

論文 促進剤を使用した水中不分離性コンクリートに関する基礎的検討

長塩 靖祐^{*1}・竹下 永造^{*2}・竹中 寛^{*3}・末岡 英二^{*4}

要旨: 本研究では、セメントとして高炉セメント B 種を使用し、凝結時間の短縮と乾燥収縮の低減を図るために促進剤を添加した従来と同程度の品質を有する水中不分離性コンクリートについて基礎的検討を実施した。その結果、促進剤を使用し、単位水量および水中不分離性混和剤量を低減し配合調整を行うことで、凝結時間の短縮および乾燥収縮の低減が可能となることが確認された。また、今回検討したコンクリートは水中不分離性混和剤を 2.0 kg/m^3 程度使用することにより、従来の水中不分離性コンクリートと同程度の水中不分離抵抗性を有することも確認された。

キーワード: 促進剤, 水中不分離性混和剤, 凝結時間, 乾燥収縮, 圧縮強度

1. はじめに

水中不分離性コンクリートは水中不分離性混和剤の混和によりコンクリートの粘性を高めたものであり、材料分離抵抗性やセルフレベリング性に優れる。水中不分離性コンクリートの施工は常時水面下にある構造物への適用が基本であるが、その施工において、海中部から干満帯へ打ち上げる場合もある。その場合一般的に平均干潮面付近までは水中不分離性コンクリートを、それより上面では普通コンクリートを打ち込むことが多い。この背景の一つとして、例えば従来の水中不分離性コンクリートは普通コンクリートと比較して、水中不分離性混和剤の使用により凝結時間が遅くなる¹⁾、単位水量が 220 kg/m^3 程度²⁾と多いことにより乾燥収縮が大きくなることなど、気中環境下で従来の水中不分離性コンクリートを打ち込むには課題があるものと考えられる。文献³⁾では干満帯の施工をする場合、配合、打込み等について適切な処置をとらなければならないとしている。気中環境下で打ち込む場合の課題を解決することが出来れば、平均干潮面より上方で普通コンクリートに切り替えることが可能となるため、打重ね部の品質を保持しやすくなる。さらには、海中部から干満帯を同コンクリートで打ち込むことも可能になるのではないかと考えられる。

筆者らは既往の報告⁴⁾において、上記課題を解決するために、促進剤を使用することを選定し、凝結時間の短縮と乾燥収縮の低減を図り、かつ従来の水中不分離性コンクリートと同程度の品質を有するコンクリートについて基礎的検討を実施した。その結果、促進剤を使用し、単位水量および水中不分離性混和剤量を低減し配合調整を行うことでその課題が解決できる可能性を見出した。しかしながら、既往の検討ではセメントとして普通ポ

ランドセメントを使用している。セメントが異なればその結果が異なることも予想され、海洋環境下への適用ということを考慮すれば混合セメントについても検討する必要があると考えられる。また、更に実施工も想定すれば環境温度の影響についても検討しておく必要がある。

そこで本研究では、セメントとして高炉セメント B 種を選定し、促進剤を使用した水中不分離性コンクリートについて前述した課題を解決するための検討を行った。また環境温度の影響として、低温環境下 10°C での性状についても検討を実施した。併せて、促進剤の影響についても考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。セメント (C) には高炉セメント B 種 (以下, BB) を、細骨材には静岡県産山砂 (S) を、粗骨材には茨城県産碎石 (G) を使用した。混和剤にはリグニンスルホン酸とポリカルボン酸系複合体の AE 減水剤 (Ad) と、芳香族エーテルとオキシカルボン酸複合体の高性能減水剤 (SP) を使用した。水中不分離性混和剤にはセルロース系 (L) を、促進剤には亜硝酸カルシウム系 (E) のものを使用した。表-2 にセメントの物理化学的性質を、表-3 に骨材の物理的性質を示す。

