

## [17] スラグ細骨材を用いた高強度のコンクリート製品の強度等に関する研究

正会員 岡田 清（京都大学工学部）  
 正会員 沼田 智一（新日本製鐵スラグ事業開発部）  
 正会員 藤井健太郎（日本プレスコンクリート技術研究部）  
 正会員 ○田代 博海（日本プレスコンクリート技術研究部）

### 1. はじめに

高炉スラグ骨材の標準化研究に当っては、多くの研究機関において膨大な量の実験が繰返し実施され、今日では一般の普通骨材と同様に使用してよいことが認められている。しかし、高炉スラグ骨材をコンクリート工場製品の生産に使用した例は数少ない。しかも工場製品に使用する場合には、①製品の種類によって設計基準強度が異なる。②コンクリートの打設方法が異なる。③コンクリート製品は過酷な環境で使用されることがあるなどから配合もそれらに応じて変える必要がある。④スラグ骨材を製造するときの高炉スラグの処理加工方法が工場によって異なる、等を考慮してコンクリートの配合、強度を決定しなければならない。本報告は、これらの要因を踏まえ、スラグ細粗骨材を用いたコンクリートを、各種工場製品を対象とし、硬練りコンクリートから比較的軟練りコンクリートまでの範囲に亘っての配合を決定し、強度試験を行い、結果をとりまとめたものである。

### 2. 実験概要

(1) 使用材料 セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。混和材はフライアッシュを単位結合材量に対し内割で重量比1.2.5%使用した。骨材は粗骨材に高炉スラグ砕石(200.5B)と和歌山県橋本市産の山砕石(最大寸法20mm)を使用し、細骨材は球型粒風砕砂および破碎風砕砂を1:1(重量比)に混合したものを使用した。

(2) コンクリートの配合 実験に用いたコンクリートは、①加压成型用硬練りコンクリート(スランプ2cm、VB10秒程度)。実験に使用したVB試験機は3500RPM、振幅0.6mmである。②流し込み用コンクリート(スランプ5cm、VB5秒程度)③流し込み用コンクリート(スランプ10cm程度)の3種類とし、適当なワーカビリティが得られる範囲で単位水量が最小となるよう試験練りによって決定した。

### 3. 供試体の製作方法

加压成型：ミキサから吐出された直後のコンクリートを型枠に詰めテープルバイプレーターにより締固めた後、直ちに加圧量1.0kg/cm<sup>2</sup>で5分間加圧し、上蓋をボルトにより側枠と緊結した状態で蒸気養生を行った。

流し込み：ミキサから吐出された直後のコンクリートを型枠に詰めテープルバイプレーターにより締固めた後、蒸気養生を行った。

### 4. 試験方法

(1) 圧縮強度試験：供試体の寸法はφ10×20cmで、所定の蒸気養生を行い、大気温と同程度になるまで空冷した後、試験材令まで21℃で水中養生し、試験材令時に確実キャッピングを施し、JIS A 1108に準じて行った。

(2) 引張強度試験：圧縮強度試験と同一条件とし、JIS A 1113に準じて行った。

(3) 曲げ強度試験：供試体の寸法は10×10×40cmで、JIS A 1106に準じて行った。

(4) せん断強度試験：供試体の寸法は10×10×40cmで、直接2面せん断試験を行った。

(5) 付着強度試験：供試体の寸法は15×15×15cmの立方体で、中央にφ9mmの鉄筋を埋込み、引抜き試験を行い、荷重-自由端すべり量の関係を測定した。

### 5. 実験結果および考察

(1) 圧縮強度：供試体の種類、コンクリートの配合を表-1、表-2に示す。加圧成型用および流し込み用コンクリートの蒸気養生方法を図-1に示す。供試体の試号は、単位セメント量-加圧の有無-コンシスティンサー混和材の有無-マチュリティー、として例えば420-A-A-A-Aのように表わすこととする。各種供試体の圧縮強度試験結果を表-3ならびに図-2～図-6に示す。使用骨材は高炉スラグ碎石と風碎砂である。

