

論文 低温で打設し蒸気養生を行った早期脱型材配合コンクリートの物性

樋口 隆行^{*1}・グエン ドウック フーン^{*2}・庄司 慎^{*3}・富岡 茂^{*2}

要旨：早期脱型材を配合したコンクリートに関して、5℃での凝結性状や50℃蒸気養生後の物性を評価した。早期脱型材の添加によって5℃でも凝結が促進された。蒸気養生後の圧縮強度は、早期脱型材の添加率が高いほど高くなり、打設後4hr40minという短い蒸気養生サイクルで十分な脱型強度を確保でき、その後の長期強度も増進した。早期脱型材による結合材の水和促進とエトリンサイト生成量の増加が要因と考えられた。早期脱型材の添加によって適度な膨張ひずみが導入され、乾燥収縮ひずみも抑制された。早期脱型材の添加によって空隙率が減少して組織が緻密化しており、乾燥収縮ひずみの抑制に寄与していることが示唆された。

キーワード：蒸気養生, 早期脱型, 圧縮強度, 凝結, 膨張ひずみ, 乾燥収縮ひずみ, 耐久性

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品工場では、早期に脱型可能な強度を発現させ、型枠の回転率を向上させることで型枠の保有台数を減らし、高品質な製品を低コストで開発する検討が行われている^{1),2),3),4),5),6)}。しかしながら、気温の低い冬場は強度の発現に時間がかかるため、蒸気養生時間を長くしたり、蒸気養生温度を高くする必要がある。コストがかかるだけでなく、養生温度が高くなりすぎると、脱型直後にコンクリート表面から水分が逸散しやすくなり、表面の緻密性が損なわれる^{7),8),9),10)}。セメント中の硫酸アルカリ濃度が高い場合はDEF(Delayed Ettringite Formation)と呼ばれるエトリンサイトの遅延生成によってコンクリートが膨張破壊する場合もあり^{11),12)}、蒸気養生温度はなるべく低くすることが望ましい。

また、環境負荷低減の取組みとして、下水汚泥焼却灰や高炉スラグ微粉末といった副産物をセメントに置換したプレキャストコンクリート製品が増加している¹³⁾。しかし、これら副産物の初期水和活性はポルトランドセメントに比べて小さいものが多く、下水汚泥焼却灰はリンなどのセメントの水和遅延成分を含む。このため、早期に脱型を必要とするプレキャストコンクリートの製造では、凝結が遅延して表面仕上げのタイミングが遅れる場合や、脱型に必要な養生時間および温度が高くなり、一日に型枠を2回転させることが難しい場合がある。

本報では、5℃環境下で練り混ぜ、50℃程度の比較的低い温度で蒸気養生を施すことを想定し、エトリンサイト生成系の早期脱型材を添加したペーストの水和解析を行い、水和機構を調査した。また、副産物として下水汚泥焼却灰を配合したプレキャストコンクリートにおいて、凝結の促進や脱型に必要な強度を早期に確保することを目的に、エトリンサイト生成系の早期脱型混和材の効果と長期耐久性を検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の化学成分と物理的性質を表-1に示す。早期脱型材は、CaO, Al₂O₃, SO₃を主成分とするエトリンサイト生成系を用いた。下水汚泥焼却灰はP₂O₅を19.8%含有するものを、細骨材は新潟県姫川産川砂(表乾密度2.62g/cm³)、粗骨材は新潟県姫川産砕石(表乾密度2.64g/cm³, 最大寸法25mm)を用いた。混和剤(SP)には、ポリカルボン酸塩系の促進型高性能減水剤を用いた。

2.2 ペースト配合と成形

早期脱型材の基本的な性質を確認するため、ペーストを用いて水和解析を行った。早期脱型材を普通セメントに外割で7.5%配合し、水結合材比33%とした。練混ぜは20℃環境下で行なった。2×2×8cmの4連式型枠に充填し、角柱試験体を作成した。

