

筑波大学 学員 ○ 秋山 淳  
筑波大学 正員 山本 泰彦

### 1. まえがき

産業廃棄物であるフェロニッケルスラグ（以下、スラグと呼ぶ）をコンクリートに用いることは、資源の有効利用ばかりでなく、良質な骨材が枯渇化している我が国にとって極めて有意義と思われる。昨年度は、スラグの使用がコンクリートのワーカビリティ、圧縮強度等に及ぼす影響について報告し、この種のスラグもコンクリート用細骨材として十分に活用できる可能性を有することを示した。<sup>1)</sup>しかし、スラグを用いるとコンクリートのエントラップトエアーが多くなる問題点も示されたのであって、これがコンクリートの凍結融解に対する耐久性に悪影響を及ぼすことが危惧される。また、スラグは  $\text{SiO}_2$  や  $\text{MgO}$  を主成分とし、一般に急冷されて造られるので、コンクリート中におけるスラグの安定性についても調べておく必要がある。本文は、これらの諸点について検討した試験結果を報告するものである。

### 2. 使用材料および試験方法

試験に用いたスラグ細骨材および比較のために用いた鬼怒川産の川砂の諸性質を、表1および表2に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いたが、そのアルカリ濃度は等価  $\text{Na}_2\text{O}$  量で 0.62% であった。また、粗骨材には鬼怒川産の玉石砕石（M.S. 25mm, 比重 2.60, 吸水率 1.30%）を、AE 剤にはヴィンソルを用いた。

コンクリートの凍結融解試験は、ASTM C-290 の水中凍結融解法によって行った。この試験に用いたコンクリートの配合は、水セメント比および目標スランプをそれぞれ 55% および 8cm と一定にし、空気量を 3~6.5% の範囲で 3 段階に変化させた。

スラグのアルカリ骨材反応性を調べる試験では、 $\text{Na}_2\text{O}$  換算量でセメント重量の 1% に相当する  $\text{NaOH}$  を練り混ぜ水に添加してアルカリ濃度を増加させたモルタル供試体を作成し、その他は ASTM C-227 セメント骨材の潜在性アルカリ反応試験法（モルタルバー法）に従って試験を行った。また、一部のスラグについては、 $\text{NaOH}$  を添加しない供試体の試験も行った。

### 3. 試験結果および考察

#### (1) コンクリートの凍結融解に対する耐久性

表3は、製造プロセスおよび溶融炉の異なる 4 種類のスラグを用いた場合について、コンクリートの凍結融解試験を行った結果を示したものである。これによれば、スラグを用いたコンクリートの耐久性は、空気量の増加に伴って増大するが、同じ空気量の川砂の場合と比べて、全般的に小さくなる傾向が認められる。この主な原因は、スラグを用いた場合にエントラップトエアーが川砂の場合より多くなった影響と思われる。特に、S-5 および S-6 の場合には、空気量がそれぞれ 4.5 および 5% 以上となれば、耐久性指数は 80% 以上になっているのであって、これらの場合には、空気量の選定を適切に行えば十分な耐久性が得られるものと思われる。

しかし、S-2 および S-4 を用いた場合には、これらを用いたコンクリートのエントラップトエアーと川砂を用

表 1 細骨材の物理的性質

|     | 冷却法 | 炉   | 比重   | 吸水率<br>% | 安定性<br>% | 粗粒率  |
|-----|-----|-----|------|----------|----------|------|
| S-1 | 乾碎  | 電気炉 | 2.99 | 2.72     | ----     | 2.03 |
| S-2 | 風碎  | 電気炉 | 2.94 | 0.85     | 1.55     | 2.45 |
| S-3 | 水碎  | 電気炉 | 2.85 | 0.84     | 4.20     | 2.49 |
| S-4 | 水碎  | 回転炉 | 3.05 | 0.99     | 1.56     | 2.73 |
| S-5 | 水碎  | 溶鉱炉 | 2.74 | 1.35     | 1.87     | 2.46 |
| S-6 | 水碎  | 電気炉 | 2.86 | 0.91     | 2.77     | 2.43 |
| S-7 | 水碎  | 電気炉 | 2.95 | 1.12     | 1.88     | 2.31 |
| 川砂  | —   | —   | 2.59 | 2.27     | 4.30     | 2.71 |