流し込み用コンクリートの場合、材令14日程度までの短期材令を対象としても、フライアッシュ使用の有無によって圧縮強度に殆んど差異は認められない。したがって本実験のようにフライアッシュをセメント重量の内割で12.5%以内の範囲で添加しても初期強度の低下はないと考えられる。さらに、図-2、図-3に示すように、28日以後の材令においてはフライアッシュを用いた方がむしろ強度増進が大きくすぐれたボゾラン効果が期待できることがうかがえる。

加圧コンクリートの場合、脱型時(3～3.5 hr)では養生温度が高く養生時間が長いほど高強度が得られるが、図-4～図-5に示すように、材令7日程度になると、その影響はきわめて小さいことが認められる。また、本実験によると材令91日についても養生温度の差による強度差は殆んどなく、高温養生(100°C)の悪影響はみられない。本実験のよう

に成型時に加圧を行った場合、図-6に一例を示すが、フライアッシュを添加したコンクリートの圧縮強度は添加しないものに比べて、長期材令(91日)でもやや低下する傾向が認められる。このことから、加圧を実施した場合にはボゾラン反応による圧縮強度の増加は小さいか、あるいはもっと遅れる可能性があると推定される。

表-2 コンクリートの配合

| 記号        | セメント比<br>W:C:F(%<br>s/a %) | 細骨材率<br>W (%) | 単位セメント量<br>kg/m <sup>3</sup> |       |      |     | セメント<br>kg/cm <sup>3</sup> |
|-----------|----------------------------|---------------|------------------------------|-------|------|-----|----------------------------|
|           |                            |               | W                            | C     | F    | S   |                            |
| 340-B-B-A | 43.5                       | 42            | 148                          | 297.5 | 42.5 | 876 | 1127                       |
| 340-B-B-B | 46.5                       | 44            | 158                          | 340   | -    | 910 | 1084                       |
| 380-B-C-A | 40.8                       | 41            | 155                          | 323.5 | 47.5 | 829 | 1116                       |
| 380-B-C-B | 43.9                       | 43            | 166                          | 380   | -    | 867 | 1071                       |
| 420-A-A-A | 33.1                       | 38            | 139                          | 367.5 | 52.5 | 772 | 1178                       |
| 420-A-A-B | 34.5                       | 40            | 145                          | 420   | -    | 815 | 1111                       |

(2) 引張強度：供試体の種類、コンクリートの配合、蒸気養生方法、供試

表-1 コンクリートの種類

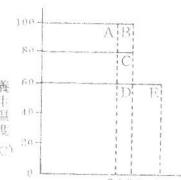
| 単位セメント量<br>kg/m <sup>3</sup> | 加圧 | コンシスティンサー     |              | 混和材<br>A:有<br>B:無 | マチュリティ       |               | セメント<br>kg/cm <sup>3</sup> |
|------------------------------|----|---------------|--------------|-------------------|--------------|---------------|----------------------------|
|                              |    | A: V.B. 10 lb | B: V.B. 5 lb |                   | A: 有<br>B: 無 | C: S.Z. 10 cm |                            |
| 340                          | B  | B             | A            | A                 | B            | A             |                            |
| 380                          | B  | C             | A            | B                 | A            | B             |                            |
| 420                          | A  | A             | A            | B                 | B            | C             | D                          |
|                              |    |               |              |                   |              |               | E                          |

\*1) 10 kgf/cm<sup>2</sup> 5分

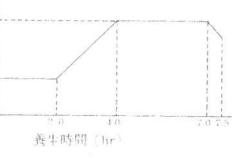
\*2) フライアッシュ使用

\*3) 加圧成形後の蒸気養生のマチュリティは下表のとおりである。

| 記号 | 温 度 (°C) | 時 間 (hr) | マチュリティ (hr) |
|----|----------|----------|-------------|
| A  | 100      | 2.4      | 210         |
| B  | 100      | 3.0      | 300         |
| C  | 80       | 3.0      | 240         |
| D  | 60       | 3.0      | 180         |
| E  | 60       | 4.0      | 240         |



