

## 論文 硬質水砕スラグを海砂代替品として利用するための研究

高山 俊一\*1・北原 敦志\*2・寿崎 益夫\*3

**要旨：** 破碎・粒形改善機によって処理した硬質水砕スラグ 4 種類を海砂と混合し、コンクリートのコンシステンシーならびに硬化コンクリートの諸性質を調べた。フレッシュコンクリートの空気量は、水砕スラグ混入率が大きくなるほど、一部の水砕スラグに多量に連行される傾向がみられた。スランプおよびブリーディング率は、水砕混入率が大きくなってもほとんど変化は見られなかった。また、圧縮強度は水セメント比 55% で、水砕混入率が最大 50% までであるが、海砂 100% のそれとほとんど変わらなかった。したがって、硬質水砕スラグを海砂と 10~50% 混合して使用しても、コンクリートに何ら支障が生じる事が無いものとする。

**キーワード：** 水砕スラグ、海砂、細骨材、コンシステンシー、強度

### 1. はじめに

周囲を海で囲まれている我が国では、海岸および海中より採取される海砂は、無尽蔵に存在する物と最近まで考えられていた。しかし、近年、環境保全の考えが強調される様になり、海砂の採取にも著しい制限が伴うようになってきた。特に瀬戸内海での海砂の採取は、数年前から禁止ならびに制限が行われている。このような状況下において、コンクリート用細骨材として優れた海砂に代わる細骨材を、早急に選択しなければならない。そこで著者らは、製鉄所から毎日、多量に排出される高炉スラグを冷却して生産される「高炉水砕（水砕スラグ）」に着目した。水砕スラグは多量の水によって冷却されて製造されるため、針状部分が多く、そのままでは細骨材として利用することは不可能と考えられる。したがって、針状部分を除去し、中心部分の比較的硬い部分のみを採取しなければならない。そこで、破碎・粒形改善機を利用すれば、水砕スラグの針状部分を除去した硬質水砕スラグ（以下、水砕と略する）が製造可能である。原形の水砕を破碎・粒形改善機に通すことにより、細砂から荒砂までの粗粒率が異なる細骨材を比較的簡単に製

造できる。したがって、硬質水砕スラグがコンクリート用細骨材として十分に使用できることを確認するために実験を行った。また、製鉄所は北海道から九州まで各地に分散し、しかも大都市に比較的隣接している。この点からも硬質水砕スラグが細骨材として利用される事は、リサイ



写真-1 水砕スラグの形状



写真-2 粒形改善した硬質水砕スラグの形状

\*1 九州共立大学 工学部土木工学科教授 工博(正会員)

\*2 九州共立大学 工学部土木工学科

\*3 住金リコテック(株) 技術課課長

クル資源の活用も含め、極めて有効であると考えられる。

## 2. 実験概要

### 2.1 硬質水砕スラグに改良するための方法

水砕の針状箇所を除去するために、図-1に示す破碎・粒形改善機（k社製、以下、粒形改善機と略す）を使用した。水砕を粒形改善機の上方から投入し、機械の回転速度を利用し、遠心力によって破碎室から排出される。排出された水砕が周囲の鋼板に衝突し、針状箇所が除去され、硬質部分が残る。粒形改善機の回転速度によって骨材の粒形を調整できる。回転速度を小さくすれば粗粒が得られ、大きくすれば細粒が得られる。写真-1および写真-2は、水砕（原形）と硬質水砕を示す。粒形改善機に水砕を投入することにより、水砕の針状箇所が除去されたことが分かる。

### 2.2 使用材料

表-1に骨材の物理的性質を示す。北九州産の海砂および粗骨材（碎石、最大寸法20mm）を使用した。粒形改善機によって針状箇所を除去した硬質水砕スラグは、4種類である。水砕A、BおよびDは同一製鉄所で製造されたものである。水砕Cは、前記と異なる製鉄所で製造された。水砕A、CおよびDは目標粗粒率が2.7であり、水砕Bのみが目標粗粒率3.0である。水砕Dは水砕（原形）製造時の冷却温度を若干変えて製造した。一般に、水砕製造時の水砕自体の温度が高い場合、密度が小さい水砕ができるとされている。

