検討した。その結果, 充填性や圧縮強度, 白華抑制効果, 美観性の要求性能を満たす配合とその際の充填率の指標も示した。しかし, これらの検討は充填性と他の要求性能との関係を明らかにするため, 単一材料で検討しているため, 使用材料の影響までは検討できていない。特に, 既往の文献²⁾にも示さ

れている即時脱型コンクリート製品の推奨される細骨材率は通常のコンクリートより高く, 単位細骨材量が多いため, 細骨材の種類や物理的性質の影響を大きく受ける可能性がある。単位細骨材量が多いことは細骨材の表面水の影響も大きく受ける可能性があるが, ゼロランプの状態であるため, 細骨材の表面水を頻繁に確認しない限り, 製造時に表面水の変動に気付くことは困難である。また, それら細骨材の種類や表面水の変動が充填性やその他の性状に及ぼす影響は明確にされていない。

そこで, 本研究では, 使用材料の中でも細骨材の種類や粒度, 表面水の状態が即時脱型コンクリート製品の充填性やその他の性状に与える影響を検討した。

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 日における目標強度は 21N/mm² 以上である。本稿では, 即時脱型コンクリートに対する実験的研究として 2 つのシリーズで検討した。シリーズ 1 では, 使用骨材の違いが即時脱型コンクリートの充填性や硬化後の特性に及ぼす影響の検討を行った。シリーズ 2 では, 細骨材の表面水の違いが即時脱型コンクリートの充填性や硬化後の特性に及ぼす影響について検討を行った。本稿で検討したのは, 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, 美観性の 4 項目を満足する配合である。

2.1 使用骨材の違いが即時脱型コンクリートの充填性や硬化後の特性に及ぼす影響(シリーズ 1)

2.1.1 使用材料およびコンクリート配合

シリーズ 1 で使用した骨材を表-1, 骨材の粒度分布を図-1, コンクリート配合を表-2 に示す。セメントは全て

*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

普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリート配合は、即時脱型コンクリートの充填性、目標強度、美観性や白華抑制を満足する配合³⁾を参考に単位水量、単位セメント量や細骨材率、即時脱型コンクリート用混和剤の添加量を一定とした。その中で、使用材料の違いが充填性やその他の性状に与える影響を検討するため物理的性質および粒度の異なる細骨材を用いた計 6 配合で検討した。配合 No.1 (S1 および S3 を使用)、No.2 (S1 および S2 を使用) では海砂および砕砂の単位細骨材量の比を 4:6、No.3 (S1 および S2 を使用) では 3:7 とし粒度の調整を行った。

2.1.2 試験項目および試験方法

(1) 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。

(2) 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 (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 1, 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。

(3) 簡易曲げ強度試験

圧縮強度試験と同様の供試体を作製し、簡易曲げ強度試験を行った。既往の文献⁴⁾を参考に、支点での破壊を防止するため V 字型 (90°) の載荷装置を使用した。また、支点と供試体端部との距離を長くして支点破壊を防止するため、支点間距離を 160mm とした。円柱供試体の中央集中載荷試験による曲げ強度 σ_b (N/mm²) の計算方法を式(1)、試験状況を図-2 に示す。

$$\sigma_b = \frac{8Pl}{3.14d^3} \quad (1)$$

ここで、 σ_b : 曲げ強度 (N/mm²)、P: 供試体破壊時の荷重 (N)、l: スパン長 (mm)、d: 供試体の直径 (mm)

(4) 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 1 および 2 週とし、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。