(a) 加圧成型用



(b) 流し込み用

図-1 蒸気養生方法

表-3 圧縮強度試験結果

| 記号          | 材<br>合 | kgf/cm <sup>2</sup> |     |     |     |
|-------------|--------|---------------------|-----|-----|-----|
|             |        | 脱型時                 | 7日  | 14日 | 28日 |
| 340-B-B-A   |        | 115                 | 297 | 325 | 433 |
| 340-B-B-B   |        | 111                 | 285 | 366 | 418 |
| 380-B-C-A   |        | 143                 | 321 | 376 | 438 |
| 380-B-C-B   |        | 153                 | 315 | 374 | 424 |
| 420-A-A-A-A | 3.87   | 684                 | 773 | 832 | 874 |
|             | B      | 111                 | 694 | 735 | 808 |
|             | C      | 389                 | 681 | 788 | 838 |
|             | D      | 223                 | 681 | 781 | 817 |
|             | E      | 293                 | 680 | 796 | 853 |
| 420-A-A-B-A | 3.96   | 726                 | 797 | 854 | 907 |
|             | B      | 476                 | 735 | 798 | 830 |
|             | C      | 431                 | 690 | 763 | 830 |
|             | D      | 291                 | 735 | 786 | 866 |
|             | E      | 350                 | 737 | 785 | 902 |

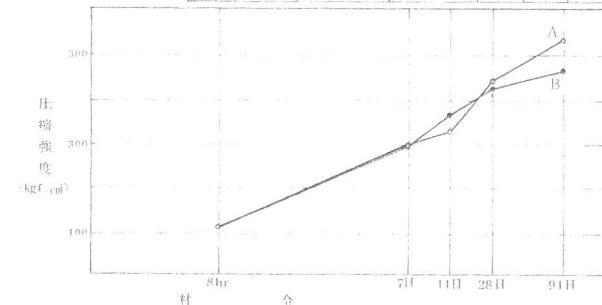


図-2 材令と圧縮強度の関係 340-B-B

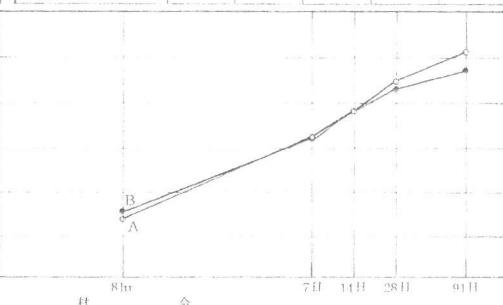


図-3 材令と圧縮強度の関係 380-B-C

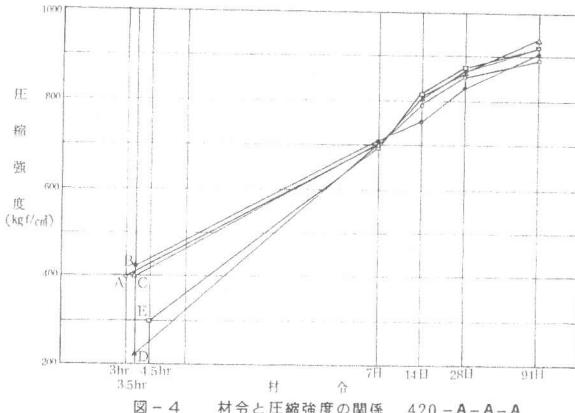


図-4 材令と圧縮強度の関係 420-A-A-A

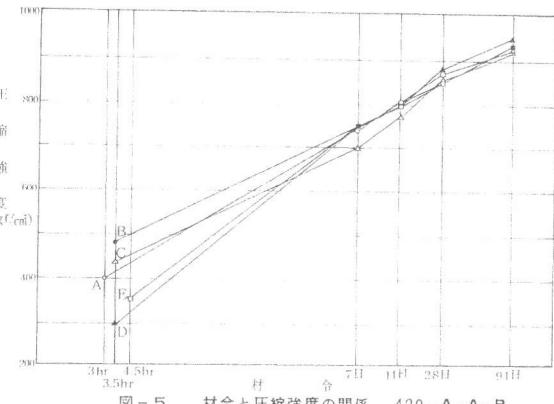


図-5 材令と圧縮強度の関係 420-A-A-B

体の記号は(1)圧縮強度と同様である。引張強度試験結果を表-4に示す。表中の( )内の数字は表-3に対する比を表わす。

流し込み用コンクリートの場合、引張強度は圧縮強度の $1/9 \sim 1/13$ の範囲にあり、川砂利コンクリートに対する従来の標準値とはほぼ同等の比と考えられる。これに対して加圧成型用コンクリートの場合は、引張強度の圧縮強度に対する比は $1/10 \sim 1/18$ となり、流し込み用コンクリートに対するものと比較してかなり小さくなつた。しかし、引張強度を圧縮強度から推定する式は、加圧の有無、脱型直後のものも含め、いずれの場合も一率に $\eta = 0.600 \sigma_e^{2/3}$ で表示でき、相関係数も $0.958$ とかなり高い関係が示された(図-7参照)。

