

鹿島建設技術研究所 正会員 田沢雄二郎  
 鹿島建設技術研究所 正会員 ○信田 佳延  
 鹿島建設技術研究所 正会員 石井 明俊

## 1. はじめに

シリカフュームは、フェロシリコン・シリコンメタル製造の際に副産物として収集される超微粒活性シリカ質粉末（平均粒径約  $0.1\mu m$  程度、 $SiO_2$  を主成分とする）である。北欧・北米における結果によるとシリカフュームはコンクリートの強度増加・耐久性向上・鉄筋に対する防食性向上、等に効果があるとされ、既に、海洋コンクリート構造物の施工に用いられた実績も見られる。しかしながら、我が国においては、シリカフュームをコンクリート混和材として使用した実績は少なく、シリカフュームがコンクリートの物性に及ぼす影響について基礎的な研究が始まった段階であるのが現状と考えられる。

本報文は上記の状況を踏まえ、海洋コンクリート構造物への利用を目標として、シリカフュームを添加したコンクリートの強度、耐久性、施工性等の基本的性質を把握するために行った室内実験結果のうち、主として強度特性に関する検討結果を述べるものである。

表-1 実験因子と水準

| 要 因                                    | 水 準                  |                        |                        |
|----------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
|                                        | 1                    | 2                      | 3                      |
| A: シリカフュームの種類<br>(メーカー)                | A <sub>1</sub> : X   | A <sub>2</sub> : Y     | A <sub>3</sub> : Z     |
| B: シリカフューム添加率<br>(%) SF/C+SF           | B <sub>1</sub> : 0   | B <sub>2</sub> : 7.5   | B <sub>3</sub> : 15    |
| C: 水結合材比<br>(%) W/C+SF                 | C <sub>1</sub> : 35  | C <sub>2</sub> : 40    | C <sub>3</sub> : 45    |
| D: 単位結合材量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) C+SF | D <sub>1</sub> : 350 | D <sub>2</sub> : 400   | D <sub>3</sub> : 450   |
| E: 細骨材率<br>(%) s/a                     | E <sub>1</sub> : 39  | E <sub>2</sub> : 42    | E <sub>3</sub> : 45    |
| F: A E 助剤添加率<br>(%) $\times (C+SF)$    | F <sub>1</sub> : 0   | F <sub>2</sub> : 0.004 | F <sub>3</sub> : 0.008 |

## 2. 実験方法

### (1) 実験要因

シリカフュームがコンクリートの物性に及ぼす影響はシリカフュームの添加率及びシリカフューム自体の品質（組成、粒径分布など）によって左右される。また、海洋コンクリート構造物を対象とする場合、耐久性の観点から単位セメント量、水セメント比、空気量等の影響を把握することが重要となる。

以上より、実験要因として強度、耐久性、施工性等に影響を与えると考えられる表-1に示す6因子を選定し、直交配列表 L<sub>27</sub> (3<sup>13</sup>) を用いて実験を行った。各実験因子の水準及び直交表への割付をそれぞれ表-1, 2に示す。

### (2) 使用材料及び練混ぜ方法

実験に使用した材料を表-3に示す。シリカフュームは、外国産（1種）及び国内産（2種）の3種類である。

また、単位水量が  $158kg/m^3$  以下の配合及びシリカフュームを添加する配合については、十分な練混ぜ、ワーカビリティ（スランプ  $10 \pm 2.5cm$ ）が得られるよう、高性能減水剤を添加した。使用したミキサは強制攪拌型（容量 100ℓ）である。

なお、シリカフュームは粉体のまま使用した。

## 3. 実験結果

### (1) 圧縮強度に対する要因効果

図-1は、圧縮強度に対するシリカフュームの種類・添加率の要因効果、並びに圧縮強度に対して高度に有意（有意水準 1%で有意）となった水結合材比、A E 助剤添加率の要因効果を示したものである。

表-2 直交表への割付け

| 列 番               | 1                  | 2                  | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                     | 8                          | 9                | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|----|----|----|----|
|                   | B                  | A                  | A×B              | F                | B×F              | B×F              | C                     | D                          | E                |    | e  | e  | e  |
| 主効果<br>及び<br>交互作用 | シリカ<br>フューム<br>添加率 | シリカ<br>フューム<br>の種類 | 交<br>互<br>作<br>用 | 交<br>互<br>作<br>用 | A E<br>助剤<br>添加率 | 交<br>互<br>作<br>用 | 水<br>結<br>合<br>材<br>比 | 単<br>位<br>結<br>合<br>材<br>量 | 細<br>骨<br>材<br>率 |    |    |    |    |

表-3 使用材料

|         |                                  |
|---------|----------------------------------|
| セメント    | 普通ポルトランドセメント、比量=3.15             |
| 細骨材     | 富士川産、比量=2.62, FM=6.62, Gmax=25mm |
| 粗骨材     | 大井川産、比量=2.65, FM=2.80            |
| シリカフューム | 外国メーカー産を含む3社の製品、比量=2.2~2.3       |
| 減水剤     | リグニンスルホン酸値とポリオール複合体を主成分とする。      |
| A E 助剤  | 炭性ロジウム酸値を主成分とする。                 |
| 高性能減水剤  | 高糖合芳香族スルホン酸値を主成分とする。             |

