

## 論文

[1084] 超高強度コンクリートの物性に及ぼす施工条件の影響  
に関する研究

正会員○鬼塚雅嗣（佐藤工業中央技術研究所）

正会員 松尾 忠（佐藤工業中央技術研究所）

浦川和也（佐藤工業中央技術研究所）

## 1. はじめに

近年、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ 以上の超高強度コンクリートを建築物等に利用したいとの要求が高まっている。このためには、選定したコンクリート材料および調合はもちろんのこと、コンクリートの製造・運搬・打込み・締固め・養生等の施工条件および施工時期が超高強度コンクリートを用いた構造体の物性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかし、施工条件の観点から通常コンクリートや高強度コンクリートと比較しながら実験研究した例は少ない。

そこで、本論文は、 $F_c=600 \sim 800\text{kgf/cm}^2$ レベルの超高強度コンクリート構造体の物性に及ぼす施工条件（コンクリートの製造・運搬・打込み・締固め・養生）および施工時期（冬期・夏期）の影響を明らかにするため、レデーミクストコンクリートを用いて行った実験結果を、同時に行なった $F_c=210\text{kgf/cm}^2$ レベルの通常コンクリートや $F_c=420\text{kgf/cm}^2$ レベルの高強度コンクリートと比較しながら検討したものである。

## 2. 実験概要

超高強度コンクリートの製造・運搬・打込み・締固め・養生に関する要素実験とこれに基づいた実大模擬柱部材の施工実験からなる研究フローに従って、実験を行った。本論文では、締固め・養生に関する以下の4つの実験、有効締固め範囲に関する実験（実験-1）、締固め方法の違いに関する実験（実験-2）、柱部材の初期養生方法に関する実験（実験-3）、部材天端の初期養生方法に関する実験（実験-4）および実大模擬柱部材の施工実験（実験-5）について報告する。

## 3. 実験計画

## 3.1 使用材料および調合

実験に使用したコンクリート材料とその基本物性一覧を表-1に、コンクリートの調合を表-2に示す。

## 3.2 コンクリートの製造

コンクリートの製造は、表-3に示す材料の投入順序および練混ぜ時間を設定し、レデーミクストコンクリート工場の強制二軸コンクリートミキサー（容量 $3\text{m}^3$ ）を使用して行った。

表-1 使用材料

| 使用材料  | 種 類              | 基 本 物 性                                                |
|-------|------------------|--------------------------------------------------------|
| セメント  | 普通ポルトランドセメント (C) | 比重3.16, 比表面積 $3180\text{cm}^2/\text{g}$                |
| 混 和 材 | 顆粒状シリカフューム (SF)  | 比重2.35, 平均粒径 $0.145\mu\text{m}$ , $\text{SiO}_2$ 93.0% |
| 細 骨 材 | 青梅産砕砂+君津産山砂 (S)  | 最大寸法 5mm, 表乾比重2.60, 吸水率1.49                            |
| 粗 骨 材 | 青 梅 産 砕 石 (G)    | 最大寸法20mm, 表乾比重2.64, 吸水率0.87                            |
| 混 和 剤 | 高性能AE減水剤 (Ad)    | アニオン型特殊活性剤                                             |

表-2 コンクリートの調合

| 調 合<br>記 号 | $F_c$<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | W/CM<br>(%) | s/a<br>(%) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 重 量 ( $\text{kg/m}^3$ ) |     |    |     |      |
|------------|--------------------------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------------------|-----|----|-----|------|
|            |                                |             |            |              |            | W                       | C   | SF | S   | G    |
| P60        | 210                            | 60.5        | 48.5       | 18.0         | 3.5        | 178                     | 295 | -  | 869 | 935  |
| P37        | 420                            | 37          | 39         | 18.0         | 3.5        | 170                     | 459 | -  | 654 | 1038 |
| P30        | 600                            | 30          | 40         | 23.5         | 2.0        | 165                     | 550 | -  | 665 | 1016 |
| P25        | 800                            | 25          | 38         | 23.5         | 2.0        | 160                     | 640 | -  | 609 | 1011 |
| S25        | 800                            | 25          | 38         | 23.5         | 2.0        | 160                     | 576 | 64 | 601 | 1001 |

