

論文 普通ポルトランドセメントを用いた超早期交通開放型舗装コンクリートについて

森澤 勝弘*1・松本 明*2・谷口 恵一*3・島 弘*4

要旨: 1 DAY PAVE に使用するセメントの種類は、早強ポルトランドセメントを使用する 경우가多いが、汎用的とは言い難い。そこで、汎用的な普通ポルトランドセメントを用いた早期交通開放型舗装コンクリートについて、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子を主成分とした早強剤（C-S-H 系早強剤）を用いて実験を行った結果、水セメント比 35%で早強剤を単位セメント量の 5%使用した配合で、一般的な条件におけるセメント・コンクリート舗装の養生終了強度 3.5 N/mm² 以上を室内実験で約 11 時間、実機による試し練りで約 12～13 時間で確保できることを確認した。

キーワード: 超早期交通開放型舗装コンクリート, 普通ポルトランドセメント, C-S-H 系早強剤, 曲げ強度

1. はじめに

コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べて、長寿命・低ライフサイクルコスト・明色性等に優れているが、打設後の交通開放までの養生期間が長いことを主な理由にその利用頻度が少ない状況にある。そこでセメント協会舗装専門委員会では、今後増加する古いコンクリート舗装の補修に対応することを目的に、打設後 1 日で養生を終えることが可能な早期交通開放型コンクリート舗装（以下、1 DAY PAVE）を開発し現在に至っている。

1 DAY PAVE に用いるコンクリートには特殊な結合材や混和材料等を使用せず、セメントの種類は早強ポルトランドセメント（以下、早強セメント）を標準とすると「1 DAY PAVE 製造施工マニュアル」¹⁾に規定されている。また、試験施工や施工事例で報告されている工事で使用されているのは、ほとんどが早強セメントである。この早強セメントは全ての生コン工場で常備してなく汎用的とは言い難い。そこで、本研究では、汎用的な普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント）の適用に当たって、早期強度確保が可能な混和材を用いてより早期に強度発現する舗装コンクリートの検討を行うこととした。

普通セメントを用いた 1 DAY PAVE コンクリートで課題となるのは交通開放時期であるが、舗装工事での交通開放時期は舗装材料によって異なる。アスファルト舗装では、舗装表面温度が 50℃以下となる時²⁾と規定されており、一般的には施工終了後から 2～3 時間程度である。一方、コンクリート舗装では、現場養生供試体の強度を試験によって確認し、一般的な条件では曲げ強度が 3.5 N/mm² 以上となる時期とされ、試験によらない場合で普通セメントを用いる場合は 2 週間とされている³⁾。

本実験では、早期強度確保が可能な混和材料を用いて、1 DAY PAVE より早く養生終了強度が確保出来るコンクリート、具体的には午後にコンクリートを打設し、翌朝材齢 15 時間程度で養生終了強度が確保できる舗装コンクリート（ここでは、超早期交通開放型舗装コンクリートと表す）の開発を目指すこととした。

2. 混和材の選定

2.1 早期強度確保が可能な材料の選定

実験を進めるにあたって文献等で早期強度確保が可能な材料を調査し、一般的な生コンクリート工場で利用可能で汎用的であることを重要視して、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子を有効成分とした早強剤（以下、C-S-H 系早強剤と称す）とエトリンガイトを早期に生成させ高強度を発現させる効果のある混和材（以下、高強度用混和材と称す）の材料を選定した。

2.2 C-S-H 系早強剤

数十～数百 nm の粒子サイズである C-S-H 系のナノ粒子を液体中へ安定的に分散させた懸濁液（サスペンション）で、外観は白色の液体で一般的な混和剤よりもやや高い粘性を有している。セメントの水和反応メカニズムは、コンクリートの液相中に C-S-H ナノ粒子を直接導入させるため、ナノ粒子が水和生成のための結晶核として作用し、セメントからのイオンの溶出による結晶核の生成を待たずに C-S-H の成長が可能となり、水和が促進されると考えられる⁴⁾。C-S-H 系早強剤は、一般的な強度領域から超高強度領域のコンクリートに適用できる。また、蒸気養生するプレキャストコンクリートの生産性向上に寄与して利用されている。

