

# 壁状構造物における温度ひび割れの簡易評価手法の提案

石田 知子 近松 竜一  
入矢 桂史郎

## Study on Quick Method of Assessing Crack Index for Concrete Wall Structures

Tomoko Ishida Ryuichi Chikamatsu  
Keishiro Iriya

### Abstract

The possibility of cracking caused by hydration heat of cement is generally checked on basis of thermal stress analysis. However, thermal stress analysis takes a great deal of time and effort, so a quicker assessment method is needed. In this research, a quick method of assessing minimum crack index was examined from analytical results for wall structures using ordinary portland cement, blast-furnace slag cement (B-type) and low-heat cement. It was thus clarified that the temperature drop could be assumed by using the relation between wall thickness, curing condition and adiabatic temperature rise of concrete. The results indicated that a minimum crack index can be estimated from wall thickness, temperature drop strain, autogenous shrinkage and a restraint coefficient.

### 概要

コンクリート構造物におけるセメントの水和熱による温度応力に起因したひび割れの照査は、温度応力解析に基づいて実施するのが一般的である。しかし、温度応力解析には多くの時間や労力、費用がかかるため、より簡便にひび割れ発生の可能性を照査できる手法が求められている。本研究では、壁状構造物を対象に最小ひび割れ指数を簡易に算定する手法について検討した。その結果、温度降下量は、壁厚、養生条件と断熱温度上昇式をもとに精度良く推定できること、また、最小ひび割れ指数は、壁厚、温度降下ひずみ、自己収縮ひずみと拘束係数等を用いて精度良く推定できること、が明らかとなった。

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性および水密性を確保するためには、温度応力に起因するひび割れを適切に制御に関する必要がある。また、最近では総合評価型入札における技術提案として、施工時のひび割れの事前検査を求められる事例が増加している。

コンクリート構造物に発生するひび割れの発生原因として、セメントの水和熱や自己収縮によるコンクリートの体積変化が拘束され発生する温度応力が考えられる。この温度応力に起因したひび割れ（以下、温度ひび割れと呼称する）の照査は、CP法や有限要素法などによる温度応力解析をもとに行うのが一般的である。この温度応力解析によれば、コンクリートの時間依存した非定常な物性を考慮することができ、高い精度で予測が可能であるが、一方で施工条件の入力や解析のモデル化、解析結果の整理にかなりの時間と労力、費用がかかる。

そこで、温度応力解析によらず現場で簡易に温度ひび割れ発生の可能性を評価する手法について検討した。壁状構造物を対象とし、壁厚や養生条件と断熱温度上昇特性からコンクリートの温度降下量を算出し、この温度変化による温度降下ひずみ、自己収縮ひずみと拘束係数からひび割れ指数の最小値を推定する手法を考案し、その

有用性について検証した。

### 2. 簡易算定手法の概要

本研究で対象とした構造物は、一般に温度ひび割れが発生しやすい Fig. 1 に示すような壁部材で、擁壁やボックスカルバートの側壁など、下端を底版により連続的に拘束された部材とした。また、着目したひび割れは、外部拘束に起因する貫通ひび割れとし、ひび割れ指数の最小値（以下、「最小ひび割れ指数」と呼称）とした。

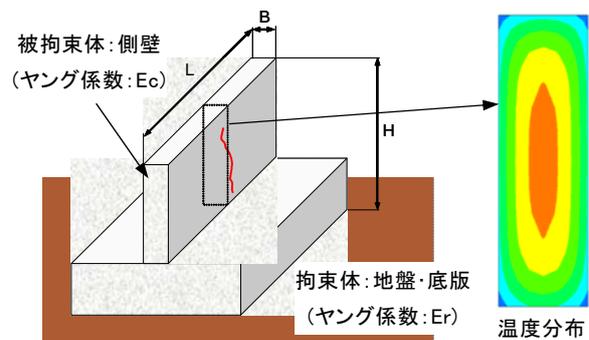


Fig. 1 検討対象構造物概要  
The Outline of Analyzing Structure

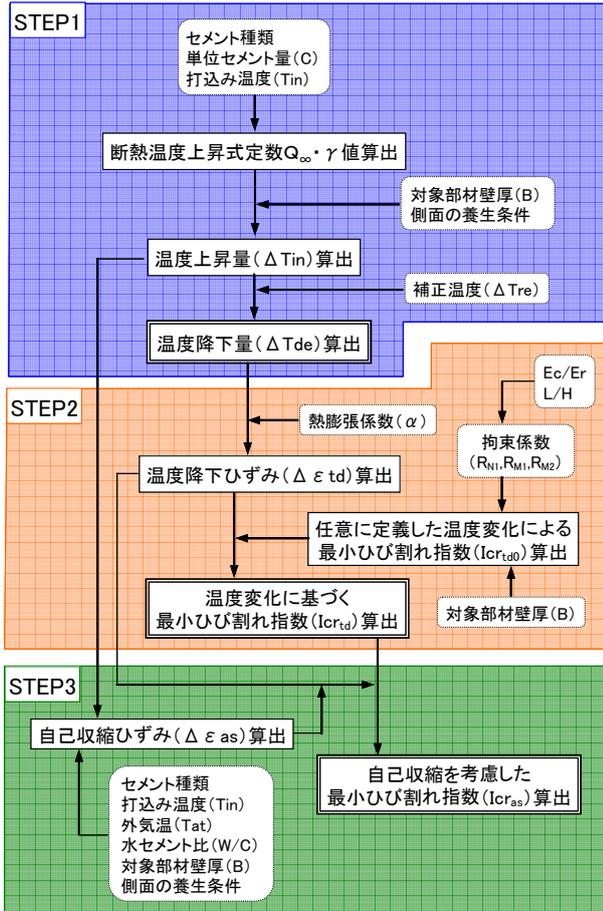


Fig. 2 簡易算出手法概略フロー  
The Sketchy Flow of Brief Assessment Method

温度ひび割れの発生に影響を及ぼす主要な要因としてはコンクリートの打込みによる部材の温度変化、セメントの水和反応に伴う自己収縮現象によるコンクリートの体積変化および部材の拘束条件などがある。これらの影響を適切にかつ簡便に評価し最小ひび割れ指数を算出し、複雑な温度応力解析によらずに温度ひび割れを簡易に評価する手法について検討した。