注) CM: 結合材量

### 3. 3 実験の組合せ

各実験の組合せを表-4に示す。

### 3. 4 試験体の形状および寸法

実験-1, 2, 3の試験体の断面寸法は、実大模擬柱と同一の900×900mmとし、高さは1打設層部分を取り出した寸法の500mmとした。また、コンクリートの内部温度が実大模擬柱の中心部と同一になるように上・下面を断熱材(t=100mm×3枚=300mm)で覆った。実験-4の試験体は、各養生方法について9本のφ100×200mmの薄鉄板製軽量型枠に打込んだ円柱供試体とし、図-1に示すように打込み面以外からの熱の移動および水分の蒸発を生じさせないように断熱材で覆った。実験-5の試験体は、断面寸法900×900mmで、高さ2100mmの実大柱部材を模擬した。なお、すべての実験の試験体は、無筋とした。

### 3. 5 実験方法

打込みは、すべてバケット打ちとし、締固めは、締固めに関する実験(実験-1, 2)以外は図-2に示すB15法とし、養生は、養生に関する実験(実験-3, 4)以外はせき板の存置期間7日間とした。実験-1における棒形振動機および加速度計の埋込み位置を図-3に示す。

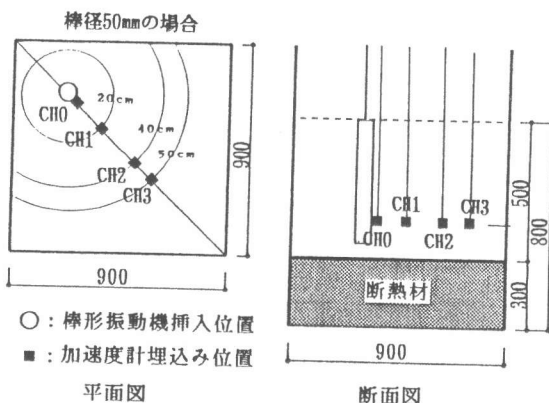


図-3 棒形振動機および加速度計の埋込み位置

表-3 コンクリートの練混ぜ方法

| 調査記号                    | 練混ぜ方法       | 材料の投入順序および練混ぜ時間                                                                                                                      |
|-------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P 6 0                   | 一括投入        | (C+S+WAD+G) $\xrightarrow[t1=40s]{\text{中速回転}}$ (排出)                                                                                 |
| P 3 7                   | 一括投入        | (C+S+WAD+G) $\xrightarrow[t1=90s]{\text{中速回転}}$ (排出)                                                                                 |
| P 3 0<br>P 2 5<br>S 2 5 | モルタル<br>先練り | (C+S $\xrightarrow[t1=30s]{\text{高速回転}}$ +SF) (WAD $\xrightarrow[t2=150s]{\text{高速回転}}$ (G) $\xrightarrow[t3=60s]{\text{中速回転}}$ (排出) |

注) 低速回転: 10rpm, 中速回転: 27rpm, 高速回転: 41rpm

表-4 実験の組合せ

| コンクリートの調査 |                  | P 6 0 | P 3 7 | P 3 0 | P 2 5 | S 2 5 |
|-----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 実験名       | 施工方法             |       |       |       |       |       |
| 実験-1      | 棒形振動機の棒径<br>(mm) | 40    | ○     |       |       |       |
|           |                  | 50    | ○     | ○     | ○     | ○     |
|           |                  | 60    |       | ○     | ○     | ○     |
|           | 打設層厚<br>(cm)     | 50    | ○     | ○     | ○     | ○     |
|           |                  | 80    |       | ○     |       |       |
| 実験-2      | 締固め方法<br>(図-2参照) | A 1 5 | ○     | ○     | ○     | ○     |
|           |                  | B 5   |       | ○     |       | ○     |
|           |                  | B 1 5 | ○     | ○     | ○     | ○     |
|           |                  | B 3 0 |       | ○     |       | ○     |
| 実験-3      | せき板存置期間<br>(日)   | 1     | □     | □     | ○     | □     |
|           |                  | 3     | □     | □     | ○     | □     |
|           |                  | 7     | □     | □     | ○     | □     |
| 実験-4      | 図-10参照           |       | △     | △     |       | △     |
| 実験-5      |                  |       |       | □     | △     | □     |