水砕の密度は、A、B および C では海砂の2.57g/cm<sup>3</sup>より若干大きい。しかしながら水砕Dの密度は2.56g/cm<sup>3</sup>で、海砂のそれとほぼ同一である。海砂の実積率は66.2%であるが、水砕のそれはいずれも小さい。実積率は、水砕Cが64.2%であり、密度が最小の水砕Dが53.4%である。水砕が同一品質であるAとBで比較すると、水砕Aの粗粒率2.67の実積率が57.9%であるが、粗粒率2.99の水砕Bでは56.3%である。同一品質の水砕の場合、粗粒率が大きい水砕は、粗粒率が小さいものに比べ、粒形の大きいものがより

多く存在することである。すなわち、粗粒率が大きい水砕は、角や針状箇所が除去されずに多く存在しているものとする。そのため、粗粒率が大きい水砕ほど、実積率が小さくなったものとする。

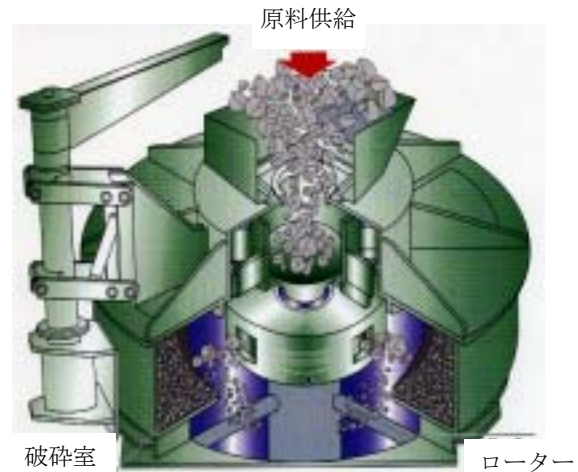


図-1 破碎・粒形改善機

表-1 骨材の物理的性質

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水 率(%)	粗粒 率	単位容 積質量 (kg/L)	実積 率(%)	
海砂	2.57	1.51	2.74	1.675	66.2	
粗骨材	2.66	0.27	6.96	1.617	61.0	
水砕	A	2.66	1.32	2.67	1.519	57.9
	B	2.61	1.41	2.99	1.448	56.3
	C	2.78	0.94	2.63	1.768	64.2
	D	2.56	1.30	2.66	1.350	53.4

表-2 実験項目

水セメント比W/C	目標スランプ	海砂と水砕の混合 (水砕混入率)	試験項目
55%	8cm	0,10,20	・フレッシュコンクリート スランプ・空気量・ブリーディング ・硬化コンクリート 圧縮強度（材齢7,28および91日）、弾性係数、単位質量
	18cm	30,50%	

※水砕混入率 0%は細骨材に海砂 100%

表-3 コンクリート配合（水砕A）の一例

番号	水セメント比 (%)	細骨材率 s/a (%)	水砕混入率 %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	海砂	水砕	粗骨材	AE減水剤
1	55	45	0	148	269	840	0	1064	0.807
2			10	151	275	753	88	1056	0.825
3			20	155	282	663	170	1045	0.846
4			30	157	285	578	255	1043	0.855
5			50	161	293	409	423	1032	0.879

