

田代恭一（株式会社 神戸製鋼所利材部）

○正会員 山崎友二（ “ ” ）

吉川勇一（ “ ” ）

まえがき

コンクリートは土木建築の建設資材として重要な基礎資材の一つであり、我が国で大量に使用され、その量は年間約8億トンと推定される。コンクリートに使用される細骨材のうち河川砂、山砂等は環境保全からの採取規制により最近深刻な事態を迎え、特に関西地方では、海砂使用による塩分規制等が相まって、多くの制約が生れつつある。これらの状況を背景として、現在鉄鋼業界を挙げて、コンクリート用水砕スラグ細骨材（以下水砕砂と言う。）として、利用すべく研究開発を進め、官界および土木建築両学会、建設業界の、指導と協力を得て昭和52年度、建設省建設技術研究補助金研究として、コンクリート用水砕スラグ細骨材の使用規準案、建築学会では水砕スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針案、同解説を作成中である。

水砕砂は高炉水砕スラグを粒調したものであるがその場合、高炉から排出される熔融スラグに直接圧力水を噴射させて水砕を製造する「炉前方式」と一度熔融スラグを鍋に受さいし、処理場に運搬した後、水砕を製造する「炉外方式」とに大別される。

当社では神戸製鉄所に月間25000トンの水砕製造プラントを建設し、昭和53年5月より本格的な稼動に入った。水砕砂を正しく理解して戴くため以下、高炉水砕砂の製造方法と使用上の特徴について報告する。

1. 水砕砂の製造方法

水砕砂の製造方法は、炉前方式と炉外方式があるが、今回は炉外方式の基本的な製造工程を示すと5つの工程より構成されている。

(1) 調質工程

調質工程は高炉操業からくる、スラグの性状のバラつきを吸収し、熔融スラグを水砕砂製造に適する条件に調質するため設ける設備である。

(2) 吹製工程

吹製工程は硬質緻密な水砕を得るため熔融スラグを急冷、造粒する工程である。ジェット水温、水圧、水量、ノズル配置等が重要な要因となる。

(3) 脱水工程

スラリー状で発生する水砕スラグを次の工程に送るため脱水する工程である。静置脱水槽で脱水するバッチ式と連続的に脱水する、連続式とが考えられる。（神戸製鉄所では場所的制約もあり、連続式脱水設備を採用し全

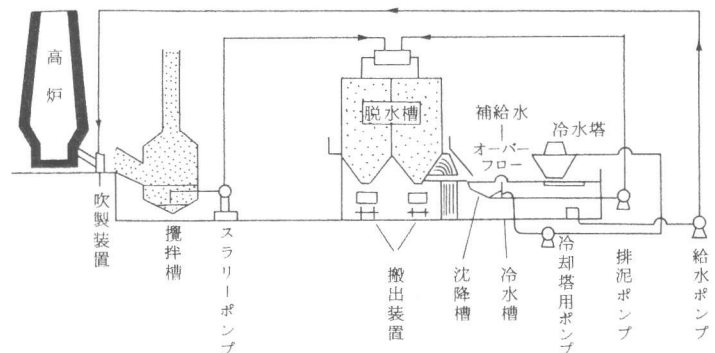
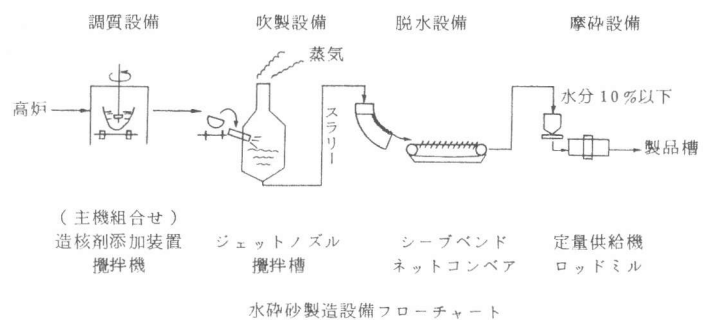


図-1 炉前方式



水砕砂製造設備フローチャート

図-2 炉外方式



結晶量の安定的確保	スラグの急冷造粒	脱 水	粒度調整、粒形改善	貯蔵、出荷
・スラグの化学組成 ・スラグの温度 ・結晶核形成材の添加 ・スラグの攪拌	・ジェット水温 ・ジェット水圧 ・ジェット水量 ・ジェット配置	・バッチ式 静置脱水槽 ・連続式 1次脱水 2次脱水	・ロッドミル ・オートジナミル ・オートファイン	・サイロ ・ヤード ・トラック ・船

