

[13] 急冷高炉スラグ細骨材の高強度コンクリートへの適用に関する基礎研究

正会員 長滝重義 (東京工業大学)

正会員○坂井悦郎 (同上)

沢田 勝 (同上)

1. まえがき

急冷高炉スラグ砂¹⁾特に水砕砂をコンクリート用細骨材に適用すべく数多くの研究がなされるとともに、使用基準作成に関する検討も加えられている。水砕砂を細骨材として用いたコンクリートは、その潜在水硬性のため湿潤状態では力学的性状が著しく増進し、乾燥収縮の値も川砂を用いたものに比して小さいなどの特徴を有しているが、一方乾燥状態に置かれると力学的性状が低下することやオートクレーブ養生の効果が少ないなどの欠点も指摘されている²⁾³⁾。水砕砂をプレキャスト製品特に高強度プレキャスト製品に適用することについては、水砕砂の品質が脆弱であること、初期強度が低いこと、オートクレーブ養生の効果が少ないこと等により一般的には不利と考えられる要因が多いが詳細な検討はほとんどなされていない。本研究は、これらの観点から養生条件や高性能減水剤の添加量および遠心締め固め効果が水砕砂および試作段階にある風砕砂等の急冷高炉スラグ砂を用いたコンクリートの力学性状に及ぼす影響について、スラグ砂の反応と関連させ考察を加え、それらをもとに急冷高炉スラグ砂の高強度コンクリートへの適用性について、川砂の場合と比較検討したものである。

2. 実験概要

(1)使用材料 セメントは普通および早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材としては、水砕砂(S)、風砕砂(F)と比較のために富士川産川砂(R)を用い、さらにこれらの混合砂(混合比 75:25、50:50、25:75)も使用した。なお、急冷高炉スラグ砂の化学組成を1表に、細骨材の物理的性質を2表に示した。また、粗骨材としては西多摩産碎石(比重2.64、最大寸法20mm)を用い、高性能減水剤としては、 β -ナフタレンスルホン酸ナトリウムホルムアルデヒド縮合物(以下SPと略す)を用いた。

1表 急冷高炉スラグ砂の化学組成(%)

略記	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	TiO ₂	T.S	ガラス化率
S	41.94	33.32	13.30	7.51	0.89	0.60	1.27	1.27	73.8
F	41.29	33.75	13.98	7.44	0.62	0.52	1.04	0.98	67.2

2表 細骨材の物理的性質

	略記号	比重	吸水率(%)	F.M.
川砂	R	2.62	1.43	304
水砕砂	S	2.90	0.56	280
風砕砂	F	2.93	0.39	266

3表 養生条件

略記	養生条件
N-7	水中養生(20℃)7日
N-28	水中養生(20℃)28日
S ₄₀ -1	蒸気養生(40℃10h)直後
S ₄₀ -28	蒸気養生後水中養生28日
S ₆₅ -1	蒸気養生(65℃3h)直後
S ₆₅ -28	蒸気養生後水中養生28日
AC	蒸気養生(65℃3h)後 オートクレーブ養生(180℃5h)

4表 遠心締め固め方法

回転数(rpm)	138	256	497	550
遠心力(g)	2.0	6.0	22.0	27.0
締め固め時間(分)	1.0	2.0	2.0	1.0

3. 実験方法

(i) 配合 単位セメント量400、450、500kg/m³、高性能減水剤添加量0.5%とし、スランブ8±1cm、空気量2±1%となるよう配合を定めた。また、単位セメント量450kg/m³の場合、SPの添加量を0.3、0.75、1.0、1.2%と変化させた。

(ii) 強度試験 $\phi 10 \times 20$ cmの供試体を3表に示す各条件で養生したものについて強度試験を行なった。さらに4表のような条件で遠心締め固めを行なった外径20cm、厚さ4cm、高さ30cmの供試体を水中養生28日後強度試験した。

