

論文 温度ひび割れ指数の簡易評価方法の提案

溝淵 利明^{*1}・佐藤 良一^{*2}・鈴木 康範^{*3}・丸山 一平^{*4}

要旨：本論文では、温度応力解析を実施することなく環境条件や構造物形状、熱特性や力学特性などの物性値を説明変数として温度ひび割れ指数を推定する簡易評価式の提案を行った。簡易評価式の算定には、1000近い各種構造物の3次元モデルを用いた有限要素法による温度応力解析結果を用い、打込み温度、断熱温度上昇特性、放熱条件、引張強度、拘束体との剛性などを説明変数とした重回帰分析を行った。その結果、壁状構造物、層状構造物および柱状構造物について、自己収縮ひずみや施工条件などを考慮できないものの、比較的精度の高い簡易評価式を提案することができた。

キーワード：温度ひび割れ指数、簡易評価式、温度応力、重回帰式、壁状構造物、層状構造物、柱状構造物

1. はじめに

温度ひび割れに対する事前検討では、対象構造物から温度応力によるひび割れ発生の可能性が高いと思われる部位をモデル化し、材料・配合、施工方法を考慮した解析を行うのが一般的である。また、形状変更の際には解析モデルの再構築を行って、計算を行う場合が多い。最近では、パーソナルコンピュータの性能向上に伴い、大容量の解析を高速で行えることから、3次元モデルによる解析を行う場合が多くなっている¹⁾。しかしながら、解析モデルの構築、解析条件の設定、制御目標値に達するまでの解析条件を変化させてのパラメータ解析は、如何にコンピュータの性能が向上しても非常に手間のかかる作業であることに変わりはない。そこで、従来から温度応力解析を実施しないで解析条件などを用いて概略値を算定する簡易評価式が提案されている^{2)~8)}。

本論文では、従来方法よりもさらに精度よく実構造物でのひび割れ発生の有無やひび割れ幅の推定を目指した簡易評価式を提案するために、約1000近い構造物について3次元モデルによる温度および応力解析を行い、その結果を基に温度ひび割れ指数の簡易評価式の算定を行った結果についてとりまとめたものである。

2. 検討の概要

2.1 温度応力に影響を与える要因について

解析を実施することなく温度ひび割れ指数を推定するためには、3次元モデルによる温度および応力解析(以後、詳細解析と称する)に用いる解析条件をできるだけ多く網羅しておく必要がある。ただし、それらの条件の多くは独立した条件ではなく他の条件に影響を与える場合がある。また、解析条件だけでは十分に詳細解析結果を表現することができるとはいいい難い点や、解析条件

を数多く用いることで却って煩雑な計算となってしまいう場合もある。したがって、簡易評価式の算定に際しては、できるだけ入力すべき条件を少なくした式とし、かつ得られる結果ができるだけ詳細解析結果と同等となるような式の作成が必要となる。

本検討で簡易評価式を算定するために用いたのは、約1000(壁状構造物のデータ約210,スラブ状構造物のデータ約80,層状構造物のデータ約710,柱状構造物約20)の温度応力解析結果データのうち、壁状構造物、スラブ状構造物、層状構造物(2層以上打重ねた構造物)、柱状構造物(橋梁橋脚)のデータである。ただし、本検討での簡易評価式で対象とする層状構造物は橋梁橋台や砂防ダム等であり、コンクリートダムについては検討事例が少なかったことから適用外とした。また、柱状構造物は本指針で検討した事例が橋梁橋脚であったことから、柱の幅の最小値が2.0mで、長さとの比が1.00~9.50で矩形断面を簡易評価式の対象とした。さらに、本検討で対象としたのは、部材を貫通するひび割れであり、表面ひび割れは対象としなかった。

一般に、詳細解析を実施する際には、モデル作成のための構造物形状・寸法、使用材料・配合、熱特性値、境界条件(断熱境界、対流境界など)、力学特性などの解析条件が必要である。詳細解析時に必要となる条件で、簡易評価式に適用すべきであると思われる条件は、解析対象となる部材の幅、長さ、高さ(mm)、セメントの種別、水セメント比、単位セメント量、混和材料の種別と使用量、打継ぎ間隔(日)、型枠の種別もしくは養生条件、型枠存置期間、打込み温度、外気温、地盤のヤング係数などがある。

