論文　高炉スラグ細骨材の固結防止技術

光藤浩之[*1]・吉澤千秋[*2]・高橋智雄[*3]・木之下光男[*4]

要旨：近年，資源の枯渇や環境悪化への懸念から，海砂を中心に天然砂の採取が規制され，その代替に，高炉水砕スラグを破砕し粒度調整した，高炉スラグ細骨材への関心が高まっている。しかし高炉スラグの持つ水硬性により，貯蔵時に固結と呼ばれる硬化現象を引き起こすことが，利用上の大きな障害となっていた。今回，新固結防止剤の添加により，固結にいたる期間を従来の２倍以上に延長できる高炉スラグ細骨材の固結防止技術を開発した。その性能は，４０℃及び８０℃で養生した後の細骨材の粒度測定と，夏季の屋外貯蔵試験で評価した。またコンクリートに及ぼす影響についても調査した。

キーワード：高炉水砕スラグ，高炉スラグ細骨材，水硬性，貯蔵，固結，固結防止剤

1．はじめに

コンクリート用細骨材の多くは河川砂や山陸砂，海砂等の天然砂であるが，近年，環境への影響や資源の枯渇が懸念され，河川砂や海砂を中心に採取規制が進んでいる。

良質な天然砂の入手は困難なため，その代替に高炉水砕スラグを破砕し，粒度調整した高炉スラグ細骨材への関心が高まっている。

高炉スラグは水硬性を持ち，水和反応を起こして硬化する[1),2)]。この水硬性は，高炉セメントや地盤改良材などには不可欠な特性であるが，出荷先等で貯蔵中に水和反応を起こすと粒子同士が接着し，塊状化する固結現象を引き起こす。一度固結すると細骨材として使用できないばかりか，その撤去に多大な労力が必要なため，利用上の大きな障害となっていた。従来から，固結防止剤としてグルコン酸ナトリウム[1),2)]が用いられたが，その効果は不充分であり，長期間安全に貯蔵できる高炉スラグ細骨材の固結防止技術が必要であった。

本研究では，新たな固結防止剤として，グルコン酸ナトリウム誘導体[3),4),5),6)]とポリアクリル酸ナトリウム[7)]を取り上げ，その固結防止効果とコンクリートへの影響を調査した。

2．高炉スラグ細骨材

銑鉄を製造する高炉で副産した溶融スラグに，加圧水を噴射して急冷すると高炉水砕スラグとなる。この高炉水砕スラグを軽破砕し粒度を調整したものが高炉スラグ細骨材である。高炉スラグ細骨材の製造工程の一例を**図-1**に示す。高炉水砕スラグをクラシャーで破砕し、スクリーンで 5mm 以上の粗粒を回収し再破砕する。固結防止剤の希釈液は，スクリーン上の高炉水砕スラグ細骨材に散布する。

＊１　鋼管鉱業㈱　研究所　次長　工修　（正会員）
＊２　鋼管鉱業㈱　技術サービス部　部長　工博　（正会員）
＊３　竹本油脂㈱　第三事業部　研究開発部　工修　（正会員）
＊４　竹本油脂㈱　第三事業部　研究開発部　部長　工博　（正会員）

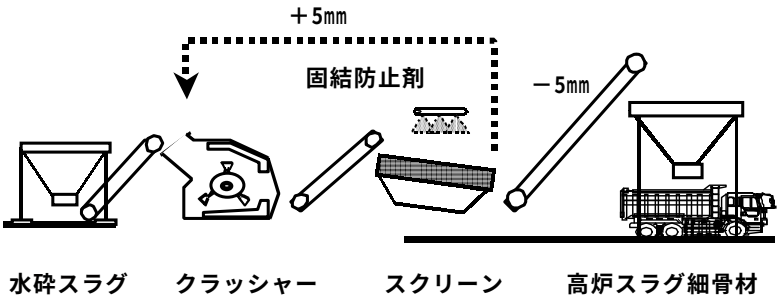
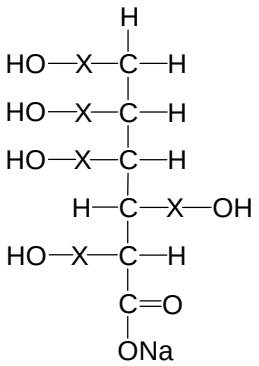


図-1　高炉スラグ細骨材の製造工程の一例

3．固結防止剤

固結防止剤として用いられるグルコン酸ナトリウムは，スラグから溶出するカルシウムと結合し粒子表面に吸着膜を形成し，その後のカルシウム溶出と水和反応を抑制するとされている[2)]。

