

# 論文 銅スラグ砂コンクリート大型暴露試験体の施工とコンクリートの初期性状

仁木孟伯<sup>\*1</sup>・長瀧重義<sup>\*2</sup>・友澤史紀<sup>\*3</sup>・福手 勤<sup>\*4</sup>

要旨：銅スラグ砂を用いたコンクリートを実際に生コンプラントで製造し、通常の施工方法で大型暴露試験体を製作した。暴露9ヶ月でコア供試体を採取し、粗細骨材の分布状況、中性化深さ、通気特性、及び力学特性を調査した。その結果、本試験の銅スラグ砂コンクリートはブリーディングが大きい特徴があるものの、硬化コンクリートの均一性の面で特に問題となる性状は認められず、むしろ緻密な組織の銅スラグ砂コンクリートが観察された。力学特性はコンクリートの比重及び強度に対応したものであった。

キーワード：骨材資源、銅スラグ砂、施工実験、暴露試験、圧縮強度、耐久性

## 1. はじめに

骨材資源の枯渇化と資源の有効利用という観点から、銅製錬時に水砕され副産する銅スラグを軽く砕いて、得られる銅スラグ砂について、コンクリート用の細骨材としての用途を対象にその評価試験を進めている。前報〔1〕では、銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的な性状について報告した。そこでは、銅スラグ砂を単味使用したコンクリートは、ブリーディングが大きくかつ凝結が遅れる傾向があるが、長期材齢での強度発現性に優れることを明らかにした。また、このような特徴は天然砂との混合使用により制御可能であることから、細骨材としての用途に基本的に大きな問題はないと評価された。

本報告は、銅スラグ砂コンクリートを実際に生コンプラントで製造し、ポンプあるいはバケットを使用し施工した大型暴露試験体の初期性状について、主としてコンクリートの均一性の面から調査したものである。試験は、大型暴露試験体より暴露9ヶ月で採取したコア供試体について、粗細骨材の分布状況、中性化深さ、通気特性、及び力学特性等を行い、これらのことから銅スラグ砂を使用したコンクリートの実用性の一面について評価した。なお、本研究は日本鉱業協会が組織した銅スラグ研究委員会が、平成6年7～8月に実施した「銅スラグ砂（日鉱金属社佐賀関工場製）を使用したコンクリートの施工性に関する試験」の一部を取りまとめたものである。

## 2. 大型暴露試験体の製作

### 2. 1 コンクリートの種類と配合

試験の対象としたコンクリートの種類は、ポンプ圧送性試験（配合シリーズⅠ）及び消波ブロック製造試験（配合シリーズⅡ）に用いたもので、銅スラグ砂の混合率、スランプ、水セメント比及びセメント種類を比較要因としている。コンクリートの種類を表-1に示す。目標空気量はすべて4.5%である。

- 
- \*1 三菱マテリアル（株）セメント研究所 部長（正会員）
  - \*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）
  - \*3 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻、工博（正会員）
  - \*4 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室室長、工博（正会員）

## 2. 2 使用材料

使用骨材の物理的性状を表-2  
及び図-1に示す。銅スラグ砂は  
自溶炉法により産出し水砕され  
たものを、ロッドミルで軽く砕  
いて得た。比較用の天然砂は  
河口砂と海砂を混合し粒度調  
整したものである。粗骨材は  
石灰岩碎石である。銅スラグ  
砂の粒度は、JIS A 5011「  
コンクリート用スラグ骨材」の  
FNS2.5に該当するものであり、  
天然砂に比べ0.6~1.2mmの粒  
子が多い。化学混和剤はA E  
減水剤遅延形を用いた。

表-1 コンクリートの種類

| シリーズ                     | 配<br>番<br>号 | 銅スラグ<br>砂混合率 | セメン<br>ト種類 | 水セメン<br>ト比 | 目標スラ<br>ンプ(cm) |
|--------------------------|-------------|--------------|------------|------------|----------------|
| I<br>ポンプ<br>圧送性<br>試験    | I-1         | 100 %        | N          | 55 %       | 18             |
|                          | I-2         | 100 %        |            |            | 8 → 12         |
|                          | I-3         | 50 %         |            |            | 18             |
|                          | I-4         | 50 %         |            |            | 8 → 12         |
|                          | I-5         | 0 %          |            |            | 18             |
|                          | I-6         | 0 %          |            |            | 8 → 12         |
| II<br>消波<br>ブロック<br>製造試験 | II-1        | 100 %        | B B        | 61 %       | 8              |
|                          | II-2        | 50 %         |            |            |                |
|                          | II-3        | 0 %          |            |            |                |
|                          | II-4        | 100 %        | N          | 61 %       | 8              |
|                          | II-5        | 50 %         |            |            |                |
|                          | II-6        | 0 %          |            |            |                |

