

論文 温度ひび割れ危険度評価法の適用性について

呉 昊^{*1} ・ 森本 博昭^{*2}

要旨：コンクリート構造物の大型化，高機能化に伴い，施工段階でしばしば生じる温度ひび割れが問題となっている。温度ひび割れ発生確率を推定する方法として，土木学会コンクリート標準示方書に温度ひび割れ指数を用いる方法が推奨されており，そのほかにもいくつかの温度ひび割れ簡易評価法が提案されている。しかし，これら簡易評価法の適用性については十分に検討されていないのが現状である。そこで，本研究は 30 例の施工実施例を用いて，各種の温度ひび割れ危険度評価法の適用性を統一的に検討するものである。

キーワード：温度ひび割れ，温度ひび割れ指数，温度解析，温度応力解析。

1. はじめに

近年のコンクリート構造物の大型化，高機能化に伴い，施工段階における温度ひび割れの発生事例が増えている。温度ひび割れ危険度評価については，土木学会コンクリート標準示方書¹⁾（以下，示方書という）に温度ひび割れ指数を用いる方法が推奨されている。温度ひび割れ指数は強度と温度応力の比で定義されるので，指数を算定するためには，解析により温度応力を求めなければならない。温度応力は FEM あるいは CP 法などで算定することができるが，場合によっては多大な計算コストと時間を費やさなければならない。このような事情から，温度ひび割れ指数およびひび割れ危険度評価に関する簡易式が，現在まで示方書推奨式を初めとしていくつか提案されている。しかし，これらの簡易式は適用性と適用範囲が明らかにされていないのが現状である。本研究は多数の実構造物の温度，温度応力解析を実施して，既往の簡易式の適用性について統一的評価を行うものである。

2. 研究概要

2.1 温度ひび割れ簡易評価式

温度ひび割れ指数は一般的に CP 法あるいは

FEM による温度応力解析をもとに算定される。一方，温度ひび割れ指数の簡易算定式として土木学会簡易式がある。そして，ひび割れ危険度評価式には，塚山式，山崎式，石崎・青柳式などがある。以下にそれぞれの概要を説明する。

(1) 土木学会簡易式

(a) 内部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひび割れ指数} = 15 / \Delta T_i \quad (1)$$

ここに， ΔT_i ：最大内外温度差。

(b) 外部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひび割れ指数} = 10 / (R \Delta T_o) \quad (2)$$

ここに， ΔT_o ：最大平均温度差、

R ：拘束係数。

(2) 塚山式²⁾

$$T_{cr} = \frac{12}{0.1 + 0.25\sqrt{W} + 0.8k} \quad (3)$$

ここに， W ：壁の厚さ(m)

k ：外部拘束度

T_{cr} ：ひび割れ発生限界温度(°C)。

(3) 山崎式および石崎・青柳式³⁾

(a) 山崎式：

$$K_R \Delta T_o = 10 \quad (4)$$

*1 岐阜大学大学院工学研究科 (正会員)

*2 岐阜大学工学部教授 工博 (正会員)

(b) 石崎・青柳式：

$$K_R \Delta T_o = 7.67 \quad (5)$$

ここに、 K_R ：拘束係数 ΔT_o ：最大温度降下量。

なお、式(2)~(5)における拘束係数および外部拘束度は、いずれも温度ひずみに対する拘束ひずみの比として定義されていると考えられる。

2.2 構造物施工データ

本研究で解析した構造物は、土木学会年次学術講演会講演概要集、日本コンクリート工学協会コンクリート工学年次論文報告集およびマスコンク

リートのひび割れ制御指針、土木学会コンクリート技術シリーズ“最新のマスコンクリート技術”⁴⁾などで施工事例として報告されたものである。内訳は、壁体が18例、スラブが7例、その他（基礎頂板、フーチンク、ケーソン、塔基など）が5例である。セメントの種類は普通ポルトランドセメントを始め、中庸熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントなどとなっている。施工時期は春、夏、秋、冬の四季におよんでいる。養生方法は、断熱養生、湛水養生、シート養生などである。各構造物の施工データを表-1に示す。