表 2 スラグの化学成分 (%)

|                         | S-1  | S-2  | S-3  | S-4  | S-5  | S-6  | S-7  |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\text{SiO}_2$          | 56.4 | 53.2 | 56.0 | 54.1 | 50.6 | 54.2 | 52.2 |
| $\text{MgO}$            | 35.0 | 34.4 | 36.5 | 28.4 | 26.0 | 37.0 | 33.7 |
| $\text{CaO}$            | 1.5  | 1.5  | 0.8  | 5.5  | 14.3 | 0.2  | 0.9  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 2.0  | 2.9  | 1.5  | 2.4  | 3.7  | 1.2  | 1.5  |
| $\text{FeO}$            | 4.5  | 6.2  | 5.4  | 7.7  | 4.4  | 6.4  | 9.0  |
| Cr                      | 0.5  | 1.0  | 0.1  | 0.8  | 0.3  | 0.5  | 0.8  |
| Ni                      | 0.1  | 0.04 | 0.07 | 0.3  | 0.06 | 0.07 | 0.06 |
| Mn                      | 0.15 | 0.18 | 0.03 | 0.2  | 0.21 | 0.22 | 0.33 |
| S                       | ---- | 0.03 | ---- | 0.04 | 0.21 | 0.03 | 0.02 |
| Na                      | ---- | 0.0  | 0.24 | 0.05 | 0.0  | 0.0  | 0.04 |
| K                       | ---- | 0.0  | 0.05 | 0.05 | 0.0  | 0.0  | 0.02 |

いた場合のエントラップトエアとの差を考慮に入れても、耐久性は極めて低く、特にS-2を用いた場合には、空気量が6%であっても耐久性指数は42%に過ぎなかったのである。この原因を調べるために、硬化コンクリートの空気量を試験したところ、練り混ぜ直後に6.0および4.5%であったS-2およびS-4の空気量が、硬化後にはそれぞれ2.4、1.9%と著しく減少していた。従って、これらの著しい空気量の損失がS-2およびS-4を用いたコンクリートの耐久性が小さくなった原因と考えられる。しかし、このような著しい空気量の低下が生じた理由については現在のところ不明である。

#### (2) スラグのアルカリ骨材反応性

図-1は、アルカリ濃度が1.62%の場合の材令5ヶ月までのモルタルバーの膨張量を示したものである。これによれば、S-1～S-5のスラグを用いた場合には川砂の場合より膨張量は小さいが、S-6およびS-7の場合にASTMの限界値を大中に越える膨張量を示している。また、これらのモルタルバーには、材令約1ヶ月の時点で網の目状のひびわれが生じ始めることが認められたのである(写真1参照)。これらの結果から判断すれば、これらの異常膨張は、S-6およびS-7がアルカリ骨材反応を起こしていることを示すものと考えられ、アルカリ濃度を増加させたことによって、その影響が顕著に現れたものと思われる。

図-2は、上記の結果をさらに確認するために、アルカリを添加しないで試験した結果を示したものである。この場合の膨張量は図-1よりかなり抑制されているが、S-6の膨張量はS-2より大きく、また、S-7の膨張量は依然としてASTMの限界値以上となっている。このようにS-6およびS-7が他より大きい膨張を示し、特にS-7のみが異常に大きい膨張を示した理由については、表-2の化学成分に明確なる差異が認められないことから、スラグの生成過程、特に冷却過程の相違によってスラグの反応性に差を生じた影響と思われる。

