

論 文

[1004] 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

正会員 田 沢 雄二郎 (鹿島建設技術研究所)

正会員 大 友 忠 典 (鹿島建設技術研究所)

正会員 ○平 和 男 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

近年、大規模な海洋構造物の施工において特殊水中コンクリートの使用が検討されており、このような構造物ではマスコンクリートとしての問題点が指摘されてきている。一方、特殊水中コンクリートの場合、所要の流動性を得るために単位水量を増加させる必要があり、その結果単位結合材量も気中のコンクリートと比較して多くなるのが実情である¹⁾。従って、通常の気中コンクリート以上に温度ひびわれの発生が懸念される。

温度ひびわれを抑制するために種々の方法が採用されているが、材料面からの方策として、低発熱型セメントの利用、高炉スラグ微粉末（以下、スラグと呼ぶ）やフライアッシュ等混和材の大量添加、水和熱抑制剤の利用等が考えられ、これらについては過去多くの研究がなされている。しかし、これらの研究は気中のコンクリートを対象としており、特殊水中コンクリートについての研究はほとんど行われていないのが現状である。

本研究は、低発熱型水中コンクリートの開発を目的として、スラグを大量に添加した場合にスラグ置換率及びスラグ粉末度が特殊水中コンクリートの凝結、温度及び強度特性に及ぼす影響を検討するとともに、低発熱型水中コンクリートにおける材料の適切な組合せについて比較検討したものである。

2. 実験内容

2.1 実験条件

本実験で検討した要因は、スラグ置換率、スラグ粉末度及び特殊水中コンクリート用混和剤添加の有無であり、表-1に示す14ケースの配合について実験を行った。

配合条件は、スランブフロー¹⁾ 50±2.5 cm、空気量 3±1%、最大骨材寸法 40 mm、単位結合材量 370 kg/m³、細骨材率 37%、練上り温度 20±2 °C とした。

表-1 配合種類及び実験結果

配 合	スラグ 置換率	スラグ 粉末度	水結合 材比 (W/C+B)	単位量 (kg/m ³)							実 験 結 果									
				水 W	セメン ト C	スラ グ B	細骨 材 S	粗骨 材 G	特殊 混和 剤	高性 能減 水剤	スラン ブフロ ー (cm)	空気量 (%)	凝結時間 (hr.)		断熱温度 上昇	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)				
													始発	終結		Q _∞ (°C)	T	水 中		
															7日			28日	91日	91日
No	(%)	(%)	(%)																	
①	0		52.8	195	370	0	642	1102			47.9	2.6	12.9	18.9	57	2.00	202	284	327	385
②	50				185	185	637	1093			52.3	3.3	18.9	23.9	65	1.00	101	307	406	475
③	70	3760			111	259	641	1100			52.5	3.3	22.1	33.5	64	0.80	101	280	441	458
④	80				74	296	640	1098			50.5	3.1	—	—	58	0.70	97	275	429	456
⑤		2160									50.2	2.8	41.4	71.8	32	0.32	29	163	277	343
⑥		3180						1096			51.0	3.1	—	—	37	0.32	48	210	311	380
⑦	90	3760			37	333			2.22	9.25	49.9	3.0	24.3	47.5	35	0.35	65	264	367	431
⑧		4280	51.1	189							50.0	2.8	—	—	29	0.75	86	281	419	433
⑨		5000					639	1097			52.3	2.2	—	—	25	0.75	91	213	313	332
⑩		5950									50.4	2.7	—	—	24	0.90	112	209	296	314
⑪		3760						1095			51.2	3.2	—	—	23	0.30	18	130	270	301
⑫	95	4280			18.5	351.5					52.5	3.0	—	—	18	0.27	41	163	284	303
⑬		5000						1096			52.4	2.8	—	—	15	0.55	103	213	307	336
⑭		5950									52.1	2.5	—	—	12	0.75	120	210	302	319

