

# 超速硬セメントを用いた RC ばりの若材令時曲げ試験およびコンクリートの断熱温度特性に関する実験

Bending Test of Reinforced Concrete Beam in Early Age and Experiment on Adiabatic Temperature Rise of Concrete by the Use of Ultra Super High Early Strength Cement

熊谷 健洋\*  
Takehiro Kumagae

大矢 一夫\*\*  
Kazuo Ōya

前川 一行\*\*\*  
Kazuyuki Maekawa

西 保\*\*\*\*  
Tamotsu Nishi

小島 雅樹\*\*\*\*\*  
Masaki Kojima

土橋 吉輝\*  
Yoshiteru Dobashi

西田 德行\*  
Noriyuki Nishida

島津 新一\*\*\*\*\*  
Shinichi Shimazu

## 要 約

超速硬セメントは、打設後2～3時間で実用強度を得ることができることから、今後緊急工事等広い用途が考えられるセメントである。

今回、超速硬セメントコンクリートの打設直後からの圧縮、引張、曲げ、温度上昇などの特性を知るための実験を実施、次のことがわかった。

圧縮強度の発現は極めて早い、圧縮強度と弾性係数、引張強度との関係は普通コンクリートとほとんど変わらない。また、鉄筋コンクリートはり部材としての曲げ特性も変わらず、従来の考え方が適用できる。

しかし、若材令での水和熱の発生が激しいので、温度上昇はいくぶん大きく、従来問題にならなかった部材厚でも温度に対する注意が必要であることがわかった。

## 目 次

- §1. はじめに
- §2. 圧縮強度、弾性係数および引張強度
- §3. はり曲げ試験
- §4. 温度試験
- §5. あとがき

## §1. はじめに

短時間で所要の強度が得られるコンクリートとしては、超早強セメントコンクリート、アルミナセメントコンクリート、樹脂コンクリート、超速硬セメントコンクリートなどがある。このなかで比較的最近になって使われ始めたものに、超速硬セメントコンクリートがある。

超速硬セメントは、アメリカのセメント協会研究所で開発された“Regulated Set Cement”の基本技術を国内メーカー2社（住友セメント㈱、小野田セメント㈱）が導入し改良を加えたもので、1971年に市販（商品名ジェットセメント）された<sup>1)</sup>。

このセメントを用いたコンクリートは、次のような特長を持っている。<sup>2)</sup>

---

\*技術研究部土木技術課  
\*\*技術研究部技術研究所副所長  
\*\*\*技術研究部技術研究所係長  
\*\*\*\*技術研究部土木技術課係長  
\*\*\*\*\*技術研究部原子力室係長  
\*\*\*\*\*関東(支)目黒(出)

- 2～3時間で実用強度を発現する。
- 凝結時間が短く、かつ、有機カルボン酸を主成分とする凝結遅延剤の使用で始発時間を任意に設定できる。
- アルミナセメントのような長期における強度の低下がなく、安定した強度の増大を示す。
- 養生温度の強度発現への影響が少なく、低温時でも十分な強度を得ることができる。
- 乾燥収縮が少ない。
- 若材令時の水密性が高い。

これらの特長は、従来の早強性のセメントがケイ酸三石灰( $3\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$ )の量を増加しさらに粉末度を小さくすることによって早強性を発揮させてきたのに対し、超速硬セメントでは活性化されたアルミン酸石灰( $11\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2$ )の超速硬性とケイ酸三石灰の反応とを利用したことによる。<sup>3)</sup>

このコンクリートは、主として道路・橋梁の補修や緊急工事及び寒中コンクリート工事などに使用されているが、若材令時におけるRC部材としての構造特性や温度特性などに関する研究は未だ十分とは言えない。

本実験は幹線道路を横断するボックスカルバート頂版に超速硬セメントコンクリートを使用し、打設後3時間で道路開放することを想定し、この場合に必要資料を得る目的で行ったものである。

本実験では次の試験を行った。

- 圧縮強度試験、弾性係数試験、引張強度試験
- RCばりの若材令時曲げ試験
- 打設後の温度上昇試験

実験に用いたコンクリートは、材令3時間での圧縮強度を $200\text{kgf/cm}^2$ ( $19.6\text{MPa}$ )以上とし、Table 1に示す配合とした。

実験は昭和59年7月、西松建設技術研究所において、技術研究部、関東支店目黒出張所、住友セメント(株)の共同で実施したものであり、結果については技術研究部がまとめた。

Table 1 コンクリート示方配合

| 粗骨材の最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>S/L<br>(cm) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<br>S/a<br>(%) | 単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |     |     |      |     |      |
|------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|-----|-----|------|-----|------|
|                  |                     |                      |                    | W                             | C   | S   | G    | 混和剤 |      |
|                  |                     |                      |                    |                               |     |     |      | Mt* | Js*  |
| 25               | $12\pm 2.5$         | 40.0                 | 43.5               | 136                           | 340 | 819 | 1056 | 6.8 | 1.02 |

