# 論文　低熱セメントと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの圧縮強度特性とその予測について

吉田　行[*1]・名和　豊春[*2]・田口　史雄[*3]・渡辺　宏[*4]

**要旨**：本研究では，微粉末化したビーライト系セメントと，その一部を粉末度が異なる高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートの低水結合材比領域における圧縮強度特性とその予測について検討を行った。その結果，結合材の種類によりコンクリートの強度発現性が多様化すること，および高炉スラグ微粉末の粉末度や置換率に加えスラグに添加される $SO_3$ 量により強度発現が異なることが明らかとなった。また，これら強度発現に及ぼす種々の要因の影響を考慮した圧縮強度の予測式を提案した。

**キーワード**：ビーライト系セメント，高炉スラグ微粉末，圧縮強度，石膏量，粉末度

## 1. はじめに

近年，建設技術の目覚ましい発展により，長大橋や高層ビルの建設が世界中で行われている。このような大型コンクリート構造物の建設にあたっては，コンクリートの強度だけでなく，その施工性や低発熱性が要求される。さらに，近年，コンクリート構造物の性能規定型設計体系への移行に伴い，100 年単位の長期的な耐久性の確保が求められるようになった。このように，多様化したコンクリート構造物の要求性能を満足するには，コンクリート自体の高性能化が必要となるが，この場合，低水セメント比領域のコンクリートに関する検討が不可欠となる。しかし，低水セメント比領域のコンクリートは，セメント量の増加に伴う温度ひび割れや収縮ひび割れの発生確率が高まることに加え，施工性（流動性）の確保も必要となるなど課題も多い。

このため，著者らは，これらの課題を克服しコンクリートの高耐久化を図るため，セメントの改質，あるいは混和材量の使用によるコンクリート自体の高性能化について広汎な検討を行ってきた。その結果，ビーライト系セメントの高微粉末化およびその一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより，強度・発熱特性，耐凍害性および塩分浸透抵抗性などの物性や耐久性が向上し，コンクリートの高性能化が可能であることを明らかにしてきた[1),2),3)]。また，これらの結合材料を用いることによりセメント製造時の $CO_2$ 発生量を抑制することが可能となることから，環境問題の側面からもそれらの積極的な利用が期待される。他方，このような結合材を用いてコンクリート構造物を設計するには，強度の予測が必要不可欠であるが，これらの結合材を用いたコンクリートの強度特性については，十分な検討がなされていない。本研究では，高微粉末化したビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの低水結合材比領域における圧縮強度特性と圧縮強度の予測について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

**表－1**に本研究で用いた結合材の性質を示す。セメントは，ビーライト系セメント（以下，ビーライトセメントと略記），普通ポルトランドセメント（以下 OPC と記述）および高炉セメント B 種（以下 BB と記述）を用いた。ビーライトセメントは，JIS R 5210:2003 に規定され

**表－1　結合材の性質**

| セメントの種類 | 記号 | 密度 (g/cm$^3$) | 比表面積 (cm$^2$/g) | 化学成分(%) | | | | | | | 鉱物組成(%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | igloss | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $C_3S$ | $C_2S$ | $C_3A$ | $C_4AF$ |
| ビーライト系セメント | B3 | 3.27 | 3340 | 0.2 | 24.8 | 3.9 | 4.0 | 62.1 | 1.5 | 2.2 | 25 | 52 | 4 | 12 |
| ビーライトセメント微粉 | B6 | 3.25 | 6090 | 0.5 | 25.0 | 4.1 | 3.9 | 61.6 | 1.5 | 1.9 | 21 | 56 | 4 | 12 |
| 普通ポルトランドセメント | OPC | 3.16 | 3270 | 0.3 | 21.8 | 5.4 | 2.9 | 64.5 | 1.9 | 1.7 | 54 | 21 | 9 | 9 |
| 高炉B種セメント | BB | 3.07 | 4280 | 0.7 | 25.7 | 9.2 | 2.0 | 55.6 | 3.5 | 2.4 | － | － | － | － |
| 高炉スラグ微粉末 4000 | S4 | 2.91 | 4111 | 0.3 | 34.3 | 15.1 | 0.6 | 41.7 | 5.1 | 0.0 | － | － | － | － |
| 高炉スラグ微粉末 6000 | S6 | 2.89 | 6020 | 0.5 | 33.9 | 15.0 | 0.7 | 41.3 | 4.8 | 0.0 | － | － | － | － |
| 高炉スラグ微粉末 8000 | S8 | 2.89 | 7200 | 0.6 | 34.1 | 15.2 | 0.5 | 41.5 | 5.0 | 0.0 | － | － | － | － |

