

正会員 ○沼田 晉一 (新日本製鐵(株)スラグ事業開発部)

坂田 八郎 (同上 設備技術センター)

遠藤 修弘 (同上 名古屋製鐵所)

## 1 まえがき

製鉄所の工場等の諸施設は高炉スラグ砕石コンクリートが古くから使用されてきた。水砕スラグについても近年硬質なものが製造可能となったため、これを軽破砕加工し粒度調整したものを細骨材として利用する研究が我が国でも急速に進み、すでにいくつかの使用実績を有している。今回の検討は重荷重が作用する溶鋳炉鑄床スラブのけたの建設に当り、水砕スラグ細骨材(以下水砕砂という)を用いたコンクリートの高強度特性を調査したものである。なお粗骨材として高炉スラグ砕石を用いた高強度コンクリートの研究実績も限られているため、水砕砂に組合せ、併せて比較検討を行なった。対象としたけたは、設計基準強度 $\sigma_{ck}=600\text{Kg}/\text{cm}^2$ のプレキャスト鉄筋コンクリートである。

水砕砂を用いたコンクリートのこれまでの研究によると、水砕砂コンクリートは初期強度が良質の河川砂を用いた場合よりも<sup>1,2)</sup>2~10%小さいが、長期材令での強度は同等又はそれ以上になる。また水セメント比が小さい場合は川砂コンクリートよりも強度が小さく、水セメント比が大きい場合は同程度となり、<sup>1,2)</sup>とくにこの場合水砕砂の潜在水硬性が発揮される傾向にある。<sup>2)</sup>養生条件の違いでは標準養生、蒸気養生(65℃)については大きな差はないが、乾燥状態に保ったり、<sup>3)</sup>オートクレーブ養生の場合は川砂コンクリートに比べてかなり劣る傾向にある、といわれている。フランスではかなり昔から比重2.4程度以上の水砕砂がコンクリート構造物に用いられているが水砕砂は潜在水硬性があるためセメントペーストと骨材表面の間に境界反応生成物が生じ、このエビタキシ効果によって強度増進と耐久性の向上が進むといわれている。<sup>5)</sup>

このようなことから、水砕砂は高強度コンクリートとくに初期強度の発現を必至とするプレキャスト製品への利用が不利のように考えられるが、この点については実用目的で十分に検討されていない。高強度コンクリートの製造方法には高性能減水剤の使用、オートクレーブ養生、加圧成形などの方法がある。今回筆者等は吉田徳次郎先生が昭和15年に発表された加圧蒸気養生方法を工業化した方法(加圧 $10\text{Kg}/\text{cm}^2$ 、 $100^\circ\text{C}$ 蒸気養生)によつて円柱供試体及び鉄筋コンクリートけたを製作し実験を行ない、水砕砂及び高炉スラグ砕石の適用性について検討したのである。

実験を担当し終始貴重な御助言を戴いた日本プレスコンクリート 藤井健太郎氏、田代博海氏はじめ関係者の各位に深甚の謝意を表します。

## 2 使用材料

セメントは圧縮強さ(28日) $420\text{Kg}/\text{cm}^2$ の普通ポルトランドセメントとした。細骨材は大井川産の川砂と名古屋製鉄所の水砕砂とし、粗骨材は最大骨材寸法 $25\text{mm}$ とし大井川産の川砂利(玉さい)とJIS A 5011に台致する名古屋製鉄所の高炉スラグ砕石 2505Bとした。骨材試験の結果を表-1に示す。なお高炉スラグ砕石の絶乾比重及び吸水率はJIS A 5011によつた。この水砕砂は溶鋳炉の炉前で製造した水砕スラグをロードミルで軽破砕加工したもので、ガラス率が高く反応性に富むものとみられたが、実験を行なった時期が気温の低い冬期であつたため長期間貯蔵しても変質や固結はみられなかつた。搬入された骨材は均一な含水状態を保つよう取り扱いに注意した。粗骨材は表面乾燥飽水状態にして用いた。とくに高炉スラグ砕石は工場出荷時十分吸水した湿潤状態のものであつたが、乾きやすいので適宜散水し覆いをかけて表面乾燥飽水状態を保つた。湿潤状態から吸水させたときの高炉スラグ砕石の有効吸水率は4.5%を示した。従つて配合設計に用いる高炉スラグ砕石の表乾比重は有効吸水率に対応するものとし2.56を採用した。鉄筋はSD30の異形鉄筋D25, D13