### 2.3 実験方法

表-2に示すように、実験項目はフレッシュコンクリートがスランプ、空気量およびブリーディングを、硬化コンクリートが強度、弾性係数および単位質量である。水セメント比は55%と一定して実験を行った。コンクリートの配合の一例を表-3に示す。コンクリートの目標スランプは8cmおよび18cm、目標空気量は4%とした。AE減水剤は、主成分がリグニンスルホン酸塩系を使用した。細骨材は海砂と4種類の硬質水砕スラグを利用し、水砕混入率を容積比で0, 10, 20, 30 および 50%と混合し、表-2の諸性質を調べた。ブリーディング率は、コンクリートのブリーディング試験方法（JIS A 1123）に従って行った。予備実験として、単位水量（151kg/m<sup>3</sup>、粗粒率3.0の水砕）を一定とし、水砕混入率を変化してスランプ試験を行ったところ、図-2<sup>1)</sup>に示す様に、水砕混入率が増加すると、スランプが減少する傾向がみられた。そのため、水砕A, BおよびDにおいては、目標スランプを確保するために、水砕混入率が大きくなるにしたがい、単位水量を増加することにした。圧縮強度を行う際、ストレンゲージ（PL-60-11）を供試体側面に3枚貼付（偏心荷重によるデータのばらつきを防止するため）し、荷重毎のひずみを測定し、静弾性係数（以下、弾性係数と略す）を測定した。

### 3. 実験結果および考察

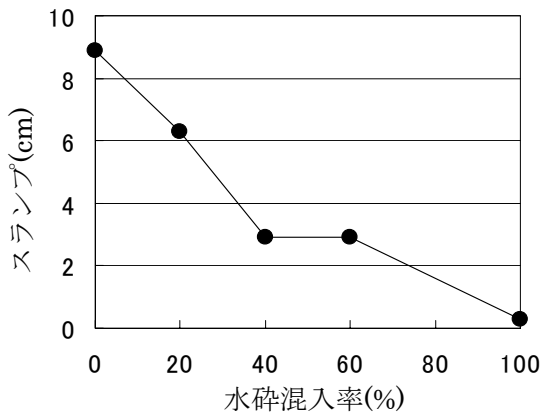


図-2 水砕混入率によるスランプの変化  
(W=151kg/m<sup>3</sup>, 水砕 FM=3.0)

### 3.1 フレッシュコンクリートの性質

コンクリートの単位水量は148~169kg/m<sup>3</sup>とし、水砕混入率が多くなるにしたがって水量を増加した。図-3は目標スランプ8cmのスランプならびに空気量の測定結果を示す。水砕BおよびDでのスランプは、海砂100%の場合、約14cmと目標値より大きくなったが、水砕混入率10~20%でもほぼ同程度であったため図中に示した。

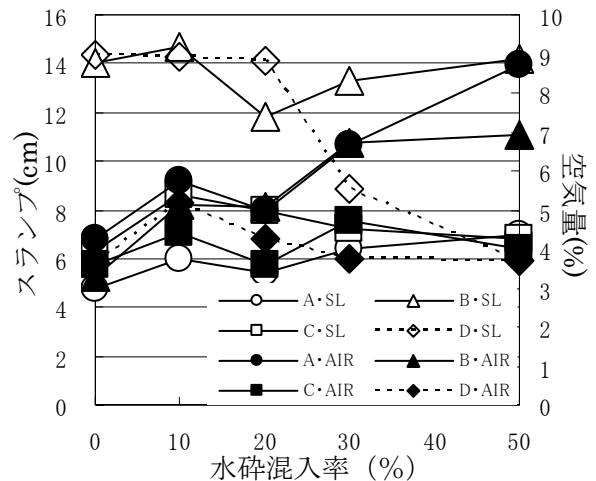


図-3 水砕混入率とスランプ・空気量 (SL=8cm)

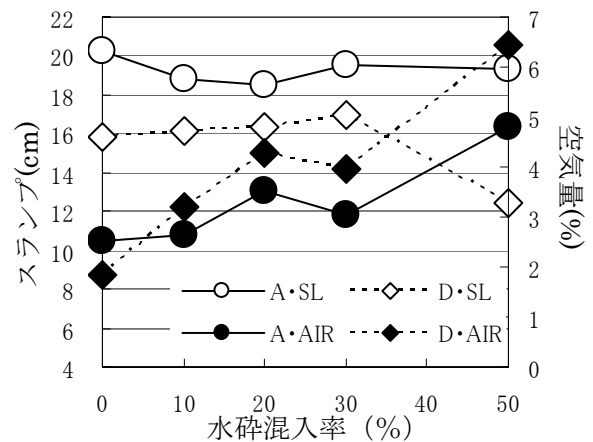


図-4 水砕混入率とスランプ・空気量 (SL=18cm)

