

報告

[1108] 35年間暴露したスラグ高含有セメントコンクリートの性状

正会員○長尾之彦（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

正会員 近田孝夫（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

富沢年道（新日鐵化学高炉セメント技術センター）

1. はじめに

セメントコンクリートの特徴の一つは、耐久性が大きいことである。この点に関して、古くから試験体を用いた長期試験または長年月経過した構造物の調査結果が、数多く報告されている^{1) 2) 3)}。一方、構造体の大型化にともなって、ある程度強度を確保し、かつ発熱を極力低減させたセメントに期待が高まりつつあり、普通ポルトランドセメントに多量の高炉スラグ微粉末（以下スラグと記す）またはフライアッシュを組み合わせた2成分系あるいは3成分系の混合セメントが、注目されてきている。ここでは、スラグを80%以上含有するセメントコンクリートの耐久に関する技術資料を得るために、35年間日射・風雨をうける屋外（小倉セメント工場）に暴露したスラグ高含有セメント使用コンクリート柱の物理的性状、水和物を調べると同時に、電子顕微鏡により内部組織の観察を行って検討した結果、耐久性を十分保持していることを確認した。

2. 屋外暴露供試体

(1) 使用材料

セメントは、高硫酸塩スラグセメント（SH、スラグ：82.5%，石膏：15.0%，クリンカー：2.5%）と高炉セメントB種（BB）を用いた。骨材は、粗骨材の最大寸法20mmの川砂利と細骨材として川砂を使用し、プレーンコンクリートであった。各材料の試験結果を表1～4に示している。

(2) コンクリートの配合と性質

コンクリートの配合条件は、セメント：細骨材：粗骨材の重量比が1:2:4で、水セメント比は、55%（SH）と60%（BB）、スランプは約5cmのものであった。この配合条件から、各材料の単位量を算出して示したのが表-5である。表-5をみると、粗骨材

表-1 セメントの化学分析

セメント	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	SO ₃	Total
SH	4.2	27.8	13.7	1.3	1.0	39.4	4.0	7.5	98.9
BB	1.4	25.9	8.0	2.2	0.6	55.4	3.8	2.3	99.6

表-2 セメントの物理試験結果

セメント	比 重	粉末度 (cm ² /g)	凝結時間		曲げ強さ (kgf/cm ²)			圧縮強さ (kgf/cm ²)		
			始 発 (h-m)	終 結 (h-m)	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
SH	2.81	5.010	4-00	7-25	18.7	50.9	64.9	86	223	440
BB	3.03	3.570	2-55	5-00	28.7	39.2	58.9	97	159	304

表-3 骨材の粒度分布

骨材の種類	ふるいに留まるものの重量百分率(%)										粗粒率
	25mm	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材	—	—	—	—	0	2.0	20.4	59.1	77.5	98.7	2.58
粗骨材	0	6.7	26.2	52.2	99.5	100	—	—	—	—	6.58

表-4 骨材の物理的性質

骨材の種類	比 重	吸水率 (%)	泥土量 (%)	単位容積重量 (kg/l)
細骨材	2.55	1.2	0.2	1,564
粗骨材	2.60	1.0	0.2	1,627

の最大寸法20mmに対して、細骨材率が33.8%となっており、現在用いられている土木用コンクリートに比べて、細骨材の少ない配合であったことがわかる。ミキサ（練り混ぜ容量40L）で混練したコンクリートにより、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体を成形し、材令3日で脱型した後温砂養生した圧縮強度を表-5に示している。SHのスラグ含有量は、BBよりも多いにもかかわらず、また水セメント比の差5%を考慮しても、SHの圧縮強度は、BBよりもかなり大きいことがわかる。

(3) 暴露供試体

本試験を開始したのは、昭和29年10月であった。屋外に暴露した供試体の大きさは、 $30 \times 30 \times 200\text{ cm}$ の角柱である。BBコンクリート打設後1日でSHコンクリートを打ち継いだもので、材令7日で脱型後角柱を約50cm土中に埋め込んで、以後屋外暴露したものである。図-1にその状況を示しているが、写真で見られるコンクリートの面は、供試体成形時のコテ仕上げ面であり、左側がBB、右側がSHである。また、日射を受ける面をA面とし、受けない面をB面とした。