コンクリートの温度降下量の算出にあたっては、長期的な外気温の季節変動の影響は考慮しないこととし、検討の対象期間はコンクリートの打込み後1ヶ月間とした。

また、構造物の拘束条件としてCP法で定義されている拘束係数( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ )を用いた。拘束係数( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ )とは、コンクリートブロックの自由な熱変形を、岩盤などの拘束体が拘束する効果を表す係数で、 $R_N$ は軸方向変形を拘束する程度を、 $R_M$ は曲げ変形を拘束する程度を表す。

最小ひび割れ指数を算出するための概略のフローをFig. 2に示す。

まずSTEP1として対象部材の温度変化量を算出する。自己収縮を考慮しない場合、一般にひび割れ指数が最小となるのは、打ち込んだコンクリートの躯体温度が上昇した後、外気温と同程度まで降下した時点であると考えられる。そこで、最小ひび割れ指数に寄与する温度変化

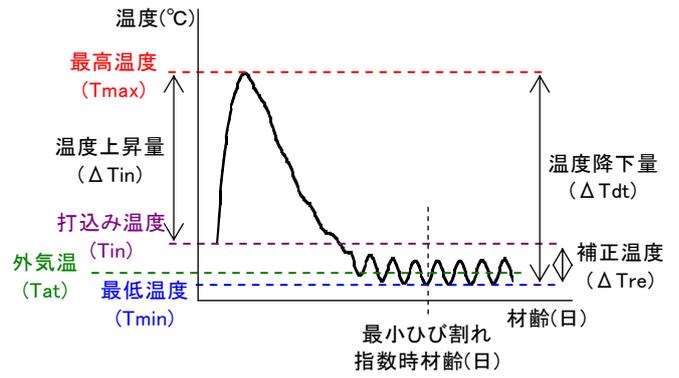


Fig. 3 温度降下量算出イメージ  
The Image of Temperature Descent

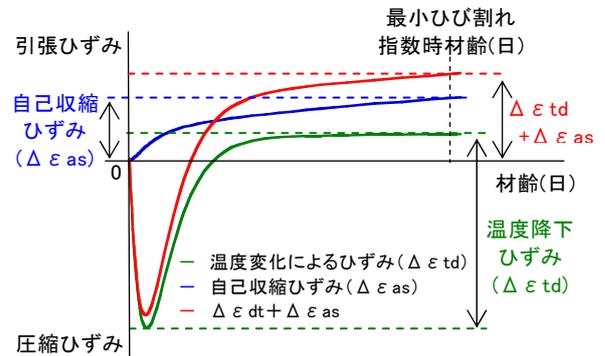


Fig. 4 ひずみイメージ図  
The Image of Strain

量として Fig. 3 に示した温度降下量( $\Delta T_{de}$ )を用いた。温度降下量( $\Delta T_{de}$ )は、壁厚(B)、側面の養生条件、式(1)で定義される打ち込んだコンクリートの断熱温度上昇式の定数( $Q_{\infty} \cdot \gamma$ )から推定した温度上昇量( $\Delta T_{in}$ )、および補正温度( $\Delta T_{re}$ )を用いて算出できると考えた。なお、上記の補正温度( $\Delta T_{re}$ )は、コンクリートの打込み温度と外気温の差と躯体温度降下時の外気温の日変動を考慮した値であり、本検討においては $10^{\circ}\text{C}$ と仮定した。(STEP1)。

$$Q(t) = Q_{\infty} \times \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} \quad (1)$$

$Q(t)$  : 材齢  $t$  日の断熱温度上昇量( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_{\infty}$  : 断熱温度上昇量の最終値( $^{\circ}\text{C}$ )

$\gamma$  : 温度上昇速度を表す定数

次にSTEP2としてコンクリートの温度降下量に基づく最小ひび割れ指数( $I_{cr_{td}}$ )を算出する。本検討では、水セメント比が大きい配合では、自己収縮ひずみの影響を考慮する必要がない場合もあることを想定し、まず温度変化に基づく最小ひび割れ指数( $I_{cr_{td0}}$ )を算出することとした。この $I_{cr_{td0}}$ は、STEP1にて算出した温度降下量( $\Delta T_{de}$ )に熱膨張係数( $\alpha$ )を乗じることにより算出したひずみ(以下、温度降下ひずみ( $\Delta \epsilon_{td}$ )と称する)と拘束係数( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ )および壁厚(B)の関係から算出できると考えた。

Table 1 温度上昇量への影響要因  
The Influential Factors of Temperature Ascent

要因	項目	検討範囲
部材要因	壁厚	0.4~3.0m
配合要因	セメント種類	普通ポルトランドセメント(N) 中庸熱ポルトランドセメント(M) 早強ポルトランドセメント(H) 高炉セメント B 種(BB) 低熱ポルトランドセメント(L)
	単位セメント量	260~550kg/m <sup>3</sup>
施工要因	打込み温度	13~35℃
	外気温	10~30℃
	側面の型枠種類	鋼製・合板・断熱

最後に STEP3 として、自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数 (Icr<sub>as</sub>) を算出する。この Icr<sub>as</sub> は、Fig. 4 のイメージ図に示した自己収縮ひずみ (Δε<sub>as</sub>) および温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) を用い、STEP2 で算出した温度変化に基づく最小ひび割れ指数 (Icr<sub>td</sub>) を補正することにより算出できると考えた。

以下、CP 法による温度応力解析の結果に基づいて、それぞれのステップにおける算定項目の算定手法について検討した結果を示す。なお、対象部材のコンクリートの熱物性や力学的特性などの解析条件は、「コンクリート標準示方書・施工編」(2002 年度制定)<sup>1)</sup>を参照した。

### 3. 簡易算定手法の検討および検証

#### 3.1 温度降下量の算出 (STEP1)

温度降下量 (ΔT<sub>dt</sub>) は、Fig. 3 に示したイメージ図をもとに、式(2)より算出できる。

$$\Delta T_{dt} = \Delta T_{in} + \Delta T_{re} \quad (2)$$

ΔT<sub>dt</sub> : 温度降下量(℃)  
ΔT<sub>in</sub> : 温度上昇量(℃)  
ΔT<sub>re</sub> : 補正温度(℃)(=10℃)

