

# コンクリート構造物の温度ひびわれ危険度評価に関する研究

## STUDY ON THE ESTIMATION OF THERMAL CRACKING IN CONCRETE STRUCTURES

森本博昭\*・小柳 洽\*\*

By Hiroaki MORIMOTO and Wataru KOYANAGI

In order to estimate the possibility of thermal cracking of concrete structures, various thermal crack evaluation indices have been proposed. These indices are calculated from the results of thermal stress analysis. However, these indices include a certain amount of error and the crack evaluation contains a certain extent of uncertainty, because the calculation of stress analysis has a certain inevitable error and, in addition, cracking has a probabilistic nature. In this study, thermal stress analysis was made for 43 cases of mass concrete structures with and without thermal cracking by finite element method. Effectiveness of the crack indices in evaluating the thermal crack occurrence was fully examined. Three crack indices were adopted, which were defined by stress-strength ratio, strain-strain capacity ratio and thermal crack index proposed by JSCE.

*Keywords*: mass concrete, thermal cracking, thermal crack index, thermal stress

### 1. 概 説

コンクリート構造物の温度ひびわれを防止するためには、あらかじめ対象とする構造物について、種々の施工条件を想定した温度応力解析を実施し、これらの結果をもとにおのおの施工条件に対する温度ひびわれの危険性を評価することが必要になる。コンクリート構造物の温度応力解析については、現在有限要素法などの数値解法を始めとして、各種簡易解法<sup>1)</sup>に至るまで数多くの計算手法が用いられており、また最近では三次元的な解析も可能な JCI 温度応力委員会法 (Compensation Plane 法)<sup>2)</sup>も提案されている。しかし、このような各種解析手法の中で最も適用範囲の広い一般的な温度応力手法は有限要素法などの数値解法であり、最近のコンピュータ技術の進歩により、パーソナルコンピュータでも実構造物の温度応力解析にこれらの手法<sup>3)</sup>を適用することが可能となりつつある。

以上のような解析手法の進歩、普及により、温度応力解析に関しては細部においていくつかの重要な問題点が残されてはいるものの、今やほとんどの構造物に対して

一応の温度応力解析が可能な状態にまで達しているといつて過言ではない。

一方、温度ひびわれの危険度評価については温度応力解析から得られた応力あるいはひずみと、コンクリートの引張強度あるいはひずみ能力とを対比させて、その危険度を判定するのが一般的であり、特に温度応力が引張強度を上回ったときに温度ひびわれが発生するとした確定論的な判断をすることが多い。しかし、温度応力解析から得られる応力ならびにひずみと、それに対するコンクリートの引張強度およびひずみ能力のいずれもが、種々の要因により避けがたい誤差とばらつきを有する量であり、したがって、これらをもとにしたひびわれ危険度の評価も確率論的に、もしくはある誤差の範囲を念頭において議論されなければならない。このような立場から、小野氏ら<sup>4)</sup>は構造物の温度上昇特性、拘束度、コンクリートの強度、ならびに弾性係数など、温度ひびわれに影響を及ぼす諸要因の影響を考慮した温度ひびわれ指数を定義し、多数の実測結果をもとに温度ひびわれ指数と温度ひびわれ発生確率との関係を報告している。また森永氏<sup>5)</sup>らは、構造物中の温度分布にかかわる係数 (温度分布係数) なる概念を導入し、これと温度ひびわれ発生確率との関係を示している。これらの手法はいずれも、温度応力解析を行うことなく構造物中の温度分布をもと

\* 正会員 工修 岐阜大学助教授 工業短期大学部  
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

\*\* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部 (同上)

に温度ひびわれの危険性を簡便に推定できる点で実用的意義は大きいと考えられるが、一方では、直接温度応力と引張強度の比較を行わないため、ひびわれ発生位置とその時期、あるいはひびわれに及ぼす各種要因の影響を詳細に検討する目的に対しては十分とはいえない面がある。また、吉岡氏<sup>6)</sup>らは、単純拘束モデルを用いた温度応力解析手法により、引張強度と温度応力との比（ひびわれ安全度）を算出し、これとひびわれ発生確率との関係を求めている。この手法は温度応力の値を算出してひびわれ安全度を評価するという点では、より一般的な手法と考えられるが、温度応力解析手法の特殊性から、適用範囲に制限がある。

著者らは、まえに43例のコンクリート構造物を対象とし、有限要素法による温度解析ならびに温度応力解析を実施した。そして、得られた結果をもとに応力と強度の比によるひびわれ危険指数を算出し、ひびわれ発生有と無のおのおのにおける指数の分布の範囲を明らかにしている<sup>7)</sup>。本研究は、先に得られた研究成果をさらに発展させ、ひびわれ危険度に関する指数として、応力と強度による指数に加えて、著者らが提案した<sup>8)</sup>ひずみとひずみ能力による指数、ならびに昭和61年度版土木学会コンクリート標準示方書で提案された温度ひびわれ指数<sup>9)</sup>を取り上げ、43例のコンクリート構造物に対する解析結果をもとに、これら各種指数の分布の範囲ならびに適用性を総合的に検討したもので、今後温度ひびわれ予測を行う際の有用な資料となるものと考えられる。

2. 温度ひびわれ予測手法

(1) 本研究における手法

本研究で用いた温度ひびわれ予測手法は、温度解析、温度応力解析、および温度ひびわれ危険指数の算出の各過程よりなるが、以下においてそれぞれの段階における解析方法の概要、特に解析で用いた諸定数の決定等について述べる。なお、温度解析と温度応力解析の有限要素法による定式化については関連の参考書<sup>10)</sup>にゆずり、ここでは説明を省略する。

a) 温度解析

コンクリートの発熱率は、既往の研究成果<sup>11),12)</sup>を参考にして求めた断熱温度上昇特性を用いた。コンクリートの熱伝導率、比熱は著者らの研究<sup>13)</sup>をもとに、それぞれ平均的な値を用いた。熱伝導率はコンクリート面では11.6 W/m<sup>2</sup>C、合板型枠面では5.8 W/m<sup>2</sup>C、鋼製型枠面では13.9 W/m<sup>2</sup>Cとし、その他の場合は材質および厚さを考慮して決定した<sup>14),15)</sup>。