注) ○: 冬期実験のみ実施, △: 夏期実験のみ実施, □: 冬期・夏期実験実施

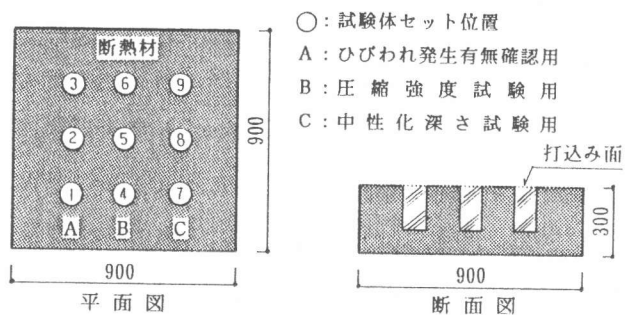


図-1 部材天端模擬試験体の形状および寸法

| A 法 (順次加振)                                                                     | B 法 (同時加振)                                                                                                                                                                                                                                              |       |      |     |    |       |     |       |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-----|----|-------|-----|-------|-----|
| <p>○: バイブレータの挿入位置<br/>・バイブレータを図中の挿入位置に番号に従って順次締固めを行う。加振時間は各点1.5秒とする。(A15法)</p> | <p>○: バイブレータの挿入位置<br/>・バイブレータ4本を所定の挿入位置に同時に挿入して締固めを行う。加振時間は下表の3種類とする。</p> <table border="1"> <tr> <th>締固め方法</th><th>加振時間</th></tr> <tr> <td>B 5</td><td>5秒</td></tr> <tr> <td>B 1 5</td><td>15秒</td></tr> <tr> <td>B 3 0</td><td>30秒</td></tr> </table> | 締固め方法 | 加振時間 | B 5 | 5秒 | B 1 5 | 15秒 | B 3 0 | 30秒 |
| 締固め方法                                                                          | 加振時間                                                                                                                                                                                                                                                    |       |      |     |    |       |     |       |     |
| B 5                                                                            | 5秒                                                                                                                                                                                                                                                      |       |      |     |    |       |     |       |     |
| B 1 5                                                                          | 15秒                                                                                                                                                                                                                                                     |       |      |     |    |       |     |       |     |
| B 3 0                                                                          | 30秒                                                                                                                                                                                                                                                     |       |      |     |    |       |     |       |     |

図-2 締固め方法の要領

#### 4. 実験結果および考察

##### 4. 1 有効締固め範囲に関する実験

各測定点における振動加速度は、0～20秒の平均値とみなした。この平均加速度と振動源からの距離の関係を調査および棒径別にまとめたものを図-4に示す。いずれも振動加速度は、振動源からの距離とともに減少しているが、P25・S25の超高強度コンクリートの20cmまでの距離減衰は、通常および高強度コンクリートに比べて小さいことが分かる。この原因については、粘性が高いためにせん断応力が伝わりやすいという考察もある[1]が、さらに今後検討する必要がある。

振動源からの距離と材令28日コア強度比の関係を図-5に示す。超高強度コンクリートのコア強度比は、通常および高強度コンクリートに比べて、加速度の距離減衰と同様に低下が少なく、測定したいずれの位置においても9割以上確保できている。

加速度と材令28日コア強度比の関係を図-6に示す。加速度とコア強度比には相関性があり、加速度の低下に伴いコア強度比も低下している。この傾向には、水結合材比の影響は認められなかった。有効締固め範囲をコア強度比0.9以上とすると、それに必要な振動加速度は1.6G程度以上となる。これらのことから、超高強度コンクリートの有効締固め範囲は、通常および高強度コンクリートと同様に棒径の10倍程度と言える。

##### 4. 2 締固め方法の違いに関する実験

締固め方法の違いに関するコア強度の関係を図-7に示す。コア強度に及ぼす材令および締固め方法に関する二元配置分散分析を行った結果、P30・S25とも材令および締固め方法の主効果は有意水準1%で有意であった。B法では加振時間が15秒程度であればさらに加振してもさほど強度増進は認められなかった。また、棒形振動機の挿入箇所および加振時間15秒と同一で本数を変えたA15法とB15法ではコア強度は、ほぼ同等であった。