図-3 基本的な製造工程

体をコンパクトにまとめた。)

(4) 粒度調整工程

得られた水砕は角張りがあり軽石状，繊維状等砂に不適当なものが混っているうえ粒度構成も適当でない，この水砕を軽度磨砕し，硬い部分を粗粒分に残し，軟い部分，角張った部分を細粒分にするよう優先破砕する工程である。これにより粒形を改善し粒度を調整すると共に粗粒率を決定する。

(5) 貯蔵および出荷

粒度調整された，水砕砂は貯蔵ホッパーに一次貯蔵され，トラックで直送するか，貯蔵ヤードに仮置し需要家の要望に応じ，トラックまたは船積して出荷される。

2. 神戸製鉄所，水砕砂製造設備（炉外方式）

神戸製鉄所に建設された，水砕砂製造設備の諸元と概要について要約すると，月産 25000 トンの能力で，シーブベンド・ネットコンベアーを採用した，連続プロセスであること；プロセスの後続過程ほど能力を下げ，全体設備のコンパクト化を図っていることが特徴である。プロセス水は循環使用しているが，製品と共に系外に逃げる水，および蒸発水を補給するため，スラグ 1 トン当たり約 0.8 トンの補給水が必要である。

3. 水砕砂の使用上の特徴について

(1) 水砕砂の化学成分を表 2 に示す。

我が国の製鉄所は製鉄原料を外国から共同購入している関係もあり，各製鉄所による，変動は少なく，その主成分は，CaO，SiO₂，Al₂O₃，MgO の 4 成分が 95% 以上を示し，S，SO₃，FeO，TiO₂，MnO 等が微量含有している。

表 2 水砕砂の化学成分

化学 成分 メーカー	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	S	SO ₃	FeO	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	塩基度 CaO/SiO ₂
N・G	41.6	32.1	13.6	7.1	0.73	0.04	0.64	0.78	1.37	0.273	0.47	1.30
H・R	42.4	34.0	13.3	6.2	1.17	0.03	0.42	0.76	1.06	0.167	0.33	1.25
C・B	41.6	34.5	14.5	5.1	0.85	0.01	0.34	0.65	1.56	0.290	0.50	1.21
K・B	40.1	34.6	15.6	5.6	1.24	0.05	0.27	0.70	1.41	0.370	0.29	1.16
F・N	42.0	34.4	15.4	4.9	0.90	0.02	0.33	0.91	0.90	0.18	0.36	1.22

(2) 水砕砂の代表的な物理特性を表 3 に示す。

水砕砂の比重，吸水率，単位容積質量等，天然砂と大差ない性質を示している，洗い試験で失なわれる量が若干多いが，これは粒調時に，角張り等が磨砕されたものであり，粘土質，シルト分ではなくコンクリートに有害なものではない。むしろ粒形による流動性の悪い面を緩和し，ワーカビリティの改善に寄与する。

(3) 水砕砂の比重，吸水率測定方法について

水砕砂は硬質緻密であり，比重，吸水率試験方法は JIS A 1109 を適用するが，粒形が天然砂に比較し角張っているため，表乾状態判定時フローコーンを上げた場合，スランプ状態の相違により吸水率が異なる。(表 4)

- 天然砂は表乾状態判定時のスランプ状態が，A～D，の様に変化しても吸水率の差は 0.3% と小さく測定方法による誤差は非常に少ない。
- 水砕砂は表乾状態判定時のスランプ状態が変化すると，吸水率の変化が大きく，1.0～1.4% 程度となり，砕砂と同様な傾向がある。