表-1 使用材料

記号	使用材料	物理的性質
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: 3.16g/cm ³
S1	海砂	表乾密度: 2.58g/cm ³ , FM2.42, 実積率: 63.8%, 吸水率: 0.50%
S2	砕砂	表乾密度: 2.69g/cm ³ , FM3.50, 実積率: 65.2%, 吸水率: 2.63%
S3	砕砂	表乾密度: 2.59g/cm ³ , FM2.36, 実積率: 64.8%, 吸水率: 1.60%
S4	山砂	表乾密度: 2.56g/cm ³ , FM2.74, 実積率: 62.3%, 吸水率: 2.0%
S1:S3 (4:6)	海砂: 砕砂	表乾密度: 2.58g/cm ³ , FM2.42, 実積率: 64.0%, 吸水率: 1.79%
S1:S2 (4:6)	海砂: 砕砂	表乾密度: 2.68g/cm ³ , FM2.87, 実積率: 64.0%, 吸水率: 1.85%
S1:S2 (3:7)	海砂: 砕砂	表乾密度: 2.67g/cm ³ , FM3.02, 実積率: 64.2%, 吸水率: 1.68%
G1	砕石 1505	表乾密度: 2.69g/cm ³ , 実積率: 60.7%, 吸水率: 1.35%
G2	砕石 1305	表乾密度: 2.81g/cm ³ , 実積率: 59.2%, 吸水率: 1.12%
Ad	即時脱型コンクリート用混和剤	主成分: 非イオン系界面活性剤, 密度: 1.01g/cm ³

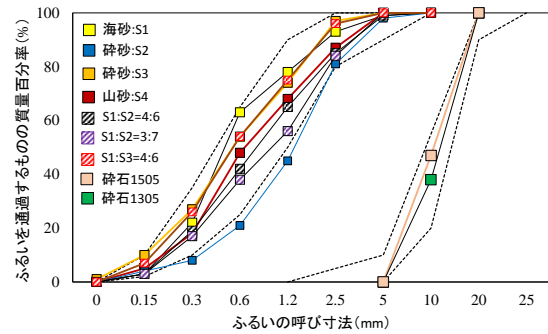


図-1 骨材の粒度分布

表-2 コンクリート配合 (シリーズ 1)

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								Ad (%)		
			W	C	S1	S2	S3	S4	G1	G2			
1	30	65	100	333	533	-	802						C×0.2
2					533	839							
3					400	979							
4					-	1399				748			
5					1332								
6					-					1322			

表-3 コンクリート配合 (シリーズ 2)

表面水率の補正	骨材の含水状態	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad (%)
				W	C	S1	S2	G1	
あり	絶乾	30	65	100	333	533	839	748	C×0.2
	表乾								
	湿潤								
なし	絶乾								
	湿潤								

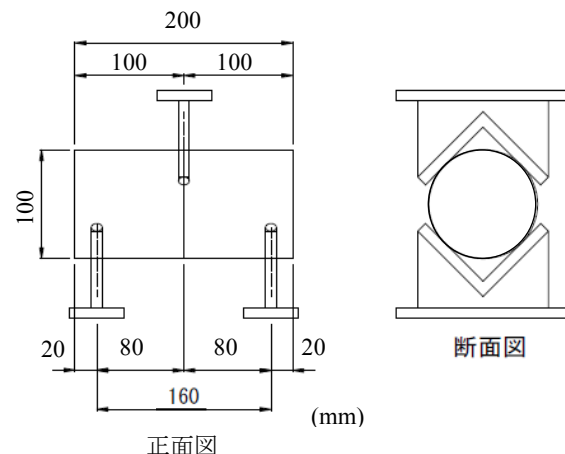


図-2 簡易曲げ強度試験 (載荷装置)

(a).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。

(b).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。

(c).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付着供試体の質量増加率を算出する。

(d).供試体の表面についた可溶性成分を水道水で5秒程度洗い流す。

(e).供試体を絶乾状態にし、可溶性白華除去供試体の質量増加率を測定する。浸漬日数は91日までとし7日毎に測定を行った。全白華付着供試体の質量増加率および可溶性白華除去供試体の質量増加率には(2)、(3)式より算出した。本稿では、浸漬日数2週までの結果を報告する。