b) 温度応力解析

温度応力解析を行う際に必要となるコンクリートの材料定数のうち、強度、弾性係数およびクリープなどはす

べて、マチュリティを考慮した有効材令の関数として評価した。すなわち、強度、弾性係数などは岡田博士<sup>16)</sup>らの研究を参考にして導いた評価式<sup>17)</sup>を用い、クリープひずみについてはCEB-FIPモデルコード(1978)<sup>18),19)</sup>における提案式を用いて算出した。クリープ解析では初期ひずみ法を適用し、各時間刻みにおけるクリープひずみの増分は履歴理論<sup>20)</sup>を用い次式により算定した。

$$\Delta|\epsilon| = [D_0] \int_0^t \frac{\partial}{\partial t'} C(t, t') \frac{\partial |\sigma|}{\partial t'} dt' \dots\dots\dots (1)$$

$$\{\epsilon\}^T = [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}] \dots\dots\dots (2)$$

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}] \dots\dots\dots (3)$$

$$[D_0] = \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここで

- |\epsilon\_0| : クリープひずみベクトル
- \{\sigma\} : 応力ベクトル
- [D\_0] : 応力~クリープひずみマトリックス

C(t, t') : クリープ関数

\nu : クリープポアソン比

t, t' : 材令ならびに載荷材令

上式において、クリープポアソン比は弾性ポアソン比に等しいものと仮定した。さらに、コンクリートの熱膨張率 \alpha については、すべての解析ケースにおいて、\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ C (一定) とした。

c) 温度ひびわれ危険度評価

温度ひびわれの発生規準として、本研究では従来から一般的に用いられている応力とコンクリートの引張強度に着目するもの<sup>21)</sup>に加えて、ひずみと引張ひずみ能力<sup>22),23)</sup> (Tensile strain capacity) に着目するものもあわせて検討した。いま、着目する部分の材令 t における引張主応力および引張主ひずみを \sigma\_p(t), \epsilon\_p(t) とし、一方、コンクリートの引張強度および引張ひずみ能力をそれぞれ \sigma\_{cap}(t), \epsilon\_{cap}(t) としたとき、著者らは温度ひびわれの危険度を表わすものとして、次のようなひびわれ危険指数を提案<sup>7),8)</sup>した。

$$\text{応力と強度による危険指数 } (I_1) = \frac{\sigma_p(t)}{\sigma_{cap}(t)} \dots\dots\dots (5)$$

および

$$\text{ひずみとひずみ能力による危険指数 } (I_2) = \frac{\epsilon_p(t)}{\epsilon_{cap}(t)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

I\_1 : 応力と強度による危険指数

$I_2$  : ひずみとひずみ能力による危険指数

これらのうち、式(2)により指数を算出する場合、コンクリートの引張ひずみ能力  $\epsilon_{cap}(t)$  を評価することが必要であるが、本研究では引張ひずみ能力評価式として、次に示す2つの式を用いた<sup>8)</sup>。本算定式は、材令の進行に伴うコンクリートの弾性係数、クリープ係数、ならびに強度の変化を考慮できるよう、著者らが Houghton 氏らの算定式<sup>22)</sup>に修正を加えて得られたものである。

$$\epsilon_{cap1}(t) = \frac{\sigma_b(\tau)}{E(\tau)} + \sum_{i=1}^t \frac{\Delta\sigma_b(i)}{E_{28}} \cdot \psi(\tau, \tau_i) \dots\dots\dots(7)$$

$$\epsilon_{cap2}(t) = \frac{\sigma_t(\tau)}{E(\tau)} + \sum_{i=1}^t \frac{\Delta\sigma_t(i)}{E_{28}} \cdot \psi(\tau, \tau_i) \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

$\tau$  : 材令  $t$  における有効材令

$E(\tau)$  : 材令  $t$  における弾性係数

$\sigma_b(\tau), \sigma_t(\tau)$  : 材令  $t$  における引張強度と曲げ強度

$\Delta\sigma_b(i), \Delta\sigma_t(i)$  :  $i$  ステップにおける強度の増分

$\psi(\tau, \tau_i)$  : CEB-FIP コードによる載荷時有効材令  $\tau$  の有効材令  $\tau$  におけるクリープ係数

$\epsilon_{cap1}$  : 引張強度をもとにした引張ひずみ能力

$\epsilon_{cap2}$  : 曲げ強度をもとにした引張ひずみ能力

式(7), (8)の右辺第1項は弾性ひずみ能力を、また第2項はクリープひずみ能力を表わしている。式(7), (8)を式(6)に適用すると2つのひびわれ危険指数が得られるが、本研究では式(7)の  $\epsilon_{cap1}$  を用いた場合のひびわれ危険指数を  $I_{2A}$  とし、

$$I_{2A} = \frac{\epsilon_p(t)}{\epsilon_{cap1}(t)} = 1 \dots\dots\dots(9)$$

をひびわれ発生線(以下、これを A Line と称する)とし、一方式(8)の  $\epsilon_{cap2}$  を用いた場合を  $I_{2B}$  とし、

$$I_{2B} = \frac{\epsilon_p(t)}{\epsilon_{cap2}(t)} = 1 \dots\dots\dots(10)$$

をひびわれ発生限界線(以下、これを B Line と称する)と定義し、指数  $I_{2A}$  が A Line を越える領域をひびわれ発生域、指数  $I_{2A}$  が A Line 以下でかつ指数  $I_{2B}$  が B Line 以上の領域をひびわれ危険域そして指数  $I_{2B}$  が B Line 以下の領域を安全域と考えてひびわれの判定を行った。一方、応力と強度による指数  $I_1$  を用いる場合は  $I_1 \geq 1$  をひびわれ発生域、そして  $I_1 < 1$  を安全域と考えた。

(2) 土木学会コンクリート標準示方書(昭和61年度版)の方法<sup>7)</sup>

昭和61年度版土木学会コンクリート標準示方書では次式により温度ひびわれ危険指数を定義し、既往の研究成果による温度ひびわれ指数とひびわれ発生確率との関係を参考にして、構造物の重要度、機能、環境条件に応じて指数の値を適切な範囲内におさめるよう推奨してい