(3)曲げ強度：曲げ強度試験に使用した骨材は、粗骨材に高炉スラグ碎石と山碎石、細骨材に風碎砂である。コンクリートの配合、曲げ強度試験結果を表-5、表-6に示す。表-6の( )内の数字は同バッチのコンクリートの圧縮強度に対する比を表わす。

流し込み用コンクリートの場合、曲げ強度は圧縮強度 $1/6 \sim 1/10$ 、加圧成型用コンクリートで $1/8 \sim 1/11$ となり、引張強度のように顕著ではないが、高強度コンクリートになると、その比率はやはり小さくなることが示された。粗骨材を比較すると、高炉スラグ碎石を粗骨材に用いたものが、山碎石を用いたものよりやや大きい結果となった。引張強度と同様に、曲げ強度を圧縮強度から推定する式は、図-8より、 $\eta_e = \sigma_e^{2/3}$ が得られたが(相関係数 $0.930$ )、圧縮強度 $400 \text{ kgf/cm}^2$ 未満の蒸気養生直後のものを除くと、加圧の有無等に無関係に良好な相関が得られる。

(4)せん断強度および付着強度：せん断強度および付着強度試験結果を表-7に示す。なお、同一骨材、養生条件のコンクリートについて $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の供試体

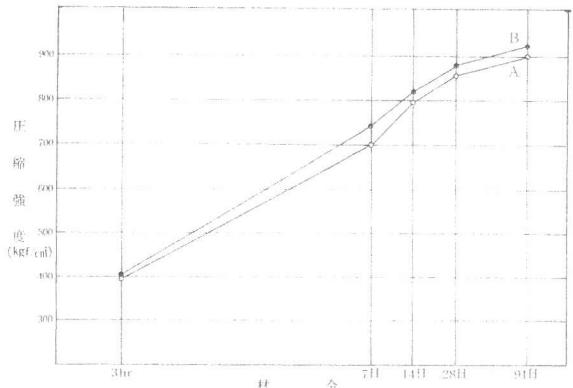


図-6 混和材の有無と圧縮強度の関係 420-A-A-B-A

表-4 引張強度試験結果

| 記号          | 脱型時<br>(kgf/cm²) | 材令              |                  |                  |
|-------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
|             |                  | 7日<br>(kgf/cm²) | 14日<br>(kgf/cm²) | 28日<br>(kgf/cm²) |
| 340-B-B-A   | 10.5(1/13)       | 26.9(1/11)      | 32.0(1/10)       | 39.4(1/11)       |
| 340-B-B-B   | 12.5(1/9)        | 29.8(1/11)      | 37.4(1/10)       | 38.9(1/11)       |
| 380-B-C-A   | 14.4(1/10)       | 25.8(1/12)      | 35.6(1/11)       | 37.1(1/12)       |
| 380-B-C-B   | 15.3(1/10)       | 22.4(1/14)      | 38.2(1/10)       | 43.3(1/10)       |
| 420-A-A-A-A | 34.9(1/11)       | 47.2(1/14)      | 43.3(1/18)       | 46.0(1/18)       |
| B           | 34.1(1/12)       | 51.1(1/14)      | 49.5(1/18)       | 50.2(1/18)       |
| C           | 30.5(1/13)       | 48.7(1/14)      | 51.3(1/16)       | 52.3(1/16)       |
| D           | 24.8(1/10)       | 43.9(1/16)      | 53.3(1/16)       | 53.7(1/16)       |
| E           | 25.9(1/10)       | 47.7(1/14)      | 50.6(1/16)       | 52.2(1/16)       |
| 420-A-A-B-A | 34.3(1/12)       | 33.1(1/14)      | 50.9(1/16)       | 53.0(1/16)       |
| B           | 37.5(1/13)       | 49.9(1/15)      | 47.9(1/17)       | 48.2(1/17)       |
| C           | 31.6(1/14)       | 47.5(1/15)      | 48.5(1/16)       | 53.0(1/16)       |
| D           | 27.8(1/11)       | 49.6(1/15)      | 48.7(1/16)       | 52.8(1/16)       |
| E           | 32.2(1/11)       | 48.9(1/15)      | 58.2(1/16)       | 59.3(1/14)       |