3. 結果と考察

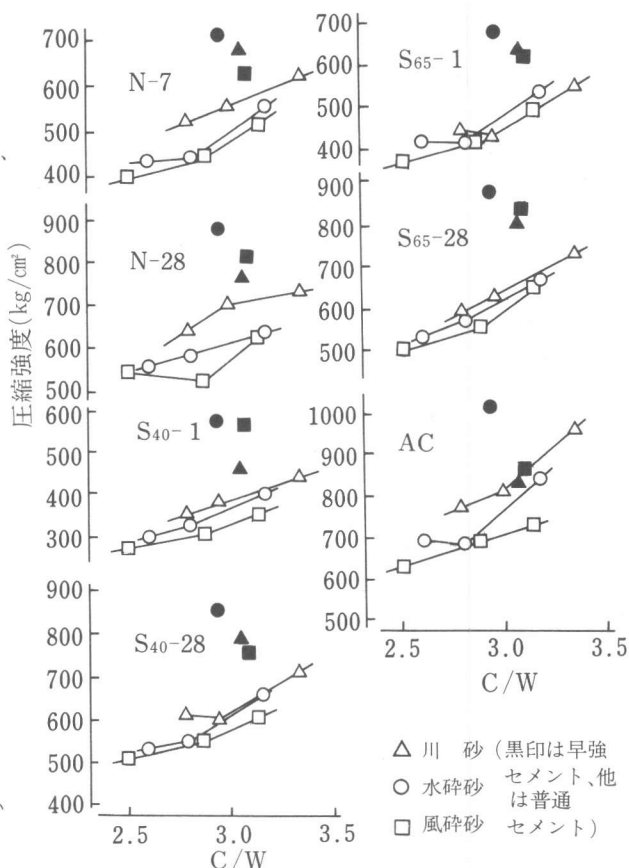
(1) 強度特性 SP添加量0.5%、単位セメント量400、450、500kg/m³とした場合について各種養生条件での圧縮強度試験の結果は1図に示すようであった。普通セメントを用いた場合、N-7、N-28において

水砕砂、風砕砂とも川砂を用いたコンクリートに比べて圧縮強度は低くなっている。水中養生でセメント水比が小さい場合には水砕砂の潜在水硬性により強度増進が著しいことをすでに報告したが⁴⁾、セメント水比が大きい所では潜在水硬性が発揮されにくくなっていると考えられる。ACにおいても、川砂を用いた場合に比べて急冷高炉スラグ砂を用いたコンクリートの圧縮強度は低くなっている。それに対し、SCの場合には細骨材によるコンクリートの強度発現性状にそれほど差は見られない。早強セメントを用いた場合、各養生とも細骨材の種類による圧縮強度の差はなく、むしろ水砕砂を用いた場合の方が高い圧縮強度を示している。水砕砂を用いた場合には、従来高強度は得られないとされて来たが、1図に示されるように高強度の確保が可能であり、早強セメントを用いたACにおいては、 1022 kg/cm^2 が得られた。なお、良質の川砂を用いた場合に比べて、急冷高炉スラグ砂を用いたコンクリートは全般的に圧縮強度が低くなっており、次にこの点を改善すべく混合砂、SP添加量について検討を加えた結果を示す。

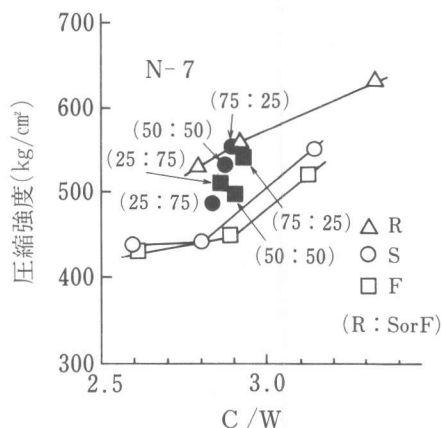
2図は混合砂を用いたコンクリートN-7の圧縮強度試験の結果である。混合砂では、川砂と急冷高炉スラグ砂を用いたコンクリートの圧縮強度の中間の値を示しており、川砂を25%程度スラグ砂で置換した混合砂を用いたコンクリートは、川砂を用いた場合とほぼ同一の圧縮強度を示している。