図-2に示すグルコン酸ナトリウム誘導体は，β＝0のグルコン酸ナトリウムに比べ，アルキレンオキサイドの付加により，主鎖から OH 基までの距離が長く，スラグ粒子表面の吸着膜の拡大が期待できる[5)]。



X:$(C_{\alpha}H_{2\alpha})_{\beta}$

α = 2 or 3, β = 0 to 3

図-2　グルコン酸ナトリウム誘導体

一方、**図-3**に示すポリアクリル酸ナトリウムは，グルコン酸ナトリウムに比べ，質量当たりのカルボキシルイオンの数が多く，スラグから溶出するカルシウムとの結合量の増加により，その後の水和反応を抑制する可能性を持つ。

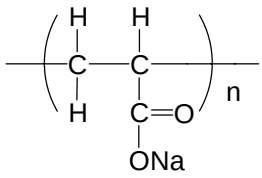


図-3　ポリアクリル酸ナトリウム

4．実験方法

高炉スラグ細骨材の化学成分を**表-1** に，物性値を**表-2**に示す。

表-1　高炉スラグ細骨材の化学組成
（質量%）

CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	FeO	S
43.0	34.0	14.6	5.4	0.5	0.3	1.0

表-2　高炉スラグ細骨材の物性値

		高炉水砕スラグ	高炉スラグ細骨材	JISA5011-1 規格
絶乾密度(g/cm³)		-	2.73	≧2.5
吸水率(%)		-	0.79	≦3.5
単位容積質量（kg/l）		-	1.53	≧1.45
積算篩下割合（%）	4.75mm	99.6	100.0	90～100
	2.36mm	93.9	99.7	80～100
	1.18mm	59.6	86.0	50～90
	0.60mm	20.2	39.5	25～65
	0.30mm	5.1	13.8	10～35
	0.15mm	1.8	5.8	2～15
粗粒率		3.20	2.55	-

4.1 固結評価試験

高炉スラグ細骨材は，**図-1**の製造プラントで粒度調整した後，試験室で固結防止剤の希釈液を添加混合した。固結防止剤の添加量は高炉スラグ細骨材に対し，最大 0.05

質量%で，含水率が10%となる量の蒸留水で希釈した。この高炉スラグ細骨材を，直径100mm,高さ127mmの円筒容器に装入し，10mの高さで貯蔵した荷重に相当する0.15N/mm^{2}の圧力で載荷し，除荷後密閉し，恒温水槽内で養生した[3)]。養生温度は夏季最高温度を想定した40℃と，加速評価を目的とした80℃を選択した[3),4)]。

所定期間養生後，高炉スラグ細骨材の粒度分布を測定し、細骨材の最大粒径である4.75mm以上の発生割合を固結量とした。また,100%固結し供試体が円柱状を保つ場合,固結塊の圧縮強度を測定した[3)]。

水和反応量の測定には，乾燥した試料を粉砕し，熱重量分析を行った[4)]。

高炉スラグ細骨材は屋外で貯蔵されることが多く,降雨により固結防止剤が流失し,効果が減衰する恐れがある。その影響を試験室規模で評価するために、固結防止剤を添加した高炉スラグ細骨材 10kg の充填層に所定量の水を添加し吸引通過させた後,前述の固結評価を行った[6)]。

最終的には，屋外で安全に貯蔵できる期間を判断するために，プラントで固結防止剤を添加して粒度調整した高炉スラグ細骨材を，山積み貯蔵し，定期的に重機で掘削することにより山内部の固結の進行状況を観察した。

4.2 コンクリート試験

コンクリートへの影響を確認するため，天然細骨材を体積率で 50%、高炉スラグ細骨材に置換して，コンクリート試験を行った。使用材料として，セメントに普通ポルトランドセメント，粗骨材に天然砕石，化学混和剤にＡＥ減水剤，天然細骨材には陸砂を用いた。

表-3にコンクリート配合を示す。

表 - 3　コンクリートの配合

配合	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m^3)				
			水	セメント	高炉スラグ細骨材	陸砂	粗骨材
1	60	47	193	322	437	408	938
2			192	320	438	412	941

5．結果

5.1 固結評価

図-3 に 40℃の養生日数と固結防止剤無添加の高炉スラグ細骨材の 4.75mm 篩い上割合（すなわち固結量）の関係を示す。2週間までは，固結量が0%であったが，3週間目には**図-4** に示す様に固結量が 100%になった。

