

論 文

[1065] 水和熱を低減した特殊水中コンクリートの諸特性

正会員○高木兼士（五洋建設技術研究所）
正会員 大橋清一（五洋建設 東京支店）

1. まえがき

近年、環境保全および水質汚濁防止の見地から、水中で分離しない特殊水中コンクリートによる施工が急速に普及している。一方、海洋構造物は年々大型化する傾向にあり、これに特殊水中コンクリートを利用しようとする機運にある。大型の海洋構造物を施工する場合にはマスコンクリートとなり温度ひびわれに留意する必要がある。特殊水中コンクリートは単位セメント量が比較的大きいので、水和熱を低減し温度上昇を抑制したいわゆる低熱タイプのコンクリートすることが考えられる。

水和熱を低減する手段として、高炉スラグ微粉末（以下、高炉スラグと称す）、フライアッシュなどの混和材を混入する方法、水和熱抑制剤と称される混和剤を添加する方法^{1) 2)}等がある。混和材を利用する方法では、高炉スラグを大量に使用することが温度上昇を抑制するうえで効果的であるという報告^{3) 4)}もあり、その実用化が望まれるところである。

本研究は、水和熱を低減し温度上昇を抑制した特殊水中コンクリートの開発を目標として、高炉スラグを大量に混入した場合（2種混合）、さらにフライアッシュを併用したとき（3種混合）のコンクリートの流動特性、水和熱の低減効果および強度特性について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験因子と配合

各実験因子と水準の組合せおよび配合を表. 1に示す。普通ポルトランドセメントを用いた場合には、結合材量を一定とし混和材の置換率を2種混合で70および90%、3種混合で90%とした。また、セメント単味の場合の水和熱の抑制効果について比較するため、中庸熱ポルトランドセメント単味の配合について検討した。いずれの配合も、スランプフローの目標値を50±2.5cm、コンクリートの練上り温度のそれを20°Cとしているが、配合N-3のみ30°Cとした。そのため、N-3の遅延剤の量が他の配合の2倍となっている。

表. 1 実験因子と配合

配合 No.	セメント の種類	結 合 材			粗最大 骨大寸 の法 (mm)	目 スランプ 標 準 ブロ ー (cm)	空 気 量 (%)	水 結 合 材 比 (%)	細 骨 材 率 (%)	单 位 量 (kg/m³)							環 境 温 度 (°C)							
		混 合 区 分	混 合 材 の 置 換 率 (%)	混 合 比 C:B:F						W	C	B	F	S	G	混 和 剂								
																特 殊 混 合 剂	流 動 化 剤	遅 延 剤						
N-1	普通 ポルトランド セメント	1種	0	100:0:0	20	50±2.5	2.5±1	57.6	42	213	370	0	0	707	991	2.56	5.55	1.11	20					
N-2		2種	70	30:70:0	"	"	"	"	"	111	259	0	699	979	"	"	"	"	20					
N-3		90	10:90:0	"	"	"	"	"	"	37	333	0	696	976	"	"	"	222	30					
N-4		90	10:75:15	"	"	"	"	"	"	37	278	55	691	968	"	"	"	1.11	20					
N-5	中庸 熱 ポルトランド セメント	3種	10:60:30	"	"	"	"	"	"	37	222	111	685	960	"	"	"	"	20					
M-1		1種	0	100:0:0	"	"	"	"	"	370	0	0	709	994	"	"	"	"	20					

(C : セメント , B : 高炉スラグ , F : フライアッシュ , W : 水 , S : 細骨材 , G : 粗骨材)

表. 2 高炉スラグの特性

比重	比表面積 (cm ² /g)	塩基度	化 学 成 分 (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO
2.89	4,730	1.97	31.3	13.3	0.2	42.4	6.1
							2.0

表. 3 フライアッシュの特性

比重	比表面積 (cm ² /g)	単位水量比 (%)	圧縮強度比(%)		化 学 成 分 (%)		
			28日	91日	二酸化けい素	湿分	強熱減量
2.28	3,080	95.4	71.6	92.9	49.4	0.1	0.6

表. 4 試験項目および方法

試験項目	試験方法	備考
スランプフロー	(財)沿岸開発技術研究センター、漁港漁村建設技術研究所:特殊水中コンクリートマニュアル(設計・施工)に準拠	経時変化も測定
空気量	JIS A 1128に準拠	
コンクリート温度	棒状温度計	練上り時
圧縮強度	JIS A 1108, JIS A 1132に準拠	気中製作後、標準養生(材令7, 28, 91日)
簡易温度上昇試験	発泡スチロール容器(外寸法90×90×90cm、内寸法30×30×30cm)にコンクリートを詰め、熱電対により中心部等温度の経時変化を測定	図. 1 参照

