

1. まえがき 近年、省資源、省エネルギーの立場から産業副産物の有効利用の機運が高まり、その一として、高炉で銑鉄を製造する際に発生する高炉スラグの有効利用に関してもその研究が活発になされている。1977年KはJISA 5011として「コンクリート用高炉スラグ粗骨材」が新たに制定され、それに伴って土木学会から高炉スラグ砕石コンクリート設計施工指針案が発表された。しかし、高炉スラグのコンクリート用材料としての有効利用については、細骨材や混和材としての利用もあり、この点についてはまだいろいろと不明な点や問題点も多く残っており、今後の研究が必要とされている。筆者は数年前より高炉水滓のコンクリート用細骨材への利用に関する実験を行ってきた。先ず、製鉄所で試作製造された硬質水滓や軟質水滓の物理的性質と水滓の粒度、粒形がモルタルの流動性やワーカビリティー、曲げおよび圧縮強度におよぼす影響を明らかにし、また、試験機で粉砕加工した水砕砂を用いたモルタル実験を行ない、粉砕加工の効果について報告をした。また、ロッドミルで粉砕加工した水砕砂を用いたコンクリートの諸性質について、特に強度、弾性、および凍結融解に対する耐久性についても一部報告を行なった。本報告はこれらに続いて水砕砂を細骨材として用いたコンクリートの諸性状に関して基礎的なデータを取得する目的で、ロッドミル加工した水砕砂の他に粉砕加工の方法の異なる水砕砂を用いたコンクリートや、自然砂との混合砂として用いたコンクリートについても、ワーカビリティー、コンシステンシー、ブリージング等のフレッシュコンクリートの性質や硬化コンクリートの強度、弾性、乾燥収縮について山砂コンクリートと比較検討したものである。

2. 使用材料 セメントは秩父社製の普通ポルトランドセメントを用い、その物理試験結果は表-1の通りである。粗骨材は千葉県君津産の山砂利(最大寸法25mm、比重2.62、吸水率1.04)、細骨材はロッドミルで加工した水砕砂I、II、III、と摩耗加工した水砕砂IV、また比較のため君津産の山砂を使用した。

3. 配合および実験方法

コンクリートの配合は予め試験練りによって所定のスランプ、ワーカ

表-2 細骨材の物理試験結果

細骨材の種類	比重	吸水率 (%)	単位容重 (Kg/m³)	実積率 (%)	粗粒率
水砕砂 I	2.79	1.53	1940	70.6	2.13
〃 II	2.69	2.53	1720	65.6	2.36
〃 III	2.59	3.29	1590	63.4	2.48
〃 IV	2.64	1.96	1580	61.0	2.95
山砂(細)	2.44	7.58	1490	65.7	2.15
〃 (粗)	2.59	2.36	1810	71.5	2.78
山砂(細)・水砕砂IV (1:1)	2.54	4.77	1560	64.3	2.59
〃 (2:1)	2.51	5.71	1550	65.3	2.42
山砂(細)・山砂(粗) (1:1.74)	2.54	4.27	1700	69.8	2.55

表-1 セメントの物理試験結果

セメントの種類	比重	粉末度		曲げ強さ(Kg/cm²)			圧縮強さ(Kg/cm²)			凝 結			安定性
		比表面積 (cm²/g)	88μ残分 (%)	3日	7日	28日	3日	7日	28日	水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)	
普通ポルトランドセメント	3.18	2980	1.1	27.1	46.2	63.5	115	182	335	27.2	1-35	3-57	良

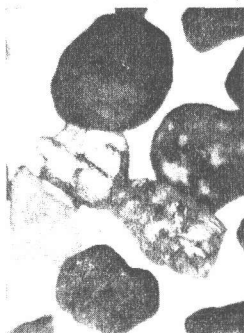


写真-1 山砂(細)



