

マスコンクリート構造物の温度ひびわれ発生の評価方法に関する研究

EVALUATION OF THERMAL CRACK OCCURRENCE IN
MASSIVE CONCRETE STRUCTURES

木村 克彦*・小野 定**

By Katsuhiko KIMURA and Sadamu ONO

Authors propose a probabilistic approach for the evaluation of thermal crack occurrences, which introduces thermal crack index, random variable defined in terms of the ratio of the concrete tensile strength to the thermally induced tensile stresses due to external restraints.

Furthermore, this report discusses some factors affecting the thermal crack occurrence probability. It becomes clear that the degree of external restraint, tensile strength and calculation method of thermal crack index are the most contributing factors.

Keywords : mass concrete, thermal crack, external restraint, thermal crack index

1. まえがき

セメントの水和熱による温度ひびわれはコンクリート構造物の機能性、耐久性、美観性などに有害な影響を及ぼすことが考えられる。たとえば、貯水構造物では温度ひびわれが漏水の主原因になって、構造物の機能に有害な影響を及ぼしている事例が多く見受けられる¹⁾。このようなことから、温度ひびわれ制御は、長大橋の下部工(橋脚、橋台、アンカレイジ)、地下式貯槽の底版、側壁等のマスコンクリート、さらに、カルバート、貯水構造物等の壁状コンクリートなどにおいて、構造物の品質を保証するうえで重要と考えられ、これまでに数多くの研究が行われてきている。

設計、計画、施工段階で温度ひびわれ制御をする場合に要求される基本要素は、コンクリート打込み後のコンクリート温度の予測、温度応力の予測、温度ひびわれ発生の評価および温度ひびわれ特性の予測であると考えられる。このことから、コンクリート温度、温度応力の予測等については実験的および解析的研究が数多く行われている。しかし、温度ひびわれ発生の評価に関する研究

は、実用上の重要性にもかかわらず少ないので現状である。

一般に、ひびわれ現象は多くの要因の組合せにより生じる。特に、マスコンクリートの場合には、温度ひびわれの発生時期がプラスチックなごく初期の状態から十分に硬化した状態まで広範にわたるため、一般的のコンクリートのひびわれ以上に多くの要因がひびわれ発生に関係すると考えられる。このため、決定論的に温度ひびわれの発生を評価する場合、コンクリート温度、温度応力などの解析にFEM等の高度な解析手法を用いても、解析に使うコンクリートの熱特性値、熱伝達率、ヤング係数、クリープなどの諸定数は本来ばらつきを有するものであることから解析結果の厳密性は失われると推察される。このようなことから、温度ひびわれの発生を決定論的に評価する方法には限界があると考えられる。

しかし従来、マスコンクリートの温度ひびわれ発生を評価するための方法としては、予測された引張応力が引張強度を上回るか下回るかで評価する決定論的な方法が広く用いられている²⁾。

そこで著者の一人は、マスコンクリートの温度ひびわれ現象が、本来多くの不確定要因を含んだ事象であり、このことを前提として温度ひびわれ発生を確率的に評価する方法が適当であることを指摘して、温度ひびわれ指

* 正会員 工修 清水建設(株)土木本部開発部
(〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル)

** 正会員 工博 清水建設(株)土木本部技術部(同上)

数といった指標を定義し、この指標により温度ひびわれ発生を確率的に評価する方法（以下、小野の方法という）を提案し、実用化している^{3)~5)}。しかしながら、小野の方法は温度ひびわれ指標を温度の比で与えているために、外力等による応力が温度応力と同時に作用した場合にはその影響を容易に考慮できない等の問題点を残している。その後、吉岡⁶⁾、大崎ら⁷⁾によっても、このような考え方に基づいた評価方法が提案されている。さらに、従来の研究では、温度ひびわれ発生確率に及ぼす諸要因の影響に関する研究が少ないのが現状である。

本研究は、マスコンクリート構造物の施工段階における外部拘束による温度ひびわれ発生の評価を確率的に行う方法を温度応力とそれ以外の応力が同時に作用する場合まで適用性を広げることを目的として、実測データとともに引張強度と発生引張応力との比で定義された温度ひびわれ指標と温度ひびわれ発生確率との関係について検討し、さらに、温度ひびわれ発生確率に及ぼす外部拘束度、引張強度および温度ひびわれ指標の算定方法の影響について検討したものである。

2. 本研究で対象とした温度ひびわれ

本研究で対象とした温度ひびわれは、図-1に示すような外部拘束によるひびわれで、施工段階のものを対象とした。なお、実構造物では、外部拘束による温度応力とともに内部拘束による温度応力も発生しているが、温度降下量が大きくなり外部拘束による温度応力が卓越する材令では内部拘束による温度応力が小さいことが多い。このことから本研究では問題を単純にするために、内部拘束による温度応力の影響を無視した。用いたデータはコンクリートが打込まれてから約1か月程度の短期のものである。短期データに限定した理由の1つは、中・長期の温度ひびわれを対象とした場合、温度・ひびわれなどのデータが十分でない場合が多いこと、施工が進み構造物の形状が変化することに伴い外部拘束度（以下、拘束度と略記）の評価が難しくなることなどである。

また、対象とした構造物は、スラブ状マスコンクリート構造物および壁状マスコンクリート構造物で主に一面拘束されたものである。これら構造物に用いられたコンクリートの単位セメント量は200~400 kg/m³である。

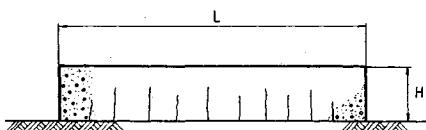


図-1 外部拘束による温度ひびわれ

3. 温度ひびわれ発生評価の基本的考え方

(1) 温度ひびわれ発生条件

a) 発生条件誘導上の仮定

① 部材内温度分布⁸⁾

部材内温度分布を図-2のように放物線と仮定し、式(1)で与えた。

$$T(y) = ay^2 + by + c \quad \dots \dots \dots (1)$$

また、内部温度の最大値を示す位置をスラブ状マスコンクリート構造物の場合には従来の実績から $h_e = H/6$ 、壁状マスコンクリート構造物の場合には温度分布が対称であることから $h_e = 0$ とすると、部材内の平均温度 T_m^t は、スラブ状マスコンクリート構造物の場合には式(2)、壁状マスコンクリート構造物の場合には式(3)で与えられた。

$$T_m^t = \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} T(y) dy = \frac{1}{4} (3 T_{\max}^t + T_s^t) \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$T_m^t = \frac{1}{3} (2 T_{\max}^t + T_s^t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