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

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

ここで、 $W_{全}$ ：全白華付着供試体の質量増加率(%), $W_{不}$ ：可溶性白華除去供試体の質量増加率(%), W_1 ：白華発生前供試体の質量(g), W_2 ：全白華付着供試体の質量(g), W_3 ：可溶性白華除去供試体の質量(g)

なお、これらの質量変化は析出物そのものの質量とは必ずしも一致しないが、白華の相対的な評価は可能と考えるものとした。

2.2 細骨材の表面水の違いが充填性や硬化後の特性に及ぼす影響(シリーズ2)

2.2.1 使用材料およびコンクリート配合

シリーズ2では、表-1に示すS1, S2の2種類の骨材を使用した。コンクリート配合を表-3に示す。シリーズ1の配合No.2に対して、細骨材の含水状態を湿潤状態(以降、湿潤)、表面乾燥飽水状態(以降、表乾)、絶対乾燥状態(以降、絶乾)の3水準に設定し、また表面水率の補正有無の比較を含めた計5配合で検討した。なお、目標表面水率は湿潤状態で $5.5 \pm 0.5\%$ 、表乾状態で $0 \pm 0.3\%$ の範囲と定めた。絶乾状態に関しては、骨材を 100°C の乾燥機で24時間乾燥させ、密閉容器内で室温まで冷却した後、表面水率の測定を行った。また、絶乾状態については、24時間乾燥による表面水率が吸水率から計算される表面水率とはほぼ同等であった。

