

論文 温度ひび割れの簡易評価手法の温度応力解析との整合性

石田 知子*1・近松 竜一*2・片野 啓三郎*3・中里 剛*4

要旨：セメントの水和熱による温度応力および自己収縮に起因したひび割れの照査は、有限要素法による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、温度応力解析は、材料の時間依存性を考慮するため多くの時間や労力を要する。そこで、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を提案し、温度応力解析との整合性について検証した。その結果、提案した簡易評価手法は、温度解析とほぼ同等の温度上昇量を算出できること、最小ひび割れ指数は、温度応力解析による場合と同等か若干小さい値となり、適用範囲を限定すれば実用上は解析と同様にひび割れの発生を評価できること、などを明らかにした。

キーワード：温度ひび割れ、簡易評価手法、温度応力解析、C P法、3次元FEM

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、構造物に発生するひび割れを適切に制御する必要がある。コンクリート構造物に発生するひび割れの原因としては、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て発生する温度応力が挙げられる。

この温度応力に起因するひび割れ（以下、「温度ひび割れ」と称する）の照査は、有限要素法による温度応力解析に基づいて行われるのが一般的である。この温度応力解析は、時間依存するコンクリートの物性を考慮することができ、高い精度での予測が可能となる。一方、対象構造物のモデル化や解析条件の設定と入力、時間に応じて変化する材料特性を考慮した逐次解析の実施およびその解析結果の評価という一連の作業には、非常に多くの時間と労力を必要とする。温度応力解析によらず、簡易な計算で温度ひび割れの発生を推定することができれば実用的であり、ひび割れ制御対策の要否の判断や現場での施工計画の見直し等の迅速な検討に有用と考えられる。

温度ひび割れの簡易評価手法の研究は、これまでも実施されている^{1)~6)}。しかし、いずれの手法においても、構造条件、養生条件、コンクリートの発熱特性など考慮できない影響要因があることから、適用範囲が限定され、条件変更や対策の検討には使用できない場合がある。

著者らは、壁状のマスコンクリート構造物の外部拘束による貫通ひび割れを対象とし、数百ケースにおよぶC P法¹⁾による温度応力解析の結果のデータベースを基に検討した簡易な計算式のみでひび割れ指数の最小値を算定できる簡易手法（以下、「簡易評価手法」と称する）を提案した⁷⁾。これによれば、温度応力の発生メカニズムに基づいた算出ステップを踏むことを基本にし、各種影

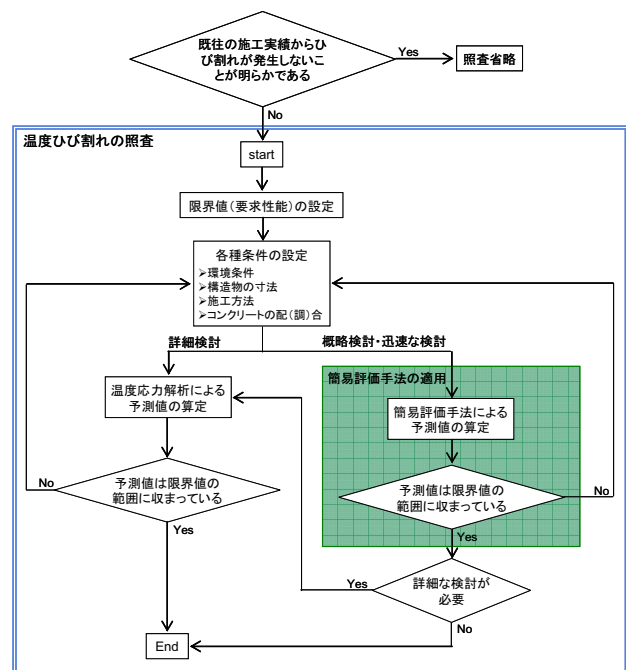


図-1 簡易評価手法を考慮した照査フロー

響要因を考慮して、汎用的にひび割れ指数の最小値を算定することができる。

本論文は、提案した簡易評価手法による推定値とC P法、および3次元FEMによるヤング係数の有効材齢依存を考慮した非線形の温度応力解析による解析値とを比較し、両者の整合性について考察を加え、本簡易評価手法の適用性について検証したものである。