る。

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{f_t}{\sigma_T} \dots\dots\dots(11)$$

ただし、

$\sigma_T$  : 水和熱に起因して生じた部材内での最大温度応力

$f_t$  :  $\sigma_T$  を算定した時点におけるコンクリートの引張強度で材令および養生温度を考慮して求める

また、温度ひびわれ指数は簡易的に次のように温度から求めてもよいとしている。

すなわち、

内部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{15}{\Delta T_i} \dots\dots\dots(12)$$

外部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{10}{R \cdot \Delta T_0} \dots\dots\dots(13)$$

ただし、

$\Delta T_i$  : 最高温度時の内外の温度差(°C)

$\Delta T_0$  : 部材平均最高温度と外気温平衡時温度との差(°C)

$R$  : 外部拘束度であり、比較的柔らかい岩盤の場合には0.5、硬い岩盤の場合には0.8を用いる。

既設のコンクリート上に打設する場合、一般には0.6としてよい。

一方、温度ひびわれ発生に対する指数の標準的な値として次のようなものを与えている。

ひびわれを防止したい場合	1.5以上
ひびわれの発生は許すが幅および数を制限したい場合	1.2~1.4
その他	0.7~1.1

ここで、式(11)で表わされる温度ひびわれ指数は、本研究で定義したひびわれ危険指数  $I_1$  の逆数となっており、両者は本質的には同じものと考えられる。本研究では、ひびわれ危険指数を温度ひびわれ指数に換算することにより、温度ひびわれ指数の値と温度ひびわれ発生の対応を検討した。さらに、温度解析結果を用い、式(12), (13)により簡略的にひびわれ指数を算出した場合についても同様の検討を行った。

3. 解析構造物

コンクリート構造物における温度応力は、その発生機構により内部拘束が卓越する場合と外部拘束が卓越する場合の2ケースに大別されるが、本研究で解析を行った構造物は柱、フーチング、はりなどの内部拘束が卓越するもの17例と外部拘束が卓越する壁、スラブなどが26例の合計43例となっている。これらの構造物に関する施工あるいは実験データは、著者らが実施した現場測定

実験データ<sup>24),25)</sup>(未発表資料を含む),著者らが入手した2つの現場における計測データ<sup>26),27)</sup>,小野氏らの現場測定実験データ<sup>28)</sup>,Hansen氏の実物大模型実験データ<sup>29)</sup>,辻氏らの実物大模型実験データ<sup>30)</sup>,崎本氏らの現場測定実験データ<sup>31)</sup>,栗本氏らの現場測定実験データ<sup>32)</sup>,および横山氏の現場測定実験データ<sup>33)</sup>から成っており,Hansen氏によるデータ(9件)を除けば,わが国においては一般的なマッシブなコンクリート構造物を対象としたものである.各構造物の寸法,コンクリートの配合と力学的性質,ひびわれの有無ならびにその他の施工条件などをまとめて表-1に示す.

#### 4. 解析結果と考察

##### (1) コンクリートの温度上昇

各構造物に対する温度解析結果のうち,コンクリート打設後の中心最大温度と中心と表面の最大温度差,なら

びに外部拘束が卓越する構造物における部材の平均温度降下量をまとめて表-2に示す.なお,部材の平均温度降下量は部材平均最大温度から外気温平衡温度を差し引くことにより算出したものである.

さて,前述のように温度応力は内部拘束に起因するものと外部拘束に起因するものに大別されるが,前者においては中心と表面の温度差が主な要因であり,一方,後者においては構造物の平均温度降下量が大きな影響を及ぼす.そこで,内部拘束が卓越する構造物(No.1~No.17)において,ひびわれが発生したもの(以下,ひびわれ有とよぶ)と発生しなかったもの(以下,ひびわれ無とよぶ)とにおける中心と表面の最大温度差を比較すると,ひびわれ有の平均は41.6°Cであり,一方ひびわれ無の平均は28.0°Cとなっており,ひびわれ有が無の約1.5倍の値を示している.同様に,外部拘束が卓越する構造物(No.18~No.43)において,平均温度降下