*1 土木研究所寒地土木研究所　耐寒材料チーム研究員　博士（工学）(正会員)
*2 北海道大学教授　大学院工学研究科　工博 (正会員)
*3 土木研究所寒地土木研究所　耐寒材料チーム上席研究員　博士（工学）(正会員)
*4 日鐵セメント㈱　研究開発部次長研究員　(正会員)

ている低熱ポルトランドセメントに相当する市販品のビーライトセメント（以下 B3 と記述）と，このセメントをボールミルとタワーミルの 2 種類の粉砕ミルを用いて微粉末化したもの（以下 B6 と記述）の 2 種類を用いた。

混和材として用いた高炉スラグ微粉末（以下，スラグと記述）は，比表面積 4000，6000 および 8000（$cm^2/g$）クラス（以下，それぞれ S4，S6，S8 と記述）の３種類を用いた。なお，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは粉末度が大きいほど自己収縮が大きくなることが報告されている [4)]。他方，スラグに添加する石膏の存在により自己収縮が低減できるとする報告もある [5)]。特に低水結合材比領域においては自己収縮が大きくなることから，本研究では，S4，S6，S8 に対してそれぞれ $SO_3$ 量として 2，4，6%となるように二水石膏を内割りで添加した。

骨材は，登別産の陸砂（密度 2.69g/$cm^3$）と白老産の砕石（密度 2.66g/$cm^3$，最大寸法 25mm）を用いた。

混和剤は，分散性の異なる 4 種類（分散性：A＞B＞C＞D）の高性能 AE 減水剤（末端スルホン基を有するポリカルボン酸系，以下 SP と略記）を，各配合におけるコンクリートの性状を確認して用いた。併せて，空気量を調節するため AE 剤（樹脂酸塩系）あるいは消泡剤（ポリエーテル系）を用いた。

### 2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を**表－2** に示す。本研究では，コンクリートの高耐久化と実用性を考慮し，水結合材比は 30%と 40%を中心に検討したが，一部の結合材および材齢では水結合材比 25，50%についても検討した。

高炉スラグ微粉末は高微粉末化した B6 の一部を置換して添加し，その置換率はセメント内割りで 40%と 60%の 2 水準とした。なお，スラグ置換率は S6(60)のようにスラグ記号の後に括弧書きで示した。

配合は，目標スランプ 8cm±2.5cm，目標空気量は水結合材比により 2.5～4.5±1.0%と変化させ，配合試験を実施して決定した。

### 2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し，φ10×20cm 円柱供試体を用いて 3，7，28 および 91 日の 4 材齢で行った。供試体の養生は，温度 20℃の水中養生とした。