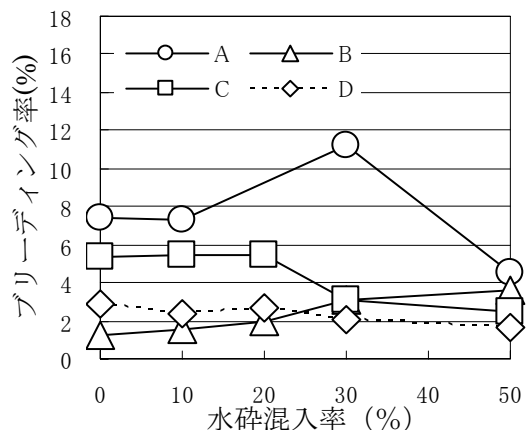


図-5 水砕混入率とブリーディング率 (SL=8cm)

同図によると、水砕Dの場合を除き、水砕混入率が変化してもスランプはほぼ一定の値を示した。しかしながら、空気量は水砕AおよびBの場合、水砕混入率が30%および50%と大きくなると2~4%増加した。図-4は目標スランプ18cmのスランプならびに空気量の測定結果である。水砕Dの混入率50%のスランプを除き、スランプは水砕混入率の大小にかかわらず、ほぼ一定の値を示した。水砕Dの実積率(表-1)は、53.4%と他の水砕のそれより3~10%ほど小さい。この実積率が小さいために、水砕混入率を大きくすると、スランプが低下したものとする。しかしながら、空気量は水砕混入率が大きくなるにしたがって増加傾向を示した。

図-5は目標スランプ8cmのブリーディング率の測定結果である。同図によると、ブリーディング率は水砕Aの一部を除き、水砕混入率にかかわらずほぼ一定の値を示した。水砕Aでは図-3に見られる様に、水砕混入率が大きくなると、空気量が増加している。この空気量の増加により、水砕Aでブリーディングがそれほど多くならなかったものとする。当初、水砕混入率が大きくなると、水砕自体がガラス化<sup>2),3)</sup>しているものも有り、保水性に欠けるため、ブリーディングが増加することを懸念したが、この心配はき憂に過ぎなかった。

### 3.2 水砕混入率と圧縮強度の変化

図-6に材齢7日、図-7に材齢28日および91日の圧縮強度と水砕混入率の関係を示す。両図とも目標スランプ8cmの場合である。図-6によると、水砕混入率0%（海砂100%）の圧縮強度に比較し、水砕混入率が増加すると、極わずかなではあるが強度の減少傾向を示している。水砕A,CおよびDの混入率0%の強度が25~26N/mm<sup>2</sup>であり、水砕混入率50%で21~23N/mm<sup>2</sup>とわずかに減少し、強度の減少率は10~18%である。水砕混入率30%および50%での空気量の増加による強度の低下<sup>4)</sup>が10~20%であるとする、3~5N/mm<sup>2</sup>の強度低下と考えられる。そうすると、図-6での水砕混入率30%および50%での強度の低下はほとんど無いとも考えられる。図-7

によると、水砕の種類および材齢によって変化するが、同一であれば水砕混入率0%での圧縮強度に比べ、水砕混入率が大きくなっても圧縮強度はほぼ一定であるものと考えられる。

図-8は目標スランプ18cm、水砕Aの圧縮強度と水砕混入率の関係である。同図によると、材齢7日、28日および91日のいずれにおいても、水砕混入率が変化しても圧縮強度はほぼ一定である。また、強度は材齢が大きくなるにしたがって順調に伸びている事が分かる。