2.2 使用材料

実験では、普通ポルトランドセメント（N社製；比重 3.16，粉末度3260cm²/g）、スラグ（S社製；表-2）、細骨材（富士川産川砂；FM 2.94, 比重 2.64）、粗骨材（八王子産砕石；FM 7.85, 比重 2.66）、特殊混和剤（M社製）及び高性能減水剤（N社製）を使用した。

2.3 試験項目

スランプフロー、空気量、ブリージング及び凝結時間についての試験を行うとともに、温度上昇試験及び圧縮強度試験を実施した。断熱温度上昇試験はスラグ置換率90%、スラグ粉末度3760 cm²/gの配合についてのみ行い、他のケースについては、周囲を厚さ20cmの断熱材で囲んだφ50 cm×h50cmの試験体による簡易温度上昇試験を行った。圧縮強度試験用供試体（φ15cm×h30cm）は水中及び気中で作成し、標準水中養生を行った。水中作成供試体は、水深50cmの容器にモールドをセットし、水面から静かに特殊水中コンクリートを水中落下させて作成した¹。

2.4 断熱温度上昇式の推定方法

簡易温度上昇試験（図-1）での断熱温度上昇式は、一次元差分法を用いて以下の方法で推定した。

① 断熱温度上昇式として凝結の遅れを考慮した次式を仮定した。

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-t')})$$

表-2 使用したスラグ微粉末の特性

ここに、 $Q(t)$: 材令 t 日の断熱温度上昇 (°C)

Q_{∞} : 断熱温度上昇 (°C)

γ : 温度上昇速度に関する定数

t : 材令 (日)

t' : 凝結遅れ (0.5日温度上昇なし)

No	比重	粉末度 (cm ² /g)	比表面積	化学成分 (%)				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	H ₂ O
①	2.90	2160	1.94	33.0	15.6	1.0	42.3	6.2
②	2.90	3180	1.95	33.1	16.0	1.0	42.3	6.3
③	2.90	3760	1.93	33.3	15.7	0.8	42.5	6.2
④	2.90	4280	1.94	33.2	15.7	0.8	42.5	6.2
⑤	2.91	5000	1.83	33.8	14.2	0.4	42.0	5.8
⑥	2.91	5950	1.83	33.7	14.2	0.4	41.9	5.8

② 放熱条件としての熱伝達率は、発熱が3日でほぼ終了し、その後は放熱だけの状態に近いスラグ置換率0%の結果を用いて求め、この熱伝達率を用いて、置換率90%の結果と一致する断熱温度上昇式を求めた。

以上のような方法で推定された断熱温度上昇と、断熱温度上昇試験及び周囲を厚さ45cmの断熱材で囲んだ一辺 1.7m のコンクリートブロックの温度上昇試験の結果とを比較した結果、図-2に示したように実験値と推定値はよく一致し、この方法の妥当性が確認された。そこで、この方法をすべての実験結果に適用し、各々の断熱温度上昇を求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリートの特性

(1) コンクリートの流動性

特殊水中コンクリートはセルフレベリング性を有するため、その流動性についてはスランプフローで評価した。スランプフローは通常 5分経過時に測定するが、ここでは10分間のスランプフローの増加を調べ、その結果を図-3に示した。スランプフローの増加はスラグ置換率0%の場合は2分

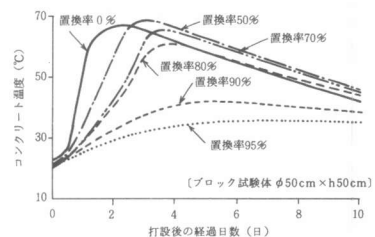


図-1 温度上昇試験結果

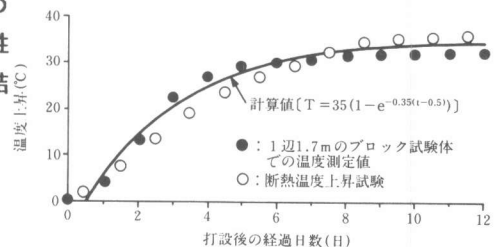


図-2 推定方法の確認

程度経過してから小さくなり、5 分経過後はほとんどなくなるが、スラグを添加した場合は徐々に増加し、5 分経過後も増加する傾向を示した。このとき、スラグ置換率による差は明確でなかった。