2.2 使用材料

実験では、普通ポルトランドセメント(O社製、比重3.16、粉末度3320 g/cm³以下、NPと称す)、中庸熱ポルトランドセメント(O社製、比重3.21、粉末度3230 g/cm³以下、Mと称す)、粗骨材(八王子産、比重2.66)、細骨材(鬼怒川産、比重2.61)を使用した。混和剤のうち特殊水中コンクリート用混和剤はD社製、流動化剤および遮延剤はN社製のものを使用した。混和材として用いた高炉スラグおよびフライアッシュの特性をそれぞれ表. 2、表. 3に示す。

2.3 練りませ方法

コンクリートは、セメント、骨材、混和材および特殊混和剤が均等に分散するようあらかじめ30秒間空練りした。全練りませ時間は、2分30秒である。

2.4 試験項目および方法

試験項目および方法を表. 4に示す。圧縮強度試験に供する供試体は気中製作とした。水中製作としなかった理由は、気中と水中における圧縮強度の関係が既に得られていること、および各供試体間の品質のバラツキを極力避けるためである。簡易温度上昇試験は図. 1に示すように試験体(30×30×30cm)の周囲を厚さ30cmの断熱材(発泡スチロール)で取り囲み、内部温度の上昇履歴を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 流動特性

流動特性はスランプフローで評価した。図. 2によると練上り直後のスランプフローは、NP单味で配合したコンクリート(N-1)のみ当初設定した目標値を下回る結果となった。高炉スラグで置換した2種混合のそれは、N-1に比して4.3~5.6cm、さらにフライアッシュを併用した3種混合の場合、2.8~6.3cm大きくなつた。これは両混和材の粒子表面が平滑であること、水と接しても直ちに反応を開始しないことなどから、ペーストあるいはモルタルに潤滑機能が付与されたため流動性が向上したものと推察される。

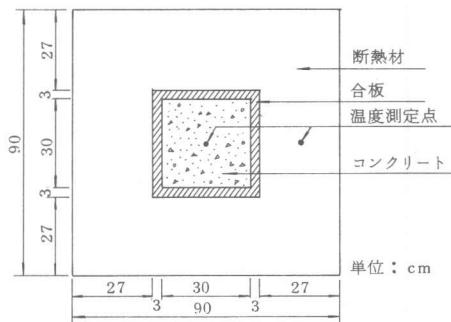


図. 1 簡易温度上昇試験装置

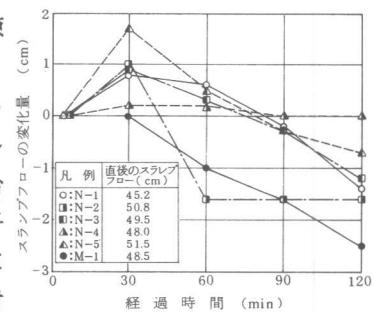


図. 2 スランプフローの経時変化量

スランプフローの経時変化を見ると、30分経過後に一旦大きくなり、その後徐々に低下していることが認められる。2時間経過後の低下量は、Mを使用したM-1が最も大きく2.5cmとなっている。練りまぜ直後の値を基準とした低下率に換算すると0~5.2%の範囲であり、各配合において少なくとも2時間程度流動性を保持することができるものと考えられる。別途試験した遅延剤を添加していないものの低下率が5.3%であったことから、遅延剤の添加による効果が大きいと考えられる。このように、長時間流動性を確保することは、運搬時間を長く要する場所や長距離ポンプ圧送による施工に対して有利であると思われる。

3.2 温度特性

(1) 温度履歴曲線

簡易温度上昇試験によって得られたコンクリート中心部の温度測定結果を図. 3に示す。打込み温度はN-3を除いて20.9~22.0°Cであり、いずれの場合にも初期において20時間程度凝結の遅延が認められる。

高炉スラグおよびフライアッシュで置換した3種混合(N-4およびN-5)では、他の配合に比べて温度上昇が緩慢であり、上昇量も小さい。また、最高温度に達する明瞭なピークが認められない。

(2) 断熱温度上昇式の推定

各配合のコンクリートの断熱温度上昇式の推定は以下の手順によった。

- ① 凝結の遅れを考慮した式(1)を断熱温度上昇式と仮定する。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp \{ -\gamma (t - t_0)\}] \quad (1)$$

ここに、

$Q(t)$: 材令 t 日における断熱温度上昇量 (°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C)