なお、スラグを用いたコンクリートを20℃の水中、50℃の温水中、屋外、等に長期間静置する試験も行っているが、水中・屋外といった通常の条件下では約1年が経過してもコンクリートには何の異常も認められていない。しかし、温水中では材令約3ヶ月の時点で、一部のスラグを用いたコンクリートの表面にポップアウトを生ずることが認められている。

#### 4. おおひ

スラグを用いたコンクリートの長期安定性については、上記のように解明すべき問題点が多い。これらについては、今後さらに検討していきたい。なお、本研究は、土木学会スラグ小委員会の研究の一環として行ったものである。

り、秋山、山本、コンクリートにおけるシリカスラグの利用に関する基礎研究、土木学会38周年講義要集

表 3 コンクリートの凍結融解試験結果(300サイクル)

| 細骨材          | コンクリートの空気量(%) | 各サイクルにおける相対弾性係数(%) |     |     |     |     |     |     | 耐久性能指数(%) |
|--------------|---------------|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
|              |               | 0                  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |           |
| S-2<br>(3.3) | 3.3           | 100                | 78  | ×   |     |     |     |     | 14        |
|              | 4.9           | 100                | 89  | 85  | 55  | ×   |     |     | 29        |
|              | 6.0           | 100                | 89  | 87  | 78  | 65  | ×   |     | 42        |
| S-4<br>(2.0) | 3.0           | 100                | 84  | ×   |     |     |     |     | 15        |
|              | 4.3           | 100                | 92  | 86  | 55  | ×   |     |     | 30        |
|              | 4.5           | 100                | 89  | 86  | 86  | 81  | 45  | ×   | 46        |
| S-5<br>(2.1) | 3.7           | 100                | 92  | 90  | 91  | 79  | 48  | 22  | 46        |
|              | 4.7           | 100                | 94  | 92  | 91  | 91  | 91  | 85  | 85        |
|              | 5.7           | 100                | 93  | 92  | 91  | 91  | 83  | 82  | 82        |
| S-6<br>(2.3) | 4.1           | 100                | 100 | 97  | 97  | 90  | 86  | 74  | 74        |
|              | 5.1           | 100                | 96  | 96  | 96  | 91  | 88  | 83  | 83        |
|              | 6.3           | 100                | 97  | 93  | 92  | 91  | 90  | 85  | 85        |
| 川砂<br>(1.5)  | 3.6           | 100                | 95  | 96  | 94  | 91  | 87  | 71  | 71        |
|              | 4.6           | 100                | 101 | 101 | 100 | 100 | 97  | 95  | 95        |
|              | 6.1           | 100                | 101 | 100 | 101 | 101 | 98  | 96  | 96        |

※：ブレンコンクリートの空気量(%)  
×：供試体の破砕により測定不能であったことを示す

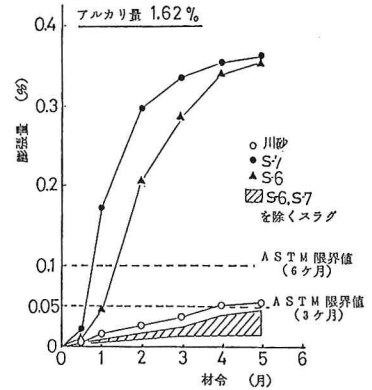


図-1 モルタルバーの膨張量

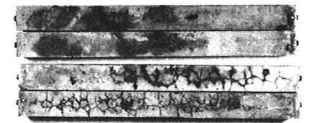


写真-1 モルタルバーのひびわれ S-7

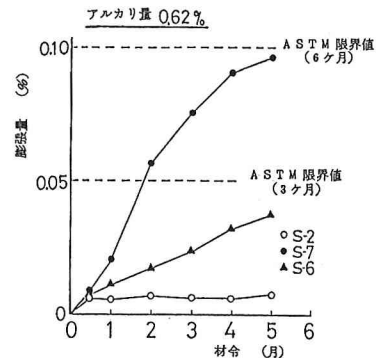


図-2 モルタルバーの膨張量