表-1 解析構造物データ一覧表

解析 ケース	構造物 種類	構造物 長 (mm)	構造物 高 (mm)	構造物 厚 (mm)	拘束体の 弾性係数 (N/mm ²)	使用セ メント	打ち込 み温度 (°C)	温度上 昇量 Q_{∞} (°C)	温度上 昇速度 (r)	設計基準 強度 (N/mm ²)
1 ⁵⁾	壁体	30000	5450	1700	5000	高炉	20	27.99	0.548	24
2 ⁵⁾	壁体	10000	3200	1200	20000	普通	12	46.71	0.852	30
3 ⁵⁾	壁体	5000	3200	1200	20000	普通	12	46.71	0.852	30
4 ⁶⁾	壁体	21800	6150	850	20000	普通	28	44.5	1.521	24
5 ⁶⁾	壁体	17800	1962	700	2000	普通	22	40.54	1.048	24
6 ⁶⁾	壁体	17800	1962	700	2000	普通	22	37.8	0.916	24
7 ⁶⁾	壁体	3650	3000	1300	1500	早強	20	50.04	1.469	24
8 ⁶⁾	壁体	10000	3200	1200	25000	普通	20	46.50	1.180	30
9 ⁶⁾	壁体	10000	3600	1200	25000	普通	20	40.00	1.000	30
10 ⁷⁾	壁体	10000	4170	1000	25000	普通	27	43.50	0.852	30
11 ⁸⁾	壁体	15000	1500	1000	25000	普通	15	57.87	0.716	30
12 ⁹⁾	壁体	6250	3000	700	10000	普通	11	44.76	0.606	24
13 ⁹⁾	壁体	5000	3000	1200	1000	低熱	16.7	39	0.652	30
14 ¹⁰⁾	壁体	20000	3000	2300	2000	普通	20	42.8	0.994	24
15 ¹⁰⁾	壁体	20000	1075	600	2000	普通	30.5	62.6	2.117	21
16 ¹⁰⁾	壁体	10000	3000	1000	1000	普通	22	33	0.778	21
17 ¹⁰⁾	壁体	8600	2600	1000	5000	高炉	26.5	46.6	1.060	24
18 ¹¹⁾	壁体	6100	1850	1200	20600	普通	24	32.0	0.700	30
19 ¹⁰⁾	スラブ	64000	64000	5400	200	高炉	10	38.4	0.334	24
20 ⁶⁾	スラブ	9060	9060	2000	100	高炉	24	45.0	0.920	30
21 ⁶⁾	スラブ	12300	7900	500	2300	普通	29.4	46.8	1.576	30
22 ⁶⁾	スラブ	12300	7900	500	2300	普通	30.6	46.7	1.628	30
23 ⁶⁾	スラブ	11300	10230	500	2300	低熱	30	22.60	1.128	30
24 ⁶⁾	スラブ	9060	9060	2000	100	早強	18	50.4	1.30	30
25 ¹²⁾	スラブ	44000	(直径)	6000	1000	低熱	30	19.1	1.872	24
26 ¹⁰⁾	梁状物	27000	2200	1200	5000	普通	24	61.4	0.700	30
27 ⁵⁾	フーチンク	12000	12000	4000	100	中庸熱	9.5	33.5	0.430	30
28 ⁵⁾	フーチンク	27000	17000	4500	1000	高炉	20	28.0	0.554	30
29 ⁶⁾	ケーソン	21200	10200	4000	1000	早強	19	49.49	1.332	30
30 ⁶⁾	塔基	8000	3000	4500	30000	普通	16.5	51.5	1.200	50

2.3 解析方法

温度解析は二次元 FEM, 温度応力解析は CP 法ならびに FEM を用いた。解析にあたり節点数、要素数, ステップ数, 最大対流境界数など解析モデルデータは原文献で示されたものを用いた。比熱, 熱伝導率, 熱伝達率, 密度, 強度, 外気温, コンクリートの打ち込み温度など温度解析関係のデータも原文献のものを用いた。

断熱温度上昇式 $Q(t)$ (°C) は次式を用いた。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (7)$$