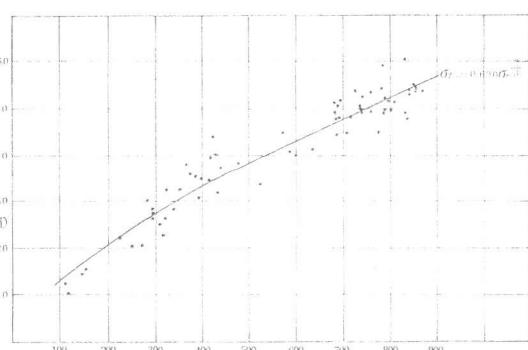


図-7 引張強度と圧縮強度の関係

により行った圧縮強度試験結果も併記した。付着強度試験における荷重-自由端すべり量の関係を図-9に示す。

せん断強度は、加圧成型を行ったものについては、

粗骨材として高炉スラグ砕石を用いたものが山砕石に比べてやや小さく、圧縮強度と逆の傾向にある。しか

し両者の差異はきわめて小さく、せん断強度と圧縮強度の比は、前者で1/4.5、後者で1/4.1となる。これらの比は加圧成型を行わないものにおける1/10.1と比較して著しく大きい。

付着強度は、加圧成型を行ったものについて粗骨材種類の影響を調べてみると、図-9のように自由端初すべり荷重は高炉スラグ砕石を用いたものが、山砕石に比べてやや小さい傾向が認められる。しかし、表-7に示すように最大付着強度に関しては両粗骨材ではほとんど差違はない。一方、加圧成型を行ったものは、圧縮強度に対する最大付着強度の比が1/14.4

～1/15.5となるのに対し、加圧成型を行わない供試体ではその比は1/40.3であって前者に比べ著しく小さいことがうかがえる。

以上のように、加圧成型を行うことは、せん断強度の向上、付着強度の改善を計る上からきわめて効果的であるといえよう。

## 6. 結論

スラグ細骨材を使用したコンクリートについて次のようなことが言える。①圧縮強度は、早期および長期強度いずれも工場製品として充分に使用可能な強度である。②引張強度は、流し込みコンクリートで圧縮強度の1/9～1/13、加圧成型コンクリートで1/10～1/18となり、 $\sigma_u = 0.600\sigma_c$ で示される。③曲げ強度は、流し込みコンクリートで圧縮強度の1/6～1/10、加圧成型コンクリートで1/8～1/11となり、 $\sigma_u = \sigma_c$ で示される。④せん断強度および付着強度は加圧を行うことにより大いに改善される。このように、早期強度・高強度が要求されるコンクリート工場製品にスラグ細骨材を使用することは、強度的に何ら支障のないことが示され、今後検討課題は多くあるが、コンクリート工場製品に大いに活用することが必要である。

本実験は（社）日本材料学会において「風碎砂等を用いたコンクリートに関する調査研究」の一環として実施したもので、終始貴重な御指導を賜わった立命館大学明石外世樹教授、神戸大学藤井学教授、岐阜大学小柳治教授、京都大学小林和夫助教授に深甚の謝意を表します。