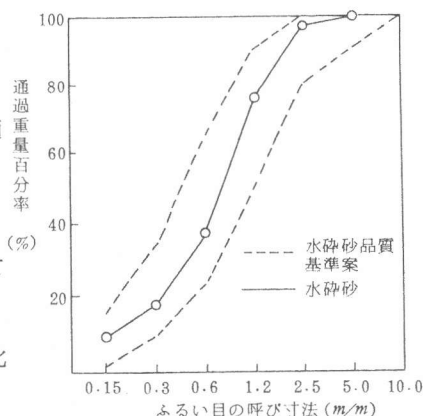
表 1 設備諸元

設備諸元

- 基本仕様
 - 目標結晶量 13±3 %
 - 設備能力 25000 トン/月
- 調質設備
 - 機械式攪拌装置 設置予定
- 吹製装置 (1.2 トン/分)
 - 攪拌槽 4.5m (径) 4.0m (高) × 2 基
 - 注さい量 1.2 トン/分
 - スラグ水比 1 : 3
 - ジェット水圧 2 kg/cm²
- 脱水設備 (1.0 トン/分)
 - 1 次脱水機 シーブベンド
 - 1.5m (巾) × 1.5m (長) × 4 基
 - スリット巾 0.2mm，成品水分 60% 以下
 - 2 次脱水機 ネットコンベアー
 - 1.8m (巾) × 15.0 (長) × 1 基
 - ネットスピード 2m/分，成品水分 12% 以下
- 粒調設備 (0.3 トン/分)
 - ロッドミル (7' × 12') × 1 基
- 水処理設備
 - オーバーフロー槽，沈降槽，集水槽

表 3 水砕砂の物理特性

項目 種類	比重(kg/ℓ) 絶乾 表乾	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	実積率 (%)	洗い損 (%)	有機 不純物	塩化物 (NaCl)
海砂	2.50 2.55	1.8	1.544	61.8	1.8	良	0.01
水砕砂	2.66 2.68	0.8	1.530	58.0	5.7	良	0.00
水砕砂品質基準(案)	2.5以上 3.5以下	—	1.45以上	—	7 以下	—	—



(イ) コンクリート混練時、水砕砂の表面水補正を行なう場合、吸水率測定結果より表面水率を計算する、従って各々の使用者による、比重、吸水率測定誤差が表面水補正につながり、単位水量におよぼす影響が大きくなり、スランプの変動につながる。

(ロ) 水砕砂の表乾状態は吸水率の安定した、C～Dのスランプ状態を標準とした方が、単位水量におよぼす影響が少ない様である。

(なお軽骨法、JIS A 1134、で測定するとコンクリート用水砕砂使用規準案を満足しないこともある。)

4. 水砕砂の貯蔵期間と物性の変化

水砕砂は潜在水硬性を有し、長期間貯蔵すると固結化現象をおこすと同時に物性の変化も若干ある。コンクリートに影響をおよぼさない範囲について調査され、基準案が作成されつつある。夏期、冬期における物性試験値を表5に示す。その代表的な留意点について述べる。

(1) 比重、吸水率について

水砕砂は貯蔵期間が長くなると、吸水率が大きくなり、比重は小さくなる傾向があり使用前の骨材試験を行なうことが望ましい。(図6)

(2) 固結化条件と固結防止対策について

水砕砂は図7・8に示す通り適度(6~12%)の含水量のもとで、温度(35℃以上)が高い程、密度が大きい程、貯蔵期間に比例して固結化が増大する傾向がある。生コン工場における使用量、貯蔵設備の種類や容量(ヤード方式、サイロ方式)により、管理目標を設ける必要がある。

(3) 固結化防止対策について

水砕砂の固結防止対策としては、温度を低く、含水量を少なく、ソフト積とし密度を小さくして貯蔵することが望ましい。また天然砂を30%以上、混合貯蔵することにより、固結を遅延させることが可能である。

(4) 水砕砂の標準的貯蔵期間

標準的貯蔵期間は、冬期で4週間、夏期で2週間、程度であれば、コンクリートの配合設計および品質におよぼす影響は少なく十分使

表-4 表乾判定と比重吸水率

項目 スランプ の状態	川 砂			水 砕 砂		
	絶対比重	表乾比重	吸水率	絶対比重	表乾比重	吸水率
A	2.52	2.58	2.1	2.61	2.67	2.2
B	2.52	2.57	2.1	2.66	2.70	1.6
C	2.53	2.58	1.9	2.72	2.74	0.8
D	2.54	2.59	1.8	2.72	2.74	0.6
参考(軽骨法)	—	—	—	2.72	2.61	4.2

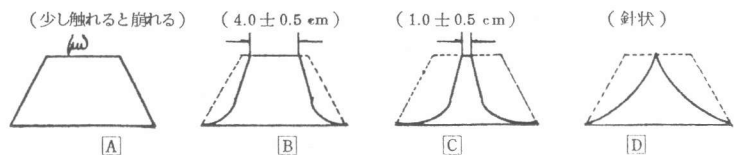


図-4 水砕砂の表乾状態判定時とスランプ状態

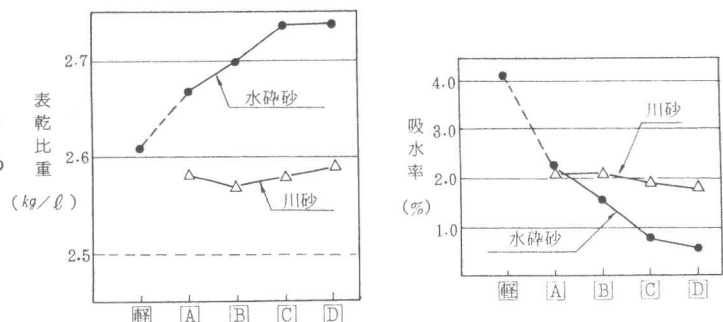


図-5 表乾判定と比重、吸水率の関係

表-5 製造直後の水砕砂を貯蔵したもの(屋外貯蔵)