写真-2 水砕砂I



写真-3 水砕砂II



写真-4 水砕砂III



写真-5 水砕砂IV

ビリーが得られるような単位水量と細骨材率を求めた。スランプの範囲は 8 ± 1 cm, 水セメント比は43, 50, 60, 70%と4種としプレキャストコンクリートとした。用いた細骨材の組み合わせは水砕砂Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ, 山砂(細)に加え水砕砂Ⅳと山砂(細)の混合および山砂の細粗粒の混合である。細骨材は気乾状態とし練りませa7紫に有効吸水量分の水量を補正した。また、練上がりコンクリートの温度は特に長期強度への影響を考えて 23 ± 2 ℃程度となるような温水または冷水を用いた。練りませは強制練りミキサを用い、養生は 20 ± 1 ℃の水中で行った。ブリージング試験は W/C が50, 60%についてJIS A 1123 K準じて恒温恒湿室(温度 21 ± 1 ℃, 湿度 75 ± 3 %)内で行った。強度用の供試体は 10×20 cmの円柱型枠を用い材令は7, 28, 91日について、圧縮および引張強度用とそれぞれの本とした。また乾燥収縮用の供試体は $75 \times 10 \times 40$ cmの角柱型枠を用い1配合について2本作成した。脱型後材令7日まで水中養生をし、基長(20cm)測定後は恒温恒湿室内に設置し、コンタクトタイプのひびき計で測定をした。

4. 実験結果および考察

1) 骨材の物理的性質

実験に用いた細骨材の物理的性質は表-2に、粒度曲線は図-1に示す通りである。水砕砂ⅡⅢはロッドミルでの加工程度が異なるもので、粉砕加工の大きい水砕砂Ⅱほど粗粒率は小さく、比重、単位容積重量は大きくなる傾向がある。また、未加工の水砕砂と比較して粒形が丸味を帯び針状のガラスがほとんどなくなっている。硫酸ナトリウムを用いた安定性試験の結果は水砕砂ⅡⅢとも約14%の損失重量は小さい。水砕砂Ⅳは粉砕機の種類が異なり主として摩擦作用により粉砕加工されたもので、山砂(細)との混合使用を考えて製造されたが加工の程度は小さく粗粒率は295と大きく、粒形も他の水砕砂と比較して角張りが多いように思われる。写真1~5はこのような水