γ : 温度上昇速度 (1/日)

t_0 : 凝結の遅れ (日)

- ② 試験装置を2次元FEMでモデル化し、比較的温度上昇の顕著な配合(N-1およびM-1)について温度履歴の解析結果をそれぞれ実測値に適合させ、試験装置の熱特性を決定する。

- ③ ②で求められた試験装置の熱特性を用いて、他の配合コンクリートの断熱温度上昇式を推定する。

解析に用いた物性値および断熱温度上昇式の推定値を、それぞれ表. 5、表. 6に示す。表. 5において、断熱材の熱伝導率がカタログ値の約3倍と大きくなっている。この原因としては、放熱の影響を断熱材の熱伝導率で代表させたことおよび2次元解析で3次元のものの実測結果を近似させたためなどが考えられる。表. 6においてN-3の温度上昇速度が他の配合に比べて幾分大きい。これは、温度履歴測定時の環境温度を30°Cに保っていたためと推察される。

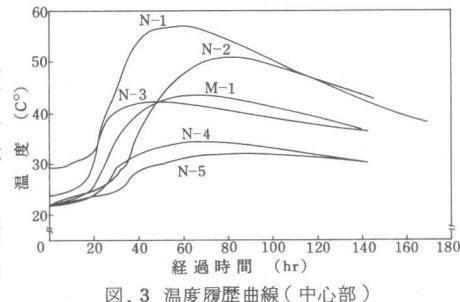


図. 3 温度履歴曲線(中心部)

表. 5 解析に用いた物性値

材 料	密 度 (kg/cm³)	比 热 (kcal/kg·°C)	熱 伝 導 率 (kcal/cm·hr·°C)
コンクリート	0.00225	0.27	0.0230
合 板	0.00048	0.30	0.0035
断 热 材	0.00003	0.29	0.00075

注) 断熱材の熱伝導率のカタログ値は、0.00027である。
外部との熱伝達率は0.001kcal/cm·hr·°Cとした。

表. 6 断熱温度上昇に関する推定値

配 合 Na	セ メ ント の 種 類	結合材の 混 合 比 C:B:F	解 析 結 果		
			Q_{∞} (°C)	γ (1/日)	t_0 (日)
N-1		100:0:0	57.0	1.001	0.625
N-2	普 通	30:70:0	52.0	0.818	1.110
N-3	ポルトランド セ メ ント	10:90:0	21.0	1.325	0.695
N-4		10:75:15	26.7	0.587	0.736
N-5		10:60:30	24.0	0.540	0.950
M-1	中 廉 热 ポルトランド セ メ ント	100:0:0	40.6	0.891	0.833

(3) 温度上昇量

図. 4 は、配合N-N-1の終局断面温度上昇量を基準としたときの各配合コンクリートの温度上昇比と混和材置換率の関係を示したものである。高炉スラグで置換した2種混合の場合、温度上昇量は置換率が70%を越えると急激に低下し、置換率90%ではNP単味のものに比べて約60%低減している。この低減効果は環境温度が30°Cの場合であり、環境温度が20°C程度まで下がればさらに小さくなるものと考えられる。通常高炉スラグの粉末度が3,000～5,000 cm³/gの範囲において水和熱の減少は粉末度よりも置換率の方が大きく影響する⁵⁾と言われており、また文献(4)によれば置換率が80%を越えると温度上昇量が急激に低下することが見いだされており、本結果もこのことを裏づけている。

混和材置換率が90%の場合、フライアッシュを併用した3種混合では、2種混合と比較して温度上昇量に対する顕著な差異は認められない。むしろ高炉スラグのみで置換した2種混合の方が、環境温度が30°Cと高いにもかかわらず低減効果は大きい結果となっている。さらに、Mを用いた場合、温度上昇量がNP単味のものに対して、約30%低い結果となっているが、混和材置換率が90%の場合の3配合に比べると、低減効果は小さい。

(4) 温度上昇速度

温度上昇速度と最高温度到達時間の関係を図. 5に示す。ここで言う最高温度到達時間とは、実測された到達時間から解析で得られた凝結の遅延時間(t_0)を差し引いたものである。図より、温度上昇速度と最高温度到達時間とには直線的な関係が得られている。したがって、セメントの種類、混和材の置換率および環境温度の差異などの要因が温度上昇速度に及ぼす影響は、最高温度到達時間を一指標として関連付けられるものと推察される。たとえば、混和材置換率を種々変化させた場合には温度上昇速度との間に比例的な関係が得られるものと考えられる。