T_m^t ：材令 t における部材平均温度 (°C)

H ：部材厚さ (m)

T_{\max}^t ：材令 t における内部温度の最大値 (°C)

T_s^t ：材令 t における表面温度 (°C)

h_e ：部材中心から T_{\max}^t を示す位置までの距離 (m)

② コンクリートの力学的性質

コンクリートの力学的性質に関して次のような仮定をした。

$$\sigma_c(t) = 0.5 \sigma_{cb}(t)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$E_c(t) = 33000 \sigma_{cb}(t)^{0.4} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$B(t) = \frac{1}{1 + \varphi(t)} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

$\sigma_c(t)$ ：材令 t におけるコンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

$\sigma_{cb}(t)$ ：材令 t におけるコンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

$E_c(t)$ ：材令 t におけるコンクリートのヤング係数

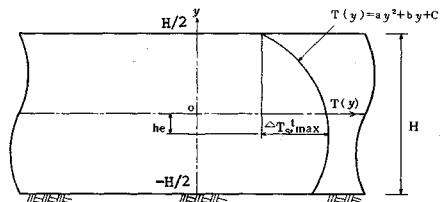


図-2 部材内温度分布

(kgf/cm²)

$B(t)$: 材令 t におけるクリープによる応力緩和率

$\phi(t)$: 材令 t におけるクリープ係数

なお、クリープ係数のデータがない場合には CEB/FIP コード (1978 年版)¹¹⁾ により相対湿度を一般的と考えられる 70 % と想定し、部材の仮想厚さ、セメント種類、コンクリートの有効材令を考慮してクリープ係数を求めた。また、クリープ係数を計算するときの載荷材令は内部温度が最大値を示した材令とし、クリープ係数を載荷後材令の関数として双曲線式で近似した。そして、載荷材令が異なっても式 (10) で与えられる引張応力増分に対して同一載荷後材令であればクリープ係数は同じであるとした。

b) 温度ひびわれ発生条件

温度ひびわれ発生条件（破壊条件）として最大主応力説を採用し、部材内に発生した最大主応力がコンクリートの引張強度を超えたときに最大主応力が発生している方向と直角方向にひびわれが発生するとした。ひびわれ発生条件を式で示せば次のとおりである。

ここに

$\sigma_{te}(t)$: 材令 t における温度降下により発生した引張応力 (kgf/cm^2)

c) 外部拘束による発生応力

外部拘束により発生する温度応力は式(8)で与えられる(以下増分法という)とし、温度上昇時に発生する圧縮応力は考慮していない。

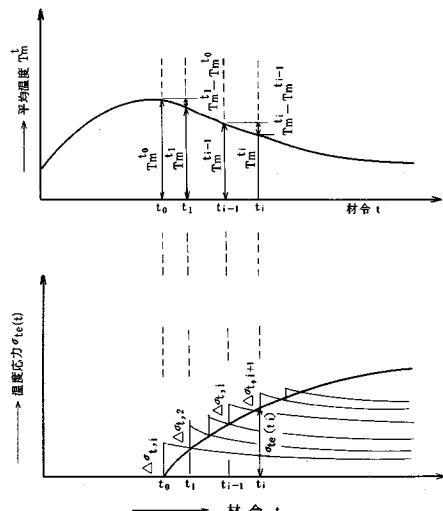


図-3 外部拘束による温度応力算定模式図

ج

$\Delta\sigma_{te,i}(t)$: 引張応力増分 $\Delta\sigma_{ti,i}$ が材令 t で示す応力

(kgf/cm²)

$\Delta\sigma_{t_i}$: 材令 t_{i-1} から t_i の間に発生する引張応力増分 (kgf/cm^2)

R ：外部拘束度

α_c : コンクリートの熱膨張率 ($=10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

$T_m^{t_i}$: 材令 t_i での部材平均温度 (°C)

$$t'_i = \frac{1}{2}(t_{i-1} + t_i), \quad t' = t - t_{i-1}$$

図-3に平均温度と温度応力の関係を模式的に示した。

d) 外部拘束度 R

拘束度の推定方法には ACI の方法、永山らの方法、森の方法などがあるが、ここでは小野の提案による方法⁴⁾を用いた。拘束度は、図-4 および図-5 により算定した。また、地盤に直接打設されたり、杭基礎のフー

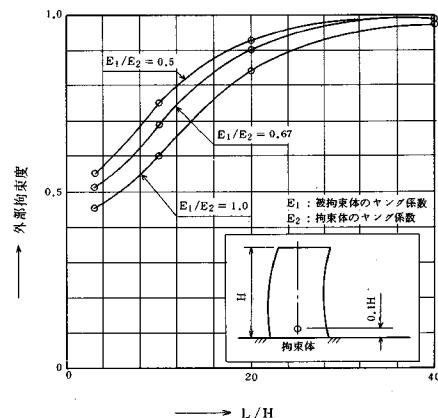


図-4 外部拘束度算定図（拘束体と被拘束体との長さが等しい場合）

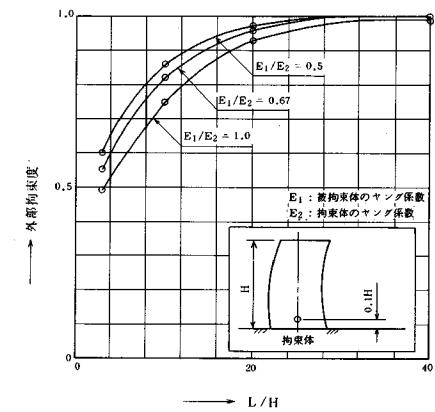


図-5 外部拘束度算定図（拘束体と被拘束体との長さが異なる場合）

チングなどの場合には拘束が小さいと考えられるので $R=0.1$ とした¹²⁾。一般に、外部拘束による温度ひびわれは拘束度の大きい打継目近傍から進展することが多い。このことから拘束度はひびわれ発生に大きく影響すると考えられる打継目近傍の $0.1 H$ の点での値とした。さらに拘束度を算定するときのヤング係数比は材令によって異なるが、ここでは簡易解であることを考慮して材令 30 日における値とした。ただし、材令 30 日以内に次のリフトなどが打継がれたり、ひびわれが材令 30 日以内に発生した場合には打継時の材令またはひびわれの発生が確認された材令でのヤング係数比を拘束度の算定に用いた。