及びD10 ( $\sigma_y = 3,500 \text{ Kg/cm}^2$ )並びにSR24の丸鋼 $6\phi$ とした。

表-1 骨材の物理試験結果

骨材の種類	絶対比重	吸水率 (%)	単位容積重量 ( $\text{kg/m}^3$ )	実積率 (%)	洗い損失量 (%)	有機不純物	すりへり減価 (%)	ふるいを通るものの重量百分率										粗粒率 FM				
								30mm	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3		0.15			
水砕砂 s	2.58	1.8	1556	60.3	3.4	-	-								100	96	82	50	26	8	2.38	
川砂 (大井川) r	2.59	1.2	1640	63.3	1.5	合格	-							100	98	87	69	34	15	4	2.93	
高炉スラグ砕石2505B S	2.45	3.4	1546	63.1	4.3	-	3.45	100	97	76	54	20	9	5	-	-	-	-	-	-	-	6.90
川砂利 (大井川) 2.5mm R	2.60	0.4	1621	62.3	0.3	合格	11.5	100	100	79	62	27	4	1	-	-	-	-	-	-	-	6.89

### 3 コンクリートの配合

工場で従来から造られている加圧成形鉄筋コンクリートげたに用いるコンクリートは設計基準強度 $\sigma_{ck} = 60 \text{ Kg/cm}^2$  (材令14日), ヤング係数 $E_c = 3.5 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ と定められていたので, これに用いられている川砂川砂利コンクリートの示方配合を参考に各骨材の組合せの試し練りを行ない配合を決定した。単位セメント量は $420 \text{ Kg/m}^3$ , スランブは $2 \sim 4 \text{ cm}$ とし, 細骨材率は適当なワーカビリティが得られる範囲で単位水量が最小となるよう選んだ。練りまぜには $100 \ell$ 強制練りミキサを用いた。試験結果を表-2に示す。

### 4 コンクリートの成形及び養生

表-2 配合及び練りまぜ結果

工場で実際に実施されている加圧蒸気養生方法は, 加圧力 $10 \text{ Kg/cm}^2$ , 加圧時間5分で, 加圧終了後ただちに締付けボルトによって型わくを緊結し, コンクリート内部の圧力を保ったまま $100^\circ\text{C}$ の蒸気養生を3時間行なった後脱枠し, 気中で14日間

記号	骨材の種類		目標スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				結果	
	細	粗				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	スランブ (cm)	空気量 (%)
rR	川砂	川砂利	2~4	36	40	151	420	728	1100	3.2	1.3
rS	川砂	高炉スラグ砕石		35	38	145	420	694	1085	2.8	3.1
sR	水砕砂	川砂利		36	36	149	420	629	1119	3.6	4.0
sS	水砕砂	高炉スラグ砕石		33	36	139	420	642	1098	3.2	4.9

自然養生し出荷している。従って $10\phi \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体による試験は, この方法によった外, 同上の加圧蒸気処理を行った後 $21^\circ\text{C}$ の水中に置いた場合と, 加圧蒸気処理せず通常の $21^\circ\text{C}$ の水中で標準養生する場合の3つの方法を比較した。RCげたは図-1のような長さ $l = 7.0 \text{ m}$ とし, 工場での実操業に従って製作した。加圧モールド及びげたの成形機を写真-1~2に示す。

### 5. げたの断面選定及び載荷方法

曲げ破壊試験に用いる試験体は図-1に示すようなCT型の断面とした。支間は $6.6 \text{ m}$ とし $50 \text{ トン}$ 加力装置による1点載荷とした。計測は支間中央部のげた断面各部のひずみ量 (W.S.G.)及びたわみ量 (ダイヤルゲージ) について行うと共に, ひびわれの発生状況の追跡を測微計によって行った。載荷はひびわれ発生抵抗モーメントまで $1.0 \text{ t}$ きざみ, 弾性設計計算上の鉄筋降伏点荷重まで $2.0 \text{ t}$ き