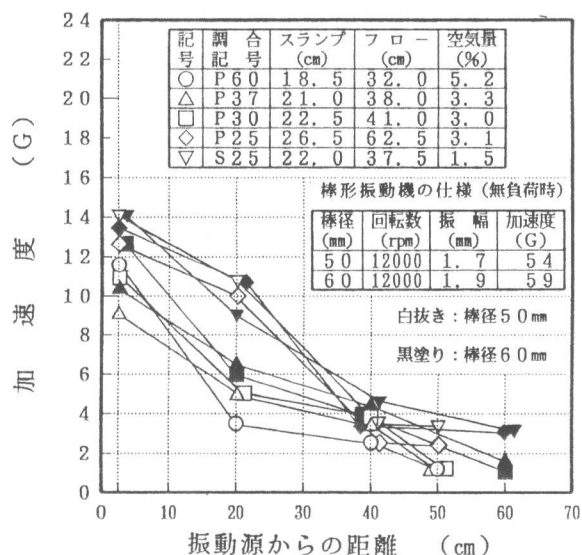


図-4 振動源からの距離と加速度の関係

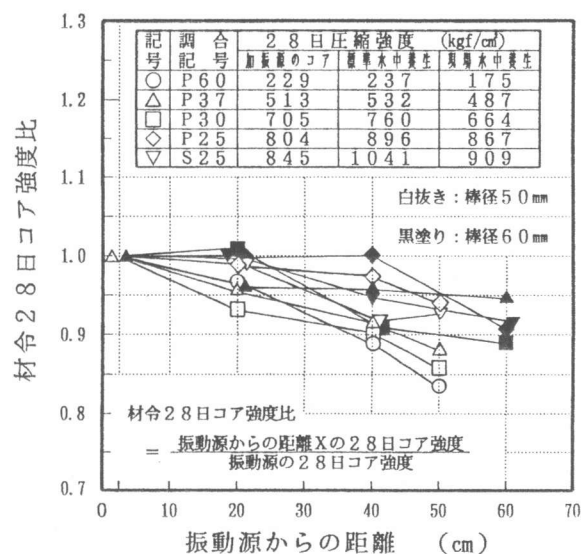


図-5 振動源からの距離とコア強度比の関係

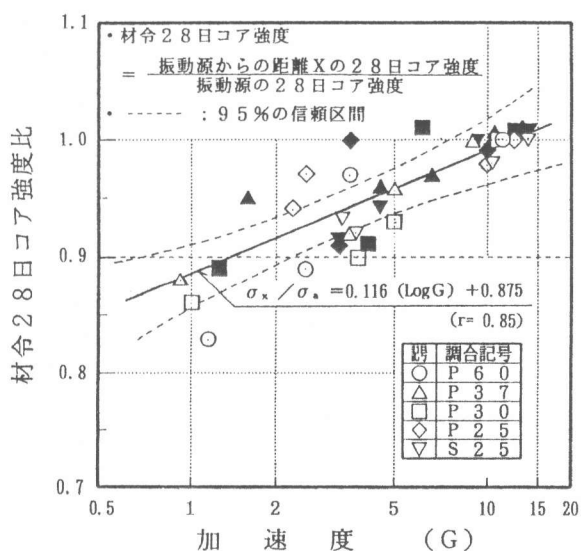


図-6 加速度とコア強度比の関係

#### 4. 3 柱部材の初期養生方法に関する実験

せき板存置期間7日供試体のコア強度を基準にした各せき板存置期間試験体のコア強度の比と脱型時強度の関係を図-8に示す。脱型時強度が100kgf/cm<sup>2</sup>以下と小さい冬期実験における通常コンクリートのP60では既往文献[2]と同じように、せき板の存置期間の影響が認められるが、それでも強度比95%程度確保できていた。脱型時強度が100kgf/cm<sup>2</sup>を越えるその他については、すべてせき板の存置期間の影響が認められなかった。

冬期実験におけるせき板存置期間と中性化深さの関係を図-9に示す。本実験の中性化促進環境は温度30℃、相対湿度60%、CO<sub>2</sub>濃度5%で行ったが、日本建築学会「高耐久性コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の規準値と比較するために、上記指針の中性化試験案に基づいて、温度を20℃に修正した値をプロットした。通常コンクリートのP60では、せき板存置期間の影響が認められるが、水結合材比37%以下の高強度および超高強度コンクリートではせき板存置期間の影響が認められなかった。

