

# 論文 温度応力解析に依らないひび割れ指数の簡易算定手法に関する研究

石田 知子<sup>\*1</sup>・近松 竜一<sup>\*2</sup>・辻 幸和<sup>\*3</sup>

**要旨**：セメント水和熱による温度応力に起因したひび割れの発生に対する照査は、温度応力解析に基づき実施するのが一般的である。しかし、温度応力解析には多大な時間と労力を必要とすることから、より簡易にひび割れ発生の可能性を照査する手法が必要とされている。本研究では、高炉セメントB種を使用した壁状構造物を対象にした解析結果に基づいて、最小ひび割れ指数の簡易算定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の関係を用いて精度良く推定できること、また、最小ひび割れ指数は、壁厚、温度降下ひずみと拘束度等を用いて精度良く推定できること、などが明らかとなった。

**キーワード**：温度ひび割れ、壁状構造物、温度降下量、最小ひび割れ指数

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の耐久性および止水性を確保する観点から、ひび割れ制御に関する関心が高まりつつある。また、性能照査型設計への移行や技術提案型の入札件数の増加に伴い、設計段階において施工時のひび割れ照査が求められるケースが増加している。

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、セメント硬化時に生じるセメントの水和熱や自己収縮に起因したコンクリートの体積収縮が拘束されることによって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」と略称する）の発生に対する照査は、CP法や有限要素法等を用いた温度応力解析結果を基に行うのが一般的である。温度応力解析は、コンクリートの時間依存した非定常な物性をも考慮することができることから精度良い結果が得られる反面、条件の入力、解析や結果整理に多大な時間と労力を必要とする。そのため、迅速な対応には不向きであり、より簡易にひび割れ発生の可能性を照査する手法を検討する必要がある。

本研究では、壁状構造物を対象とし、高炉セメントB種を使用した場合について、温度応力

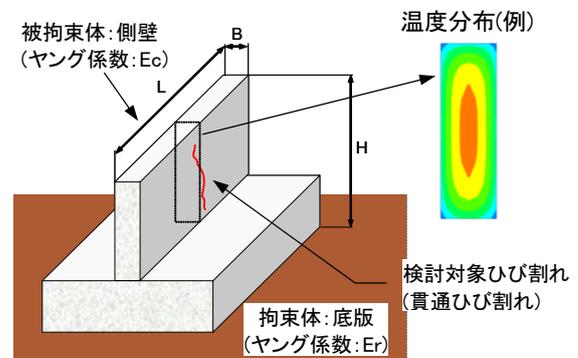


図-1 検討対象構造物概要

解析を実施せずに簡易に最小ひび割れ指数を算定する手法について検討した結果を報告する。

## 2. 簡易算定手法の概要

本検討での対象構造物は、図-1 に示すように、比較的溫度ひび割れが発生し易いと考えられる下端部を底版で連続的に拘束された壁状構造物とした。また着目したひび割れは、外部拘束による貫通ひび割れとし、算出するひび割れ指数は、対象部材の最小となるひび割れ指数（以下、「最小ひび割れ指数」と称する。）とした。

最小ひび割れ指数に直接影響を及ぼす主な要因としては、対象部材の温度変化および自己収縮に伴う体積変化と、それを拘束する拘束条件があり、これらを考慮して、最小ひび割れ指数

\*1 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室材料施工グループ 主任 工修 (正会員)

\*2 (株)大林組 技術研究所土木材料研究室材料施工グループ グループ長 博士 (工学) (正会員)

\*3 群馬大学 工学部 建設工学科 社会基盤工学講座 工博 教授 (正会員)