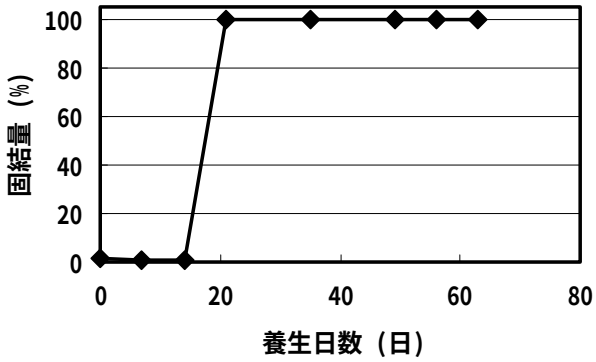


図-3　養生日数と固結量の関係
（40℃，無添加）

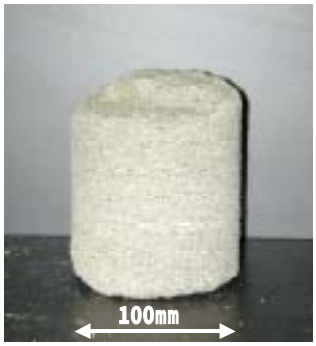


図-4　固結状況

図-5 に、固結塊の圧縮強度を示す。3週間目の圧縮強度は，ほぼ0であったが，養生日数の増加と供に圧縮強度は増加する。

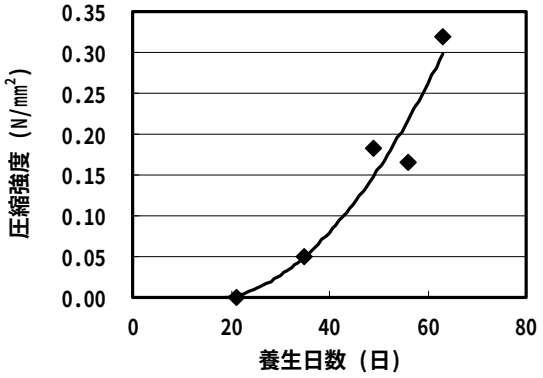


図-5　養生日数と圧縮強度の関係（40℃，無添加）

図-6 に 40℃の養生日数と，高炉スラグ細骨材の水和量の関係を示す。ここで、熱分析における 600℃までの減量を水和量と考えた。固結防止剤無添加では，養生日数の増加に従い水和量が増加する。一方，グルコン酸ナトリウム誘導体を添加した場合には，長期間水和反応が進んでいない。

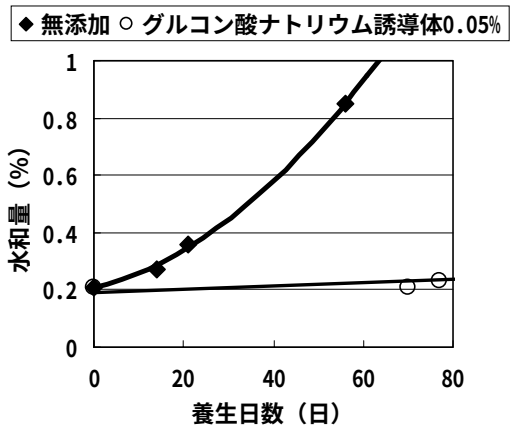


図-6　養生日数と高炉スラグ細骨材の水和量の関係（40℃）

固結量が 1%以上になった養生日数を，固結開始日数とし，**図-7** に固結防止剤の添加量と 40℃の固結開始日数の関係を示す。同一添加量では，グルコン酸ナトリウム誘導体は、グルコン酸ナトリウムの 2 倍以上の期間，固結開始日数を延長できる。ポリアクリル酸ナトリウムの場合，更に効果が大きく，添加量を 0.02%まで低下させても固結開始に 300 日必要だった。また 0.03%以上添加した場合、測定期間の 300 日間では固結しなかった。

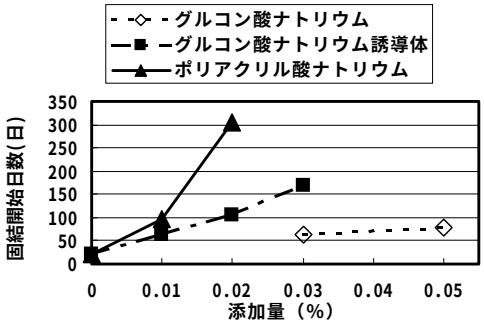


図-7　固結防止剤添加量と固結開始日数の関係（40℃）

図-8 に固結防止剤の添加量と 80℃の固結開始日数の関係を示す。養生温度を上昇させることで，短期間で固結評価を行える。

図-9 に固結開始日数に及ぼす通水量の影響を示す。ここで通水量は高炉スラグ細骨材に対する質量割合で表した。グルコン酸ナトリウム誘導体 0.05%添加時，80℃の固結開始日数は当初 40 日間であるが，通水量の増大と共に短縮し，50%通水すると，2 週間で固結する。一方，ポリアクリル酸ナトリウムの場合，50%の通水量でも 80℃の固結開始に 2 ヶ月かかり，降雨の影響を受けた後の固結防止効果もグルコン酸ナトリウムを大きく上回る。

