

## [14] 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

正会員 ○森本博昭 (岐阜大学工業短期大学部)

正会員 小柳 治 (岐阜大学工学部)

### 1、まえがき

マスコンクリートの温度ひびわれに対する危険度を評価する場合、温度応力解析から得られる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引張ひずみ能力とを対比させ、その危険性を評価するのが一般的であり、中でも温度応力が引張強度を上回った時に温度ひびわれが発生すると確定論的に判断することが多い。しかし、温度応力解析から得られる応力あるいはひずみとそれに対する引張強度ならびに引張ひずみ能力のいずれもが避けがたい誤差とばらつきを有する量があり、従ってこれらにもとづく、温度ひびわれ危険度の評価も確率論的、もしくはある誤差の範囲を前提として行なわなければならない。

本研究は43例のコンクリート構造物を対象として、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、解析により得られた温度応力とこれに対するコンクリートの引張強度から温度ひびわれ危険度を表す指標を算出し、温度ひびわれの発生とこの指標の分布との関連性ならびにこれにおよぼす温度応力発生メカニズムの影響などを明らかにしたもので、今後温度ひびわれ危険度の評価を行う際の有力な参考資料を得ようとするものである。

### 2、温度ならびに温度ひびわれ予測手法

本研究では有限要素法により温度解析と温度応力解析を実施した。温度応力のクリープ解析では初期ひずみ法を適用し各時間ステップにおけるクリープひずみの増分は履歴理論を適用し、また一軸応力下におけるクリープひずみの多軸応力場への拡張はクリープボアソン比を用いた。その際クリープボアソン比は弾性ボアソン比に等しいものと仮定した。解析で用いた諸定数ならびに温度ひびわれ予測手法の概要を以下に述べる。なお有限要素法による各解析の定式化については関連の参考書<sup>(1)</sup> 参照されたい。

まず温度解析におけるコンクリートの発熱率は断熱温度上昇を用い既往の研究成果<sup>(2)</sup> を参考にして単位セメント量と打ち込み温度からこれを推定した。コンクリートの熱伝導率と比熱は著者等の研究<sup>(3)</sup> によりそれぞれ平均的な値、すなわち  $2.16 \text{ k cal/m h }^{\circ}\text{C}$  および  $0.24 \text{ k cal/kg }^{\circ}\text{C}$  を用いた。さらに熱伝達率については既往の研究成果<sup>(4)</sup> によりコンクリート面では  $10.0 \text{ k cal/m}^2 \text{ h }^{\circ}\text{C}$  合板型枠面では  $5.0 \text{ k cal/m}^2 \text{ h }^{\circ}\text{C}$  そして剛製型枠面では  $12.0 \text{ k cal/m}^2 \text{ h }^{\circ}\text{C}$  とし、その他の型枠面では材質および厚さを考慮して値を決定した。次ぎに、温度応力解析ではコンクリートの弾性係数およびクリープ特性をマチュリチーを考慮した有効材令の関数として評価した。その際の算定式は岡田博士らの 研究成果<sup>(5)</sup> を参考にして導いた算定式<sup>(6)</sup> を用いた。一方、クリープ特性については次式の C E B - F I P コード提案のクリープ係数算定式を用いた。<sup>(7)</sup> 次ぎに温度ひびわれ予測については、温度応力  $\sigma_p(t)$  コンクリートの引張強度  $\sigma_{cap}(t)$  から次式のようにひびわれ危険指標  $I_1$  を定義し指標  $I_1$  の値と温度ひびわれ発生との関係を検討した。

$$\text{ひびわれ危険指標 } I_1 = \frac{\sigma_p(t)}{\sigma_{cap}(t)} \quad (1)$$

なお、従来のような確定論的な温度ひびわれ予測法においては  $I_1 = 1$  をひびわれ発生線とし  $I_1 > 1$  をひびわれ発生域、そして  $I_1 < 1$  を安全域と考えている。さらに温度ひびわれの危険度を表す指標として本研究で定義したひびわれ危険指標 ( $I_1$ ) の逆数 ( $1/I_1$ ) を用いた研究<sup>(8)</sup> も見うけられる。