\* Mt: 減水剤

\*\* Js: 凝結遅延剤

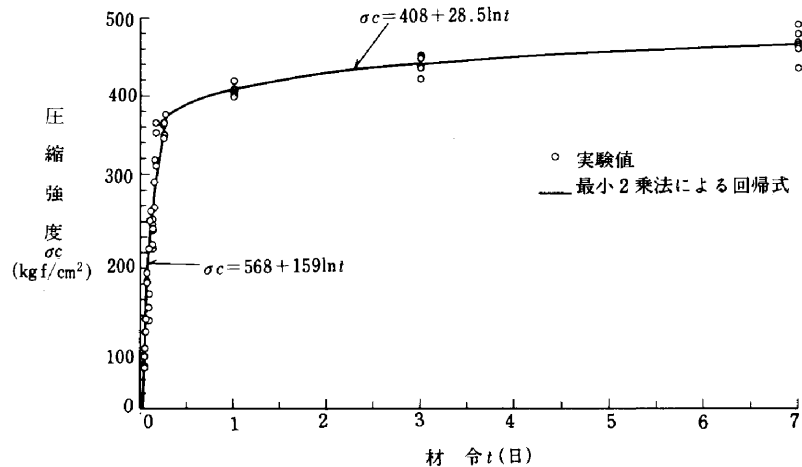


Fig.1 材令-圧縮強度 関係図

## §2. 圧縮強度、弾性係数および引張強度

コンクリートなどの材料試験では、3本の供試体の試験結果の平均値をもって測定値とするが、超速硬コンクリートでは材令初期における圧縮強度等の発現が極めて急速であるため、3本の供試体の測定の間には時間差が生じ、その影響は無視できない。そこで、3本の平均値ではなく1本毎の測定値で試験結果を整理した。なお、材令は載荷開始時とした。

試験供試体は、60本作成し、打設後1時間以内に使用するものについては、キャップレスモールドを使用した。また、供試体はすべて気乾養生であり、気温は平均 $28^\circ\text{C}$ であった。

### ① 圧縮強度 (JIS A 1108)

圧縮強度試験の結果得られた圧縮強度と材令との関係を Fig. 1 に示す。

図に示すとおり、超速硬セメントコンクリートは、打設直後から6時間前後までの強度の発現が極めて早く、その後、急に緩やかになっている。これは、普通コンクリートと異なった水和反応が、極く初期に活発に行われることによるものである。

最小二乗法により求めた圧縮強度と材令との関係式は次のようになる。

$$\sigma_c = 568 + 159 \ln t \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad t \leq 0.294 \text{ (日)} \quad (1)$$

$$\sigma_c = 408 + 28.5 \ln t \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (t > 0.294 \text{ (日)}) \quad (2)$$

なお、打設後3時間における圧縮強度は、 $\sigma = 237\text{kgf/cm}^2$ ( $23.2\text{MPa}$ )である。

### ② 弾性係数 (ASTM C 469-65)

弾性係数試験の結果得られた弾性係数と圧縮強度との関係を Fig. 2 に示す。

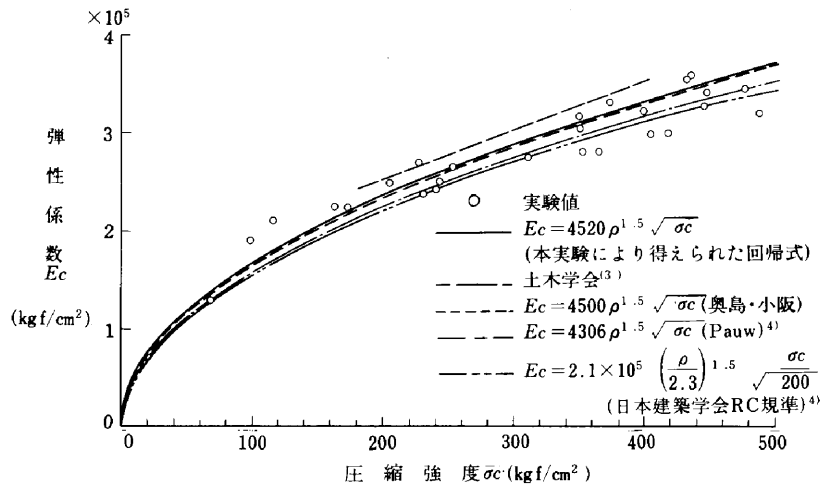


Fig.2 圧縮強度-弾性係数 関係図

この結果から最小二乗法により求めた圧縮強度をパラメータとする関係式は、

$$E_c = 0.165 \times 10^5 \sqrt{\sigma} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (3)$$

となる。参考までに、比重(2.37)もパラメータとすると関係式は

$$E_c = 4520 \rho^{1.5} \sqrt{\sigma} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4)$$

となる。

図中には普通コンクリートについての既往の実験式を併記したが、本実験での超速硬セメントコンクリートは、普通コンクリートに関する奥島・小阪の式<sup>(6)</sup>によく合う結果となった。

打設後3時間における弾性係数は、 $E = 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  (24.5GPa)である。