(2) 凝結時間

図- 4に示したように、スラグ置換率の増加に伴い凝結時間は遅れ、始発時間は置換率0%の場合の13時間に対して90% の場合は24時間となった。また、終結時間はスラグ置換率が50% 以上になると著しく遅れ、0% の場合の19時間に対して90% の場合は48時間となった。

一般にスラグを添加すると凝結が遅れ、さらに特殊混和剤を添加すると凝結時間は 5~10時間程度遅れるといわれており¹⁾、今回の遅れは両者の影響によって生じたものと考えられる。

3.2 コンクリートの温度特性

(1) スラグ置換率の影響

前述した方法を用いて各スラグ置換率に対する断熱温度上昇を推定し、その曲線を図- 5に示した。断熱温度上昇 Q_{∞} 及び温度上昇速度に関する定数 γ は図- 6に示したとおりで、断熱温度上昇 Q_{∞} は置換率50% で最大を示したが80% を越えると急激に低減し、置換率0% の場合と比較して、置換率90% では22 $^{\circ}$ C、95% では34 $^{\circ}$ C の大幅な低減を示した。一方、 γ はスラグ置換率の増加に伴い直線的に減少し、置換率90% の場合は0% の1/6 程度であった。

この結果を用いて、断熱温度上昇 Q_{∞} に対するセメント及びスラグの寄与の程度を検討した。検討に際しては、図- 7 に示すように Q_{∞} をセメントの寄与分 Q_c (Q_c はセメント量に比例すると仮定) とスラグの寄与分 Q_b (Q_b は Q_{∞} と Q_c との差) の和と仮定し、寄与の程度を単位量当りの断熱温度上昇 Q_c/C 、 Q_b/B で定義した。その結果は図- 8に示したとおりで、スラグの寄与の程度はスラグ置換率80% まではセメントよりも大きい値となったのに対して、80% を越えると急激に小さくなった。

スラグ置換率が80% を越えると断熱温度上昇が急激に低下する理由は明確ではないが、単位セメント量が少なくなるためにコンクリートの温度上昇に寄与するセメントの水和生成物の量が少なくなること、その結果スラグを十分に刺激するだけのアルカリが足りないこと等が考えられる。

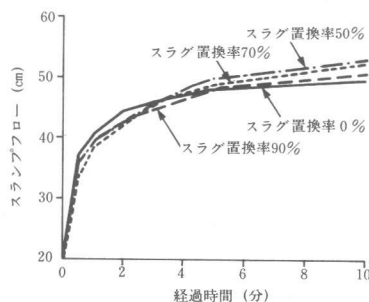


図- 3 スランプフローとスラグ置換率

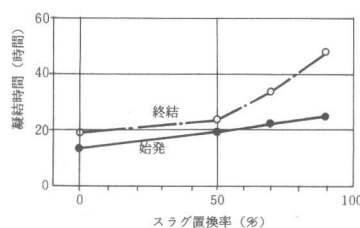


図- 4 凝結時間とスラグ置換率

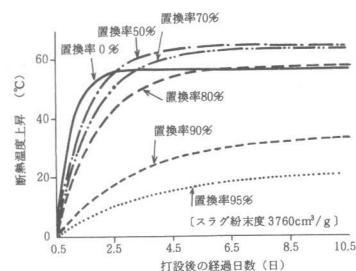


図- 5 断熱温度上昇曲線(1)