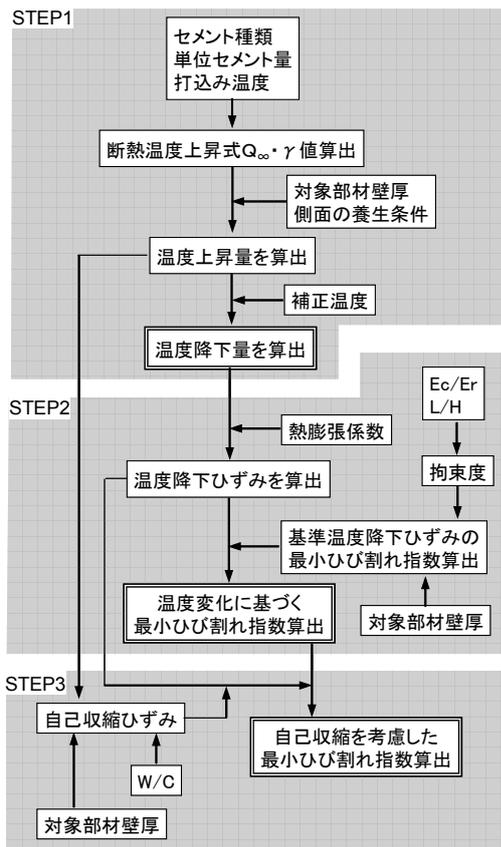


図-2 簡易算出手法概略フロー

を簡易に算定できると考えた。

本検討では、躯体の温度変化に影響を及ぼす要因としてはセメント水和熱を考慮し、外気温の季節変動による影響については考慮しないこととした。したがって、検討対象期間はコンクリートの打込み後1ヶ月間（30日間）とした。

想定した最小ひび割れ指数の簡易算出手法の概略フローを図-2に示す。最小ひび割れ指数算出までの流れとしては、まず壁厚、側面の養生条件および断熱温度上昇から温度上昇量を推定し、それをを用いて温度降下量を算出する（STEP1）。次にSTEP1にて算出した温度降下量に熱膨張係数を乗じるにより算出したひずみ（以下、「温度降下ひずみ」と称する）と拘束度および壁厚の関係から、温度変化に基づく最小ひび割れ指数を推定する（STEP2）。本検討では、水セメント比が大きく自己収縮ひずみの影響を考慮する必要がない場合があることを想定し、まず温度変化に基づく最小ひび割れ指数を算出する。その後、自己収縮ひずみおよび温度降下ひずみを用いて、STEP2にて算出した温度

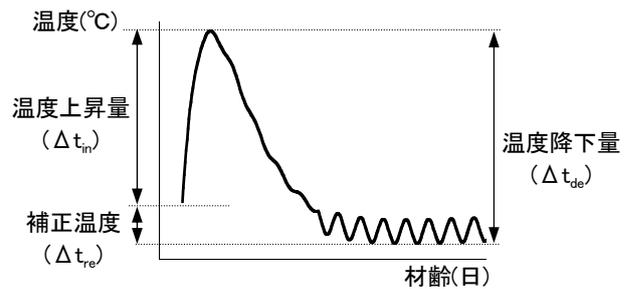


図-3 温度降下量算出のイメージ

変化に基づく最小ひび割れ指数を補正することにより自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数を算出する（STEP3）こととした。

本稿では、3次元FEMによる解析結果との比較によりその適用性が検証されているCP法<sup>1)</sup>による温度応力解析の結果に基づいて、それぞれの検討ステップにおける算定項目の算定手法について検討を行い、本手法の妥当性について検証を行った結果を述べる。なお、対象部材のコンクリートの熱物性や力学的特性等の解析条件は、「コンクリート標準示方書・施工編」（2002年度制定）<sup>2)</sup>を参照した。解析ステップの時間刻み間隔は、材齢3日までは2.0時間毎とし、その後は最大1日まで徐々に増加させた。