図 1 耐久性試験供試体

3. 耐久性試験

35年間屋外暴露した角柱供試体の耐久性を調べるために、(1)外観観察、(2)中性化深さ、(3)コアの圧縮強度、(4)シュミットハンマーによる反発硬度、(5)X線回折、(6)電子顕微鏡観察、(7)細孔量および細孔径分布の測定などの試験を行った。

4. 試験結果と考察

中性化深さ、コアの圧縮強度、シュミットハンマーによる反発硬度の試験結果を表-6に示している。

(1) 外観観察

図-1で見られるA面では、SH、BBともにセメント部分が消失して骨材が露出しているが、その程度はSHの方が大きい。しかしここでは示していないが、日射を受けないB面や側面では、部分的にSHよりもBBの方が、露出

表-5 コンクリートの配合と圧縮強度

セメント の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				実測ス ランプ (cm)	圧縮強度 (kgf/cm²)		
			W	C	S	G		28日	6ヶ月	1年
SH	5.5	33.8	171	310	620	1240	5.0	323	375	388
BB	6.0	33.8	188	308	616	1232	5.4	229	293	348

表-6 中性化深さ、反発硬度、圧縮強度

セメント の種類	No.	平均中性化深さ (mm)			反発硬度		コア	
		A面	B面	地中部	反発硬度 (kgf/cm²)	換算強度 (kgf/cm²)	密度 (g/cm³)	圧縮強度 (kgf/cm²)
SH	1	27.3	27.5	0	28.1	218	2.388	435
	2	30.7	31.1	0			2.379	434
	平均	29.0	29.3	0			2.374	434
BB	1	11.2	8.0	0	34.2	305	2.377	365
	2	13.4	8.4	0			2.358	327
	平均	12.3	8.2	2			2.368	346

程度の大きいところが見られた。一般に、このような現象をアブサンデンと称している。この原因として、Kuhl⁴⁾は表面の乾燥および空気中のCO₂による水和物の分解によるし⁴⁾、J.D Ansらの研究⁵⁾によると、高硫酸塩スラグセメントでは、その硬化体中に生成するエトリンガイトが空気中の炭酸ガスの作用により分解するためとしている。また、浅野ら⁶⁾の報告によると、アルミニート水和物の炭酸化反応速度は、エトリンガイトが最も速いという。普通ポルトランドセメントコンクリートでも、長年月風雨に曝されると、表面の骨材が露出してくる現象が見られるが、石膏量が多くてスラグ量をより多く含有するセメントほど、アブサンデン現象の程度は増すようである。一方、魚本⁷⁾らは、スラグ量が多くても普通ポルトランドセメントが10%以上であれば、この現象が生じなかつたと報告している。したがって、スラグ量、石膏量、普通ポルトランドセメントの配合比やスラグの高微粉末化などによっても、アブサンデン現象をかなり抑制できると考えられる。また、気象条件やコンクリートの初期の養生条件、配合条件により、その程度が異なることも考慮しておく必要がある。

(2) 中性化深さ

表-6に示すように、中性化深さは地上部のSHでは約30mm、BBでは10mm前後であり、地中部では両者とも0mmであった。BBの地上部の中性化深さは、依田⁸⁾の中性化速度式の値2.2mm程度よりも小さいようであるが、これはSHに比べてBBの方が、日射、風雨の影響以外に、近接した蒸気洩れの影響を受けやすい位置にあったためと考えられる。

(3) 圧縮強度

コアの圧縮強度は、コアの長さが30cmであったため、両端約5cmを切断して試験した。圧縮強度の値は2ケと少ないが、SHで434kgf/cm²、BBで346kgf/cm²となっており、表-5に示した試験開始時の材令1年の圧縮強度と比べて、SHの場合とくにその強度の伸びが著しいことが認められる。

(4) 反発硬度

参考のためシュミットハンマーによる反発硬度を測定した。コンクリート表面に骨材が露出した状態であったため、反発硬度のバラツキが大きくより正確な値は得られなかつたようである。SHとBBでコアの圧縮強度と換算強度が逆になっているのは、セメントの相違によるコンクリート表面の平滑度の差が、影響していると考えられるが、反発硬度は表面層の硬度を測定するものであり、ある程度表面層近傍に対する特性値と評価するのが適切とも考えられる。

