

## 超高強度グラウトの製造に関する基礎的実験

関東学院大学工学部社会環境システム学科 正会員 工博 ○出雲 淳一

### 1. はじめに

近年、高層建築の分野では設計基準強度が $100\text{ N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートの適用例が増えてきており、設計基準強度が $120\sim 150\text{ N/mm}^2$ クラスの超高強度コンクリートの実用化も可能となっている。コンクリートの高強度化に伴い、建築構造物においてプレキャスト部材などの接合部に使用されるグラウト材に対しても躯体と同程度の高強度化が求められている。また、土木構造物においても、橋梁に適用できる超高強度コンクリートが開発<sup>1)</sup>されており、コンクリートの超高強度化が今後益々推進されるものと考えられる。

これまで、グラウト材の超高強度化に関する研究はあまり報告されておらず、本研究では、グラウト材の超高強度化のための基礎データの収集を目的として、 $150\text{ N/mm}^2$ クラスの超高強度グラウトを製作することを試みた。超高強度グラウトの製造を実現するための配合、グラウトの練混ぜの際に用いられる攪拌機の回転数および攪拌羽の形状・寸法が強度発現に及ぼす影響について検討を行うことにした。

### 2. 実験概要

本実験では $150\text{ N/mm}^2$ クラスの超高強度グラウトを製作するために、水セメント比として超高強度コンクリートの製造において練混ぜの極限と考えられている水セメント比 $12\%\sim 15\%$ を設定することにした。また、このような極限に近い練混ぜにおいては、練混ぜ方法の違いも強度発現に影響を及ぼすことが考えられるために、グラウトの練混ぜに用いる攪拌機の回転性能、羽の形状・寸法についても実験パラメータにとり、実験を行うことにした。

グラウトの練混ぜに用いる攪拌機には、 $1300\text{ min}^{-1}$ 、 $1000\text{ min}^{-1}$ 、 $550\text{ min}^{-1}$ と回転数の異なる3種類の攪拌機と、羽の形状、直径の異なる7種類の攪拌羽を実験で用意した。表-1に攪拌羽の寸法と形状を、写真-1に実験に使用した攪拌羽を示している。実験では、まず羽の形状の違いを調べるためにグラウトの代わりに煙を用いて、拡散状況を可視化する実験を行った。その後、グラウトを練混ぜて、圧縮強度試験およびフロー試験を行った。

表-1 攪拌羽の大きさや形状

No	公称径(mm)	形状(呼称)
1	130	丸型
2	165	丸型 (丸穴あり)
3	150	丸型 (角形穴あり)
4	70	丸型
5	100	丸型
6	150	丸型 (丸穴あり)
7	220	ファン型

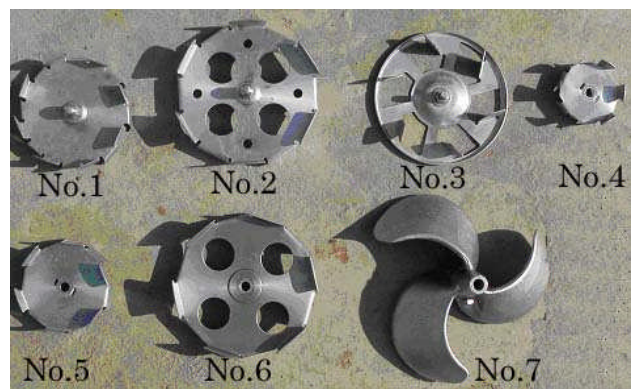


写真-1 攪拌羽の種類

## 2. 1 攪拌羽の煙を用いた拡散実験

グラウトの製造に先立ち、攪拌時における羽の形状がグラウトの練混ぜに及ぼす影響を調べるために、煙を用いて拡散状況を可視化することを試みた。無風状態の恒温室内で線香をたき、煙が鉛直に立ち上がるのを確認して、それぞれの羽を攪拌機の回転数が  $1300\text{min}^{-1}$  に取り付けて羽を回転させて煙を拡散させた。攪拌状況の一例を写真-2 および写真-3 に示している。

No. 1, No. 2, No. 4, No. 5, No. 6 の攪拌羽の場合、上に向かう煙は攪拌機の羽の位置で横に広がるように拡散することが確認された。(写真-2 参照) それに対して、No. 3, No. 7 の攪拌羽の場合には、煙を吸い上げて上昇させるように拡散するのが確認された。(写真-3 参照)