2.2 コンクリート配合⁴⁾

表-4 にコンクリート配合を示す。本配合は凝結促進には促進剤の使用と水中不分離性混和剤量の低減を、乾燥収縮低減には単位水量減による効果を見出すために選定したものである。W/C は 55%, 単位水量は 185 kg/m^3 , 水中不分離性混和剤 (L) は 1.8 および 2.0 kg/m^3 とし、促進剤 (E) は $C \times 1.0$ および 2.0% とした。なお、比較用

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 混和材料グループ 博士 (工学) (正会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 混和材料グループ 修士 (工学) (正会員)

*3 東洋建設株式会社 総合技術研究所 美浦研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 東洋建設株式会社 総合技術研究所 美浦研究所長 博士 (工学) (正会員)

として促進剤無の配合（以下、従来配合）についても実施した。s/aについては、単位水量を低減した配合は粉体量が少なくなるため従来配合よりも増加させることとした。目標スランブフローは500±30mm、空気量4.0%以下になるように混和剤の添加量で調整した。本研究内においてコンクリート配合は環境温度によらず同一とした。なお、表中の1A配合は後述する促進剤の影響について検討した配合である。本検討内の配合は水中不分離性混和剤を現場にて水に希釈し後添加することを想定したものである。すなわち、プラントにてセメント、骨材、水および混和剤(Ad)を使用してコンクリートを練り混ぜ、現場にて水中不分離性混和剤(L)と高性能減水剤(SP)を添加し水中不分離性コンクリートを製造するものであり、促進剤(E)の添加も現場において行うものとしている。

表-1 使用材料

セメント(C)	BB：高炉セメントB種
細骨材	S：静岡県産山砂
粗骨材	G：茨城県産砕石
混和剤	Ad：リグニンスルホン酸とポリカルボン酸系複合体のAE減水剤 SP：芳香族エーテルとオキシカルボン酸複合体の高性能減水剤
水中不分離性混和剤	L：セルロース系
促進剤	E：亜硝酸カルシウム系

表-2 BBの物理化学的性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結 (h-m)		化学成分 (%)		
		始発	終結	MgO	SO ₃	ig.loss
3.04	3840	3-03	4-18	3.29	2.19	1.39

表-3 骨材の物理的性質

骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
S	2.56	2.17	67.3	2.73	1.5
G	2.65	0.62	30.6	3.67	0.0

表-4 コンクリート配合

No.	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					C× (%)		
					W	C	S	G	L	Ad	SP	E
1	500±30	4.0以下	55	45	185	336	770	963	1.8	1.0	1.7	1.0
2				45	185	336	770	963	1.8	1.0	2.0	2.0
3				45	185	336	770	963	2.0	1.0	1.7	1.0
4				45	185	336	770	963	2.0	1.0	2.0	2.0
5				40	220	400	627	963	2.4	1.0	1.3	—
1A				45	185	336	770	963	1.8	1.0	1.3	—

2.3 試験項目とその方法

(1) スランブフローおよび空気量

スランブフローはJIS A 1150、空気量はJIS A 1128に準拠した。

(2) 凝結時間

凝結時間はJIS A 1147に準拠した。

(3) 懸濁物質量およびpH

懸濁物質量およびpHはJSCE-D 104附属書2(規定)に準拠して行った。

(4) 圧縮強度

圧縮強度はJIS A 1108に準拠して行った。測定材齢は7および28日とした。供試体の作製は水中作製(JSCE-F 504準拠)および気中作製(JIS A 1132に準拠)とした。養生条件は所定の材齢までその環境温度下での水中養生とした。

(5) 乾燥収縮

乾燥収縮試験(長さ変化率試験)はJIS A 1129に準拠して行った。7日間標準養生後に乾燥を開始し、測定材齢は乾燥開始後1, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 126および182日とした。

(6) 水和発熱

促進剤の影響について検討するために水和発熱を測定した。水和発熱の測定にはセメントペーストを用いて試験を行い、水セメント比は55%、水中不分離性混和剤量、Ad量、SP量および促進剤量はコンクリート配合と同様として実施した。水和発熱の測定時間は材齢72時間までとした。