注) 8 → 12: ベーススランプ8 cmを12cmに流動化

## 2. 3 大型暴露試験体の施工

大型暴露試験体は表-1に示す  
コンクリートについて各1体を作  
成した。その形状は800 × 300 ×  
2000<sup>H</sup> mmの柱体(図-2)で、配  
筋は主筋6-D16、スターラップ  
D10@200である。コンクリ  
ートの製造は、運搬時間がお  
よそ30分の生コン工場で行い、  
コンクリートの打設は、打込み  
高さ

表-2 骨材の性状

| 骨材種類                      | 細骨材   |       | 粗骨材   |
|---------------------------|-------|-------|-------|
|                           | 銅スラグ砂 | 天然砂   | 石灰岩碎石 |
| 最大寸法 (mm)                 | 2.5   | 2.5   | 20    |
| 粗粒率                       | 2.56  | 2.66  | 6.61  |
| 表乾比重                      | 3.61  | 2.55  | 2.70  |
| 吸水率 (%)                   | 0.45  | 2.00  | 0.41  |
| 単位容積質量(t/m <sup>3</sup> ) | 2.35  | 1.57  | 1.63  |
| 実積率 (%)                   | 65.4  | —     | 60.5  |
| 洗い試験損失量 (%)               | 4.6   | 0.62  | 0.20  |
| 塩分含有量 (%)                 | 0.003 | 0.012 | —     |

を50cm(4層)とし、各層を内部振動機を用いて締固めた。なお、コン  
クリートの投入は、シリーズIはポンプ圧送(水平換算距離226m)により、  
シリーズIIはバケットにより行った。コンクリートの配合と打込み直  
前の性状を表-3に示す。

## 2. 4 コア供試体の採取

試験体は1週間後に脱型し、岸壁から約20m離れた場所(日鉾金属  
社佐賀関工場)に梁型(800<sup>H</sup>)として暴露した。コア供試体の採取は、  
暴露9ヶ月後に図-2に示す位置から行い、所定の試験に供した。