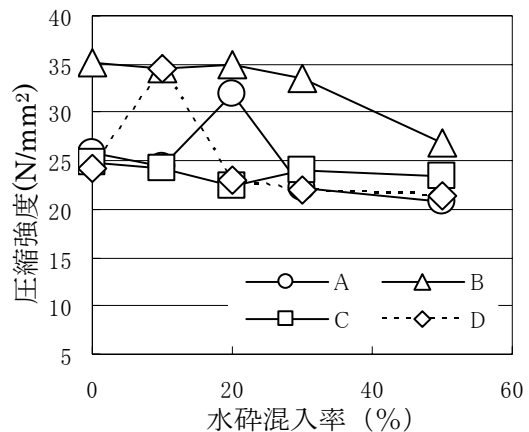


図-6 圧縮強度と水砕混入率 (SL=8cm, 材齢7日)

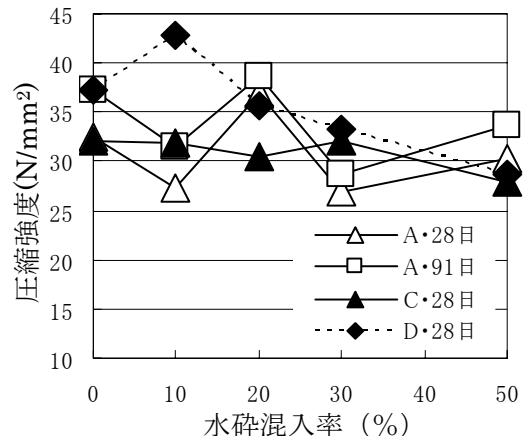


図-7 圧縮強度と水砕混入率 (SL=8cm)

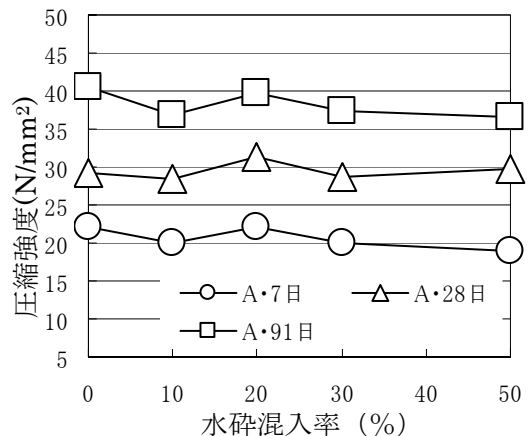


図-8 水砕混入率と圧縮強度 (SL=18cm)

したがって、水セメント比 55%の場合であるが、硬質水砕スラグを海砂の代替品として 10～50%使用しても、圧縮強度は海砂使用コンクリートのそれに比べ、大差ないものと考えられる。以上の事から、強度の面においては、水砕を 50%まで使用しても何ら不都合は生じないものと考えられる。

### 3.3 静弾性係数(以下、弾性係数と略す)

目標スランブ 8cm, 材齢 7 日の弾性係数を図-9 に、材齢 28 日と 91 日の弾性係数を図-10 にそれぞれ示す。図-9 によると、海砂 100%での弾性係数と比較し、水砕混入率が増加しても弾性係数は大きな変動は無いものと考えられる。水砕 B の弾性係数は、他の水砕の場合に比べ若干大きくなっているが、これは図-6 に示されている強度の違いに因るものと考えられる。図-10 の弾性係数の傾向も図-9 の場合と同じく、海砂 100%の弾性係数と比べ、水砕混入率の違いによって何ら差異は認められない。水砕 D の場合、

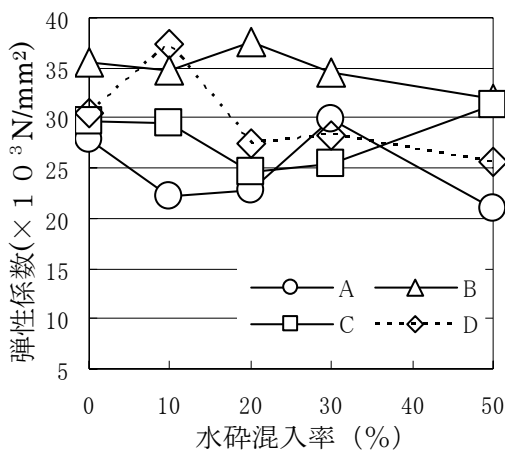


図-9 水砕混入率と弾性係数 (SL=8cm, 材齢 7 日)