2.4 実験水準

表-5に実験水準を示す。環境温度の影響については10および20℃の2水準とした。

表-5 実験水準

環境温度 (℃)	試験項目					
	フロー 空気量	凝結	懸濁 物質量	圧縮 強度	乾燥 収縮	水和 発熱
20	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	—	—

表-6 フレッシュ性状の試験結果

No.	単位量 (kg/m ³)		C× (%)		環境温度 20℃				環境温度 10℃			
					スランブ フロー (mm)	空気 量 (%)	懸濁 物質 量 (mg/l)	pH	スランブ フロー (mm)	空気 量 (%)	懸濁 物質 量 (mg/l)	pH
	W	L	SP	E								
1	185	1.8	1.7	1.0	525×510	2.7	77	11.4	490×490	2.7	59	11.0
2	185	1.8	2.0	2.0	510×500	2.6	47	11.2	480×480	2.3	30	11.1
3	185	2.0	1.7	1.0	510×505	3.2	48	11.2	480×470	2.5	32	11.1
4	185	2.0	2.0	2.0	500×485	3.1	40	11.1	480×470	2.6	31	11.0
5	220	2.4	1.3	—	530×530	3.0	29	11.2	530×530	2.8	28	11.0

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

表-6 にフレッシュ性状の試験結果を示す。今回検討した配合（以下、検討配合）はスランブフローおよび空気量は所要の性状が得られるものであった。環境温度の影響は検討配合で温度が低くなると、スランブフローがやや小さくなる傾向が確認された。セルロース系の水不分散性混和剤は温度が低くなると、その粘度が増加する傾向にあることが報告されている³⁾。一方、促進剤の影響は例えば亜硝酸カルシウムを使用した場合のコンクリート性状に関する報告⁵⁾によると、フレッシュ性状については多量に使用した場合、硬化が必要以上に促進されるため、コンクリートのこぼりやスランブロスの増大などの課題があるとされているが、通常の使用量程度であれば大きな問題はないものと考えられる。前述した文献では亜硝酸カルシウムを主成分とする市販品の標準的な使用量としてC×4%程度で検討している。本試験では高性能減水剤の添加量を温度によらず同量としており、促進剤の添加量もC×1.0～2.0%としている。検討配合の低温環境下におけるスランブフローの結果は単位水量を低減させていることを踏まえると、水中不分散性混和剤の影響を受けた結果ではないかと考えられる。懸濁物質量は従来配合と比較してやや大きく、配合 No.1 が水中不分散性の指標³⁾となる 50mg/l を超える結果となった。それ以外の配合についてはその値以下であることが確認された。環境温度の影響は温度が低くなると、懸濁物質量の値が小さくなる傾向にあった。これは前述したように低温環境下での水中不分散性混和剤の影響によるものと推察される。本結果から検討配合を BB で適用する場合、懸濁物質量 50mg/l を満足するには水中不分散性混和剤が 2.0 kg/m³ 程度必要になるものと考えられる。なお、pH については 11.0～11.4 の結果にあった。

3.2 凝結時間

図-1 に凝結時間の試験結果を示す。環境温度 20℃における凝結時間は従来配合が始発 26 時間、終結が 30 時間程度、検討配合は始発 16～18 時間、終結 20～21 時間程度であった。環境温度 20℃では 8～11 時間程度凝結時