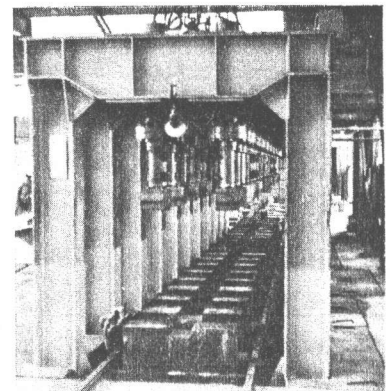
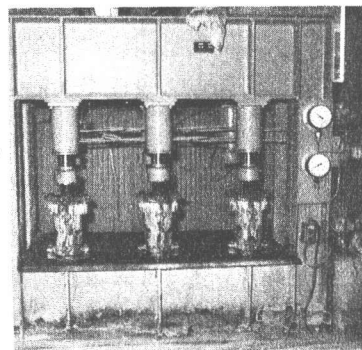


写真-1 加圧成形用モールドとげた加圧成形機

ざみとし, ひずみ量とたわみ量の計測を追跡させたが, これ以降破壊まではひびわれの成長状況, 伸びを視察するにとどめた。

### 6. コンクリート試験結果

水砕砂を用いたコンクリートは, 練りまぜ時にかなりのエントラップトエアが含まれた。このためや水砕砂の粗粒率が小さいため $s/a$ が小さくなり, 単位水量も小さくなった。粗骨材は, 用いた川砂利が玉石を破碎した

ものであり比較対象の高炉スラグ碎石よりも実積率が小さいためか、高炉スラグ碎石の方が川砂利よりも単位水量が低下した。このことはスランプ5～21cmの高炉スラグ碎石コンクリートについての従来の知見と異なる結果となっている。

表-3に硬化コンクリートの試験結果を示す。硬化コンクリートの単位容積重量の測定結果をみると、発生したエントラップトエアは棒突き程度の締めめでかなり消滅する気泡であるとみられる。加圧成形と棒突きによる標準締めを比較すると川砂コンクリートの方法が加圧成形の結果が大きい傾向はあるが明瞭でない。加圧成形の効果は主として水及びエントラップトエアの押し出しにあり、文献によれば水セメント比35%程度のコンクリートを加圧力10Kg/cm<sup>2</sup>で処理すると、水セメント比は30%程度になる。多孔質の高炉スラグ碎石を用いたコンクリートでは、加圧成形時に骨材の圧力吸水が生じ、系外への脱水があまり起こらないとも考えられたがデータからは不確である。

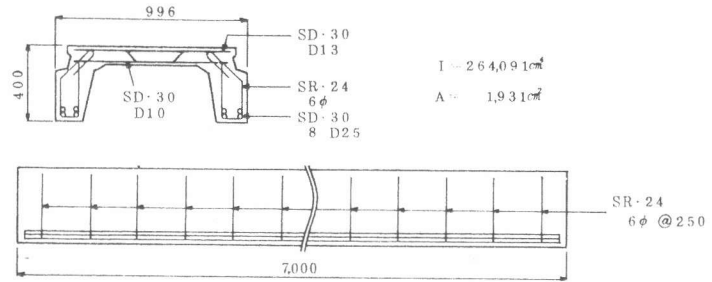


図-1 曲げ試験体の寸法及び配筋

表-3 コンクリートの力学試験結果

記号	養生条件	単位容積重量 (kg/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )					弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> ・10 <sup>-5</sup> E <sub>1/3</sub> )
			脱型(3hr)	7日	14日	28日	91日	
rR	加圧・蒸気・水中養生	2,503	374 (3.05)	595	678 (820)	722 (831)	765 (857)	423
	加圧・蒸気・気中養生	2,487	-	526	574	661	758	396
	標準養生	2,429	-	420	488	556	621	382
rS	加圧・蒸気・水中養生	2,460	382 (2.83)	562	640 (782)	671 (780)	757 (808)	380
	加圧・蒸気・気中養生	2,428	-	558	601	646	725	336
	標準養生	2,396	-	511	550	594	634	321
sR	加圧・蒸気・水中養生	2,461	370 (3.07)	539	602 (851)	641 (919)	721 (927)	421
	加圧・蒸気・気中養生	2,453	-	502	549	611	727	398
	標準養生	2,410	-	449	506	567	631	391
sS	加圧・蒸気・水中養生	2,460	354 (2.71)	550	613 (816)	679 (823)	718 (855)	381
	加圧・蒸気・気中養生	2,460	-	502	539	603	742	357
	標準養生	2,402	-	402	467	532	588	333

