

製鉄スラグのコンクリート杭材料への利用

The Utilization of the Steelmaking Slags for the Concrete Pile Production

大阪大学理学研究科 ○西脇 醇
(株) ジオトップ 藪内 貞男

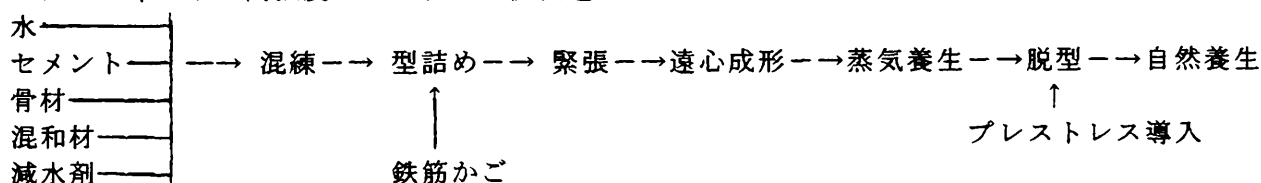
1. はじめに

鉄鋼スラグの土木建築用材としての利用は、セメント原料、路盤材、埋め戻し材などの強度や耐久性に関する要求が低い分野が主となっている。資源循環社会が始まり他のリサイクル材との競合も見られる現在において、鉄鋼スラグの用途拡大のためには、例えば、水和反応熱が小さい高炉スラグ微粉末がマスコンクリート製造に際しては不可欠である様に、鉄鋼スラグの持つ固有の性質を活かした付加価値の高い利用法の開発が幅広い分野で必要である。

ここでは、コンクリートプレハブ構造材の一つであるコンクリート杭の製造において、原料に鉄鋼スラグ利用を検討した結果を報告する。

2. コンクリート杭製造工程および杭原料に望まれる性質

プレキャストの高強度コンクリート杭製造工程の概略を下に示す。



コンクリート杭は通常のコンクリート成形品と比べると、遠心成形→蒸気養生（あるいはオートクレーブ養生）の工程を経ること、約 100N/mm^2 の圧縮強度を持つ高強度コンクリートであること、配筋に緊張応力が負荷されていることが特色である。したがって、杭製品の原料に鉄鋼スラグを利用するためには、スラグの性質が以下の事柄に有効に作用することが望まれる。

- 1) 水/セメント比が30%以下の非常に硬練りのコンクリートであること。
- 2) 遠心成形のため骨材分離が生じ易いこと。
- 3) 高温養生が行われること。
- 4) 短期養生後の脱型時に高強度を発現していること。

3. 製鉄スラグ細骨材の利用

製鉄スラグは、現状では、路盤材や埋め戻し材などに大半が使用され、その特徴を生かした利用がなされているとはいいい難い。製鉄スラグの特徴を生かした利用法としては、製鉄スラグは高炉スラグより FeO 量、 CaO 量が高く $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比は小さいことに着目したフェライトセメント（耐硫酸塩セメント）の原料への利用、Free-CaO の速硬性や膨張性を利用するポルトランドセメントとの混和材料（速硬膨張セメント）、炭酸固化反応を活用した固形体製造、塩基度の小さいフライアッシュとの複合による FS コンクリートブロックの製造、構成成分の化学的性質を利用する肥料や土壌改良材、水質・海底浄化材、あるいは著者らによる膨張性を利用した杭施工法など、いくつかの用途開発が行われ注目されているが、それぞれ大規模の利用に至っていない。

製鉄スラグ骨材を天然碎石の代替としてコンクリート骨材に利用する例は非常に少なく、特に高強度コンクリートへの適用は見当たらない。以下に、製鉄スラグ細骨材の杭材料への利用を検討した二三の結果を述べる。