表-1 各構造物の施工データ

NO	拘束の種類	部材厚(D) m	長辺長(L) m	短辺長(H) m	コンクリートの種類	単位重量 kg/m <sup>3</sup>	圧縮強度 MPa	引張強度 MPa	弾性係数 GPa	打設温度 °C	施工時期	脱型材令 日	型枠の種類	ひびわれの有無 K	拘束体の種類	拘束体の弾性係数 GPa	断熱温度上昇 K	上昇速度 α	拘束体の高さ m
1	内	—	1.55	1.55	普通	276	23.7	2.03	25.0	11.0	冬	6	合板	無	—	—	38.2	0.0288	—
2	内	—	1.55	1.55	普通	276	23.7	2.03	25.0	29.0	夏	6	合板	無	—	—	36.0	0.0782	—
3	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	6	鋼	無	—	—	45.0	0.1107	—
4	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	6	合板	有	—	—	45.0	0.1107	—
5	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	1	シート	有	—	—	45.0	0.1107	—
6	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	1.5	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
7	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	8	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
8	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	28	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
9	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
10	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
11	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	20	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
12	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
13	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
14	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	11	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
15	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	23.7	2.03	24.7	11.0	冬	4	合板	有	—	—	38.6	0.0294	3.0
16	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	23.7	2.03	24.7	29.0	夏	6	合板	無	—	—	36.3	0.0794	3.0
17	内	3.6	7.2	6.08	普通	276	25.3	2.06	24.8	13.0	冬	5	合板	無	—	—	37.8	0.0351	6.0
18	外	1.35	10.0	5.6	普通	270	23.7	2.03	25.2	18.0	冬	10	合板	有	ｽﾌﾟ	24.7	36.4	0.0496	3.5
19	外	1.3	13.0	3.5	普通	285	23.5	2.06	25.0	20.0	秋	4	合板	有	ｽﾌﾟ	25.0	37.4	0.0587	1.7
20	外	1.3	13.0	3.4	普通	285	23.5	2.06	25.0	20.0	秋	4	合板	有	壁	25.0	37.4	0.0587	5.2
21	外	0.3	8.0	2.0	普通	300	32.9	2.80	31.5	30.0	夏	3	合板	無	ｽﾌﾟ	31.5	38.2	0.0797	2.0
22	外	1.0	8.0	2.0	普通	300	32.9	2.80	31.5	30.0	夏	3	合板	無	ｽﾌﾟ	31.5	38.2	0.0797	2.0
23	外	0.8	20.0	3.6	普通	371	29.9	2.45	28.1	25.0	夏	9	合板	有	ｽﾌﾟ	28.1	44.7	0.0914	1.0
24	外	1.4	20.0	4.9	普通	366	34.1	2.74	30.4	27.0	夏	9	合板	有	ｽﾌﾟ	30.4	44.0	0.0967	1.0
25	外	0.8	9.8	3.1	普通	284	20.3	1.88	20.4	25.0	夏	9	合板	有	ｽﾌﾟ	20.4	36.9	0.0707	1.0
26	外	0.65	8.0	2.7	普通	403	38.2	3.25	29.7	21.0	冬	6	合板	有	ｽﾌﾟ	29.7	48.0	0.0847	0.6
27	外	0.4	27.3	2.8	普通	294	28.2	2.13	24.3	25.0	夏	5	合板	無	壁	24.3	37.8	0.0731	11.9
28	外	1.6	18.8	4.2	高B	299	23.8	1.98	31.4	27.0	秋	10	鋼	有	ｽﾌﾟ	32.7	38.3	0.7900	1.7
29	外	1.3	27.0	3.4	高B	299	23.8	1.98	29.0	23.0	秋	10	鋼	無	ｽﾌﾟ	32.6	39.5	0.6100	7.0
30	外	0.9	25.0	1.5	普通	306	29.0	2.31	31.5	12.0	冬	6	鋼	有	壁	32.3	41.8	0.6120	1.55
31	外	0.9	25.0	2.4	普通	306	29.0	2.31	31.5	23.5	春	6	鋼	有	壁	33.1	40.2	1.0860	3.05
32	外	0.9	25.0	1.8	普通	306	29.0	2.31	31.5	30.0	夏	6	鋼	有	壁	32.7	39.0	1.5450	9.6
33	外	0.7	25.0	3.1	普通	306	29.0	2.31	31.5	22.0	秋	6	鋼	有	壁	32.8	40.4	1.0160	10.7
34	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	30.5	2.41	32.1	27.0	春	5	鋼	有	壁	33.3	39.7	1.2500	1.75
35	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	30.6	2.41	32.1	25.5	夏	5	鋼	有	壁	33.3	40.0	1.1810	7.95
36	外	1.1	25.0	3.9	普通	306	29.1	2.32	31.6	29.0	夏	5	鋼	有	壁	32.5	39.5	1.3430	7.95
37	外	1.0	25.0	3.9	普通	306	30.1	2.39	31.9	27.8	春	5	鋼	有	壁	32.9	39.6	1.2970	1.75
38	外	2.2	28.5	2.5	中痛	256	24.4	2.02	29.6	28.1	夏	4	合板	有	壁	31.3	37.9	2.3470	5.0
39	外	2.0	28.5	2.5	中痛	256	24.4	2.02	29.6	22.1	秋	4	合板	有	壁	30.9	37.2	1.8380	7.5
40	外	1.8	28.5	2.5	中痛	256	24.4	2.02	29.6	22.6	秋	4	合板	有	壁	30.9	37.3	1.8810	10.0
41	外	1.7	8.1	3.1	高A	266	21.8	1.84	28.0	14.0	春	3	鋼	有	ｽﾌﾟ	28.9	31.2	0.4630	3.2
42	外	1.7	8.1	3.1	高A	266	21.8	1.84	28.0	14.0	春	5	鋼	無	壁	29.1	31.2	0.4630	6.25
43	外	1.7	8.1	3.9	高A	279	21.8	1.84	28.0	23.5	夏	23	鋼	無	壁	29.6	33.4	0.8310	9.3

量に注目すると、ひびわれ有では平均 28.2°C、一方ひびわれ無では平均 19.9°C となっており、ひびわれ有がひびわれ無の約 1.4 倍の値を示している。図-1 は内部拘束が卓越する構造物について、ひびわれ有と無の場合における中心と表面の最大温度差の分布を、また図-2 は外部拘束が卓越する構造物について、ひびわれ有と無における平均温度降下量の分布をそれぞれ示したものであるが、図-1 から、内部拘束が卓越する場合、ひびわれ有における最大温度差の範囲は 28.7~54.6°C、一方ひびわれ無では 12.1~39.3°C の範囲である。すなわち、ひびわれ有と無とが混在する最大温度差の範囲は 28.7~39.3°C で、この範囲以上ではすべての例においてひびわれが発生しており、反対にこの範囲以下ではひびわれの発生は認められていない。図-2 から、外部拘束が卓越する場合、ひびわれ有における平均温度降下量の分

布は 15.3~38.2°C で、ひびわれ無では 9.1~26.7 となっている。すなわち、ひびわれ有と無が混在する平均温度降下量の範囲は 15.3~26.7 で、これ以上ではすべての例においてひびわれが発生しており、反対に、これ以下ではひびわれの発生は認められていない。温度応力に影響を及ぼす要因は構造物の温度上昇特性のほかに、コンクリートの物性、外部拘束度さらには施工条件など数多くを上げることができるが、ここで得られた結果から、最大温度差ならびに平均温度降下量のいずれもが、ひびわれ発生の重要な要因となっており、これらにより温度ひびわれの危険度を概略的に判断することが可能であると考えられる。