製造プラントで固結防止剤を添加した高炉スラグ細骨材をそれぞれ 80ｔずつ製造し，**図-10** に示す様に屋外に山積み貯蔵し，定期的な重機掘削により山内部の状況を観察した。測定期間は，ユーザーでの在庫期間を考慮して，降雨の多い梅雨を含む夏季 6 月から 9 月の，3 ヶ月間とした。グルコン酸ナトリウム誘導体 0.05%添加した高炉スラグ細骨材は 2 ヶ月間固結せず，3 ヶ月後

に**図-11** に示す様な小量の固結塊が発生した。またポリアクリル酸ナトリウムでは，0.05%の添加と，より少ない 0.03%添加の高炉スラグ細骨材で 3 ヶ月間，固結が発生しなかった。

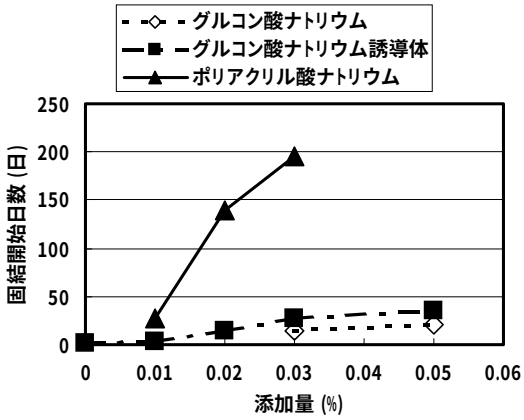


図-8　固結防止剤添加量と固結開始日数の関係（80℃）

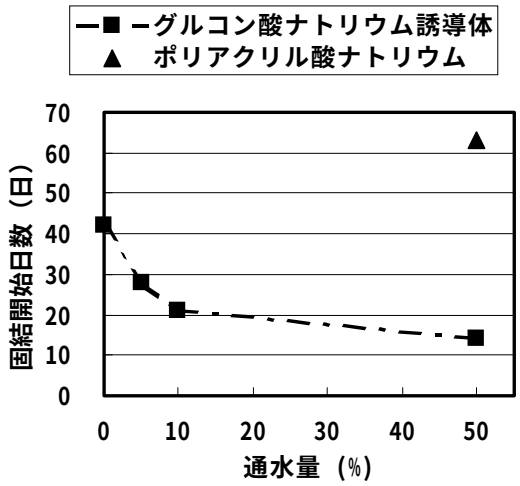


図-9　固結開始日数に及ぼす通水量の影響（80℃、添加量：0.05%）

5.2 コンクリート試験

表 4 にコンクリートの性状を示す。ここで SG はグルコン酸ナトリウム，DSG はグルコン酸ナトリウム誘導体，PSA はポリアクリル酸ナトリウムを表す。固結防止剤の添加によるコンクリートの流動性や空気連行性への影響は見られなかった。

図-10　高炉スラグの屋外貯蔵試験

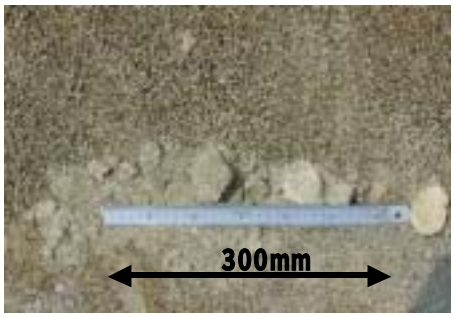


図-11　高炉スラグ細骨材の貯蔵山の掘削状況（3 ヶ月後、グルコン酸ナトリウム誘導体 0.05%）

図-12 にコンクリートの凝結時間を比較する。無添加と比べ，各種の固結防止剤を添加するとやや凝結が遅れる。今回新たに開発したグルコン酸ナトリウム誘導体とポリアクリル酸ナトリウムの凝結時間は従来品よりも凝結の遅れが小さい。