表-6 曲げ強度試験結果

| 記号          | 粗骨材の種類  | 材 令    |       |       |       |       |  |
|-------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|--|
|             |         | 脱型時    | 7日    | 14日   | 28日   | 91日   |  |
| 420-A-A-B-A | 高炉スラグ砕石 | 34.9   | 70.1  | 77.6  | 84.3  | 90.4  |  |
|             | 山砕石     | 1.11   | (1.9) | (1.9) | (1.9) | (1.9) |  |
| 380-B-C-A   | 高炉スラグ砕石 | 33.1   | 65.2  | 77.4  | 81.0  | 84.6  |  |
|             | 山砕石     | (1.10) | (1.9) | (1.8) | (1.8) | (1.8) |  |
| 340-B-B-B   | 高炉スラグ砕石 | 15.6   | 42.9  | 60.0  | 61.6  | 74.5  |  |
|             | 山砕石     | (1.7)  | (1.8) | (1.7) | (1.8) | (1.7) |  |
| 340-B-B-B   | 高炉スラグ砕石 | 17.4   | 44.8  | 53.7  | 57.8  | 73.4  |  |
|             | 山砕石     | (1.10) | (1.7) | (1.6) | (1.7) | (1.6) |  |
| 340-B-B-B   | 高炉スラグ砕石 | 20.0   | 46.0  | 51.7  | 59.3  | 66.6  |  |
|             | 山砕石     | (1.7)  | (1.8) | (1.8) | (1.8) | (1.7) |  |
| 340-B-B-B   | 高炉スラグ砕石 | 22.9   | 47.0  | 48.0  | 49.1  | 55.3  |  |
|             | 山砕石     | (1.7)  | (1.7) | (1.8) | (1.8) | (1.9) |  |

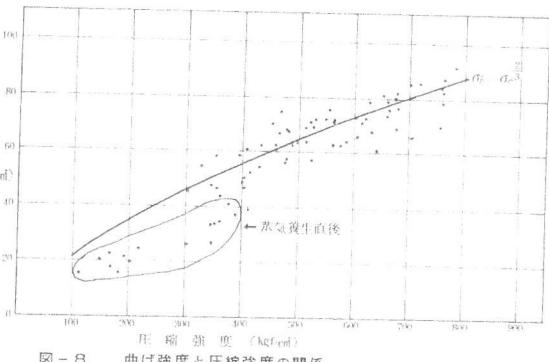


図-8 曲げ強度と圧縮強度の関係

表-7 せん断および付着強度試験結果

| 粗骨材の種類       | 養生条件        | 圧縮強度<br>(kgf/cm) | せん断強度<br>(kgf/cm) | 付着強度<br>圧縮強度 | 最大付着強度<br>(kgf/cm) | 最大付着強度<br>圧縮強度 |
|--------------|-------------|------------------|-------------------|--------------|--------------------|----------------|
| 高炉スラグ<br>砕石  | 加圧・蒸気       | 714              | 168.5             | 1/4.5        | 13.3               | 1/15.4         |
|              | 加圧・蒸気       | 725(712)         | 149.2(158.9)      |              | 10.6(16.3)         |                |
|              |             | 698              |                   |              | 55.0               |                |
| 山砕石<br>(橋本市) | 加圧・蒸気       | 687              | 181.8             |              | 48.9               |                |
|              |             | 685(687)         | 150.6(167.9)      | 1/4.1        | 50.0(47.6)         | 1/14.4         |
| 山砕石<br>(橋本市) | 加圧          | 688              | 171.2             |              | 43.9               |                |
|              | 加圧<br>締固めせん | 541              | 53.2              |              | 9.7                |                |
|              |             | 592(564)         | 69.7(55.6)        | 1/10.1       | 17.3(14.6)         | 1/10.3         |
|              |             | 558              | 43.8              |              | 14.9               |                |

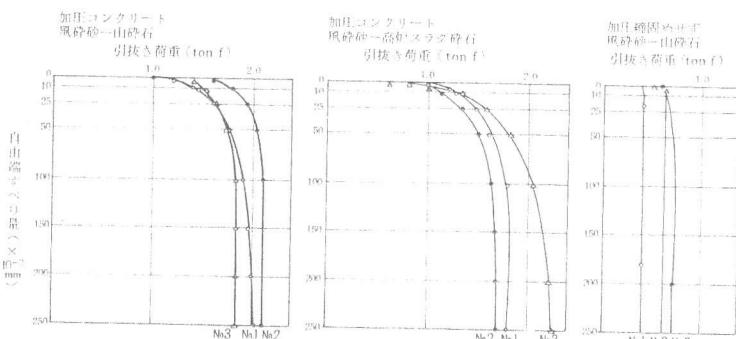


図-9 荷重-自由端すべり量