*1 高知県生コンクリート工業組合（正会員）

*2 (株)ビルドベース 中芸生コンクリート工場

*3 室戸菱光コンクリート(株)

*4 高知工科大学 大学院工学研究科基盤工学専攻教授 工博（正会員）

2.3 高強度用混和材

粉体の無機質混和材で、コンクリートの組織に微細な結晶であるエトリンガイト ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) を早期に生成させて組織を緻密にして高強度を発現させるもので、特に高い圧縮強度が要求される分野、例えば高強度プレストレストコンクリート杭などで利用されている。

3. モルタルによる予備実験

3.1 実験の概要

予備実験1として、セメントの物理試験で用いるモルタルに前述のC-S-H系早強剤と高強度用混和材を使用し、早強セメントとの比較を行った。次に予備実験2として細骨材を標準砂から石灰砕砂に変更し、水セメント比を40%としC-S-H系早強剤を使った配合で強度発現を確認した。さらに予備実験3として、材齢24時間以内の強度発現状況を確認した。なお、予備実験ではモルタルミキサを用いてJIS R 5201（セメントの物理試験方法）の試験方法で練り混ぜ、 $40\times40\times160\text{mm}$ 供試体を成型し、温度 $20\pm1^\circ\text{C}$ 、湿度90%以上が確保できる恒温湿潤養生装置を用いて養生した。以上の予備実験でコンクリートの配合設計に必要な諸条件を見極め、コンクリートによる室内実験および実機試験を実施した。

3.2 予備実験1の結果

室内実験によって早期に強度を確保する材料として、

表-1 予備実験1のモルタル配合

配合No	セメント種類	モルタル配合 (g)			早強剤・混和材使用量 C×%	フロー mm
		C	標準砂	水		
—	H	450	1350	225	—	170×165
1	N				1	179×171
2					3	198×195
3					5	244×231
4					10	180×175
5		1270.8	20	180×180		

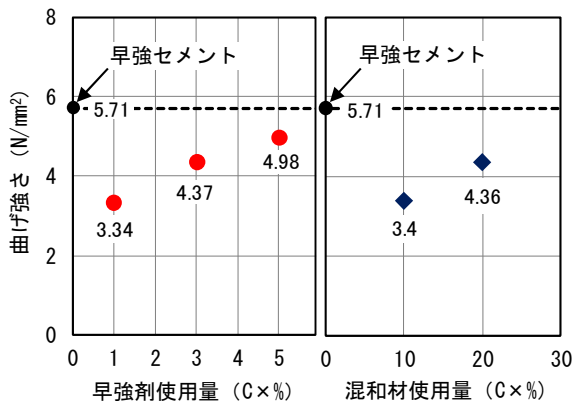


図-1 材齢1日の曲げ強度試験結果

C-S-H系早強剤と高強度用混和材を使用し、JIS R 5201

（セメントの物理試験方法）の標準砂を用いて表-1に示す配合で材齢1日の曲げ強度を確認した。なお、表-1の配合No.1~No.3にはC-S-H系早強剤を水量の一部として使用し、配合No.4およびNo.5は粉体の混和材である高強度用混和材を標準砂の内割置換し使用した。

予備実験1での曲げ強度試験結果を図-1に示す。結果は、いずれの配合においても早強セメントの曲げ強度 5.71 N/mm^2 を下回った。

3.3 予備実験2の結果

予備実験1の結果から、高強度混和材よりもC-S-H系早強剤の方が早期強度発現に優れていると判断した。モルタル配合を 1m^3 配合に変更し、水セメント比を40%とし、細骨材に実験協力工場で使用している石灰砕砂を用いて、C-S-H系早強剤の使用量をセメント量の3%および5%で材齢1日の曲げ強度を確認した。