### 3.簡易算定手法の検討および検証

#### 3.1 温度降下量

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、コンクリートの打込み後躯体温度が打込み時の外気温と同程度となった時点であると考えられる。温度降下量のイメージを図-3に示す。ここで補正温度（ $\Delta t_{re}$ ）とは、コンクリート打込み時のコンクリート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、本検討では安全側を考慮して10℃と仮定した。温度降下量（ $\Delta t_{de}$ ）の算出式を式(1)に示す。

$$\Delta t_{de} = \Delta t_{in} + \Delta t_{re} \quad (1)$$

ここで、

- $\Delta t_{de}$  : 温度降下量(°C)
- $\Delta t_{in}$  : 温度上昇量(°C)
- $\Delta t_{re}$  : 補正温度(°C) (=10°C)

式(1)において、補正温度は既知であることから、ここでは、温度上昇量の算定方法について

表-1 温度上昇量への影響要因

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・中庸熱・早強・高炉B種・低熱
	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

検討を行った。

また本検討では、温度上昇量に影響を及ぼす要因として、表-1に示す項目を考慮した。

使用配合の温度上昇特性は式(2)に示す断熱温度上昇式を用いて考慮するのが一般的である。

$$Q(t) = Q_{\infty} \times \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} \quad (2)$$

ここで、

- Q(t) : 材齢t日の断熱温度上昇量(℃)
- Q<sub>∞</sub> : 断熱温度上昇量の最終値(℃)
- γ : 温度上昇速度を表す定数

このうち、断熱温度上昇式の定数(Q<sub>∞</sub>・γ値)はセメント種類、単位セメント量およびコンクリートの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値を温度上昇量の算出因子として設定することにより、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>値とγ値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の割合を、T値として定義する。このT値とγ値との関係について検討を行った。

$$T = \frac{\Delta t_{in}}{Q_{\infty}} \quad (3)$$

ここで、

- Δt<sub>in</sub> : 温度上昇量(℃)
- Q<sub>∞</sub> : 断熱温度上昇量の最終値(℃)

壁厚を0.4、2.0mとし、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値とγ値との関係を図-4に示す。T値とγ値は強い相関関係を示し、また、セメント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、γ値とT値との関係について、外気温および打込み温度を変化させた影響について検討を行った。その結果、図-5に示すように、外気温および打込み温度に関わらず、γ値とT

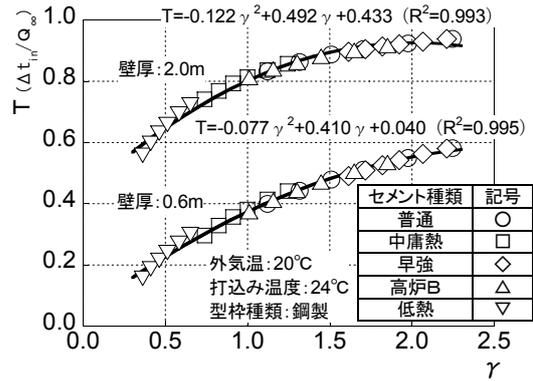


図-4 γ値とT値の関係

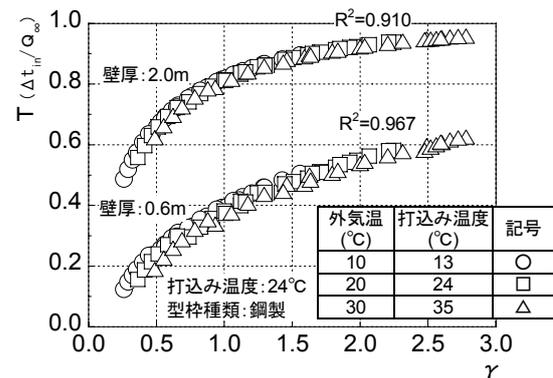


図-5 γ値とT値の関係(温度の影響)