式(2)中の補正温度は設定値として取り扱うこととし、以下、温度上昇量 (ΔT<sub>in</sub>) の算定方法について検討した。なお、温度上昇量に影響を及ぼす要因としては、Table 1 に示す各項目について考慮した。

使用するコンクリートの温度上昇特性は、前述の式(1)に示す断熱温度上昇式を用いるのが一般的である。このうち、断熱温度上昇に関する特性値 (Q<sub>∞</sub>・γ) はセメントの種類、単位セメント量および打込み温度の関数で定義されることから、Q<sub>∞</sub>およびγを温度上昇量 (ΔT<sub>in</sub>) の評価要因とすることでこれら要因の影響を考慮できると考えた。

温度上昇量には Q<sub>∞</sub>とγが相互に作用していると考え、式(3)に示すように断熱温度上昇の最終値 (Q<sub>∞</sub>値) に対する温度上昇量 (ΔT<sub>in</sub>) の割合を T として定義し、この T と γ との関係について整理した。

$$\Delta T_{in} = Q_{\infty} \times T \quad (3)$$

ΔT<sub>in</sub> : 温度上昇量(℃)  
Q<sub>∞</sub> : 断熱温度上昇量の最終値(℃)  
T : Q<sub>∞</sub>値に対する ΔT<sub>in</sub> の割合

壁面の型枠は鋼製型枠を使用し、セメント種類および単位セメント量を変化させた場合の T と γ との関係を図 5 に示す。T と γ との相関は高く、セメントの種類に依らず一義的に算出できることが明らかとなった。

次に、T と γ との関係について、外気温および打込み

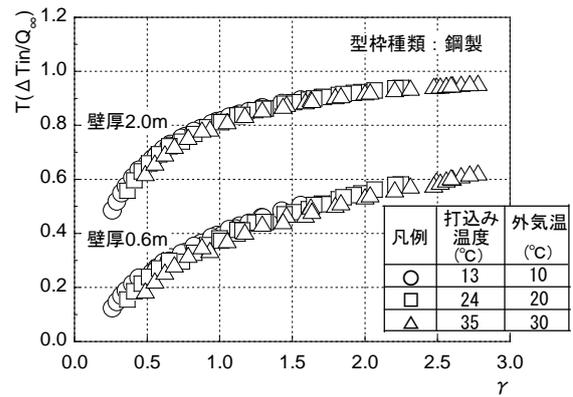


Fig. 6 T 値と γ 値の関係 (温度の影響)

The Relationship between T and γ (Temperature Influence)

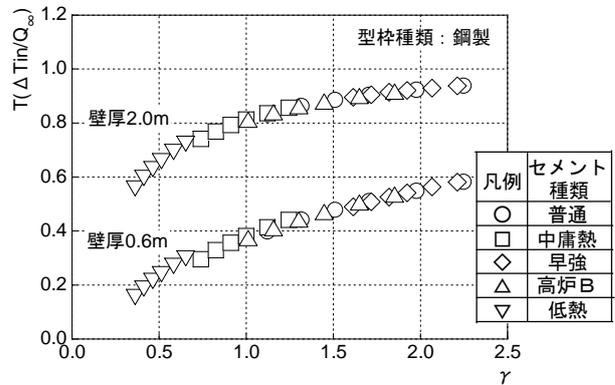


Fig. 5 T 値と γ 値の関係

The Relationship between T and γ

Table 2 係数 a<sub>i</sub>(B) と部材厚の関係を表す係数 (b<sub>1</sub>~b<sub>5</sub>)  
Coefficient (b<sub>1</sub>~b<sub>5</sub>) concerning a<sub>i</sub>(B) and Thickness of Wall

型枠*	係数	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b <sub>5</sub>	相関係数
鋼製	a <sub>1</sub> (B)	0.00270	-0.02937	0.12321	-0.22055	0.01830	0.999
	a <sub>2</sub> (B)	-0.01886	0.17766	-0.62829	0.91939	0.04378	0.998
	a <sub>3</sub> (B)	—	—	-0.05684	0.42083	-0.18580	0.999
合板	a <sub>1</sub> (B)	0.00266	-0.02753	0.10966	-0.18505	-0.00926	0.999
	a <sub>2</sub> (B)	-0.01529	0.14279	-0.49728	0.69977	0.16314	0.997
	a <sub>3</sub> (B)	—	—	-0.06442	0.43082	-0.13924	0.999
断熱	a <sub>1</sub> (B)	0.00169	-0.01462	0.04801	-0.06389	-0.08003	0.982
	a <sub>2</sub> (B)	-0.00366	0.03298	-0.10797	0.11079	0.41777	0.996
	a <sub>3</sub> (B)	—	—	-0.06462	0.35938	0.10029	0.991

\*型枠: 側面の型枠種類 断熱: 熱伝達率 2w/m<sup>2</sup>・℃

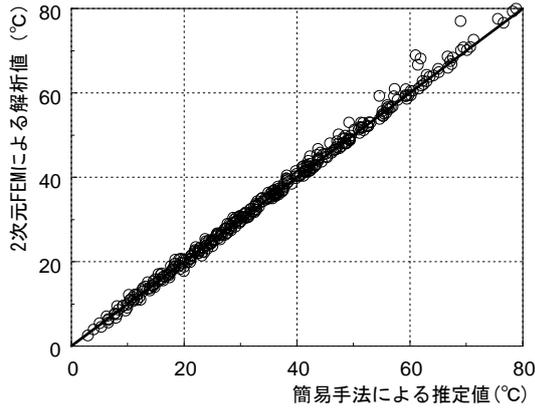


Fig. 7 推定値と解析値の比較 (温度上昇量)

Comparison between Presumption Value and Analytical Value (Temperature Ascent)