2. 簡易評価手法の概要

2.1 簡易評価手法のフローとその使用方法

簡易評価手法を考慮した温度ひび割れの照査フローを図-1に示す。温度ひび割れの照査は、設計段階または

*1 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主査 博士(工学) (正会員)

*2 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 ㈱大林組 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*4 ㈱宇部三菱セメント研究所

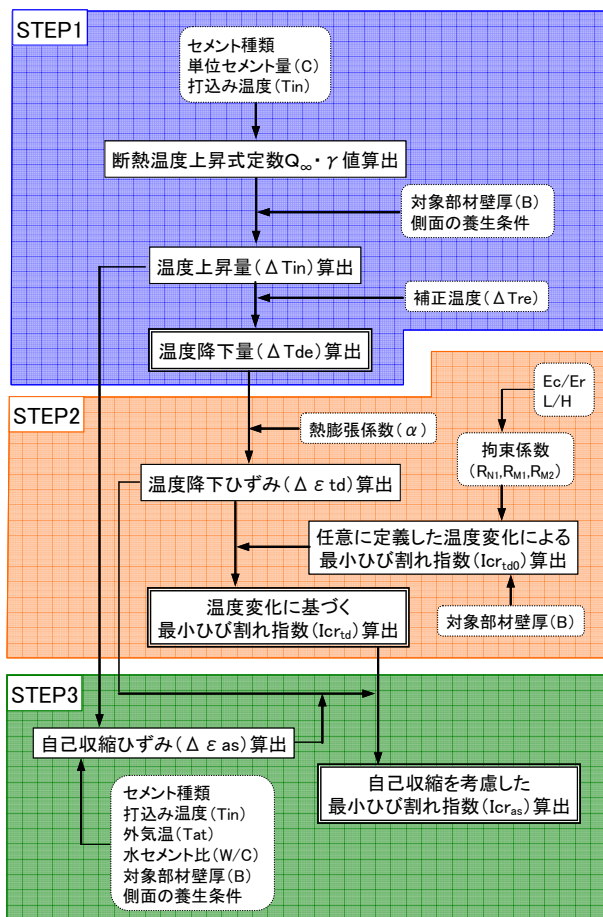


図-2 簡易算出手法概略フロー

施工段階の2段階において実施される。温度ひび割れは、構造、環境および施工条件など様々な要因が相互作用することにより発生することから、過去に同様の実績がない場合は、温度ひび割れの照査が必要か否かは一概に判断できない。したがって、現状の照査では、既往の実績から判断できない場合は、温度応力解析による照査を実施することとなる。これに対して、簡易評価手法を用いれば、照査段階に関わらず、温度応力解析による詳細検討を実施する前に、その詳細検討の可否を判断することができると考える。また、設計段階における照査では、詳細な施工条件が確定していない場合もあることから、概略検討として簡易評価手法による評価結果を用いることも可能であると考えられる。さらに、施工段階における照査では、猛暑や寒波の到来など事前の詳細検討では予測できなかった不測の事態が生じた場合に、簡易評価手法を用いれば迅速な対策検討の対応が可能となるなど、それぞれの照査段階に応じた効果的な使用が考えられる。

2.2 対象構造物および検討期間

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壁部材で、擁壁やボックスカルバートの側壁など、下端を既設コンクリートにより連続的に拘束された部材とした。

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、評価の算出指標はひび割れ指数の最小値(以下、「最小ひび割れ指数」と称する)とした。

コンクリートの温度変化への影響要因は、セメントの水和熱とし、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た。そのため、検討の対象期間は、打ち込んだコンクリートの躯体温度が上昇した後、外気温と同程度となるまでとし、コンクリートの打込み後から1ヶ月間とした。