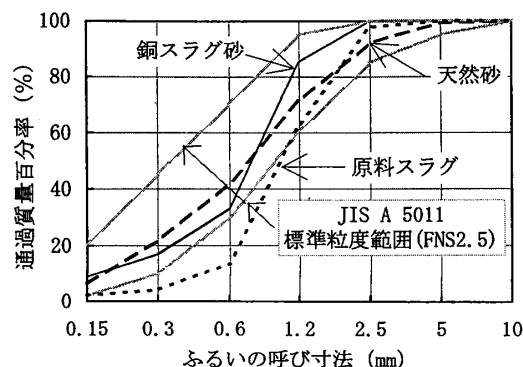


図-1 銅スラグ砂の粒度曲線

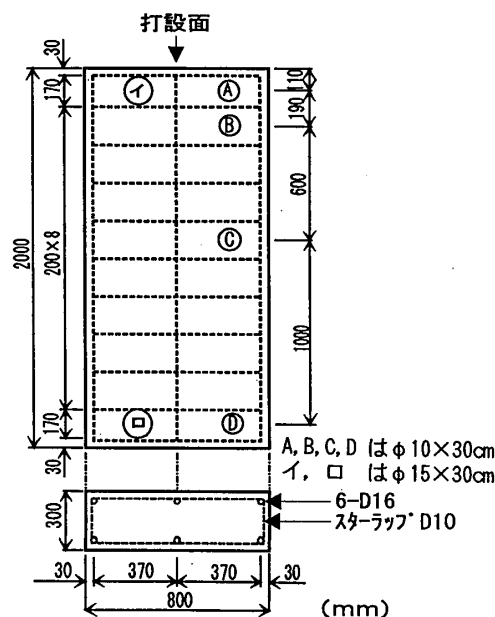


図-2 大型暴露試験体とコア採取位置

表-3 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性状

| 配合<br>番号 | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |                |                |      | スランプ <sup>o</sup><br>(cm) | 空気量<br>(%) | 単位容<br>積質量<br>(t/m <sup>3</sup> ) | アリーティ<br>ンク率<br>(%) | コンクリート<br>温度<br>(°C) |
|----------|------------|------------|--------------------------|-----|----------------|----------------|------|---------------------------|------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------|
|          |            |            | W                        | C   | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | G    |                           |            |                                   |                     |                      |
| I-1      | 55.0       | 44.4       | 183                      | 333 | 1074           | 0              | 1002 | 18.5                      | 4.9        | 2.59                              | 9.67                | 31.0                 |
| I-2      | 55.0       | 43.8       | 161                      | 293 | 1114           | 0              | 1064 | 9.5                       | 5.0        | 2.61                              | 6.75                | 31.5                 |
| I-3      | 55.0       | 44.6       | 181                      | 329 | 545            | 380            | 1002 | 19.0                      | 3.7        | 2.46                              | 5.37                | 31.0                 |
| I-4      | 55.0       | 44.0       | 159                      | 289 | 563            | 395            | 1064 | 13.0                      | 4.4        | 2.48                              | 3.39                | 31.0                 |
| I-5      | 55.0       | 44.9       | 179                      | 325 | 0              | 770            | 1002 | 18.0                      | 4.0        | 2.31                              | 3.02                | 30.5                 |
| I-6      | 55.0       | 44.4       | 157                      | 285 | 0              | 801            | 1064 | 10.0                      | 4.7        | 2.28                              | 1.20                | 30.5                 |
| II-1     | 61.0       | 44.6       | 160                      | 262 | 1147           | 0              | 1061 | 7.5                       | 4.8        | 2.61                              | 4.50                | 31.0                 |
| II-2     | 61.0       | 44.8       | 158                      | 259 | 581            | 405            | 1061 | 8.5                       | 4.3        | 2.45                              | 2.54                | 31.0                 |
| II-3     | 61.0       | 45.0       | 156                      | 256 | 0              | 821            | 1061 | 9.0                       | 3.8        | 2.28                              | 2.16                | 32.0                 |
| II-4     | 61.0       | 44.8       | 160                      | 262 | 1158           | 0              | 1061 | 6.5                       | 5.5        | 2.61                              | 10.32               | 33.0                 |
| II-5     | 61.0       | 45.0       | 158                      | 259 | 584            | 411            | 1061 | 8.5                       | 3.9        | 2.47                              | 4.72                | 33.0                 |
| II-6     | 61.0       | 45.3       | 156                      | 256 | 0              | 829            | 1061 | 8.5                       | 3.5        | 2.31                              | 1.61                | 33.5                 |

注) S<sub>1</sub> : 銅スラグ砂、S<sub>2</sub> : 天然砂、A E減水剤遅延形添加率 : Cx0.3%

### 3. 試験の内容と手順

施工した大型暴露試験体コンクリートの主として均一性を評価するために、採取コア供試体について、単位容積質量、中性化深さ、粗骨材量、銅スラグ砂量、通気特性の各試験を実施した。また、試験手順(図-3)に示すように、各種力学特性試験を実施した。

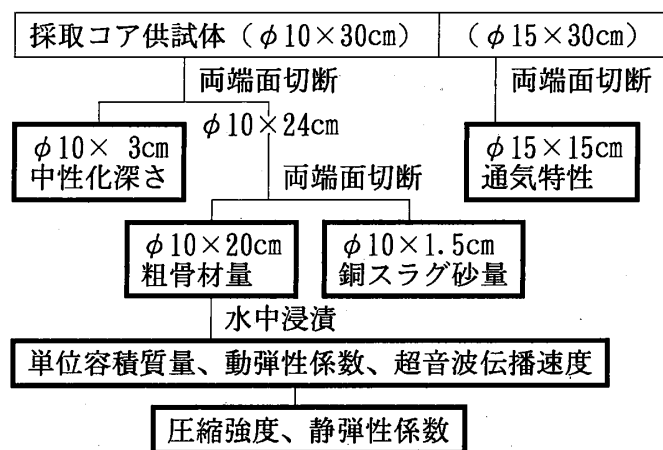


図-3 試験手順

### 4. 試験結果と考察

#### 4. 1 粗骨材の分布

粗骨材量はコア供試体外周面の粗骨材を透明紙にトレースし、その面積率を画像処理により求めた。打設面からの距離と粗骨材面積率との関係を目標スランプ別に図-4に示す。粗骨材面積率の打設面からの距離による変動は、目標スランプ18cmの場合は銅スラグ砂の混合率に関係なく比較的小さく、一定の傾向も認められない。