表-1 使用材料

材料	化学成分(%)									密度 (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI		
普通セメント	64.3	5.3	20.1	2.9	2.2	0.25	0.37	-	3.0	3.13	3,500
下水汚泥焼却灰	11.0	15.1	38.2	5.4	1.1	1.19	1.90	19.8	2.7	2.63	7,700
早期脱型材	59.9	6.1	0.8	0.2	26.1	0.02	0.04	-	5.1	2.74	6,400

*1 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 グループリーダー (正会員)

*2 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部

*3 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 (正会員)

表-2 コンクリート配合

配合 No	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
				W	C	下水汚泥焼却灰	早期脱型材	細骨材	粗骨材	SP
1(Plain)	33.6	31.1	40.5	150	446	36	0	728	1081	4.8
2	33.6	29.9	40.5	150	446	36	20	720	1070	5.0
3	33.6	29.3	40.5	150	446	36	30	716	1064	5.1
4	33.6	28.7	40.5	150	446	36	40	712	1059	5.2
5	33.6	28.2	40.5	150	446	36	50	708	1052	5.3

2.3 コンクリート配合と成形

コンクリートの配合を表-2に示す。早期脱型材は骨材に置換して配合し、添加率を 0~50kg/m³ に設定した。練混ぜは 5℃環境下で行った。φ10cm×20cm の横型キャッププレス型枠を用いてコンクリートを振動成形した。

2.4 養生条件

ペースト、コンクリートともに、図-1に示す条件で蒸気養生を行った。練り混ぜた後、40min の前置時間を取った後、30min で 50℃まで昇温し、50℃で 3hr 保持した後、30min かけて冷却して脱型した。蒸気養生後の試験体は、温度 20℃の水槽で 2 次養生を行った。

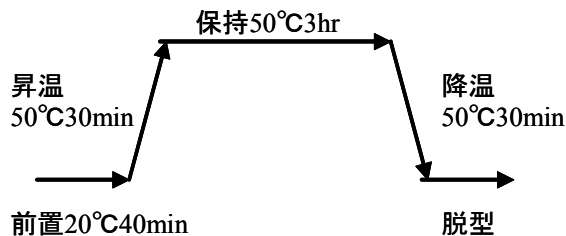


図-1 蒸気養生条件

2.5 ペースト試験体の分析

(1) 結合水量

早期脱型材の有無による水和挙動を比較するため、試験体を多量のアセトンを用いて水和停止し、アスピレーターで 20℃乾燥を行った試料について強熱減量を測定した。蒸気養生直後に相当する材齢 4hr40min と、蒸気養生後に 20℃水中で材齢 28 日養生した試料を測定した。

(2) 粉末 X 線回折

結合水量の測定に用いたサンプルを微粉碎して試料とし、エトリンタイトの回折ピーク強度を比較した。

(3) 空隙率

結合水量の測定に用いたサンプルを用い、水銀圧入ポロシメーターで硬化体中の空隙量および空隙径分布の測定を行った。

2.6 コンクリート物性評価

(1) 凝結性状

凝結時間は JIS A 6204 に準拠し、5℃環境で測定した。

(2) 圧縮強度

JIS A 1108 に準拠し、蒸気養生直後の材齢 4hr40min、以降は 20℃水中で養生し、28 日、6 か月で測定した。

(3) 拘束ひずみ

JIS A 6202 に準拠した。養生は 20℃水中で行った。

(4) 乾燥収縮ひずみ

JIS A 1129 に準拠した。脱型直後に試験体を 20℃水中に浸漬した後、材齢 6hr で基長を測定した。その後、20℃水中で材齢 7 日まで 2 次養生を行った後、20℃60%RH 室内で養生し、乾燥収縮ひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 ペースト試験体の分析