### ③ 引張強度 (JIS A 1113)

コンクリートの引張試験の結果得られた引張強度と圧縮強度の関係を Fig. 3 に示す。

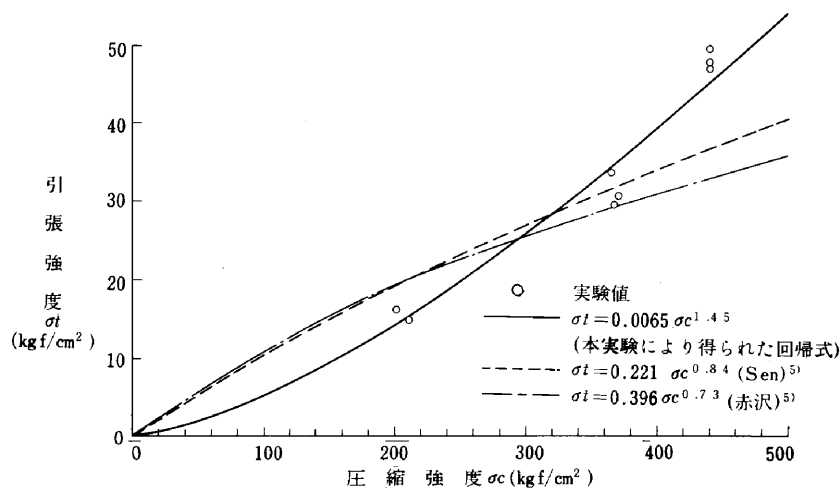


Fig.3 圧縮強度-引張強度 関係図

最小二乗法により求めた圧縮強度をパラメータとする関係式は、

$$\sigma_t = 0.0065 \sigma_c^{1.45} \quad (5)$$

となる。

Fig. 3 に示した Sen<sup>(5)</sup>、赤沢<sup>(5)</sup>の研究にみられるように、普通コンクリートの場合、一般に圧縮強度が大きくなるに従い  $\sigma_t/\sigma_c$  の値が小さくなるが、今回の超速硬セメントコンクリートに関する試験結果では逆に圧縮強度が大きくなるに従い  $\sigma_t/\sigma_c$  の値が大きくなる傾向を示した。しかし、この点についてはデータ数が少ないため、

さらに詳細な検討が必要であり、今後のデータの蓄積が待たれる。

## §3. はり曲げ試験

曲げ試験の目的は、超速硬セメントコンクリートを用いて施工したボックスカルバート頂版の RC スラブを、コンクリート打設後3時間で道路開放した場合、耐力、変形上の問題がないことを確認することである。

### 3-1 試験体、試験方法、測定

試験体寸法は Fig. 4 に示すように、45cm×60cm×400cm(厚さ×幅×長さ)である。配筋は、引張鉄筋比  $P_t = 1.1\%$ 、圧縮鉄筋比  $P_c = 1.1\%$  であり、定着破壊を防ぐため鉄筋端部を材端の鉄板に溶接した。鉄筋引張試験の結果得られた鉄筋の降伏点は  $3900 \text{ kgf/cm}^2$  (382 MPa, ひずみ0.195%)である。また、曲げ降伏荷重に対してせん断破壊しないようにせん断補強筋を配置した。

加力は、Fig. 5 に示すとおり三等分二点集中載荷(支間300cm, 加力点間100cm)とし、200tf (1.96GN)の圧縮試験機を用いた。

コンクリート打設には、コンクリートモーター車を用い、片側から順次施工した。試験体は打設後1時間で脱型し、2時間後に試験機にセットし、コンクリート用ひずみゲージ等を取り付け、3時間後に加力を開始した。

測定項目は、荷重、鉛直変位、軸鉄筋ひずみ度、コンクリート表面のひずみ度であり、使用した変位計およびひずみ計は Table 2、

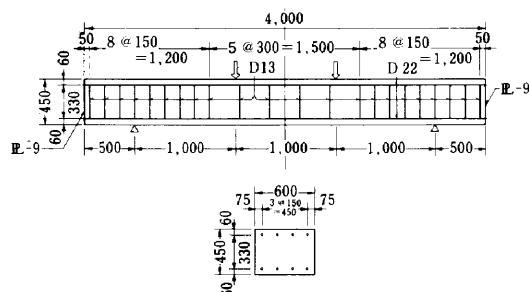


Fig.4 試験体寸法図

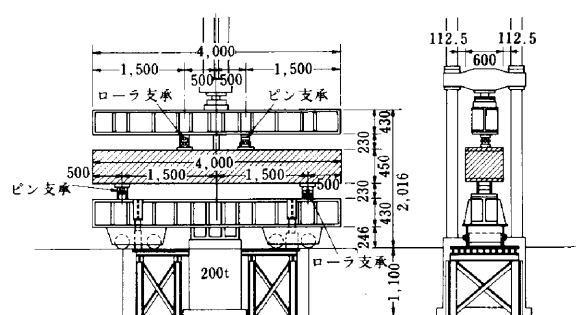


Fig.5 加力装置

Table2 変位計およびひずみ計

| 項 目       | 変位計・ひずみゲージ | 測点数 |
|-----------|------------|-----|
| 垂直変位      | CDP-25     | 9   |
| 鉄筋ひずみ     | YFLA-2     | 20  |
| コンクリートひずみ | PL-60-3 L  | 12  |

Fig. 6 のとおりである。

なお、ひびわれについては、ひびわれ進行に応じて直

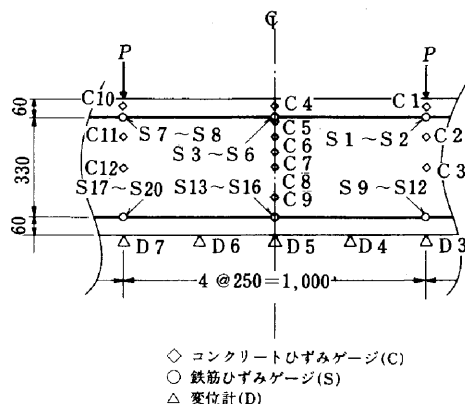


Fig.6 測点位置図

接試験体に記入し観測した。

測定は、デジタル静ひずみ測定器(TDS-301)を用い、測定器のコントロール、データのファイル化にはパーソナルコンピュータ(MULTI 16)を用いた。

測定は、降伏荷重までは2 tf 毎とし、その後は約10秒毎に行った。

### 3-2 曲げ試験結果

#### ① ひびわれ発生状況

曲げ試験の目視観測による最終ひびわれ状態を、Fig. 7 に示す。

荷重  $P = 5\text{tf}$  付近までは弾性的な変形を示し、 $P = 6\text{tf}$  で左加力点やや内側に、続いて右加力点やや内側に、 $P = 7\text{tf}$  で中央に曲げひびわれが発生した。これは、後述する鉄筋やコンクリートのひずみから推定できる値より幾分遅れている。荷重の増大とともにこのひびわれは進展し、また、新たなひびわれが、順次ほぼ対称に発生し