(2) 温度ひびわれ指数の定義

温度ひびわれ発生に関する指標として引張強度と発生応力の比を温度ひびわれ指數(以下ひびわれ指數と略記)と定義し式(11)で与える。

二四

ET_s : 外部拘束による温度ひびわれに対する温度ひびわれ指数

$\sigma_{ct}(t)$: 材令 t におけるコンクリートの引張強度

$\sigma_{te}(t)$: 材令 t における温度降下により発生した引張応力

(3) 温度ひびわれ発生確率の定義

任意のひびわれ指数の範囲における温度ひびわれ発生確率（以下ひびわれ発生確率と略記）は任意のひびわれ指数の範囲における温度ひびわれ発生データ数と同範囲の全データ数との比で定義し、式(12)で与える。なお吉岡らは温度ひびわれ発生確率をひびわれが発生したものと発生しなかったものの累積頻度から求めている。

ここに

P_i : $ET_{s,t-1}$ から $ET_{s,i}$ 区間における温度ひびわれ発生確率

n_i : $ET_{s,i-1}$ から $ET_{s,i}$ 区間における温度ひびわれ発生データ数

N_i : $ET_{a_{i-1}}$ から ET_{a_i} 区間における全データ数

4. 実構造物における調査結果による温度ひびわれ指標の特性の分析

(1) 使用したデータ

調査した現場数は47現場である。解析に使用したデータ数は655個であり、このうち温度ひびわれ発生の有無は次のとおりである。

温度ひびわれ有：233 個

温度ひびわれ無：422 個

調査した構造物は壁状マスコンクリート構造物（以下 Mass 2 a と略記）とスラブ状マスコンクリート構造物（以下 Mass 2 c と略記）の 2 つに分類することができ、おのおのの調査数は Mass 2 a が 19 現場、293 個、Mass 2 c が 35 現場、362 個である。調査結果の一部は表-1(a) および表-1(b) に示すとおりである。

(2) 温度ひびわれ指数の算定

ひびわれ指數は、部材内平均温度の経時変化から式(8)で発生応力を計算し、式(11)で求める必要があるが、本研究では、発生応力を式(13)で与えられるとして求めたひびわれ指數 ET_s' (以下簡易法という)と式(11)で与えられる ET_s との間に以下に述べるような関係があることからこれらの関係を用いて ET_s' から ET_s を求めた。なお、 ET_s および ET_s' の違いは発生応力の算定方法がそれぞれ増分法によるか簡易法によるかである。簡易法の場合、クリープ係数は3.(1), a) で述べた方法により材令を検討対象材令 t として求めて、ヤング係数は応力緩和を考慮して $B(t) \cdot E_c(t)$ としている。

表-1(a) マスコンクリート調査データ（その1）

選別 番号	セメント比 W/C (%)	セメント の種類	供給 量 (kg/m ³)	初期 強度 (kg/cm ²)	バイブレー シング時間 (min)		部材厚 (mm)	長辺長 (m)	短辺 (m)
					プレケーリ ング時間 (min)	シグの有無			
1	55.2	中燃熱 高炉土	280	10.0	初期 4 2次 48	有	1.50	32.0	15.9
2	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ
3	タ	タ	タ	タ	タ	タ	1.40	31.0	15.9
4	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ
5	56.0	タ	280	10.5	有 (不明)	タ	1.50	17.2	12.6
6	タ	タ	タ	タ	タ	無	タ	30.0	15.9
7	54.8	普通	290	12.0	0	タ	3.00	18.2	14.0
8	タ	タ	タ	タ	タ	タ	タ	14.3	10.5
9	57.0	タ	309	タ	タ	タ	2.30	47.0	36.0
10	45.5	フライアッシュ 白陶	295	8.0	7~8	タ	4.50	22.0	18.0

表-1(b) マスコンクリート調査データ（その2）

選別 No.	TP (℃)	打設時期	養生方法	養生期間 (日)	T _{r,max} (℃)	T _{e,r,max} (℃)	D A Y _r	△T _r ¹ (短縮 (℃))	R	温度びわの 発生率。	
										△T _r ² (℃)	△T _r ³ (℃)
1	28.8	夏	スプリング ラー散水	5以上	27.2	5.5*	2.0	9.5 (13)	0.94	無	
2	28.8	〃	〃	〃	28.2	5.2*	〃	13.5 (21)	0.93	〃	
3	28.5	〃	〃	〃	23.5	5.2*	〃	15.2 (22)	0.94	〃	
4	25.0	秋	〃	〃	26.0	5.1*	3.0	21.0 (38)	0.92	〃	
5	25.4	夏	〃	〃	〃	5.8*	1.0	18.3 (23)	0.82	有	
6	26.6	〃	〃	〃	28.4	5.1*	2.0	20.2 (16)	0.94	〃	
7	12.0	冬	熱敷スチ ロール	〃	49.0	17.6	〃	28.0 (36)	0.50	無	
8	12.0	春	〃	〃	47.0	27.0	3.0	34.6 (36)	0.48	〃	
9	13.0*	冬	熱敷スチロ ール+シート	25	37.0*	23.0*	2.5*	14.0 (30)	0.82	〃	
1.0	14.0	春	シート	7~8	40.5	26.6	4.0	24.0 (30)	0.49	〃	

注) T_p : 打込み温度 Tr,max: 内部温度上界値の最大値(℃) DAYxx: T_{max} を示した材令(日)

$T_{s,r,max}$: 表面温度上界盤の最大値(℃) ()内は ΔT^t の場合 来は推定値

ここに

$\sigma'_{te}(t)$: 材令 t における温度降下により発生した引張応力

ΔT_m^t : 材令 t における部材内平均温度降下量

ET'_s : 発生応力を式(15)で与えたときの温度ひびわれ指数

ひびわれ指数 ET_s と ET'_s の関係は、次のようにして求めた。正確な詳細データのあるものからランダムに Mass 2 a から 17 個, Mass 2 c から 20 個抽出しひびわれ指数 ET_s および ET'_s を計算し図-6 および図-7 にひびわれの有・無別に ET_s と ET'_s との関係を示した。ひびわれ有の場合の ET_s と ET'_s の関係は式 (15), 無の場合には式 (16) のとおりである。

