

論 文

[1089] 高炉水碎スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性

正会員 ○中村信行 (NKK鉄鋼研究所)

正会員 鯉渕 清 (第一セメント技術開発室)

石川陽一 (第一セメント技術開発室)

佐藤和義 (NKK鉄鋼研究所)

1. まえがき

コンクリート混和材として用いる高炉水碎スラグ微粉末はその粉末度の大きいものほど初期強度の改善、高強度化、耐透水性・耐塩素透過性の向上等、コンクリートの各種性能を向上させることができが筆者らによても明らかにされてきた[1~3]。また、スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化の早さは、高粉末度スラグの使用により改善できることが促進試験で確かめられている[4]。一方、最近のスラグ系コンクリートの多様化、高性能化の動向のなかで高粉末度スラグを用いたコンクリートの長期にわたる性能に関する研究例は少ない。

そこで、本研究では粉末度の大きいスラグを混和したコンクリートの強度、中性化、耐海水性などについての長期性能を明らかにすることを目的として、3年間にわたり屋内中性化試験および海洋護岸に供用したコンクリート(コア)について、各種試験を行い検討を加えた。

2. 実験概要

2. 1 屋内環境下における中性化試験

(1) 使用材料および配合 前報[3]ではW/C = 50, 55, 60%、スラグ置換率 = 0, 20, 40, 60%のコンクリートの各種性能試験結果を報告した。本報は、中性化試験についてその後の検討結果を報告するものであり、配合の詳細は前報[3]の通りである。ここでは主要な使用材料および配合条件を表1に示す。

(2) 試験方法 供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱とし、打設後24時間で脱型し、材令7日まで標準(20°C)水中養生を行い、以後 20°C 、60%RHの気乾条件下で屋内曝露した。その後、材令1年および3年でカッターで切断した破断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧し、赤変した部分を未中性化領域としてその面積を測定し、文献[4]による方法で平均中性化深さを求めた。

2. 2 海洋環境下におけるコアコンクリートの各種試験

(1) 使用材料および配合 表2に使用材料および配合を示す。配合の特徴は中性化試験と同様にスラグ粉末度の違いがコンクリートに与える影響を明らかにすることにあるが、粗

表1 コンクリートの使用材料および配合条件(中性化試験用)

	記号	比重	粉末度(cm ³ /g)	備考
普通セメント	O P C	3.16	3160	市販品、スラグ量 4%, SO ₃ 2.0%
標準スラグ	O R	2.90	4060	市販品
高粉末度スラグ	V F	2.90	7570	上記標準スラグを分級したもの
粗骨材	；川砂利 + 硬質砂岩碎石	5~20mm	；細骨材	；川砂 + 山砂 0~5mm
水結合材比(W/C)	50, 55, 60%			スラグ置換率 0, 20, 40, 60%
単位水量	166~172kg/m ³			スランプ 20±2cm, 空気量 4±1%

骨材として高炉スラグ碎石を使用していることが上記2.1の中性化試験の条件と異なる。なお、O P C 単味のコンクリートは比較試験用で実際の工事には使用せず、V F、O R を混和したコンクリートのみを工事に使用した（使用材料の記号は表1、表2の通り。また以下では、スラグを混和したコンクリートを、使用したスラグ記号で表わす）。

(2) 対象構造物 神奈川県川崎市N K K 京浜製鉄所構内（扇町地区）で海洋護岸構造物の工事を1985年12月に実施した。護岸の構造は図1に示すもので、鋼矢板護岸の干溝部の補強用の梁としてスラグ微粉末混和コンクリートを採用したものである。施工後3年目に、最も潮の干溝の変化が激しい、貝殻の付着域近傍からコアを採取した。具体的にはV F、O R の隣接使用箇所各5mの範囲において図1に示すように貝殻の付着限界線から上下15cmの2ヶ所から各3個ずつ $10\phi \times 35\text{cm}$ のコアを合計12本採取した。なお貝殻の付着限界高さは小潮時の最大潮位付近であった。