(1) 結合水量

図-2に、蒸気養生直後、および材齢 28 日でのペースト試料の結合水量を示す。いずれの材齢でも早期脱型材の配合によって結合水量が増加していることが分かる。

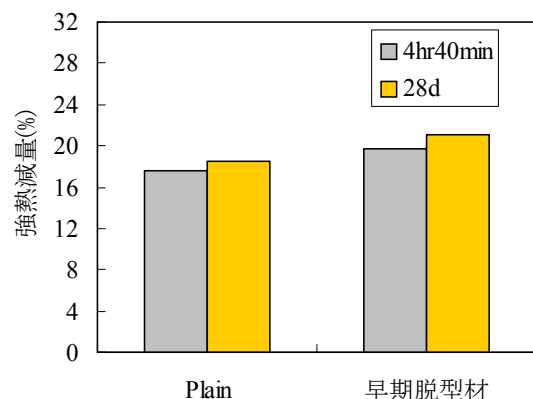


図-2 結合水量

(2) 粉末 X 線回折

図-3に、粉末 X 線回折の測定結果を示す。材齢 4hr40min に着目すると、早期脱型材の配合によってエトリンタイトの生成量が増加していることが分かる。材齢

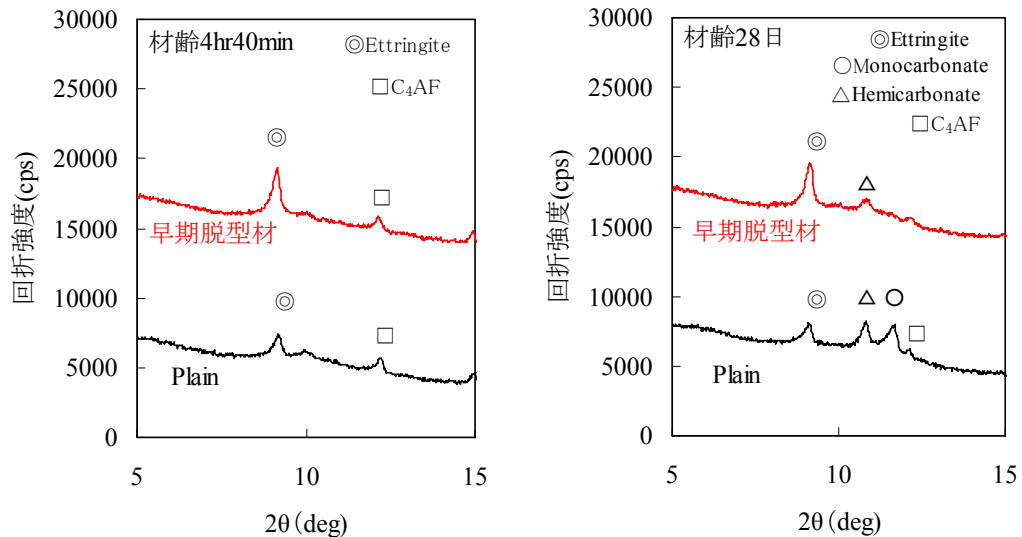


図-3 粉末X線回折測定結果

28日ではエトリンガイトに加え、ヘミカーボネートが検出された。ヘミカーボネートは早期脱型材無混和のPlainでも検出されており、セメント中の炭酸カルシウムとアルミネートの反応によって生成したものと思われる。エトリンガイトのピーク強度は、材齢4hr40minと材齢28日で大きな違いはない。早期脱型材の反応は、材齢4hr40minでほぼ完結していると考えられる。

(3) 空隙率

図-4に、材齢4hr40minの空隙率を示す。積算空隙率に着目すると、早期脱型材の添加によって積算空隙率が小さく緻密になったことが分かる。空隙径に着目すると0.1~1 μm 程度の空隙が著しく減少している。早期脱型材は単位水量一定で、骨材に置換して配合しているため、水結合材比が小さくなったことが一因であるが、図-2や図-3に示すように、早期脱型材の添加で結合材の水和が進行し、エトリンガイトの生成量が増えており、緻密化に寄与していると考えられる。図-5に、材齢28日の空隙率を示す。Plainおよび早期脱型材ともに材齢