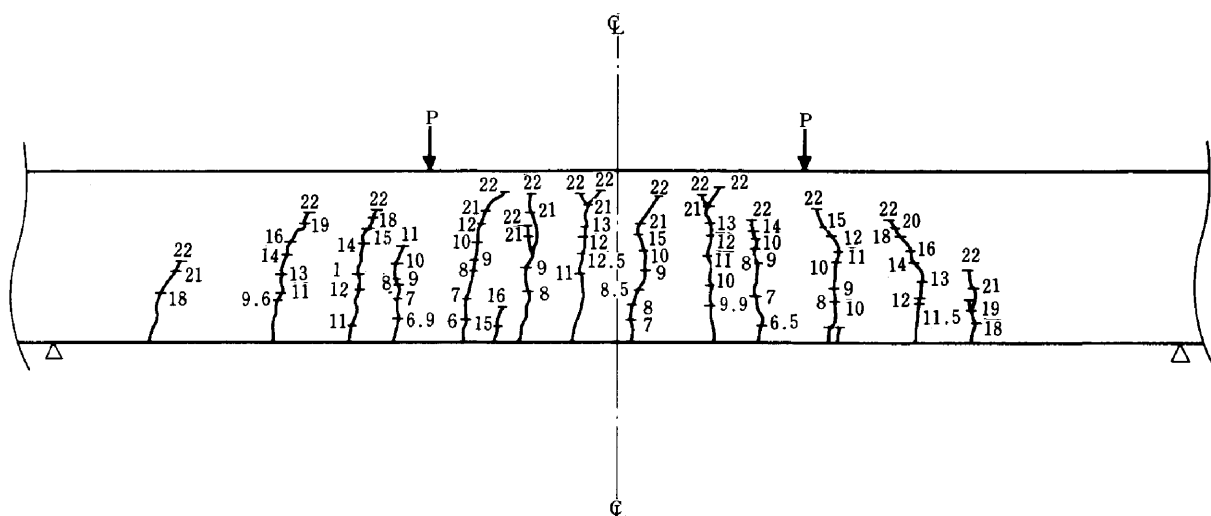


Fig.7 曲げ試験最終ひび割れ図  
(図中の数字は荷重  $P$  [tf] を示す)

た。

$P = 20.8\text{tf}$ で引張鉄筋が降伏した後、荷重が増加せずに変形だけが進行し、荷重の低下は見られなかった。また、ひびわれは、圧縮鉄筋位置で止まった。

中央部の鉛直変位 $\delta = 18.7\text{mm}$ で除荷した。

## ② 垂直変位

試験体中央部における荷重—変位曲線を Fig. 8 に示す。

荷重が、ひびわれ荷重を越えたあたりから変形が大きくなり、引張鉄筋降伏( $20.8\text{tf}$ )後は荷重は増加せずに変形だけが進んだ。

## ③ 鉄筋ひずみ

載荷点直下および中央部の荷重—引張鉄筋ひずみの関係をそれぞれ Fig. 9 および Fig. 10 に示す。

初期ひびわれ荷重はひずみゲージでの測定値から読み取れ、約 $5\text{tf}$ であり、目視による観測結果の平均値約 $6.2\text{tf}$ よりやや小さい。

中央部においては、初期ひびわれ荷重は約 $8.9\text{tf}$ であり、載荷点直下と比較してひびわれ発生が遅いが、これは弾性範囲内では載荷点直下が曲げモーメントの変曲点になることによると考えられる。しかし、降伏荷重に関しては中央部の方が早く、約 $20.8\text{tf}$ ( $204\text{kN}$ )である。

圧縮側の鉄筋については、図示していないが、降伏せず、応力レベルで言えば許容応力度 $\sigma_{ca} = 1600\text{kgf/cm}^2$ ( $157\text{MPa}$ )以内であった。

## ④ コンクリートひずみ

はり中央部の荷重—コンクリートひずみの関係を Fig. 11 に示す。

図に示すとおり、鉄筋の引張降伏後もコンクリートの圧壊は生ぜず、圧縮ひずみは弾性範囲内であった。

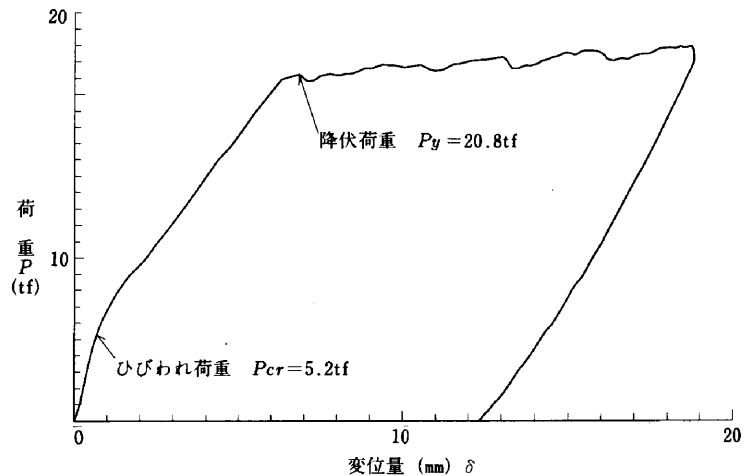


Fig.8 試験体中央部の荷重—変位曲線(D 5)