No. 1, No. 2, No. 4, No. 5, No. 6 の羽の場合、全て丸い形状で、その外周部分に突起が設けられている点が共通している。それぞれ直径が異なったり、羽の内部に穴が開いていたりするものがあるが、煙の拡散状況を観察する限りにおいては、これら羽の直径、内部の穴の有無、穴の大きさが、拡散に明確な影響を与えているようには見受けられなかった。すなわち、羽の外周部分に突起があることが、拡散に影響を及ぼしているものと考えられる。

回転数を  $1300\text{min}^{-1}$  よりも回転数が低い  $1000\text{min}^{-1}$  の攪拌機で同様の実験を行った際には、拡散する範囲は  $1300\text{min}^{-1}$  の場合より狭くなったが、拡散方向は回転数が  $1300\text{min}^{-1}$  の場合と同様に横に広がるような煙の拡散が確認された。したがって、外周部分に突起が設けられた羽の場合には、拡散方向は横に広がり、広がる範囲は羽の径よりも、むしろ回転数の影響を受けると判断される。

一方、No. 3, No. 7 の場合、羽の形状は異なるが、吸い上げるように拡散することが共通している。また、No. 7 の攪拌羽はファン形状であり、No. 3 に比べより煙を吸い上げる形状になっている。No. 3 の羽の場合には、羽の周りに突起物はなく、穴の位置に穴と同じ面積だけの突起が付いている。穴のすぐ横に突起が付いている独特の形状が、煙を吸い上げるように拡散させる要因と考えられる。

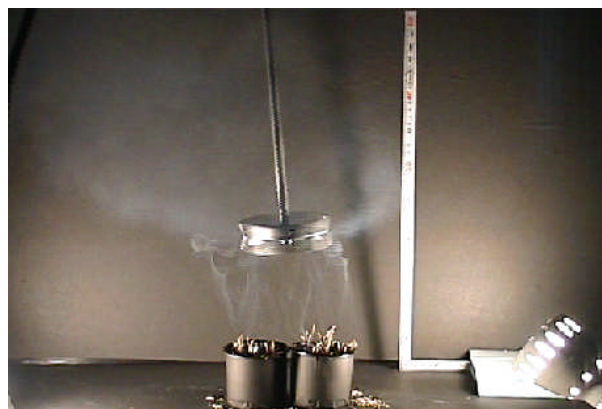


写真-2 攪拌機による煙の拡散（横に拡散）



写真-3 攪拌機による煙の攪拌（縦に吸い上げ）

## 2. 2 グラウトの練混ぜ実験

### (1) 使用材料

セメントには超高強度コンクリート用として使用実績のあるシリカフェームをプレミックスした低熱系セメントを使用した。細骨材には、グラウト用に一般的に使用されている硅砂（山形産5号）を用いた。硅砂の分析結果によると、絶乾密度  $2.62\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $0.25\%$ 、成分中  $96\%$  が  $\text{SiO}_2$  であった。高性能減水剤には、ポリカルボン酸系の超高強度用を用いた。グラウトの配合は、これまでの研究<sup>2)</sup>を参考

にして、水セメント比(W/C)は、練混ぜの極限に近い12%、13%、15%の3種類を採用した。細骨材セメント比(S/C)は20%、高性能減水剤はセメント量の2.0%用いることにした。

## (2) 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜには、前節で用いた攪拌羽を攪拌機に取付けて行った。攪拌機にはハンドミキサーを用いた。ハンドミキサーには、回転性能が異なる3種類(1300min<sup>-1</sup>、1000min<sup>-1</sup>、550min<sup>-1</sup>)を用意した。グラウトの練混ぜは、1バッチ当たり3リットルで実施した。材料は計量後、セメント、細骨材、水、混和剤の順に鋼製のペール缶(外径30cm、高さ36cm)に投入し、10分間練混ぜを行うことにした。練混ぜ時間は当初5分を設定していたが、水セメント比が非常に小さいために練混ぜが十分に行えず、10分間に変更して練混ぜを行うことにした。