(ひびわれ有)

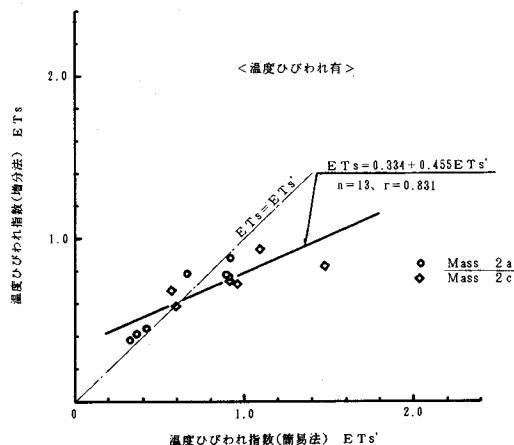


図-6 増分法と簡易法による温度ひびわれ指数の関係

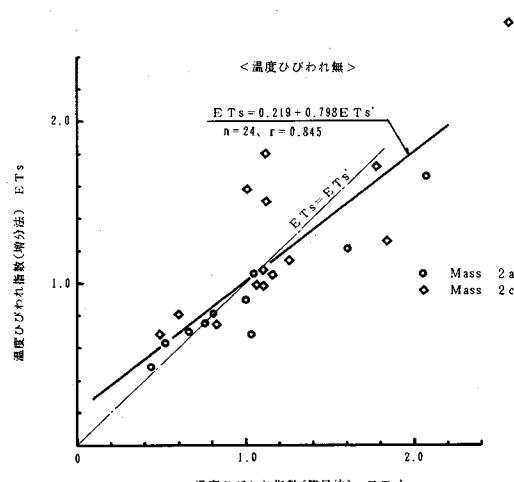


図-7 増分法と簡易法による温度ひびわれ指数の関係

(ひびわれ無)

ひびわれ有・無の場合の相関係数は、それぞれ 0.831, 0.845 であり有意性の検定を行った結果, $r(11, 0.01) = 0.684$, $r(22, 0.01) = 0.517$ であるので相関係数は高度に有意であることが認められた。また、回帰の分散分析および F 検定を行った結果を表-2 および表-3 に示した。 F 検定の結果、回帰は高度に有意であることが認められた。

以上のことから簡易法による ET'_s から増分法によるひびわれ指数 ET_s を求めてよいと判断した（以下ひびわれ指数とは原則として式（11）で与えられる ET_s をいう）。なお、式（8）で発生応力を求め、式（11）で ET_s を算定する方が式（13）～式（16）を用いて ET_s を算定するよりもひびわれ発生の可能性評価を適切にできると考えられる。

(3) 温度ひびわれ指数の統計的性質

図-8 および図-9 に温度ひびわれが発生した場合と発生しない場合のひびわれ指数のヒストグラムを示した。温度ひびわれが発生した場合のひびわれ指数の平均値は $\bar{x} = 0.824$ (0.813), 分散の平方根は $\sqrt{V} = 0.297$ (0.272) である。また温度ひびわれが発生しない場合

表-2 分散分析表（ひびわれ有の場合）

要因	S	ϕ	V	F _o	備考
R	0.2719	1	0.2719	24.9*	F(1, 11, 0.01) = 9.65
e	0.1198	11	0.0109		
T	0.3917	12			

R : 要因による変動 e : 誤差による変動

T : 全變動 S : 平方和 ϕ : 自由度

V : 不偏分散 F₀ : 分散比

表-3 分散分析表（ひびわれ無の場合）

要因	S	ϕ	V	F o	備 考
R	3.9343	1	3.9343	54.9	F(1, 22, 0.01)
e	1.5777	22	0.0717		= 7.94
T	5.512	23			

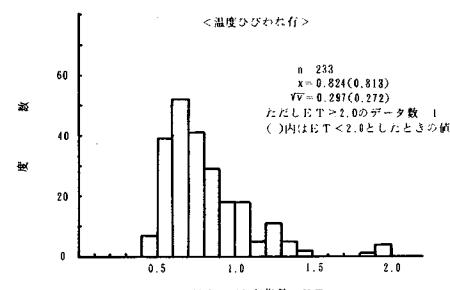


図-8 溫度ひびわれ指數のヒストグラム

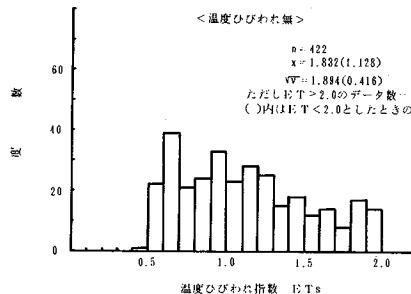


図-9 温度ひびわれ指数のヒストグラム

のひびわれ指数の平均値 $\bar{x} = 1.832$ (1.128), 分散の平方根は $\sqrt{V} = 1.894$ (0.416) である。なお、温度ひびわれが $ET < 2.0$ の範囲で発生しており、ひびわれ発生確率とひびわれ指数の関係もこの範囲のデータに基づいて作成していることからこれに対応するそれぞれの値を()内に示した。

温度ひびわれが発生した場合のひびわれ指数の分布は、正規分布の傾向が認められる。温度ひびわれが発生しない場合には、図-9 からわかるようにひびわれ指数は広い範囲にわたって分布しており、温度ひびわれが発生したような正規分布の傾向は認められない。これは、温度ひびわれ発生は理論的にはある瞬間、つまり点でとらえられるが、ひびわれが発生しない状態は不定であることによるためであると考えられる。

(4) 温度ひびわれ発生確率

図-8 および図-9 に示したヒストグラムから式(12)を用いてひびわれ指数の各クラスのひびわれ発生確率を計算し、それを正規確率紙にプロットした結果は図-10 のとおりである。

検討に用いるひびわれ発生確率とひびわれ指数のデータの範囲がこれらの関係に及ぼす影響を調べるために正規確率紙上でデータの分布の傾向が大きく変化している ET_s が 1.5 より小さい場合、すなわち (ET_s, P) の組の数 n が 11 の場合と、同確率紙上で全データをカバーする $ET_s < 1.8$ ($n=14$) の場合について検討した。

ひびわれ発生確率とひびわれ指数の間の相関係数は $n=11$ ($ET_s < 1.5$) で $r=0.919$, $n=14$ ($ET_s < 1.8$) で $r=0.903$ となった。