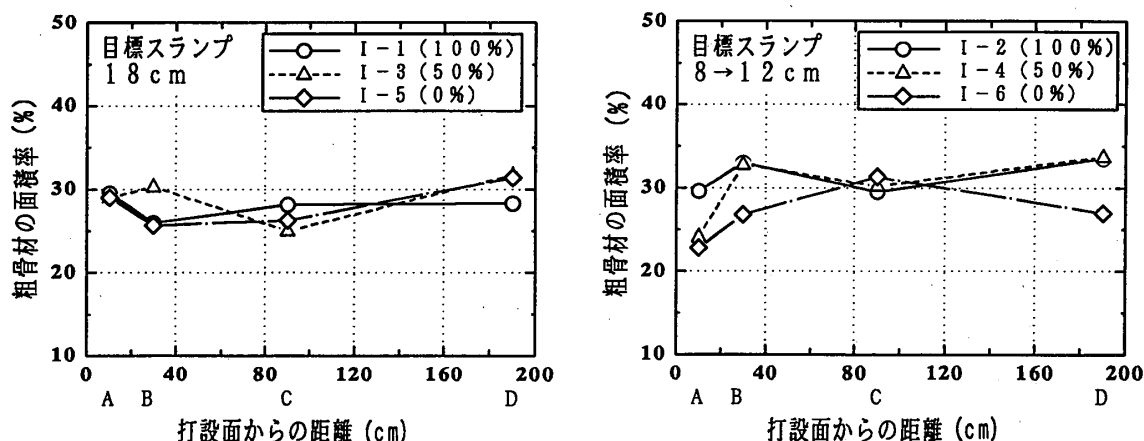


図-4 打設面からの距離と粗骨材面積率の関係

一方、目標スランブ8→12cmの場合は、銅スラグ砂50%及び0%(天然砂)ではその変動幅は比較的大きく(レンジで9.6%および8.5%)、また打設面付近では粗骨材面積率が小さくなる傾向が認められる。銅スラグ砂100%ではその変動幅は比較的小さい(レンジで4%)。これは、銅スラグ砂100%の場合はモルタルの比重が大きいいため、粗骨材の沈下による分離が抑制されたケースと考えられる。

#### 4. 2 モルタル中の銅スラグ砂の分布

銅スラグ砂は黒色であり、供試体切断面での目視観察も可能であるが、目視で打設面からの距離による分布の差が明瞭に認められるものはいなかった。そこで、銅スラグ砂中には比較的多く他の材料には極めて少ない成分であるCu及びFeの含有量(それぞれ0.6%, 33%)から銅スラグ砂の量を推定することとした。その手法は、試験片(φ10×1.5cm)を全粉碎し、ICP発光分析法によりコンクリート中のCu及びFeの含有量を求めた。次に、炭素分析装置によりC量を計測し、Cは全て粗骨材の石灰岩に由来するものとして粗骨材量を求め、また500°C強熱減量より水和物の結合水量を求め、これらをコンクリートの分析値から補正することにより、モルタル中のCu及びFeの含有量を求めた。その結果を表-4に示す。結果は配合からの算定値に比べ、砂の割合がかなり小さく本手法は的確なものとは言えない。敢えて相対値で打設面からの距離による砂の分布をみると、最下部(D)では砂量が多く、モルタル中の砂の分離傾向が窺える。