2.3 ひび割れ指数への影響要因

外部拘束応力が卓越する場合、ひび割れ指数の算出方法は、式(1)は、式(2)のように変換できると考えた。式(2)のうち、変数は拘束条件 (R)、コンクリートの打込みによる部材温度の変化量 ($\Sigma\Delta T$)、熱膨張係数 (α)、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である自己収縮ひずみ ($\Delta\epsilon_{as}$) および圧縮強度 ($f'ck$) である。このうち、圧縮強度 ($f'ck$) は、分子および分母の両方の項に存在することから、他の変数に比べて影響度は小さいと考えられる。したがって、温度ひび割れの発生に影響を及ぼす主要な要因には、コンクリートの打込みによる部材の温度変化、自己収縮ひずみ、および部材の拘束条件となる。なお、構造物の拘束条件としては、CP法で定義されている拘束係数 (R_N, R_{M1}, R_{M2}) を用いることとした¹⁾。

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{tk}(t)}{\sigma_t(t)} \cong \frac{f_{tk}(t)}{\sum_{i=1}^t R \times (\Delta\epsilon_{tdi} + \Delta\epsilon_{asi}) \times \varphi \cdot E_{ci}} \quad (1)$$

$$= \frac{f(f'ck(t))}{\sum_{i=1}^t R \times (\Delta T_i \times \alpha + \Delta\epsilon_{asi}) \times \varphi \cdot f(f'ck_i)} \quad (2)$$

ここに、

- $I_{cr}(t)$: 材齢 t 日におけるひび割れ指数
- $f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度
- $\sigma_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート最大主引張応力度
- R : 拘束
- $\Delta\epsilon_{tdi}$: 材齢 $i-1$ から材齢 i における温度変化に起因したひずみの変化量
- $\Delta\epsilon_{asi}$: 材齢 $i-1$ から材齢 i における自己収縮に起因したひずみの変化量
- E_{ci} : 材齢 i におけるヤング係数
- ΔT_i : 材齢 $i-1$ から材齢 i における温度の変化量
- α : 熱膨張係数
- φ : クリープを考慮したヤング係数の補正係数
- $f'ck$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度

2.4 最小ひび割れ指数の算出手順

簡易評価手法による最小ひび割れ指数の算出は、前述の温度変化、自己収縮ひずみ、および部材の拘束条件の影響要因を用いて構築した関係式により、図-2に示す概略フローに基づき行う。

最小ひび割れ指数の算出までの流れとして、まず

STEP1として対象部材の温度変化量を算出する。外部拘束が卓越する壁状構造物では、一般にひび割れ指数が最小となるのは、コンクリートの温度が上昇した後、外気温と同程度まで降下した時点である。そこで、最小ひび割れ指数に寄与する温度変化量として図-3に示す温度降下量(ΔTdt)を用いる。温度降下量(ΔTdt)は、壁厚(B)、側面の養生条件および打ち込んだコンクリートの断熱温度上昇量より算出した温度上昇量(ΔTin)と補正温度(ΔTre)を用いて式(3)より算出できる。なお、上記の補正温度(ΔTre)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る。

$$\begin{aligned} \Delta Tdt &= \Delta Tin + \Delta Tre \\ &= f(Q_{\infty}, \gamma, B, \Delta Tre) \\ &= Q_{\infty} \times \{a_1(B) \cdot \gamma^2 + a_2(B) \cdot \gamma + a_3(B)\} + \Delta Tre \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、

- ΔTin: 温度上昇量(°C)
- ΔTre: 補正温度(°C)
- Q_∞: 断熱温度上昇量の最終値(°C)
- γ: 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(側面の養生条件に依存)