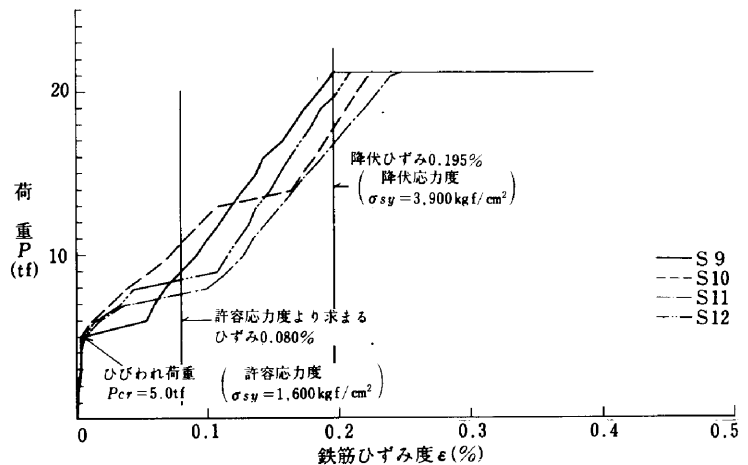


Fig.9 加力点下側における荷重—鉄筋ひずみ曲線 (S 9 ~ S12)

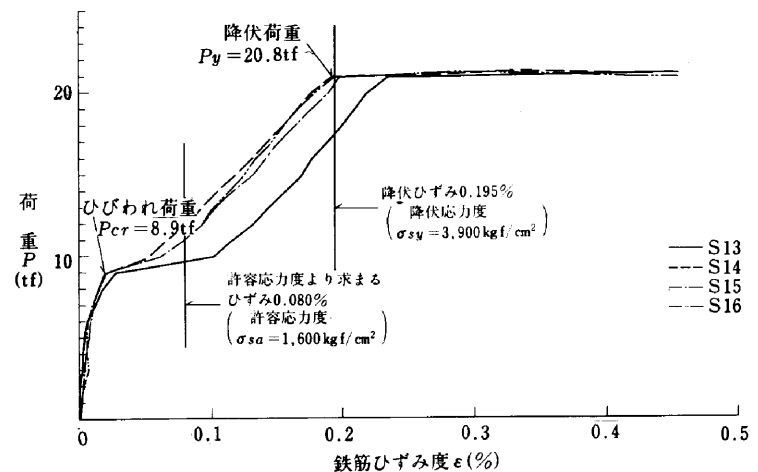


Fig.10 中央部下側における荷重—鉄筋ひずみ曲線 (S13 ~ S16)

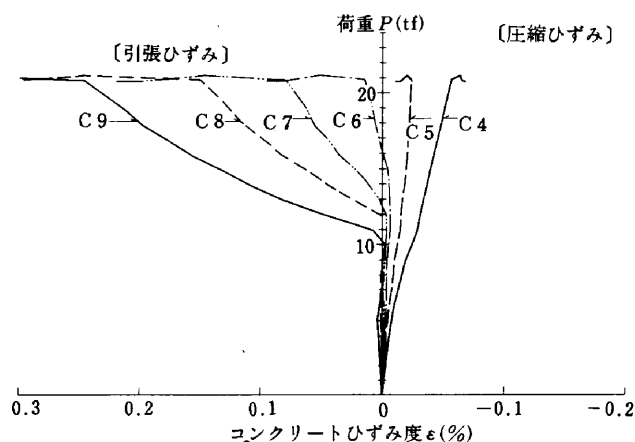


Fig.11 中央部側面における荷重-コンクリートひずみ曲線(C4～C9)

### 3-3 実験値と計算値との比較

はりのひびわれモーメント  $M_{cr}$  は、一般に次式で与えられる。

$$M_{cr} = \sigma_{bt} I_y / y_e \quad (6)$$

$\sigma_{bt}$  : コンクリートの曲げ引張強度

$I_y$  : 全断面有効と考えたときの

ここに、換算断面2次モーメント

$y_e$  : 換算断面図心から引張縁までの距離

『RC構造計算規準・同解説』<sup>6)</sup>に示された曲げ引張強度に関する関係式  $\sigma_{bt} = 1.8 \sqrt{\sigma_c}$  を用いれば、曲げ引張強度は  $27.3 \text{ kgf/cm}^2 (2.67 \text{ MPa})$  となる。

したがって、(6)式から  $M_{cr} = 5.53 \text{ tfm} (54.2 \text{ kNm})$  となる。また、試験体および加力治具の自重による曲げモーメントは、

$$M_d = 0.77 \text{ tfm} (7.5 \text{ kNm})$$

であるので、これより初期ひびわれ荷重は、 $4.76 \text{ t} (46.6 \text{ kN})$  となる。試験結果は、前述の鉄筋ひずみより、約  $5.0 \text{ tf}$  (約  $50 \text{ kN}$ ) であり計算値とはほぼ一致している。

続いて降伏荷重について述べる。

一般に、降伏モーメント  $M$  は、次式で与えられる。

$$M = A_s \sigma_{sy} j_1 d \quad (7)$$

ここに、 $A_s$  : 引張鉄筋断面積

$\sigma_{sy}$  : 引張鉄筋の降伏応力度

$j_1$  : 応力中心距離比

$d$  : 有効高さ

したがって、これに試験体、加力治具の自重によるモ

ーメントを考慮すると、降伏荷重は  $20.4 \text{ tf} (200 \text{ kN})$  となる。実験結果は、 $20.8 \text{ tf} (204 \text{ kN})$  であるので降伏荷重についても計算値とよく一致していると言える。