#### 4. 3 中性化深さ及び通気特性

図-5に銅スラグ砂の混合率と中性化深さの関係を、図-6に打設面からの距離と中性化深さの関係をそれぞれシリーズIについて示す。

表-4 モルタル中の銅スラグ砂量

| 配合番号                 | コア採取位置 | モルタル中の含有量 (%) |       | モルタル中銅スラグ砂量の割合 (%) |          |
|----------------------|--------|---------------|-------|--------------------|----------|
|                      |        | Cu            | Fe    | *) 推定値             | 配合からの計算値 |
| I-1<br>銅スラグ砂<br>100% | A      | 0.40          | 23.27 | 68.6               | 76.3     |
|                      | B      | 0.41          | 23.05 | 69.1               |          |
|                      | C      | 0.41          | 23.20 | 69.3               |          |
|                      | D      | 0.41          | 23.73 | 70.1               |          |
| I-2<br>銅スラグ砂<br>100% | A      | 0.42          | 25.20 | 73.2               | 79.2     |
|                      | B      | 0.43          | 26.19 | 75.6               |          |
|                      | C      | 0.42          | 25.59 | 73.8               |          |
|                      | D      | 0.45          | 26.89 | 78.2               |          |

\*) Cu 及び Fe 含有量からそれぞれ求めた推定値の平均値

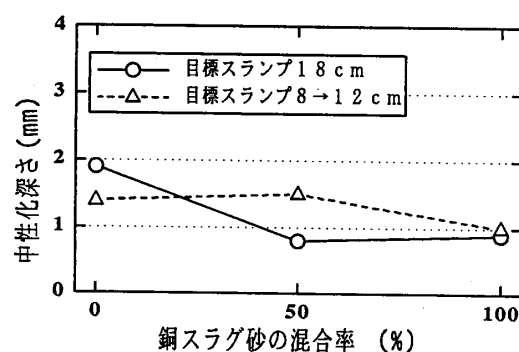


図-5 銅スラグ砂混合率と中性化深さの関係

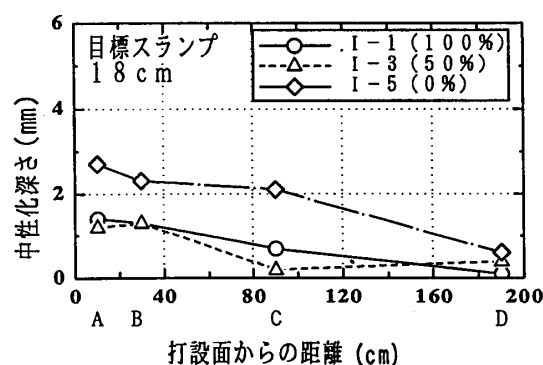


図-6 打設面からの距離と中性化深さの関係

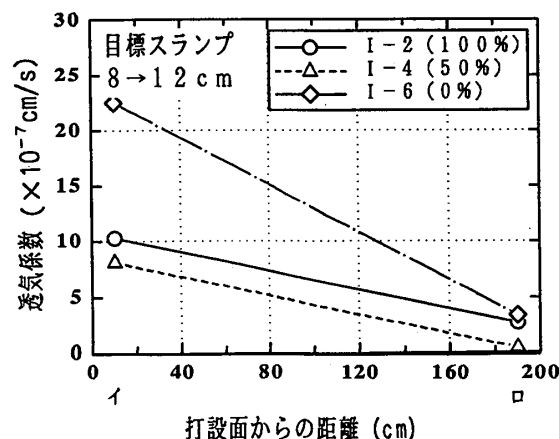


図-7 打設面からの距離と透気係数の関係

銅スラグ砂の混合率が大きいほど、また打設面からの距離が大きいほど中性化深さは小さい傾向にある。これらの現象は、いずれもブリーディングの影響と考えられる。銅スラグ砂コンクリートは、砂の表面性状、粒度構成及び比重の関係から、ブリーディングが大きいことを前報〔1〕で報告したが、本試験でも表-3に示すように大きい。すなわち、銅スラグ砂コンクリートは実質的な水セメント比が低下し、緻密な組織となっていることが考えられる。

図-7に透気試験の結果を、打設面からの距離と透気係数の関係で示す。中性化深さの場合と同様なコンクリート性状を示す結果である。

#### 4. 4 単位容積質量と実質空気量

図-8に打設面からの距離と単位容積質量の関係を、その変動が比較的大きかったシリーズIの目標スランプ18cmについて例示する。配合種類に係らず、打設時の下部と上部は単位容積質量が若干大きい傾向が認められる。図-9は単位容積質量から求めたコアコンクリートの空気量について、フレッシュコンクリートからの増減をブリーディング率との関係で示したものである。なお、空気量はブリーディングによる単位水量の減少を考慮に入れ算定した。ブリーディング率が大きいほど硬化コンクリート中の空気量が少なくなる傾向が認められる。