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(Icr_{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(Icr_{td})を算出することとする。このIcr_{td}は、STEP1において算出した温度降下量(ΔTdt)に熱膨張係数(α)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(Δε_{td})と称する)と曲げ変形に対する拘束係数であるR_{M2}、および壁厚(B)の関係から式(4)により算出できる。

$$\begin{aligned} Icr_{td} &= f(R_{M2}, \Delta Tdt, \alpha, B) \\ Icr_{td} &= f(R_{M2}, B) \times f(\Delta Tdt, \alpha, B) \\ &= \{c_1(B) \times \exp\{c_2(B) \times R_{M2}\}\} \\ &\quad \times \left\{c_1(B) \times (\Delta Tdt \times \alpha \times 10^6)^{e_2(B)}\right\} \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、

- c_i(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(セメント種類・壁厚に依存)
- R_{M2}: 拘束係数
- e_i(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(セメント種類・壁厚に依存)

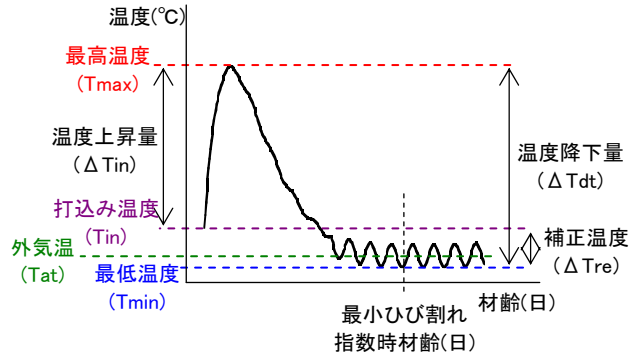


図-3 温度降下量算出イメージ

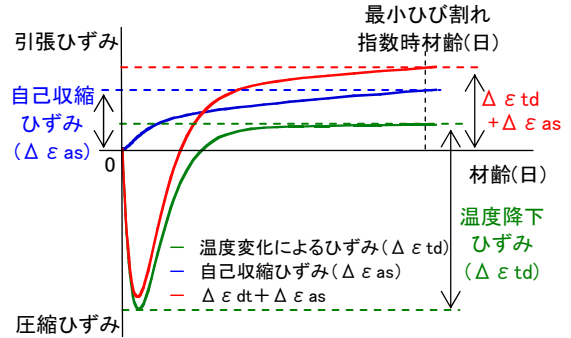


図-4 ひずみイメージ図

- ΔTdt: 温度降下量
- α: 線膨張係数(×10⁻⁶)

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_{as})を算出する。このIcr_{as}は、図-4のイメージ図に示す自己収縮ひずみ(Δε_{as})および温度降下ひずみ(Δε_{td})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_{td})を補正することにより、式(5)から算出できる。

$$\begin{aligned} Icr_{as} &= f(\Delta \epsilon_{td}, \Delta \epsilon_{as}, Icr_{td}) \\ &= \frac{\Delta \epsilon_{td}}{\Delta \epsilon_{td} + \Delta \epsilon_{as}} \times Icr_{td} \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、

- Δε_{td}: 温度降下ひずみ(×10⁻⁶)
- Δε_{as}: 自己収縮ひずみ(×10⁻⁶)

なお、式(3)および式(4)で用いる係数(b_i・d_i・f_i)については、数百ケースに及ぶCP法による解析結果のデータベースを基に算出した⁷⁾。

3. 温度応力解析との比較検証

3.1 温度応力解析の概要

比較を行った温度応力解析の解析手法は、本簡易評価手法検討時に、その解析結果をデータベースとして用いたCP法に加え、より高度な解析精度を有する3次元FEMの2種類とした。比較検討した温度応力解析手法を表-1に示す。

3次元FEMの解析に用いた解析モデル図を、図-5

表-1 温度応力解析手法

	解析名称	
	CP法	3次元FEM
温度解析	2次元FEM	3次元FEM
応力解析	CP法	3次元FEM

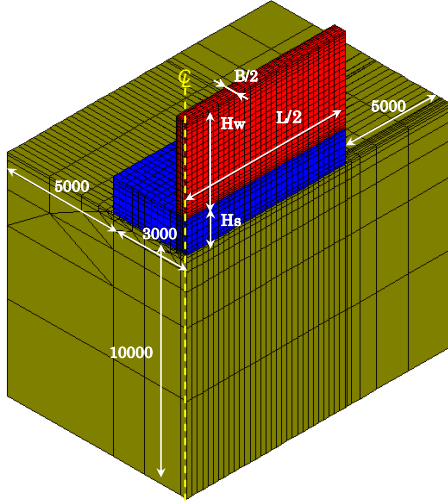


図-5 解析モデル (3次元FEM)