結果を表-2に示すが、細骨材を標準砂から石灰砕砂に変更し、水セメント比を40%とすることによって目標とする早強セメントの曲げ強度 5.71 N/mm^2 を上回ることができた。なお、表-2のACXはC-S-H系早強剤を示している。

表-2 予備実験2のモルタル配合

早強剤使用量 C×%	W/C %	単位量(kg/m³)				フロー mm	曲げ強度 N/mm²
		W	C	S	ACX		
3	40	265	663	1335	19.89	162×159	6.21
5	40	255	638	1354	31.90	189×184	7.22

3.4 予備実験3の結果

水セメント比40%のモルタル配合で細骨材に石灰砕砂と海砂（四万十町志和沖産）を用いて、C-S-H系早強剤の使用量をセメントの量の5%とし、材齢を15時間、18時間、21時間および24時間として曲げ強度を確認した。

モルタル配合とフローを表-3に、各材齢における曲げ強度の試験結果を図-2に示す。結果は、両者に明らかな違いが認められ、単位水量は海砂配合が 25 kg/m^3 多くなり、曲げ強度は石灰砕砂配合が全ての材齢において大きい傾向を示した。一般に石灰石骨材を用いたコンクリートは、骨材とセメントペーストとの付着が良いことから強度の発現が良好であることが知られており、この

表-3 予備実験3のモルタル配合

細骨材種類	W/C %	単位量 (kg/m³)				早強剤使用量	フロー mm
		W	C	S	ACX		
石灰砕砂	40	255	638	1370	31.9	5%	179×171
海砂		280	700	1253	35.0		200×194

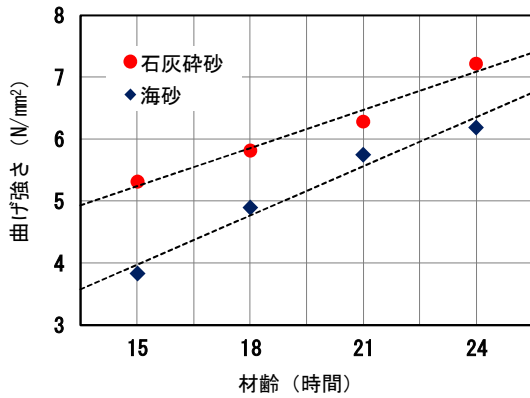


図-2 石灰砕砂および海砂の曲げ強さ

影響が考えられる。

以上のモルタルによる室内予備実験で材齢 24 時間以内の曲げ強さの傾向が確認できた。

4. コンクリートによる実験

4.1 実験概要

予備実験の結果より、普通セメントに C-S-H 系早強剤を使ったモルタルで早強セメント以上の強度を確保できることが確認できたことから、粗骨材に石灰砕砂を使用した配合とし、早期に交通開放が可能なコンクリートの室内実験を行なった。

4.2 使用材料と試験項目

コンクリートの実験に使用した材料を表-4 に、試験項目および試験方法を表-5 に示す。なお、コンクリートの練り混ぜは、容量 60L の強制 2 軸型試験練りミキサを用いて、全材料投入後 90 秒間練り混ぜた。

4.3 実験結果

(1) フレッシュコンクリート

水セメント比別の決定配合とフレッシュコンクリートの試験結果を表-6 に示す。また、各配合におけるスランプ試験後の状態を図-3 に示す。

配合 No.1 および No.2 は、アジテータトラックでの運搬を考慮し、目標スランプを 15~18cm、目標空気量を

表-4 使用材料

材料	記号	種類及び物理的性質
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16 g/cm³)
細骨材	S1	中土佐町加江崎沖産海砂(密度:2.58 g/cm³)
	S2	高知市春野町産石灰砕砂(密度:2.67 g/cm³)
粗骨材	G1	南国市白木谷産石灰砕石1505(密度:2.69 g/cm³)
	G2	南国市白木谷産石灰砕石2010(密度:2.69 g/cm³)
混和剤	AD	AE減水剤 高機能タイプ(リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体)
AE剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
早強剤	ACX	カルシウムシリケート水和物(C-S-H)のナノ粒子