以上の結果から超速硬セメントを用いた RC スラブの曲げ耐力は十分あると考えられ、初期載荷による影響はない。

ただし、繰り返し荷重や衝撃荷重等の影響については、別途検討を要する。

## §4. 温度試験

従来、コンクリートの水和熱による温度ひびわれは、ダム等のマスコンクリートで問題とされたが、最近では高強度コンクリートの使用などにより、通常の鉄筋コンクリート部材においても問題となっている。超速硬コンクリートではコンクリート打設直後から発熱が他のコンクリートに比べ大きいのでひびわれの可能性もより大きいと考えられる。

コンクリート部材の温度解析に必要なコンクリートの断熱温度上昇特性は断熱温度上昇試験、あるいは実験に基づいた実験式によって示されるが、超速硬セメントコンクリートでは水和熱の発生が極めて早いので従来の試験法ではうまく適合しない場合があり、また、既往の研究も少ない。このために本実験では想定した構造物の寸法を考慮した大型試験体を作成し構造物の温度分布を推定すると共に、その温度履歴の測定結果から逆にコンクリートの断熱温度上昇を求めることにした。

### 4-1 試験体、試験方法、測定

試験体は、Fig. 12 に示すように、 $50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$  (厚さ×幅×長さ)とした。厳密に、試験体中央の垂直温度勾配を、水平方向に無限なスラブと等しくなるようにするためには、水平方向に十分な寸法をとるか、側面に温度調節器を設けるべきであるが、超速硬コンクリートの場合、一般のセメントと異なり温度上昇が極めて急であるので、側方4面の型枠の外周に断熱材(発泡スチロール)を取り付けるだけとした。

計測には熱電対(CC)を使用し、測点数は33点であり測定点配置図はFig. 13に示すとおりである。測定器はデジタル静ひずみ測定器(TDS-301)を使用した。

測定間隔は、打設後 8時間まで 5分間隔  
7日 まで 60分間隔  
とした。

### 4-2 測定結果

試験体中央線上3点の温度履歴曲線をFig. 14に示す。

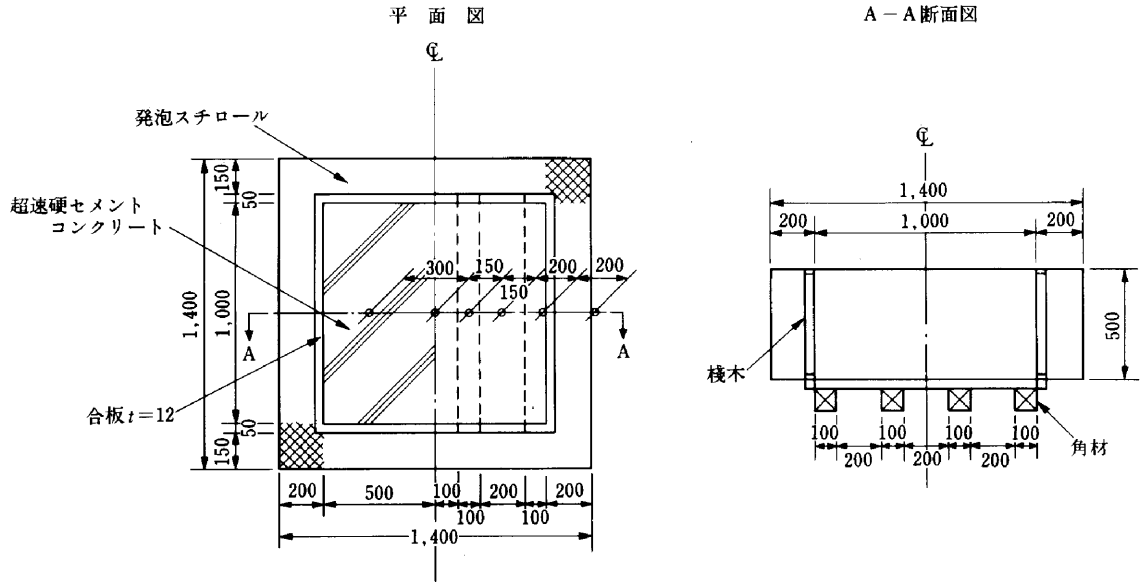


Fig.12 試験体形状寸法図

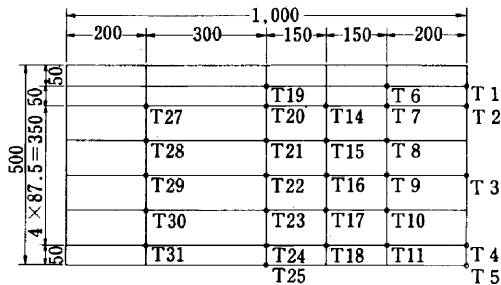


Fig.13 測点位置図

温度のピークは、各点とも打設後約4時間である。また、中心部の温度上昇量は $33^{\circ}\text{C}$ であり、中心と表面から5 cmの点で $6^{\circ}\text{C}$ の差がある。ピーク前後での温度勾配の急変は、発熱が急に小さくなったことを示しており、他のコンクリートではあまり見られない特徴である。