**表－２　コンクリートの配合**

| セメントの種類 | スラグの種類 | スラグ置換率 (%) | W/B (%) | 目標空気量 (%) | 減水剤の種類 ※1 | 減水剤添加率 (B×%) | s/a (%) | コンクリート単位量 ($kg/m^3$) W | B=C+BS C | B=C+BS BS | S | G | AE剤 (B×%) ※2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| B6 | － | － | 25 | 2.5 | B | 1.00 | 43 | 113 | 452 | － | 832 | 1099 | － |
| | | | 30 | 3.5 | | 0.85 | 44 | 113 | 377 | － | 368 | 1100 | － |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.70 | 46 | 125 | 313 | － | 904 | 1057 | 0.001 |
| | | | 50 | | E | 0.25 | 44 | 154 | 308 | － | 830 | 1053 | 0.002 |
| B3 | － | － | 25 | 2.5 | C | 0.90 | 43 | 107 | 428 | － | 848 | 1120 | 0.01 |
| | | | 30 | 4.5 | | 0.80 | 44 | 109 | 363 | － | 877 | 1112 | 0.0045 |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.75 | 46 | 117 | 293 | － | 922 | 1078 | 0.0015 |
| OPC | － | － | 25 | 2.5 | C | 0.70 | 43 | 143 | 572 | | 749 | 989 | 0.012 |
| | | | 30 | 3.5 | | 0.70 | 44 | 129 | 430 | － | 825 | 1047 | 0.002 |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.80 | 46 | 137 | 343 | － | 874 | 1022 | － |
| | | | 50 | | － | － | 44 | 155 | 310 | － | 828 | 1050 | 0.015 |
| BB | － | － | 25 | 2.5 | A | 0.50 | 43 | 115 | 460 | － | 821 | 1085 | － |
| | | | 30 | 3.5 | C | 0.70 | 44 | 123 | 410 | － | 838 | 1063 | － |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.70 | 46 | 136 | 340 | － | 876 | 1025 | 0.0002☆ |
| | | | 50 | | E | 0.25 | 44 | 145 | 290 | － | 847 | 1075 | 0.001 |
| B6 | S4 | 40 | 30 | 3.5 | D | 0.85 | 44 | 119 | 238 | 159 | 845 | 1072 | 0.001 |
| | | | 40 | 4.5 | | 0.65 | 46 | 125 | 188 | 125 | 903 | 1056 | 0.0035 |
| | | 60 | 30 | 4.5 | | 0.80 | 44 | 119 | 159 | 238 | 841 | 1066 | 0.002 |
| | | | 40 | 4.5 | | 0.65 | 46 | 125 | 125 | 188 | 900 | 1052 | 0.0019 |
| | S6 | 40 | 25 | 2.5 | A | 0.50 | 43 | 115 | 276 | 184 | 824 | 1088 | 0.005 |
| | | | 30 | 3.5 | C | 0.60 | 44 | 118 | 236 | 157 | 853 | 1082 | 0.001 |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.70 | 46 | 120 | 180 | 120 | 914 | 1069 | 0.0003☆ |
| | | | 50 | | E | 0.25 | 44 | 141 | 175 | 117 | 856 | 1085 | 0.002 |
| | | 60 | 25 | 2.5 | A | 0.50 | 43 | 115 | 184 | 276 | 820 | 1083 | 0.01 |
| | | | 30 | 3.5 | C | 0.60 | 44 | 118 | 157 | 236 | 850 | 1078 | 0.002 |
| | | | 40 | 4.5 | D | 0.70 | 46 | 120 | 120 | 180 | 912 | 1067 | － |
| | | | 50 | | E | 0.25 | 44 | 141 | 113 | 169 | 855 | 1084 | 0.003 |
| | S8 | 40 | 25 | 2.5 | A | 0.90 | 43 | 114 | 274 | 182 | 821 | 1084 | 0.002 |
| | | | 30 | 3.5 | B | 0.95 | 44 | 118 | 236 | 157 | 848 | 1075 | － |
| | | | 40 | 4.5 | | 0.80 | 46 | 129 | 194 | 129 | 889 | 1040 | － |
| | | 60 | 25 | 2.5 | A | 2.00 | 43 | 116 | 186 | 278 | 810 | 1070 | － |
| | | | 30 | 3.5 | B | 1.40 | 44 | 118 | 157 | 236 | 834 | 1040 | － |
| | | | 40 | 4.5 | | 0.90 | 46 | 124 | 124 | 186 | 896 | 1048 | 0.0045 |
| | | | 50 | | E | 0.25 | 44 | 163 | 130 | 196 | 809 | 1062 | 0.0025 |

※1：減水剤の種類（A～D：高性能AE減水剤（分散性A>B>C>D），E：AE減水剤）、※2：☆印＝消泡剤

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮強度と材齢の関係

**図－１**に各水結合材比における圧縮強度と材齢の関係を示す。何れの水結合材比においても材齢の経過とともに圧縮強度は増加したが，結合材の種類により強度発現の傾向が異なった。セメント単味の場合，材齢７日までの初期（早期）強度は OPC が最も大きく，高粉末化したビーライトセメントの B6 は OPC より 15N/mm$^2$ 程度小さく BB と同程度であったが，一般的なビーライトセメントの B3 より強度が増加しており，高微粉末化によりビーライトセメントの弱点とされている初期強度が改善されることがわかる。一方，材齢 28 日以降では，B6 の圧縮強度は OPC と同程度以上となり，材齢 91 日では OPC よりも強度が大きくなることが確認された。また，低粉末度の B3 の場合圧縮強度の発現は B6 より小さかったが，材齢 91 日で OPC や BB と同程度以上となり B6 との強度差が小さくなった。これらの強度発現の傾向は，既往の研究と同様であり，本研究においても既知の事実が確認された。