表-5 試験項目及び試験方法

試験項目	内 容	試験方法
ブリーディング試験	内径250mm内高285mm専用容器	JIS A 1123
温度履歴	φ100×200mm簡易型枠	データロガーで5分間隔で測定
凝結試験	内径150mm内高150mmの金属製円筒	JIS A 1147
曲げ強度	100×100×400mm型枠	JIS A 1106

曲げ強度試験以外は、W/C40%配合のみ実施

4.5%として実施した。配合 No.2 では C-S-H 系早強剤をセメント量の 5%使用することにより、No.1 配合より単位水量を 24kg/m³ 少なくすることが出来た。

配合 No.3 および No.4 では、水セメント比 40%では目標とする強度が得られなかったために、水セメント比を 35%および 37%と小さくして実施した。水セメント比を小さくすることにより、単位セメント量が多くなり、粘性が高くなることが想定されたが、スランプ 23cm でフロー40cm 前後の中流動的な性状で十分扱えることを確認した。

表-6 配合とフレッシュコンクリートの試験結果

配合 No	W/C %	空気量 %	S/a %	単位量 (kg/m³)						AD C×%	AE A※	ACX C×%	フレッシュ性状			
				W	C	S1	S2	G1	G2				スランプ cm	空気量 %	温度 °C	フロー cm
1	40	4.5	42.1	186	465	271	419	484	484	0.90	4.5	—	14.0	4.5	23.0	—
2	40	4.5	45.9	162	405	315	489	484	484	0.60	13	5	18.0	4.5	23.0	—
3	37	4.5	45.9	162	438	310	481	476	476	0.70	8.5	5	23.0	4.9	19.0	43×41
4	35	4.5	45.2	162	463	302	467	476	476	0.80	10	5	23.0	4.0	19.0	40×38

※AE剤は、C×0.01%を1Aとして表す。

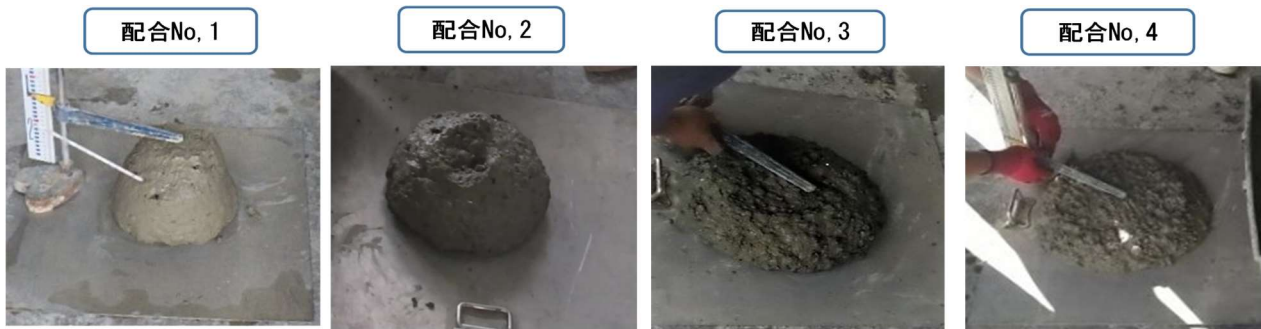


図-3 各配合のスランプ試験後の状態

(2) ブリーディング

水セメント比 40% の No.1 配合と C-S-H 系早強剤を使用した No.2 配合のブリーディング試験結果を図-4 に示す。既往の研究⁴⁾では、C-S-H 系早強剤を添加することによりブリーディング量は低減し、ブリーディングが停止する時間も早まる傾向にあるとされているが、図-4 に示すように、今回の実験では No.2 配合はブリーディング水が発生しなかった。単位水量が少なく、水セメント比が小さい等の影響が考えられる。