に示す。検討対象とした底版により連続的に拘束される壁部材は、対称形状を想定したことから、CP法では1/2断面を、3次元FEMでは1/4断面をモデル化した。

コンクリートの熱物性や強度特性などの解析条件については、土木学会「コンクリート示方書・設計編(2007年制定)」¹⁾に準拠し設定した。また、コンクリートの自己収縮ひずみは、川合らの提案式⁹⁾を用いた。

3.2 検討ケース

本検討では、部材の厚さ、打込み長ささと高さの比(L/H)、打込み時期、打込み温度、セメント種類、水セメント比および単位セメント量をパラメータとし、77ケースについて検討した。パラメータの検討範囲を表-2に示す。

3.3 簡易評価手法の温度応力解析結果との比較結果

(1) 温度上昇量

図-3に示した簡易評価手法の概略フローのうち、STEP1に示した温度上昇量(ΔT_{in})について、簡易評価手法による推定値(以下「簡易推定値」と称する)と、温度解析による解析値(以下「解析値」と称する)との比較を行った。壁状構造物の場合、部材厚方向の熱の移動が卓越することから、温度上昇量の解析値は、2次元および3次元の次元に関わらずほぼ同等となる。そこで、ここでは、簡易推定値と2次元FEMによる解析値とを比較した結果を図-6に示す。簡易推定値と解析値は、概ね $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲で一致していることから、本簡易評価手法は、2次元および3次元FEMによる温度解析とほぼ同等の温度上昇量を算出できると考えられる。

各部材厚ごとの傾向を見ると、部材厚を3.0mと厚くした場合、簡易推定値は解析値より小さくなる傾向を示

表-2 検討パラメータと検討範囲

項目	単位	検討範囲
構造条件	壁厚	m 0.5・0.7・1.0・2.0・3.0
	L/H (打込み長さ)	— (m) 1.1・2.7・4.0・5.5 (6・15・22・30)
施工条件	打込み時期 (打込み温度)	— ($^{\circ}\text{C}$) 4月下旬(20.4) 7月中旬(30.2) 10月下旬(20.5) 1月上旬(10.0)
	セメント種類	— 高炉セメントB種 普通ポルトランド 早強ポルトランド 中庸熱ポルトランド 低熱ポルトランド
コンクリート	水セメント比	% 65・50・30
	単位セメント量	kg/m^3 260・350・550

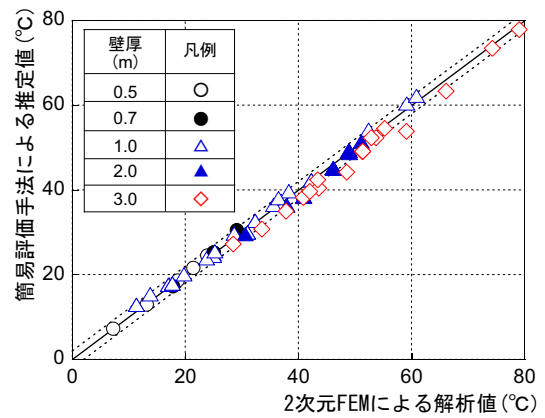


図-6 温度上昇量の簡易推定値と解析値の比較 (2次元FEM)