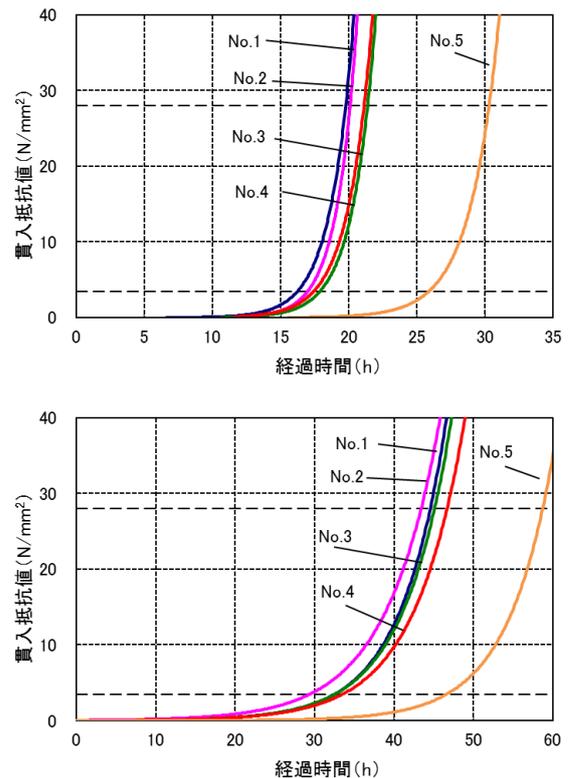


図-1 凝結時間（上段：20℃，下段：10℃）

間が早くなることが確認された。次に環境温度 10℃における凝結時間は従来配合が始発 48 時間、終結が 58 時間程度で、検討配合は始発 30～34 時間、終結 44～47 時間程度であった。環境温度 10℃では 11～18 時間程度凝結時間が早くなることが確認された。一方、促進剤を増加しても凝結時間が大きく短縮することは見受けられない結果にあった。この理由としては促進剤を増加させると所要のスランブフローを得るための SP 量が増加しており、その影響があったのではないかと考えられる。

3.3 圧縮強度

図-2 に圧縮強度の試験結果を示す。図中の数字で上段は材齢 28 日の水中気中強度比を、下段は材齢 7 日のそれを示している。環境温度 20℃において、検討配合は従来配合と比較して、気中作製強度が材齢 7 日で 3～5N/mm² 程度、材齢 28 日で 3～6N/mm² 程度高い結果にあ

り、水中作製強度はほぼ同程度にあった。次に環境温度 10℃において、検討配合は従来配合と比較して、気中作製強度が材齢 7 日で同程度、材齢 28 日で 2~3N/mm² 程度高い結果にあり、水中作製強度はほぼ同程度にあった。本検討内の範囲では気中作製強度が全体的に高い結果を示す傾向にあった。この理由としては、高炉セメントと促進剤の反応が影響しているのではないかと考えられる。例えば、文献⁶⁾では海水を使用している条件下であるが、高炉スラグ微粉末と亜硝酸カルシウムの併用で高炉スラグの反応が促進され強度が高くなること、文献⁷⁾では亜硝酸カルシウムを促進剤として選定し、高炉スラグ微粉末を使用した際の強度確認を実施しており、促進剤無添加の場合より高くなること示されている。本検討も既往の報告と同様に高炉セメントと促進剤の反応により、水和が活発になったのではないかと考えられ、その結果気中作製強度が高くなったものと考えられる。一方、水中作製強度は検討配合と従来配合でほぼ同程度であり、促進剤の効果は少ない結果となった。水中作製強度は気中作製強度と水中分離抵抗性の両者に影響される。検討配合は気中作製強度が促進剤の影響により高くなっているものの、水中分離度の指標となる懸濁物質量が従来配合と比較した場合にやや大きい。したがって、本結果は促進剤と高炉セメントの反応による水和の促進効果が、水の洗い作用の影響により相殺されたために従来配合と同程度になったものと考えられるが、現時点では明確でない。材齢 28 日の水中気中強度比は、環境温度 20℃において、水中不分離性混和剤が 1.8 kg/m³ の場合 (No.1, No.2) は 74%、2.0 kg/m³ の場合 (No.3, No.4) は 80~81%、環境温度 10℃の場合は水中不分離性混和剤量によらず、80~81%であった。検討配合の水中気中強度比は従来配合と比較するとやや小さくなった。検討配合を BB に適用して水中分離度の指標⁴⁾となる 80%以上を満足するには、水中不分離性混和剤が 2.0 kg/m³ 程度必要となり、前述した懸濁物質量の結果と符号していた。圧縮強度および懸濁物質量の試験結果から、検討配合に BB を適用し水中分離抵抗性を確保するには、水中不分離性混和剤が 2.0 kg/m³ 程度必要になるものと考えられる。