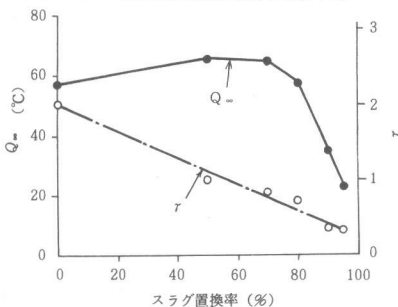


図- 6 スラグ置換率と温度定数

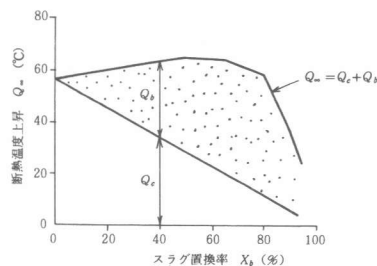


図- 7 断熱温度上昇の分解

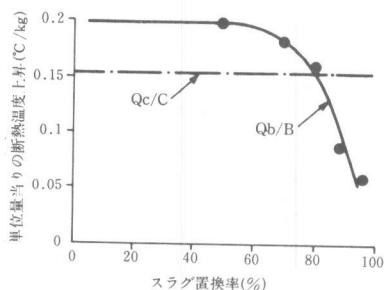


図-8 発熱におけるスラグの寄与

(2) スラグ粉末度の影響

スラグ置換率90% の場合の各スラグ粉末度における断熱温度上昇曲線を図-9に、また置換率90% と95% の場合の温度定数を図-10及び11に示した。置換率90% の場合、粉末度が $2000\text{cm}^2/\text{g}$ から $3000\text{cm}^2/\text{g}$ までは断熱温度上昇は増加したが、 $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上では逆に減少した。一方、温度上昇速度はスラグ粉末度が $3800\text{cm}^2/\text{g}$ を越えると急激に増加した。また、スラグ置換率95% の場合も90% の場合と同様の傾向を示した。

通常のスラグ置換率の範囲では水和熱はスラグ粉末度の増加に伴い大きくなるようであるが、今回のように単位セメント量が少ない場合はセメントの水和生成物の量が非常に少なくなり、その上スラグ粉末度が大きくなるとスラグの水和反応を促進させるアルカリ濃度が相対的に低くなること、粉末度が大きくなると初期の温度が高くなるためスラグ表面の水和反応が促進されるが、内部に未水和スラグが残ること等によってトータルとしての発熱量を低下させていることも考えられ、今後セメント化学的な観点からの検討が必要と思われる。

3.3 コンクリートの強度特性

(1) スラグ置換率の影響

スラグ置換率と圧縮強度の関係は図-12に示したとおりで、材令7日ではスラグ置換率の増加に伴い低くなるが、材令28日での圧縮強度は置換率 0~90% の範囲でほぼ同等であった。さらに材令91日では置換率90% までは0%の場合を上回り、95% の場合でも0%の83% になった。また、気中作成と水中作成の供試体の圧縮強度を比較すると気中の方が高く、水中作成の場合は気中の85~96% であり、通常の特水水中コンクリートと同等であった。

一方、特殊混和剤を添加しない通常のコンクリートでは、図-13に示したようにスラグ置換率が80% 以上になると圧縮強度は急激に小さくなり、スラグ置換率90% の場合は0%の場合の60% 程度になった。この結果から、スラグを大量添加しても圧縮強度が低下しない特性は特殊水中コン

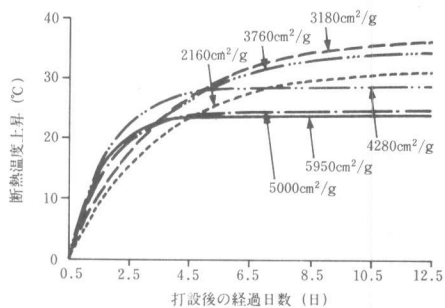


図-9 断熱温度上昇曲線(2)