#### 4. 5 圧縮強度

図-10に打設面からの距離と圧縮強度の関係をシリーズIIの8Nについて例示する。打設面からの距離による圧縮強度の変動は、銅スラグ砂の混合率が大きいほどその変動係数は小さく、ばらつきは小さいと評価され、また最上部の強度が低下する顕著な傾向も認められない。このような傾向は他の配合でも同様である。

また、表-5からも判るように他のシリーズの場合も含めて、銅スラグ砂の混合率が大きいほど明らかに強度は大きい。その差は同一シリーズで20 N/mm<sup>2</sup> 強にも及んでいる。更に、前報〔1〕の基礎研究では、銅スラグ砂コンクリートは、材齢91日では良質の川砂を使用した強度を上回ることを報告した。このような強度発現性は、ブリーディングによる水セメント比の低減効果が大きいと考えられるが、算定される実質水セメント比の減少（最大で5%程度）に対して強度差が大きく、また材齢の経過に伴う強度の増進が大きいことから、水セメント比の低

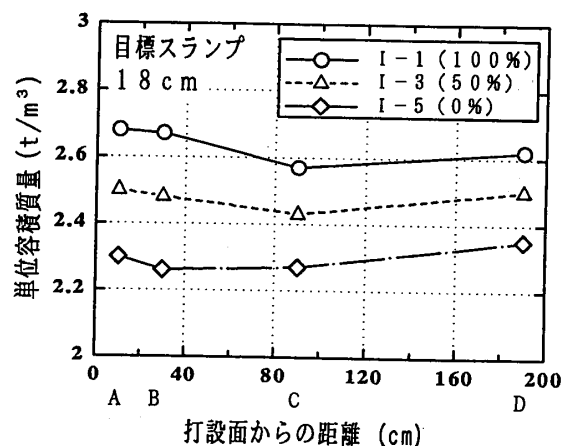


図-8 打設面からの距離と単位容積質量の関係

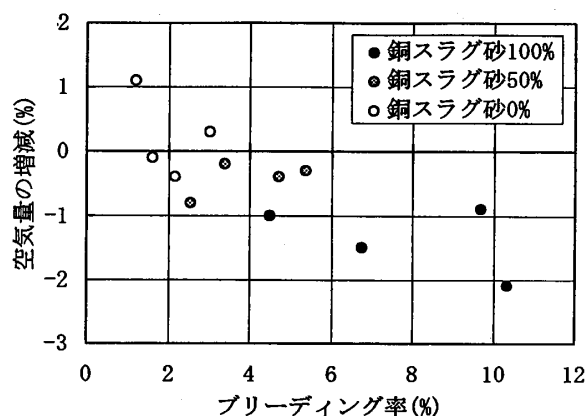


図-9 ブリーディング率と空気量変化の関係

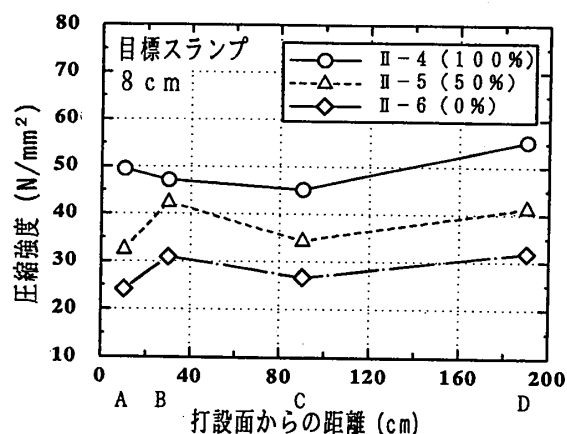


図-10 打設面からの距離と圧縮強度の関係

表-5 コア供試体の諸物性(4本の平均値)