上記の項目は、簡易評価式に適用できるように定量化した値、例えば、セメントの種別を表すものとして、断

*1 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻 建設構造工学講座 教授 工博 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株)セメントコンクリート研究所 技師長 工博 (正会員)

*4 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

熱温度上昇特性を用いる必要がある。また、水セメント比や単位セメント量のようにセメントの種類に関係なく同じように取り扱われる値については、材齢 28 日や 91 日での圧縮強度もしくは引張強度、終局断熱温度上昇量や上昇速度に関する係数のようなセメント種別が考慮された値に置き換えて評価することとした。さらに、説明変数の数をできるだけ増やさないようにするために、例えば、養生期間とその間の境界条件（表面熱伝達率）を乗じることによって一つの変数として捉えられるようにした。

詳細解析は、“マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008”⁹⁾ に示されている材料の設計用値および解析手法に準拠して行った。

2.2 簡易評価式に用いる説明変数の選定

各解析条件と詳細解析で得られた温度ひび割れ指数について単回帰分析を行い、簡易評価式での説明変数として考慮すべきかどうかの検討を行った。ただし、一つの変数のみで温度ひび割れ指数との関係を表すことはできないことから、定性的な傾向、たとえば部材長さが長くなるほど温度ひび割れ指数は小さくなる傾向にあるというような点で、説明変数として考慮すべきかどうか判断することとした。単回帰分析の結果、温度ひび割れ指数算定に加える説明因子としては、打込み温度(°C)、セメントの水和発熱に影響を与える断熱温度上昇特性（終局断熱温度上昇温度(°C)および上昇速度に関する定数）、温度ひび割れ指数算定に影響を与える引張強度(N/mm²)で標準養生材齢 28, 91 日における割裂引張強度、部材からの放熱に影響を与える表面熱伝達率、型枠存置期間、対象部材の収縮や拘束体に影響を与える部材厚(D(m))、L/H(部材の部材長さ(L(m))と部材高さ(H(m))の比)および E_c/E_r (E_c :対象とする部材のヤング係数(N/mm²), E_r :拘束体となる地盤のヤング係数(N/mm²)とし、 E_c は標準養生材齢 28, 91 日における供試体のヤング係数とする)を選定した。例えば、打込み温度と温度ひび割れ指数との関係は、図-1 に示すように構造物の種類、セメント種別に関係なく打込み温度が高くなるほど明確ではないが、温度ひび割れ指数が小さくなる傾向を示している。また、終局断熱温度上昇量と温度ひび割れ指数との関係は、図-2 に示すように高炉セメント B 種以外は、終局断熱温度上昇量の増加に伴い明確ではないが、温度ひび割れ指数が小さくなる傾向を示しており、一般的に言われている傾向に近い結果となっている。高炉セメント B 種は、他のポルトランドセメントと異なり若干ではあるが終局断熱温度上昇量の増加に伴い温度ひび割れ指数が大きくなる傾向を示したが、全体の傾向として、終局断熱温度上昇量の増加に伴い温度ひび割れ指数が小さくなる傾向にあっ