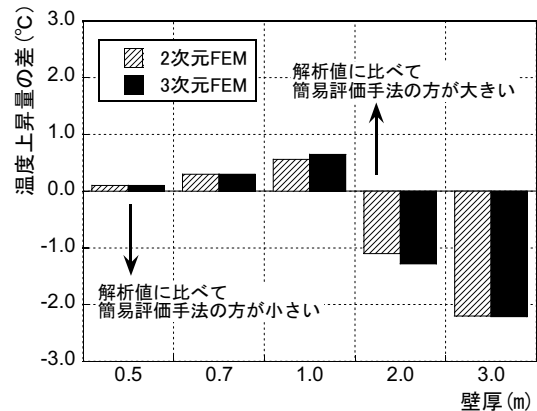


図-7 壁厚と温度上昇量の簡易推定値と解析値との差(平均値)との関係

した。壁厚と温度上昇量の簡易推定値と解析値との差の平均値との関係を図-7に示す。部材厚が厚くなるほど、温度上昇量の簡易推定値と解析値との差が大きくなる傾向が認められる。本手法では、温度上昇量は式(3)に示したように、断熱温度上昇量の最終値(Q_{∞})に温度上昇速度を表す係数(γ)から求めた補正係数を乗ずる方法で算出する。そのため、温度上昇量が大きい厚い壁では、この補正係数の精度の影響を受け易く、解析値との差が大きくなったと考えられる。

(2) 最小ひび割れ指数

図-3 に示した簡易評価手法の概略フローのうち、STEP3 に示した自己収縮を考慮した最小ひび割れ指数 ($I_{cr,as}$) について、簡易評価手法による推定値（以下「簡易推定値」と称する）と、CP法および3次元FEMによる温度応力解析による解析値（以下「解析値」と称する）とを比較した結果を図-8 および図-9 に示す。このうち、図-8 に示した簡易推定値とCP法による解析値との比較では、概ね±0.1の範囲で一致している。ただし、壁厚を1.0mとした検討ケースのうち、CP法による解析値が1.40以上と大きくなるケースで、簡易推定値と解析値との差が0.1を超えて、簡易推定値の方が小さくなる場合が2ケース認められた。

簡易推定値と3次元FEMによる解析値とを比較した図-9 では、CP法と比較した図-8 の場合に比べ、全体的に簡易推定値の方が小さい値を算出する傾向が認められ、簡易推定値と解析値との差は、概ね-0.15～+0.1程度の範囲に納まる。ただし、CP法と同様に壁厚を1.0mとした検討ケースにおいて、簡易推定値と解析値との差が0.15を超えて、簡易推定値の方が小さくなる場合が4ケース認められた。CP法に比べ、全体的に簡易推定値の方が小さい値を算出した原因としては、本簡易評価手法では、3次元FEMに比べひび割れ指数を若干小さく算出する傾向があるCP法による解析結果を、データベースとして使用していることが考えられる。

また、温度上昇量の簡易推定値と解析値の差が大きくなった壁厚3.0mとした場合、最小ひび割れ指数については、いずれの解析手法においても、簡易推定値と解析値はほぼ同等となる結果を示した。本簡易評価手法は、温度上昇量から算出した温度降下量を用いて最小ひび割れ指数を算出する。壁厚3.0mとした場合、その温度上昇量が概ね40℃以上と大きくなることから、温度上昇量の簡易推定値と解析値の差が若干大きくても、最小ひび割れ指数への影響は小さくなると思われる。そこで、温度上昇量の簡易推定値と解析値の差の絶対値を各解析手法の温度上昇量で除した値（以下、「簡易推定値と解析値の差が温度上昇量に占める割合」と称する）を温度上昇量ごとに整理した結果を図-10 に示す。簡易推定値と解析値の差が温度上昇量に占める割合は、一部局所的に小さくなる箇所があるが、全体的には、温度上昇量が大きくなると小さくなる傾向が認められた。

そこで、図-8 および図-9 に示した最小ひび割れ指数の簡易推定値と各解析手法における解析値との比較を、温度上昇量ごとに整理した結果を図-11 および図-12 に示す。また、温度上昇量と最小ひび割れ指数の簡易推定値と各解析手法における解析値との差の平均値の関係を図-13 に示す。