2.2.2 試験項目および試験方法

充填性の評価、品質確認試験として加圧振動締め試験、充填率および圧縮強度試験、簡易曲げ強度試験をシリーズ1と同様に行った。

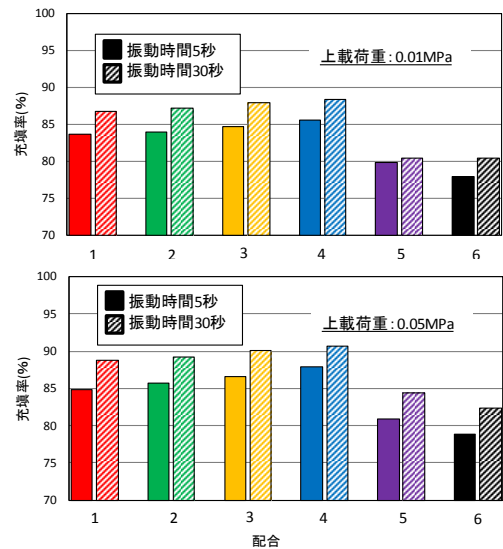


図-3 使用骨材の違いと充填率の関係

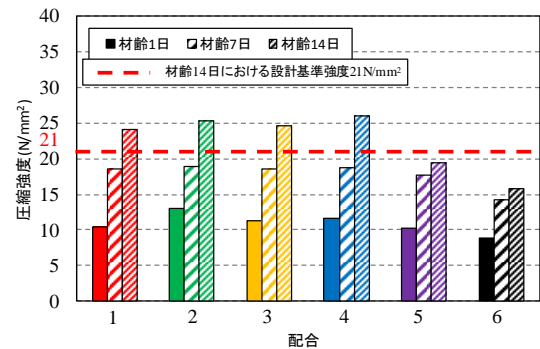


図-4 各材齢における圧縮強度試験結果

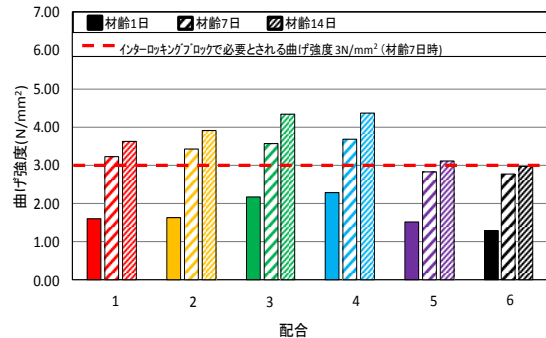


図-5 各材齢における簡易曲げ強度試験結果

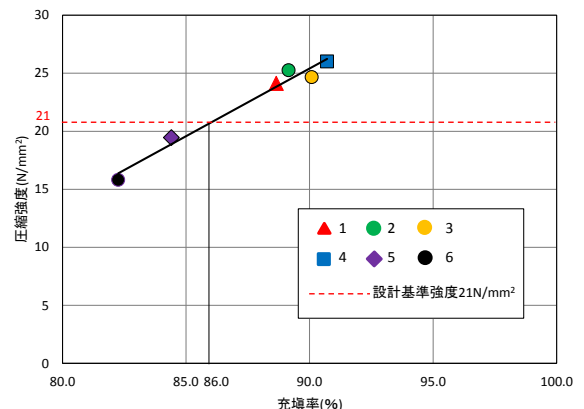


図-6 圧縮強度試験結果と充填率の関係

3. 結果および考察

3.1 使用骨材の違いが充填性や硬化後の特性に及ぼす影響(シリーズ 1)

図-3 に使用骨材の違いと充填率の関係を示す。上載荷重と振動時間に関わらず、配合 No.5, 6 の充填率は配合 No.1, 2, 3, 4 の充填率に比べて、低い傾向を示しており、使用する骨材条件により充填率は大きく異なることを確認した。既往の研究³⁾では、同配合条件で上載荷重：0.05MPa、振動時間：30秒で85%以上の充填率が得られており、同様に配合 No.1, 2, 3, 4 の充填率は85%以上であったが、配合 No.5, 6 の充填率は85%以下となった。配合 No.5, 6 は実積率の低い海砂(S1)と山砂(S4)を使用した配合であり、既往の報告⁷⁾で示されている普通コンクリートの細骨材の実積率とコンクリートの充填性状の結果と同様に即時脱型コンクリートの配合においても、細骨材の実積率の影響が大きいことを示し、また、粗粒率が高くなるにつれ充填率が増加する傾向を確認した。

図-4 に各材齢の圧縮強度、図-5 に各材齢の曲げ強度、図-6 に材齢 14 日における圧縮強度と充填率の関係を示す。圧縮強度と曲げ強度の各材齢で、配合 No.5, 6 の結果は配合 No.1, 2, 3, 4 の結果に比べて低く、充填率の影響を大きく受けた結果となった。特に、圧縮強度と曲げ強度の材齢 7 日以降の強度の伸びが小さく、材齢 14 日における目標強度：21N/mm²を満たさなかった。配合 No.1, 2, 3, 4 の 4 配合は、目標強度を満足した。即時脱型コンクリート製品の材齢 7 日における曲げ強度の規格値⁸⁾：3N/mm²を参考にした場合も、配合 No.1, 2, 3, 4 の 4 配合は曲げ強度の規格値を満たしたが、配合 No.5, 6 は規格値以下であった。材齢 14 日の圧縮強度と充填率に関しては、充填率が高くなるに従い、圧縮強度も増加する傾向を示した。また、充填率 86%以上を確保することにより、目標強度を満たすことができ、この結果は既往の研究結果³⁾と同様であった。