### 3、解析対象構造物

本研究で解析を行った構造物は柱、はり、フーチングなど内部拘束が卓越するもの17例と壁、スラブなど、外部拘束が卓越するもの26例の合計43例である。各構造物の寸法、コンクリートの配合と力学的性質、ひびわれ発生の有無など施工に関する諸条件<sup>(9)(10)(11)</sup> を表-1に示す。

### 4、解析結果と考察

#### 4-1 コンクリートの温度上昇

図-1に内部拘束が卓越する構造物 (No.1～No.17) についての、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に外部拘束が卓越する構造物 (No.18～No.43) につ

いての、ひびわれ有と無における平均温度降下量の分布を示す。図-1から内部拘束が卓越する構造物において、ひびわれ有における最大温度差の範囲は28.7~54.6°Cで平均41.6°Cである。一方ひびわれ無では12.1~39.3°Cで平均は28.0°Cである。即ち、ひびわれ発生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全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発生は認められていない。図-2から外部拘束が卓越する構造物において、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で平均28.7°Cである。一方、ひびわれ無では9.1~26.7°Cで平均18.9°Cとなっている。ひびわれ有と無とが混在する平均温度降下量の範囲は15.3~26.7°Cで、これ以上では全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内の温度上昇

表-1 解析構造物資料

NO	拘束の種類	部材厚(D)	長辺長(L)	短辺長(H)	セメントの種類	単位セメント量	圧縮強度	引張強度	弾性係数*10 <sup>4</sup>	打設温度	施工時期	脱型材令	型枠の種類	ひびわれの有無
		m	m	m		Kg/m <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>3</sup>						
1	内	—	1.55	1.55	普通	276	242	20.7	25.5	11.0	冬	6	合板	無
2	内	—	1.55	1.55	普通	276	242	20.7	25.5	29.0	夏	6	合板	無
3	内	—	3.0	2.6	普通	381	360	25.5	29.8	33.0	夏	6	鋼	無
4	内	—	3.0	2.6	普通	381	360	25.5	29.8	33.0	夏	6	合板	有
5	内	—	3.0	2.6	普通	381	360	25.5	29.8	33.0	夏	1	シート	有
6	内	—	6.0	4.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	1.5	合板	有
7	内	—	6.0	4.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	8	合板	有
8	内	—	6.0	4.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	28	合板	有
9	内	—	6.0	2.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	2	合板	有
10	内	—	6.0	2.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	2	合板	有
11	内	—	6.0	2.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	20	合板	無
12	内	—	4.0	1.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	2	合板	無
13	内	—	4.0	1.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	2	合板	無
14	内	—	4.0	1.0	普通	350	382	26.5	30.0	15.0	冬	11	合板	無
15	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	242	20.7	25.2	11.0	冬	4	合板	有
16	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	242	20.7	25.2	29.0	夏	6	合板	無
17	内	3.6	7.2	6.08	普通	276	258	21.0	25.3	13.0	冬	5	合板	無
18	外	1.35	10.0	5.6	普通	270	242	20.7	25.7	18.0	冬	10	合板	有
19	外	1.3	13.0	3.5	普通	285	240	21.0	25.5	20.0	秋	4	合板	無
20	外	1.3	13.0	3.4	普通	285	240	21.0	25.5	20.0	秋	4	合板	有
21	外	0.3	8.0	2.0	普通	300	336	28.6	32.1	30.0	夏	3	合板	無
22	外	1.0	8.0	2.0	普通	300	336	28.6	32.1	30.0	夏	3	合板	無
23	外	0.8	20.0	3.6	普通	371	305	25.0	28.7	25.0	夏	9	合板	有
24	外	1.4	20.0	4.9	普通	366	348	28.0	31.0	27.0	夏	9	合板	有
25	外	0.8	9.8	3.1	普通	284	207	19.0	20.8	25.0	夏	9	合板	有
26	外	0.65	8.0	2.7	普通	403	390	33.2	30.3	21.0	冬	6	合板	有
27	外	0.4	27.3	2.8	普通	294	288	21.7	24.8	25.0	冬	5	合板	無
28	外	1.6	18.8	4.2	高B	299	243	20.2	29.6	27.0	秋	10	鋼	有
29	外	1.3	27.0	3.4	高B	299	243	20.2	29.6	23.0	秋	10	鋼	無
30	外	0.9	25.0	1.5	普通	306	296	23.6	32.1	12.0	冬	6	鋼	有
31	外	0.9	25.0	2.4	普通	306	296	23.6	32.1	23.5	春	6	鋼	有
32	外	0.9	25.0	1.8	普通	306	296	23.6	32.1	30.0	夏	6	鋼	有
33	外	0.7	25.0	3.1	普通	306	296	23.6	32.1	22.0	秋	6	鋼	有
34	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	311	24.6	32.8	27.0	春	5	鋼	有
35	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	312	24.6	32.8	25.5	夏	5	鋼	有
36	外	1.1	25.0	3.9	普通	306	297	23.7	32.2	29.0	夏	5	鋼	有
37	外	1.0	25.0	3.9	普通	306	307	24.4	32.6	27.8	春	5	鋼	有
38	外	2.2	28.5	2.5	中庸	256	249	20.6	30.2	28.1	夏	4	合板	有
39	外	2.0	28.5	2.5	中庸	256	249	20.6	30.2	22.1	秋	4	合板	有
40	外	1.8	28.5	2.5	中庸	256	249	20.6	30.2	22.6	秋	4	合板	有
41	外	1.7	8.1	3.1	高A	266	222	18.8	28.6	14.0	春	3	鋼	無
42	外	1.7	8.1	3.1	高A	266	222	18.8	28.6	14.0	春	5	鋼	無
43	外	1.7	8.1	3.9	高A	279	222	18.8	28.6	23.5	夏	23	鋼	無