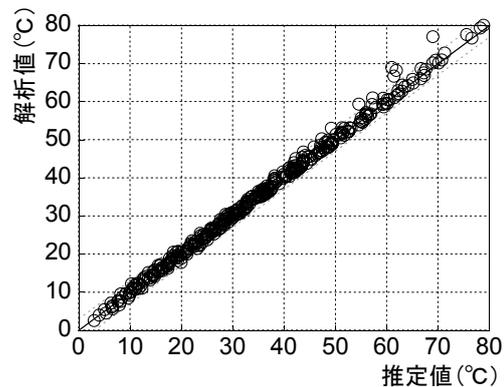


図-6 推定値と解析値の比較(温度上昇量)

値との関係はほぼ同様となる結果を示した。

したがって、温度上昇量は側面の養生条件(型枠種類)ごとに設定したT値とγ値の関係を近似した式(4)により、本検討の範囲では一義的に算出できると考えられる。

$$T = \frac{\Delta t_{in}}{Q_{\infty}} = a_1(B) \cdot \gamma^2 + a_2(B) \cdot \gamma + a_3(B)$$

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

ここで、

a<sub>i</sub>(B) : 係数(壁厚B(m)の関数)

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図-6に示す。温度上昇量が60℃

表-2 温度変化に基づく最小ひび割れ指数への影響要因

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	高炉B種
	水セメント比	40.0~55.0%
施工要因	拘束条件	Ec/Er : 1~50 L/H : 0.25~12.5

を超えるような高温域において、解析値の方が大きくなる場合が数ケース認められるものの、それ以外については概ね±2.0℃程度の誤差範囲で推定できていることから、本推定方法は妥当であると考えられる。

### 3.2 温度変化に基づく最小ひび割れ指数の算定

本文では、使用頻度が高い高炉セメントB種を対象として検討を行った結果について述べる。

自己収縮を考慮せず、温度変化のみに基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{td}}$ ) に影響を及ぼす要因として、温度降下ひずみ ( $\Delta \epsilon_{td}$ ) と、さらに表-2 示す項目を考慮した。

拘束条件については、被拘束体と拘束体の剛性の相違 (以下、「 $E_c/E_r$ 」と略称する) および長さ高さの比 (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CP法の拘束度 ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) を算出因子として考慮した。

拘束度 ( $R_N, R_{M1}, R_{M2}$ ) と温度変化に基づく最小ひび割れ指数の関係について検討を行った結果、 $R_{M2}$  と最小ひび割れ指数の間には高い相関関係が認められた。

壁厚を 1.0m、水セメント比 (以下、「 $W/C$ 」と略称する) を 55%、単位セメント量を  $310\text{kg/m}^3$  (壁厚 1.0mでの温度降下ひずみ ( $\Delta \epsilon_{td}$ ) は  $320 \times 10^{-6}$ ) とした場合、 $R_{M2}$  と温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{td0}}$ ) の関係を図-7 に示す。 $R_{M2}$  と温度変化に基づく最小ひび割れ指数の間には高い相関関係が認められ、式(5)により近似することができる。

$$I_{cr_{td0}} = b_1(B) \times \exp\left\{(R_{M2})^{b_2(B)}\right\} \quad (5)$$

ここで、

$I_{cr_{td0}}$  : 単位セメント量  $310\text{kg/m}^3$ での温度変化に基づく最小ひび割れ指数

$b_1$  : 係数 (壁厚  $B(\text{m})$ の関数)

$R_{M2}$  : 拘束度

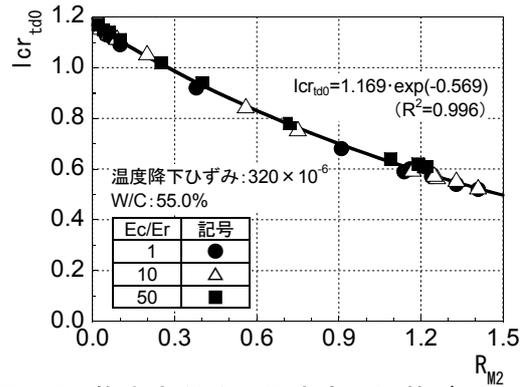


図-7 拘束度 ( $R_{M2}$ ) と温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{td}}$ ) の関係