期 貯蔵 週	夏 期										冬 期									
	絶対 比重	吸水 率(%)	単 重(kg/ℓ)	実積率(%)	粗粒率	水洗 損失(%)	含水率(%)	固結(85℃ モールド)	外気 温度(℃)		絶対 比重	吸水 率(%)	単 重(kg/ℓ)	実積率(%)	粗粒率	水洗 損失(%)	含水率(%)	固結(85℃ モールド)	外気 温度(℃)	
0	2.66	0.8	1.58	58	2.60	5.7	8.8	—	37	2.70	1.1	1.58	59	2.50	5.0	7.0	—	0	5	
1	2.70	0.5	1.58	57	2.60	5.8	4.8	—	36	2.72	1.2	1.57	58	2.56	4.2	9.0	—	0	9	
2	2.66	0.4	1.54	58	2.65	5.6	4.6	—	35	2.69	1.6	1.55	58	2.57	3.7	5.3	—	0	8	
3	2.67	0.5	1.58	57	2.64	5.1	5.8	—	33	2.72	1.2	1.55	57	2.59	3.5	4.9	—	0.6	10	
4	2.67	0.7	1.52	57	2.65	5.3	4.8	—	35	2.71	1.6	1.55	57	2.56	3.9	5.1	—	1.9	8	
5	2.67	0.8	1.50	56	2.64	5.5	6.4	—	35	2.70	1.7	1.55	57	2.55	3.7	4.4	—	8.0	9	
6	2.69	0.9	1.49	55	2.65	5.1	5.9	—	3	2.69	1.7	1.52	56	2.57	4.2	4.2	—	4.0	8	
7	2.68	1.0	1.49	56	2.62	4.8	5.6	—	34	2.68	1.8	1.57	58	2.58	4.0	3.4	—	4.5	8	
8	2.67	1.0	1.47	55	2.65	5.0	6.4	—	35	2.67	1.9	1.57	59	2.60	4.2	4.7	—	5.0	7	

貯蔵期間 夏期8~9 冬期1~2月

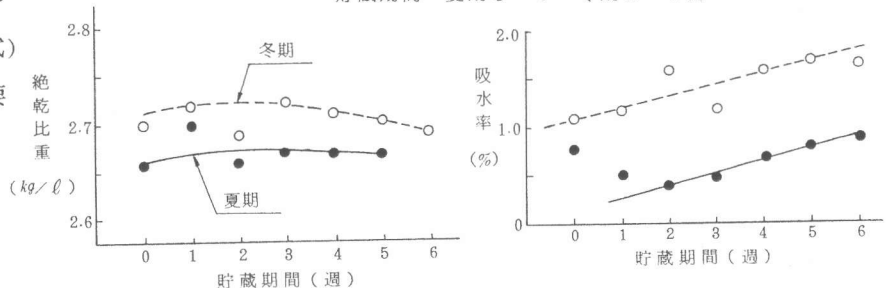


図-6 貯蔵期間と比重、吸水率の関係

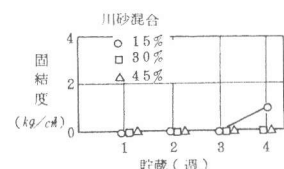


図-9 天然砂混合と固結化の関係

用可能である。

5. 水砕砂を用いた、まだ固まらないコンクリート

水砕砂をコンクリート用細骨材として、使用する場合の特徴として天然砂と異なり、水砕砂は大部分が、ガラス質のため、水とのなじみや保水性が悪く、ブリージング速度が早くなる傾向がある。また磨砕が不十分で、粒形に角張りが残っていたり、粒度分布が連続的でない場合など、所定のスランプを得るため、単位水量が増加することもある。この結果からもブリージング量が多くなる硬練りコンクリートの場合、水砕砂 100% 使用してもブリージングの心配はないが、軟練りコンクリートの場合は天然砂と混合使用するか、良質の AE 減水剤を使用して、水の絶体量を減らす工夫が必要となる。