特性の他に、コンクリートの物性、構造物の形状、外部拘束度、あるいは施工条件など数多くを上げることが出きるが、ここでは構造物内の温度上昇特性のみに注目して温度ひびわれとの関係を検討した結果、内部拘束が卓越する場合は中心と表面の最大温度差が、一方外部拘束が卓越する場合は平均温度降下量がそれぞれ重要な要因となっていることが確認された。

#### 4-2、ひびわれ危険指數 ( $I_1$ )

図-3に、式(1)により算出した各構造物のひびわれ危険指數  $I_1$  の最大値の分布を示す。指數の値は、各構造物において温度応力が最大となる箇所におけるものである。図から、ひびわれ有における指數の範囲は  $0.65 \sim 2.04$  で、指數の値が  $I_1 < 1$  でも 7 例においてひびわれが発生している。その中でも最も小さな値を示したもののは No. 18 構造物の 0.65 および No. 4 構造物の 0.66 あり、本研究の範囲内ではひびわれ有の指數の下限値は 0.6 程度の値となった。一方、ひびわれ無における指數の範囲は  $0.19 \sim 1.25$  で大部分が  $I_1 < 1$  の範囲内にあるが  $I_1 > 1$  でもひびわれが発生しなかったものが 2 例あった。このうち指數の上限は 1.25 (構造物 No. 13) であった。次ぎに、図-4, 5 は内部拘束が卓越するものと外部拘束が卓越するものの各々におけるひびわれ危険指數の最大値の分布を示したものである。

図-4 から、内部拘束が卓越する場合、ひびわれ有における指數の範囲は  $0.66 \sim 1.94$ 、ひびわれ無の場合  $0.24 \sim 1.25$  となっており、特にひびわれ有と無の例が混在する範囲は  $0.66 \sim 1.25$  となっている。一方、図-5 から、外部拘束が卓越する構造物ではひびわれ有の場合の指數の範囲は  $0.65 \sim 2.04$  で、ひびわれ無の場合  $0.19 \sim 0.97$  であり、ひびわれ有と無の例が混在する範囲は  $0.65 \sim 0.97$  となっている。即ち、図-4, 5 から明らかなように、ひびわれ有と無の各々におけるひびわれ危険指數の分布範囲は、内部拘束が卓越する構造物と外部拘束が卓越する構造物との間には大きな差異は認められず、従ってひびわれ危険指數の値により温度ひびわれ予測あるいは制御について検討を行う際、内部拘束が卓越する場合と外部拘束が卓越する場合とを特に区別する必要はないものと考えられる。以上、