#### 4. 4 部材天端の初期養生方法に関する実験

一般に、プラスチック収縮ひびわれは、ブリージングによる水の上昇速度よりもコンクリート表面からの水分の蒸発速度が大きいときに発生する。特に、高強度・超高強度コンクリートではブリージングもほとんどなく、水分の蒸発を防がないとひびわれが発生しやすいと考えられる[3]。そこで、夏期において、実際の風および直射日光を受ける外部環境下において実験を行った。その結果を部材天端の初期養生方法と材令28日強度比の関係にまとめたものを図-10に示す。部材天端に何も養生しないものは、P37についてはひびわれは発生せず、養生を行ったものと強度比は大差なかったが、P30およびS25については供試体高さ中央にほぼ水平方向のひびわれが発生した。しかし、シート養生・湿布養生または被膜養生を行えば、

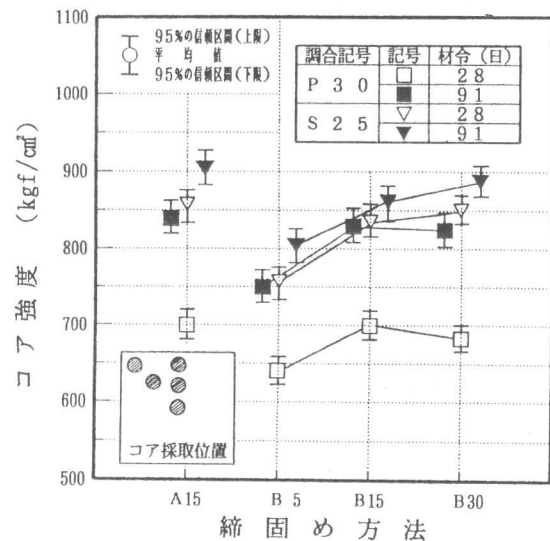


図-7 締固め方法とコア強度の関係

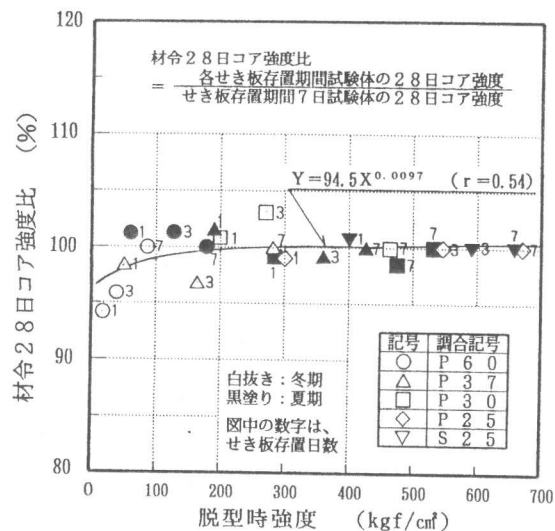


図-8 脱型時強度とコア強度比の関係

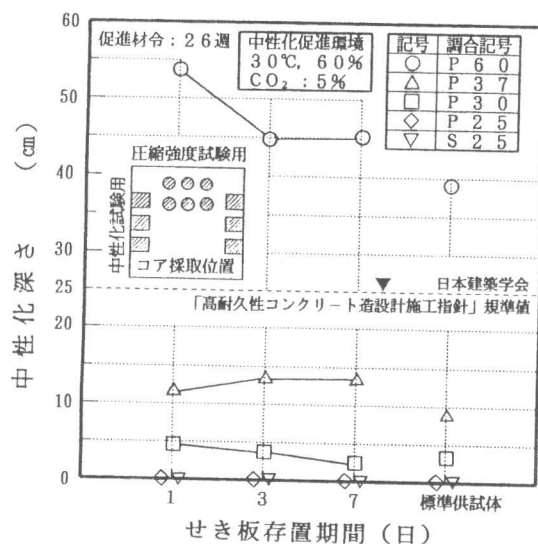


図-9 せき板存置期間と中性化深さの関係

ひびわれは発生せず、強度比も大差なかった。P 3 7とP 3 0においてひびわれの発生の有無が生じた原因としては、ブリージング量は、 $0.02\text{cc}/\text{cm}^2$ と同一であり、単位水量が $5\text{kg}/\text{m}^3$ 違うことであるが、詳細については今後検討していく必要がある。