4hr40minに比べて空隙率が小さくなり、緻密化している。

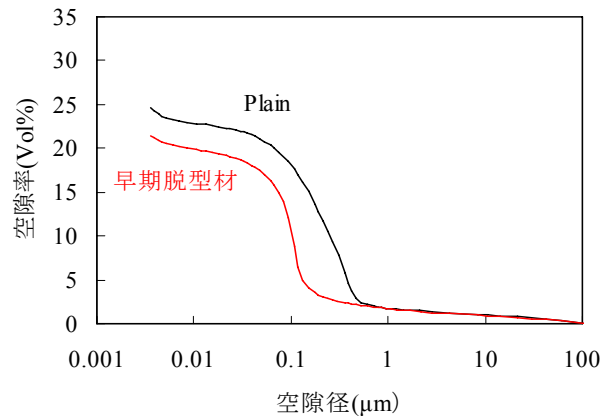


図-5 空隙径分布 (28d)

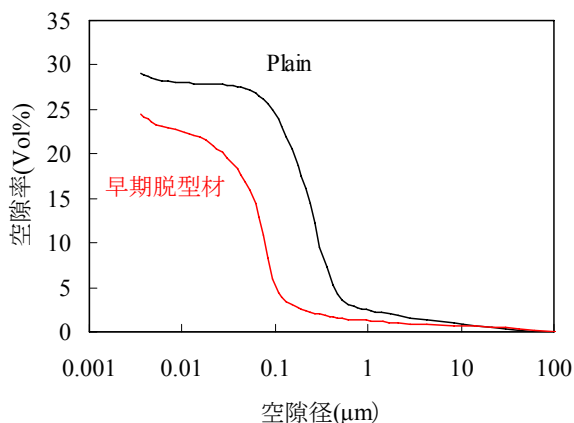


図-4 空隙径分布 (4hr40min)

3.2 コンクリート物性

(1) 凝結性状

図-6に、5 $^{\circ}\text{C}$ 環境下で行った凝結試験の結果を示す。始発時間に着目すると、Plainが4hr20minで始発を迎えたのに対し、早期脱型材を配合したものは、いずれも早く始発を迎えた。20 kg/m^3 の添加では始発時間が2hr50minとなり、Plainよりも約1hr30min短縮できることが分かる。終結時間も始発時間と同様の傾向を示した。Plainが10hr30minで終結を迎えたのに対し、早期脱型材を20 kg/m^3 添加した配合は、終結時間が7hr35minとなり、終結時間を3割ほど短縮できることが分かる。

図-7に、早期脱型材添加率と凝結時間の関係を示す。添加率が高くなるほど始発、終結ともに短くなった。50 kg/m^3 では始発時間が1hr50min、終結時間が5hr40minとなり、Plainに対してそれぞれ約半分短縮された。以上の結果から、5 $^{\circ}\text{C}$ の低温環境においても早期脱型材を添加することで、凝結が促進されることが確認された。

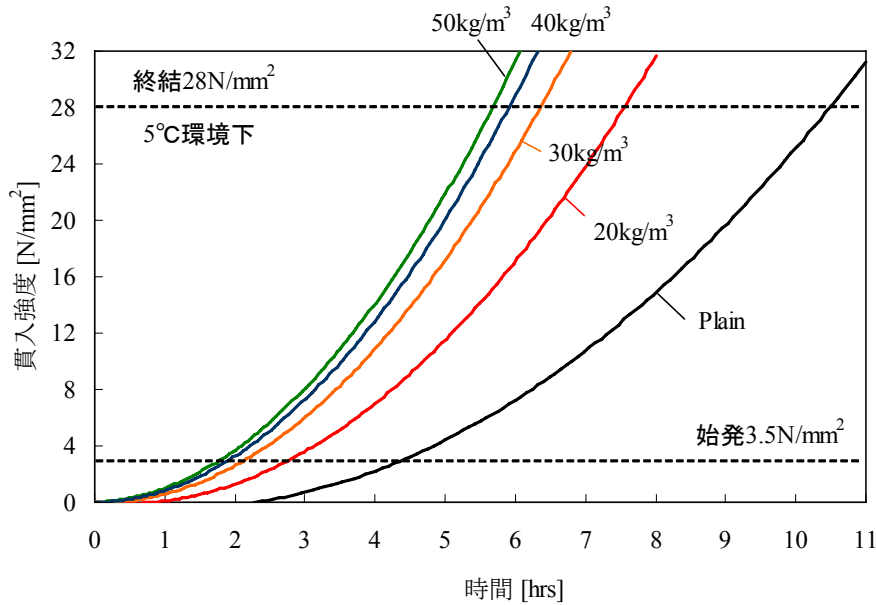


図-6 凝結試験結果 (5°C環境下)