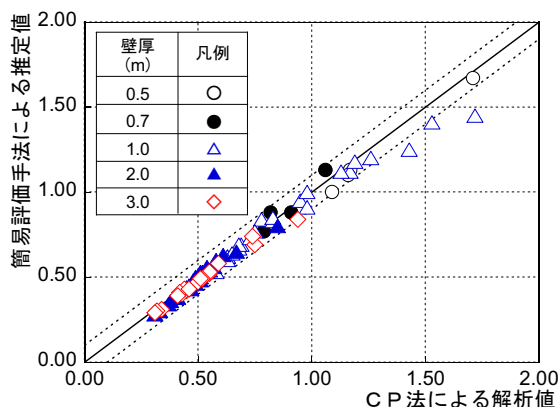


図-8 最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値の比較（CP法）

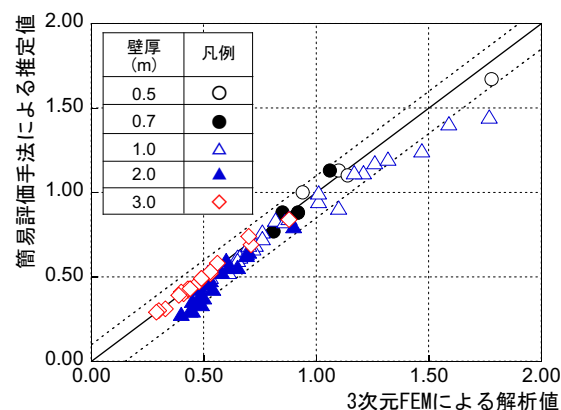


図-9 最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値の比較（3次元FEM）

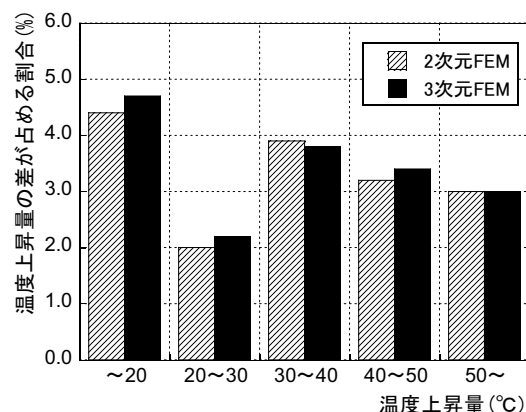


図-10 温度上昇量の簡易推定値と解析値の差が温度上昇量に占める割合（平均値）

図-11 および図-12 から、最小ひび割れ指数の解析値と簡易推定値との差が大きくなる検討ケースは、解析手法に関わらず、いずれも温度上昇量が20℃以下と小さい場合であることが判る。また、図-13 では、温度上昇量が20℃以下の小さい場合に、最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値との差の平均値が最も大きくなる結果を示した。

したがって、本簡易評価手法の精度向上を図る上では、温度上昇量の簡易推定値と解析値の差が温度上昇量に占める割合を小さくする必要があると考えられる。そのためには、薄い部材や冬季施工時など温度上昇量の低い条

件下において、温度上昇量の推定精度の向上を図る必要があると考えられる。

4. まとめ

壁状のマスコンクリート構造物に生じやすい外部拘束による貫通した温度ひび割れを対象に提案した簡易評価手法について、CP法および3次元FEMによる温度応力解析による評価との整合性を検証した。本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 簡易評価手法により算定した温度上昇量は、2次元および3次元FEMによる温度解析から求まる解析値に対して約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲で一致しており、簡易法によっても実用上は温度解析と同等の精度で温度上昇量を評価できる。
- (2) 簡易評価手法から求まる最小ひび割れ指数は、CP法により得られる解析値に比べ、最小ひび割れ指数が1.40以上の範囲で若干小さな値となり安全側の評価となるが、両者は概ね ± 0.1 の範囲で一致している。したがって、壁厚が0.5~3.0m、打込み長さ \times 高さの比(L/H)が1.1以上の場合には、簡易法によりCP法とほぼ同等の最小ひび割れ指数を算定できる。
- (3) 簡易評価手法と3次元FEMによる最小ひび割れ指数の相違は、概ね $-0.15 \sim +0.1$ の範囲にあり、全般的には簡易評価手法による算定値の方が若干小さい傾向が認められる。したがって、上記の適用範囲において、簡易法によるひび割れの発生に対する評価は、3次元FEMによる解析による場合と同等か若干安全側の評価となる。

