

# 報告 現場計測に基づく若材令コンクリートの特性

壹岐直之\*1・小山田宇孝\*2・小栗純也\*3

**要旨:** 高炉セメントB種を用いたマッシブなコンクリート構造物において、温度・ひずみ・応力の現場計測を行った。メーカー提示の発熱特性、標準的な物性、風速を考慮した熱伝達率を用いた結果、温度解析結果は実測値と一致した。熱膨張係数は標準的な値と一致した。また、熱膨張係数を一定と仮定して算出した自己収縮ひずみについて、終局値は既往の提案式と一致したが、ひずみの進行速度は速かった。さらに、有効弾性係数を算出し、標準示方書の有効弾性係数推定式中の補正係数を近似した。近似した補正係数は標準示方書に記載された値の1/2程度となった。

**キーワード:** 高炉セメント, マスコンクリート, 水和熱, 自己収縮, 有効弾性係数, 現場計測

## 1. まえがき

コンクリート構造物において、若材令時に発生する水和熱・乾燥収縮・自己収縮等はひびわれの発生原因となるため、発生するひずみ・応力を高い精度で予測する必要がある。温度応力解析について、その手法<sup>1)2)</sup>等はほぼ確立されている。断熱温度上昇曲線は種々の条件に対応する特性が標準値として設定され、有効弾性係数はクリープを考慮した推定式が提案されている。しかし、これらの特性値・推定値を用いた温度応力解析結果が実際の構造物の挙動と必ずしも一致するわけではない。また、自己収縮はひびわれの発生原因として無視できないことが、近年指摘された。自己収縮ひずみの推定式<sup>3)</sup>は提案されているが、その検証は充分であるとはいえない。ひびわれの発生を高い精度で予測するためには、これらの特性値をどのように設定するかが極めて重要であり、さまざまな条件下で計測された特性を蓄積する必要がある。

現在、下田港で製作されている双同型ケーソン<sup>4)</sup>は、ハイブリッド構造を持ち、かつマッシブな構造物である。図-1に示すように、ケーソンは高さ23.5m、幅22.0m、長さ33.5mである。

このケーソンのフーチング部は、断面が大きいことため水和熱による温度上昇は大きくなることが予測され、乾燥収縮および自己収縮の影響が温度変化に加わった場合は、近傍に鋼殻があるため、ひびわれの発生が懸念された。そこで、若材令時の挙動を確認するため、フーチング部で温度・ひずみ・応力の計測を行った。49日の計測期間中ひびわれは発生しなかったが、有益な情報を得た。計測および解析から推定した熱特性・自己収縮ひずみ・有効弾性係数に関して報告する。推定した特性値は、従来一般的に行われている温度応力解析の手法、および既往の研究<sup>3)</sup>で提案されている自己収縮ひずみの推定式に沿った特性値とした。

## 2. 材料、配合、および計測項目

### 2.1 使用材料および配合

セメントは高炉B種を使用し、比重3.04、比表面積3920cm<sup>2</sup>/g、高炉スラグ混入量40~45%

表-1 コンクリートの配合 (24-12-20 BB)

| 水セメント比[%] | 細骨材率[%] | 単位量 [kg/m <sup>3</sup> ] |     |     |     |       |
|-----------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-------|
|           |         | セメント                     | 水   | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤   |
| 53.5      | 50      | 307                      | 164 | 891 | 925 | 0.768 |

\*1 若築建設(株) 土木本部 設計部 設計第4課 (正会員)

\*2 運輸省 第五港湾建設局 清水港港湾工事事務所 次長

\*3 若築建設(株) 名古屋支店 静岡東部工事事務所

である。配合を表-1 に示す。なお、計測を行った部材の型枠はメタルフォームを用い、1996.12.4 に打設、1997.1.19 に脱型した。脱型までは保水マット・散水・シートによる養生を行い、脱型後は皮膜剤を塗布して乾燥を防止した。ケーソン底面にはアスファルトルーフィングを布設したため、底面からの拘束はない。

## 2.2 計測項目および配置

計測断面は図-1 に示すように、フーチングの端部から 3m 内側の断面とした。温度および実ひずみは、熱電対および埋込型ひずみ計を用いて測定した。コンクリートの自由ひずみおよび有効応力は、この断面より 50cm 程度離れた断面の No.7 に対応する位置に無応力ひずみ計および有効応力計を設置して計測した。無応力ひずみ計の向きは鉛直方向とし、これ以外の計