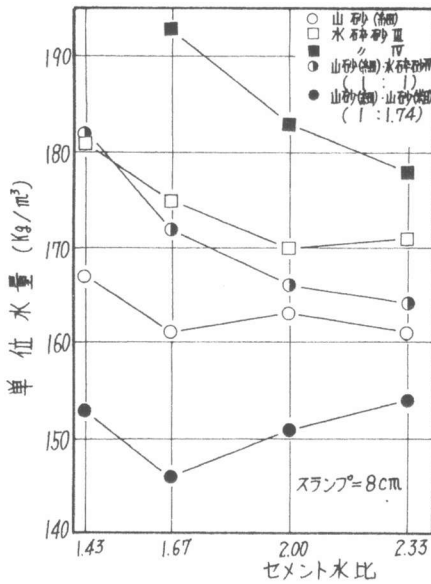


図-2 WとC/Wとの関係

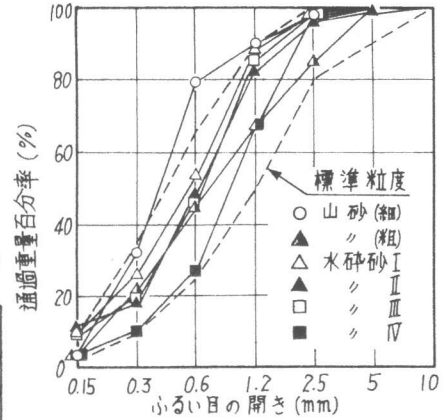


図-1 細骨材の粒度曲線

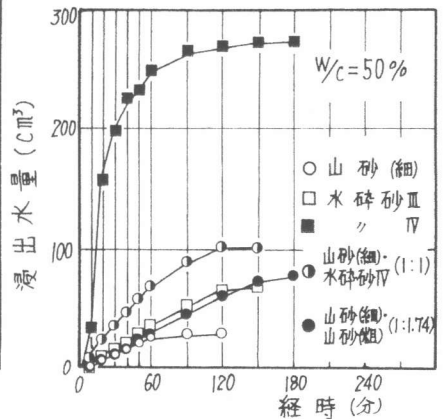


図-3 ブリージング試験結果

砕砂と山砂(粒径 $0.6 \sim 0.3$ mm)の粒の形状についての1例を示す顕微鏡写真である。B.S規格に準じて行った10 ϕ 破砕値は粒度が $1.2 \sim 2.5$ mmの試料の 0.6 mmふるい通過重量百分率を示すと、山砂が5~8%, 水砕砂が36~39%と水砕砂の方がかなり弱いようである。

2) フレッシュコンクリートの性質

水砕砂ⅡⅢを用いたコンクリートの単位水量は W/C が43%と小さい時はほとんど差はないが60%, 70%と大きくなると水砕砂Ⅱに対してⅢの方が3~4%大きくなる。図-2は練上がり温度も 23 ± 2 ℃, スランプを8cmと一定とした場合の単位水量と W/C との関係を示したものである。各 W/C における山砂(細)と比較して水砕砂Ⅲは4~9%, 水砕砂Ⅳは10~20%と大きく、 W/C が大きくな

表-3 ブリージング試験結果

細骨材の種類	水セメント比 (%)	単位水量 (kg)	スランプ (cm)	全浮水量 (cm³)	ブリージング量 (cm³/cm³)	ブリージング率 (%)	練り上り温度 (°C)
水砕砂Ⅲ	50	172	9.1	64.5	0.131	3.14	22.5
〃	60	174	7.6	62.0	0.126	2.98	22.0
水砕砂Ⅳ	50	183	8.0	274.4	0.559	12.60	23.5
〃	60	191	7.2	303.4	0.618	13.58	23.0
山砂(細)	50	162	7.3	29.8	0.061	1.54	26.0
〃	60	165	9.9	71.0	0.145	3.56	25.5
山砂(細)水砕砂Ⅳ (1:1)	50	164	6.9	101.7	0.207	5.12	23.5
〃	60	170	7.2	209.9	0.428	10.87	23.0
山砂(細)山砂(粗) (1:1.74)	50	152	8.6	78.9	0.161	4.29	22.0
〃	60	149	9.6	125.6	0.256	6.92	23.0

るほど単位水量は増加の傾向がある。また、水砕砂IVに山砂(細)を混合した混合砂(1:1)の単位水量は%が43, 50%において12, 18%と僅かの増加で混合が単位水量の減少に有効となっているが、%が60, 70%と大きくなると、ワーカビリティも悪くなり、所要のスランプを得るための単位水量は7%, 9%と大きくなって来る。表-3は%が50, 60%におけるブリーディング試験の結果も、図-3は浸出水量-時間曲線の一例を示したものである。この図、表から明らかであるが、%が50%では、水砕砂IVの浸出水量は山砂(細)の9倍、水砕砂IIIの5倍と大きく30分までで約73%のブリーディング水量が生じている。混合砂(1:1)の%が50%と60%のブリーディング水量を比較すると60%の方が約2倍も大きくなり、配合における単位水量の増加およびワーカビリティの低下が大きく影響している。