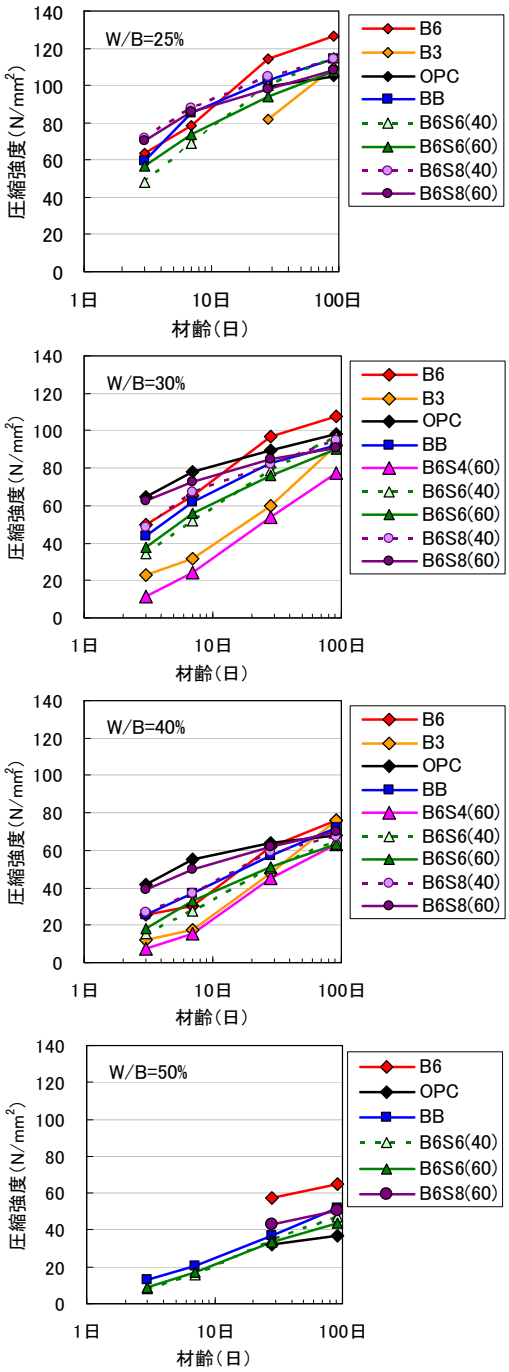
これに対して，B6 の一部をスラグで置換したコンクリートの圧縮強度発現はスラグの粉末度の影響を受け，材齢７日までの圧縮強度は，スラグの粉末度が大きいものほど高く，特に S8 を用いたコンクリートでは，OPC とほぼ同程度の初期強度を示した。しかし，材齢 28 日以降では，初期強度が大きかったものほど材齢の経過に伴う強度の増加割合が小さくなり，材齢 28 日で B6 単味の圧縮強度と同程度以下となり，かつ材齢 91 日ではスラグの粉末度による強度差が小さくなった。

### 3.2 圧縮強度とスラグ置換率の関係

**図－２**に圧縮強度とスラグ置換率の関係を示す。スラグ置換率をみると，高粉末度の S8 を用いたコンクリートの圧縮強度（実線）は材齢７日までは無置換よりも大きく，スラグ置換率が大きいほど強度は概ね増大する傾向がみられた。しかし，材齢 28 日以降は無置換が最大となり，材齢 91 日以降はスラグ置換率が大きいほど圧縮強度は小さくなる傾向が，特に W/B=30%以下で顕著であった。これに対し，S6（破線）や S4（点線）を用いたコンクリートは，何れの材齢においても無置換と比べると概ね圧縮強度は小さかった。また，S8 と同様，材齢７日までではスラグ置換率が大きいほど強度は増大したが，W/B=30%以下では材齢の進行とともにその関係は逆転した。このように，スラグ置換率が圧縮強度に及ぼす影響は，スラグ粉末度が高く，低水結合材比ほど顕著であった。なお，本研究においては，スラグの粉末度に応じて二水石膏の添加量を変えており，スラグ粉末度だけでなく二水石膏が強度発現に影響を及ぼしていると推論される[7]。

### 3.3 圧縮強度と石膏添加量の関係

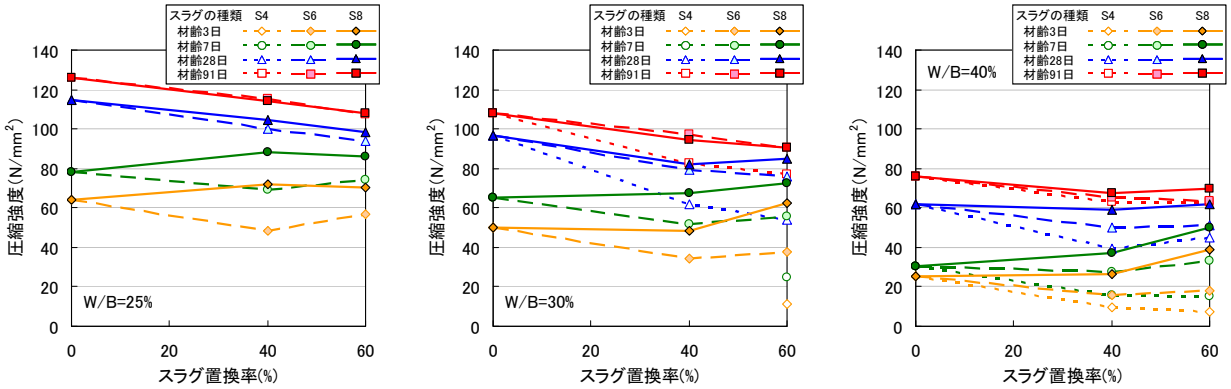
**図－３**に圧縮強度とスラグの $SO_3$ 量の関係を示す。なお，スラグの $SO_3$ 量は，各配合の単位スラグ量にスラグの粉末度に応じて添加した各 $SO_3$ の添加率を乗じることにより算出した。