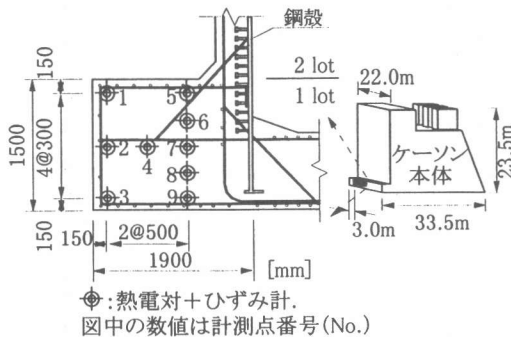


図-1 温度・ひずみの計測位置

器はケーソン法線方向とした。また、以下に示す計測結果において材令の初期値は、コンクリートの安定に伴う計測データの安定、および有効応力の発生から判断して、打設終了から 4 時間後とした。セメントメーカーから提示されたモルタルでの凝結の始発は 3 時間 18 分である。

## 3. 熱特性

### 3.1 温度計測結果

各計測点での温度を図-2 に示す。同図には後述する解析結果も示した。打設温度の平均値は 15.5°C であった。内部の温度は、フーチングの中心部 (No.7) において、材令 2.8 日で最高温度 45.6°C に達した。フーチング下面近傍では、その下に注水したフローティングドック (以下、FD と称す) があるため、温度変化の速度

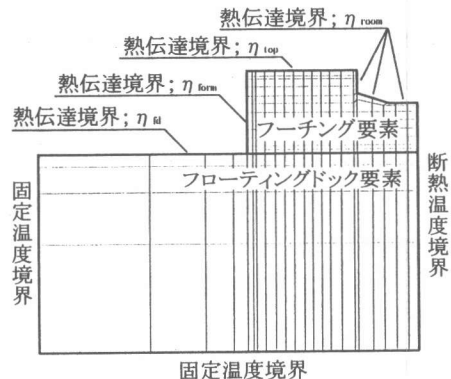


図-3 温度解析モデル

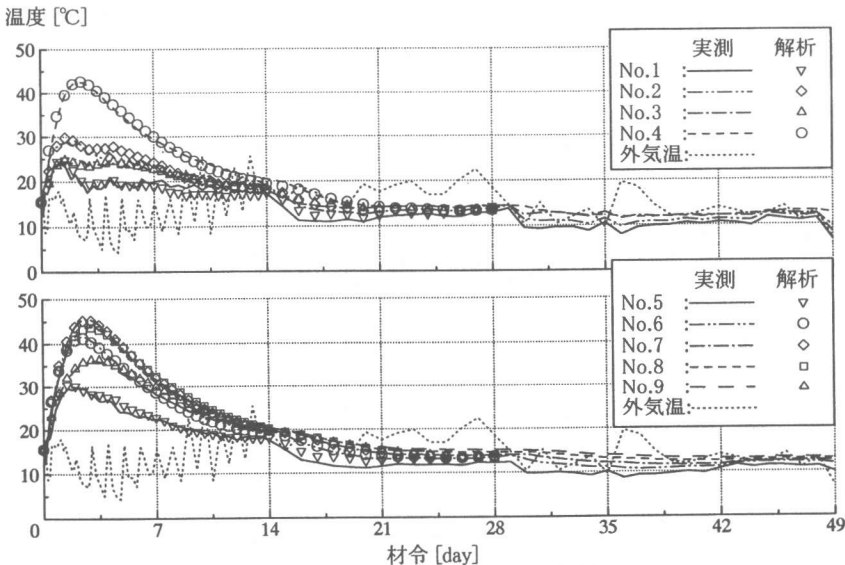


図-2 温度計測結果および解析結果

は他の計測点より遅い傾向がみとめられた。

### 3.2 温度解析条件

温度解析は、有限要素法に基づく非定常熱応力解析プログラムを用いて行った。解析モデルは図-3 に示すように、FD を含んだ断面とし、解析面外への熱の移動はないものとした。固定温度境界での温度は、計測期間中の外気温の平均値  $10.5^{\circ}\text{C}$  とした。