3.4 乾燥収縮

図-3 に乾燥収縮の試験結果を示す。検討配合の乾燥収縮は従来配合より 70~100×10⁻⁶ 程度小さい結果になった。従来配合と比較した場合の材齢 182 日の乾燥収縮低減率は 8~10%程度にあり、既往の報告⁸⁾にある単位水量低減分と同程度の効果が得られる結果にあった。また、検討配合の水中不分離性混和剤量および促進剤量の影響は見受けられなかった。図-4 に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。質量減少率についても、従来配合と比較して検討配合の方が小さくなる傾向を示した。

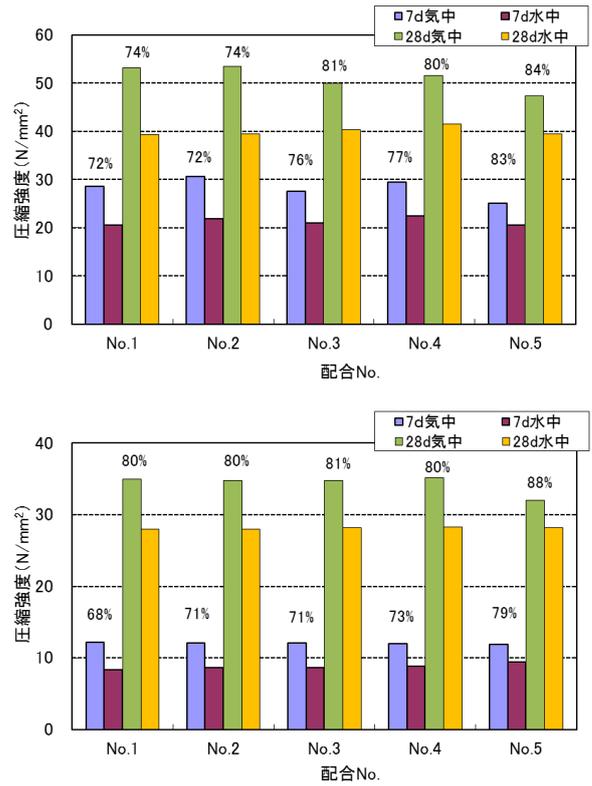


図-2 圧縮強度 (上段 : 20℃, 下段 : 10℃)