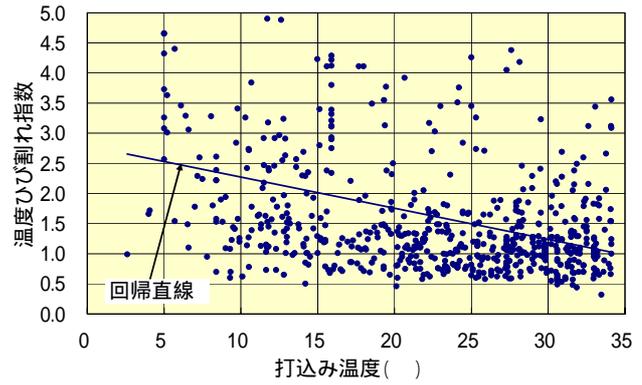


図-1 打込み温度と温度ひび割れ指数との関係

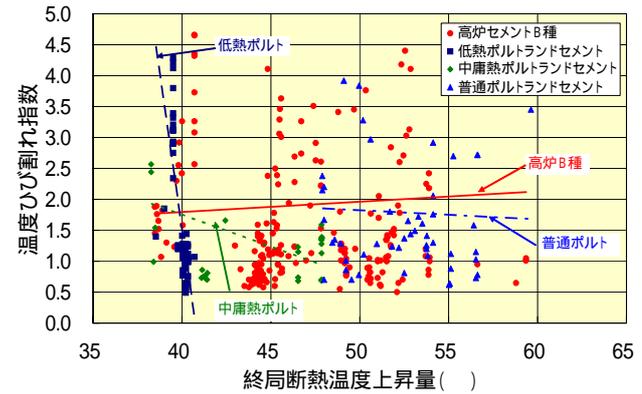


図-2 終局断熱温度上昇量と温度ひび割れ指数との関係

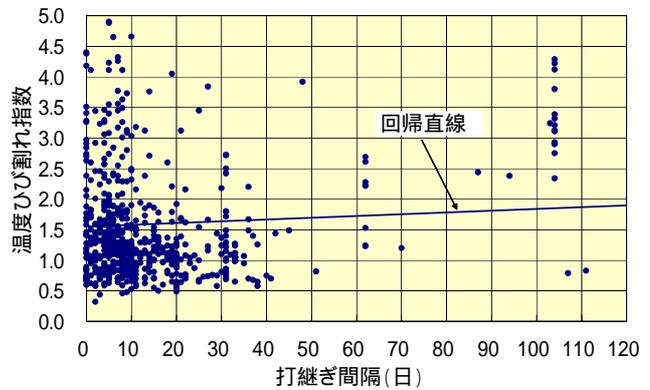


図-3 打継ぎ間隔と温度ひび割れ指数との関係

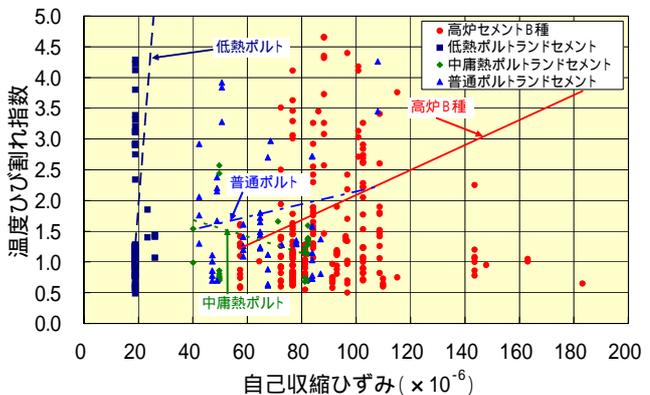


図-4 自己収縮ひずみと温度ひび割れ指数との関係

たことから、説明因子の一つとして考慮することとした。

一方、当初温度応力に影響を与えられたと思われた打継ぎ間隔及び自己収縮ひずみは、本検討において簡易評価式には考慮しなかった。その理由として、打継ぎ間隔と詳細解析で得られた温度ひび割れ指数との関係から、図-3に示すように打継ぎ間隔が長くなるほど温度ひび割れ指数が大きくなる傾向を示し、今回の傾向が一般の傾向と反対であったこと、また自己収縮ひずみの最終値と温度ひび割れ指数との関係から、図-4に示すように各セメントとも自己収縮ひずみの増加に伴って温度ひび割れ指数が大きくなる傾向を示しており、これも一般の傾向と反対の傾向を示したためである。

3. 簡易評価式による部材内の温度および応力の推定

3.1 簡易評価式による最高温度の推定

本検討では、温度ひび割れ指数を推定するための簡易評価式を求めることを目的としているが、その過程で部材内の最高温度及び温度降下量の推定のための簡易評価式の算定を行った。

部材内の最高温度の推定には、上述した説明因子のうちセメントの水和発熱に影響を与える断熱温度上昇特性（終局断熱温度上昇温度（ Q_{∞} ）および上昇速度に関する定数）、対象部材の温度変化に影響を与える部材厚を用いるとともに、外気温、 V/S （体積面積比）も説明因子に加えて重回帰分析を行った。重回帰分析した結果を図-5に示す。図-5から、部材内の最高温度は構造物の種別、セメントの種別に関係なく比較的高い相関関係を示した（重相関係数：0.86）。部材内の最高温度の重回帰式を以下に示す。

$$T_{max} = 1.10T_a + 0.756Q_{\infty} + 0.126\alpha^{\beta} + 10.5V/S + 2.20D \quad (1)$$