(5) X線回折

コアから、中性化した部分（深さ：0～10mm）と非中性化部分（深さ：約100mm）のモルタル小片を真空脱気乾燥後、粉末にした試料のX線解析結果を図-2に示す。なお、SHとBBの中性化部のX線回折図は、ほとんど同じパターンであったため、SHの図のみを示している。中性化部はSH、BBともに、セメントの水和により生成した消石灰とエトリンガイトが炭酸化されて生じた炭酸カルシウムと、骨材の混入による石英と長石のピークが認められる。非中性化部では、セメントの水和に関係するものとして、BBの場合、エトリンガイト、モノサルフェートと消石灰、SHの場合はエトリンガイトのみでモノサルフェートと消石灰は同定できなかつた。Smolczyk⁷⁾は、20年経過したスラグ高含有セメントコンクリート中より、X線回折でエトリンガイト、モノサルフェート、消石灰の他にカルシウムシリケートの水和生成物を同定しているが、今回の試験では検出できなかつた。

(6) 電子顕微鏡観察

電子顕微鏡観察により観察した結果を図-3に示す。炭酸化した部分は、図-3のDとHに示すように、SH, BBともに輪郭が不明瞭な形態で、ほとんどが炭酸カルシウムであると考えられる。図-3のA, B, CとE, F, Gは、SHとBBの非中性化部を対比し、かつ倍率の異なるもので、同じような水和物が生成していることを示している。BはAに示したSH試料中の空隙に生成したエトリンガイトを示している。Cは他の微小空隙にみられた水和物を示している。エトリンガイトの他に不定形な形態をした水和物が観察されるが、これはカルシウムシリケイト水和物と推察される。Eは、骨材の剥離面でブリージング水による空隙部に生成している水和物で、この点を拡大したFではエトリンガイトの結晶が観察されるが、形態および大きさからみて、二次析出した石膏も混在しているかも知れない。GはBB試料中の微小空隙中にみられた水和物であり、エトリンガイトの他にカルシウムシリケイトらしきものも観察される。

(7) ポア分布

SH, BBの中性化部、非中性化部のポロシティの測定結果を図-4に示している。

両セメントともに中性化部は、非中性化部に比べ全細孔孔量(T.P.V.)が大きくなり、平均細孔径が著しく大きくなっていることがわかる。SHとBBの非中性化部では、両者の細孔径分布は類似しており、組織が緻密であると考えられるのに対して、中性化部では、SHの方がBBよりも細孔量が最大になる細孔径が大きく、非中性化部に比べて全細孔量の増加も大きいようである。このことは、BBよりもSHの方が、炭酸化の影響を受ける程度が大きいことを示していると考えられる。