| 配<br>番 | 合<br>号 | 銅スラグ砂<br>混合率(%) | 単位容積<br>質量( $\text{t}/\text{m}^3$ ) | 空気量<br>(%) | 圧縮強度<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 静弾性係数<br>( $\times 10^4$<br>$\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 動弾性係数<br>( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) | 超音波伝播<br>速度( $\text{Km}/\text{s}$ ) |
|--------|--------|-----------------|-------------------------------------|------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| I-1    |        | 100             | 2.64                                | 3.8        | 50.7                               | 4.06                                                 | 4.54                                | 4.61                                |
| I-2    |        | 100             | 2.67                                | 3.8        | 53.5                               | 4.34                                                 | 4.90                                | 4.75                                |
| I-3    |        | 50              | 2.48                                | 3.4        | 41.9                               | 3.39                                                 | 4.02                                | 4.43                                |
| I-4    |        | 50              | 2.49                                | 4.0        | 41.4                               | 3.41                                                 | 4.11                                | 4.27                                |
| I-5    |        | 0               | 2.30                                | 3.7        | 34.0                               | 2.92                                                 | 3.32                                | 4.20                                |
| I-6    |        | 0               | 2.29                                | 5.3        | 31.5                               | 2.60                                                 | 3.30                                | 4.21                                |
| II-1   |        | 100             | 2.65                                | 4.2        | 41.0                               | 4.00                                                 | 4.41                                | 4.70                                |
| II-2   |        | 50              | 2.48                                | 4.1        | 30.5                               | 3.27                                                 | 4.54                                | 4.53                                |
| II-3   |        | 0               | 2.29                                | 4.8        | 25.0                               | 2.54                                                 | 3.32                                | 4.40                                |
| II-4   |        | 100             | 2.71                                | 3.0        | 50.3                               | 4.11                                                 | 4.79                                | 4.70                                |
| II-5   |        | 50              | 2.51                                | 3.5        | 38.4                               | 3.38                                                 | 4.02                                | 4.53                                |
| II-6   |        | 0               | 2.32                                | 3.9        | 29.0                               | 2.53                                                 | 3.18                                | 4.24                                |

減効果だけでは十分な説明はつかない。これには、前述の通り空気量が1~2%減少していることの影響の外、文献[2]に認められるように、銅スラグとセメントとの化学反応により、骨材界面が強固になっているものと推察される。図-10のコアCに関し、水銀圧入法により細孔径分布を測定した結果、その細孔容積( $37.5 \sim 75000 \text{\AA}$ )は、II-4が $33.9 \text{mm}^3/\text{g}$ 、II-5が $47.3 \text{mm}^3/\text{g}$ 、II-6が $76.3 \text{mm}^3/\text{g}$ であり、銅スラグ砂の混合率が大きいほど緻密な組織になっていることを確認した。

#### 4. 6 その他の力学特性値

静弾性係数、動弾性係数および超音波伝播速度の測定結果を表-5に示す。圧縮強度と静弾性係数、動弾性係数および超音波伝播速度の関係は、コンクリートの比重及び強度に対応したもので、通常のコンクリートの場合と異なる力学特性は認められない。

#### 5. まとめ

軽く砕いて得た銅スラグ砂を用いたコンクリートを実際に生コンプラントで製造し、ポンプあるいはバケットを使用し大型暴露試験体を施工した。この長期暴露試験体の初期性状について、暴露9ヶ月でコア供試体を採取し調査した。その結果、天然砂コンクリートに比較し銅スラグ砂コンクリートは、粗骨材の分布は均一であり、中性化深さや透気係数は小さく、かつ圧縮強度も大きいことが判った。本試験の銅スラグ砂コンクリートは、ブリーディングが大きい特徴があるものの、硬化コンクリートの均一性の面で特に問題となる性状は認められず、むしろ緻密な組織が観察された。弾性係数等の力学特性は、コンクリートの比重及び強度に対応したものであった。

#### 参考文献

- 1) 仁木孟伯・長瀧重義・友澤史紀・梶原敏孝：銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1 pp. 399-404、1995
- 2) 福島祐一・仁木孟伯・井上敏克・立屋敷久志：非鉄金属スラグのセメントとの反応性、三菱マテリアルセメント研究所研究報告、No. 7 pp. 88-99、1996

(付記) 日本鋳業協会・銅スラグ研究委員会

委員長：長瀧重義（東京工業大学）、副委員長：友澤史紀（東京大学）、川瀬清孝（新潟大学）  
 庄谷征美（八戸工業大学）、依田彰彦（足利工業大学）、山本泰彦（筑波大学）  
 国府勝郎（東京都立大学）、福手勤（運輸省港湾技術研究所）、阿部道彦（建設省建築研究所）  
 河野広隆（建設省土木研究所）、飛坂基夫（建材試験センター）、野尻陽一（鹿島建設）