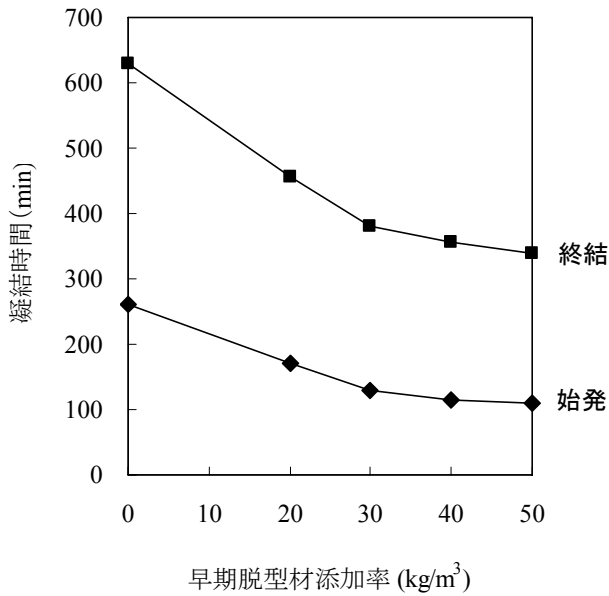


図-7 早期脱型材添加率と凝結始発・終結時間

(2) 圧縮強度

図-8に早期脱型材添加率と圧縮強度の関係を示す。材齢4hr40minの脱型時に着目すると、早期脱型材の添加率が高いほど、高い圧縮強度を示した。Plainが13.2N/mm²に対し、20kg/m³添加では19.7N/mm²とPlainより約5割高い圧縮強度を示した。長期材齢に着目すると、早期脱型材の添加率によらず材齢28日で80N/mm²程度、材齢6か月で90N/mm²程度の圧縮強度を示した。早期脱型材は初期強度の増進に寄与するとともに、長期強度の発現は阻害しないことが分かる。ペーストの分析結果より、早期脱型材の添加は、エトリンサイト生成量を増加させ、結合材の水和も促進させることが明らかとなっており、蒸気養生直後の脱型強度の増進に寄与していると考えら

れる。またエトリンサイト生成系の材料ではDEFなど長期材齢での強度低下が懸念されるが、本試験で行った養生条件の範囲では強度低下は見られなかった。蒸気養生温度が低く、アルカリ量も少ないためと考えられる。

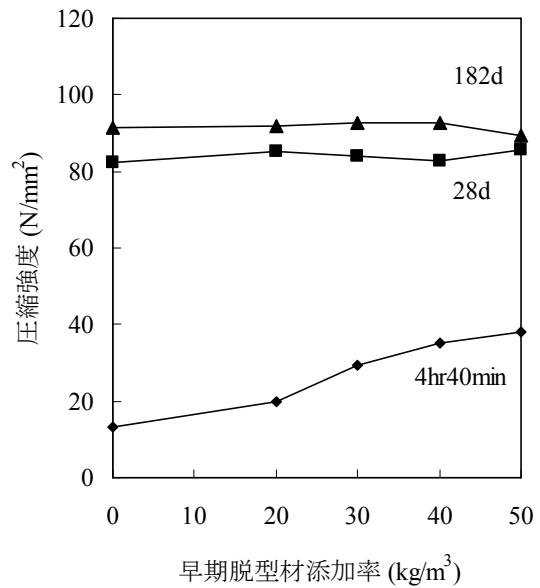


図-8 早期脱型材添加率と圧縮強度の関係

(3) 拘束ひずみ

図-9に拘束ひずみの測定結果を示す。Plainも若干の膨張ひずみが確認されているが、早期脱型材を添加した配合は、膨張ひずみがさらに導入されている。添加率30kg/m³に着目すると、材齢7日の時点で約70×10⁻⁶、材齢180日で約80×10⁻⁶膨張している。膨張ひずみは初期材齢でほぼ導入され、材齢180日でほぼ収束している。添加率が40kg/m³や50kg/m³でも初期材齢で膨張ひずみが導入されているが、長期的に緩やかな膨張挙動が持続