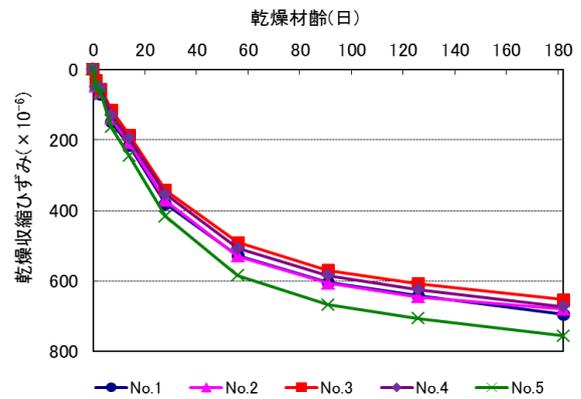


図-3 乾燥収縮

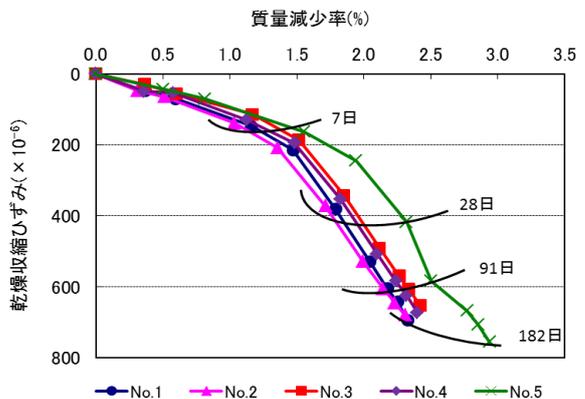


図-4 質量減少率と乾燥収縮ひずみ

4. 促進剤の影響

本研究の検討配合は促進剤を使用し、単位水量および水中不分離性混和剤量を低減し配合調整を行うことで、凝結促進と乾燥収縮低減を可能としたものである。乾燥収縮については単位水量の減量により、その効果は認められる結果にあった。一方、凝結促進については、促進剤の使用と水中不分離性混和剤量の低減の2つの方策により対応したものである。そのため凝結促進についてはどちらの影響が大きいのか定かではない。ここでは凝結に対する促進剤の影響について検討を行った。促進剤の影響については、表-4に示すコンクリート配合のNo.1（以下、促進剤有）から促進剤を使用しない場合No.1A（以下、促進剤無）の凝結時間を測定し、促進剤有および従来配合No.5（以下、従来）の3水準の比較により評価を実施した。なお、促進剤無の配合のSP量については所要のフレッシュ性状が得られるものとした。また材齢初期の反応性を連続的に測定できる伝導式微少熱量計により、水和発熱性状についても測定を実施した。

表-7に促進剤の有無に関するフレッシュ性状の試験結果を、図-5にその凝結時間の試験結果を示す。所要のフレッシュ性状を得るためのSP量は、促進剤無の場合、促進剤有の場合より少なくなることが確認された。凝結時間は促進剤無の場合、従来配合より、始発および終結時間ともに3時間程度早くなることが確認されたが、促進剤有の配合よりは遅い結果となった。凝結時間は促進剤を添加することにより、SP量が多いにもかかわらず、従来配合から8時間程度早くなり、水中不分離性混和剤の減量よりも、促進剤を添加することによる影響の方が大きいのではないかと考えられる。図-6に水和発熱性状の試験結果を示す。従来配合は材齢12時間程度まで反応が停滞しており、その後反応が進む結果となった。促進剤無の配合は、従来配合よりもやや速く反応する結果となった。一方、促進剤有の配合は材齢3~4時間程度から水和発熱速度の立ち上がりが見え、その後も緩やかに反応が継続している結果となった。促進剤を添加することにより、比較的早い材齢の初期から反応していることが示唆された。図-7に材齢24時間における積算発熱量を示す。材齢24時間における積算発熱量は、従来配合が115 (J/g)、促進剤無が121 (J/g)、促進剤有が136 (J/g)となっており、促進剤有の配合はその他の配合よりも水和が活発となっている結果が得られた。

以上の結果から、凝結時間は水中不分離性混和剤の減量においても従来配合よりやや早くなるものの、促進剤を添加した場合の方がより凝結時間が早くなっており、本検討内における凝結促進についてはその影響の方が大きいものと考えられる。一方で、本検討内では促進剤を添加した場合の方が、気中作製強度が高い結果が得られ

表-7 フレッシュ性状の試験結果（促進剤の有無）

No.	単位量 (kg/m ³)		C _x (%)		フレッシュ性状	
	W	L	SP	E	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
1	185	1.8	1.7	1.0	525×510	2.7
1A	185	1.8	1.3	—	530×530	2.4
5	220	2.4	1.3	—	530×530	3.0