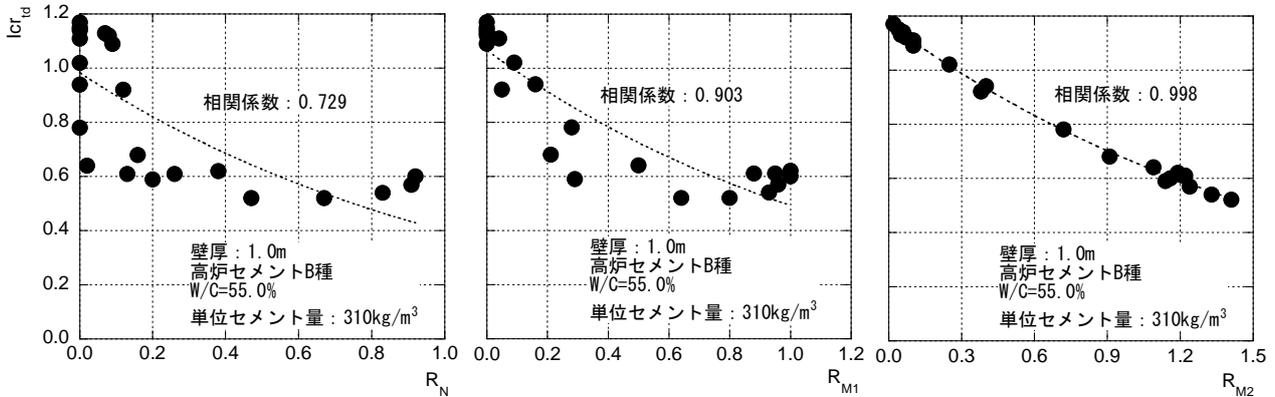


Fig. 8 拘束係数 ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) と  $I_{cr_{id}}$  の関係

The Relationship between Restriction Coefficient ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) and  $I_{cr_{id}}$

温を変化させた場合の影響を検討した。その結果, Fig. 6 に示すように外気温および打込み温度によらず,  $\gamma$  と  $T$  との関係はほぼ同様となった。

以上のことから, 温度上昇量は壁部材の養生条件 (型枠の種類) ごとに設定した  $T$  と  $\gamma$  の関係を近似した式(4)により算出することができる。式(4)の  $a_1(B) \sim a_3(B)$  の側面の型枠種類ごとの係数 ( $b_1 \sim b_5$ ) を Table 2 に示す。

$$T = a_1(B) \cdot \gamma^2 + a_2(B) \cdot \gamma + a_3(B)$$

$$\Delta T_{in} = Q_{\infty} \times \{a_1(B) \cdot \gamma^2 + a_2(B) \cdot \gamma + a_3(B)\} \quad (4)$$

$a_i(B)$  : 係数 (壁厚  $B(m)$  の関数)  
 $= b_1 \cdot B^4 + b_2 \cdot B^3 + b_3 \cdot B^2 + b_4 \cdot B + b_5$   
 $b_i$  : 係数 (Table 2 参照)

式(4)を用いて算出した温度上昇量の簡易解析手法による推定値と, 2次元 FEM による解析値との関係を Fig. 7 に示す。温度上昇量が  $60^{\circ}C$  を超える高温域では解析値の方が大きくなる場合が一部認められるが, 概ね  $\pm 2.0^{\circ}C$  程度の誤差に収まっている。

以上のことより, 温度降下量 ( $\Delta T_{dt}$ ) は, 式(5)により簡易的に算出できると考えられる。

Table 3 温度変化に基づく最小ひび割れ指数への影響要因

The Influential Factors to Minimum Crack Index based on Temperature Alteration

項目	単位	検討条件
壁厚	m	0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0
セメント種類	—	高炉セメントB種(BB) 普通ポルトランドセメント(N) 低熱ポルトランドセメント(L)
単位セメント量	kg/m <sup>3</sup>	260, 310, 360, 410, 480, 550
水セメント比	%	55, 50, 48, 45, 40
拘束条件( $E_c/E_r$ )	$^{\circ}C$	1, 10, 50

$$\Delta T_{dt} = f(Q_{\infty}, \gamma, B, \Delta T_{re})$$

$$= Q_{\infty} \times \{a_1(B) \cdot \gamma^2 + a_2(B) \cdot \gamma + a_3(B)\} + \Delta T_{re} \quad (5)$$

$Q_{\infty}$  : 断熱温度上昇量の最終値( $^{\circ}C$ )

$\gamma$  : 温度上昇速度を表す定数

$B$  : 壁厚(m)

$a_i(B)$  : 係数 (壁厚  $B(m)$  の関数)

$$= b_1 \cdot B^4 + b_2 \cdot B^3 + b_3 \cdot B^2 + b_4 \cdot B + b_5$$

$b_i$  : 係数 (Table 2 参照)

$\Delta T_{re}$  : 補正温度( $^{\circ}C$ ) ( $=10^{\circ}C$ )

### 3.2 温度変化に基づく最小ひび割れ指数の算定(STEP2)

自己収縮の影響を考慮せず, 温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) に影響を及ぼす要因として, 温度降下ひずみ ( $\Delta \epsilon_{id}$ ) および Table 3 に示す項目を考慮した。

拘束条件については, 被拘束体の剛性 ( $E_c$ ) と拘束体の剛性 ( $E_r$ ) の比 (以下,  $E_c/E_r$  と略称する), および壁の長さ ( $L$ ) と高さ ( $H$ ) の比 (以下,  $L/H$  と略称する) と,  $E_c/E_r$  および  $L/H$  から設定される C P 法の拘束係数 ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) を算出因子として考慮した。

拘束係数 ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) と最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) の関係について検討した。結果を Fig. 8 に示す。各拘束係数のうち,  $R_{M2}$  と最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) の間には高い相関が認められ, 近似曲線との相関係数は 0.998 とほぼ