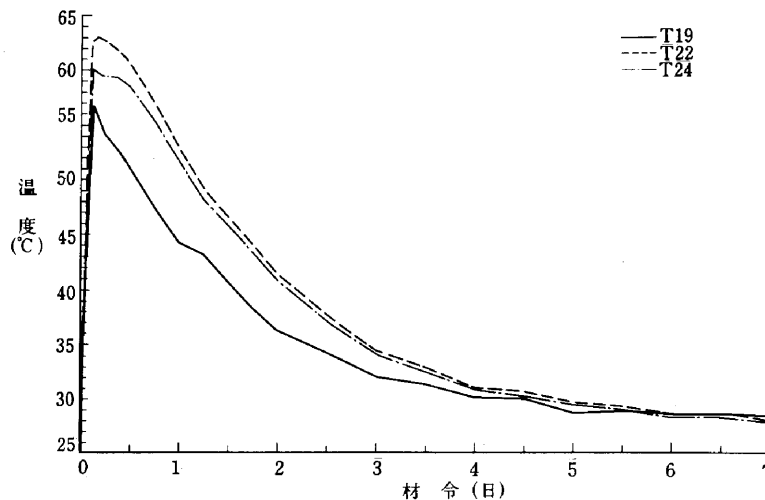


Fig.14 温度履歴曲線

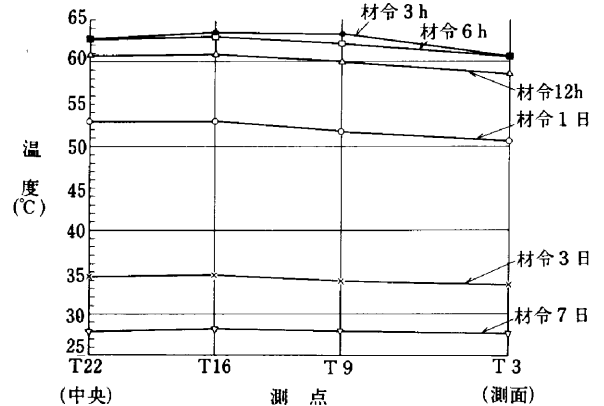


Fig.15 水平温度分布

温度の降下がなめらかでないのは外気温の影響で、中心部でもわずかながらその影響が認められる。

Fig.15に示す水平方向の温度勾配から判断すると、中心部と側面の温度差はほとんどなく中央部の垂直方向の温度勾配は、無限平面スラブとほぼ同様のものが得られていると考えられる。

#### 4-3 解析モデル

温度解析では、一方向によほど長い場合を除いて、3次元問題として考えるべきである。しかし、本実験の結果から一応無限平面を再現していると思われ、解析も1次元問題(厚み方向だけで解析する)として取り扱うこともできるが、断熱材の効果を確認する意味

もあり2次元で解くこととし、Fig.16に示すような解析モデルを決定した。なお、解析に用いた熱定数は以下に示すとおりである。

|         |                 |            |
|---------|-----------------|------------|
| 熱伝導率    | $\lambda = 2.0$ | kcal/mh°C  |
| 比熱      | $C = 0.22$      | kcal/kg    |
| 熱伝達係数   |                 |            |
| 上側表面    | $\alpha = 10$   | kcal/m²h°C |
| 側面(断熱材) | $\alpha = 0.18$ | kcal/m²h°C |
| 下面      | $\alpha = 3.5$  | kcal/m²h°C |

解析は、FEMによる非定常温度解析プログラムを用い、各測定における計算値と実測値の比較を行い、逆に断熱温度上昇曲線式を求めた。

#### 4-4 断熱温度上昇曲線

超速硬セメントコンクリートの断熱温度上昇曲線について現在確立されたものはないが、普通コンクリートに関しては種々の式が提案されている。一般には次のような実験式が多く用いられている<sup>7)</sup>。

$$T = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (8)$$

ここに、 $T$ :ある材令における断熱温度上昇量(°C)

$t$ :材令(日)

$K, \alpha$ :実験定数で、それぞれ断熱温度上昇量、上昇速度と呼ばれる

超速硬セメントコンクリートでは、初期にアルミン酸石灰( $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ )が急速な化学反応をおこすため、アルミン酸石灰の発熱が支配的である時期と、他の成分による発熱が支配的である時期では、その単位時間当たりの発熱量が、大きく変化する。そのために、他のコンクリートの場合と異なり断熱温度上昇曲線を一つの式で表わすことは困難となる。

解析の結果得られた断熱温度上昇曲線式は次に示すとおりである。

$$T = 35.0 \times (1 - e^{-22.5t}) \quad (^\circ\text{C}) \quad (t \leq 0.153\text{日}) \quad (9)$$

$$T = 54.7 \times (1 - e^{-1.2(t+0.652)}) \quad (^\circ\text{C}) \quad (t > 0.153\text{日})$$