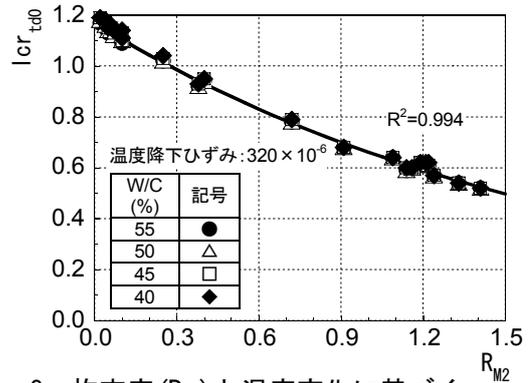


図-8 拘束度 ( $R_{M2}$ ) と温度変化に基づく最小ひび割れ指数 ( $I_{cr_{td0}}$ ) の関係 ( $W/C$ の影響)

また、単位セメント量を  $310\text{kg/m}^3$  と一定とし、 $W/C$  を変化させた場合の  $R_{M2}$  と温度変化に基づく最小ひび割れ指数の関係を図-8 に示す。

本検討の範囲では、コンクリートの強度発現の温度依存性について、その考慮の有無が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。そのため、温度降下量が同値であれば、 $W/C$  を変化させても温度変化に基づく最小ひび割れ指数はほぼ同等となることが明らかとなった。

次に温度降下ひずみが最小ひび割れ指数に及ぼす影響について検討を行った。温度降下ひずみの影響を検討するにあたり、単位セメント量を  $310\text{kg/m}^3$  とした際の最小ひび割れ指数を 1 とした場合の比を温度降下ひずみの補正係数  $R$  とし、式(6)で定義した。

$$R = \frac{I_{cr_{td}}}{I_{cr_{td0}}} \quad (6)$$

ここで、

$R$  : 温度降下ひずみの補正係数

$I_{cr_{td}}$  : 算出対象の温度変化に基づく最小ひび

割れ指数

壁厚 1.0mとし、単位セメント量を変化させることで温度降下ひずみを変化させ、さらにEc/Erを変化させた場合のR<sub>M2</sub>と温度降下量の補正係数Rの関係を図-9に示す。R<sub>M2</sub>に関わらず、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Rはほぼ同等となる。そこで、温度変化に基づく最小ひび割れ指数の算出は、単位セメント量を310kg/m<sup>3</sup>とした場合の最小ひび割れ指数をR<sub>M2</sub>との関係から算出し、その後図-10に示す温度降下ひずみとの関係から算出した温度降下ひずみの補正係数Rを乗ずることとした。

図-10に示した温度降下ひずみと温度降下ひずみの補正係数Rの関係は、式(7)により精度良く近似することができる。

$$R = \frac{Icr_{td}}{Icr_{td0}} = c_1(B) \times (\Delta \epsilon_{td})^{c_2(B)} \quad (7)$$

ここで、

c<sub>1</sub>: 係数 (壁厚 B(m)の関数)

したがって、温度変化に基づく最小ひび割れ指数(Icr<sub>td</sub>)は、水セメント比に関わらず、式(8)により一義的に推定できると考えられる。

$$Icr_{td} = R \times Icr_{td0} = \left\{ c_1(B) \times (\Delta \epsilon_{td})^{c_2(B)} \right\} \times \left\{ b_1(B) \times \exp \left\{ (R_{M2})^{b_2(B)} \right\} \right\} \quad (8)$$