(3) 試験方法

i) 圧縮強度試験 標準養生供試体による材令7日、28日、91日、180日、1年、3年の試験を行った。また、護岸コンクリートの表面強度をシュミットハンマーによる非破壊試験により測定した。さらに10cmから30cm深さの $10\phi \times 20\text{cm}$ コアコンクリートを強度試験に供した。

ii) 塩素浸透深さ 表面から10cm深さのコアコンクリートを割裂し、破断面に1.0%濃度のフルオレセインナトリウムを噴霧し、ドライヤーで表面を乾燥させた後0.1規定の硝酸銀水溶液をその上に噴霧し再びドライヤーで乾燥させた。この操作を繰返し行うことにより、塩素浸透部分は白色を帶び

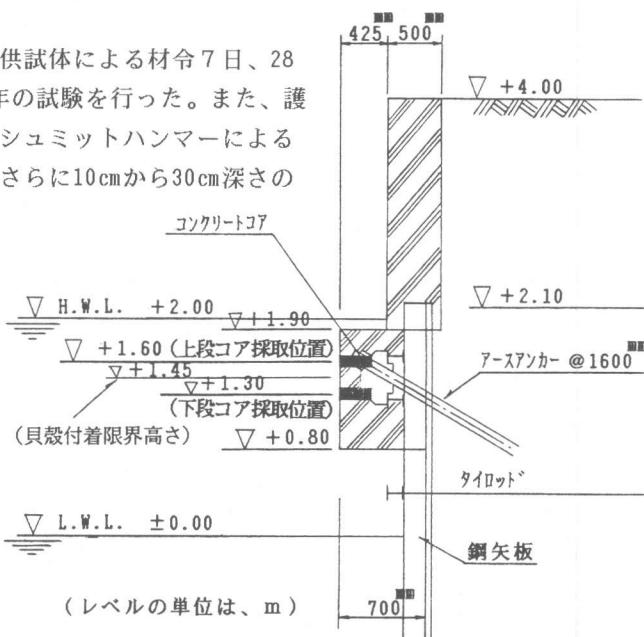


図1 護岸構造物

表2 コンクリートの使用材料および配合（海洋護岸用）

W/C (%)	スラグ置換率 (%)	単位配合量 (kg/m³)				
		結合材	水	細骨材	高炉碎石	A E 減水剤
60	40	300	180	721	1036	0.750
		物理的性質		フレッシュコンクリートの性質		
記号	比重	粉末度(cm³/g)	スランフ° cm	空気量 %	温度 °C	
O P C	3.16	3210	16.5	5.2	11.0	
O R	2.91	4120	17.9	5.5	10.0	
V F	2.91	8130	17.8	4.5	10.0	
粗骨材；高炉スラグ碎石 5~20mm(JIS A 5011), 表乾比重 2.56, 吸水率 2.2%						
細骨材；山砂 0~5mm, 表乾比重 2.60, 吸水率 1.6%						

たオレンジ色に発色し、未浸透部分は緑色の蛍光を発することから塩素浸透部分が判別できる。塩素イオン浸透深さは変色域の面積測定から平均浸透深さとして求めた。

- iii) 塩素イオン濃度 コアコンクリートを表面から2cmずつ輪切りにし、これを乾燥した後振動ミルにより149μm以下に微粉碎したものを試料とした。塩素イオン濃度の測定はJC I法に準拠し、全塩素、および可溶性塩素を吸光光度法により求めた。
- iv) 細孔径分布 上段から採取したコアコンクリートの表層部(約1cm深さ)と深層部(約30cm深さ)のモルタル部分の細孔径を水銀圧入法により求めた。
- v) 反応生成物 塩素イオン濃度測定用に調整した試料を用い、粉末X線回折(XRD)により反応生成物の同定を行った。
- vi) 中性化 コアコンクリートの割裂破断面を用いてフェノールフタレイン法による中性化深さの測定を行った。

3. 実験結果および検討

3.1 スラグ粉末度および置換率が中性化に及ぼす影響

図2に材令1年と3年におけるスラグ置換率と中性化深さの関係を示す。その結果、W/C=50~60%の範囲でORは20%、VFは60%まで置換しても普通コンクリートとほぼ同等の中性化抵抗性を確保できる。また、材令3年のスラグ置換率60%の中性化深さは粉末度が大きいVFはORの約6割であり、中性化に対する抵抗性が大きいことがわかる。これらは促進試験の結果[4]と同様な傾向である。