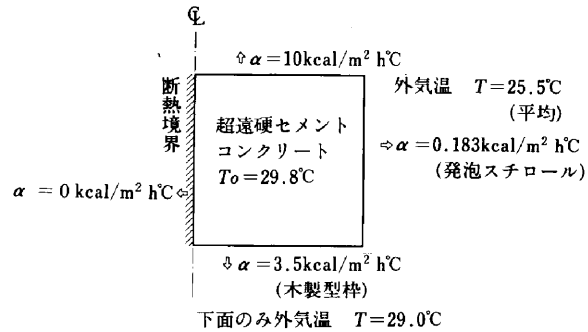


Fig.16 温度解析モデル

Fig.17は、本実験にて求めた超速硬セメントコンクリートの断熱温度上昇と既往の実験例<sup>7)</sup>を参考にして計

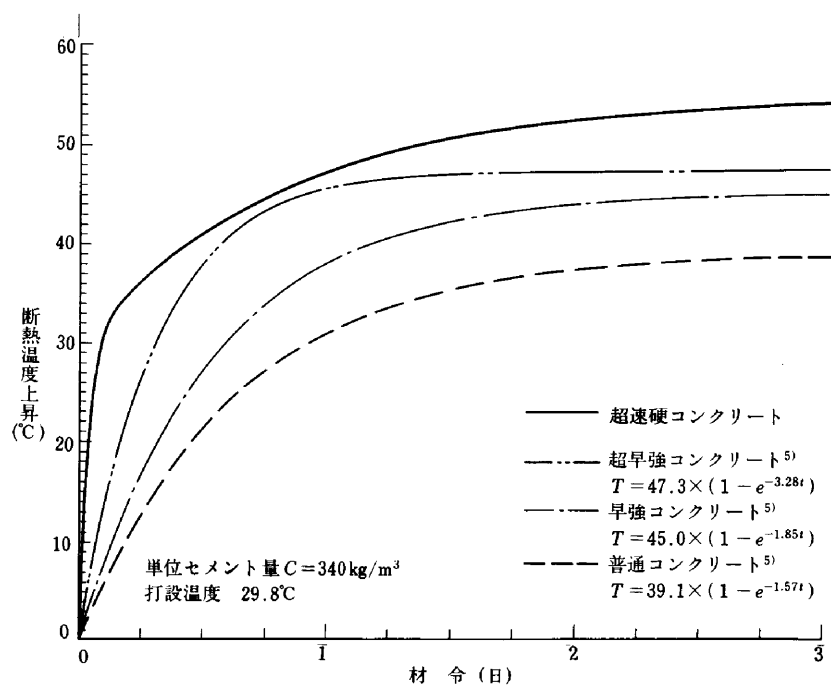


Fig.17 断熱温度上昇曲線

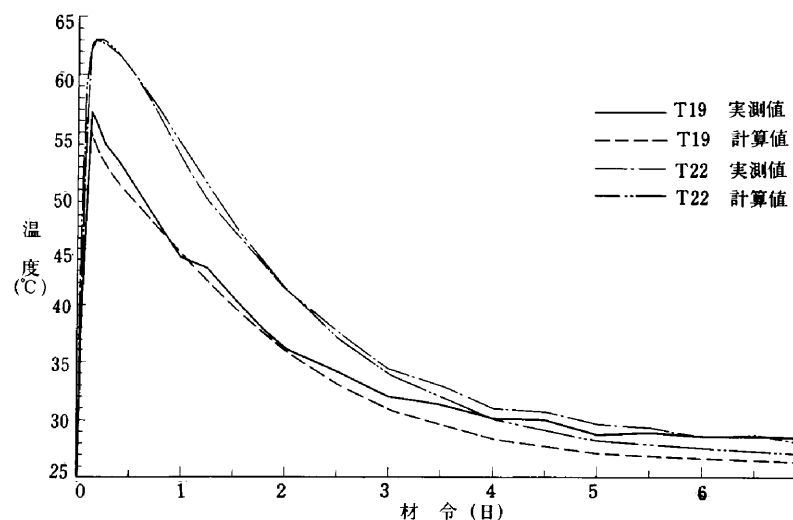


Fig.18 試験体中央における温度履歴比較

算した他のセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇を示したものである。これより、超速硬セメントコンクリートでは他に比較して温度上昇量も大きく、特に初期の温度上昇が大きい。

#### 4-5 計算値と実験値の比較

試験体中心の表面から5 cmの点における、この断熱温度上昇曲線式を用いた計算値と実験値の比較を Fig. 18 に、試験体事央の垂直温度分布を Fig. 19 に示す。

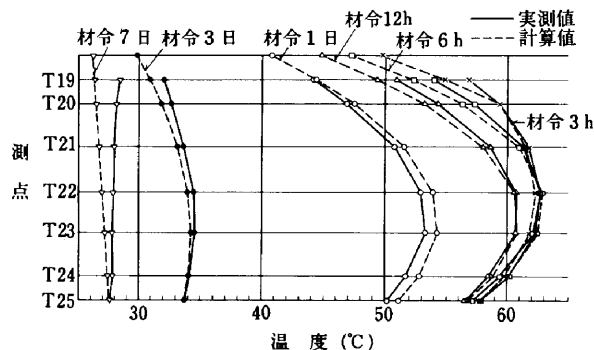


Fig.19 試験体中央における垂直温度分布比較

計算値と実験値は、全体としてよく一致しており、式(9)は超速硬セメントコンクリートの断熱温度上昇曲線としてほぼ満足できるものと考えられる。

このように断熱温度上昇試験によって断熱温度上昇曲線式を得るのが困難な場合、今回のような一種の逆転解析による手法は有効な手段であると考えられる。

## §5. あとがき

超速硬セメントコンクリートは現在 JIS で制定されていないが、今後 JIS 化とともに施工性も含めた改良・研究が進むと考えられ、緊急工事等において、超速硬セメントコンクリートの利用がさらに増加すると考えられる。

この報告は、超速硬セメントコンクリートの曲げ特性および断熱温度特性に関する実験結果を中心に紹介したものであるが、少しでも超速硬セメントコンクリートの発展に寄与できれば幸いである。

最後に、実験および解析に御協力を載いた関係各位に感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 中嶋・吉田「超速硬セメントによる寒中コンクリートの研究」土木学会論文集1984
- 2) 住友セメント(株)「ジェットセメント」カタログ
- 3) 住友セメント(株)「ジェットセメント技術資料集」
- 4) 土木学会「コンクリート標準示方書解説」昭和55年版
- 5) 岡田・六車「コンクリートハンドブック」朝倉書店
- 6) 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」
- 7) 塚山・宮地「各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇」セメント技術年報 XXV, 1971