43 例におけるひびわれ危険指數  $I_1$  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、 $I_1 > 1.2$  の場合はひびわれ発生の可能性が高く、反対に  $I_1 = 0.6$  の場合はひびわれの危険性は低いと推定しても大きな誤りはないものと

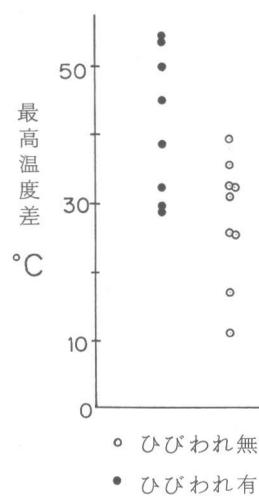


図-1 最大温度差  
(内部拘束)

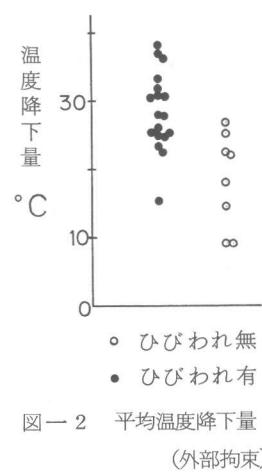


図-2 平均温度降下量  
(外部拘束)

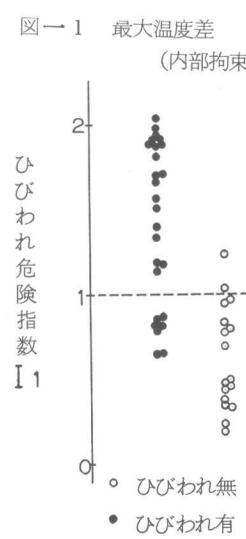


図-3 指数 ( $I_1$ )

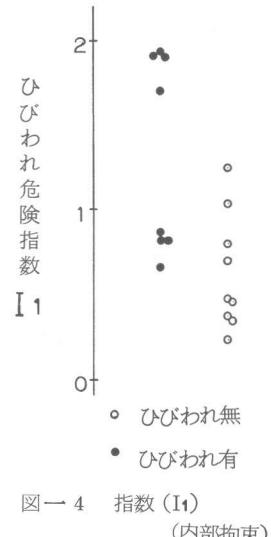


図-4 指数 ( $I_1$ )  
(内部拘束)

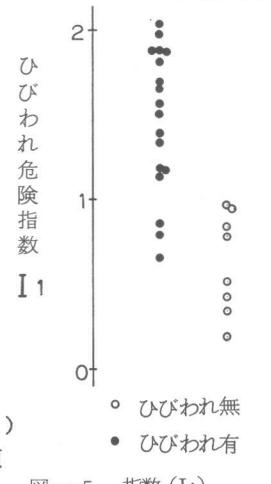


図-5 指数 ( $I_1$ )  
(外部拘束)

考えられる。さて、前述のようにひびわれの危険度をあるいは安全度を表す指標として本研究で定義したひびわれ危険指數  $I_1$  の逆数 ( $1/I_1$ ) をひびわれ安全度と定義し、これを用いてひびわれ安全度の評価を行った報告も見受けられるが、図-6に各構造物におけるひびわれ危険指數  $I_1$  の逆数 ( $1/I_1$ ) の分布を示す。図-6から、ひびわれ有における指數 ( $1/I_1$ ) の範囲は、0.49 (構造物 No 40) ~ 1.54 (構造物 No 18) であり、一方ひびわれ無の場合は0.80 (構造物 No 13) ~ 5.26 (構造物 No 43) となっている。即ち、ひびわれ有と無が混在する指數の範囲は0.8~1.54で、 $(1/I_1) < 0.8$  ではすべての例でひびわれが発生しており、一方  $(1/I_1) > 1.54$  ではひびわれの発生は生じていない。