している。50kg/m³では材齢180日で膨張ひずみが200×10⁻⁶程度の値を示している。

図-10に早期脱型材添加率と各材齢の拘束膨張ひずみの関係を示す。早期脱型材の添加率が多いほど拘束膨張ひずみは大きくなり、添加率が高くなると膨張率はやや指数関数的に増加している。また、添加率が40kg/m³や50kg/m³では緩やかな膨張挙動が持続していることが改めて分かる。ペーストの水和解析から、早期脱型材の添加に伴って蒸気養生直後にエトリンサイト生成量が増加することを確認しており、エトリンサイトの生成に伴って膨張ひずみが導入されたものと考えられる。

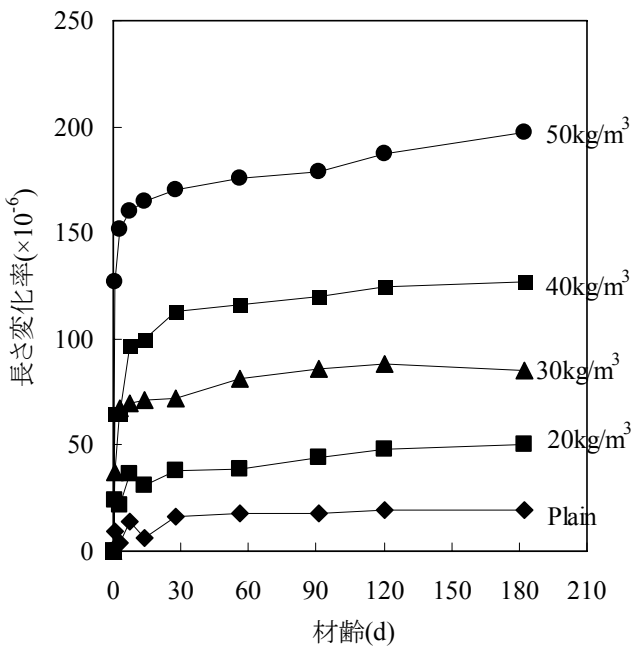


図-9 拘束ひずみの測定結果

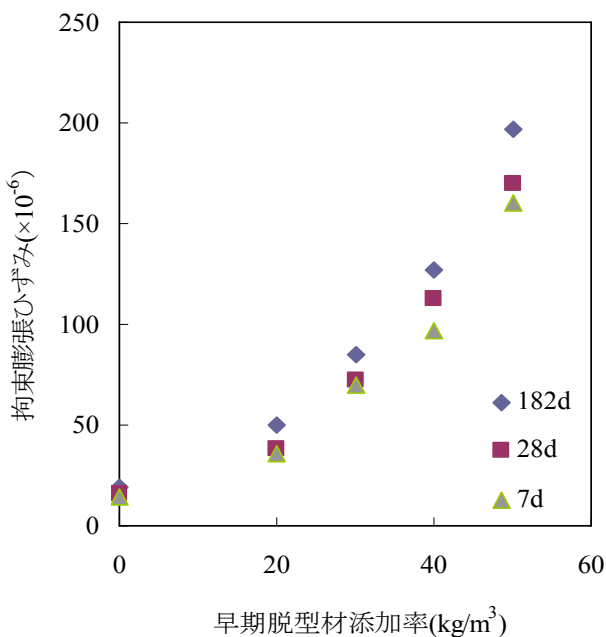


図-10 早期脱型材添加率と拘束膨張ひずみの関係

導入された膨張ひずみの大きさは、膨張コンクリートの品質規格150~250×10⁻⁶と照らし合わせると適正な水準であるが、添加率40kg/m³や50kg/m³では膨張ひずみの増加が継続している。早期脱型材の添加に伴って水結合材比が小さくなり未反応物が残存していることも考えられ、さらに長期的な挙動を継続的に確認する必要がある。