3). 硬化コンクリートの性質 図-4は水砕砂I II IIIを用いたコンクリートの圧縮強度と%との関係を示したものである。この3種の水砕砂は採令が小さい日では、また、%の大きい70%では圧縮強度にほとんど差がなく、粒度、粒形の影響が小さい。採令が28, 91日と大きく、また、%が小さくなるにつれてその影響が大きくなることを示している。図-5, 6, 7は山砂(細)、水砕砂III, IV, 混合砂(1:1)コンクリートの圧縮強度と%との関係と比較したものである。山砂と水砕砂IIIコンクリートの採令が日数における圧縮強度は各%においてほとんど差はないが採令91日では、水砕砂IIIコンクリートの σ_c -%直線の傾きが山砂に比べて小さくなり、%が70%では水砕砂IIIが山砂より26%大きく、%が43%では逆に9%小さくなって来る。また、水砕砂IIIとIVを比較すると、粗粒率が29.5と大きく、粒形が比較的角張っていて、微粒合の少ない水砕砂IVの方が、各採令、各%において一様に強度が小さくなって来る。これは加工方法の違いよりもむしろ粒度、粒形の差と考えられる。水砕砂IVは細粒の自然砂との混合利用を考えたもので、その結果の一例を図-7に示す。混合砂(1:1)コンクリートの圧縮強度は混合前の両者のコンクリートの大略中間程度と考えられるが、特に、採令

91日では%が43~70%において、山砂コンクリートの強度に近くなり、僅か4~5%程度の強度減となり、混合利用をはかることにより、比較的加工の程度の小さい水砕砂の単位水量の減少、ワーカビリティの改善、および、強度特性の面からも有効な手段と思われる。図-8, 9, 10は各種細骨材を用いたコンクリートの引張強度と%との関係を示したものである。一般に水砕砂コンクリートの引張強度は初期採令において、特に、%の小さい範囲では山砂コン