解析に用いた特性値を表-2 に示す。解析に用いた断熱温度上昇式中の定数  $Q_{\infty}$  および  $\gamma$  は、セメントメーカーから提示された値である。熱伝導率は標準的な値を用いた。熱伝達係数は、解析値と実測値の差が最小となることを条件とした試行的繰返解析により推定した。ここで、材令4日目にフーチング部をシートで覆ったことを考慮して、解析において熱伝達係数  $\eta_{\text{top}}$ ・ $\eta_{\text{form}}$  は、材令4日前後で異なる値とした。また、FD の比熱・熱伝導率・熱伝達係数は、FD を均一な材料と仮定して、解析により推定した。外気温は実測値を用いた。

### 3.3 温度解析結果

温度解析結果を図-2 に示す。解析結果は実測値と一致した。推定した熱伝達係数は、養生シートを設置した材令4日前後で大きく異なった。シート設置前の熱伝達係数と標準示方書<sup>1)</sup>の参考値との差は  $20\sim 30\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$  程度であり、熱伝達率の増加量は風速  $1\text{m/s}$  あたり  $2.3\sim 4.6\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$ <sup>1)</sup> であるから、この差は風速  $4\sim 13\text{m/s}$  程度に相当する。これは、施工場所においてコンクリート打設後、風速が  $2\sim 10\text{m/s}$  であったこととほぼ一致した。

## 4. ひずみ特性

### 4.1 実ひずみ計測結果

各計測点の実ひずみを図-4 に示す。ひずみは正の値が膨張である。長期にわたる収縮は認められず、また、養生を充分に行っていることより、乾燥収縮はなかったと考える。

### 4.2 温度ひずみ

温度と自由ひずみの関係を図-5 に示す。温度およびひずみの初期値を  $23.7^{\circ}\text{C}$  および  $0\mu$  と

し、傾きが一定とみなせる材令  $5\sim 49$  日で、温度とひずみの関係を直線近似すると、熱膨張係数は  $\alpha_T=10.86\mu/\text{C}$  となった。これは標準的な値  $10.5\mu/\text{C}$  とほぼ一致した。

表-2 温度解析に用いた値

|  | 4日以前                                  | 4日以降  |
|--|---------------------------------------|-------|
| コンクリートの密度： $\rho$                                      | $\text{kg}/\text{m}^3$                | 2310  |
| 断熱温度上昇式： $Q_{\infty}$                                  | $^{\circ}\text{C}$                    | 46.56 |
| //： $\gamma$   |                                       | 0.544 |
| コンクリートの比熱：<br>$C_c=3.03\times 10^3/\rho$ <sup>1)</sup> | $\text{J}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$ | 1.3   |
| // 熱伝導率： $\lambda_c$                                   | $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ | 2.4   |
| FDの比熱： $C_{\text{FD}}$                                 | $\text{J}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$ | 1.1*  |
| // 熱伝導率： $\lambda_{\text{FD}}$                         | $\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$ | 5.8*  |
| 熱伝達係数(天端)  | $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$       | 29*   |
| // (型枠)： $\eta_{\text{form}}$                          | $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$       | 34*   |
| // (鋼殻内)： $\eta_{\text{room}}$                         | $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$       | 15*   |
| // (FD表面)： $\eta_{\text{FD}}$                          | $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$       | 34*   |