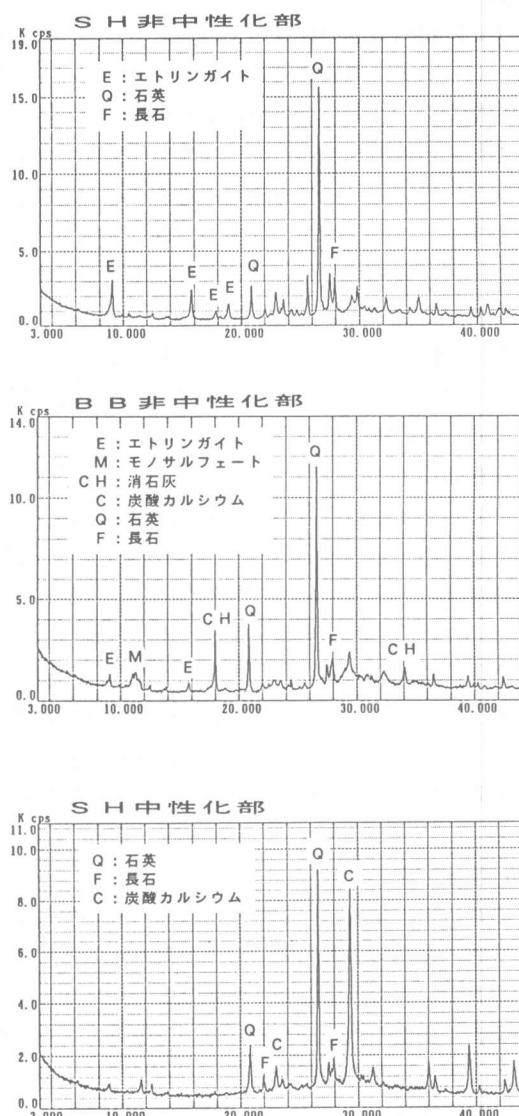
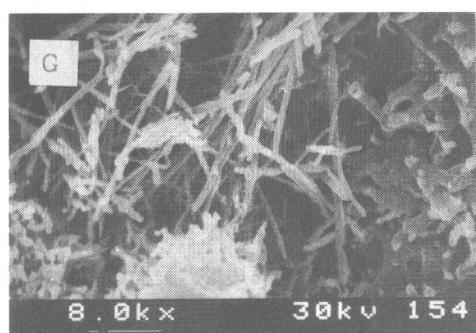
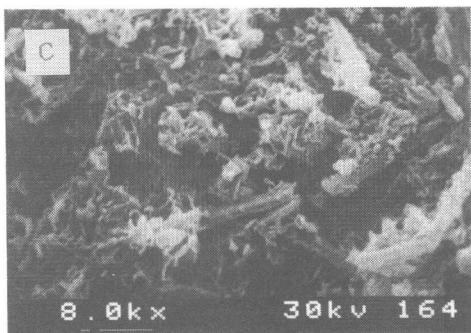
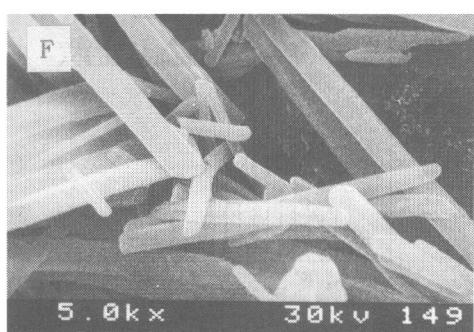
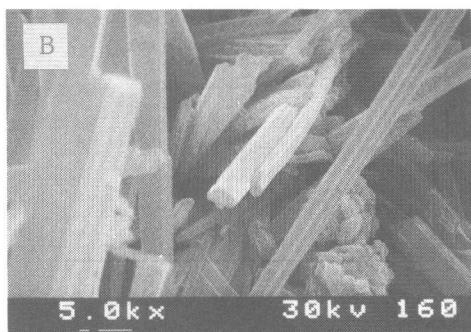
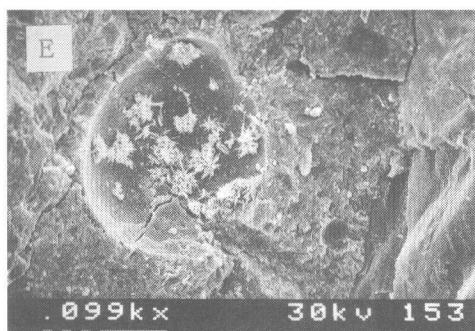
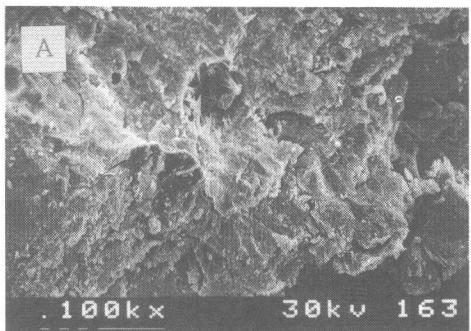
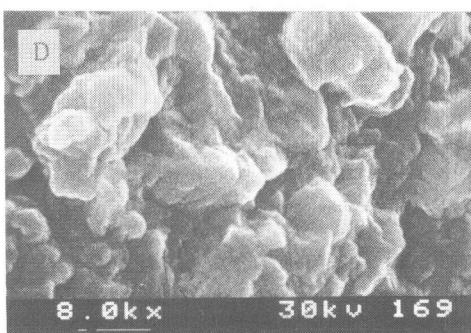


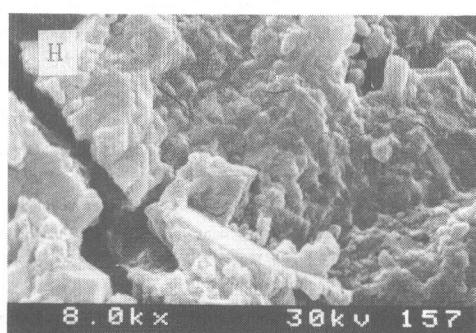
図 2 X線回折図



S H (非中性化部)