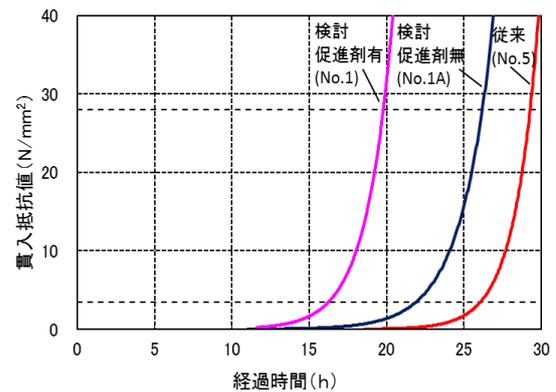


図-5 凝結時間（促進剤の有無）

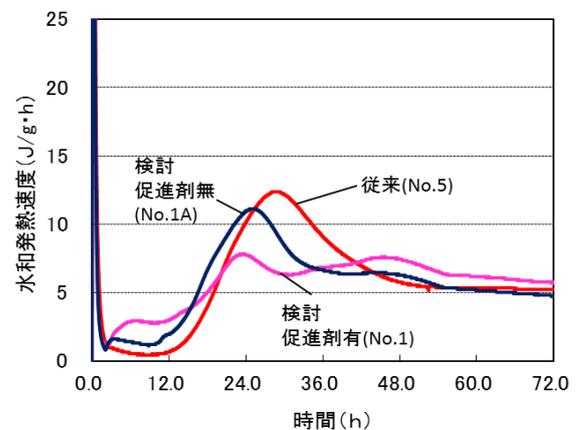


図-6 水和発熱性状

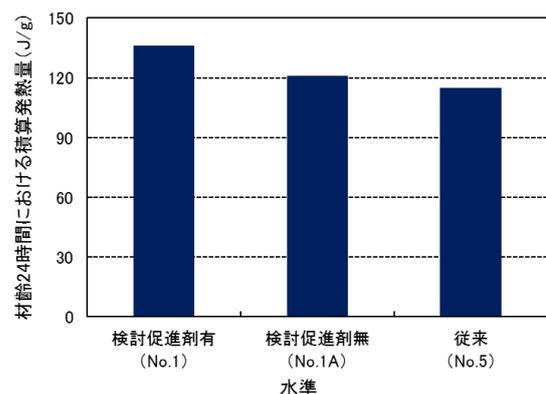


図-7 材齢24時間における積算発熱量

ている。そのため促進剤の影響は凝結時間だけではなく、硬化物性にも影響を及ぼしているものと考えられる。今後は促進剤を使用した場合の硬化物性の影響についても明らかにし、促進剤を添加した水中不分離性コンクリートの特性について更なる検討を行い、実施工に向けたデータの蓄積とその拡充を行う予定である。

5. まとめ

本報告はセメントに BB を使用し、促進剤を使用した水中不分離性コンクリートについて、環境温度の影響も踏まえ、凝結促進および乾燥収縮の低減について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) スランプフローおよび空気量は、所要の性状が得られた。環境温度 10℃のスランプフローは、環境温度 20℃の場合と比較して、やや小さくなる傾向が確認された。
- (2) 懸濁物質量は従来配合と比較して、やや大きい結果となった。懸濁物質量 50mg/l を満足するには水中不分離性混和剤が 2.0 kg/m³ 程度必要になるものと考えられた。
- (3) 凝結時間は従来配合と比較して、環境温度 20℃で 8～11 時間程度、環境温度 10℃で 11～18 時間程度早くなることが確認された。
- (4) 圧縮強度は環境温度によらず従来配合と比較して、気中作製強度が高くなり、水中作製強度がほぼ同程度にあった。
- (5) 乾燥収縮は従来配合と比較して、70～100×10⁻⁶ 程度小さい結果になった。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリー67, 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 1991
- 2) 財団法人沿岸開発技術研究センター, 漁港漁村建設技術研究所, 水中不分離性コンクリート・マニュアル(特殊コンクリートマニュアル改訂版)(設計・施工), 1998.3
- 3) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書 施工編, 2012
- 4) 長塩靖祐, 竹下永造, 末岡英二, 竹中寛：水中不分離性コンクリートの性能向上に関する基礎的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V 部門, pp.497-498, 2015
- 5) 赤間智仁, 井上真澄, 須藤裕司, 三上修一：亜硝酸カルシウムと各種減水剤を併用したコンクリートのフレッシュ性状および初期強度発現の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.154-159, 2012
- 6) 片野啓三郎, 竹田宣典, 小林久美子, 大即信明：海水を使用したセメント硬化体の強度および内部組成に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2017-2022, 2013
- 7) 梅村靖弘, 露木尚光：無塩化物型凝結促進剤を用いた高流動コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.223-228, 2005
- 8) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会, 2010.3