No.7の羽の場合、他の羽に比べて径が大きいためペール缶内で羽が隅々まで行き渡らず、また羽も他の羽に比べて重いためか、練混ぜ時の抵抗が大きく羽が十分回転せず、練混ぜが十分に行えないことが分かったので、No.7の羽は今回の実験では用いないことにした。また、水セメント比が12%になると極端に練混ぜ時のハンドミキサーの抵抗が大きくなり、ハンドミキサーの回転数が1000min<sup>-1</sup>、550min<sup>-1</sup>の場合、回転数が1300min<sup>-1</sup>の場合に比べて、練混ぜ効率が低下するために、水セメント比が12%の場合には、回転数が1300min<sup>-1</sup>の場合のみでグラウトを製造した。

実験では、グラウトの練混ぜ後、練上り温度の測定とフロー試験を実施し、圧縮試験用シリンダー供試体φ5×10(cm)を各3本ずつ製作した。製作した供試体は標準養生を行い、材齢28日で圧縮試験を実施した。JP漏斗試験は、グラウトが閉塞して流下時間の測定を行うことが難しかったので、今回の実験では実施しなかった。

## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度と水セメント比

図-1～図-3は、水セメント比がそれぞれ12%、13%、15%のグラウトを回転数が1300min<sup>-1</sup>の攪拌機を用いて製作した場合の各攪拌羽ごとの圧縮強度試験結果を表している。図中の棒グラフが圧縮強度の平均値を表しており、圧縮強度の最大値と最小値の差(以後、強度の変動幅と呼ぶことにする)を黒の実線で示している。図-1～図-3において、いずれの羽を用いた場合も圧縮強度の平均値、および強度の最小値は、目標とする強度150N/mm<sup>2</sup>以上であった。

W/C=12%の場合、No.4の羽を使用して製造したグラウトの圧縮強度が一番高く187.0N/mm<sup>2</sup>で、強度の変動幅は、15.2N/mm<sup>2</sup>であった。No.4の羽は、実験に用いた羽の中では径が一番小さい。W/C=12%の場合、圧縮強度は172.2～187.0N/mm<sup>2</sup>、強度の変動幅は、10.7～22.4N/mm<sup>2</sup>の範囲にあった。圧縮強度は、羽の違いによって、およそ15N/mm<sup>2</sup>程度の差が生じている。攪拌機の回転数は、同じであっても羽の形状の違いによって、強度にはばらつきが認められる。また、強度が他に比べて高かったNo.4の場合、強度の変動幅は必ずしも他に比べて大きい結果にはなっていない。

W/C=13%の場合、No.3の羽を使用して製造したグラウトの圧縮強度が一番高く183.3N/mm<sup>2</sup>で、強度の変動幅は、4.1N/mm<sup>2</sup>であった。W/C=13%の場合、圧縮強度は161.9～183.3N/mm<sup>2</sup>、強度の変動幅は、4.1～26.5N/mm<sup>2</sup>の範囲にあった。圧縮強度は羽の違いによって、およそ22N/mm<sup>2</sup>程度の差が生じている。強度が他に比べて高かったNo.3の羽は径が150mmあり、No.4よりも2倍近く径が大きい。また、煙の可視化実験では、煙が上方に立ち昇る傾向のある拡散タイプであり、No.4と羽のタイプは異なっている。また、W/C=13%の場合、No.3の圧縮強度が一番高く、強度の変動幅も一番小さい結果になっている。

W/C=15%の場合、No. 6 の羽を使用して製造したグラウトの圧縮強度は 190.2N/mm<sup>2</sup> と一番高く、強度の変動幅は 4.6N/mm<sup>2</sup> であった。しかし、圧縮強度に関しては、No. 3 および No. 4 の場合もそれぞれ、187.7 N/mm<sup>2</sup>、187.0 N/mm<sup>2</sup> となっており、No. 6 の羽と No. 3 および No. 4 の羽の場合の強度にはあまり大きな差はない結果となっている。W/C=15%の場合、圧縮強度は 173.9~190.2 N/mm<sup>2</sup>、強度の変動幅は 3.6~18.3N/mm<sup>2</sup> の範囲にあった。