一方、SP添加量を変化させた場合の1例を3図、4図に示す。3図は単位セメント量 450 kg/m^3 とし、SP添加量を変化させ、結果的にセメント水比を変化させた場合の強度性状を示したものである。傾向は単位セメント量の変化でセメント水比を変化させた1図と酷似している。ただし、SP添加量の増加による単位水量の減少は、0.75%添加以上ではそれほど大きくないが、とくに水砕砂を用いた場合に、単位水量の減少の割合に比べて、圧縮強度の増加が著しくなっており、スラグ砂の反応と関連しているものと思われる。また4図は同一資料をSP添加量の観点から整理したものであるが、N-28において、SP添加量の増加とともに、急冷スラグ砂を用いたコンクリートの圧縮強度は増大するが川砂を用いたものと同等の値は示していない。しかし、ACにおいて水砕砂を用いたコンクリートは、とくにSP添加量の増大による強度増進が著しく、SP添加量1.0%においては川砂を用いたものと同等の圧縮強度を示している。また、混合砂(50:50)を用いたコンクリートの圧縮強度はN-28、ACともSP添加量の高いところで、川砂を用いたものと同等の値を示している。

静弾性係数は同一圧縮強度において、急冷スラグ砂を用いたコンクリートの方が川砂を用いたものに比べて、