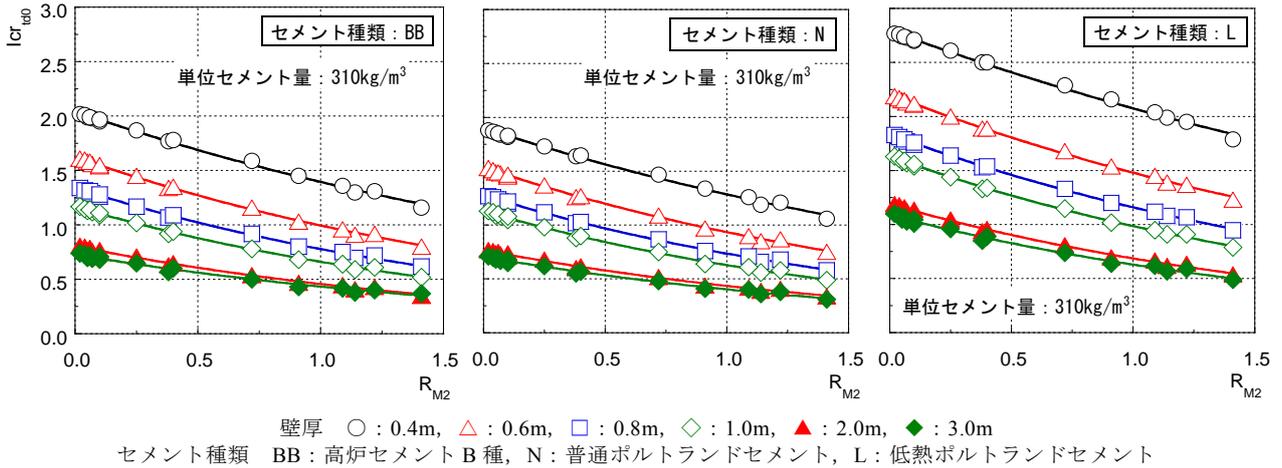


Fig. 10  $R_{M2}$  と  $I_{cr_{id0}}$  の関係  
The Relationship between  $R_{M2}$  and  $I_{cr_{id0}}$

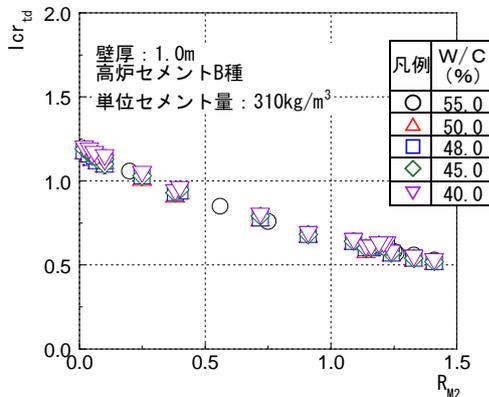


Fig. 9  $R_{M2}$  と  $I_{cr_{id0}}$  の関係 (W/C の影響)  
The Relationship between  $R_{M2}$  and  $I_{cr_{id0}}$   
(W/C Influence)

1 に近い値を示した。

次に、水セメント比 (以下、W/C と略称する) が最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) に及ぼす影響について検討を行った。単位セメント量を  $310\text{kg/m}^3$  と一定とし、W/C を変化させた場合について、拘束係数  $R_{M2}$  と最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) の関係を Fig. 9 に示す。

本検討では、コンクリートの強度発現の温度依存性については最小ひび割れ指数に及ぼす影響は小さいと考え、温度依存性は考慮しないこととした。このため、温度降下量が同値であれば、W/C を変化させても最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id}}$ ) はほぼ同等となり、W/C は影響要因として考慮しないこととした。

各壁厚およびセメント種類において、単位セメント量を  $310\text{kg/m}^3$  とした場合の温度変化に起因した最小ひび割れ指数を任意に定義した温度変化による最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id0}}$ ) とし、この最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id0}}$ ) と  $R_{M2}$  との関係を Fig. 10 に示す。セメントの種類によらず、 $R_{M2}$  と任意に定義した温度変化による最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{id0}}$ ) の間には高い相関が認められ、 $E_c/E_r$  および  $L/H$  にかかわらず、式(6)を用いて近似することができる。式

Table 4 係数  $c_i(B)$  と部材厚の関係を表す係数 ( $d_1 \sim d_4$ )  
Coefficient ( $d_1 \sim d_4$ ) concerning  $c_i(B)$  and Thickness of Wall

係数	セメント種類*	壁厚 (m)	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	相関係数
$c_1(B)$	BB	0.4~1.0	-0.48813	2.55050	-4.26747	3.37460	0.999
		1.0~2.0	—	0.27918	-1.20047	2.09079	1.000
		2.0~3.0	—	0.08978	-0.52647	1.50039	1.000
	N	0.4~1.0	—	1.36419	-3.19845	2.96516	1.000
		1.0~2.0	—	0.28526	-1.21755	2.06344	1.000
		2.0~3.0	—	0.08174	-0.47047	1.38336	1.000
	L	0.4~1.0	-1.26146	5.08337	-7.08737	4.89957	0.999
		1.0~2.0	—	0.31396	-1.38574	2.70590	1.000
		2.0~3.0	—	0.10564	-0.62766	2.02302	1.000
$c_2(B)$	BB	0.4~1.0	-0.61354	1.81325	-1.89436	0.12517	0.998
		1.0~2.0	—	0.03814	-0.11095	-0.49667	1.000
		2.0~3.0	—	-0.02334	0.16393	-0.80051	1.000
	N	0.4~1.0	-0.64188	1.78675	-1.82493	0.09318	0.998
		1.0~2.0	—	0.03856	-0.09628	-0.52915	1.000
		2.0~3.0	—	-0.05922	0.30265	-0.93589	1.000
	L	0.4~1.0	-0.46375	1.31638	-1.46278	0.10620	0.999
		1.0~2.0	—	0.07924	-0.28198	-0.30121	1.000
		2.0~3.0	—	-0.05838	0.29213	-0.89895	1.000

\*セメント種類 BB: 高炉セメント B 種, N: 普通ポルトランドセメント  
L: 低熱ポルトランドセメント

(6) の  $c_1(B) \sim c_3(B)$  のセメント種類ごとの係数 ( $d_1 \sim d_5$ ) を Table 4 に示す。

$$I_{cr_{id0}} = c_1(B) \times \exp\{c_2(B) \times R_{M2}\} \quad (6)$$

$I_{cr_{id0}}$  : 任意に定義した温度変化による最小ひび割れ指数 (単位セメント量:  $310\text{kg/m}^3$ )

$c_i(B)$  : 係数 (壁厚  $B(\text{m})$  の関数)  
 $= d_1 \cdot B^3 + d_2 \cdot B^2 + d_3 \cdot B + d_4$

$d_i$  : 係数 (Table 4 参照)