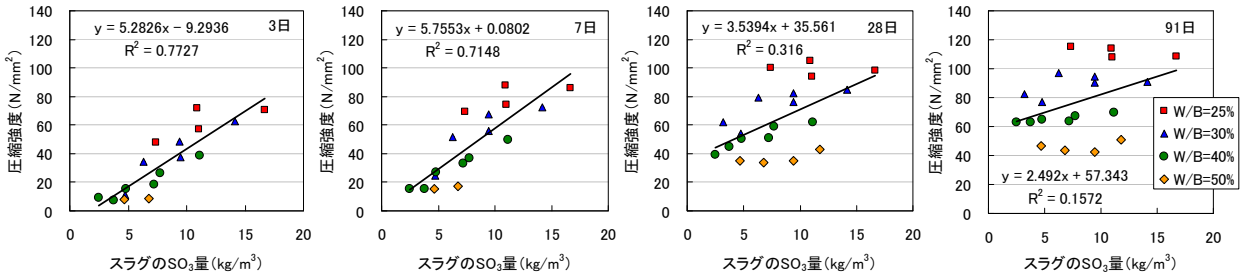

**図－１ 圧縮強度と材齢の関係**

全体としては，材齢７日までの圧縮強度とスラグの $SO_3$ 量には正の相関が見られたが，材齢 28 日以降は相関が低かった。これらの傾向は石膏が材齢初期の強度発現に寄与するとした既往の研究と同様の傾向であった[8]。

水結合材比毎に詳細にみると，W/B=50%においてはデータ数が少なく不明だが，水結合材比が大きくなるほど圧縮強度と $SO_3$ 量には良い相関がみられた。特に W/B=40%においては，何れの材齢においても極めて良い相関（相




図－２ 圧縮強度と各スラグ置換率の関係




図－３ 圧縮強度とスラグ $SO_3$ 量の関係

関係数 0.92 から 0.75）がみられ，材齢の進行とともにその相関は小さくなるものの，$SO_3$ 量と強度には良好な関係が確認された。他方，W/B=30%以下では徐々に両者の相関は低くなり，材齢初期における相関は比較的高いものの（0.86 から 0.75），材齢 28 日以降の相関は低く（0.64 から 0.25），特に W/B=25%では，材齢 28 日以降逆相関となった。このように，圧縮強度とスラグ $SO_3$ 量の関係は水結合材比や材齢によって異なる傾向がみられた。しかし，本研究では，スラグの粉末度が高いほど $SO_3$ を高添加しているため $SO_3$ 量のみの影響として分離することができないことから，これらの関係については，今後詳細な検討が必要である。

### 3.4 圧縮強度の予測

これまで述べたように，各結合材およびそれらの組合せにより，圧縮強度発現性を多様化できることが明らかとなった。このような種々の発現性を有する結合材を実用化するには，圧縮強度を精度良く予測する必要がある。コンクリート強度の予測に関する理論は古くからあり，代表的なものとして水セメン比説，セメント水比説，空隙説が知られているが，セメント水比説は配合設計に良く用いられているほか，水セメント比の算定式が各学協会より提案されている[9]。このため，ここでは結合材水比と圧縮強度の関係について検討した。なお，本研究では W/B=30%以下は空気量が異なるため，空気量が圧縮強度に及ぼす影響を補正する必要がある。一般に，空気量が 1%増加する毎に圧縮強度は 4～6%低下するとされている[9]ことから，ここではその中間値の 5%低下すると考え，空気量 4.5%を標準として，空気量が 3.5%の場合には 0.95 を，空気量が 2.5%の場合には 0.9 を圧縮強度に乗じることにより簡易的に補正した圧縮強度を用いて検討した。

**図－４**に各結合材の結合材水比と圧縮強度の関係を示す。図には，圧縮強さ f’(c)=a(B/W)+b の関数で近似した回帰直線を併記しており，**表－３**には各近似直線の係数 a，b と相関係数 $R^2$ を示した。図から，結合材の種類，材齢により直線の傾きは異なるものの，いずれも水結合材比と圧縮強度には高い相関があることが確認できた。これより，圧縮強さの予測式は**式(1)**のようになり，この式を書き改めると**式(2)**となり，必要強度となる水セメント（結合材）比の算定が可能となる。