(4) 乾燥収縮ひずみ

図-11に乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。いずれの配合でも乾燥に伴う収縮ひずみが見られるが、Plainの収縮ひずみが最も大きく、材齢180日で-717×10⁻⁶の収縮ひずみが計測された。これに対し、早期脱型材を配合したものは、いずれの添加率においてもPlainより小さい乾燥収縮ひずみを示した。添加率20kg/m³では材齢180日で-536×10⁻⁶の収縮ひずみを示し、Plainに対して2割ほど乾燥収縮ひずみが抑制された。

図-12に早期脱型材の添加率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。材齢28日、材齢182日ともに、30kg/m³までは添加率に応じて乾燥収縮ひずみが小さくなったが、40kg/m³や50kg/m³では、Plainより収縮ひずみは小さいものの、30kg/m³よりも収縮ひずみが大きくなった。

図-2、図-4、図-5に示すように、早期脱型材は結合材の水和を促進し、組織を緻密化させる。このため、乾燥開始時点で逸散する水分が少なくなり、Plainよりも乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる。しかし、本試験では単位水量一定とし、早期脱型材を骨材に置換する形で配合している。このため、早期脱型材の添加率が高いほど水結合材比は低くなる。50kg/m³ではより緻密な組織が形成されるが、水結合材比が28.2%となり、自己収縮が顕在化するため、30kg/m³に比べて乾燥収縮

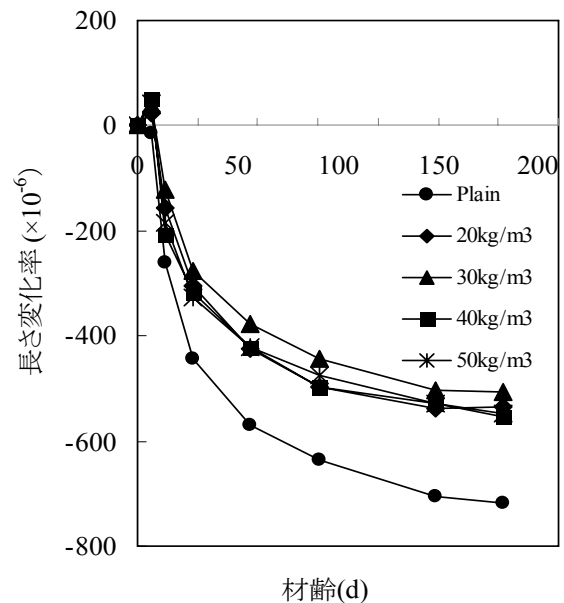
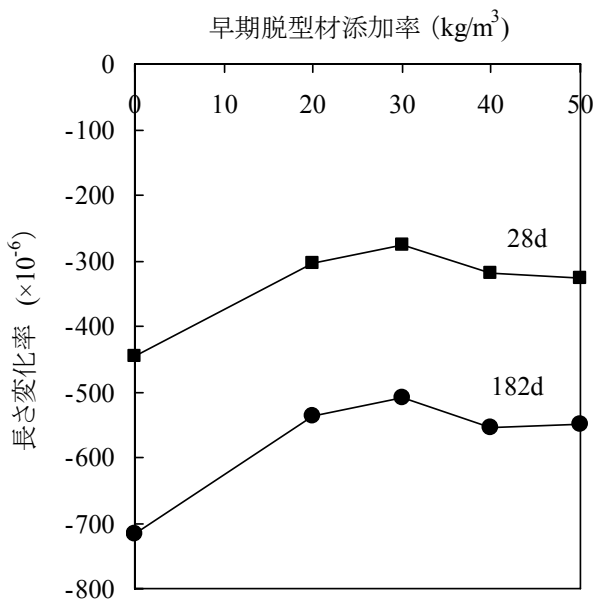