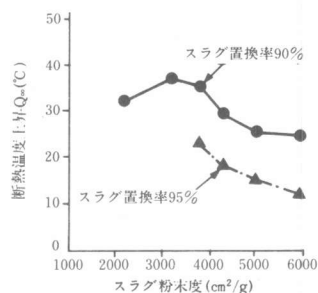


図-10 粉末度と断熱温度上昇

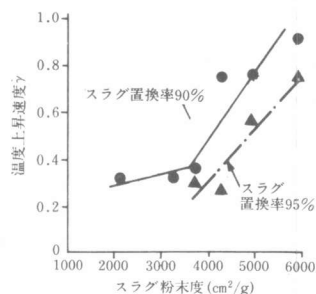


図-11 粉末度と温度上昇速度

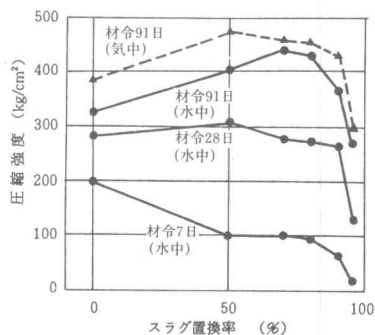


図-12 スラグ置換率と圧縮強度

クリート特有のものであると考えられる。

このように、特殊混和剤を添加するとスラグを高添加した場合でも強度が低下しない理由としては、特殊混和剤の添加により保水性が向上してブリージングが抑制され、そのためにコンクリート中のアルカリ量が減少しにくく、かつ均一に分布し、スラグの水和反応を促進させていること等が考えられる。このことを確認する目的で調べた結果を写真-1に示す。これは材令7日におけるスラグ置換率90%のペーストの断面状況を示したもので、特殊混和剤を添加した場合は全体が濃い緑青色を示しているのに対して、添加しない場合は所々濃くなっている程度である。この緑青色はスラグ中にわずかに含まれている硫化鉄の色²⁾で、この色が特殊混和剤を添加した場合に濃く全体に分布していることは、スラグの水和反応がより均等に進行していることを示しているものと考えられる。

(2) スラグ粉末度の影響

スラグ粉末度と圧縮強度の関係は図-14に示したとおりで、スラグ置換率90%の場合は水中作成、気中作成のいずれの条件下でも粉末度が4000 cm^2/g 級までは圧縮強度は増加したが、それ以上増加すると逆に減少した。このとき使用したすべてのスラグのガラス化率はほぼ100%に近く、塩基度の差も0.1程度であるため、その影響はそれほど大きくないものと考えられる³⁾。また、スラグ置換率95%では図-15に示したように5000 cm^2/g までは圧縮強度は増加したが、それ以上では圧縮強度の増加は見られなかった。

このように、スラグ粉末度の増加に伴い圧縮強度は増加するが、その増加には限界があり、スラグ置換率90%以上の特殊水中コンクリートの場合、4000 cm^2/g 程度であると考えられる。この特性は、前述したように断熱温度上昇が4000 cm^2/g 以上で減少しているのと同じ現象であると考えられる。

4. 適切なスラグ置換率及びスラグ粉末度

上記の温度及び強度特性から、水中マスコンクリートとして適切なスラグ置換率及びスラグ粉末度を検討した。

スラグ置換率については、図-6に示したように断熱温度上昇は非常に低くなるが、図-11に示したように90%から95%にかけて圧縮強度の低下が著しくなるため、バラツキ等を考慮すると90%程度が妥当な置換率であると考えられる。

スラグ粉末度については、断熱温度上昇 Q_{∞} と材令91日の圧縮強度 $f'c$ から単位強度当りの断熱温度上昇 $Q_{\infty}/f'c$ を指標として比較した。図-16はその結果を示したもので、スラグ置換率90%ではスラグ粉末度の増加に伴い減少して4280 cm^2/g で最小になり、それ以上ではほぼ一定に

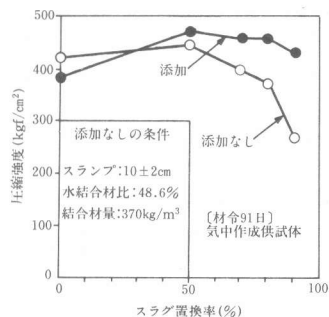


図-13 特殊混和剤の効果

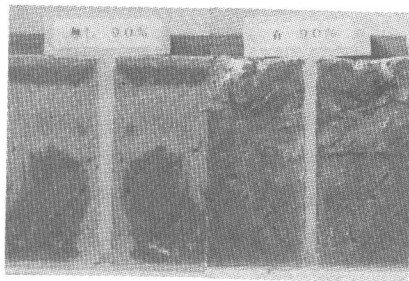


写真-1 スラグの水和反応

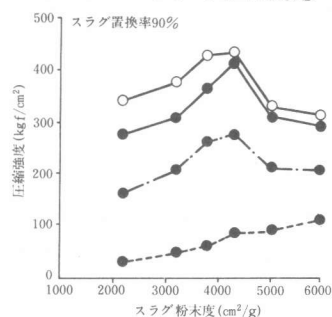


図-14 粉末度と圧縮強度(1)