図-7 に養生期間の違いと白華発生率の関係、図-8 に白

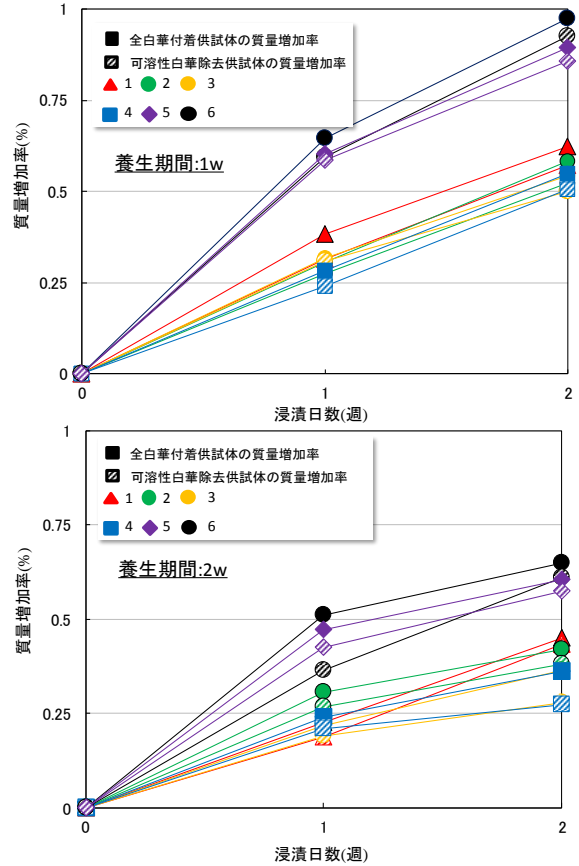


図-7 養生期間の違いによる白華促進試験結果

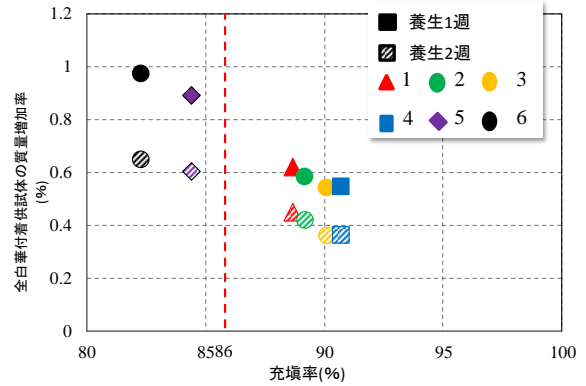


図-8 浸漬 2 週目における白華発生率と充填率の関係

表-4 表面性状と白華発生状況の関係

配合番号	1	2	3	4	5	6
供試体表層部の表面性状						
目視確認による表面性状の評価	○	○	○	○	○	○
養生期間1週間、浸漬期間2週目における白華発生状況						
充填率 (%)	88.7	89.2	90.1	90.7	84.4	82.3
全白華付着供試体の質量増加率 (%)	0.62	0.49	0.54	0.55	0.89	0.98

※表面性状5mm以上の空隙を確認⇒× 5mm以上の空隙が確認できない⇒○ 白枠：白華発生部分

表-5 細骨材の表面水の違いがフレッシュコンクリートおよび表面性状に与える影響

表面水率の補正の有無		あり			なし	
表面水の状態		絶乾	表乾	湿潤	絶乾	湿潤
実測表面水率 (%)	S1:海砂	-1.16	0.25	5.4	-1.16	5.42
	S2:砕砂	-1.41	0.025	5.84	-1.41	5.78
練混ぜ直後のフレッシュコンクリート						
作製した供試体の表面性状						

華発生率と充填率の関係を示す。養生期間に関わらず、配合 No.5, 6 は配合 No.1, 2, 3, 4 に比べ白華発生率が高く、浸漬 1 週目以降においてその差は顕著に表れた。養生期間の違いでは、養生 1 週目に比べ、養生 2 週目の場合は全白華付着供試体の質量増加率が低くなった。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、浸漬時の上面からの逸散水量が減少したためだと考えられる。白華発生率と充填率に関しては、養生期間に関わらず、充填率が高くなるに従い、白華発生率は低くなる傾向を示した。また、充填率 86% を基準とした場合、配合 No.2 は配合 No.6 に比べて全白華付着供試体の質量増加率を半分以下まで低減できることを確認した。