$R_{M2}$  : 拘束係数

次に、式(6)により算出した任意に定義した温度変化に

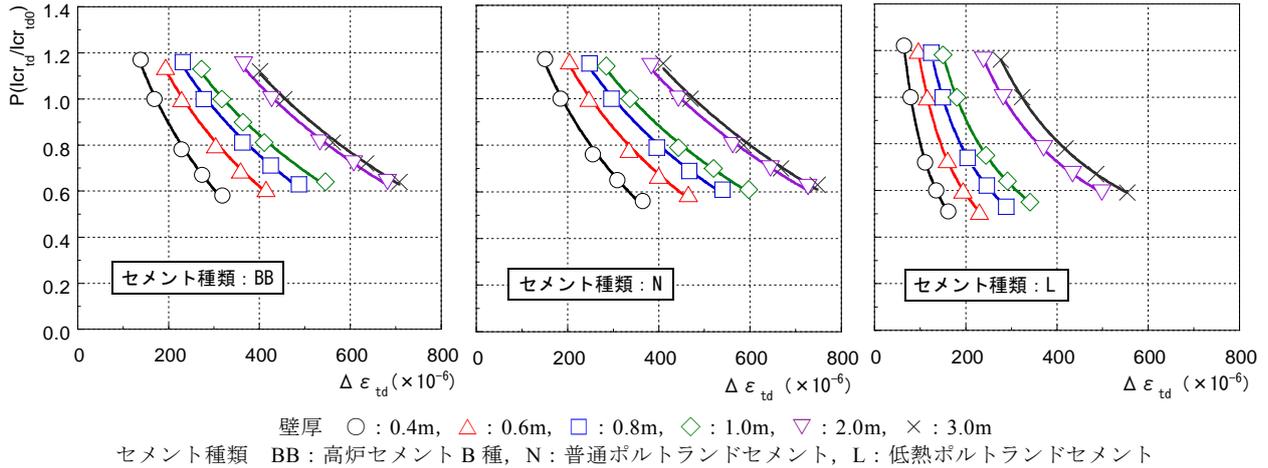


Fig. 12 Δε<sub>td</sub> と P 値の関係  
The Relationships between Δε<sub>td</sub> and R

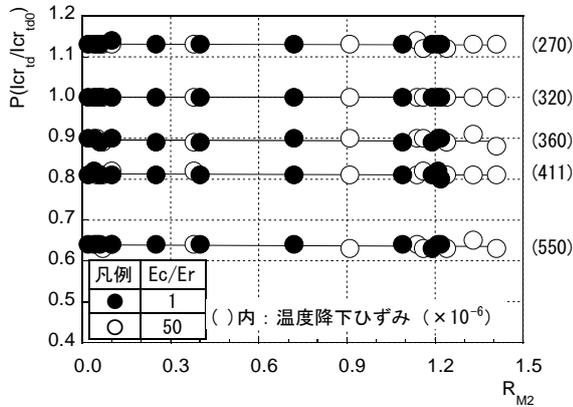


Fig. 11 R<sub>M2</sub> と P 値の関係  
The Relationship between R<sub>M2</sub> and R

よるひび割れ指数 (Icr<sub>td0</sub>) に対し、温度変化量が変化した場合の最小ひび割れ指数の算出方法について検討した。その際、式(7)に示すように、算出対象の温度変化に基づく最小ひび割れ指数 (Icr<sub>td</sub>) に対する任意に定義した温度変化によるひび割れ指数 (Icr<sub>td0</sub>) の割合を補正係数 P と定義し、この補正係数 P と温度変化量との関係について検討した。

$$Icr_{td} = Icr_{td0} \times P \quad (7)$$

- Icr<sub>td0</sub> : 任意に定義した温度変化による最小ひび割れ指数(単位セメント量:310kg/m<sup>3</sup>)
- Icr<sub>td</sub> : 算出対象の温度変化に基づく最小ひび割れ指数
- P : 補正係数

ここで、最小ひび割れ指数に寄与する温度変化量は、式(2)より算出した温度降下量 (ΔTdt) により考慮できると考えた。この温度降下量 (ΔTdt) にコンクリートの線膨張係数 (α) を乗じた値を温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) とし、この温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) と補正係数 P との関係について整理した。

Table 5 係数 e<sub>i</sub>(B) と部材厚の関係を表す係数 (f<sub>1</sub> ~ f<sub>4</sub>)  
Coefficient (f<sub>1</sub> ~ f<sub>4</sub>) concerning e<sub>i</sub>(B) and Thickness of Wall

係数	セメント種類*	壁厚 (m)	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	相関係数
e <sub>1</sub> (B)	BB	0.4~1.0	30.3542	-46.4750	85.6758	44.7390	1.000
		1.0~3.0	—	-25.3635	251.241	-111.583	1.000
	N	0.4~0.8	—	-65.1250	145.295	28.8360	1.000
		0.8~3.0	-35.7583	191.601	-127.811	101.325	1.000
	L	0.4~1.0	238.938	-705.613	711.800	-119.729	1.000
		1.0~3.0	—	25.2855	-21.3875	121.498	1.000
e <sub>2</sub> (B)	BB	0.4~1.0	0.10437	-0.36975	0.38072	-0.93788	1.000
		1.0~3.0	—	0.03242	-0.21108	-0.64387	1.000
	N	0.4~0.8	—	1.46675	-1.71770	-0.37999	1.000
		0.8~3.0	0.01708	-0.07184	-0.01760	-0.76411	1.000
	L	0.4~1.0	-0.74458	1.84088	-1.36339	-0.66360	1.000
		1.0~3.0	—	-0.03388	0.11175	-1.00857	1.000

\*セメント種類 BB: 高炉セメント B 種, N: 普通ポルトランドセメント  
L: 低熱ポルトランドセメント

壁厚 1.0m とし、高炉セメント B 種を使用した場合において、単位セメント量を変化させて温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) を変化させ、さらに Ec/Er を変化した場合の拘束係数 R<sub>M2</sub> と補正係数 P の関係を Fig. 11 に示す。拘束係数 R<sub>M2</sub> によらず、壁厚および温度降下ひずみが同値である場合、温度降下ひずみの補正係数 P はほぼ同等となる。したがって、補正係数 P は、温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) との関係から算出できると考えられる。

そこで、各セメント種類における温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) と補正係数 P の関係を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 より、温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) と補正係数 P は高い相関関係を示し、式(8)により精度良く近似することが明らかとなった。式(8)の e<sub>1</sub>(B) ~ e<sub>2</sub>(B) のセメント種類ごとの係数 (f<sub>1</sub> ~ f<sub>3</sub>) を Table 5 に示す。

$$P = e_1(B) \times (\Delta Tdt \times \alpha \times 10^6)^{e_2(B)}$$

$$= e_1(B) \times (\Delta \varepsilon_{td} \times 10^6)^{e_2(B)} \quad (8)$$

$e_1(B)$  : 係数(壁厚 B(m)の関数)  
 $= f_1 \cdot B^3 + f_2 \cdot B^2 + f_3 \cdot B + f_4$   
 $f_i$  : 係数 (Table 5 参照)  
 $\Delta Ttd$  : 温度降下量  
 $\alpha$  : 線膨張係数( $\times 10^{-6}$ )  
 $\Delta \varepsilon_{td}$  : 温度降下ひずみ