図-4 は、各攪拌羽を用いて製作したグラウトの圧縮強度と水セメント比との関係を表している。全体的な傾向として、水セメント比が 12%の場合に比べて、13%の場合は強度がやや低下しており、一方 15%の場合には強度がやや増加している。W/C=12%の場合、6 種類の羽を用いて製作したグラウトの圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ 179.4 N/mm<sup>2</sup>、17.0 N/mm<sup>2</sup> であった。一方、W/C=13%の場合、圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ 170.9 N/mm<sup>2</sup>、11.2 N/mm<sup>2</sup>、W/C=15%の場合、それぞれ 183.1 N/mm<sup>2</sup>、8.7 N/mm<sup>2</sup> となっている。水セメント比が、極端に低い 12%~15%の範囲においては、水セメント比と圧縮強度との間にはあまり相関性が認められない。むしろ水セメント比以外に練混ぜ方法も強度に影響を及ぼしているものと考えられる。また、この水セメント比の範囲においては、変動幅は水セメント比が増加するのに伴い減少している。すなわち、水セメント比が増加するのに伴い練混ぜも改善され、材料の均一な練混ぜが行われ、強度のばらつきにも影響を及ぼしたのではないかと考えられる。また、拡散傾向が他とは異なる No. 3 の羽が、他の羽を用いた場合に比べて著しく強度が異なっている傾向も認めがたい。