(2) ひびわれ危険指数

温度応力ならびに温度ひびわれ予測結果のうち、図-3~4 に内部拘束が卓越する No.1 構造物 (表-1 参照) と外部拘束が卓越する No.23 構造物 (表-1 参照) におけるひびわれ危険指数  $I_1$ ,  $I_{2A}$  および  $I_{2B}$  の経時変化を示す。これらの指数の値は、各構造物において温度応力が最大となる箇所について算出したものであり、一般に内部拘束が卓越する場合は表面部、一方外部拘束が卓越する場合は中心部における値である。図-3 から、内部拘束が卓越する No.1 構造物においては材令初期 (温度が最大となる時期) に指数の値がピークとなり、温度ひびわれの危険性が增大する。各指数のピーク値は  $I_1=0.46$  で応力と強度によるひびわれ発生線 ( $I_1=1$ ) 以下となっている。一方、ひずみ能力による指数は  $I_{2A}=0.55$ ,

表-2 各構造物の温度解析結果

NO	最高温度 °C	最高温度材令日	最高温度差 °C	温度降下量 °C	NO	最高温度 °C	最高温度材令日	最高温度差 °C	温度降下量 °C
1	42.5	3.0	25.8	—	23	37.1	1.0	12.4	24.9
2	64.3	2.0	25.5	—	24	44.4	1.0	22.2	36.2
3	78.5	1.5	39.3	—	25	33.3	1.0	12.4	31.8
4	78.5	1.5	29.7	—	26	31.7	0.5	5.9	30.8
5	78.5	1.5	38.6	—	27	51.4	1.0	9.5	22.5
6	53.5	4.5	54.6	—	28	53.2	2.0	18.9	27.7
7	54.0	5.0	53.5	—	29	44.6	2.0	15.9	22.0
8	54.0	5.0	28.7	—	30	24.4	1.0	6.8	15.3
9	46.3	2.5	45.0	—	31	45.3	1.0	8.1	24.7
10	47.1	3.0	50.1	—	32	57.9	1.0	6.7	26.1
11	47.7	3.0	17.7	—	33	41.3	1.0	5.3	25.2
12	35.6	2.0	32.6	—	34	52.4	1.0	13.4	30.6
13	38.1	2.0	35.6	—	35	55.7	1.5	9.1	22.5
14	38.1	2.0	12.1	—	36	58.8	1.5	9.9	25.1
15	44.3	3.5	32.3	—	37	52.2	1.0	11.9	30.4
16	64.7	2.0	31.0	—	38	69.1	1.5	14.5	33.2
17	49.5	4.0	32.4	—	39	58.8	1.5	14.3	37.0
18	38.9	1.55	15.7	23.3	40	59.1	1.5	12.2	38.2
19	49.2	1.5	14.3	25.1	41	34.4	4.0	13.9	9.2
20	49.4	1.5	13.7	28.0	42	34.3	4.0	13.7	9.1
21	43.7	0.5	2.4	17.9	43	51.4	2.5	14.4	14.4
22	56.9	1.0	11.1	26.7					

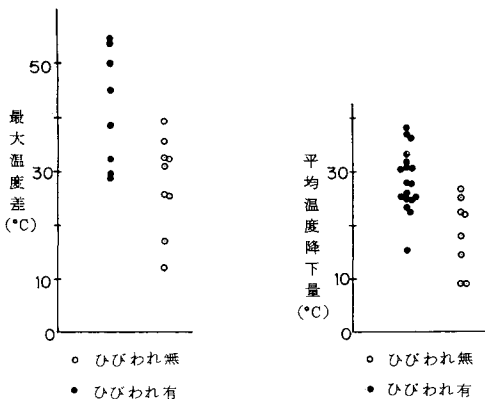


図-1 最大温度差の分布

図-2 平均温度降下量の分布

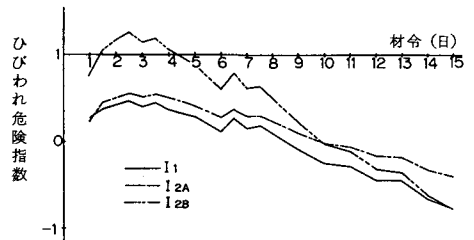


図-3 No.1 構造物のひびわれ危険指数

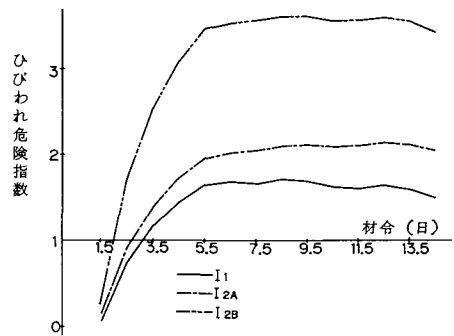


図-4 No.23 構造物のひびわれ危険指数

$I_{2B}=1.26$  で、ひびわれ発生線 A Line ( $I_{2A}=1$ ) かつひびわれ発生限界線 B Line ( $I_{2B}=1$ ) 以上の、ひびわれ危険域の値を示す。温度降下期に移ると各指数の値は単調に減少し、ひびわれの危険性が減少していく。たとえば、指数  $I_{2B}$  は材令 4~5 日で  $I_{2B}<1$  となり、ひびわれ発生限界線以下になる。なお、図中において材令 6 日付近で指数が一時的に増大するが、これは型枠脱型の影響である。

次に、図-4 から外部拘束が卓越する No.23 構造物においては、温度上昇期をすぎて温度降下期に移ると指数の値がしだいに大きくなり、ひびわれの危険が増大していく。

指数  $I_1$  は材令 3 日前後で  $I_1>1$  となり、材令 6 日以降は  $I_1=1.5\sim 1.7$  のほぼ一定した値を保っている。一方、指数  $I_{2A}$  も材令 2~3 日で  $I_{2A}>1$  となり、A Line 以上のひびわれ発生域の値を示す。そして材令 5 日以降は  $I_{2A}=2.0\sim 2.1$  程度の一定した値を保っている。

### (3) 温度ひびわれ予測

a) 応力と強度によるひびわれ危険指数  $I_1$  を用いた予測

図-5 に各構造物のひびわれ危険指数  $I_1$  の最大値の分布を示す。ひびわれ発生有の指数の範囲は  $0.65\sim 2.04$  で、指数の値が  $I_1\leq 1$  の場合でも 7 例においてひびわれが発生している。そしてその中でも小さな指数を示したものは、No.18 構造物の  $0.65$  および No.4 構造物の  $0.66$  であり、したがってひびわれ発生有における実用上の指数の下限は  $0.6$  程度の値と考えられる。