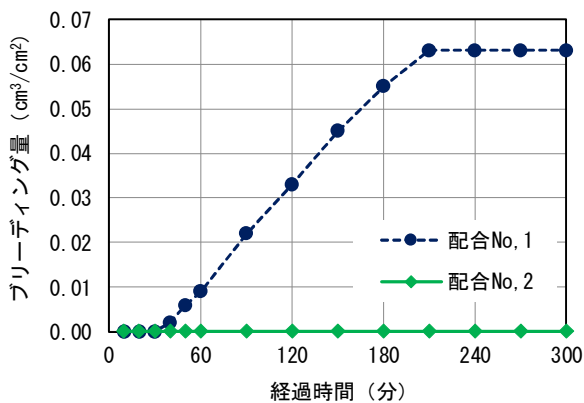


図-4 ブリーディング試験結果

(3) 凝結時間

水セメント比 40% の No.1 配合と C-S-H 系早強剤を使用した No.2 配合の凝結時間の測定結果を図-5 に示す。

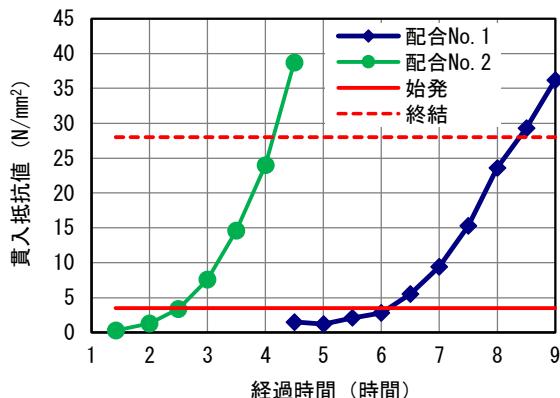


図-5 凝結時間の測定結果

C-S-H 系早強剤を添加することによって、コンクリートの凝結時間は No.1 配合よりも始発で 3 時間 40 分、終結で 4 時間 15 分早くなった。これは C-S-H 系早強剤の水和反応速度に起因すると考えられる。

(4) 温度履歴

水セメント比 40% の No.1 配合と C-S-H 系早強剤を使用した No.2 配合の温度履歴の測定結果を図-6 に示す。C-S-H 系早強剤を添加することによって、最高温度に達する時間は No.1 配合より約 5 時間早くなっている。これは既往の研究⁴⁾の C-S-H 系早強剤の添加によってセメント中の C₃S の反応が促進され、材齢初期以降の水和反応についても阻害されないことが影響していると考えられる。

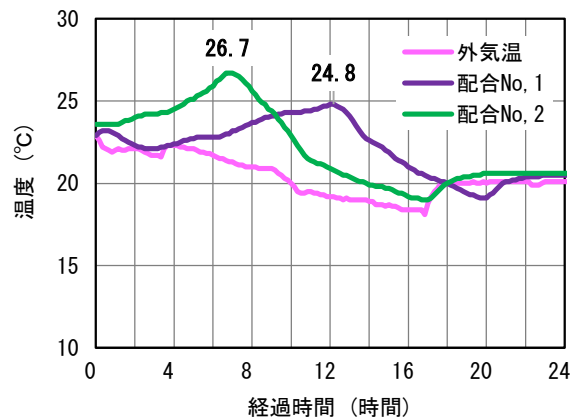


図-6 温度履歴の測定結果

(5) 曲げ強度

材齢 1 日以内の曲げ強度はコンクリート温度の影響が大きいと考えられるため、実験はコンクリート温度が 20°C 前後となる 5 月 (配合 No.1 と No.2) と 11 月 (配合 No.3 と No.4) に実施した。

材齢の基点は練り混ぜ開始時刻とし、材齢は 15 時間、18 時間、21 時間および 24 時間とした。また、供試体の脱型時期は、曲げ強度試験の 30 分前とした。