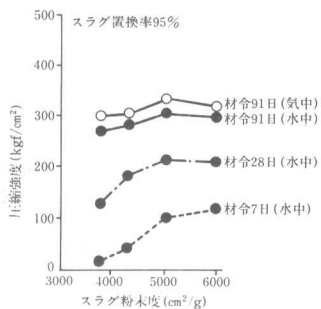


図-15 粉末度と圧縮強度(2)

なった。また、置換率95%ではスラグ粉末度の増加に伴い徐々に減少し、6000cm²/gが最小となった。温度上昇速度は、図-11に示したように3800cm²/g以下ではほぼ一定となっており、これらの結果から判断すると、スラグの粉末度は通常生産されている3500~4500cm²/g程度が妥当な範囲であると考えられる。

5. まとめ

低発熱型的水中コンクリートの開発を目的として、スラグを大量添加した特殊水中コンクリートの特性を検討

した結果、次のようなことが明らかになった。

① スランプフローは通常 5分経過後に測定するが、その後もスランプフローの増加を測定すると、スラグを添加しない場合は 5分程度ではほぼ収束するのに対して、添加した場合は徐々に増加し、5 分経過後も伸びる傾向を示す。また、凝結は特殊混和剤及びスラグの添加の影響によって遅れる。

② 断熱温度上昇はスラグ置換率80% 以下では0%の場合より大きくなるが、80% を越えると急激に低減する。また、スラグ粉末度3000cm²/g級で断熱温度上昇は最大となり、それ以上にスラグ粉末度が増加すると逆に低減する。断熱温度上昇速度は、スラグ置換率の増加及びスラグ粉末度の低下に伴い遅くなる。

③ 材令 7日の圧縮強度はスラグ置換率の増加に伴い低下するが、材令91日では置換率90% までは0%の場合を上回り、置換率95% の場合でも0%の場合の80% 程度になる。このように、置換率が著しく高いコンクリートでも大きい圧縮強度を示す理由として、特殊混和剤の添加がスラグの水和反応を促進させる効果を有していること等が考えられる。

また、スラグ粉末度の増加に伴い圧縮強度は増加するが、ある粉末度以上になると逆に減少し、その値は今回の実験の範囲内では4000~5000cm²/gである。

④ 低発熱型特殊水中コンクリートとして最適な条件は、今回検討した範囲内では、スラグ置換率90%、スラグ粉末度4000cm²/g程度であると考えられる。

現在、高炉セメントのスラグ添加率はC種でも70% 以下と規定されているため、スラグを70% 以上添加した施工実績は我が国ではほとんどないが、ヨーロッパでは70% 以上添加したスラグセメントの規格もあり、気中では70~90% 添加した施工実績もある。

今後、このような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実用化に際しては、スラグの種類、品質管理の方法等の検討すべき点が残されており、実工事への適用に際しては、使用するスラグの品質を予め十分に検討しておくことが必要であると考えられる。

[参 考 文 献]

- [1] (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）、1986.11
- [2] 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー第63号、1988.1
- [3] 小林、魚本、嶋：コンクリート混和材としての高炉水砕スラグ粉末の品質がコンクリートの圧縮強度ならびに乾燥収縮に及ぼす影響、コンクリート工学、Vol.17, No.5, May, 1979

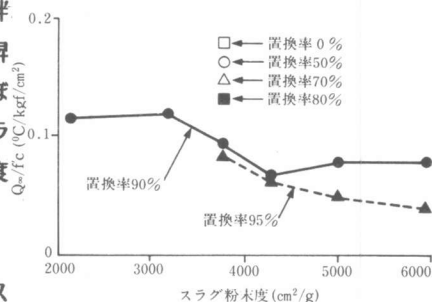


図-16 単位強度当りの断熱温度上昇