注) カッコ内の値は曲げ強度

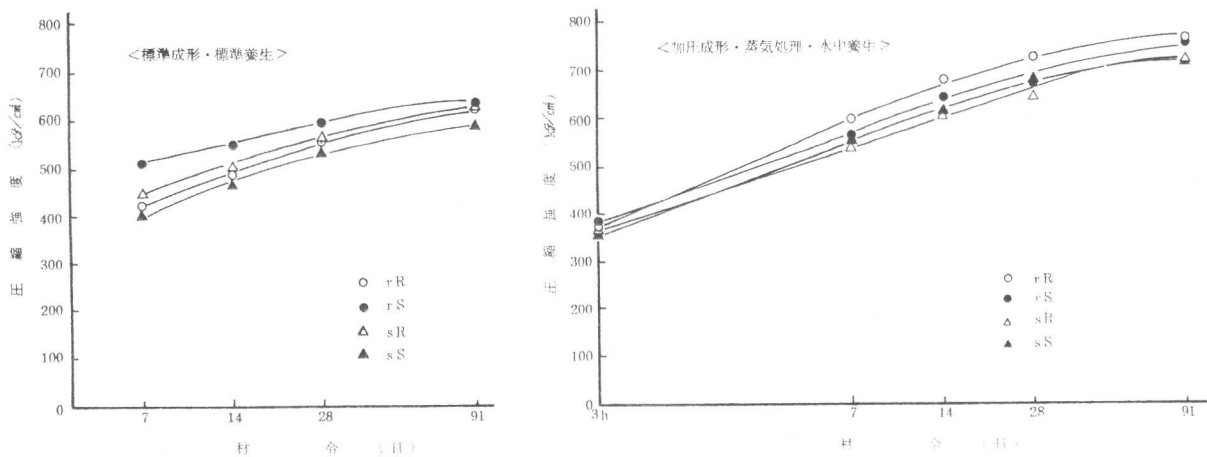


図-2 圧縮強度と材令の関係

圧縮強度は、標準養生では初期材令において強度差が認められるが、加圧成形蒸気処理水中養生では骨材の違いによる差は小さかった。しかし円柱供試体にW.S.G.を貼付け測定した弾性係数E<sub>1/3</sub>は図-3に示すように水砕砂を用いたコンクリートの方がやや小さい傾向を示した。曲げ強度は図-4のように圧縮強度の増進が大きくても一定で頭打ちの状態である。しかし水砕砂を用いたコンクリートは川砂コンクリートに比較して曲げ強度の改善がみられる傾向を示した。

#### 7. けたの曲げ破壊試験

川砂利コンクリートも高炉スラグ砕石コンクリートも十分高強度が得られたので、粗骨材は高炉スラグ砕石とし川砂と水砕砂の比較を行った。試験体(自重3.5 t)は各配合2体計4体製作した。川砂コンクリート(rS)は材令18日で、水砕砂コンクリート(sS)は材令12日で試験を行った。

けたのひびわれ発生荷重は目視によるものと図-5の曲線の折れ点とした。これらは弾性理論でコンクリートの引張り強度を60 kg/cm<sup>2</sup>とした場合よりも大きく、表-3の曲げ強度の値に近くしかも