参考文献

- (1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】(2007年制定)
- (2) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書，pp.15~21，2006.6
- (3) 小野定，櫛田泰仁，名倉健二，金森洋史，江渡正満：第2回マスコンクリートの温度ひび割れ制御対策の研究，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，pp.21~28，1984.3
- (4) 小野定：マスコンクリートの温度ひびわれ特性の数量化に関する検討，コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するコロキウム，pp.45~54，1990.8
- (5) 網野貴彦，上谷修一，岩谷理，羽瀨貴士：外部拘束が主体となる壁状構造物の温度ひび割れ評価式の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.199~204，2007

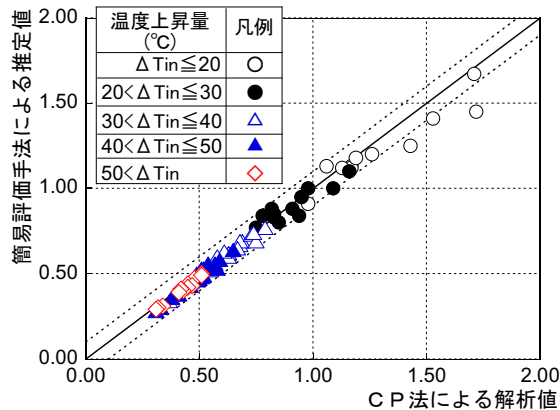


図-11 最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値の比較 (CP法)

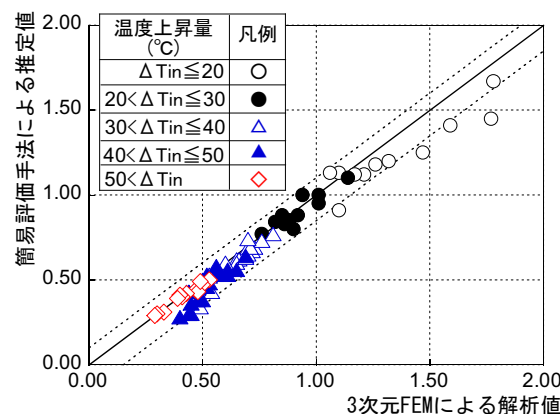


図-12 最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値の比較 (3次元FEM)

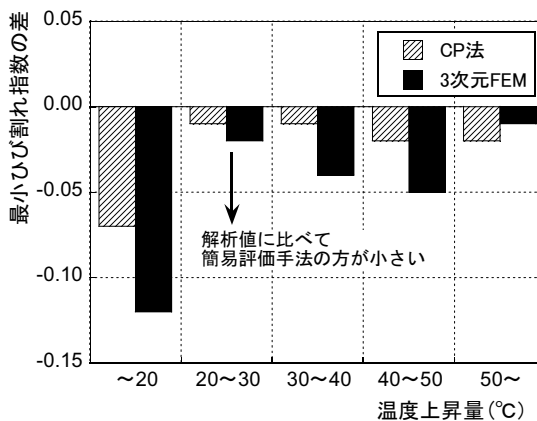


図-13 温度上昇量と最小ひび割れ指数の簡易推定値と解析値との差(平均値)の関係

- (6) (社)日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008.12
- (7) 石田知子，近松竜一，辻幸和：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.187~192，2007
- (8) 川合雅弘，宮澤伸吾，黒井登起雄，齋藤倫将：コンクリートの自己収縮ひび割れの予測式に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.491~496，2003