ここで、 T_{max} は部材内の最高温度（ $^{\circ}C$ ）、 T_a は外気温（ $^{\circ}C$ ）、 Q_{∞} は終局断熱温度上昇量（ $^{\circ}C$ ）、 α^{β} は上昇速度に関する定数、 V/S は体積面積比（ m ）（ V ；対象部材の体積（ m^3 ）、 S ；対象部材の表面積（ m^2 ））、 D は部材厚（ m ）である。

3.2 簡易評価式による部材内の温度降下量の推定

部材内の温度降下量（部材内での最高温度から材齢30日以内での部材内の最低温度との差）について構造物の種別、セメントの種別に関係なく重回帰分析を行った場合、重相関係数は0.63となり、それほど高い相関性が得られない結果となった。構造物別で整理した場合には、壁状構造物が図-6に示すように、比較的高い相関性（重相関係数で0.89）を示したものの、その他の構造物は詳細解析結果との相関性は見られなかった。壁状構造物に

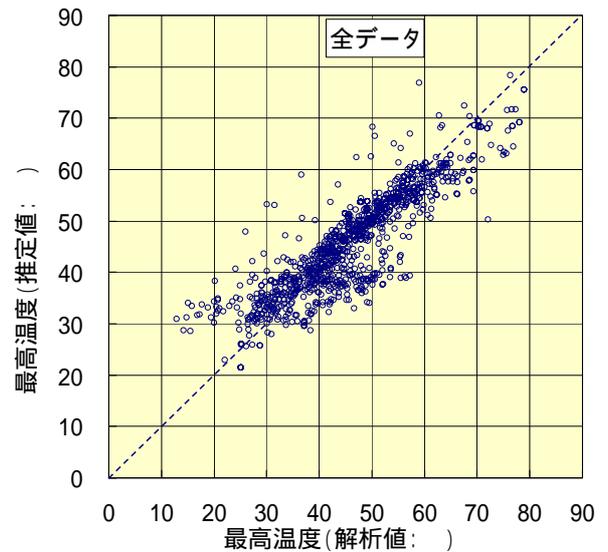


図-5 最高温度の推定値と解析値との比較

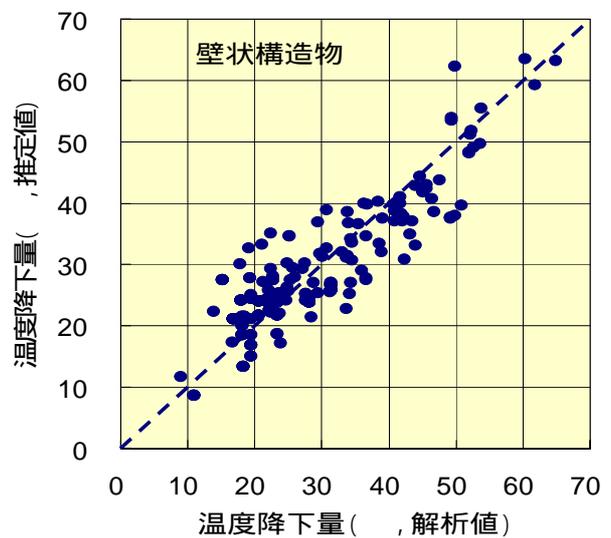


図-6 温度降下量の推定値と解析値との比較

おける温度降下量の重回帰式を以下に示す。

$$T_{fa} = -0.241T_c + 0.577Q_{\infty} + 6.07\alpha^{\beta} + 6.91V/S + 1.06D - 0.584T_{eff} - 0.764T_{ca} + 1.38L/H \quad (2)$$

ここで、 T_{fa} は部材内の温度降下量（ $^{\circ}C$ ）、 T_c は打込み温度（ $^{\circ}C$ ）、 T_{eff} は放熱条件であり、 $T_{eff} = \log(\eta \cdot t_{cu})$ （ η ：表面熱伝達率（ W/m^2 ）、 t_{cu} ：型枠存置期間（もしくは養生期間（日）））、 T_{ca} は外気温の変化で打込み時の外気温と打込み後1ヶ月での外気温との差異、 L/H は部材の部材長さ（ L （ m ））と部材高さ（ H （ m ））との比である。