相関係数の有意性の検定を行った結果、 $r(9, 0.01)=0.744$, $r(12, 0.01)=0.661$ となり相関係数は高度に有意であることが認められた。 $n=11$ の場合の母相関係数の検定を行った結果、母相関係数は危険率 5 % で 0.71 から 0.98 の間にいると推定できる。

次に、図-10 のひびわれ発生確率をひびわれ指数の関数として回帰し、回帰直線および回帰直線の 95 % 信頼限界を図示した。 $n=11$ の場合の分散分析および F

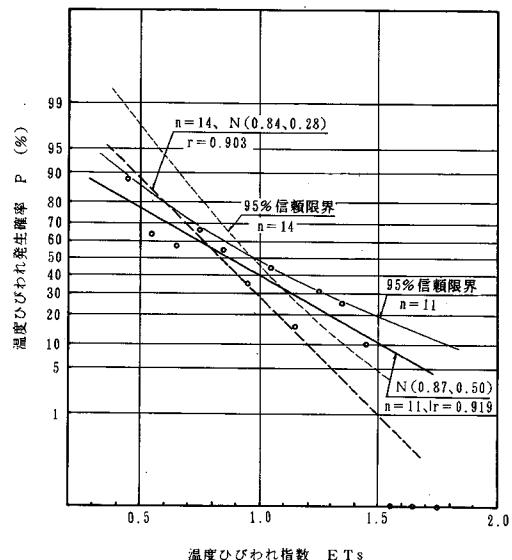


図-10 温度ひびわれ指数と温度ひびわれ発生確率との関係

表-4 分散分析表 ($n=11$ の場合)

要因	S	ϕ	V	F o	備考
R	35.00	1	35.00	49.2*	$F(1, 9, 0.01)$
e	6.40	9	0.71		$= 10.6$
T	41.40	10			

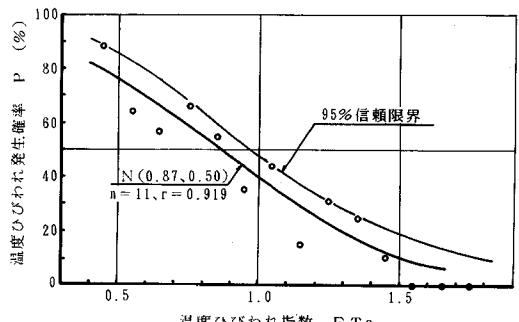


図-11 温度ひびわれ発生確率図

検定結果を表-4 に示した。 F 検定の結果、 $n=11$ および 14 の場合の回帰はともに高度に有意となった。また、ひびわれ発生確率の分布関数は $n=11$ の場合 $N(0.87, 0.50)$, $n=14$ の場合 $N(0.84, 0.28)$ の正規分布をしている。ひびわれ発生確率が 50 % となるのは回帰直線に対して、 $n=11$ の場合 $ET_s=0.87$, $n=14$ の場合 $ET_s=0.84$ となり、95 % 信頼限界に対しては n に関係なく $ET_s \neq 1.0$ となっている。また、ひびわれ発生確率のデータは $n=11$ の場合の 95 % 信頼限界内にすべて入っている。

さて、ひびわれ発生確率とひびわれ指数の関係として $n=11$ と 14 のどちらの回帰直線を用いるのが適当かに

について考える。一般に温度ひびわれ制御の検討をする場合には、ひびわれ発生確率が 50 % 以下の範囲での推定精度がよいことが望まれる。また、温度ひびわれ制御の検討においてひびわれ発生の判定に対する安全性の面からも同一ひびわれ指数に対して大きな発生確率を与える $n=11$ の回帰直線を用いる方が適切であると考えられる。以上から温度ひびわれ制御の検討には $n=11$ の回帰直線を用いるのが適当であると考えられる。以下の検討には $n=11$ の回帰直線を用いることにする。

図-11に本研究で提案する $n=11$ の場合のひびわれ発生確率図を示した。

5. 外部拘束度および引張強度が温度ひびわれ発生確率に及ぼす影響

(1) 外部拘束度 R

ここではひびわれ指数の算定式(11)に含まれる拘束度の評価がひびわれ発生確率に及ぼす影響について検討する。

まず、ひびわれ指数が次式で与えられることに注目し、ひびわれ指数と拘束度の関係を求める式 (17) のようになる。

式(17)で $f(t, \Delta T_m)$ =一定として、ひびわれ指と拘束度の関係を示したのが図-12である。同一の $f(t, \Delta T_m)$ に対して、拘束度を大きく評価した場合にはひびわれ指数が小さくなり、ひびわれ発生確率が大きくなるため、ひびわれ制御の面からは安全側の値を与えることになる。しかし、拘束度を小さく評価した場合には、逆の結果となりひびわれ発生確率は小さくなる。たとえば、 $f=0.5$ の場合、 $R=0.4, 0.5, 0.6$ とした場合のひびわれ発生確率を図-12から算定すれば次のようになる。

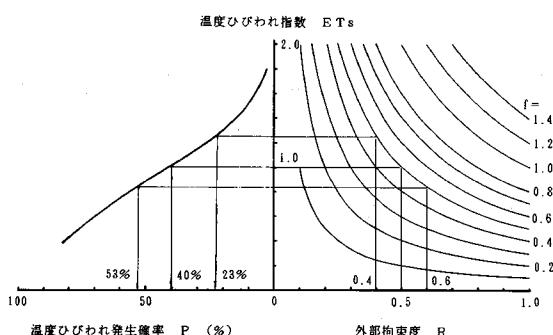


図-12 温度ひびわれ発生確率と温度ひびわれ指数と外部拘束度との関係

$R=0.5$ のときのひびわれ発生確率 $P=40\%$ に対して $R=0.4$ および 0.6 のときのひびわれ発生確率はそれぞれ 23% および 53% となり、拘束度を 0.1 大きく評価したときはひびわれ発生確率が 13% 大きくなり、拘束度を 0.1 小さく評価したときには、ひびわれ発生確率は 17% 小さくなる。特に拘束度が小さいほど拘束度評価の影響は大きくなることが図-12よりわかる。