\*：解析により推定した値

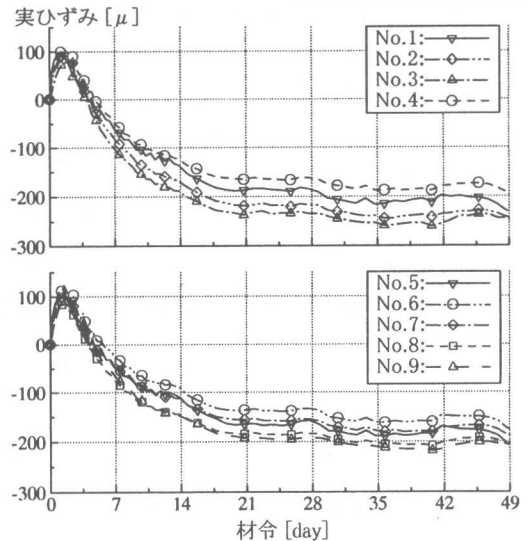


図-4 実ひずみ計測結果

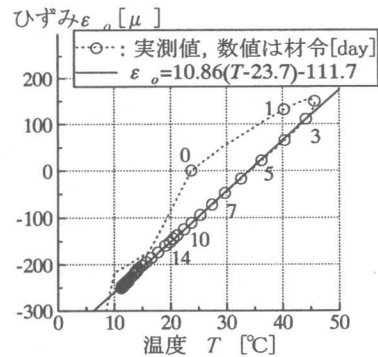


図-5 温度と自由ひずみの関係

### 4.3 自己収縮ひずみ

無応力ひずみ計で計測した自由ひずみと、4.2で推定した熱膨張係数 $\alpha_T=10.86\mu/\text{C}$ で算定される温度ひずみとの差を、自己収縮ひずみと考え、図-6に示す。自己収縮ひずみは材令5日まで増加し、終局値は $111.7\mu$ となった。図-6には、自己収縮研究委員会の提案式(1)<sup>3)</sup>を用いて算定した結果と、標準示方書<sup>9)</sup>に記載される参考値も示した。式(1)による計算には表-3に示す提案値を用いた。計測された終局値は既往の高炉セメントを用いた研究結果<sup>6)7)8)</sup>等とほぼ一致した。しかし、収縮の速度はかなり異なった。提案式を用いた計算結果では材令400日程度で終局値に達するのに対し、実測値は材令4日程度で終局値に達した。この進行速度の差は温度の影響と考える。計測した箇所は最高温度 $45.6\text{C}$ に達しており、式(1)の実証試験<sup>7)</sup>より高温の環境下にある。また、高強度コンクリートでの実験<sup>9)</sup>ではあるが、水和熱による温度履歴を受けると自己収縮ひずみは速く発現し、高炉スラグを混合した場合のこの影響はさらに大きくなるという報告もある。式(1)では温度による補正がされているが、この補正以上に温度がひずみ進行速度に及ぼす影響は大きい可能性がある。

$$\varepsilon_a(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{a0} \cdot \beta(t) \quad (1)$$

ここに、 $\gamma$  : セメント・混和剤の影響係数

$$\varepsilon_{a0} = 3070 \cdot \exp(-7.2 \cdot W/B) : \text{終局値} [\mu]$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t-t_0)^b\} : \text{時間関数}$$

$W/B$  : 水結合材比,  $a, b$  : 定数,

$t$  : 材令 [day],  $t_0$  : 凝結の始発 [day]

$t \cdot t_0$  は次式で温度補正する。

$$t, t_0 = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left\{13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right\}$$

$\Delta t_i$  :  $\text{T}^\circ\text{C}$ である期間 [day],  $T_0 = 1 [\text{C}]$

表-3 自己収縮応力算定式の定数

|          | 提案値  | 近似値  |
|----------|------|------|
| $\gamma$ | 1.3  | 1.71 |
| $a$      | 0.01 | 0.25 |
| $b$      | 1.0  | 1.2  |

### 4.4 有効ひずみ

各計測点での有効ひずみは、各計測点の実ひずみから、 $\alpha_T=10.86\mu/\text{C}$ とした温度ひずみと、近時した定数を用いて式(1)で算定した自己収縮ひずみを、差し引いた値とした。各計測点での有効ひずみを図-7に示す。

## 5. 強度および有効弾性係数

### 5.1 強度

圧縮強度および割裂引張強度の標準試験結果および計算値を図-8に示す。計算は式(2),(3)<sup>1)</sup>を用い、91日圧縮強度は28日圧縮強度が標準試験結果の $31\text{N}/\text{mm}^2$ となるように逆算した。計算による圧縮強度は試験結果と一致した。引