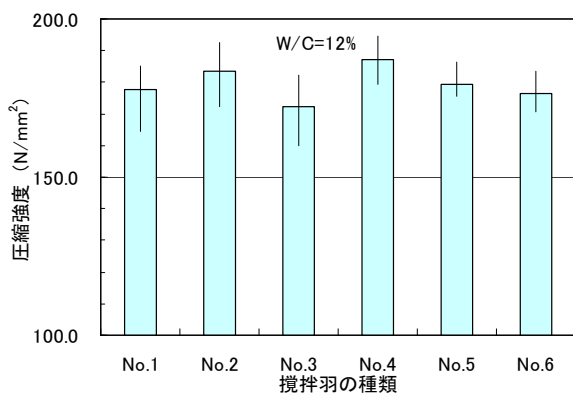


図-1 圧縮強度とそのばらつき

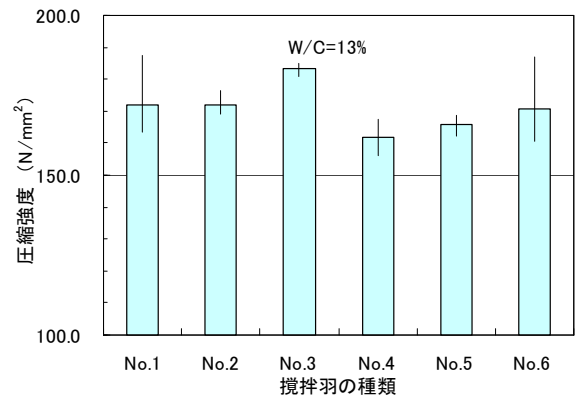


図-2 圧縮強度とそのばらつき

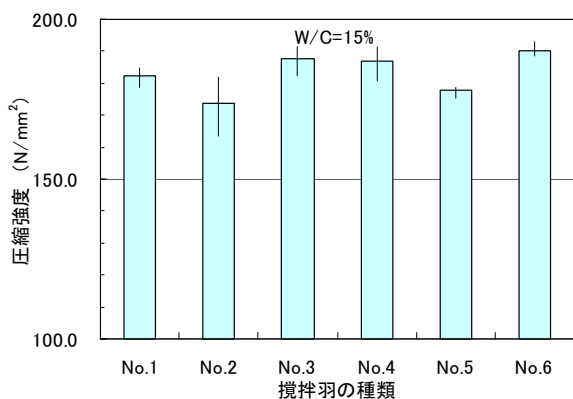


図-3 圧縮強度とそのばらつき

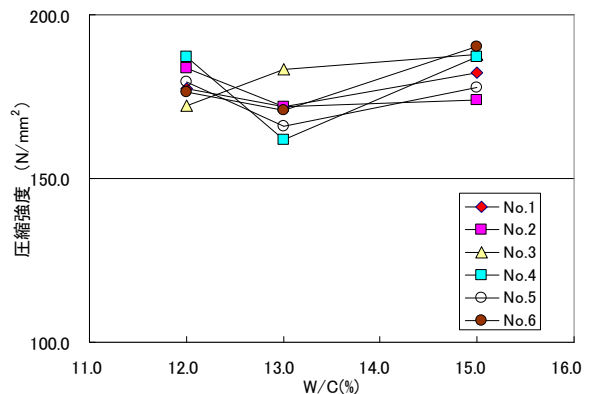


図-4 W/C と圧縮強度との関係

3. 2 圧縮強度と攪拌機の回転数との関係

図-5 および図-6 は、水セメント比が 13% および 15% の場合において、ハンドミキサの回転数を 3 通りに変化させた場合の圧縮強度を表している。図-5 において、水セメント比が 13% でハンドミキサの回転数が  $550 \text{ min}^{-1}$  の場合、No. 3 および No. 4 の羽を用いて製作したグラウトは、圧縮強度が  $150 \text{ N/mm}^2$  以下となった。回転数が  $1300 \text{ min}^{-1}$  の場合、6 種類の羽を用いて製作したグラウトの圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ  $170.9 \text{ N/mm}^2$ 、 $11.2 \text{ N/mm}^2$  であった。 $1000 \text{ min}^{-1}$  の場合、圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ  $166.4 \text{ N/mm}^2$ 、 $19.7 \text{ N/mm}^2$  で、 $550 \text{ min}^{-1}$  の場合それぞれ  $155.7 \text{ N/mm}^2$ 、 $18.9 \text{ N/mm}^2$  であった。

図-6 においては、水セメント比は  $W/C=15\%$  で、圧縮強度はすべて  $150 \text{ N/mm}^2$  以上であった。回転数が  $1300 \text{ min}^{-1}$  の場合、6 種類の羽を用いて製作したグラウトの圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ  $183.1 \text{ N/mm}^2$ 、 $8.7 \text{ N/mm}^2$  であった。 $1000 \text{ min}^{-1}$  の場合、圧縮強度および変動幅の平均値は、それぞれ  $182.7 \text{ N/mm}^2$ 、 $12.9 \text{ N/mm}^2$  で、 $550 \text{ min}^{-1}$  の場合、それぞれ  $171.3 \text{ N/mm}^2$ 、 $18.2 \text{ N/mm}^2$  であった。一概には言い難いが、ハンドミキサの回転数が低下するのに伴い、圧縮強度は低下し、強度のばらつきは増加する傾向にあるようである。また、水セメント比が 13% の場合よりも 15% の場合の方が、強度および強度のばらつきが改善されるように見受けられる。

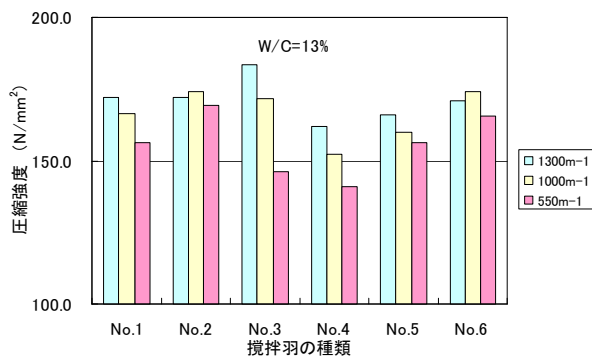


図-5 圧縮強度と回転数との関係

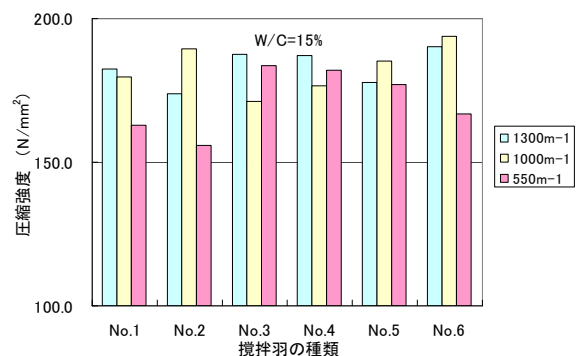


図-6 圧縮強度と回転数との関係

3. 3 フロー値

図-7 は、回転数が  $1300 \text{ min}^{-1}$  のハンドミキサを用いてグラウトを製作した時のフロー値を表している。フロー値は、羽の種類によって多少の差は認められるが、羽の種類の違いで著しくフロー値が変化している様子は見受けられない。水セメント比 12%、13% および 15% のそれぞれに対して、6 種類の羽を用いて製作したグラウトのフロー値の平均値を求めると、それぞれ  $29.0 \text{ cm}$ 、 $30.6 \text{ cm}$  および  $37.4 \text{ cm}$  であった。この結果に直線回帰をあてはめた場合、近似曲線として、 $FL=2.89W/C-6.14$ 、相関係数  $R^2=0.98$  が得られた。ここに、FL はフロー値を表している。水セメント比とフロー値とは相関性は高いと考えられる。