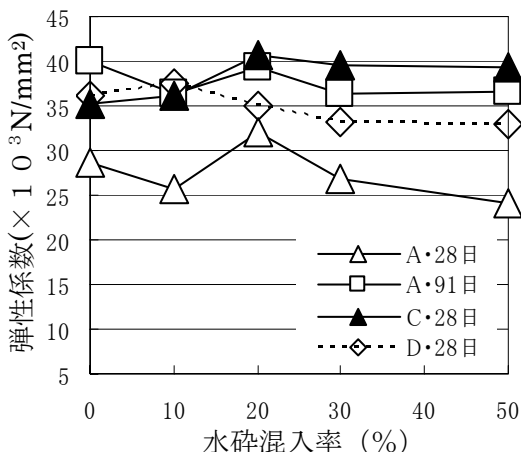


図-10 水砕混入率と弾性係数 (SL=8cm)

密度が他の水砕のそれに比べ若干小さかったため、弾性係数が若干小さくなることも懸念されたが、何ら特に注意すべき事ではないものと考えられる。これは水砕 D の密度が  $2.56\text{g/cm}^3$ 、吸水率が 1.30%と、海砂に比べてもほぼ同一であったためだと考えられる。水砕 C の弾性係数は、水砕混入率が 20%以上になると、他の水砕のそれに比べ  $2\sim 3(\times 10^3)\text{N/mm}^2$ ほど大きくなった。この理由としては、水砕 C の密度が  $2.78\text{g/cm}^3$ 、吸水率が 0.94%であり、他の水砕より若干ではあるが密度が大きく、吸水率が小さいためだと考える。

図-11 は、本研究において得られた全ての強度と弾性係数の関係である。図中の直線は、最小二乗法によって求めた回帰直線である。回帰直線の相関係数は、 $R=0.89$  と極めて大きいと言える。したがって水砕スラグを混入したコンクリートは、海砂使用コンクリートの強度と弾性係数の関係と同様であると考えてよいものと判断される。

### 3.4 コンクリートの単位質量

目標スランブ 8cm, 材齢 28 日のコンクリートの単位質量と水砕混入率の関係を図-12 に示す。同図によると、水砕混入率が大きくなるに従い、単位質量が減少している。同一水砕を使用した場合、実験誤差を無くすために、同一日に試験および供試体作製を行った。図-3 のスランブの測定結果によると、水砕 D を除き、水砕混入率によってスランブに大きな変化は認められない。また、水砕の密度は、水砕 D を除き 3 種類とも海