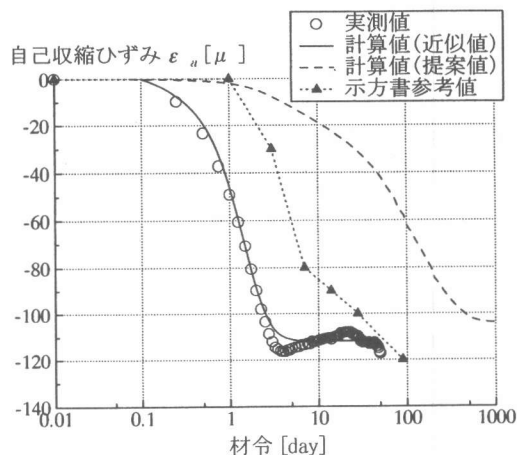


図-6 自己収縮ひずみ

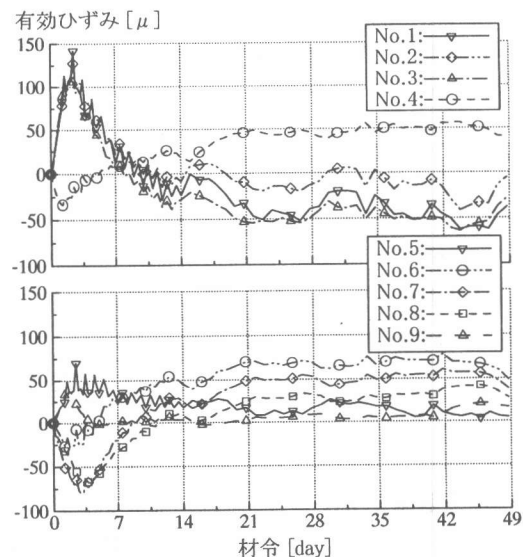


図-7 有効ひずみ

張強度の計算値は、温度応力解析等で用いる値は試験による強度より2割程度低減すること<sup>1)</sup>を考慮すると、妥当な結果であろう。

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+b \cdot t} \cdot f_c'(91) \quad (2)$$

$$f_t(t) = c \cdot \sqrt{f_c'(t)} \quad (3)$$

ここに、 $f_c'(t)$  : 材令  $t$  日の圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_t(t)$  : 材令  $t$  日の引張強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$a, b$  : 高炉セメントでは  $a=6.2$   $b=0.93$

$c$  : =0.35

### 5.2 有効弾性係数

有効弾性係数を図-9に示す。有効弾性係数の実測値は、各材令における有効応力計による計測値の最大値と最小値の差と、No.7での有効ひずみの最大値と最小値の差との比とした。式(4)<sup>1)</sup>を用い、材令3日までを $\Phi(t)=0.73$ 、材令5日以降を $\Phi(t)=1.00$ として算定した有効弾性係数は、実測値とは一致しなかった。

有効弾性係数の実測値から、式(4)での補正係数を材令に伴う変化はないとして近似すると $\Phi(t)=0.503$ となった。この値を用いて算定した有効弾性係数を図-9に実線で示す。材令10日程度までは実測値よりも小さめに見積もっているが、これ以降では実測値とほぼ一致した。

$$E_e(t) = \Phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f_c'(t)} \quad (4)$$

ここに、 $E_e(t)$  : 有効弾性係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$\Phi(t)$  : 補正係数

### 5.3 有効応力

各計測点での有効応力と、有効応力計での実測値を図-10に示す。各計測点での有効応力は、有効ひずみの各日の増分に、式(4)で $\Phi(t)=0.503$ として算定した有効弾性係数を乗じて、有効応力の各日の増分を算出し、この有効応力の増分を累計して求めた。図中の引張強度は式(3)で算定した値である。経時変化は内部拘束に起因する温度応力の傾向を示した。ひびわれ指数は、材令2.5日にNo.1で最小となり、このとき有効応力は0.74N/mm<sup>2</sup>、引張強度は1.14N/mm<sup>2</sup>、