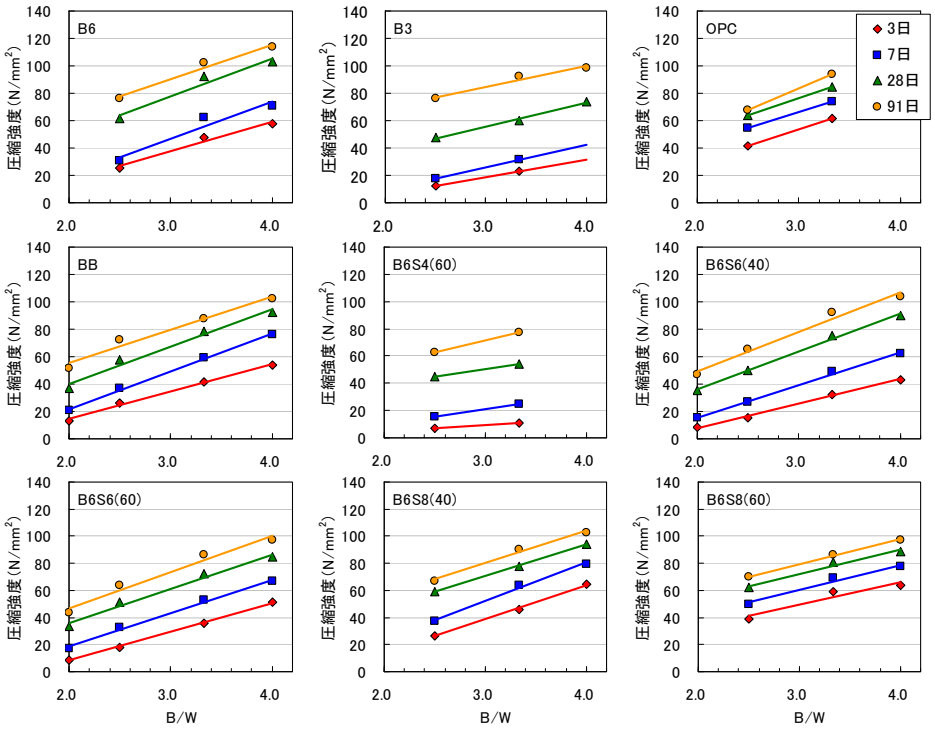
$$F = aX + b \qquad (1)$$

ここに，F：圧縮強さ（N/mm²），X：結合材水比，
a，b：結合材水比と圧縮強度の関係から定まる係数

$$x = \frac{a}{F + b} \qquad (2)$$

ここに，x：水結合材比（%）

他方，**式(2)**では結合材の種類に応じて各係数を直線回帰により求める必要があり，より汎用性を高めるには任意のセメントや任意のスラグ粉末度および置換率等に対応した予測式の確立が必要となる。そこで，本研究では，一般に設計基準強度として適用されることが多い材齢 28 日の圧縮強度推定に的を絞り，圧縮強度に及ぼす影響要因として，材齢 28 日以降の強度との相関が小さかった $SO_3$ 量を除く，結合材水比 B/W，スラグ粉末度およびスラグ置換率を変数として抽出し重回帰分析を行った。**表**




図－４　結合材水比と圧縮強度の関係

表－３　近似直線の諸係数値と相関係数

| | 材齢 | a | b | R^2 |
|---|---|---|---|---|
| B6 | 3 | 21.5 | -27.1 | 0.992 |
| | 7 | 27.2 | -34.8 | 0.963 |
| | 28 | 27.9 | -5.7 | 0.985 |
| | 91 | 25.3 | 14.6 | 0.993 |
| B3 | 3 | 12.8 | -19.8 | 1 |
| | 7 | 16.7 | -24.2 | 1 |
| | 28 | 17 | 4.8 | 0.992 |
| | 91 | 15.2 | 39.3 | 0.96 |
| OPC | 3 | 24.2 | -19 | 1 |
| | 7 | 23 | -2.7 | 1 |
| | 28 | 25.5 | 0 | 1 |
| | 91 | 30.7 | -8.8 | 1 |
| BB | 3 | 20 | -25.7 | 0.995 |
| | 7 | 27.7 | -33.8 | 0.998 |
| | 28 | 27.3 | -14.6 | 0.981 |
| | 91 | 24.3 | 6.9 | 0.974 |
| B6S4(60) | 3 | 4.68 | -4.4 | 1 |
| | 7 | 11 | -12.3 | 1 |
| | 28 | 10.8 | 17.8 | 1 |
| | 91 | 16.9 | 20.7 | 1 |
| B6S6(40) | 3 | 18 | -28.3 | 0.996 |
| | 7 | 23.7 | -31.8 | 0.997 |
| | 28 | 27.7 | -19.4 | 0.996 |
| | 91 | 28.9 | -8.4 | 0.98 |
| B6S6(60) | 3 | 21.2 | -34.1 | 0.998 |
| | 7 | 24.5 | -30.1 | 0.993 |
| | 28 | 25.3 | -14.6 | 0.986 |
| | 91 | 26.5 | -6.1 | 0.973 |
| B6S8(40) | 3 | 25.2 | -37 | 0.997 |
| | 7 | 28.3 | -32.7 | 0.991 |
| | 28 | 23.5 | -0.1 | 0.999 |
| | 91 | 23.9 | 8.4 | 0.991 |
| B6S8(60) | 3 | 16.7 | -0.8 | 0.91 |
| | 7 | 18.6 | 4.5 | 0.974 |
| | 28 | 17.9 | 18.4 | 0.972 |
| | 91 | 18.4 | 24 | 0.998 |