次に、ひびわれ無における指数の範囲は  $0.19\sim 1.25$  で大部分が  $I_1<1$  の値をとるが、 $I_1\geq 1$  でもひびわれが発生しなかった例が 2 件あった。指数の上限は  $1.25$  (構造物 No.13) であった。以上のようなひびわれ発生有と無の例におけるひびわれ危険指数  $I_1$  の分布から、ひびわれ発生線 ( $I_1=1$ ) を基準にして、 $0.6<I_1<1.2$  の範囲がひびわれ有と無の例が混在する領域、そしてこの範囲外、すなわち指数の値が  $I_1\geq 1.2$  の場合はひびわれ発生の可能性が高く、反対に  $I_1\leq 0.6$  の場合はひびわれの危険性は低いと判断するのが妥当であると考えられる。

b) ひずみとひずみ能力によるひびわれ危険指数  $I_{2A}$ 、 $I_{2B}$  を用いた予測

図-6 にひずみとひずみ能力による指数のうち、引張ひずみ能力の算定式に式(3)を用いたときの指数  $I_{2A}$  の分布を示す。前述のように、本研究では、 $I_{2A}=1$  をひびわれ発生線 (A Line) と考え  $I_{2A}\geq 1$  の領域をひびわれ発生域と考えた。図から、ひびわれ発生有における指数の範囲は  $0.49\sim 2.36$  で、 $I_{2A}<1$  の場合でもひびわれは発生している。一方、ひびわれ無における指数の範囲

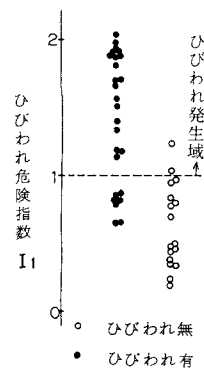


図-5 ひびわれ危険指数  $I_1$  の分布

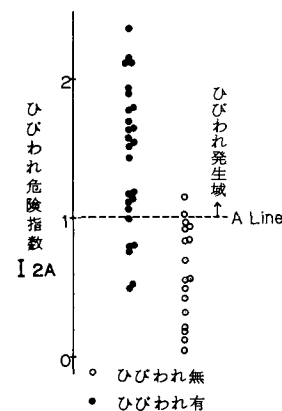


図-6 ひびわれ危険指数  $I_{2A}$  の分布

は  $0.04\sim 1.15$  であり、 $I_{2A}\geq 1$  の値を示しながらひびわれが発生しなかった例が 2 件 (構造物 13, 22) であった。しかし、この 2 例における指数  $I_{2A}$  の値はともに 1 に近い値を示しており、したがって  $I_{2A}=1$  の A Line をひびわれ発生線、すなわち、ひびわれ発生無の上界線として大きな誤りはないものと考えられる。

次に、図-7 はひずみ能力算定式に式(4)を用いたときの指数  $I_{2B}$  の分布である。本研究では前述のように  $I_{2B}=1$  の線 (B Line) 以下をひびわれ安全域と考えた。図から、ひびわれ無における指数の範囲は  $0.08\sim 2.73$  であり、B Line 以上でもひびわれが発生無のものが多数ある。一方、ひびわれ発生有における指数の範囲は  $0.99\sim 4.42$  で、大部分が 1 以上の値をとっている。構造物 No.18, 20 の 2 例においては指数がともに  $0.99$  で 1 より小さな値となる。しかし、その差はきわめてわずかであり、実用上は  $I_{2B}\leq 1$  をひびわれ安全域、すなわち、 $I_{2B}=1$  (B Line) をひびわれ発生の下限と考えてもさしつかえないと考えられる。

c) 温度ひびわれ指数を用いた予測 (土木学会コンクリート標準示方書の方法)

図-8に有限要素法による応力解析結果を用いて算出した各構造物の温度ひびわれ指数の分布を示す。

ひびわれ発生有の指数の範囲は0.49（構造物 No.40）～1.54（構造物 No.18）であり、一方ひびわれ無における指数の範囲は0.80（構造物 No.13）～5.26（構造物 No.43）である。すなわち、ひびわれ発生有と無の例が混在する指数の範囲は0.80～1.54で、指数が0.80より下ではすべての例においてひびわれが発生しており、一方指数が1.54以上になるとひびわれは生じていない。

示方書ではひびわれを防止したい場合の指数の値として1.5以上を与えているが、本研究の結果からもこの値は妥当なものと考えられる。

次に、図-9に土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、温度から簡易的に算出した場合の指数の分布を示す。ひびわれ発生有の指数の範囲は0.30（構造物 No.6）～1.09（構造物 No.30）であり、一方ひびわれ無では0.41（構造物 No.3）～1.83（構造物 No.13, 14, 42）である。応力解析結果から求めた指数の値と比較すると、簡易的に求めた指数の値は全般的に小さくなる傾向にあり、特にひびわれ発生無において大きな差異を生じている。また、各指数の相対的な大小関係も両者は必ずしも一致はしていない。簡易的に指数を求めた場合の、ひびわれ発生例における指数の上限は1.09で、ひびわれを

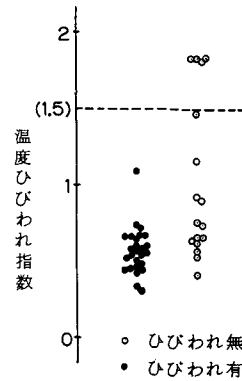


図-9 温度から求めた温度ひびわれ指数の分布

防止したい場合の指数の標準値とは一応の対応は認められる。しかし、図-9に示されるように、指数の値が0.41～1.09の間にひびわれ発生有と無の例の大半が集中しており、指数の値とひびわれ発生との対応は必ずしも明確とはなっていない。