ここに、 Q_{∞} : 終局温度上昇量(°C)

r : 温度上昇速度に関する定数

t : 材令 (日)。

諸特性が文献中に示されていない場合は温度および温度応力実測値を参考しながらこれらを決定した。CP 法で解析するときの拘束係数は JCI マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書 (1998.4 出版) で示されたものを用いた。

温度ひび割れ指数を算定する際の引張強度は、示方書に示されている算定式を用いて推定した。また、土木学会簡易式を用いる際の拘束係数 R の値については本研究で解析した外部拘束が卓越する構造物 (8 例) の拘束体は全て既設コンクリートであることから、示方書の推奨値を参考にして一律 0.6 を用いた。

表-2 温度解析結果

解析 ケース	中心最高 温度(°C)	表面温度 (°C)	最大温度 差(°C)	平均最大 温度(°C)	平均外 気温(°C)	最大温度 降下量(°C)
1	38.9	21.9	17	31.5	15	16.5
2	41.4	22.1	19.3	28.3	6	22.3
3	41.4	22.1	19.3	28.3	6	22.3
4	59.7	42	17.7	50.9	28	22.9
5	45.8	38.2	7.6	39.7	22	17.7
6	43.1	36.6	6.5	37.6	22	15.6
7	65.4	36.8	28.6	50.5	10	40.5
8	49.8	30.2	19.6	39.4	10	29.4
9	44.9	30.2	14.7	35.8	10	25.8
10	53	34.6	18.4	44.2	20	24.2
11	45.8	32.9	12.9	35.7	15	20.7
12	37.2	25.5	11.7	28	15	13
13	33.8	25	8.8	27.2	15	12.7
14	55.6	25.2	30.4	37.9	15	22.9
15	63.2	42.8	20.4	52.8	25.5	27.3
16	41.7	33.1	8.6	36.3	20	16.3
17	52.1	26.2	25.9	40.5	21.5	19
18	46.2	29.4	16.8	39.7	20	19.7
19	46.8	17.1	29.7	38.1	5	33.1
20	54.5	41.6	13.9	43.8	27	16.8
21	50.9	42.9	8	45.6	20	25.6
22	51.8	42.3	9.5	45	20	25
23	36.5	32.7	3.8	33.8	20	13.8
24	61.6	40.1	21.5	48.7	27	11.7
25	51.1	38.2	12.9	40.9	27	13
26	62	31	31	51	19	32
27	42.7	29.4	13.3	30.5	4.5	26
28	43	29.4	13.6	26.3	15	11.3
29	69.6	58	11.6	57	17	40
30	64.9	22.4	42.1	42	10	32

3. 解析結果

3.1 温度解析結果

各構造物の温度解析の結果を表－2に示す。

3.2 温度ひび割れ指数

各評価式による温度ひび割れ指数およびひび割れ危険度評価結果を表－3に示す。

表中にはFEMとCP法による温度ひび割れ

指数とあわせて、土木学会簡易式による温度ひび割れ指数および各簡易評価式によるひび割れ危険度評価結果、ならびに実構造物におけるひび割れの有無が示されている。なお、土木学会簡易式の適用にあたっては、CP法で用いる軸拘束係数が0.5未満の場合は内部拘束卓越、そして、0.5以上の場合は外部拘束卓越と判断した。