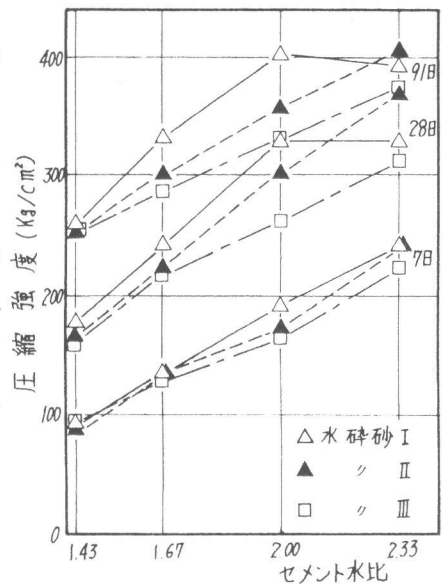


図-4 σ_c とC/Wとの関係

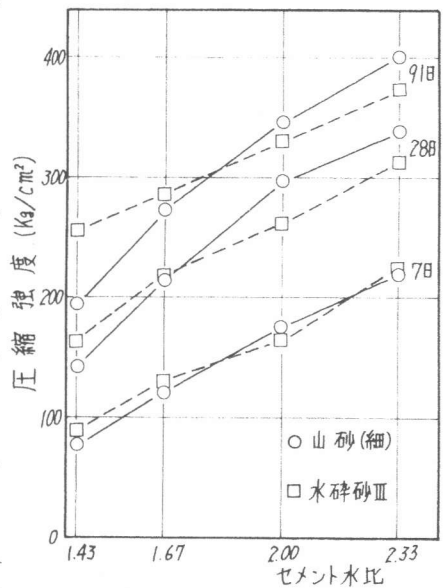


図-5 σ_c とC/Wとの関係

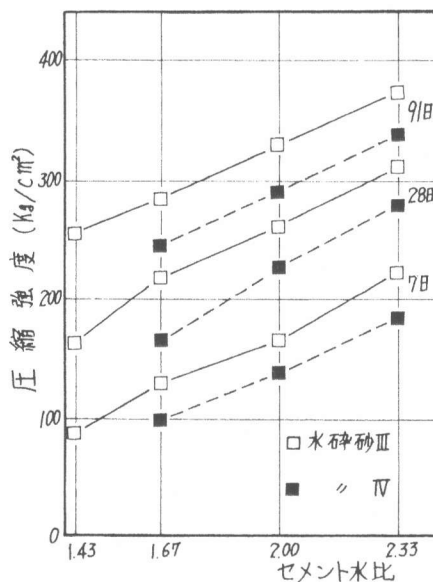


図-6 σ_c とC/Wとの関係

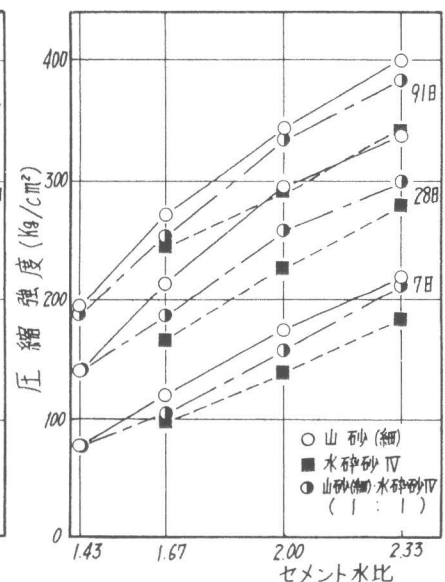


図-7 σ_c とC/Wとの関係

クリートに比べてあるが、長期材令ではW/cの大きい範囲の強度の増加が特に大きく、W/cが70%では約25%、W/cが60%では約15%程度水砕砂Ⅲ、Ⅳコンクリートの方が大きくなり、W/cの小さい範囲では引張強度の頭打ち現象がみこりW/cの関係はほぼ水平に近い傾向となる。このことはW/cの大きい範囲で潜在水硬性の影響が比較的大きく現われ、W/cの小さい範囲では水砕砂の粒自身の強さが影響して、引張強度に頭打ちの現象が現

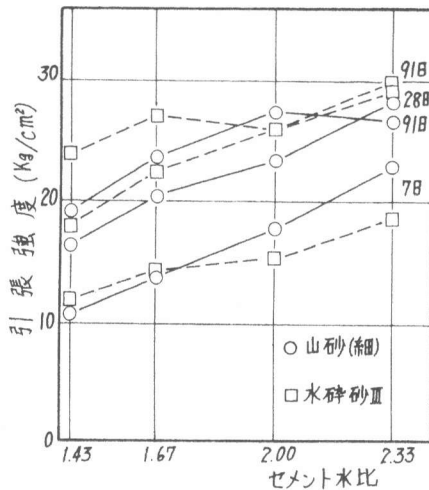


図-8 σ_t とC/Wとの関係

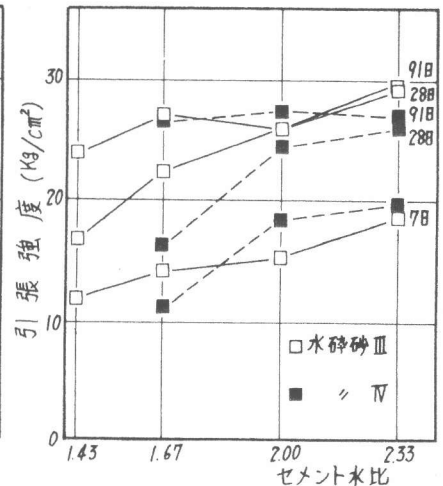


図-9 σ_t とC/Wとの関係

れられるものと思われる。水砕砂Ⅳと山砂(細)とを混合砂(1:1)の引張強度とW/cとの関係は山砂のそれに近く、潜在水硬性は認められないうである。

図-11は破壊応力の1/3まで荷重割線係数と圧縮強度との関係を示し、これらの関係を指数関数として求めた関係式は次のようになる。水砕砂Ⅱコンクリート $E_c = 0.269 \delta_{28}^{0.47} \times 10^5$ (kg/cm²)、水砕砂Ⅲ $E_c = 0.160 \delta_{28}^{0.56} \times 10^5$ (kg/cm²)、水砕砂Ⅳ $E_c = 0.188 \delta_{28}^{0.53} \times 10^5$ (kg/cm²)、山砂(細) $E_c = 0.454 \delta_{28}^{0.35} \times 10^5$ (kg/cm²)。水砕砂Ⅱ、Ⅲ、Ⅳコンクリートのヤング係数はほとんど差がなく、圧縮強度150~350 kg/cm²の範囲で2.7~4.2×10⁵ (kg/cm²)の値を示し、同一圧縮強度の山砂コンクリートに比べて同程度から約20%大きくなっている。乾燥収縮の経時変化を各細骨材について比較した結果の一例を図-12に示す、水砕砂を用いたコンクリートの乾燥収縮が山砂を用いた場合の値よりもやや小さい傾向となっている。