川砂コンクリートrSよりも水砕砂コンクリートsSが大きい点も一致している。極限破壊モーメントはrSは平均5.16 t-m、sSは5.22 t-mでいずれも同程度となった。終局破壊モーメントを極限設計法と弾性設計法で推定してみた。前者の場合、各コンクリートの応力~ひずみ関係を破壊ひずみε<sub>0.2</sub>まで求めていないためHognestadの関係 $K_1 K_3 = \frac{7,900 + 0.35 \sigma_{ck}}{3,200 + \sigma_{ck}}$ 、 $K_2 = 0.50 \frac{\sigma_{ck}}{80,000}$ が成立<sup>9)</sup>として、応力分布係数K<sub>1</sub>K<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>を求めた。弾性設計法では極限状態ではn=1.5と仮定して求めた。この結果終局破壊モーメントは、極限設計法ではM<sub>u</sub>=4.83 t-mで実際の0.91~0.95倍、弾性設計法では0.85~0.88を得た。なおひびわれの目視結果によると、いずれの場合も荷重10 t位までは真つ直ぐなひびわれを示し、ひびわれ幅は狭く、ひび割れ数が比較的多く、しかも11トン以降も同様の傾向を示し中立軸付近でひびわれの伸びが止まり、破壊時でも図示のようにフランジ下縁までであった。

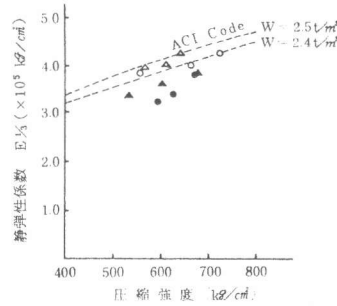


図-3 静弾性係数

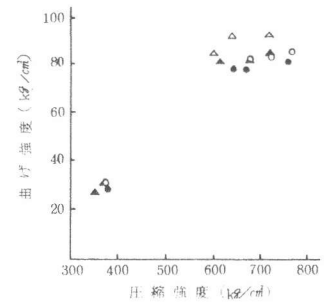


図-4 曲げ強度

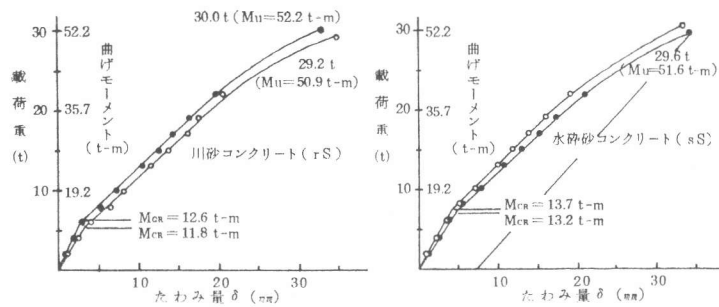


図-5 荷重-たわみ量の関係

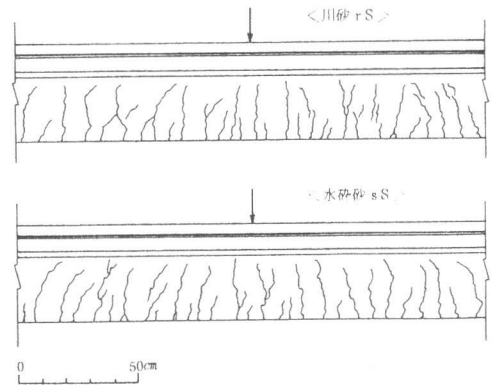


図-6 ひびわれ発生状況(破壊時)

## 8 まとめ

加圧成形による水砕砂を用いたコンクリートは、川砂の場合に劣らない高強度コンクリートを得ることができ、従来の通常の範囲のコンクリートやオートクレーブコンクリートのデータからの懸念が払拭され、水砕砂を用いたコンクリートのプレキャスト化に展望を開いた。

### (参考文献)

1. 長瀧重義, 建材試験センターコンクリート用高炉スラグ骨材標準化研究委員会レポート, 昭和52年3月
2. 中川修他, 日本建築学会昭和53年度学術講演会梗概集
3. 長瀧重義, コンクリート工学誌 Vol.116 No.9 昭和53年9月
4. 杉木六郎他, セメント技術年報XXXI 昭和52年
5. J.A.Chapelle, Laitiers誌, CTPL(フランススラグ協会) 32号(1974)及び33号(1975)
6. 吉田徳次郎, 土木学会誌第26巻第113 昭和15年11月
7. 国分正胤, 小林正几, 比田正, セメントコンクリート誌 No.284 昭和45年
8. 藤井健太郎, コンクリート工学誌 Vol.114 No.3 昭和51年3月
9. 小倉弘一郎, 日本鉄鋼連盟コンクリート用水砕スラグ細骨材使用規準作成研究委員会レポート, 昭和53年3月