(4) 各指数の適用性

前節においては、温度ひびわれ危険度に関する各指数の分布の範囲を明らかにしたが、ひびわれ発生有と無との混在は、材料特性のばらつきなど解析上避け得ない要因に加えて、温度ならびに温度応力の解析手法の精度、さらには、指数の算出法もしくはその物理的な妥当性など解析上の要因にも起因すると考えられる。したがって、ひびわれ発生有と無との指数が混在する程度により、その指数の適用性を検討することが可能であると考えられる。すなわち、指数の混在が少なければ少ないほど、ひびわれ発生に対してよりの確な判断ができるのである。本研究ではひびわれ発生有と無との指数が混在する範囲にある指数の、全指数（46例）に対する比率（ここでは、これを混在比率とよぶことにする）により、各指数の適用性を検討した。なお、最大温度差と平均温度降下量については、両者を一括して取り扱った。また、簡易的に算出した温度ひびわれ指数については、ひびわれ発生例中、指数が最も大きな値を示している一例は、特異例として計算から除外した（図-9参照）。表-3に、各指数における混在比率の大きさを示す。表-3から、混在比

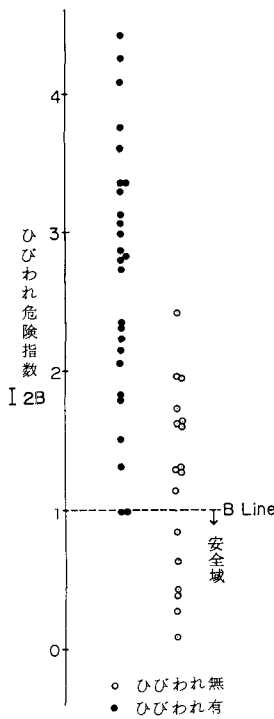


図-7 ひびわれ危険指数  $I_{2B}$  の分布



図-8 応力解析から求めた温度ひびわれ指数の分布

表-3 各指数の混在比率

指数	混在比率 (%)
ひびわれ危険指数 ( $I_1$ )	4.1
土木学会提案 温度ひびわれ指数 (厳密算定)	4.1
ひびわれ危険指数 ( $I_2$ )	5.1
最大温度差および平均温度降下量	5.1
土木学会提案 温度ひびわれ指数 (簡易算定)	7.3

率が最も小さな値を示したのは、応力と強度による指数  $I_1$  ならびに土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、応力解析をもとに算出した指数の 41 % であり、次いでひずみとひずみ能力による指数  $I_{2A}$ ,  $I_{2B}$  ならびに最大温度差および平均温度降下量の 51 %、そして、混在比率が最も大きくなったのは土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、簡易的に算出した場合で、値は 73 % となった。このような結果と、指数の一般性ならびに算出にあたっての計算量などから、本研究の範囲内では、応力と強度による指数が現段階では最も適用性が高いと判断される。次に、ひずみとひずみ能力による指数については、ひびわれ発生条件としては合理的なものと考えられるが、混在比率は応力と強度による指数に比べやや大きな値を示した。この原因としては、ひずみ能力の算定法にいくつかの改良を要する点があるものと考えられ、今後さらに研究が必要である。しかし、温度ひびわれ危険度評価における補助的な指数として、現状でも十分適用が可能であると考えられる。最大温度差ならびに平均温度降下量については、混在比率自体は 51 % でひずみとひずみ能力による指数と同程度となり、簡易的な温度ひびわれ評価法として高い実用性を有するものと考えられるが、その適用範囲に限られることに留意する必要がある。すなわち、本研究で行った最大温度差あるいは平均温度降下量のみによるひびわれ予測では力学的要因が全く考慮されていないので、一般的な構造物以外のものに対してここでの結果を適用する場合は十分な注意が必要である。最後に、簡易法による温度ひびわれ指数は、本研究の範囲内では最も大きな混在比率を示した。本方法は、温度上昇特性に加えて、拘束度という力学的要因も考慮されており、その実用性は高いと考えられるが、現段階では拘束度の評価および式中の定数の値の妥当性について、なお多くの検討が必要と考えられる。

## 5. ま と め

本研究は 43 例のコンクリート構造物に対して、有限要素法による温度応力解析に基づく温度ひびわれ危険指数を算出し、これらの指数の値とひびわれ発生との関係を明らかにしたものである。

本研究で得られた結論を要約すれば次のようになる。

(1) 構造物の最大温度差および平均温度降下量に注目して温度ひびわれを検討した結果、内部拘束が卓越する場合は中心と表面の最大温度差の平均が、一方外部拘束が卓越する場合は平均温度降下量の平均がそれぞれひびわれ発生有ではひびわれ無の 1.4~1.5 倍程度の大きさになっており、これらが温度ひびわれ発生の重要な要因となっていることが確認された。

(2) 温度応力と引張強度の比をひびわれ危険指数  $I_1$

と定義し指数  $I_1$  とひびわれ発生との対応を検討した結果、 $0.6 < I_1 < 1.2$  の範囲がひびわれ発生有と無の例が混在する領域で、 $I_1 \geq 1.2$  の場合はひびわれの発生の可能性が高く、反対に  $I_1 \leq 0.6$  の場合はひびわれの危険性が低いことが明らかとなった。

(3) ひずみと引張りひずみ能力の比から、ひびわれ危険指数  $I_{2A}$ ,  $I_{2B}$  を定義し、 $I_{2A}=1$  をひびわれ発生線（ひびわれ発生無の上界線）、 $I_{2B}=1$  をひびわれ発生限界線（ひびわれ発生の下界線）と考えた。そして、 $I_{2A} \geq 1$  をひびわれ発生域、 $I_{2A} < 1$  かつ  $I_{2B} > 1$  をひびわれ危険域、そして  $I_{2B} \leq 1$  を安全域としてひびわれ発生有と無の例における指数  $I_{2A}$  と  $I_{2B}$  の分布と各領域との関係を検討した結果、両者は良好に対応していることが明らかとなった。

(4) 有限要素法による応力解析結果を用いて算出した土木学会コンクリート標準示方書規定の温度ひびわれ指数は、ひびわれ発生有では 0.49~1.54、ひびわれ発生無では 0.80~5.26 の範囲の値となった。すなわち、指数の値が 1.54 以上ではひびわれは生じておらず、示方書で示されている温度ひびわれ防止に対する指数の標準値とよい対応を示した。一方、温度解析結果から簡易的に算出した温度ひびわれ指数はひびわれ発生有では 0.30~1.09、ひびわれ無では 0.41~1.83 となった。すなわち、ひびわれ発生有の指数の上限は 1.09 で、ひびわれ防止の指数標準値と一応の対応が認められた。しかし、指数の値とひびわれ発生との対応は、必ずしも良好な結果とはならなかった。