入手した未エージングの製鉄スラグ細骨材（5 mm under）を $100\text{mm}\Phi \times 200\text{mm h}$ の型枠中に充填して種々の環境下で膨張率を測定した結果を Fig. 1 に示す。水中より蒸気中の方が、また載荷（金属蓋）の無い方が膨張が大きく、 80°C の蒸気中では最初の1日で著しく膨張すること

Atsushi Nishiwaki: Graduate School of Science Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka Japan 560-0043

が観察された。

常圧蒸気養生法でコンクリート杭を製造する工程では、石膏系混和材を使用することによってエトリンガイト生成反応にともなう膨張が組織の空隙を埋める結果、初期強度が増大する。

Table 1 の配合のコンクリートに関して、細骨材の膨張性の強度発現への影響を調べた結果を Fig. 2 に示す。エージングスラグより膨張性のある未エージングスラグの方が強度が高くなるという結果が得られた。製鋼スラグの置換率の増加により強度の低下が認められるが、時間経過とともに強度の増加が見られるので、高温養生によって CaO や MgO の水熱促進が行われても、致命的な悪い影響をおよぼすとは考えられない。今後骨材の粒度分布の調整などによって、コンクリート組織の不均一性を改善して緻密化を計れば、製鋼スラグ細骨材の利用は可能であると思われる。

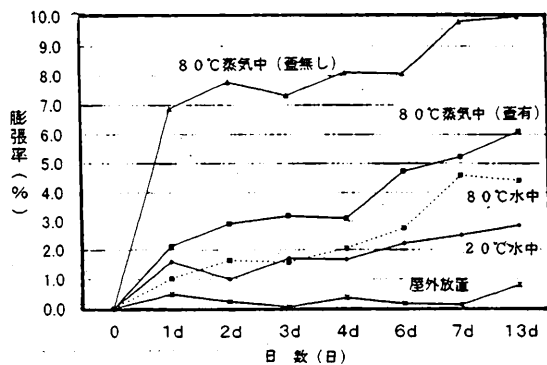


Fig. 1 製鋼スラグの膨張の経時変化

Table 1 製鋼スラグ置換コンクリートの配合 (kg/m^2)

セメント	水	混和材	細骨材	粗骨材	減水剤
460	115	36.8	716	1196	6.6

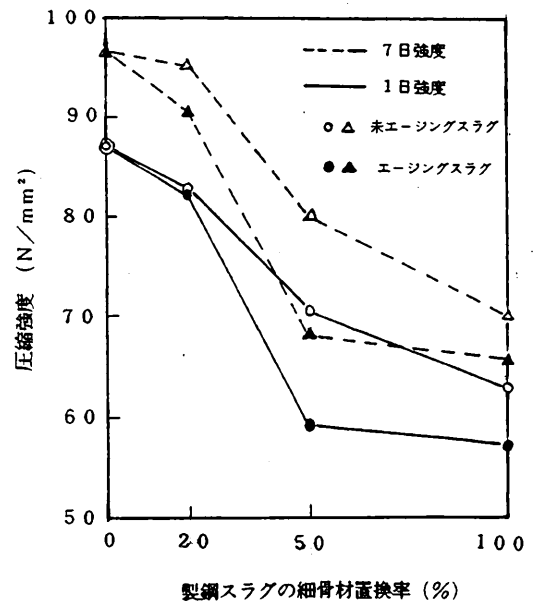


Fig. 2 圧縮強度におよぼす製鋼スラグ細骨材の影響

次に、コンクリート杭の製造現場で細骨材の半量をフェロニッケルスラグ(FNS)に置き換えるのに成功した実例を述べる。Table 2, Table 3 および Table 4 に、骨材の品質、コンクリートの配合および製品の圧縮強度を示す。FNS は絶乾密度の高い細骨材であるので、成型時の骨材分離を抑制するために微粉分量を高くした。また、化学組成は SiO_2 含有量が高いので、この結果、緻密なコンクリート組織となり、Fig 3 に示すように耐薬品性試験において非常に優れた結果が得られた。FNS は風砕であるために球形粒子を多量に含むので水/セメント比の低減に寄与し、圧縮強度が増大して強度のバラツキが小さくなった。