表－3 温度ひび割れ評価結果

対象 ケース	CP 法	二次元 FEM法	土木学会 式(内部)	土木学会 式(外部)	塚山の 評価式	山崎の 評価式	石崎青柳 評価式	ひび割れ の有無
1	0.70	0.85	Δ	1.01	○	×	○	○
2	0.75	0.61	0.77	Δ	○	○	○	○
3	0.89	0.81	0.77	Δ	○	○	○	○
4	0.60	0.66	0.85	Δ	○	○	○	○
5	1.08	1.21	Δ	0.94	○	○	○	×
6	1.41	1.35	Δ	1.07	○	×	○	×
7	0.86	0.85	0.52	Δ	○	○	○	○
8	0.68	0.76	0.77	Δ	○	○	○	○
9	0.76	0.95	1.02	Δ	○	○	○	○
10	1.00	1.00	0.82	Δ	○	○	○	○
11	0.80	0.68	Δ	0.81	○	○	○	○
12	1.06	1.59	1.28	Δ	×	×	○	×
13	2.90	3.15	1.70	Δ	×	×	×	×
14	0.59	0.86	0.49	Δ	○	○	○	○
15	0.98	1.21	Δ	0.61	○	○	○	○
16	2.36	1.09	1.74	Δ	○	×	○	×
17	0.84	0.58	0.58	Δ	○	○	○	○
18	1.27	1.34	0.89	Δ	○	○	○	×
19	0.83	1.21	0.51	Δ	Δ	Δ	Δ	×
20	Δ	0.74	1.08	Δ	Δ	Δ	Δ	○
21	1.21	0.99	Δ	0.65	Δ	○	○	○
22	0.90	0.82	Δ	0.67	Δ	○	○	○
23	1.73	1.53	Δ	1.21	Δ	×	○	○
24	Δ	0.60	0.70	Δ	Δ	Δ	Δ	○
25	0.86	1.10	1.16	Δ	Δ	×	○	×
26	1.04	0.93	0.48	Δ	Δ	○	○	○
27	1.25	1.03	1.13	Δ	Δ	×	×	×
28	1.28	2.00	1.09	Δ	Δ	×	×	×
29	0.63	1.60	1.29	Δ	Δ	Δ	Δ	×
30	0.44	0.55	0.36	Δ	Δ	Δ	Δ	○

注： 表中の数値は各算定方法による温度ひび割れ指数、○はひび割れあり、×はひび割れ無し、Δは評価方法の適用範囲外である場合を示す。

表－3で示した温度ひび割れ指数について、FEMによる温度ひび割れ指数の値に対するCP法および土木学会簡易式による指数の誤差を表－4に示す。なお、誤差は次式により算出した。

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum (I_f - I_l)^2}}{n} \quad (8)$$

ここに、 ε ： 誤差

I_f ： FEM法による温度ひび割れ指数

I_l ： CP法および簡易式による温度ひび割れ指数

n ： データ数。

表－4 各算定法による指数の誤差

種類	CP法	土木学会式 (内部卓越)	土木学会式 (外部卓越)
構造物全体	0.26	0.34	0.25
壁体構造物	0.22	0.32	0.24
スラブ構造物	0.22	0.30	0.27
他の構造物	0.43	0.39	

表－4から、まずCP法による指数の誤差は構造物全体を対象とした場合は0.26で、壁体、スラブについてもほぼ同程度の誤差となっている。しかし、他の構造物については誤差が0.43と増大している。これは、他の構造物の中にCP法の適用が問題となるものが含まれていたことによると考えられる。

内部拘束卓越の場合の土木学会簡易式の誤差は、構造物種類の影響は比較的に小さく0.30～0.39で、CP法に比べて精度が低くなっている。外部拘束卓越の場合の誤差は0.24～0.27で、内部拘束卓越の場合にくらべて誤差が小さくなっている。CP法と比較しても、精度の差異は小さい。ただし、外部拘束が卓越する場合の算定

式は、指数の値に大きな影響を与える外部拘束度Rの推奨値がかなり大略的で、その適用にあたってはRの妥当性についての吟味が必要である。

3.3 温度ひび割れ危険度評価

表－3で、温度ひび割れ危険度を各簡易式で判定した結果と実構造物におけるひび割れの有無との対応から、各簡易法的な中率を算出した。また、FEM、CP法および土木学会簡易式についても、参考のために、温度ひび割れ指数の値が1.0以下（ひび割れ発生確率50%以上）を超えればひび割れが発生するとしてそれぞれの的中率を算出した。

各方法的な中率は次のようになる。なお、カッコ中の分数の分母はデータ数で、分子は的中例の数を示す。

- (1) 塚山式 (14/18)=78%
- (2) 山崎式 (21/25)=84%
- (3) 石崎・青柳式 (19/25)=76%
- (4) FEM (29/30)=97%
- (5) CP法 (21/28)=75%
- (6) 土木学会式（内部拘束卓越）
(18/22)=82%
- (7) 土木学会式（外部拘束卓越）
(5/8)=63%