次に、本研究では拘束度を検討対象とする材令における値として式(8)から発生応力を計算しているが、本来拘束度は材令によって変化するものであり拘束度を与える材令によりひびわれ発生確率も異なることが予想できる。そこで拘束度を与える材令によってひびわれ発生確率がどの程度変化するかについて具体例により検討する。検討モデルは被拘束体と拘束体の長さが等しく $L/H=8$ のスラブで打継間隔を4週間(以下wと略記)とし、 $\sigma_{28}=250 \text{ kgf/cm}^2$ (24.5 MPa), 400 kgf/cm^2 (39.2 MPa)の2ケースについて検討した。また、拘束度を与える材令は、材令1wと4wとした。材令1wは、部材内平均温度が最大値とほぼ安定温度となる中間の材令であり、材令4wは2.で述べたように本研究で用いたデータのはば最長材令に等しい。ここでは、 $\sigma_{28}=250 \text{ kgf/cm}^2$ (24.5 MPa), 400 kgf/cm^2 (39.2 MPa)の場合 σ_1/σ_{28} を0.53, 0.64, σ_{35}/σ_{28} を1.04, 1.03, σ_{56}/σ_{28} を1.11, 1.09とした¹³⁾。拘束度を1w, 4wで与えた場合の被拘束体と拘束体のヤング係数比 E_1/E_2 、拘束度Rの計算結果は $\sigma_{28}=250 \text{ kgf/cm}^2$ (24.5 MPa)の場合 E_1/E_2 が0.76, 0.96, Rが0.60, 0.56, $\sigma_{28}=400 \text{ kgf/cm}^2$ (39.2 MPa)の場合 E_1/E_2 が0.83, 0.97, Rが0.59, 0.56となる。なお、ヤング係数は式(5)で求めた。 $\sigma_{28}=250 \text{ kgf/cm}^2$ (24.5 MPa)の場合には $f=0.5$ のときひびわれ発生確率 P_1 および P_4 は53%および48%となり、その差は5%である。なお P_1 および P_4 はRを1w, 4wで与えたときのひびわれ発生確率を表わす。 $f=0.7$ とすれば P_1 および P_4 は27%, 23%となり、その差は4%となる。一方、 $\sigma_{28}=400 \text{ kgf/cm}^2$ (39.2 MPa)の場合には $f=0.5$ のとき P_1, P_4 は52%, 48%, $f=0.7$ のとき P_1, P_2 は26%, 23%となる。これらから、拘束度を与える材令を1wと4wとしてもそれぞれのひびわれ発生確率の差は5%程度であり、拘束度を与える材令がひびわれ発生確率に及ぼす影響は小さく、また、コンクリート強度が大きいほど拘束度を与える材令がひびわれ発生に及ぼす影響は小さいことがわかる。これは、拘束度算定の材令の違いによるヤング係数比の差が小さくなるためである。

(2) 引張強度

ここでは、同一圧縮強度に対する引張強度の評価の違いがひびわれ発生確率に及ぼす影響について圧縮強度

σ_{cB} と引張強度 σ_{ct} の関係を次の 3 式とし検討した。図-13 に各 σ_{ct} と σ_{cB} の関係を示した。

式(8)に示したように σ_{te} は σ_{ct} の関数ではないので式(4), 式(18), 式(19)で引張強度を与えたときのひびわれ指数の間には次の関係が成立する。

ここに、

ET_{si} : σ_{cli} に対する ET_s

図-14に式(4), 式(18), 式(19)で引張強度をえたときの圧縮強度と引張強度比の関係, 引張強度比とひびわれ指数の関係およびひびわれ指数とひびわれ発生確率の関係を示した. 図-14からわかるように同一の圧縮強度, 発生応力でも引張強度の評価の仕方によってひびわれ指数は大きく影響される. たとえば, $\sigma_{cb} = 100 \text{ kgf/cm}^2$ (9.8 MPa), $ET_{si} = 1.0$ としたとき, $ET_{sz} = 0.92$, $ET_{ss} = 1.63$ でこれに対応するひびわれ発生確率は 40 %, 48 %, 6 % と大きな差が生ずる. また, ひびわれ指数が大きいほど $\sigma_{ctu}/\sigma_{cti}$ が, ひびわれ発生確率に及ぼす影響が大となることがわかる.

次に引張強度と圧縮強度の関係を式(4)で与え図-14を用いて圧縮強度のばらつきがひびわれ発生確率に及ぼす影響について考える。ここで圧縮強度の変動係数を $v=10\%$ とすれば圧縮強度 σ_{cb} の上下限値の推定値は、次のとおりである。

ここに、

$\bar{\sigma}_{CB}$: 圧縮強度の平均値

\sqrt{V} ：分散の平方根

σ_{cb} の $\overline{\sigma_{cb}}$ に対する引張強度の比 $\sigma_{ct}/\overline{\sigma_{ct}}$ は、 1.19, 0.79 となる。このとき $\overline{\sigma_{ct}}$ に対するひびわれ指指数およびひびわれ発生確率を 1.0, 40 % とすれば、 $\sigma_{ct}/\overline{\sigma_{ct}}=1.19$ の

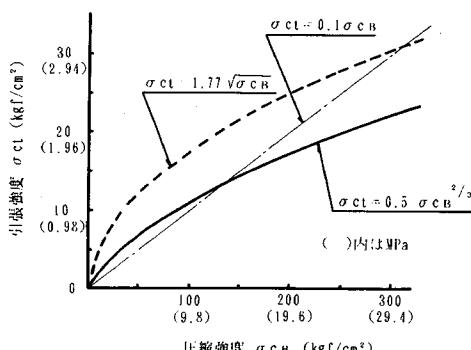


図-13 引張強度と圧縮強度との関係

とき $ET_s = 1.19$, $P = 27\%$, $\sigma_{ct}/\bar{\sigma}_{ct} = 0.79$ のとき $ET_s = 0.79$, $P = 57\%$ となる。このように同一コンクリートを施工した場合でもコンクリートの品質のばらつきによりひびわれ発生確率は大きく変化する。すなわち、このような施工に関連するコンクリート品質のばらつきが温度ひびわれ発生に及ぼす影響は大きく、温度ひびわれ発生現象を複雑なものにし、ひびわれ発生を確率的に取り扱うことを有効としていると考えられる。

以上のようにひびわれ発生確率は拘束度および引張強度の評価方法の影響を大きく受けるので、ひびわれ発生の評価をする場合には拘束度および引張強度は確率図を作成する際に使用した方法により算定する必要があると考えられる。