**－４**に圧縮強度の実測値と予測値を示す。解析の結果，B/W およびスラグ置換率の寄与率が高く 1%水準で優位であり，スラグ粉末度も 5%水準で優位となり，重相関も 85 程度と高かった。他方，**表－４**に示した実測値と予測値の比率を見ると，B6 が 1.1，B3 が 0.8 程度となっており，この比率はセメントの種類の影響を表していると考えられることから，セメントの種類の影響として，B6 は 1.1，B3 は 0.8，その他の OPC および BB は 1.0 とし，スラグを混和したものについてもベースセメントの影響として B6 の 1.1 を適用し，セメントの種類の影響を加えて再度重回帰分析を行った。**図－５**に圧縮強度の実測値と予測値の関係を示す。再度行った重回帰分析の結果，いずれも強度に及ぼす寄与率は高く，重相関も 91 程度と精度が向上した。

以上の検討から，材齢 28 日における圧縮強度の推定式として**式(3)**を提案する。

$$f'(28) = 73.2\gamma + 25.8\left(\frac{B}{W}\right) + 2.0\left(\frac{S}{1000}\right) - 0.46R - 82.9 \qquad (3)$$

ここに，f'(28)：材齢 28 日における圧縮強度の予測値 (N/mm²)

γ：セメントの種類の影響を表す係数(B3=0.8，B6=1.1，その他 1.0)

B：単位結合材量（kg/m³）

W：単位水量（kg/m³）

S：高炉スラグ微粉末の比表面積（cm²/g）

R：高炉スラグ微粉末の置換率（%）

なお，ビーライト系セメント以外のセメントと高炉スラグ微粉末を組み合わせたコンクリートへの本式の適用性については，別途検討を要する。また，本研究では，高炉スラグ微粉末の粉末度と $SO_3$ 量が特定の組合せであったため，これらの関係について詳細に検討し，$SO_3$ 量の