水砕砂の品質改善による実績率とブリージング、単位水量の関係について、過去の実績から推定し以下報告する。

(1) 実績率とブリージング

ブリージングは骨材の性質、細骨材率、単位水量、単位セメント量、実績率並びに配合により変化する以上の要因のなかでも実績率が、ブリージング、単位水量にある程度の相関があることが、図 10, 11 から判断される。天然砂は実績率が 60% 以上あり、また単位水量が 200 kg/m^3 以上あっても、ブリージングへの影響が少ない。一方水砕砂は実績率が小さ

くなるに従い、ブリージング量が多くなり、単位水量も増加する傾向がある。したがって水砕砂の実績率を 58% 以上になる様、粒形を改善し、単位水量は 200 kg/m^3 以下を目標に配合設計すれば、ブリージングの問題は解決することが推定される。

(2) 単位水量

所定のスランプを得る際、水砕砂は天然砂より約 10% 程度多く、単位水量が必要と言われている、これから派生して、水・セメント比に準ずる分だけ単位セメント量も多く

なる、何れにしても、所定のスランプを得るための単位水量は使用材料の種類、品質、粗骨材の最大寸法、水セメント比、細骨材率、コンクリート温度などが微妙に変化するので、その都度、試し練りで確める必要がある。この単位水量も水砕砂の品質、粒形改善により、天然砂とほぼ同等まで改善することが可能である。

6. 水砕砂を用いた、硬化コンクリート

水砕砂を用いた、硬化コンクリートの初期強度は天然砂より低い、28 日ではほぼ等しくなり、91 日強度は完全に天然砂を超越す、曲げ、引張り強度についても同様である。その他、凍結融解試験による耐久性、乾燥収縮、鉄筋との付着強度、透水性、静弾性係数等、水砕砂としての特徴を有するが、使用上特に問題となることはない。詳細は紙面の都合で今後の機会にゆずる。

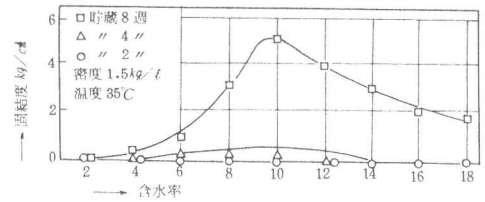


図-7 固結度と含水率の関係

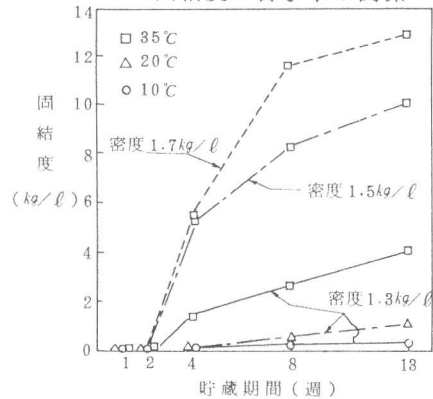


図-8 固結度と貯蔵期間の関係

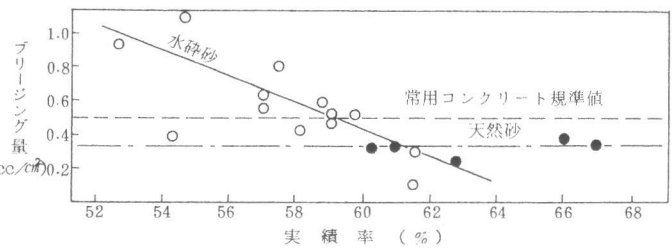


図-10 実績率とブリージングの関係

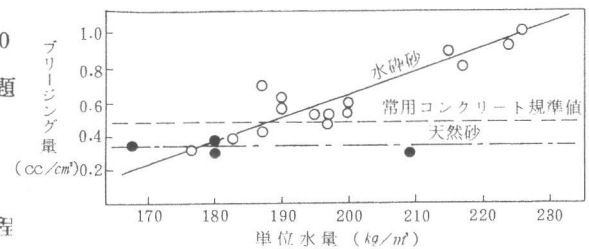


図-11 単位水量とブリージングの関係

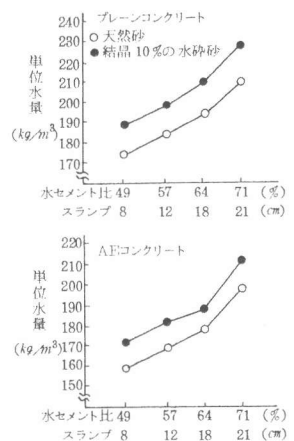


図-12 単位水量とスランプの関係