3.3 強度特性

(1) 圧縮強度と材令

図. 6 は、各配合コンクリートにおける材令91日までの圧縮強度の変化を示したものである。混和材で置換したコンクリートおよびMを用いたコンクリートの初期強度はNP単味のものより小さく、この傾向は

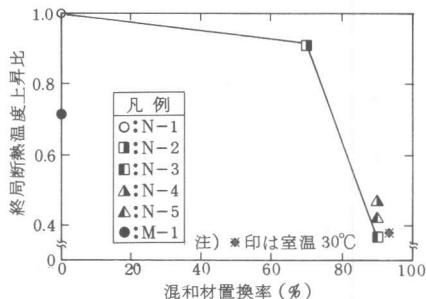


図. 4 終局断熱温度上昇に及ぼす
混和材置換率の影響

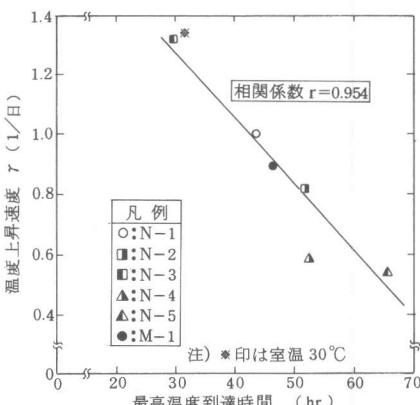


図. 5 温度上昇速度と最高温度到達時間
の関係

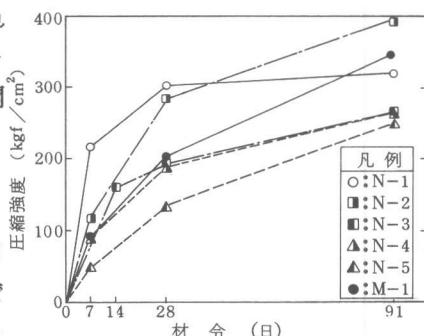


図. 6 圧縮強度と材令の関係

材令 28 日まで続く。特に混和材置換率が 90 % の場合および中庸熱ポルトランドセメントを使用した M-1 にこの傾向が強く認められる。材令 28 日から材令 91 日に至るまでの強度の伸びは、高炉スラグを 70 % 置換した N-2 および M-1 で著しく NP 単味のものの伸び率、1.06 に対し、それぞれ 1.40, 1.71 倍となっている。また、他の 3 配合 (N-3, 4, 5) の材令 91 日における強度は NP 単味のものに比べて小さいが、いずれも長期強度の増進が期待できるものと考えられる。このように、長期強度の伸びが期待できる理由としては、高炉スラグのもつ潜在水硬性、フライアッシュのポゾラン反応によるほか、特殊水中コンクリート固有の性質に起因しているものと思われる。すなわち、特殊混和剤を添加するとブリージングがほとんど生じないため、骨材周辺の組織が均一となり、水和の進行により密実化しやすいと考えられる。

(2) 高炉スラグの影響

図. 7 は、各材令における圧縮強度と高炉スラグ置換率の関係を示したものである。材令 7 日および材令 28 日の圧縮強度は、置換率の増加に伴い小さくなる傾向を示すが、置換率 70 % の場合、材令 28 日における強度は置換率 0 % とほぼ同程度である。材令 91 日では、置換率 70 % の強度が 396 kgf/cm² であり、置換率 0 % のそれを 1.23 倍ほど上回っているのに対し、置換率 90 % では 0.82 倍と下回っている。したがって、長期強度の面から言えば、粉末度 4700 cm³/g 程度の場合、置換率を 70 % 程度とすることが望ましい。

(3) フライアッシュの影響

混和材置換率 90 % において、高炉スラグとフライアッシュを併用したときの圧縮強度に及ぼすフライアッシュの影響を図. 8 に示す。材令にかかわらず圧縮強度はフライアッシュの置換率 0 ~ 15 % の範囲ではほぼ同程度であり、置換率 30 % では 0 % に比べて低下する傾向にある。温度上昇量の低減効果を考慮すると、混和材の置換率 90 % の場合には、フライアッシュを併用することの効果は小さく、むしろ高炉スラグのみで置換した方が良いものと考えられる。

4. 混和材置換率の選定

前述したように、フライアッシュを併用することのメリットが小さいことから、ここでは高炉スラグのみで置換した場合の適切な置換率について検討する。検討に際しては、図. 9 に示すように若材令時の引張強度および温度上昇量で評価した。コンクリートの引張強度は、一例として図. 6 に示す実験値から材令 7 日強度を推定し式(2)より求めた。