以上のことから、温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr,d}$ )は、式(9)を用いて推定できると考えられる。

$$I_{cr,d} = f(R_{M2}, \Delta Ttd, \alpha, B)$$

$$I_{cr,d} = f(R_{M2}, B) \times f(\Delta Ttd, \alpha, B)$$

$$= \{c_1(B) \times \exp\{c_2(B) \times R_{M2}\}\} \times \{c_1(B) \times (\Delta Ttd \times \alpha \times 10^6)^{e_2(B)}\} \quad (9)$$

$c_1(B)$  : 係数(壁厚 B(m)の関数)  
 $= d_1 \cdot B^3 + d_2 \cdot B^2 + d_3 \cdot B + d_4$   
 $d_i$  : 係数 (Table 4 参照)  
 $R_{M2}$  : 拘束係数  
 $e_1(B)$  : 係数(壁厚 B(m)の関数)  
 $= f_1 \cdot B^3 + f_2 \cdot B^2 + f_3 \cdot B + f_4$   
 $f_i$  : 係数 (Table 5 参照)  
 $\Delta Ttd$  : 温度降下量  
 $\alpha$  : 線膨張係数( $\times 10^{-6}$ )

### 3.3 自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数の算出

検討対象期間(材齢1ヶ月まで)の自己収縮ひずみ ( $\Delta \varepsilon_{as}$ )と、前節で検討した温度降下ひずみ ( $\Delta \varepsilon_{td}$ )を合算したひずみが、自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数 ( $I_{cr,as}$ )の算出要因となると考えた。そこで、自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数 ( $I_{cr,as}$ )は、これらのひずみと温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr,d}$ )を用いた式(10)により算出できると仮定した。

$$I_{cr,as} = f(\Delta \varepsilon_{td}, \Delta \varepsilon_{as}, I_{cr,d})$$

$$= \frac{\Delta \varepsilon_{td}}{\Delta \varepsilon_{td} + \Delta \varepsilon_{as}} \times I_{cr,d} \quad (10)$$

$\Delta \varepsilon_{td}$  : 温度降下ひずみ( $\times 10^{-6}$ )  
 $\Delta \varepsilon_{as}$  : 自己収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )

このうち、自己収縮ひずみ ( $\Delta \varepsilon_{as}$ )の算定には、式(13)<sup>3)</sup>を使用した。

$$\varepsilon_{as}(te) = \gamma \cdot \varepsilon_{as\infty} \times \left[ 1 - \exp\{-a(te - ts)^b\} \right] \quad (11)$$

$\varepsilon_{as}(te)$  : 材齢 te 日の自己収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )  
 $\gamma$  : セメントおよび混和材の種類を表す係数  
 高炉セメントB種  $\gamma=1.3$

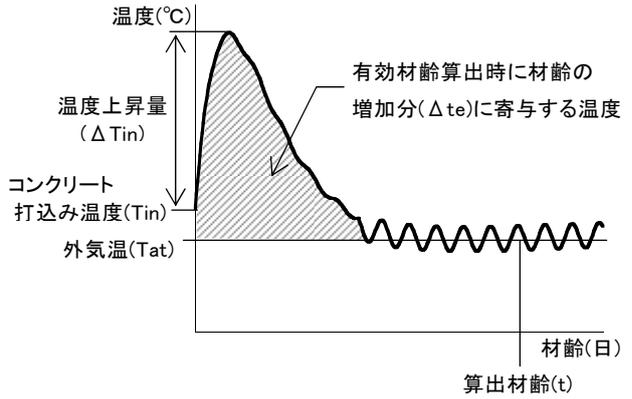


Fig. 13 有効材齢算出イメージ  
The Image of Age of Effective Material

- 普通ポルトランドセメント  $\gamma=1.0$   
 低熱ポルトランドセメント  $\gamma=0.3$   
 $\varepsilon_{as\infty}$  : 自己収縮ひずみの最終値( $\times 10^{-6}$ )  
 $= 3070 \times \exp\{-7.2 \times (W/C)\}$   
 $ts$  : 凝結の始発(日)  
 $a, b$  : 自己収縮の進行特性を表す係数  
 $W/C=50\%$ 以上:  $a=0.01, b=0.1$   
 $W/C=40\%$ :  $a=0.1, b=0.7$   
 $te$  : 有効材齢(日)

式(11)において、材齢  $te$  は式(12)で定義される有効材齢で考慮することから、温度履歴の影響を受ける。

最小ひび割れ指数を算出する材齢(t)における有効材齢 ( $te$ )は、Fig. 13に示すように、外気温( $Tat$ )を一定とした場合の有効材齢に、コンクリートの温度履歴を考慮した材齢の増加分 ( $\Delta te$ )を加算した式(13)を用いて算出できると考えた。また、セメント水和に伴う温度上昇による材齢の増加分 ( $\Delta te$ )は、式(14)により算出したコンクリート温度が最高温度から外気温になるまでの降下量 ( $\Delta Tde'$ )により算出できると考えた。

$$te = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp\left(13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right) \quad (12)$$

$$\cong t \cdot \exp\left(13.65 - \frac{4000}{273 + Tat}\right) + \Delta te \quad (13)$$

- $\Delta t_i$  : コンクリート温度が  $T^\circ C$ である期間の日数  
 $T_0$  :  $1^\circ C$   
 $t$  : 最小ひび割れ指数算出材齢(日)  
 $Tat$  : 最小ひび割れ指数算出時外気温  
 $\Delta te$  : 温度上昇による材齢の増加分

$$\Delta Tde' = Tin + \Delta Tin - Tat \quad (14)$$

- $Tin$  : コンクリート打込み温度( $^\circ C$ )  
 $\Delta Tin$  : 温度上昇量( $^\circ C$ ) 式(4)より算出  
 $Tat$  : 最小ひび割れ指数算出時外気温