3.2 海洋環境下のコアコンクリートの諸特性

(1) 標準養生と実構造物での圧縮強度の関係 図3に標準養生供試体による圧縮強度の経時変化を示す。また図4に材令3年における標準養生供試体強度、コアコンクリート強度、さらに参考のため実構造物のシュミットハンマーによる表面強度の比較を示す。

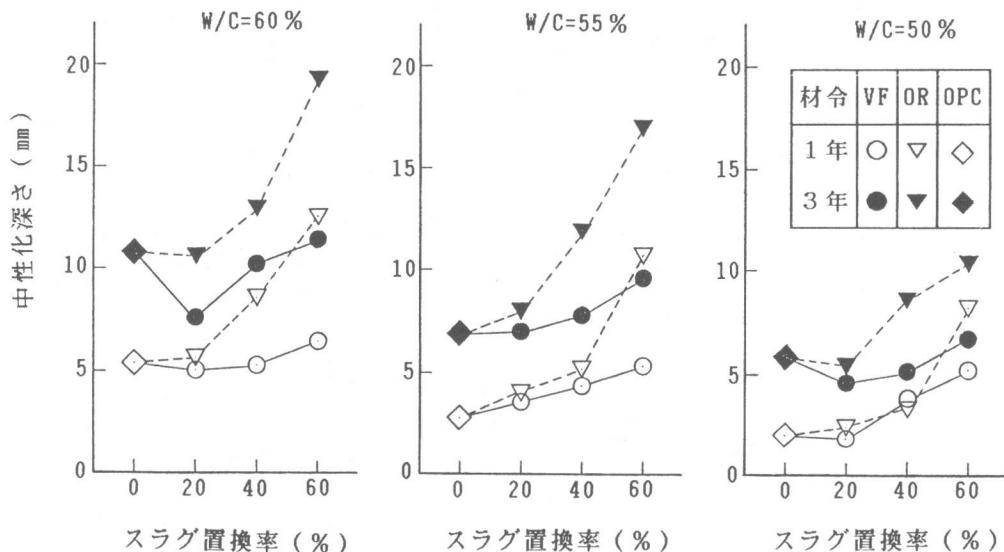


図2 スラグ置換率と中性化深さ

- i) 標準養生供試体では前報[3]と同様にVFが材令7日でOPCとほぼ同等の強度を発現し、材令28日以降はOPCの強度を10%程度上回った。一方、ORは材令7日ではOPCより20%低いが28日以降はOPCと同等の強度発現性を示した。しかし、材令1年から3年における強度の増進はどの配合においてもみられなかった。
- ii) シュミットハンマーによる参考値ではあるが表面強度はORが19.0MPa、VFが19.7MPaと標準養生供試体に比べ50%以下と小さい。一方、10cmから30cm深さのコアコンクリートの強度は若干のバラツキはあるものの標準養生供試体に近い値(OR 40.0MPa、VF 45.5MPa)であった。このことは表面近傍のコンクリートが特に劣化していることを意味し、その劣化深さは目視観察による白色の変色域(表3)と考えられる(健全な部分は濃灰色であり、明瞭に区別できた)。なお、白色の変色域はコア採取高さでその深さが異なり、貝殻の付着する下段ではその深さが小さく、さらに高粉末度スラグの方が小さい。またシュミットハンマーによる強度はコアの上段、下段の位置の差がほとんどなく変色域の深さとの相関はみられなかった。