6. 温度ひびわれ指数の算定方法が温度ひびわれ指数と温度ひびわれ発生確率の関係に及ぼす影響

ここでは、ひびわれ指数の異なる算定方法、たとえば本研究で提案した方法と小野の方法ではひびわれ発生確率とひびわれ指数の関係にどのような差が出てくるかについて検討した。ここでは小野の方法と計算条件を同一とするため引張強度は $\sigma_{ct} = 0.1 \sigma_{cb}$ とした。なお、小野の方法による温度ひびわれ指数は次式で定義されている⁴⁾。

ここに、

$(T_{\max}^t)_a$: 材令 t における外部拘束による温度ひびわ

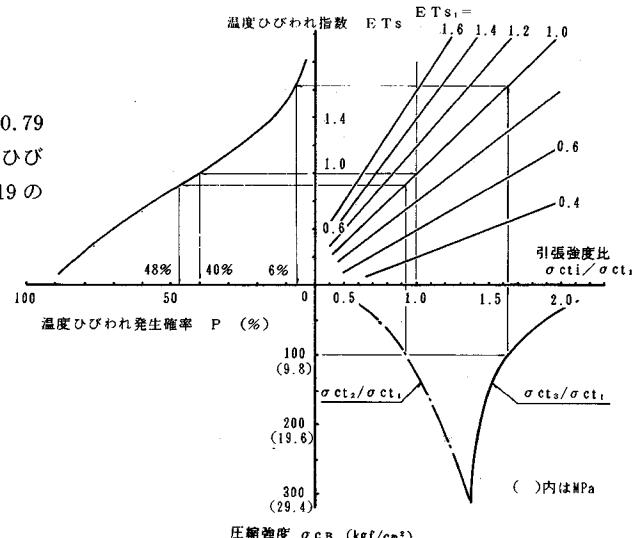


図-14 温度ひびわれ発生確率と温度ひびわれ指標と引張強度比と圧縮強度との関係

れの発生限界温度 (°C)

$$(T_{\max}^t)_a = \frac{1}{3} \left[\frac{4}{10 \cdot \alpha_c \cdot A(t) \cdot B(t) \cdot R} + 4 T_m^t - (T_p + T_{s,r}^{(t)}) \right]$$

 T_{\max} : 内部温度の最大値 (°C) $A(t)$: 材令 t における $E_a(t)$ と $\sigma_{cb}(t)$ の比率 T_p : 打込み温度 (°C) $T_{s,r}^{(t)}$: 内部温度が最大値を示した材令における表面温度上昇量 (°C)

検討に用いたデータは 4. (2) で用いたデータのうち文献 4) と共にデータとした。両方法から求めたひびわれ指数の関係をひびわれの有無別に図示したのが図-15、図-16である。ひびわれ有の場合には、それぞれのひびわれ指数間の相関は高いが、ひびわれ無の場合の相関は低い。図-15 からひびわれ有の場合の ET_{s2} のヒストグラムは ET_T のヒストグラムを $ET_{s2} = 0.7$ を中心に圧縮（分散が小さくなる）した形になることが推定できる。一方、ひびわれ無の場合には ET_{s2} と ET_T の間に一定の傾向がみられず、ヒストグラムの形は ET_T のヒストグラムに比べて分散の大きい分布となると推定できる。

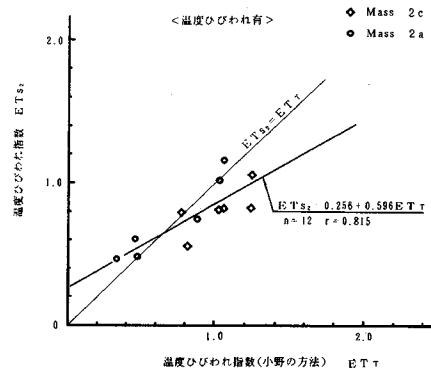


図-15 異なる方法で求めた温度ひびわれ指数の関係

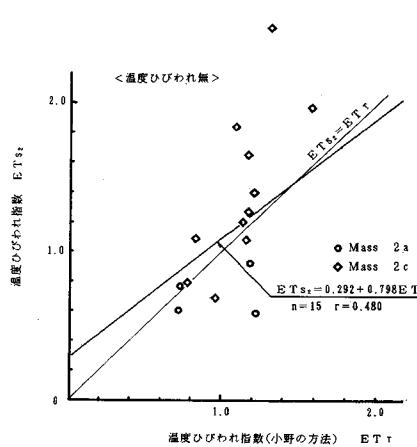


図-16 異なる方法で求めた温度ひびわれ指数の関係

以上のことからひびわれ発生確率とひびわれ指数の関係はひびわれ指数の算定方法が変われば異なることが認められる。

7. 温度ひびわれ指数法の適用性

本研究で提案した温度ひびわれ指数法によるひびわれ発生の評価方法の適用性を塚山が調査した実構造物におけるデータ²⁾により検討した。適用性の検討に用いたデータは 4 現場で調査されたもので表-5 に示した。同表中※印をつけたものは塚山の調査結果にデータが不足していたため著者らが推定し補ったものである。熱膨張率 α_c はすべて $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とし、ヤング係数は式 (5) で σ_{cb} から推定した。拘束度は図-4 および図-5 から推定した。クリープ係数は CEB/FIP の方法により算定した。

表-5 にひびわれ指数の計算値と図-11 から求めたひびわれ発生確率を示した。図-18 にひびわれ発生確率とひびわれ発生有無との対応を示した。ひびわれが発生している No. 4, No. 6, No. 7 のひびわれ発生確率は 60 % 以上であり、ひびわれが発生した現象とよい一致を示している。一方ひびわれが発生していない No. 1, No. 2, No. 3, No. 5, No. 8, No. 9 のひびわれ発生確率は No. 2 を除いて 9 % 以下と小さくひびわれが発生し