3.3 簡易評価式による部材内の最大引張応力の推定

部材内の最大引張応力については、全データを基に重回帰分析した結果、重相関係数が0.42であり、簡易評価式を用いて推定することは難しいと思われる。構造物

別では、壁状構造物で重回帰分析を行った結果、重相関係数が 0.70 であり、高い相関関係ではなかったが、ある程度の推定は可能であると思われる。壁状構造物での重回帰式から推定した結果と詳細解析結果との関係を 図-7 に示す。その他の構造物については、重相関係数が 0.6 を下回る結果となっており、実際に適用するのは難しいと考えられる。

4. 簡易評価式による温度ひび割れ指数の推定

簡易評価式による温度ひび割れ指数の推定は、構造物を考慮しないで重回帰式を算定した場合、図-8 に示すように高い相関関係が得られなかったことから、構造物別で行うこととした。

4.1 壁状構造物

壁状構造物については、構造物の形状に関係なく重回帰分析を実施したところ、高い相関性（重相関係数で 0.70）が得られず、簡易評価式を用いて温度ひび割れ指数を推定することは難しいと考えられる。しかしながら、適用範囲を絞れば簡易評価式の適用性の可能性が増大できるのではと思われたことから、壁厚を 1m 以下と 1m を超える場合で区分して重回帰分析を行った。その結果、図-9 および図-10 に示すように壁厚が 1m 以下の場合、重相関係数が 0.71 であったのに対して、壁厚が 1m を超える場合には重相関係数が 0.76 となり、壁厚を考慮しない場合に比べて高い相関関係を示した。推定式を以下に示すとともに、適用範囲を示す。ただし、簡易評価式を用いて推定する場合には、安全側を見込んで重回帰式による推定値から、0.3 差し引いた値を推定値として用いることとした。これにより、図-10 に示すように簡易評価式で推定した値が詳細解析結果を下回ることは、ほとんどないこととなる。

$$I_{cr} = -1.93 \times 10^{-2} T_a - 2.80 \times 10^{-3} D - 1.17 \times 10^{-2} Q_{\infty} + 1.55 \times 10^{-2} \alpha^{\beta} + 8.72 \times 10^{-2} \log_{10}(H_R) + 0.476 f_t - 0.165 \log_{10}(L/H) + 0.224 \log_{10}(E_c/E_r) - 0.285 \quad (3)$$

ここで、セメントの種類：普通ポルトランドセメント (NPC)，中庸熱ポルトランドセメント (MPC)，低熱ポルトランドセメント (LPC)，早強ポルトランドセメント (HPC)，高炉セメント B 種 (BB)，フライアッシュセメント B 種 (FB)，壁厚：1m ~ 5.4m，打込み温度の範囲：4 ~ 34，終局断熱温度上昇量：38.5 ~ 53.9（単位セメント量：278 kg/m³ ~ 324kg/m³），上昇速度に関する定数（ α^{β} ）：0.36 ~ 1.42，部材表面からの放熱条件の範囲（ H_R ）：24 ~ 232 (W/m²・日)，引張強度(f_t)：2.39N/mm² ~ 3.52 N/mm²（水セメント比：48.2% ~ 60.0%）で、普通、早強、高炉 B 種は材齢 28 日の、中庸熱、低熱、フライアッシュ B