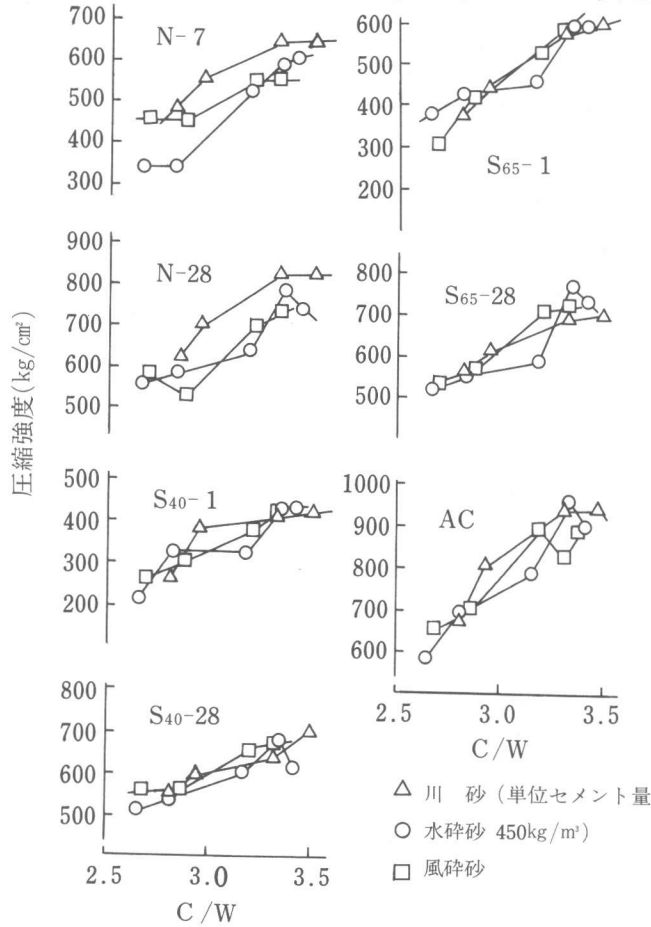


1図 各種養生条件におけるコンクリートの強度発現性状



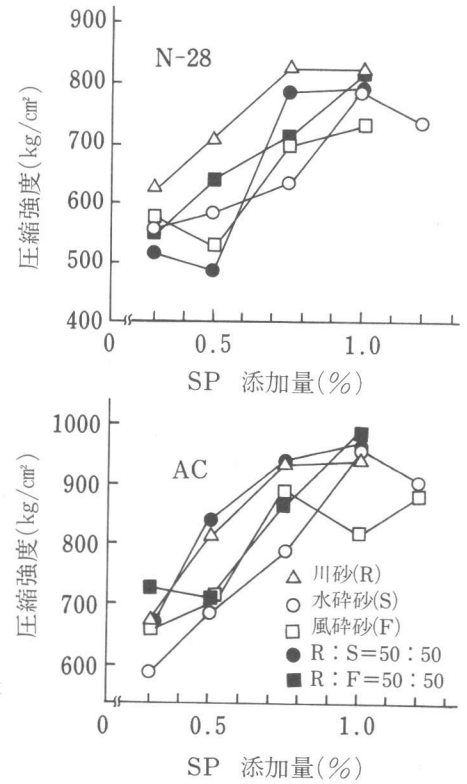
2図 混合砂を用いたコンクリートの圧縮強度

高い値を示している。しかし、従来から述べられているように圧縮強度の増加の割合に静弾性係数は増加せず、



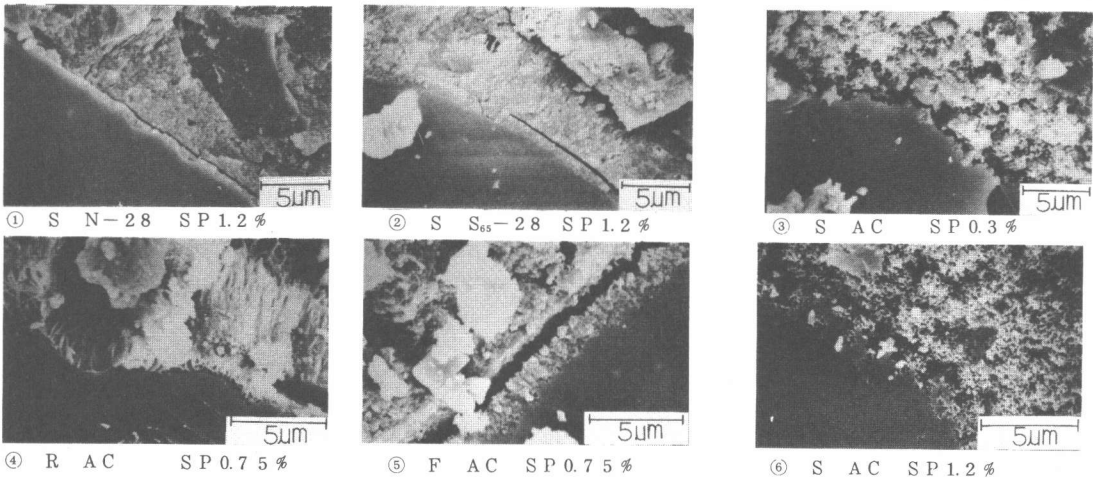
3図 コンクリートの強度発現性状

オートクレーブ養生では他の養生に比べて低くなる傾向を示している。



4図 高性能減水剤の添加量がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

(2) スラグ砂の反応 5図は供試体モルタル部分の破断面の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真である。水中養生において水砕砂を用いたコンクリートの強度発現性状がセメント水比の小さい場合と比べて異なるのは①に示すように水砕砂の周囲に厚い水和反応層が観察されず潜在水硬性が発揮されにくくなっているためと考えられる。蒸