ひびわれ指数は1.54であった。

No.7の応力は、これに対応する位置において有効応力計で計測した実測値よりも、大きかった。これは、材令を経るほどその差が大き

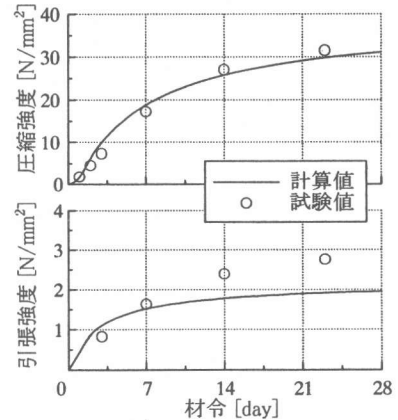


図-8 圧縮強度および引張強度

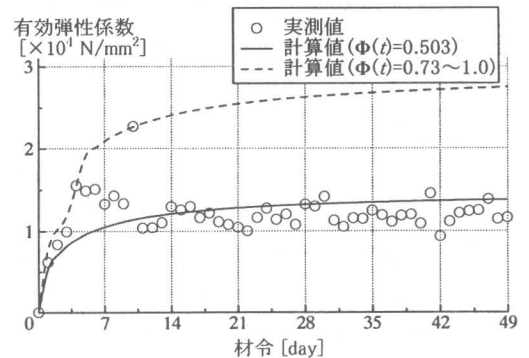


図-9 有効弾性係数

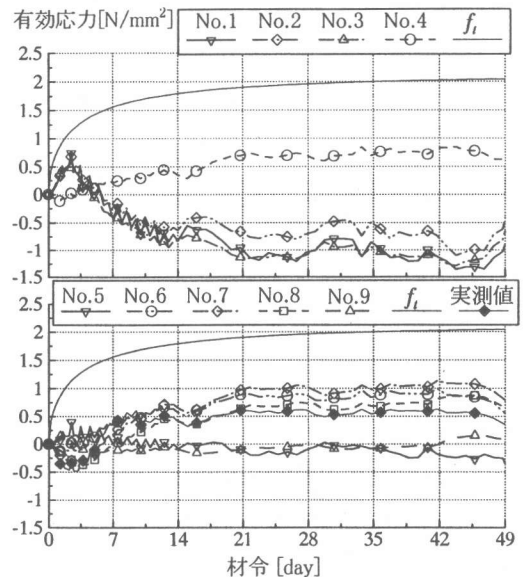


図-10 有効応力

なることから、算定においてクリープを考慮していないことが原因と考える。

## 6. まとめ

高炉セメントB種を用いたマッシブな構造物において、温度・ひずみ・応力の現場計測を行った。計測結果から若材令時における特性を分析した結果、以下に示す結論を得た。

- ① 水和熱による温度上昇について、表-2 に示した特性値を用いた解析結果は実測値と一致した。熱伝達率は逆解析により推定した。その結果、熱伝達率は、防風用のシートで覆うことにより、その前後で大きく異なった。シート設置前の熱伝達率は  $30\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$  程度となり、これは標準的な熱伝達率に風速  $6\text{m/s}$  に相当する熱伝達率の増加分を加えた値と、ほぼ一致した。また、シート設置後の熱伝達率は標準的な値に近い値となった。
- ② 熱膨張係数は、その値がほぼ一定とみなせる材令 5～49 日において近似した結果、 $10.86\ \mu/\text{C}$  となった。この値は標準的な値とほぼ同じであった。
- ③ 自己収縮ひずみは、熱膨張係数を一定と仮定して算出した結果、終局値は  $111.7\ \mu$  となり、自己収縮研究委員会の提案式を用いた計算値とほぼ一致した。しかし、ひずみの進行速度は速く、計算値では 400 日で終局値に達するのに対して、4 日で終局値に達した。提案式中の定数を近似した結果を、表-3 に示した。
- ④ 有効弾性係数は、ひずみと応力の各材令における変化量から算出した。算出した有効弾性係数は、標準示方書の推定式を用いた計算値のほぼ  $1/2$  となった。推定式中の補正係数を近似すると、 $0.503$  となった。

## 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [平成 8 年制定] 施工編, 土木学会, 1996.3
- 2) マスコンクリートのひびわれ制御指針, 日本コンクリート工学協会, 1986.3

- 3) 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1996.11
- 4) 小山田宇孝, 佐藤清, 高橋佳克: 消波ブロック内蔵双同型ケーソンの製作, コンクリート工学, Vol.36, No.2, pp.38～41, 1998.2
- 5) コンクリート標準示方書 [平成 8 年制定] 設計編, 土木学会, 1996.3
- 6) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, 土木学会, No.571/V-36, pp.211～219, 1997.8
- 7) 宮澤伸吾, 松村仁夫: 低発熱セメントを用いたコンクリートの収縮, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.19, No.1, pp.739～744, 1997.6
- 8) 久保証則, 青木茂, 新村亮, 原田暁: 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.19, No.1, pp.763～768, 1997.6
- 9) 竹田宣典, 松永篤, 米田俊一, 十河茂幸: 水和熱による温度履歴が高強度コンクリートの自己収縮応力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol.19, No.1, pp.1417～1422, 1997.6
- 10) 最新のマスコンクリート技術, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.14, 1996.11
- 11) 清水昭之: コンクリートの引張クリープ, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, Vol.21, No.6, pp.4～13, 1983
- 12) マスコンクリート技術の現状と動向, 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.8, 1994.10
- 13) 清宮理, 野口孝俊: コンクリート部材の温度ひびわれ発生の簡易予測法の適用例, 港湾技研資料, No.664, 1990.5