水セメント比別の曲げ強度の試験結果を図-7 に示す。また、図-7 の曲げ強度試験結果から算出した水セメン

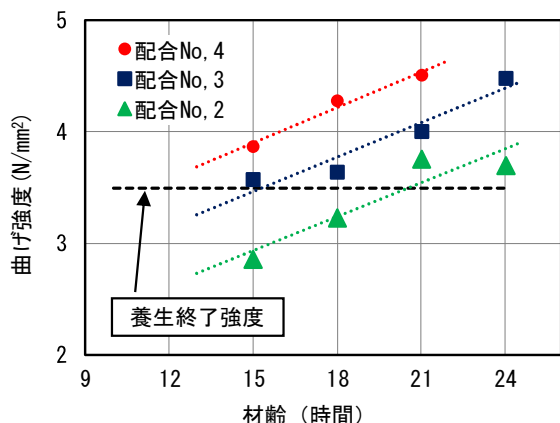


図-7 曲げ強度試験結果

表-7 曲げ強度と材齢の関係

W/C %	曲げ強度(y)と材齢(x)の関係式	相関係数	3.5N/mm ² に要する時間
40	$y = 0.10x + 1.41$	0.86	20.9
37	$y = 0.10x + 1.92$	0.91	15.8
35	$y = 0.11x + 2.30$	0.97	10.9

ト比別の曲げ強度と材齢の関係式を表-7に示す。曲げ強度と材齢の関係を線形関係式で表している。また、その関係式から養生終了強度 3.5 N/mm²に要する時間を算出した結果を表-7に示すが、養生終了強度 3.5 N/mm²に要する時間は水セメント比で大きく異なり、最短は水セメント比 35%配合の約 11 時間となった。

5. 実機試験

5.1 実機試験の概要

生コンクリート工場の実機によって試し練りを行ない、養生終了曲げ強度 3.5 N/mm²を確保できる時間を確認した。練り混ぜは、最大容量 2.25m³の強制二軸ミキサで 1.0m³を全材料投入後 60 秒間行った。

練り混ぜ直後の試料でブリーディング試験と凝結試験および曲げ強度試験用供試体を成型した。また、練り混ぜ完了後、アジテータ車 (4m³積み) に積み込み、30 分後および 60 分後の経時変化を確認した。

5.2 実機試験の配合

実機試験の配合を表-8に示す。水セメント比 35%に C-S-H 系早強剤を単位セメント量の 5%使用した配合で行った。基本的には室内実験の配合内容としたが、AE 剤

表-8 実機試験の配合

W/C %	S/a %	単位量 (kg/m ³)						AD C×%	AE A	ACX C×%
		W	C	S1	S2	G1	G2			
35	45.2	162	463	302	467	476	476	0.80	7	5

のみ 10A から 7A とした。

5.3 フレッシュコンクリートの試験結果

実機試験におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-9に示す。実機試験で行ったブリーディング試験では、室内実験と同様にブリーディング水は発生しなかった。また、凝結試験結果は始発時間が 2 時間 40 分、終結時間が 4 時間 5 分でこちらも室内実験とほぼ同じ結果であった。

表-9 フレッシュコンクリートの試験結果

試験項目	練り直後	30分後	60分後
スランプ (cm)	20.0	18.0	9.5
スランプフロー (cm)	31×30	29×28	—
空気量 (%)	4.0	7.4	5.5
コンクリート温度 (°C)	20.0	21.0	22.0
外気温 (°C)	18.0	19.4	21.0

フレッシュコンクリートの経時変化は、スランプの経時変化が大きい傾向を示したが、C-S-H 系早強剤の水和メカニズムから考えれば、スランプ低下のリスクはやむを得ないと考える。

5.4 曲げ強度試験結果

各材齢における曲げ強度試験結果を図-8に示す。曲げ強度試験を行う材齢は、養生終了強度を確保する材齢を室内実験結果から 11 時間前後と想定し、材齢 9 時間から適宜間隔を空けて行った。