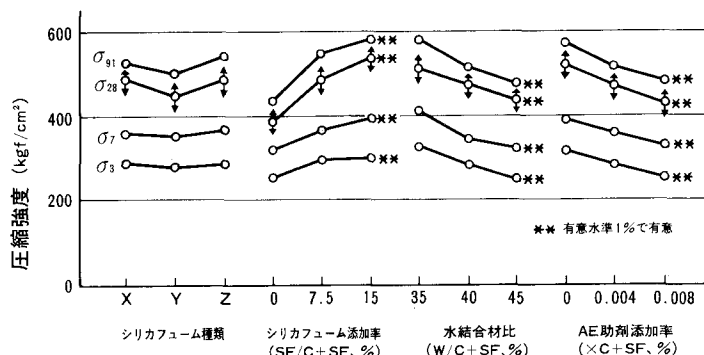


図-1 圧縮強度に対する要因効果

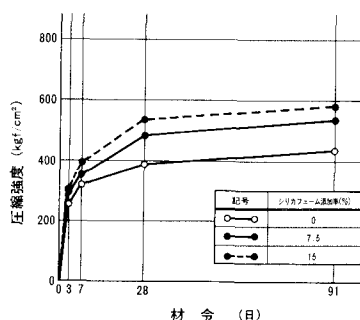


図-2 材令と圧縮強度の関係

図-1に示すとおり、シリカフュームの種類が異なった場合、圧縮強度に若干の差は認められるものの有意な差とは判定されなかった。

シリカフュームの添加率の影響については、各材令ともに、添加率が増すにつれて圧縮強度も増加する結果が示された（有意水準1%で有意）。

同一材令における圧縮強度の比率は、シリカフュームを用いない場合に対し、添加率7.5%の時1.11～1.26、添加率15%の場合に1.19～1.38である。また、図-2は材令と圧縮強度の関係を示したものであるが、シリカフュームを用いない場合に比べると、シリカフュームの添加により、材令7日から材令28日における強度増加の大きいことがうかがえる。

なお、圧縮強度に対する要因効果として高度に有意となった3因子を用い、重回帰分析により圧縮強度（材令28日、 $\sigma_{28}$ ）の推定式を求めると以下のとおりである。

$$\sigma_{28} \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 369 + 74.2 \times (C+SF/W) + 1.85 \times (SF) - 26.0 \times (AIR)$$

ここで  $C+SF/W$ ；水結合材比の逆数， $SF$ ；シリカフューム添加量（ $\text{kg/m}^3$ ），

$AIR$ ；空気量（%），寄与率  $R^2 = 0.74$ ，重相関係数  $R = 0.86$ ，

残差の標準偏差  $50.8 \text{ kgf/cm}^2$

## (2) 引張強度（割裂強度，材令28日）及び曲げ強度（材令28日）

シリカフューム添加率の引張強度及び曲げ強度に対する要因効果をそれぞれ図-3，4に示す。

図-3，4より、圧縮強度に対してと同様、シリカフュームの添加率が増すとともに、引張強度及び曲げ強度が増加することが明らかである（有意水準1%で有意）。圧縮強度（ $\sigma_c$ ）と引張強度（ $\sigma_t$ ）及び曲げ強度（ $\sigma_b$ ）との関係は、シリカフュームの添加率の相違にかかわらず  $\sigma_c/\sigma_t \approx 11$ 、 $\sigma_c/\sigma_b \approx 7$  とほぼ一定であった。

図-5は圧縮強度と引張強度の関係を図示したものであり、シリカフュームの添加率の相違にかかわらず、圧縮強度と引張強度の関係は一つの直線式で表わすことができることがわかる。

## 4. おわりに

以上述べたとおり、シリカフュームのコンクリート混和材としての利用は、コンクリートの強度向上に効果のあることが確認されたが、実際の施工への適用にあたっては、クリープ・乾燥収縮等の物性、耐久性、施工性等に対する影響の把握など残された課題も多く、さらに検討を進めていく必要があると思われる。

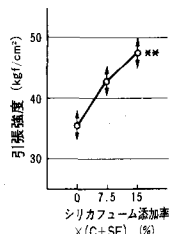


図-3 引張強度

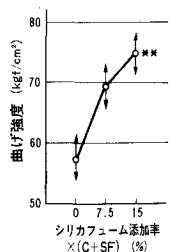


図-4 曲げ強度

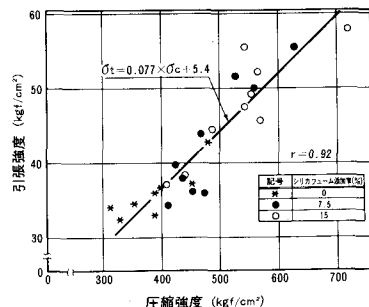


図-5 圧縮強度と引張強度の関係