表-4 に各配合の供試体の表面性状、白華発生状況を充填率や全白華付着供試体の質量増加率とともに示す。各配合の表面性状は何れも良好であり、大きな空隙や表面への粗骨材の顕在化などは見られなかった。また、白華促進試験で切断した供試体の切断面を比較した場合、配合 No.5,6 は配合 No.1, 2, 3, 4 に比べ空隙が多くみられた。このことから充填率の低い配合 No.5, 6 は供試体表層部ではなく、供試体内部に多く存在した空隙により圧縮強度や曲げ強度が低く、白華発生率が高くなったと考えられる。配合 No.5, 6 は実積率の低い海砂 (S1) と山砂 (S4) を使用した配合であったことから、普通コンクリートに比べて単位骨材量が多い即時脱型コンクリートの配合設計においては、細骨材の実積率など物理的性質を考慮し、充填率 86% 以上を確保できるように単位セメント量の調整などの対応が必要となる。

3.2 細骨材の表面水の違いが充填性および硬化後の特性に及ぼす影響(シリーズ 2)

表-5 に表面水率の状態および補正の有無と練混ぜ直後のフレッシュコンクリートおよび供試体の表面性状の関係、図-9 に表面水率の状態および補正の有無と充率の関係を示す。表面水率の補正を行った場合、表面水率の状態

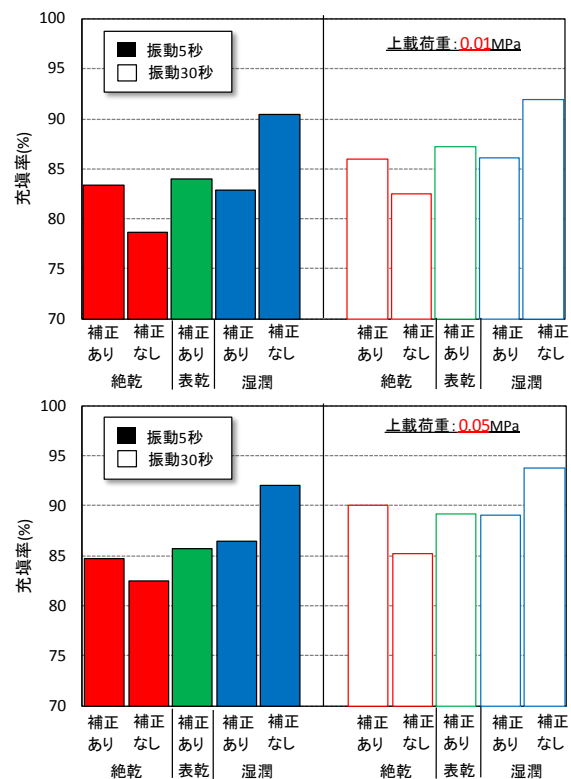


図-9 表面水率の違いによる加圧振動締固め試験結果

に関わらず、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートの状態や供試体の表面性状に違いは見られなかった。充填性についても表面水率の状態に関わらず、充填率は同程度の値を示し、大きな違いは見られなかった。表面水率の補正を行わなかった場合の練混ぜ直後のフレッシュコンクリートの状態や供試体の表面性状について、絶乾は表面水率の補正を行った場合と大きな違いは見られなかった。湿潤については、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートのモルタルに水気を多く含んだ状態であり、その影響により型枠から脱型する際の転写性が悪く、供試体の表面に空隙は見られなかったが、ペースト分の塊が荒々しく見られた。充填性について、上載荷重と振動時間に関わらず、表面水率の補