5図 細骨材周囲に生成される水和反応層のSEM写真

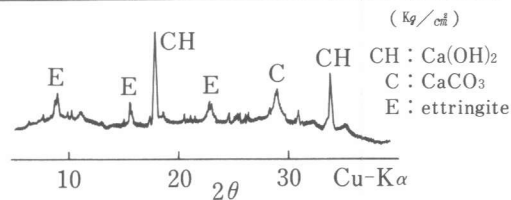
気養生を行うと水砕砂コンクリートと川砂を用いたコンクリートは同一の圧縮強度を示すが、②に示すように水砕砂の周囲に厚い水和反応層が生成しており、水砕砂の潜在水硬性が発揮されたためである。また、③と④から明らかなようにオートクレーブ養生では水砕砂はSP添加量が高くなると、かなり激しく反応するようになり、このためセメントペーストと細骨材の付着が増大し、川砂コンクリートと同等の圧縮強度を示すようになると考えられる。川砂は④に示すようにほとんど反応しておらず、風砕砂は⑤のように水和反応層は生成しているが、水砕砂ほど激しい反応は生じていない。なお、セメント水比の大きい所で水砕砂の潜在水硬性が発揮されにくいのは、過剰な $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が供給され緻密な水和層を形成し、以後の反応を抑制するためであろう。

(3) 速心締め固め効果 速心締め固めコンクリート

の水中養生28日後の圧縮強度と静弾性係数を標準養生と比較して5表に示した。静弾性係数には、細骨材の種類、速心締め固めによる差は見られない。しかし、急冷高炉スラグ砂を用いたコンクリートの圧縮強度については、川砂を用いた場合と比べて速心締め固めの効果はあまり現われていない。これはしぼり出される水量はどの供試体についても、ペースト部分から考えてあまり差はなく、むしろ強度試験後とくに水砕砂を用いた供試体において観察される白色析出物が原因と考えられる。この白色析出物により供試体が不均一となり、速心締め固めの効果が減じられたのであろう。6図にその粉末X線回折図を示したが、それによると白色析出物はエトリンガイト、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化した CaCO_3 であり、供試体のかなり内部でも炭酸化している。従って、他のモルタル部分とは微細構造もかなり異なっていると考えられる。

5表 速心締め固めコンクリートの強度特性

セメント	細骨材	SP添加量(%)	圧縮強度			静弾性係数($\times 10^6$)	
			標準養生	速心円筒	速心/標準(%)	標準養生	速心円筒
普通セメント	R	0.5	700	815	116	4.08	4.32
		1.0	731	835	114	3.94	4.02
	S	0.5	676	632	94	4.52	4.42
		1.2	751	819	109	4.39	4.76
	F	0.5	587	630	107	4.55	4.18
		1.0	701	641	91	4.61	5.16
早強セメント	R	0.5	784	766	98	4.20	4.23
	S	0.5	746	759	102	4.46	4.27
	F	0.5	768	720	94	4.68	4.49



6図 白色析出物の粉末X線回折図

なお、早強セメントの場合には、しぼり出される水量も僅かであり、速心締め固めの効果はほとんど見られない。

4. まとめ

急冷高炉スラグ砂を高強度コンクリートへ適用することは可能であるが、川砂と同等の圧縮強度を得ようとする場合には次のことに注意をする必要がある。セメント水比の大きい所で、水中養生においては水砕砂の潜在水硬性はあまり発揮されず、蒸気養生で可能となる。オートクレーブ養生における水砕砂の反応はSP添加量の増加により激しくなり強度増進が著しい。また、混合砂でSP添加量を増加させた場合は、すべての養生において、川砂を用いたものと同一の圧縮強度を示すが、風砕砂単独では川砂を用いたコンクリートと同等の圧縮強度を得ることは難しい。なお、速心締め固め効果は、急冷スラグ砂を用いた場合、それほど期待できず、この点を考慮する必要がある。最後に、本研究は鉄鋼連盟コンクリート用高炉スラグ細骨材標準化研究委員会活動の一環として行なったことを付記する。

参考文献

- 1) 岸谷・友沢・沼田・第1回コンクリート工学年次講演会論文集、213-216(1979)
- 2) 長滝・米山・高田・第1回コンクリート工学年次講演会論文集、193-196(1979)
- 3) 杉木・戸田・栗原・江藤・セメント技術年報、31、152-155(1977)
- 4) 長滝・高田・亀田・セメント技術年報、33、172-176(1979)
- 5) M. Okushima, R. Kondo, H. Muguruma and Y. Ono, Proc. 5th Intl Symp. Chem. of Cement, Tokyo N (1969)p419.