3.3 自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数算定

ここでは、検討対象期間である材齢30日までの間で最小ひび割れ指数に寄与すると考えられる自己収縮ひずみ (以下、自己収縮ひずみ (Δε<sub>as</sub>) と略称する) とこれに温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) を加算したひずみが、自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数の算出要因となると考えた。そこで、このひずみと温度変化に基づく最小ひび割れ指数 (Icr<sub>td</sub>) を用いた式(9)により、自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数 (Icr<sub>as</sub>) を算出できると仮定した。

$$Icr_{as} = \frac{\Delta \epsilon_{td}}{\Delta \epsilon_{td} + \Delta \epsilon_{as}} \times Icr_{td} \quad (9)$$

ここで、

Δε<sub>td</sub>: 温度降下ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

Δε<sub>as</sub>: 自己収縮ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

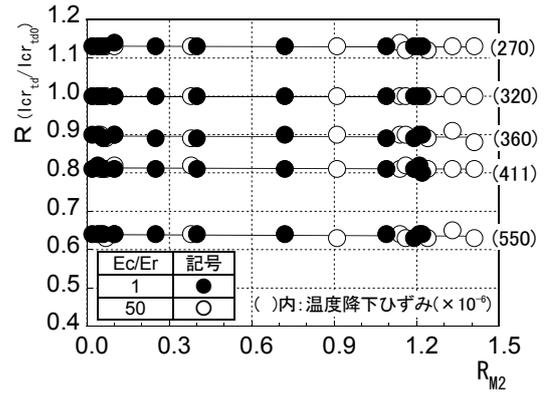


図-9 拘束度 (R<sub>M2</sub>) と R 値の関係

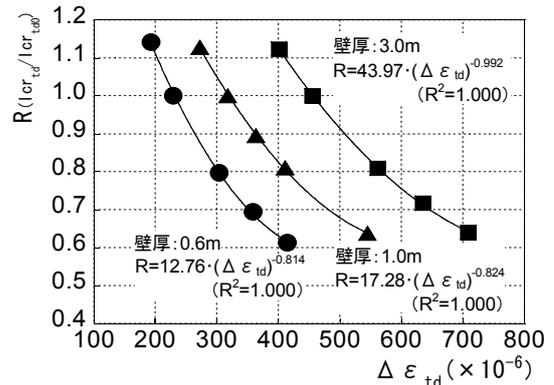


図-10 温度降下ひずみ (Δε<sub>td</sub>) と R 値の関係

このうち、自己収縮ひずみ (Δε<sub>as</sub>) の算定には、式(10)<sup>3)</sup>を使用した。

$$\epsilon_{as}(t) = \gamma \cdot \epsilon_{as\infty} \times \left[ 1 - \exp \left\{ -a(t - t_s)^b \right\} \right] \quad (10)$$

ここで、

ε<sub>as</sub>(t): 材齢t日の自己収縮ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

γ: 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=1.3)

ε<sub>as∞</sub>: 自己収縮ひずみの最終値 (×10<sup>-6</sup>)

$$= 3070 \times \exp \left\{ -7.2 \times (W/C) \right\}$$

t<sub>s</sub>: 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

式(10)において、tおよびt<sub>s</sub>は有効材齢で考慮することから、温度履歴の影響を受ける。そこで、自己収縮ひずみ (Δε<sub>as</sub>) の自己収縮ひずみの最終値 (ε<sub>as∞</sub>) に対する比をε値として式(11)で定義し、ε値と温度上昇量(Δt<sub>in</sub>)の関係について検討を行った。

$$\epsilon = \frac{\Delta \epsilon_{as}}{\epsilon_{as\infty}} \quad (11)$$

壁厚を1.0mとし、W/Cを変化させた場合の温度上昇量(Δt<sub>in</sub>)とε値の関係を図-11に示す。また、壁厚を1.0mとし、温度上昇量32.4℃とし