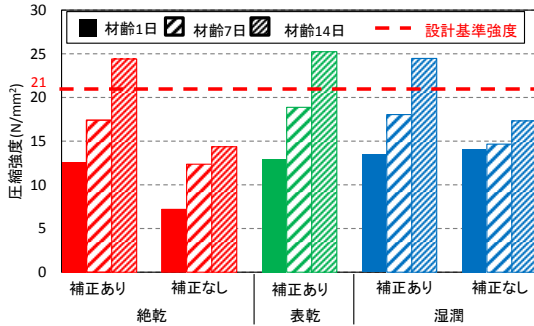


図-10 各材齢による圧縮強度試験結果

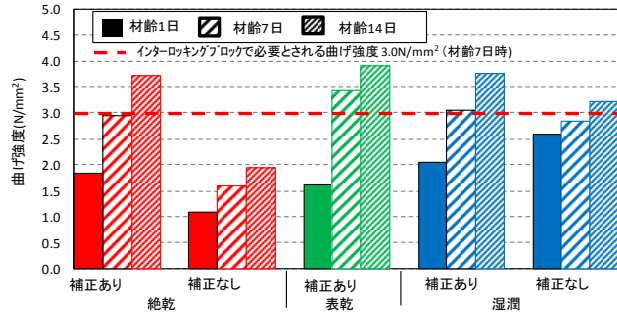


図-11 各材齢による曲げ強度試験結果

正を行った場合に比べ、絶対乾の充填率は低くなり、湿潤の充填率は高くなる傾向を示した。

図-10 に表面水率の状態および補正の有無と各材齢の圧縮強度の関係、図-11 に各配合における曲げ強度試験結果を示す。表面水率の補正を行った場合の圧縮強度と曲げ強度は、表面水率の状態に関わらず、各材齢で同程度の強度を示し、材齢 14 日における目標強度：21N/mm²、プレキャストコンクリート製品の材齢 7 日における曲げ強度の規格値⁸⁾：3N/mm²を満たした。表面水率の補正を行わなかった場合、表面水率の補正を行った場合に比べ、各材齢の圧縮強度や曲げ強度は低く、目標強度や曲げ強度の規格値を下回った。また、湿潤より絶対乾の強度が低くなる傾向を示した。これは、絶対乾の充填率が最も低かったこと、湿潤の充填率は他の結果に比べて高くなったが、単位水量が増えたことにより強度が低下したと考えられる。

以上から、即時脱型コンクリートは、ゼロランプであるため、練混ぜ直後のフレッシュコンクリートの状態で細骨材の表面水率の変動に気づくことは困難であるが、表面水率の補正を適切に行うことにより、表面水率の状態に関わらず、充填率や強度への影響はほとんどない。しかし、細骨材の表面水率の変動に気づかなかった場合や表面水率の補正を適切に行わなかった場合、絶対乾では充填率と強度の低下、湿潤では強度の低下に影響する。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 使用する骨材条件によって即時脱型コンクリートの充填率は大きく異なり、実積率が低い細骨材を用いた場合において充填率や強度の低下がみられた。
- (2) 細骨材の種類や物理的性質の大きく異なる細骨材を用いた場合でも、充填率を 86%以上確保することによって目標強度、曲げ強度や表面性状を満たし、白華抑制効果を満足することができる。

- (3) 細骨材の表面水率の補正を適切に行うことにより、表面水率の状態に関わらず、充填率や強度への影響はほとんどない。しかし、表面水率の補正が適切に行われなかった場合、絶対乾状態では充填率と強度の低下、湿潤では強度の低下がみられる。

5. 参考文献

- 1) 國府勝郎, 上野敦: 締固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, No532/V-30, pp.109-118, 1996, 2
- 2) 國府勝郎, 牛島栄, 森博嗣: 委員会報告「超硬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報告集, Vol.20, No.1, pp.29-38, 1998
- 3) 日高翔太, 橋本紳一郎, 山本康雄, 山下龍二, 即時脱型コンクリート製品の配合に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017
- 4) 天明敏行, 尾原祐三, 力石佑也, 齋藤淳: 水平打継目の円柱供試体による曲げ強度試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1333-1338, 2013
- 5) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.263-268, 2006
- 6) 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
- 7) 土木学会: コンクリートライブラリー145号, 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針, 資料 pp.56-62, 2016,
- 8) インターロッキングブロック舗装技術協会: インターロッキングブロック舗装設計施工要領, pp.68-70, 2000, 7