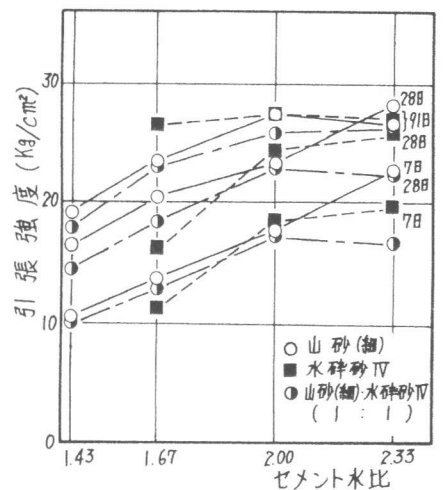


図-10 σ_t とC/Wとの関係

5. おおひ。高炉水砕砂をコンクリート用細骨材として用いる場合、水砕砂の粉砕加工の方法、程度がコンクリートの諸性状におよぼす影響は大きく、重要となる。本実験の範囲からは、特に、単独で利用するときは、単位水量、ワーカビリティー、ブリージングおよび強度の面から粗粒率が水砕砂Ⅲ程度即ち25以下が望ましいと思われる。これより大きくなると単位水量の増加が著しく、W/cが大きくなると、その傾向は11のよう顕著となりワーカビリティーが非常に悪くなるようである。しかし自然砂との混合使用はフレッツユコンクリートの性状の改善や強度特性から有効と思われるが、この場合も水砕砂の粗粒率は2.7程度までの粉砕加工は必要と思われる。なお混合砂としての利用は粉砕費用の軽減、自然に硬化する現象の問題等の解決の一方法ともなるので現在継続して検討中である。最後に本実験に用いた水砕砂は新日鉄君津製鉄所および株式会社鉄帯のご協力により提供していただき、ここに記し、謝辞を表します。

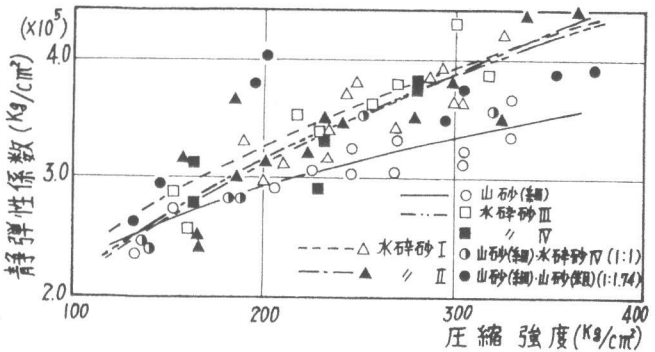


図-11 E_c と σ_c との関係

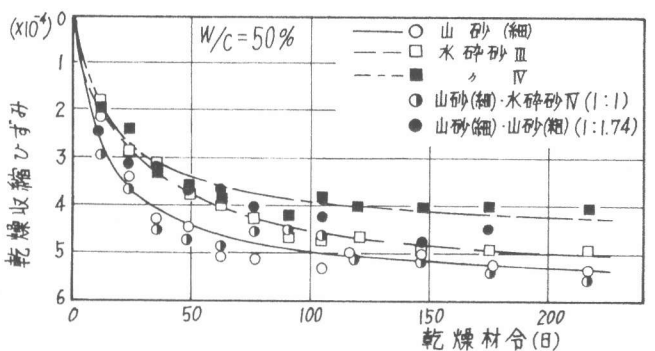


図-12 乾燥収縮ひずみの経時変化