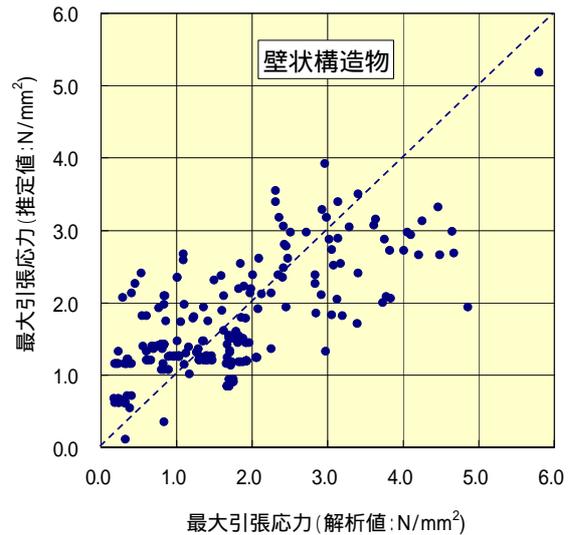


図-7 最大引張応力の推定値と解析値との比較

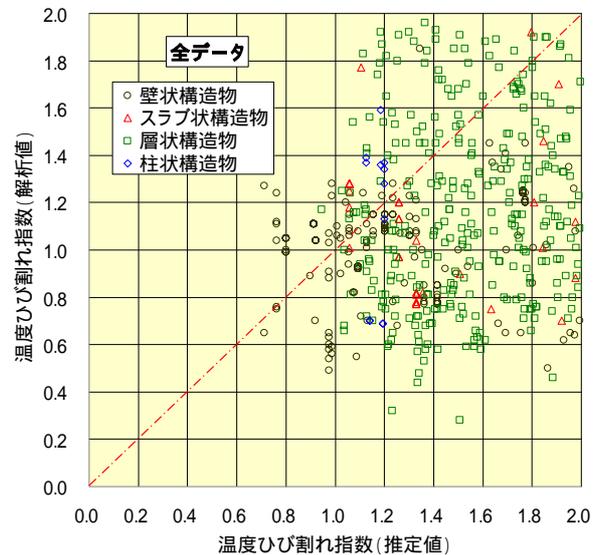


図-8 温度ひび割れ指数の推定値と解析値との比較

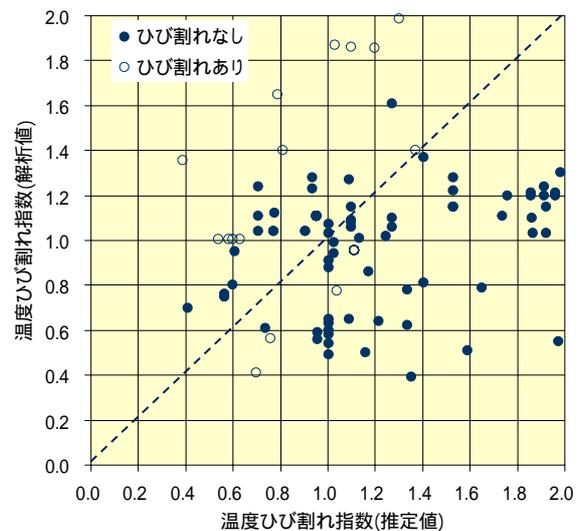


図-9 推定値と解析値との比較
(壁状構造物；壁厚 1m 以下)

種は材齢 91 日の割裂引張強度，部材の長さ（地盤からの全高さ）の比(L/H): 0.4 ~ 30 (L : 3.0m ~ 40m, H : 0.75m ~ 7.2m), 被拘束体と拘束体のヤング係数の比(E_c/E_r): 7 以上 (拘束体が改良土の場合は 7 としている) とした。

4.2 スラブ状構造物

スラブ状構造物については，図-11 に示すように推定値のばらつきが他に比べて大きい結果となった (重相関係数で 0.70)。これは，スラブ状構造物のような内部拘束が卓越するフーチングやタンク底版の場合，若材齢時において表面ひび割れが生じる場合が多く，本検討のように部材を貫通するようなひび割れで打込み後 1 ヶ月までを基本的に対象とした場合とは，ひび割れ発生機構が異なるためと思われる。したがって，本検討においてスラブ状構造物は，簡易評価式による推定から除外することとした。

4.3 層状構造物

層状構造物については，対象としたのが砂防ダムや 3 リフト以上の底版などであり，コンクリートダムや橋脚などは対象外とした。ただし，橋脚については，柱状構造物として取り扱うこととした。層状構造物での重回帰分析による推定値と解析値と比較した結果を図-12 に示す。図-12 から，推定値と解析値とは，高い相関性は得られなかったが (重相関係数で 0.79)，実構造物への適用に関してはさらに実績を加えていけば精度が向上すると思われることから，重回帰式による簡易評価式を提案することとした。ただし，簡易評価する場合には，安全側を見込んで重回帰式による推定値から，0.3 差し引いた値を推定値として用いることとした。

$$I_{cr} = -0.0342T_a + 0.0103D - 0.0930Q_\infty + 0.149\alpha^\beta - 0.312\log_{10}(H_R) + 0.142f_i - 0.236\log_{10}(L/H) - 0.0767\log_{10}(E_c/E_r) + 5.68 \quad (4)$$