た場合のW/Cとε値の関係を図-12に示す。

ε値は、温度上昇量(Δt<sub>in</sub>)と高い相関関係を示し、また、W/Cの影響も受けることが明らかとなった。W/Cの影響については、W/Cが50%以上ではε値は同値となり、W/C=50%を下回るにつれε値は大きくなる傾向を示した。そこで、ε値の算出に当たっては、W/C=50%以上と下回る場合とで場合分けした式(12)・(13)で近似することとした。

$$W/C \geq 50\% \\ \epsilon = d_1(B) \times \exp(d_2(B) \cdot \Delta t_{in}) \quad (12)$$

$$W/C < 50\% \\ \epsilon = \{d_3(B) \times \exp(d_4(B) \cdot W/C)\} \times \\ \exp\left[\{d_5(B) \times \exp(1 + d_6(B) \cdot W/C)\}\right] \times \Delta t_{in} \quad (13)$$

ここで、

d<sub>i</sub>(B) : 係数 (壁厚 B(m)の関数)

式(9)~(13)を用いて算出した自己収縮を考慮して、最小ひび割れ指数の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図-13に示す。推定値は解析値を良く反映していることから、本推定方法は妥当であると考えられる。

#### 4. まとめ

最小ひび割れ指数の簡易算定手法について検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 温度上昇量は、外気温および打込み温度によらず、断熱温度上昇式の定数(Q<sub>∞</sub>・γ値)、壁厚および側面の養生条件から精度良く推定できる。
- (2) 温度降下ひずみが同値であれば、水セメント比に関わらず、拘束度R<sub>M2</sub>と壁厚から温度変化に基づく最小ひび割れ指数を推定することができる。
- (3) 温度降下ひずみが異なることによる最小ひび割れ指数への影響は、基本となる温度降下ひずみ(ここでは320×10<sup>-6</sup>)での最小ひび割れ指数に、壁厚と温度降下ひずみを用いて算出した温度降下ひずみの補正係数を乗じることで考慮することができる。
- (4) 自己収縮を考慮することによる最小ひび割

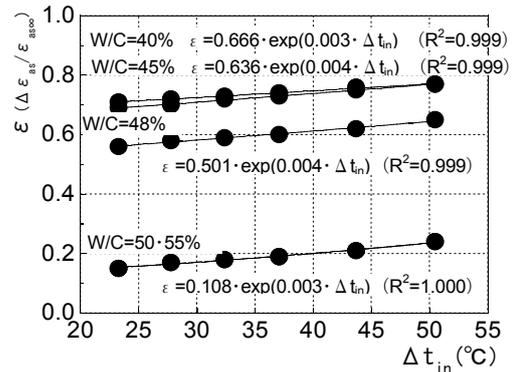


図-11 温度上昇量(Δt<sub>in</sub>)とε値の関係

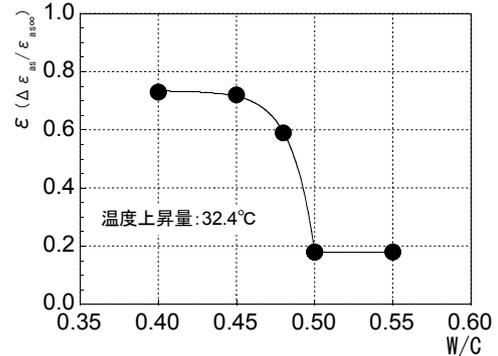


図-12 W/Cとε値の関係

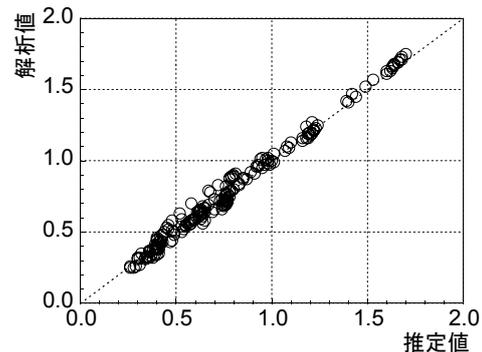


図-13 推定値と解析値の比較  
(最小ひび割れ指数)

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乗じることで算出することができる。

#### 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