#### 4. 5 実大模擬柱部材の施工実験

実大模擬柱部材のコア強度の高さ方向分布を図-11に示す。夏期実験のコア強度は、冬期実験に比べてP 3 0で10%、S 2 5で20%程度小さかった。これは、夏期実験で使用したコンクリートの練上り温度が $30^\circ\text{C}$ を越え、柱中心部の最高内部温度が $100^\circ\text{C}$ 近くまで上昇して、強度発現を妨げたことが考えられる。S 2 5は高さ方向の強度のばらつきが小さいが、P 3 0では上部で $100\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度強度が小さかった。これについては、上部に下から上げてきたエントラップドエアが抜けきれずに滞留したためと考えられるので、上部についてはもう一度締固めを行う必要があると考えられる。なお、標準養生供試体強度についても夏期実験の方が冬期実験に比べて、練上り温度および脱型までの養生温度の影響で10~15%程度小さかった。また、断面のコア採取位置によるばらつきは小さく、締固めおよび温度履歴の影響は認められなかった。

構造体内部の最高温度と強度比の関係を図-12に示す。冬期実験においては、水結合材比の違いはあるものの、最高温度が高いほど材令28日から91日の強度増進が小さかった。しかし、材令91日強度比はS 2 5を除けば100%確保できていた。夏期実験においては、通常コンクリートも含め材令28日から91日の強度増進がほとんど認められずP 6 0で100%程度確保できていたが、その他の高強度・超高強度コンクリートについては、最高温度も $75^\circ\text{C}$ を越え、90%程度の強度発現にとどまっていた。