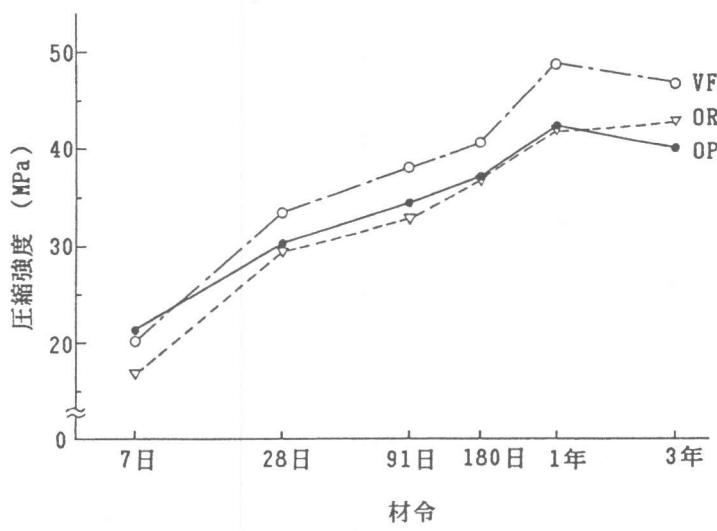


図3 圧縮強度の経時変化

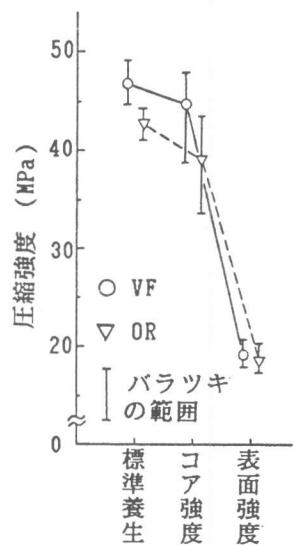


図4 圧縮強度比較

表3 コンクリートコアの分析結果一覧

コンクリート種別	コア採取位置	白色劣化深さ	塩素浸透深さ(mm)	試料採取深さ(mm)	塩素イオン濃度(%)		X線回折による生成物の同定		
					全塩素	可溶性	フリーデル氏塩	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
VF	上段	23.0	10.3	表層 0~17	0.275	0.236	○	△	◎
				中層 20~37	0.015	0.001	×	○	△
	下段	6.8	5.3	表層 0~17	0.354	0.295	◎	×	◎
				中層 20~37	0.022	0.001	×	○	△
OR	上段	34.3	13.9	表層 0~17	0.305	0.282	○	×	◎
				中層 20~37	0.020	0.001	×	○	×
	下段	9.3	6.2	表層 0~17	0.398	0.346	○	△	◎
				中層 20~37	0.022	0.006	×	○	△

同定記号 ◎ 強 ○ 有 △ 少 × 無

(2) 塩素浸透深さと塩素イオン濃度

塩素浸透深さは、ORよりVFの方が小さく、スラグの高粉末化の効果が認められた。

また、上段は下段に比べて、深くまで塩素が浸透していた。しかし、ORでも最大塩素浸透深さは材令3年で13.9mmと小さく、既報[2]の室内実験を裏づける結果である。

一方、塩素イオン濃度は、VF、ORとも表層(0~17mm)で約0.3~0.4%(全塩素)範囲にあり、中層(20~37mm)までは塩素が浸透していないことがわかる。

(3) 細孔径分布 モルタル部分における細孔半径と累積細孔量の関係を図5に示す。細孔量に及ぼすスラグ粉末度の違いは見られず、表層部と深層部の違いが大きい。表層部の累積細孔量が深層部に比べて多く、特に細孔半径0.01~1μmの間の細孔量に差がみられる。

これは、石灰の溶出などにより表層部において細孔量が増大し、組織の劣化が進行していることを示すものである。また、表面強度が小さいのは、上記の細孔量の増大が主因と考えられる。

(4) 反応生成物 表層部(深さ0~17mm)と中層部(深さ20~37mm)のXRD解析結果を図6に、その生成物の同定結果を表3に示す。生成物は、OR、VFとも同じであり、表層部にはフリーデル氏塩($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$)のピークがあらわれ、侵入塩素を表層部で固定していることが