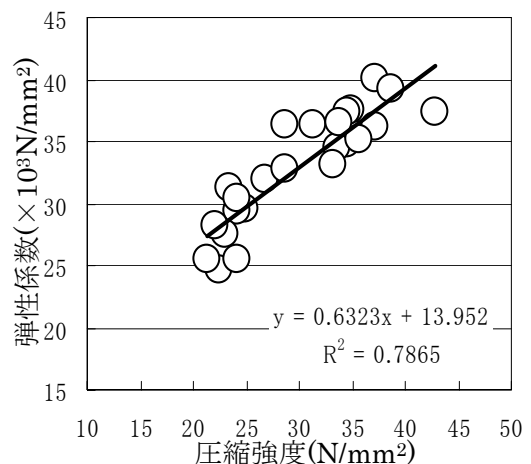


図-11 圧縮強度と弾性係数

砂のそれより大きい。したがって、通常であれば水砕混入率が大きくなるほど、単位質量は増加するものと考えられる。しかしながら、上記に記した様に水砕混入率が大きくなるにしたがい、単位質量は逆に減少している。このようなことが生じる原因としては、水砕混入率が多くなると、締固めが不十分になりやすいことも考えられる。他に、**図-3**に示されている様に、水砕混入率が大きくなると空気量が増加していることに因るものと考えられる。水砕 A の水砕混入率 0% の単位質量は  $2.43\text{g/cm}^3$ 、水砕混入率 50% のそれは  $2.34\text{g/cm}^3$  であるから、 $2.34/2.43=0.963$  となり、水砕混入率 50% での単位質量は 0% のそれに比べて約 4% 軽くなっている。**図-3** の空気量は、水砕 A で混入率 0% で 4.5%、混入率 50% のそれは約 9% となり、約 4.5% の空気量が増加している。この事を考慮すると、単位質量が水砕混入率の増加によって減少している理由は、空気連行に因るものと考えられる。

#### 4. まとめ

我が国は周囲を海で囲まれているため、海砂は無尽蔵に存在するものと考えられていたが、地球環境を守る立場から海砂採取に著しい制限が実施されるようになった。そのため、我々はリサイクル資源の活用を今以上に積極的に進め、自然破壊を防止する努力を継続しなければならない。このことから、硬質水砕スラグを海砂の代替品として利用する研究は、時機を得たテーマであると考えられる。

次に本研究から得られたことをまとめて記す。

- (1) 硬質水砕スラグの密度は、海砂のそれと比べ、ほぼ同程度であるか、若干大きくなるものと考えられる。硬質水砕スラグの実積率は海砂のそれより 1~10% ほど小さい様である。粗粒率が大きくなると、水砕スラグの実積率が小さくなるために注意が必要と考える。
- (2) スランブは一部の硬質水砕スラグで、混入率が 30%、50% と大きくなるにしたがって減少した。水砕混入率が大きくなると、一部の水砕混入率では空気量が増加する傾向がみられた。

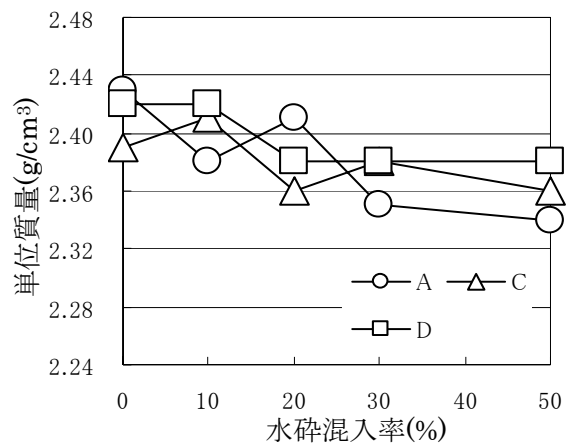


図-12 水砕混入率と単位質量  
(材齢 28 日, SL=8cm)

- (3) ブリーディングは、水砕混入率が大きくなっても海砂 100% の場合とほぼ同程度であった。
- (4) 圧縮強度は、水セメント比 55% のみであるが、海砂 100% の場合に比べ、一部で水砕混入率 30% および 50% の場合に極わずかに減少する傾向がみられたが、全体的に大きな違いは認められなかった。したがって、水セメント比 55% の普通コンクリートでは、硬質水砕スラグを 10~50% まで海砂と混合して使用しても、強度の面から何ら不都合は生じないものとする。
- (5) 弾性係数は、海砂 100% の場合に比べ、水砕混入率が変化してもほぼ同程度であったものとする。

#### 参考文献

- 1) 高山俊一, 山口訓史, 寿崎益夫: 水砕スラグを細骨材として使用するための研究, 平成 15 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 第 1 部冊, pp.A-464~A-465, 2004.3
- 2) 赤津健, 池田五十六, 志賀直敏, 前田勝輔: 高炉水砕スラグのガラス量について, セメント技術年報, 第 18 巻, pp.91~93, 1974
- 3) 魚本健人, 小林一輔: 高炉水砕スラグ・排煙脱硫石こう系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, 土木学会論文報告集, 第 302 号, pp.125~138, 1980.10
- 4) 竹村和夫, 他 3 名共著: 建設材料, 森北出版(株), p.83, 1998.5