図-11 乾燥収縮ひずみの測定結果

ひずみがやや大きくなったと考えられる。



図一 1 2 早期脱型材添加率と乾燥収縮ひずみの関係

4. まとめ

5°C環境下での練混ぜ、50°Cでの蒸気養生を想定し、凝結時間の短縮、脱型に必要な強度を早期に確保することを目的に、エトリングait生成系の早期脱型混和材の効果と長期耐久性を詳細に検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 早期脱型材を配合により、結合材の水和が促進され、エトリングait生成量が増加した
- (2) 早期脱型材は、5°C環境下でも凝結を促進する。早期脱型材添加率が高いほど、凝結促進効果が高まる。
- (3) 5°C環境下でも、練混ぜから 4hr40min という短い養生サイクルで、脱型に必要な圧縮強度を確保できる。
- (4) 早期脱型材の添加率が高いほど、脱型時の圧縮強度が高くなる。早期脱型材の添加率が 50kg/m³までの範囲では、材齢 6 ヶ月までの強度発現性に悪影響を及ぼさない。
- (5) 早期脱型材の添加によって膨張ひずみが導入される。添加率が高いほど膨張ひずみが大きくなる。
- (6) 早期脱型材の添加によって乾燥収縮ひずみが抑制され、コンクリートのひび割れ低減効果に寄与する可能性が示唆された。
- (7) 凝結の促進、圧縮強度の増進、膨張ひずみの導入は、早期脱型材による結合材の水和促進やエトリングaitの生成量増加によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 松永嘉久, 渡辺芳春, 坂井悦郎, 大門正機: 超早強

混和材の特性とコンクリート製品への適用, セメントコンクリート論文集, Vol.52, pp.412-417, 1998

- 2) 松永嘉久, 山本賢司, 盛岡実, 渡辺芳春, 坂井悦郎, 大門正機: 超早強コンクリート混和材によるコンクリート製品の製造効率の向上と環境負荷低減, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, Vol.8, pp.339-343, 2001
- 3) 河野清, 堀井克章, 浅井洋: 製品用硬練りコンクリートに対する無機系硬化促進剤の利用, セメント技術年報, Vol.38, 昭 59
- 4) 小林哲夫, 安藤豊, 上杉郁雄: 短時間脱型用混和材を用いたコンクリートの諸特性, セメントコンクリート論文集, No.44, PP.134-139, 1990
- 5) 新見龍男, 加藤弘義, 茶林啓司, 土井宏行: 水酸化カルシウム微粉末を添加したコンクリートの強度発現性におよぼす蒸気養生温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.233-238, 2006
- 6) 新見龍男, 加藤弘義, 茶林啓司, 土井宏行: 蒸気養生を行った水酸化カルシウム微粉末添加コンクリートの強度特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.249-254, 2007
- 7) 笠井芳夫: 極早期脱型するコンクリートの強度に関する研究(その2), 日本建築学会論文報告集, No.180, pp.7-12, 1971
- 8) 住吉宏, 窪山潔, 今橋太一, 塩谷勝: コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響, セメント技術年報, Vol.35, pp.290-293, 1981.12
- 9) 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.469-474, 2012
- 10) 佐々木謙二, 岡野耕大, 片山強, 原田哲夫: 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの水分逸散性状と緻密性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1540-1545, 2012
- 11) 山本賢司, 吉野亮悦, 渡辺芳春, 坂井悦郎: エトリングait生成系高強度混和材における遅れ膨張の抑制, Journal of the Society of Inorganic Materials Japan, Vol.14, pp.75-82, 2007
- 12) 羽原俊祐, 福田俊也, 小山田哲也, 藤原忠司: DEFによるコンクリートの硫酸塩膨張現象について—材料, 蒸気養生及び保管条件の影響—, セメントコンクリート論文集, No.60, pp.335-341, 2006
- 13) 松永嘉久, 山本賢司, 渡辺芳春, 坂井悦郎: 高強度混和材による低環境負荷型コンクリートの提案, セメントコンクリート論文集, No.53, pp.354-359, 1999.