Table 2 フェロニッケル細骨材の品質

		絶乾密度 (g/cm^3)	吸水量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	微粉分量 (%)	粘土塊量 (%)	粗粒率 (%)
フェロニッケル 細骨材		2.97	1.01	1.93	64.9	6.5	0.00	2.72
普通細骨材	石灰石砕砂	2.61	2.36	1.52	58.4	0.82	0.00	6.70
粗骨材	硬質砂岩砕石	2.66	0.89	1.76	66.2	3.00	-	2.97

Table 3 フェロニッケル置換コンクリートの配合 (kg/m³)

セメント	水	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
			FNS 碎石		
470	113	47	358	341	1222
				1222	6.60

Table 4 フェロニッケル細骨材配合コンクリートの圧縮強度

番号	試験項目										
	圧縮強度(N/mm ²)			ヤング係数 (KN/mm ²)				ポアソン比			
	材齢										
	1日		7日		1日		7日		1日		7日
1	1	89.1		95.4		47.6		49.0		0.22	0.22
	2	87.4	86.7	97.0	94.9	47.6	46.9	48.0	48.6	0.24	0.22
	3	86.4		92.3		45.6		48.7		0.19	0.22
2	1	87.4		93.7		46.9		49.8		0.22	0.22
	2	84.5	87.9	97.5	94.1	47.9	47.7	49.7	49.2	0.21	0.22
	3	90.1		91.0		48.4		48.2		0.23	0.22
3	1	86.5		91.0		44.4		48.1		0.20	0.22
	2	88.4	86.5	92.7	98.2	46.5	46.1	48.1	48.6	0.20	0.20
	3	84.6		96.0		47.5		49.5		0.20	0.22
平均値		86.8		94.1		46.9		48.8		0.21	

4. 高炉スラグの利用

高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、セメントの一部と置換して使用すると、水和反応の発熱が小さいこと、コンクリート組織を緻密化し水蜜性を向上すること、アルカリシリカ反応を抑制すること、流動性を良くしワーカビリティを改善ことなどの特長を持つ。

	セメント	水	高炉スラグ	C/W	C/W+B	混和材	細骨材率	混和剤
	C	W	B	(%)	(%)	K	S/a(%)	Mt
A	450	103.5	-	23	23	36	38	6.30
B	405	103.5	45	25.6	23	36	38	6.30
C	405	99.5	45	24.6	22.1	36	38	6.40