ここで，セメントの種類：MPC，BB，打込み温度 (T_a): 5.0 ~ 33.5，1 リフトの高さ (D): 0.5m ~ 4.45m，終局断熱温度上昇量 (Q_∞): 38.5 ~ 46.0 (単位セメント量; 200 kg/m³ ~ 277kg/m³)，上昇速度に関する定数 (α^β): 0.14 ~ 1.12，部材表面からの放熱条件 (H_R): 24 ~ 434 (W/m²・日)，コンクリートの割裂引張強度 (f_i): 2.24N/mm² ~ 3.34 N/mm² (水セメント比; 55.0% ~ 64.0%) で，BB は材齢 28 日の，MPC は材齢 91 日の割裂引張強度，部材の長さ（地盤からの全高さ）の比(L/H): 0.2 ~ 31.4 (L : 9.0 m ~ 44.6m, H : 4.8 m ~ 23.8 m), 被拘束体と拘束体のヤング係数の比(E_c/E_r): 1 以上 (拘束体が置換コンクリートの場合は 1 としている) とした。

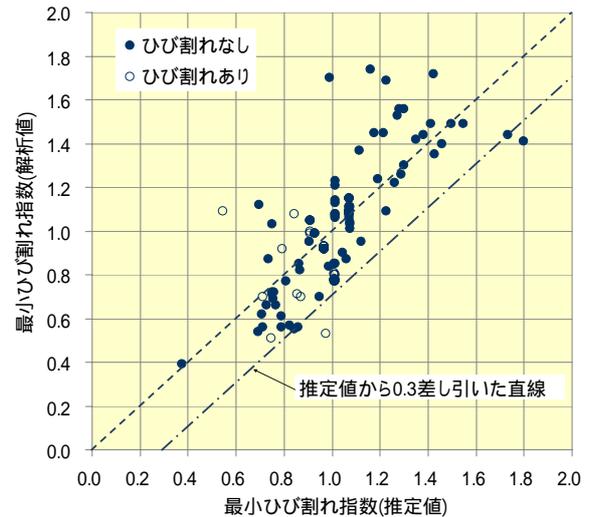


図-10 推定値と解析値との比較
(壁状構造物；壁厚 1m を超えるもの)

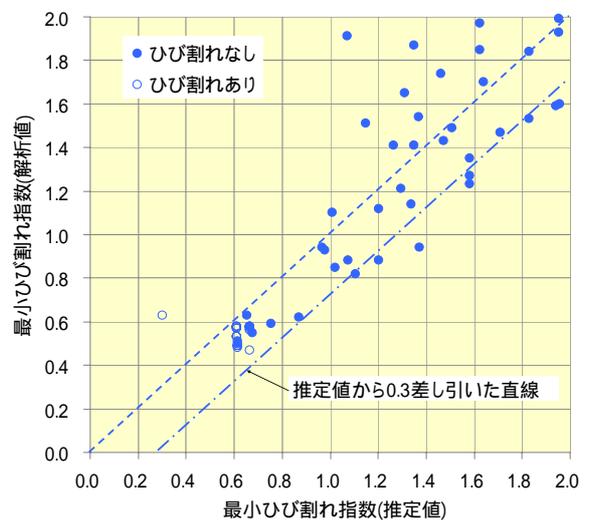


図-11 温度ひび割れ指数の推定値と解析値との比較
(スラブ状構造物)

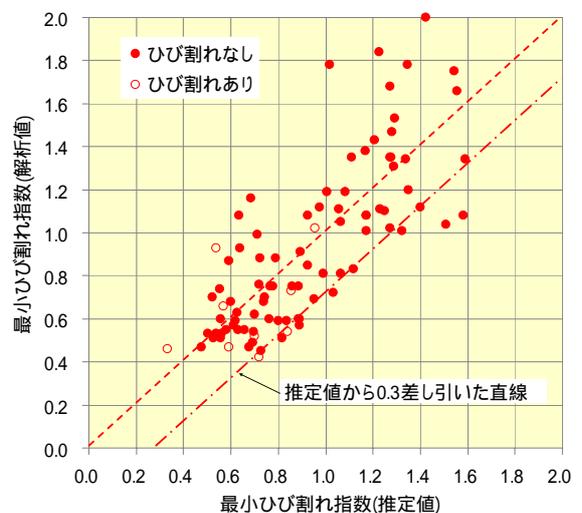


図-12 温度ひび割れ指数の推定値と解析値との比較
(層状構造物)