### 5.まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結論をまとめると次ぎのようになる。

(1) 内部拘束が卓越する場合、ひびわれ有と無とが混在する最大温度差の範囲は  $28.7 \sim 39.3^{\circ}\text{C}$  であり、この範囲より上では全ての例でひびわれが発生しております、逆にこの範囲より下においてはひびわれは発生していない。一方外部拘束が卓越する構造物において、ひびわれ発生有と無の例が混在する場合の平均温度降下量の範囲は  $15.3 \sim 26.7$  であり、この範囲より上では全ての例で発生しております逆にこれより下においてはひびわれは発生していない。

(2) ひびわれ有と無の例が混在するひびわれ危険指數  $I_1$  の範囲は  $0.65 \sim 1.25$  で、この範囲より上では全ての例でひびわれが発生しております、逆にこれより下ではひびわれは発生していない。従って指數  $I_1$  の値が  $0.6 < I_1 < 1.2$  の範囲はひびわれ有と無とが混在する領域、そして  $I_1 > 1.2$  の場合はひびわれ発生の可能性が高く、 $I_1 < 0.6$  の場合はひびわれの危険性は低いと判定しても大きな誤りはないものと考えられる。

(3) ひびわれ危険指數  $I_1$  の逆数 ( $1/I_1$ ) は、ひびわれ有と無とが混在する領域では  $0.80 \sim 1.54$  の値となり、そして  $(1/I_1) < 0.8$  の場合は全ての例でひびわれが発生しております、 $(1/I_1) > 1.54$  ではひびわれは生じていない。

### <謝辞>

本研究を実施するにあたり、資料の提供或は研究成果を参考にさせて頂いた方々に対し、それらを参考文献に掲げて深謝いたします。また、資料整理に協力いただいた近藤照子職員に感謝します。

### (参考文献)

- (1) 例えは、O.C.Zienkiewicz: マトリックス有限要素法, 培風館, 1975
- (2) 田沢、松岡: マスコンクリートの施工法, 大成建設技術報告, 238, 1976
- (3) 小柳、森本: コンクリート構造物の熱伝導解析についての2, 3の考察, 岐阜大学工研報, 31, 1981
- (4) 山川、田辺、笠原: 热伝導率の試験ならびに実測例, マスコンコロキウム論文集, 1982
- (5) 岡田、小林、宮川、村本、コンクリートの基本的性質に関する一考察, セメ技年報 34, 昭55
- (6) 森本、小柳: コンクリート構造物の温度応力における2, 3の問題点, マスコンコロキウム論文集, 1982
- (7) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 1978
- (8) 吉岡、両角、渡辺: 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回マスコンコロキウム論文集, 1984
- (9) T.C.Hansen: Surface cracking of mass concrete structures at early form removal, RILEM No 28, 1965
- (10) 小野、柳田、名倉、金森、江渡: マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策の研究, 第2回マスコンコロキウム論文集, 1984
- (11) 崎本、十河、三浦: 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, マスコンコロキウム論文集, 1982

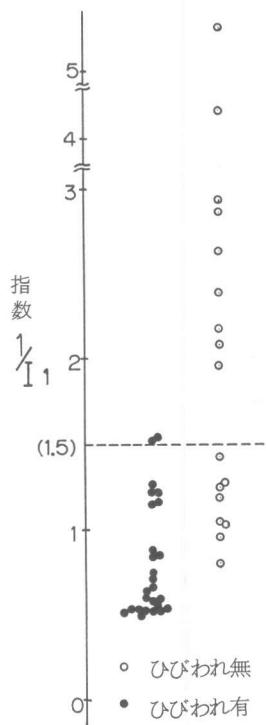


図-6 指数 ( $1/I_1$ )