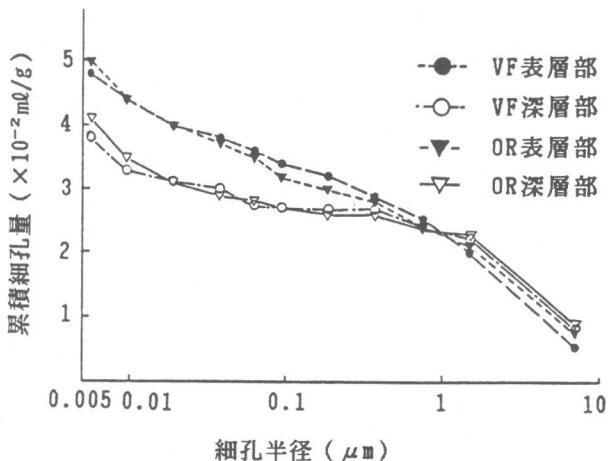


図5 細孔半径と累積細孔量

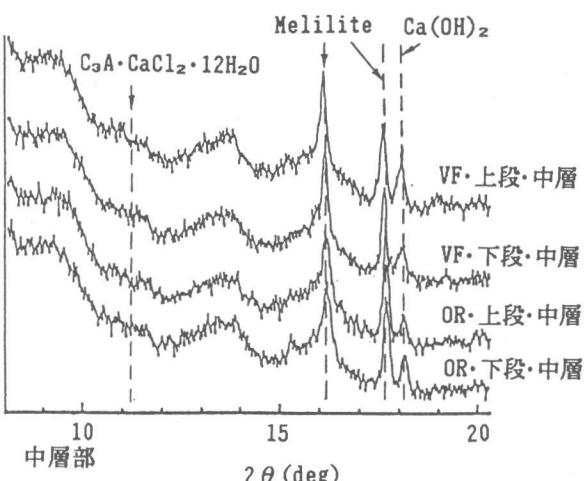
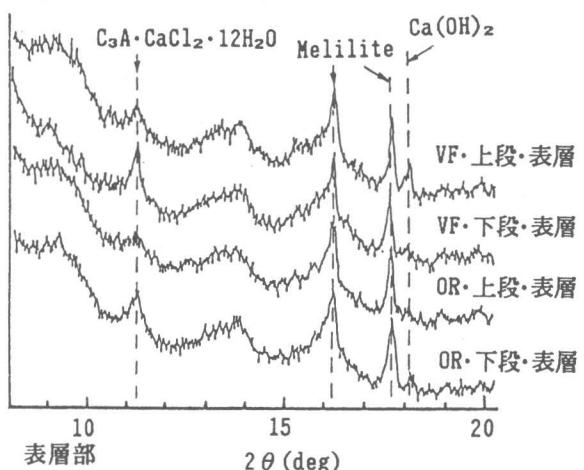


図6 XRD解析結果

わかる。また表層部は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークが小さく、その炭酸化による CaCO_3 のピークがみられる。一方、中層部では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークが大きく、 CaCO_3 のピークがみられない。耐海水性で問題にされるエトリンジャイト、モノサルフェートという膨張性水和物のピークはどの層においてもみられなかった。

(5) 中性化 コア供試体は表層の白色部分を含めフェノールフタレインにより赤紫色を呈し、中性化はみられない。XRDによると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は少ないが、常時湿潤・乾燥が繰返されるために中性化部分へのアルカリイオンの移動と高炉スラグ碎石からのアルカリ溶出などがあるためと考えられる。

4. 結論

スラグ粉末度の違いが中性化、耐海水性に与える影響を明らかにする目的で、3年間の屋内中性化試験と海洋護岸構造物のコアコンクリートの各種試験を行い、以下の結果を得た。

- 1) ブレーン値約 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高粉末度スラグは標準スラグに比べ中性化に対する抵抗性が大きく、60%までの置換率では普通セメント単味のコンクリートと同等である。
- 2) 干溝帯での海洋曝露コンクリートは表層部近傍は劣化するが、高粉末度スラグはその劣化深さを小さくする。しかし標準スラグでも塩素イオン浸透の抵抗は大きく、スラグ微粉末を使用したコンクリートの耐海水性能は良好であることが確認できた。

(参考文献)

- [1] Nakamura,N, Sakai,M, Koibuchi,K and Iijima,Y ; Properties of High-Strength Concrete Incorporating Very Finely Ground Granulated Blast Furnace Slag, FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, ACI SP-91, 1986, pp.1361~1372
- [2] 中村信行、坂井正美、鯉渕清、石川陽一：高炉水砕スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの研究、第八回コンクリート工学年講論文集、1986, pp.289~292
- [3] 中村信行、坂井正美、鯉渕清、石川陽一：高炉水砕スラグ微粉末を用いたモルタル及びコンクリートの諸特性、第九回コンクリート工学年講論文集、1987, pp.87~92
- [4] 長瀧重義、大賀宏行、荒井俊晴：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム、土木学会、1987, pp.143~150