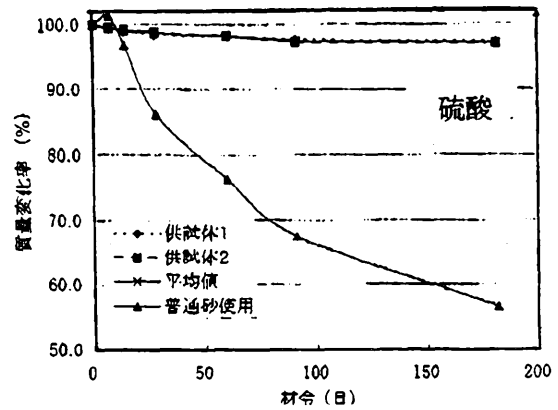


Fig. 3 FNS 置換スラグの耐薬品試験

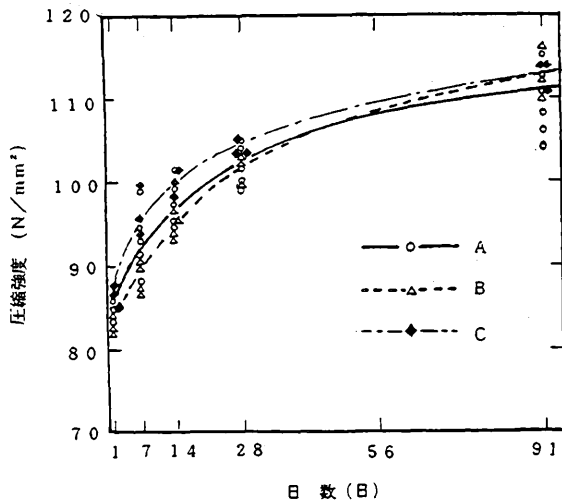


Fig. 4 圧縮強度におよぼす高炉スラグ微粉末添加の影響

杭材料に使用することによって、硬練りコンクリートの作業性の改善と配合水量の低減による高強度化が期待できる。セメントの10%をブレイン値6000の高炉スラグで置換した場合の配合と圧縮強度をFig. 4に示す。僅か10%の置換によって作業性がよくなり、骨材分離もブレイン値がいこともあって生じなかった。同一水/結合材比の配合で圧縮強度を比較すると、スラグ微粉末の置換によって初期強度は低くなるが、強度の伸びが良いので4週間経過した後は高くなる傾向が認められた。スラグ置換とともに配合水量をほぼ同一コンスタンシイになるように低減すると強度は増加する。ブレイン値4000の微粉末についても同様な結果が得られたが、骨材分離特性は6000に比べると少し悪いと思われる。

高炉スラグ骨材

高炉スラグ粗骨材は、徐冷スラグを破碎した後に粒度調整したもので構造は結晶質であるのに対して、高炉スラグ細骨材は主として水冷スラグを破碎後形状や粒度を調整したもので構造はガラス質である。したがって、セメントなどの結合材の水和反応におよぼす影響が異なる。

Table 5 の配合において、天然砕石粗骨材を高炉スラグ粗骨材で置き換えたコンクリートの材令1日強度を Table 6 に示す。作業性はスラグ置換率によって大きな変化は認められなかったが、圧縮強度は置換率が大きくなると低下した。これは、高炉スラグ粗骨材は比重の大きい骨材では天然骨材の優良品と遜色のない強度を発現すると言われているが、供試材は比重が 2.46 と小さく、骨材自体の強度が弱いことによると考えられる。

Table 7 に、細骨材を高炉スラグ細骨材に置き換えた場合の材令1日および7日の強度を示す。置換率が大きくなると若干強度が低下する傾向が認められるが、50%程度の置換は問題ないと考えられる。作業性は置換率が增大するとコンクリート円筒試験体の内面が柔らかくなる傾向が見られた。これは、入手した細骨材が天然細骨材の粒度調整用のもので粗粒率が高いことによる結果と考えられる。

Table 5 高炉スラグ骨材置換コンクリートの配合 (kg/m³)

セメント	水	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
470	106	47	707	1192	6.1

Table 6 高炉スラグ粗骨材置換による圧縮強度の変化 (材令1日)

置換率 (%)	0	25	50	70	100
圧縮強度 (N/mm ²)	83.0	79.3	73.1	70.1	66.6

Table 7 高炉スラグ細骨材置換による圧縮強度の変化 (N/mm²)

置換率 (%)	0	25	50	70	100
圧縮強度 (材令 1日)	83.0	88.0	82.0	85.0	77.7
(材令 7日)		101.2	100.0	98.3	92.5

5. むすび

コンクリート杭は、全国各地でそれぞれの地域の骨材を用いて製造されている。天然骨材の強度や形状は地域毎に様々であるが、高強度コンクリート構造体としての必要な性能を得るために、成型条件、養生条件、配合条件、混和材、減水剤、AE 剤などの調整が行われて生産される結果、品質の地域性はほとんどない。したがって、品質をコントロールできる因子は多いので、鉄鋼スラグがリサイクル材の中でも優れた機能と天然骨材に近い構造をもっていることを考えると、コンクリート製造者とスラグ供給者が緊密な連繋のもとで開発が行われれば、コンクリート杭のような高強度プレキャスト分野でも、有用な材料として活用されるであろう。