図-8 は、水セメント比が 13% および 15% の場合の回転数とフロー値との関係をそれぞれの羽ごとに表している。水セメント比が 13% および 15% のいずれの場合にも、ハンドミキサの回転数が変化しても、フロー値はあまり変化していないことが理解される。すなわち、フロー値は水セメント比には影響されるが、練混ぜ時のハンドミキサの回転数にはあまり影響されていないと判断される。

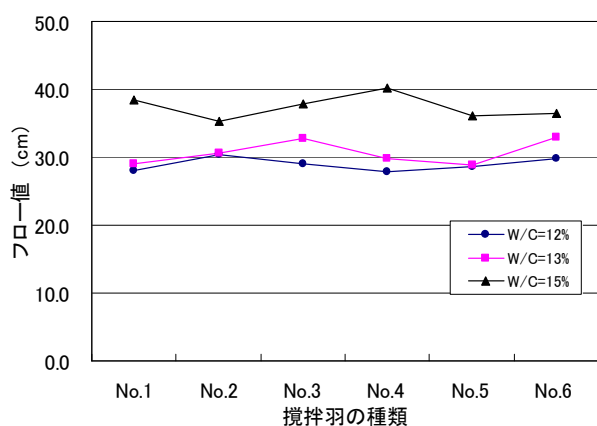


図-7 攪拌機羽とフロー値との関係

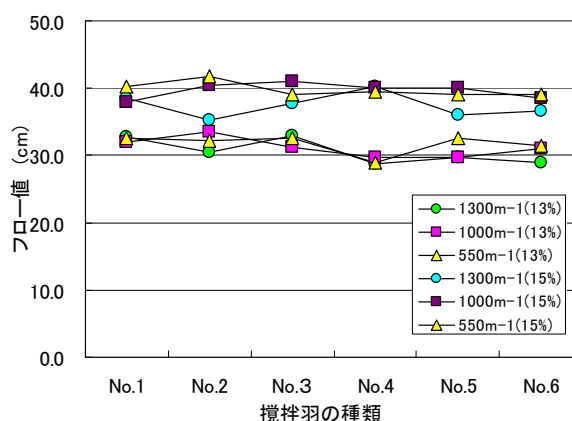


図-8 回転数とフロー値との関係

#### 4. 結論

今回行った実験の範囲において、以下のことが結論として得られた。

- (1) 水セメント比が 12%～15%の範囲において、圧縮強度が 150N/mm<sup>2</sup>以上のグラウトを製造することが可能であることが確認された。
- (2) 水セメント比が、極端に低い 12%～15%の範囲においては、水セメント比と圧縮強度のとの間にはあまり相関性が認められなかった。むしろ、この水セメント比の範囲においては、強度には水セメント比以外に練混ぜ方法が影響するものと考えられる。
- (3) 可視化実験により、攪拌羽の拡散傾向を明らかにすることができたが、羽の拡散傾向の違いがグラウト強度に著しく影響を及ぼす傾向は認められなかった。
- (4) ハンドミキサの回転数が低下するのに伴い、圧縮強度は低下し、強度のばらつきは増加する傾向が認められた。
- (5) 水セメント比とフロー値との間には高い相関性が認められたが、練混ぜ時の回転数にはあまり影響されないことが確認された。

#### 謝辞

本実験に際しては、関東学院大学工学部社会環境システム学科卒業生 加藤将高、栗林陽至、高橋正亨、川上清陸、各氏の協力を得ました。また、実験材料に関しては、安藤建設技術研究所 立山創一室長からの協力を得ました。ここに深く感謝の意を表す次第であります。

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号 19560465)の一環として行われたことを付記します。

#### 参考文献

- (1) 岡本裕昭, 一宮利通, 盛田行彦, 松原喜之; 低収縮型超高強度コンクリートを用いた秋葉原公共デッキの設計と施工, 橋梁と基礎, 第39巻, 8号, pp.10-17, 2005年8月
- (2) 立山創一, 安部弘康, 出雲淳一; シリカフェームをプレミックスした低熱系セメントを用いた超高強度グラウト材の圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2007年8月