B B (非中性化部)



S H (中性化部)

B B (中性化部)

図-3 電子顕微鏡写真

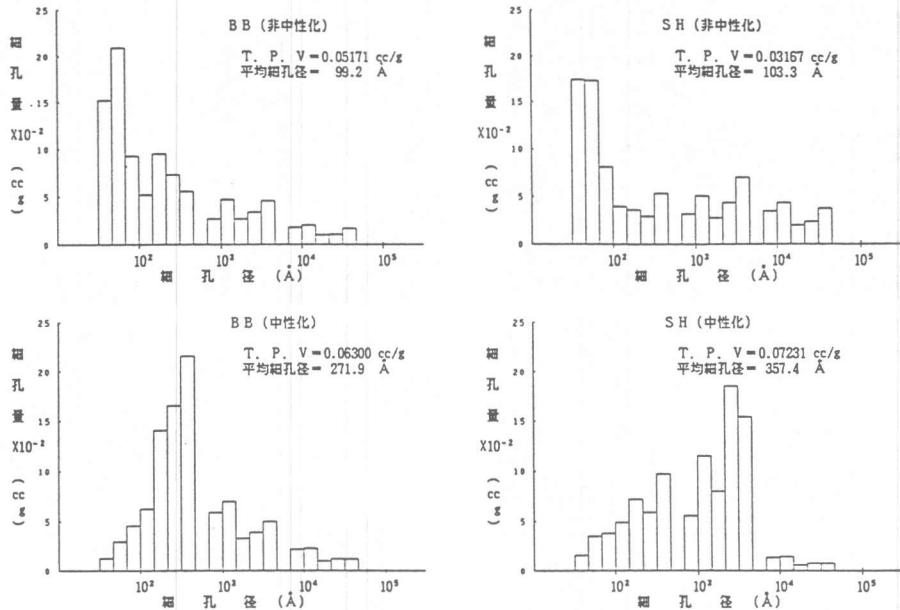


図-4 ポア分布

4.まとめ

スラグ高含有セメントを用いたコンクリートで、35年間屋外に暴露した供試体の耐久性について、種々試験した結果、圧縮強度、内部組織、水和物などからみて、耐久性を十分保持していることを確かめた。しかし、スラグを多量含有しつつ石膏量が多い高硫酸塩スラグセメントのような場合、コンクリートの配合条件、気象、環境条件にもよるが、表面部分のアブサンデン現象が生じやすいのであるので、表面の保護対策を考慮するのが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) O.G.Gjorv:Long-Time Durability of Concrete in Sea Water,ACI Jurnal,January,1971, pp.60-67
- 2) S.Ozaki and N.Sugata:Sixty-Year-Old Concrete in a Marine environment,Concrete in Marine Environment Proceedings Second International Conference,ACI SP-109,PP.587-597
- 3) 依田彰彦 横室 隆：山陰地方における25年経過した高炉セメントC種を用いたRC造建物の耐久性調査、セメント技術年報 39 昭和60年, pp.300-303
- 4) 田中太郎：高硫酸塩スラグセメントに就いて（第4報）シリトールセメントの硬化体に及ぼす接触気体の影響、水準委員会報告 O-2, 日本セメント技術協会, 昭和30年5月, pp.16-20
- 5) J.D Ans und H.Erick:Untersuchungen über das Abbinden hydraulischer Hochofenschlacken,Zement-Kalk-Gips,12,1954,pp.449-459
- 6) 浅野駿吉 石原正一 井上嘉亀：カルシウム・アルミニネート化合物の炭酸化反応、窯業協会誌, 79(10)1971,pp.357-364
- 7) 魚本健人、小林一輔、星野富夫：高炉水碎スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化、第2回コンクリート工学年次演説論文集, 1980,pp.69-72
- 8) 依田彰彦：産業副産物高炉スラグのコンクリート用セメント、混和材、骨材への有効利用に関する実験研究、研究論文、昭和58年9月, 75-77
- 9) H.-G.Smolczyk:Die Hydratationsprodukte Huttensandreicher Zement,Zement-Kalk-Gips, Nr.5,1965,pp.238-246