曲げ強度は、コンクリート温度や施工時期の影響を受けるが、今回の実験では、養生終了曲げ強度 3.5 N/mm²を 13 時間で確保できることが分かった。

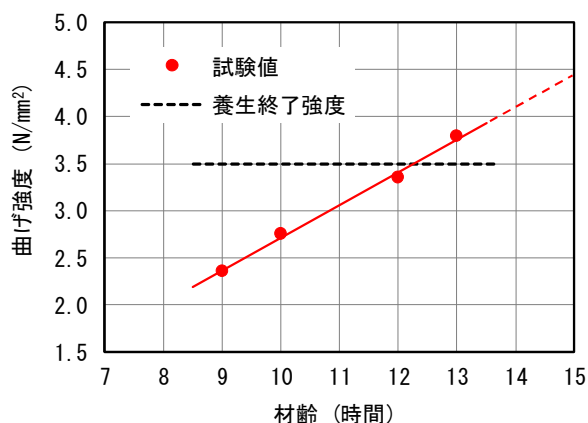


図-8 実機試験の曲げ強度試験結果

最後に、今回は目的として汎用的な普通セメントを用いて 1 DAY PAVE 以上、あるいはアスファルト舗装なみに早期に養生終了強度を確保できるコンクリートの開発を目指して実験を行なった。実験計画当初は、蒸気養生等による養生方法の工夫や急結材の利用も検討したが、

結果的に早期に強度を確保するためC-S-H系早強剤を使用した配合となった。このため1 DAY PAVE用コンクリートの一般的な特徴として、粘性が高く、単位水量が少ないため仕上げがしにくいと言われているが、今回の実験でもこの傾向は否めず、今後の課題と考える。なお、1 DAY PAVE 製造施工マニュアル第2版⁵⁾の普通セメントを用いた施工実施例によれば、材齢1日の曲げ強度は、事例No.8で4.17 N/mm²、事例No.15で3.57 N/mm²であり、今回の実験では図-8から15時間で4.4 N/mm²と推定され、1 DAY PAVEより早く養生終了強度が確保出来たと考える。

6. まとめ

1 DAY PAVEより早く交通開放出来るコンクリートとして、普通ポルトランドセメントと早期強度確保混和材を用いた超早期交通開放型舗装コンクリートの開発を目指して行った実験から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 普通ポルトランドセメントにC-S-H系早強剤を使用したモルタルでは、細骨材の種類により単位水量や曲げ強さに違いが見られた。
- (2) 普通ポルトランドセメントにC-S-H系早強剤をセメント量の5%使用することにより、室内実験および実機試験でも1 DAY PAVEより養生終了強度を早く確保できることを確認した。
- (3) 水セメント比35%配合での養生終了強度を確保できる時間は、コンクリートの練り混ぜ開始から約11～

13時間であった。

- (4) C-S-H系早強剤をセメント量の5%を使用した配合では、室内実験および実機試験のいずれもブリーディング水は発生しなかった。また、凝結時間はC-S-H系早強剤を使用しない配合より3～4時間早くなった。

謝辞：本研究は、JCI 四国支部「生コン技術力活性化委員会（第5期）」の活動の一環として行ったものである。なお、実験の実施に際し、(株)ビルドベース芸西生コンクリートの協力を頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) セメント協会：早期交通開放型コンクリート舗装 1 DAY PAVE 製造施工マニュアル第1版，2016
- 2) 日本道路協会：アスファルト舗装工事共通仕様書解説，丸善，pp.124，1992
- 3) 日本道路協会：セメント・コンクリート舗装要綱，丸善，pp.167，1964
- 4) 小山広光，井本晴丈，小泉信一，土谷正：C-S-H ナノ粒子を含有する早強剤の特性と効果について，コンクリート工学テクニカルレポート，Vol 53，No7，pp.614-621，2015.7
- 5) セメント協会：早期交通開放型コンクリート舗装 1 DAY PAVE 製造施工マニュアル第2版，2022