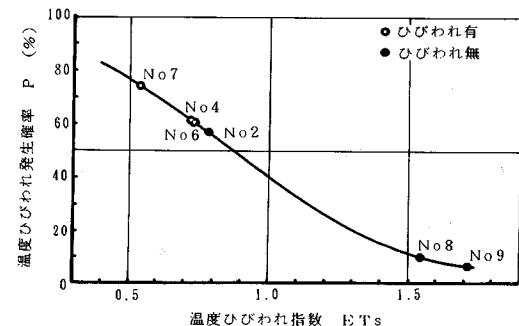


図-18 温度ひびわれ発生確率と温度ひびわれ発生有無の対比

表-5 温度ひびわれ指数法の適用性検討に用いたデータならびに温度ひびわれ発生確率

No.	データ名	α_c ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	σ_{cb} (kg/cm ²)	$\psi(t)$	R	T_{\max}^t (°C)	T_s^t (°C)	T_m^t (°C)	T_p (°C)	$T_{s,r}^{(t)}$ (°C)	T_{\max} (°C)	ET_s	発生確率(%)	温度ひびわれ発生有無
1	A現場 スラブ 1リフト	1.0	※ 10^{11}	t	0.1	46 (38)	37	43.8	24	5 [*]	52.5	17.21	5以下	無
2	A現場 スラブ 2リフト	1.0	※ 10^{11}	t	1.0	37 (30)	29	35	19	16	58.3	6.79	56	無
3	B現場 スラブ	1.1.4	※ 10^{11}	t	0.1	45.5 (38)	28.3	41.5	28.4	11.6	70.0	8.44	5以下	無
4	C現場 鉄骨	1.0	※ 10^{11}	t	0.17	10 [*] (38)	10 [*]	10 [*]	14	8.5	35.3	0.72	61	有
5	D現場 下層版 1リフト	1.1.2	1.37+0.35 1.30+0.24	2.75+1.27t 2.18+1.15t	0.1	46 (38)	28	41.5	26.1	5 [*]	63.1	7.33	5以下	無
6	D現場 下層版 2リフト	1.1.2	1.30+0.24	2.83+1.06t	1.0	30 (38)	26	29	29	11	50	0.73	60	有
7	D現場 鉄骨	1.1.2	1.35+0.18t	1.85+1.14t	0.85	33 (38)	21	29	31	16	69	0.54	74	有
8	D現場 中層版	1.1.2	1.35+0.18t	3.22+0.56t	0.4	18 (38)	18	18	21	10	56	1.55	9	無
9	D現場 上層版	1.1.2	1.30+0.24t	2.58+1.12t	0.3	15 (38)	15	15	19	8	57	1.72	5	無

※ 推定値 () 内は $T_{\max}^t - T_s^t - T_m^t$ の値である。

ていない現象とよい対応をしている。このように本研究で提案した温度ひびわれ指標によるひびわれ発生の判定結果は、比較的よく温度ひびわれ発生の有無の現象を評価することができることから、本方法は実用上有効なひびわれ発生の評価方法であると考えられる。また本方法を短期のひびわれ制御の検討に適用するのにあたっては、材令30日における拘束度を用いてひびわれ発生の判定を行い、材令30日以前にひびわれが発生する可能性がある場合には、拘束度を算定する材令を変更して再度ひびわれ発生の検討を行えばよい。

8. まとめ

本研究は、マスコンクリート構造物の外部拘束による温度ひびわれ発生を確率的に評価する方法を提案し、さらに温度ひびわれ発生確率に及ぼす外部拘束度、引張強度などの影響について検討したものである。本研究の結果、得られた主な成果を列挙すれば次のとおりである。

(1) 温度ひびわれ指標を引張強度とコンクリート温度が最大値を示した時点から発生した引張応力との比で、また温度ひびわれ発生確率を任意のひびわれ指標の範囲における温度ひびわれ発生データ数と同範囲の全データ数との比で定義し、実構造物における実測値を用いて作成した温度ひびわれ発生確率と温度ひびわれ指標との関係は比較的よく温度ひびわれ発生の現象を評価でき、この関係を用いることにより実用上有効な温度ひびわれ発生の評価ができることが認められた。

(2) 外部拘束度および引張強度の評価が温度ひびわれ発生確率に及ぼす影響は大きい。また拘束度を与える材令がひびわれ発生確率に及ぼす影響は小さい。

(3) 温度ひびわれ発生確率は外部拘束度および引張強度の評価方法の影響を大きく受けるので、温度ひびわれ発生の評価をする場合には外部拘束度および引張強度は温度ひびわれ発生確率図を作成する際に使用した方法により算定する必要がある。

(4) 温度ひびわれ指標の算定方法が異なれば温度ひびわれ発生確率と温度ひびわれ指標との関係（温度ひびわれ発生確率図）は異なるので、温度ひびわれ発生の評価を行う際には使用する温度ひびわれ発生確率図に対応する温度ひびわれ指標を用いる必要がある。

マスコンクリート構造物の施工段階における温度ひびわれ発生を確率的に評価することは温度ひびわれ制御対策を検討するうえで有効な方法であるが、今後温度ひびわれ発生をさらに精度よく評価するためには多くの正確な実構造物の温度、ひびわれ、強度などのデータの蓄積さらに精度の高い応力の評価が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査・補修指針 付：ひびわれの調査と補修事例 昭和55年5月。
- 2) たとえば、塚山隆一：マッシブな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究、東大学位論文、1974。
- 3) 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方法に関する研究、土木学会第36回年次学術講演会講演概要集、1981.10.
- 4) 小野 定：マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する研究、北大学位論文、昭和59年9月。
- 5) 山本紀夫・秋山晴樹・中元雄治：下津井瀬戸大橋4Aアンカレイジの施工(1), 本四技報, Vol. 8, No. 3, 1984.10.
- 6) 吉岡保彦・両角昌公・渡辺真次：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、日本コンクリート工学協会第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、1984.3.
- 7) 大崎幸雄・庄野 昭・杉山 律・河田秋澄：温度ひびわれ発生危険度の簡易評価システムについて、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985.
- 8) 小野 定：マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する一考察、セメント技術年報33、昭和54年。
- 9) 土木学会：コンクリートライブラー第52号コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)、昭和58年11月。
- 10) 横道英雄：コンクリート橋、技報堂出版。
- 11) CEB/FIP Model Code for Concrete Structure, 1978.
- 12) 関島謙蔵：マスコンクリートにおける基礎くい群の拘束度の推定方法、セメント技術年報36、昭和57年。
- 13) セメント協会コンクリート専門委員会：各種セメントを用いたコンクリートの長期強度、セメントコンクリート、No. 246, 1967.
- 14) ACI Committee 207 : Effect of Restraint Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal, Vol. 70, No. 7, July, 1973.

(1986.3.17・受付)