表－４　圧縮強度の実測値と予測値
（スラグ比表面積，置換率，B/W を考慮）

| 結合材の種類 | スラグ比表面積 | スラグ置換率 | B/W | 実測強度 | 予測値 | 実測/予測 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| B6 | ― | 0 | 4.00 | 103.1 | 91.8 | 1.12 |
| | ― | 0 | 3.33 | 92.0 | 75.4 | 1.22 |
| | ― | 0 | 2.50 | 61.8 | 54.8 | 1.13 |
| | ― | 0 | 2.00 | 57.4 | 42.5 | 1.35 |
| | ― | 0 | 1.67 | 38.0 | 34.3 | 1.11 |
| B3 | ― | 0 | 4.00 | 73.5 | 91.8 | 0.80 |
| | ― | 0 | 3.33 | 60.1 | 75.4 | 0.80 |
| | ― | 0 | 2.50 | 47.9 | 54.8 | 0.87 |
| OPC | ― | 0 | 3.33 | 84.9 | 75.4 | 1.13 |
| | ― | 0 | 2.50 | 63.7 | 54.8 | 1.16 |
| | ― | 0 | 2.00 | 32.0 | 42.5 | 0.75 |
| | ― | 0 | 1.67 | 23.7 | 34.3 | 0.69 |
| BB | ― | 0 | 4.00 | 92.5 | 91.8 | 1.01 |
| | ― | 0 | 3.33 | 78.4 | 75.4 | 1.04 |
| | ― | 0 | 2.50 | 57.5 | 54.8 | 1.05 |
| | ― | 0 | 2.00 | 36.6 | 42.5 | 0.86 |
| B6S4(40) | 4000 | 40 | 2.50 | 39.1 | 49.9 | 0.78 |
| B6S4(60) | 4000 | 60 | 3.33 | 53.8 | 62.9 | 0.86 |
| | 4000 | 60 | 2.50 | 44.8 | 42.3 | 1.06 |
| B6S6(40) | 6000 | 40 | 4.00 | 90.1 | 92.0 | 0.98 |
| | 6000 | 40 | 3.33 | 75.1 | 75.6 | 0.99 |
| | 6000 | 40 | 2.50 | 50.3 | 55.0 | 0.91 |
| | 6000 | 40 | 2.00 | 35.1 | 42.7 | 0.82 |
| B6S6(60) | 6000 | 60 | 4.00 | 84.6 | 84.4 | 1.00 |
| | 6000 | 60 | 3.33 | 72.1 | 68.0 | 1.06 |
| | 6000 | 60 | 2.50 | 51.0 | 47.5 | 1.07 |
| | 6000 | 60 | 2.00 | 33.6 | 35.1 | 0.96 |
| B6S8(40) | 8000 | 40 | 4.00 | 94.2 | 97.2 | 0.97 |
| | 8000 | 40 | 3.33 | 78.1 | 80.7 | 0.97 |
| | 8000 | 40 | 2.50 | 58.9 | 60.2 | 0.98 |
| B6S8(60) | 8000 | 60 | 4.00 | 88.6 | 89.6 | 0.99 |
| | 8000 | 60 | 3.33 | 80.8 | 73.1 | 1.10 |
| | 8000 | 60 | 2.50 | 62.0 | 52.6 | 1.18 |
| | 8000 | 60 | 2.00 | 43.0 | 40.3 | 1.07 |
| | 8000 | 60 | 1.67 | 35.2 | 32.0 | 1.10 |

影響を考慮した予測式を提案することにより，任意材齢における強度予測が可能になる等，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのより精度の高い強度設計が可能になると思われる。

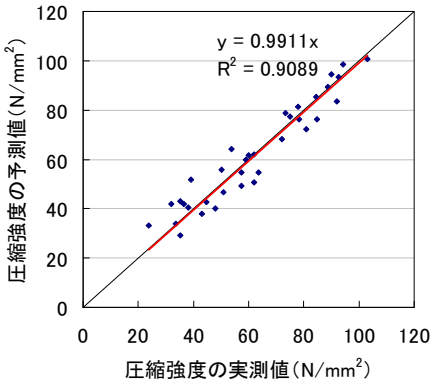
## 4. まとめ

本研究では，ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの低水結合材比領域における圧縮強度特性とその予測について検討を行った。本研究で行った検討の範囲から得られた結論は以下の通りである。

(1) 各セメントおよびビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末の組合せにより，コンクリートの強度発現性を多様化できる。

(2) 高炉スラグ微粉末を用いた場合，その置換率や粉末度に加え，高炉スラグ微粉末に添加される $SO_3$ 量が強度発現性に影響を及ぼし，粉末度が高く $SO_3$ 量が多いほど材齢初期の強度が大きくなるものの，長期的な強度の増加は小さい傾向にある。

(3) 結合材水比による圧縮強度の推定が可能であることを確認するとともに，セメントの種類，スラグの比表面積，置換率の影響を考慮した圧縮強度の予測式を提案した。




図－５　圧縮強度の実測値と予測値の関係
（セメントの種類の影響を考慮）

### 参考文献


1) 吉田行，田口史雄，名和豊春，渡辺宏：高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性に及ぼす諸要因の影響：コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.777-782，2004.7

2) 吉田行，田口史雄，名和豊春，渡辺宏：改質ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの諸性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1051-1056，2005.6

3) 吉田行，名和豊春，田口史雄，渡辺宏：高炉スラグ微粉末を用いたビーライトセメントコンクリートの中性化に及ぼす細孔組織の影響，土木学会論文集 E，vol.64，No.1，pp.1-15，2008.1

4) 三浦智哉，田澤栄一，宮澤伸吾，保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.359-364，1995

5) 宮澤伸吾，大澤友宏，廣島明男，鯉渕清：低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.487-492，2005

6) 内川浩，羽原俊祐，沢木大介，野村孝治：高ビーライトセメントの水和反応，硬化体構造と物理的性状，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.52-57，1991

7) 近田孝夫，阪本好史，長尾之彦：高炉スラグ微粉末を添加したモルタル・コンクリートの諸性状，高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.29-36，1987.3

8) 曽根徳明，重倉祐光：低発熱型高炉セメントに関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 451 号，pp.9-18，1993

9) 岡田清，六車：改訂新版コンクリート工学ハンドブック，pp.335-345，1990.7