塚山式、山崎式、石崎・青柳式的な中率はいずれもが80%前後と比較的高い中率を示した。

本研究で、塚山式は壁体のみに適用し、また、山崎式および石崎・青柳式はR≒0のものは適用範囲外とした。このように、これらの簡易評価式は本研究のように適用範囲を限定すると、実際に耐えうる精度が得られるものと考えられる。

FEMおよびCP法的な中率はそれぞれ97%および75%となった。特に、壁体構造物について、的中率が100%になった。ただし、FEMおよびCP法は、通常、温度ひび割れ指数を算定し、ひび割れ発生確率を評価するために用いられるものであり、また、ひび割れ発生限界の指数値（本研究では1.0）についてもさらに検討を要するが、指数の値をもとにしたひび割れ危険度の判定は、一つの有力な目安になると考えられる。

土木学会簡易式の的中率は内部拘束卓越の場合は 82%, 外部拘束卓越の場合は 63%となり, FEM および CP 法の的中率に比べ低くなった。しかし, 大まかな目安を得るには十分な結果を与えと考えられる。

4. まとめ

本研究では, 温度ひび割れ指数および温度ひび割れ危険度評価法に関する既往の簡易式の適用性を統一的に検討した。

本研究の結論をまとめると, 次のようになる。

(1) FEM による温度ひび割れ指数を基準とした場合の CP 法による指数の誤差は, 構造物全体を対象とした場合は 0.26 で, 壁体, スラブについてもほぼ同程度の誤差となった。しかし, 他の構造物については誤差が 0.43 と大きくなった。

(2) 内部拘束が卓越する場合の土木学会簡易算定式の誤差は, 構造物種類の影響は比較的に小さく 0.30~0.39 で, CP 法に比べて精度が低くなった。外部拘束が卓越する場合は, 誤差が 0.24~0.27 で, CP 法に比べて若干精度が悪くなった。

(3) 塚山式, 山崎式, 石崎・青柳式のひび割れ危険度の的中率はいずれもが 80%前後の値となる程度であった。

(4) 簡易評価式は適用範囲を限定することにより実用に耐えうる精度が得られるものと考えられる。

(5) FEM および CP 法の的中率は, それぞれ 97%および 75%と値を示した。特に, 壁体構造物について両方法ともに的中率が 100%になった。従って, 指数の値をもとにしたひび割れ危険度の判定は, 一つの有力な目安になると考える。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書—施工編, 1996
- 2) JCI マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, p 41, 1985
- 3) JCI：マスコンクリートのひび割れ制御指針

pp.258-266, 1986

- 4) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 14 pp.60-63, 1996
- 5) 土木学会：第 50 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.658-659, 1995 (ケース 1)
同, pp.722-723, 1995 (ケース 2,3)
同, pp.736-737, 1995 (ケース 27)
同, pp.742-743, 1995 (ケース 28)
- 6) 土木学会：第 49 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.624-625, 1994 (ケース 4)
同, pp.628-629, 1994 (ケース 5,6)
同, pp.630-633, 1994 (ケース 7)
同, pp.1132-1133, 1994 (ケース 8,9)
同, pp.582-583, 1994 (ケース 20,24)
同, pp.1118-1119, 1994 (ケース 21~23)
同, pp.590-591, 1994 (ケース 29)
同, pp.594-595, 1994 (ケース 30)
- 7) JCI：コンクリート工学年次論文報告集, pp.1103-1108, 1995
- 8) JCI：コンクリート工学年次論文報告集, pp.1359-1364, 1994
- 9) 土木学会：第 48 年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.700-701, 1993 (ケース 5-6)
同, pp.696-697, 1993 (ケース 12)
- 10) JCI：マスコンクリートのひび割れ制御指針, pp.258-266, 1986 (ケース 14)
同, pp.267-274, 1986 (ケース 15)
同, pp.275-284, 1986 (ケース 16)
同, pp.201-208, 1986 (ケース 17)
同, pp.191-200, 1986 (ケース 19)
同, pp.229-240, 1986 (ケース 26)
- 11) JCI：コンクリート工学年次論文報告集, pp.1387-1392, 1997
- 12) 土木学会：第 47 年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp.892-893, 1992
- 13) JCI：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 1998