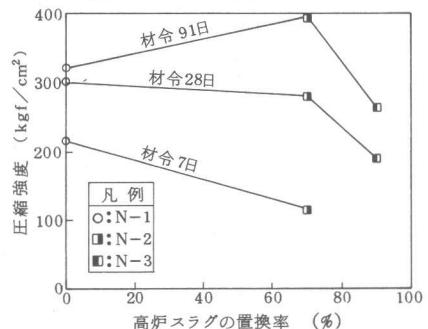


図. 7 高炉スラグの圧縮強度に及ぼす影響

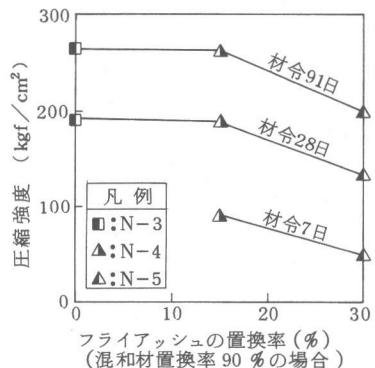


図. 8 フライアッシュの圧縮強度に及ぼす影響

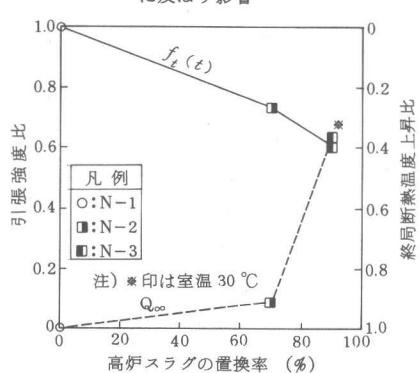


図. 9 高炉スラグ置換率と引張強度および終局断熱温度上昇の関係

$$f_t(t) = C f'_c(t) \quad (2) \text{ b)}$$

ここに、

$f_t(t)$: 材令 t 日の引張強度 (kgf/cm^2)

$f'_c(t)$: 材令 t 日の圧縮強度 (kgf/cm^2)

C : 係 数 ($C = 1.4$)

t : 材 令 ($t = 7$ 日)

同図において、コンクリートの引張強度比が大きい程かつ温度上昇比が小さい程、つまり、図上で両線が上方に位置するほど温度ひびわれに対する抑制効果が大きいと考えられる。したがって、両線の交点での置換率が最適な置換率と判断され、この場合、適切な高炉スラグの置換率は 90% 程度となっている。なお、高温における高炉スラグの発熱量はセメントよりも大きくなるので、最適置換率の決定に際しては 20°C の試験だけでなく、他の温度領域における検討が必要となる。さらに、高炉スラグを大量に使用するコンクリートについては、耐久性の観点からの評価も含めて総合的に検討しなければならない。

5.まとめ

水和熱を低減した特殊水中コンクリートの諸特性について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 特殊水中コンクリートの流動特性をスランプフローで評価した結果、長時間（少なくとも 2 時間）流動性を保持することが可能である。これは、遅延剤添加による効果が大きい。
- (2) 混和材で置換したときの断熱温度上昇量は、高炉スラグ置換率が 70% を越えると急激に低下する。混和材置換率を 90% とした場合、高炉スラグとフライアッシュを併用した 3 種混合では高炉スラグのみで置換した 2 種混合に比べて水和熱抑制効果に対する顕著な差異は認められない。
- (3) 混和材で置換したときの圧縮強度は、水和熱の低減効果により初期強度の発現は小さいが長期にわたる強度の増進を期待することができる。混和材置換率が 90% の場合、フライアッシュを併用することのメリットは小さい。
- (4) コンクリートの引張強度および温度上昇量から求まる適切な高炉スラグの置換率は 90% 程度と考えられる。

参考文献

- 1) 安藤, 坂井, 松本, 小野; 水和熱抑制剤を添加したコンクリートの基礎的研究, 第 2 回マスコントリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 1984.3
- 2) 井ノ川, 稲田, 内田; コンクリートに及ぼす水和発熱抑制剤の影響, 第 42 回セメント技術大会講演要旨, 1988.5
- 3) 太田, 小野, 佐取; 高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの品質に関する一試験, 土木技術資料 Vol.19, No.2, 1977
- 4) 田沢, 大友, 平; 高炉スラグ微粉末を大量添加した特殊水中コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, 1988
- 5) 笠井芳夫, 小林正几編; セメントコンクリート用混和材料, 技術書院
- 6) コンクリート標準示方書（施工編）, 土木学会