壁厚を 1.0m, 側面の型枠に鋼製型枠を使用した場合に、

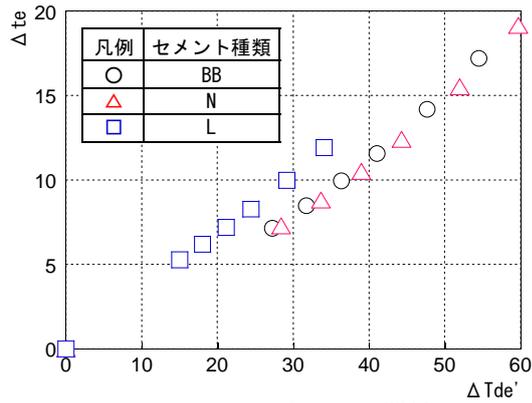


Fig. 14 ΔTde' と Δte の関係

The Relationships between ΔTde' and Δte

Table 6 係数  $g_i(B)$  と部材厚の関係を表す係数 ( $h_1 \sim h_3$ )  
Coefficient ( $h_1 \sim h_3$ ) concerning  $g_i(B)$  and Thickness of Wall

係数	セメント種類 <sup>*1)</sup>	型枠 <sup>*2)</sup>	$h_1$	$h_2$	$h_3$	相関係数
$g_1(B)$	BB・N	鋼製	0.00033	0.00318	-0.00136	1.000
		合板	0.00006	0.00419	-0.00134	1.000
		断熱	-0.00108	0.00783	-0.00011	1.000
$g_2(B)$		鋼製	-0.02791	0.17860	0.04083	1.000
		合板	-0.03006	0.17562	0.06828	1.000
		断熱	0.00336	0.03793	0.19547	1.000
$g_3(B)$		鋼製	0.01024	0.04777	0.00642	1.000
		合板	0.00194	0.07697	-0.00387	1.000
		断熱	-0.01938	0.14638	-0.00277	1.000
$g_1(B)$	L	鋼製	-0.00059	0.00691	-0.00597	1.000
		合板	0.00006	0.00419	-0.00134	1.000
		断熱	-0.00108	0.00783	-0.00011	1.000
$g_2(B)$		鋼製	-0.04521	0.27456	0.10457	1.000
		合板	-0.01418	0.22100	0.14763	1.000
		断熱	0.01305	0.08174	0.26587	1.000
$g_3(B)$		鋼製	-0.00788	0.05148	-0.00600	1.000
		合板	0.00002	0.03919	0.00031	1.000
		断熱	-0.00367	0.04662	-0.00195	1.000

\*1)セメント種類 BB:高炉セメントB種, N:普通ポルトランドセメント  
L:低熱ポルトランドセメント

\*2)型枠:側面の型枠種類 断熱:熱伝達率  $2w/m^2 \cdot ^\circ C$

コンクリート温度が最高温度から外気温となるまでの降下量 ( $\Delta Tde'$ ) と材齢の増加材齢 ( $\Delta te$ ) との関係を図 14 に示す。  $\Delta te$  と  $\Delta Tde'$  は高い相関が認められ、  $\Delta te$  は式 (15) で表される多項式で定義できる。高炉セメント B 種と普通ポルトランドセメントは同様の傾向にあり、一義的に定義できる。式 (15) に  $g_1(B) \sim g_3(B)$  のセメント種類ごとの係数 ( $h_1 \sim h_3$ ) を Table 6 に示す。

$$\Delta te = g_1(B) \cdot (\Delta Tde')^2 + g_2(B) \cdot (\Delta Tde') + g_3(B) \quad (15)$$

$g_i(B)$  : 係数 (壁厚 B(m) の関数)

$$= h_1 \cdot B^2 + h_2 \cdot B + h_3$$

$h_i$  : 係数 (Table 6 参照)

式 (10) ~ 式 (15) を用いて算出した最小ひび割れ指数の

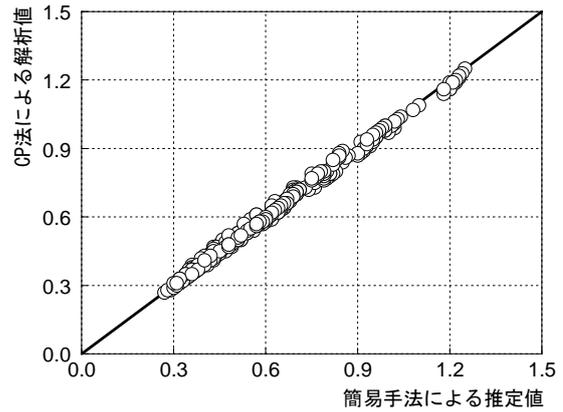


Fig. 15 推定値と解析値の比較

(自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数)

Comparison between Presumption Value and Analytical Value  
(Minimum Crack Index counted Autogenous Shrinkage)

簡易計算手法による推定値と CP 法による解析値の関係を Fig. 15 に示す。推定値は解析値とほぼ一致しており、概ね  $\pm 0.05$  程度の誤差で推定できることが確認された。

以上の結果より、本検討の提案手法によれば、CP 法による解析結果とほぼ同等のひび割れ指数の最小値を簡便に算定することができると考えられる。

#### 4. まとめ

温度応力解析によらず簡易に温度ひび割れ発生の可能性を評価するために、壁状構造物を対象に最小ひび割れ指数の算定手法について検討した。本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- 1) 温度上昇量は、外気温によらず、断熱温度上昇式の定数 ( $Q_\infty \cdot \gamma$ )、壁厚および側面の養生条件から精度良く推定できる。
- 2) 温度変化に基づく最小ひび割れ指数は、水セメント比によらず、拘束係数  $R_{M2}$ 、温度降下量、線膨張係数および壁厚から推定することができる。
- 3) 自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数は、温度降下ひずみと、温度降下ひずみと自己収縮ひずみを加算したひずみの比を、温度変化に基づく最小ひび割れ指数に乘じることで算出することができる。
- 4) 本検討で提案した最小ひび割れ指数の評価手法によれば、「コンクリート標準示方書・施工編」を参照した CP 法による解析結果とほぼ同等のひび割れ指数の最小値を簡便に算定することができる。

#### 参考文献

- 1) 例えば、(社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、1998.4
- 2) (社)土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】(2002年制定)
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、1996.11