P 3 0における品質管理用供試体の6

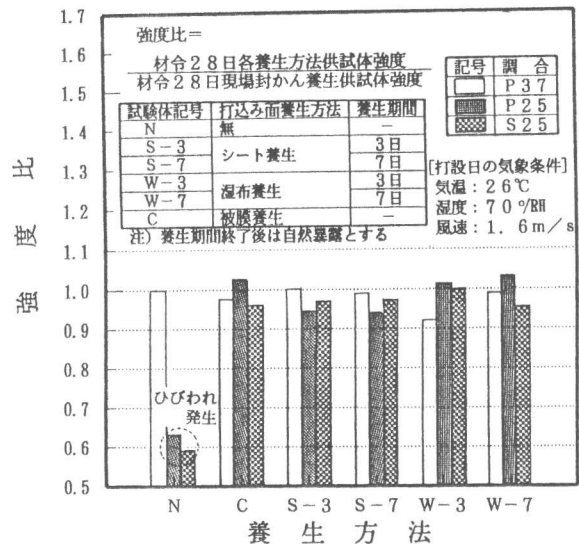


図-10 部材天端養生方法と強度比の関係

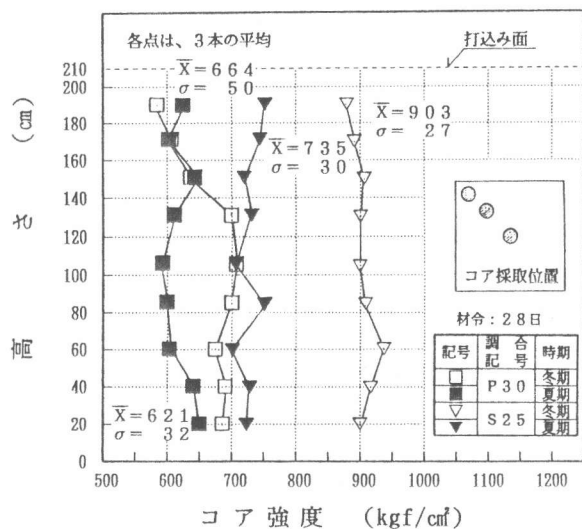


図-11 コア強度の高さ方向分布

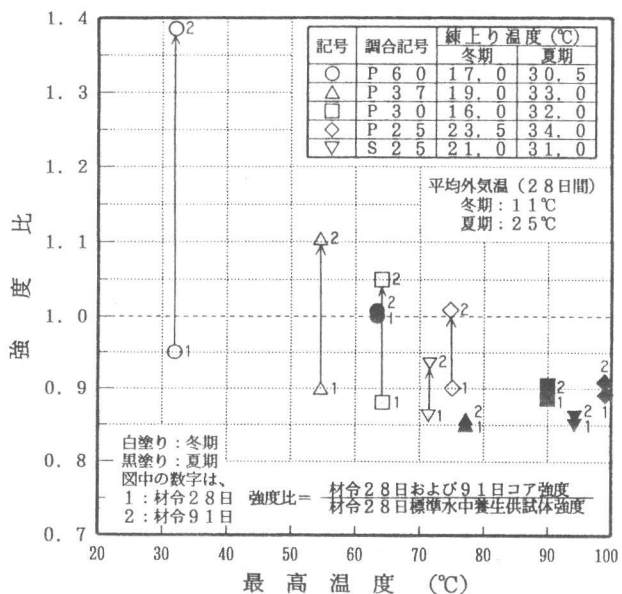


図-12 構造体内部最高温度と強度比の関係

種類の養生方法と各養生方法の供試体強度を基準にしたコア強度の比の関係を図-13に示す。コア強度は、冬期・夏期にかかわらず標準水中、標準封かん、現場水中、現場封かん養生供試体強度の80～95%の範囲であり、構造体に埋込んだ温度センサーにより温度履歴を再現する養生槽にて養生した水中および封かん養生供試体強度の95～105%の範囲にある。S25についても同様の結果を得た。このことから、超高強度コンクリートの構造体コンクリートの強度管理用供試体の養生方法としては、構造体と同一温度履歴追従水中または封かん養生が妥当であると考えられる。

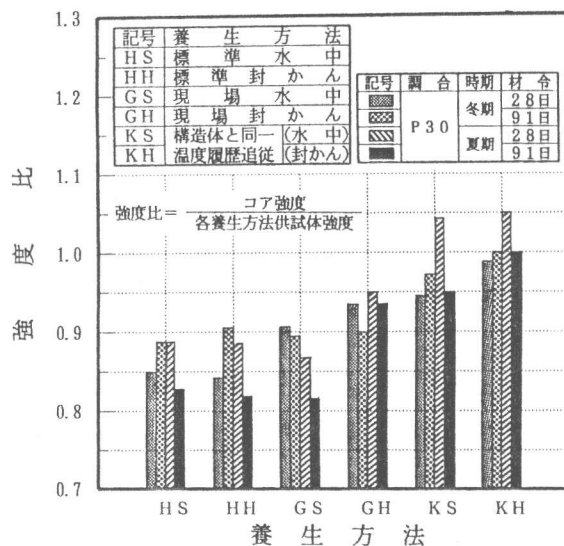


図-13 供試体養生方法と強度比の関係

## 5. まとめ

超高強度コンクリートの物性に及ぼす施工条件の影響を、通常および高強度コンクリートと比較して行った実験の結果、以下のことが明らかになった。

(1) 棒形振動機で、柱部材を締固めた場合の加速度とコア強度比（振動源からXcmの距離のコア強度／振動源のコア強度）には水結合材比にかかわらず一定の相関性があり、加速度の低下に伴いコア強度比も低下していた。この関係から、超高強度コンクリートの有効締固め範囲は、通常および高強度コンクリートと同様に棒径の10倍程度と考えて良い。

(2) 超高強度コンクリートを打ち込んだ実大柱を締固める方法として、同時加振のB法では15秒程度加振すればさらに加振しても強度増進は認められず、A15法とB15法ではコア強度に大差なかった。したがって、超高強度コンクリートの締固め時間は、15秒が妥当であると考えられる。

(3) 脱型時強度が100kgf/cm<sup>2</sup>を越える高強度・超高強度コンクリートでは、コア強度および中性化に及ぼすせき板の存置期間の影響は認められなかった。

(4) 水結合材比37%（P37）の高強度コンクリートでは、打設面を養生しなくてもプラスチック収縮ひびわれは発生せず、養生したものとコア強度は大差なかった。しかし、水結合材比30%（P30）およびシリカフュームを内割10%混入した水結合材比25%（S25）の超高強度コンクリートでは、シート養生・湿布養生または被膜養生を行わないとひびわれが発生した。

(5) 超高強度コンクリートを夏期に施工する場合には冬期に比べて、練上り温度および構造体内部の最高温度の影響で10～20%の強度低下が認められるとともに、材令28日から91日までの強度増進が認められない。超高強度コンクリートの構造体強度管理用供試体の養生方法としては、構造体と同一温度履歴追従水中または封かん養生が妥当である。

## 参考文献

- [1] 神田 亨ほか：シリカフュームを使用した高強度コンクリートの振動締固め特性、土木学会第44回学術講演会 No. 5, pp. 206-207, 1989.10
- [2] 建築業協会 型枠小委員会編：せき板の存置期間および初期養生に関する研究、1991.3
- [3] 橘 大介ほか：シリカフュームを使用した高強度コンクリートの物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No. 2 pp. 117-122, 1990.6