(5) ひびわれ発生有と無との指数が混在する範囲にある指数の、全指数に対する比率を混在比率とし、これをもとに各指数の適用性を検討した結果、応力と強度による指数の混在比率が一番小さく、現段階では最も適用性に優れていると考えられた。土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、簡易的に算出した場合は、混在比率が 74 % と最も大きな値を示した。このことより、指数の簡易算定式中の拘束度の評価ならびに定数の値について、さらに多くの検討が必要であると考えられる。

謝 辞：本研究を実施するにあたり、資料の提供、あるいは研究成果を参考にさせて頂いた各位に対し、それらを参考文献に掲げるとともに深謝いたします。また、資料整理に協力頂いた近藤照子職員に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 小野 定・榎田康仁：温度応力解析方法に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、pp.75~82、日本コンクリート工学協会、1982。
- 2) マスコンクリートの温度応力研究委員会：外部拘束係数



- の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案, マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, pp. 47~98, 日本コンクリート工学協会, 1985.
- 3) マスコンクリートの温度応力研究委員会: マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム, 日本コンクリート工学協会, 1985.
  - 4) 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ発生有無の評価手法に関する研究, 土木学会第36回年次学術講演会概要集, pp. 51~52, 1981.
  - 5) 森本 繁・桑原隆司: マスコンクリートの温度応力によるひびわれ発生条件とひびわれ発生の危険性評価方法, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 61~68, 日本コンクリート工学協会, 1982.
  - 6) 吉岡保彦・両角昌公・渡辺克次: マスコンクリートのひびわれ予測システムの開発とその適用例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 29~34, 日本コンクリート工学協会, 1984.
  - 7) 森本博昭・小柳 治: マスコンクリートの温度ひびわれ危険度判定に関する研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 53~56, 1986.
  - 8) 森本博昭・小柳 治: コンクリート構造物の温度ひびわれ予測に関する研究, 土木学会論文報告集第338号, pp. 197~206, 1983.
  - 9) 土木学会: コンクリート標準示方書(昭和61年版), 1986.
  - 10) たとえば, O. C. ツィンキヴィッツ (吉識雅夫, 山田嘉昭監訳): マトリックス有限要素法, 培風館, 1975.
  - 11) 塚山隆一: コンクリートの断熱温度上昇推定, セメント技術年報, Vol. 30, pp. 408~410, 昭和51年.
  - 12) 田沢栄一・松岡康訓: マスコンクリートの施工法, 大成建設技術報告238号, 1976.
  - 13) 小柳 治・森本博昭: コンクリート構造物の熱伝導解析についての二, 三の考察, 岐阜大学工学部研究報告, 31号, pp. 135~144, 1981.
  - 14) 野尻陽一: コンクリート打設後の温度計算方法について, コンクリートジャーナル, Vol. 5, No. 8, pp. 33~40, 1967.
  - 15) 山川秀次・笠原 清・小林精一: マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討, 土木学会第37回年次学術講演会概要集, pp. 415~416, 1982.
  - 16) 岡田 清・小林和夫・宮川豊章・村本吉弘: マスコンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 230~233, 昭和55年.
  - 17) 森本博昭・小柳 治: コンクリート構造物の温度応力解析における2, 3の問題点, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 69~74, 日本コンクリート工学協会, 1982.
  - 18) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structure, 1978.
  - 19) H. リュッシュ, D. ユンクビルト (百島拓信訳): コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976.
  - 20) たとえば, 大崎幸雄・吉川弘道・河田秋澄: マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 49~56, 日本コンクリート工学協会, 1982.
  - 21) たとえば, マスコンクリートの温度応力研究委員会: マスコンクリート工事の温度応力制御の演習, 日本コンクリート工学協会, 1985.
  - 22) Houghton, D. L.: Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Proceedings, Vol. 73, No. 12, pp. 691~700, 1976.
  - 23) Tony C. Liu, James E. McDonald: Prediction of Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Proceedings, Vol. 75, No. 5, pp. 192~197, 1978.
  - 24) 森本博昭・小柳 治: コンクリート構造物の温度解析と簡易ひびわれ予測法, 土木学会第36回年次学術講演会概要集, pp. 49~50, 1981.
  - 25) 毛利康治・戸田博文・森本博昭・小柳 治: 2, 3の方法によるコンクリート壁の温度応力の実測と解析, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 51~54, 日本コンクリート工学協会, 1984.
  - 26) 白石基礎工事株式会社: 橋台のコンクリートひびわれについての考察, 昭和57年.
  - 27) 阪神高速道路公団: マッシブなコンクリート構造物の温度・乾燥収縮応力およびPC緊張による梁部応力, 保全施設部報告書, 昭和56年.
  - 28) 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策の研究, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 21~28, 日本コンクリート工学協会, 1984.
  - 29) Hansen, T. C.: Surface cracking of mass concrete structures at early form removal, BULLETIN RILEM, No. 28, pp. 145~153, 1965.
  - 30) 辻 幸和・横田紀男・渡辺夏也・坂田憲逸・鈴木康範: 膨張コンクリートのマスコンクリートへの適用に関する研究, セメント技術年報 Vol. 34, pp. 184~187, 昭和55年.
  - 31) 崎木純治・十河茂幸・三浦律彦: 水和熱によって発生する鉄筋コンクリート壁体の温度応力について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 105~112, 日本コンクリート工学協会, 1982.
  - 32) 森本博昭・飯田正幸・巢本利博・小柳 治: コンクリート橋脚柱の温度応力の実測と解析ならびにひびわれ予測, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 45~50, 日本コンクリート工学協会, 1984.
  - 33) 横山博司: クリープを考慮した温度応力の検討他, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp. 41~44, 日本コンクリート工学協会, 1984.

(1986.10.20・受付)