図-13 にコンクリートの圧縮強度を比較する。各種固結防止剤の添加のコンクリート強度への影響は見られなかった。

表-4　コンクリートの性状

配合	固結防止剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
1	無添加	18.8	4.3
	SG,0.05%	19.0	4.0
	DSG,0.05%	19.3	4.4
2	無添加	18.0	4.3
	DSG,0.05%	18.0	4.3
	PSA,0.01%	18.0	4.3
	PSA,0.025%	17.5	4.1
	PSA,0.05%	18.5	4.0

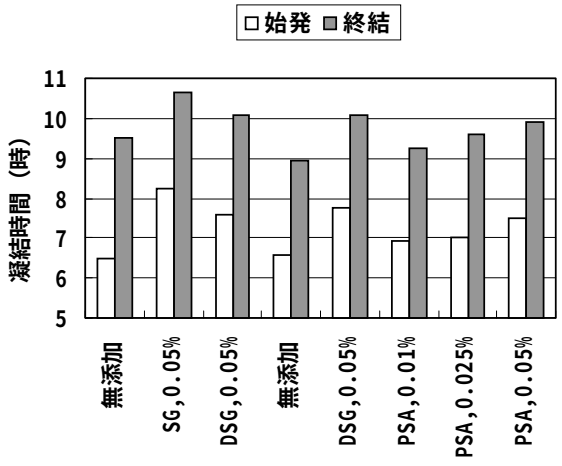


図-12　凝結時間

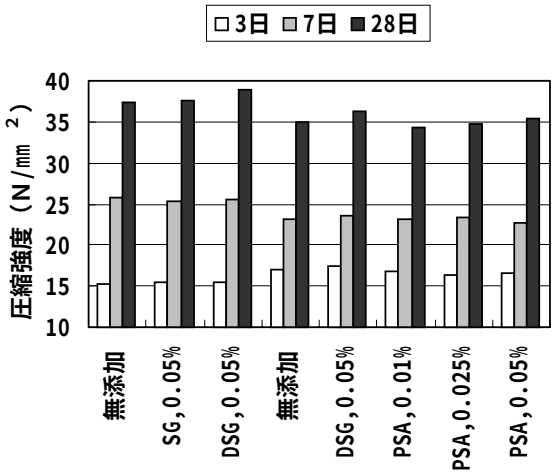


図-13　コンクリートの圧縮強度

6．まとめ

従来のグルコン酸ナトリウムに代わる新たな固結防止剤として，グルコン酸ナトリウム誘導体及びポリアクリル酸ナトリウムを見出し，それらを添加することにより，固結にいたる期間を，従来の 2 倍以上に延長できた。

夏季の屋外貯蔵試験において，グルコン酸ナトリウム誘導体を 0.05%添加した高炉スラグ細骨材が 2 ヶ月間固結しないこと，またポリアクリル酸ナトリウムは，より少ない 0.03%の添加で 3 ヶ月間固結しないことを確認した。

新たな固結防止剤を用いた場合も，コンクリートへの影響は，従来から実績のある固結防止剤と同程度であり，使用上問題のないことを確認した。

参考文献

1) 野村高照，榎戸恒夫，鈴木章平，徳永良邦，稲山邦彦：高炉水砕スラグの硬化特性とその抑制策，製鉄研究，No.30, pp.13363-13372, 1980.

2) 金谷宗輝, 松井淳, 伊澤康子, 市川牧彦：Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 7, pp.301-306, 2000.

3) 光藤浩之，吉沢千秋，深井美隆，大関彰一郎，高橋智雄，木之下光男：コンクリート用高炉スラグ細骨材の固結防止剤の開発, 材料とプロセス　第 139 回日本鉄鋼協会講演論文集, Vol.13, No.1, p.101, 2000.

4) 白石力，光藤浩之，高橋智雄，木之下光男：コンクリート用高炉スラグ細骨材の固結に及ぼす温度の影響, 材料とプロセス　第 140 回日本鉄鋼協会講演論文集, Vol.13, No.4, p.851, 2000.

5) 高橋智雄，木之下光男，光藤浩之，吉澤千秋：高炉スラグ細骨材用固結防止剤の開発，コンクリート工学，Vol.40, No.11, pp.19-25, 2002.

6) 光藤浩之，和田隆，高橋智雄，木之下光男：高炉スラグ細骨材の固結に及ぼす透水量の影響, 材料とプロセス　第 142 回日本鉄鋼協会講演論文集，Vol.14, No.4, p.932, 2001.

7) 光藤浩之，和田隆，吉澤千秋，山口篤，高橋智雄，木之下光男：ポリアクリル酸塩添加による高炉スラグ細骨材の固結防止, 材料とプロセス　第 146 回　日本鉄鋼協会講演論文，Vol.16, No.4, p.1014, 2003.