4.4 柱状構造物（橋梁橋脚）

今回対象とした柱状構造物は、そのほとんどが橋梁橋脚であり、柱の幅の最小値が 2.0m であり、長さとの比が 1.00～9.50 で矩形もしくは小判型の断面であった。柱状構造物での重回帰分析による推定値と詳細解析結果とを比較した結果を図-13 に示す。図-13 から、推定値と詳細解析値は比較的高い相関関係（重相関係数で 0.97）となった。ただし、壁状構造物と同様に安全側を見込んだ推定値とするために、0.15 差し引いた値を簡易評価式による推定値として用いることとした。

$$I_{cr} = -0.352T_a + 0.778D - 0.209Q_{\infty} + 7.07\alpha^{\beta} + 0.649 \log_{10}(H_R) + 0.524f_t - 1.15 \log_{10}(L/H) - 2.27 \log(E_c/E_r) + 10.55 \quad (5)$$

ここで、セメントの種類：MPC,LPC,FB, 打込み温度 (T_a); 2.6 ~ 32.5 ,1 リフトの高さ(D); 1.8m ~ 5.8m , 終局断熱温度上昇量 (Q_{∞}); 38.4 ~ 56.6 (単位セメント量: 257 kg/m³ ~ 342kg/m³), 上昇速度に関する定数 (); 0.15 ~ 0.91 , 部材表面からの放熱条件 (H_R); 24 ~ 420 (W/m² · 日), コンクリートの割裂引張強度 (f_t); 2.90N/mm² ~ 3.82N/mm² (水セメント比: 47.7% ~ 58.0%) で材齢 91 日の割裂引張強度, 部材の長さとは高さ (地盤からの全高さ) の比 (L/H); 0.4 ~ 2.6 (L : 2.9m ~ 15.5m, H : 3.0m ~ 29.0m), 被拘束体と拘束体のヤング係数の比 (E_c/E_r); 1 以上 (拘束体が大口径深礎の場合は 1 としている) とした。

5. まとめ

本検討では、3次元有限要素法による温度応力解析結果を基に、入力条件と温度ひび割れ指数との関係について簡易評価式の算定を行った。ただし、自己収縮ひずみ、外気温変化、打継ぎ間隔など従来温度ひび割れに影響を与えるといわれていた因子について、本検討の範囲では取り込むことができなかった。これらの因子については、制御計画を行っていく上で重要な要因となることがあると思われることから、今後さらに実構造物でのデータの蓄積と評価を行い、これらを取り込んだより精度の高い簡易評価式を作成していく必要があると思われる。

最後に、本論文作成にあたって膨大な解析およびデータ整理に協力していただいたマスコンクリートのひび割れ制御指針改訂委員会解析WGの委員の方々および協力委員の方々に深く感謝いたします。

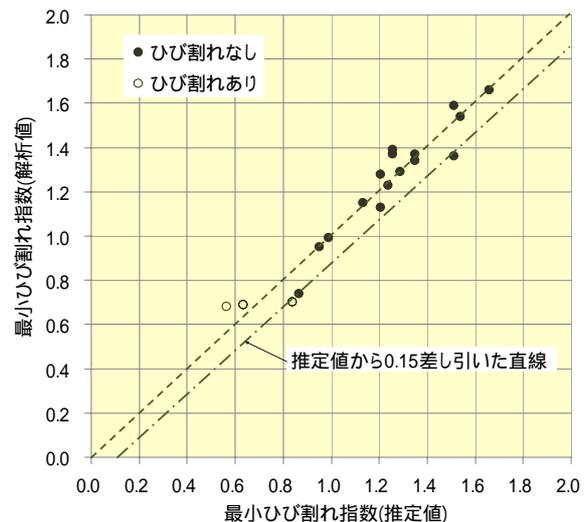


図-13 温度ひび割れ指数の推定値と解析値との比較 (柱状構造物)

参考文献

- 1) (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, 2006.9
- 2) (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 温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案, 1992.9
- 3) 小野定：マスコンクリートの温度ひび割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割れ幅制御に関する日本コンクリート工学協会コロキウム論文集, pp.45-pp.54, 1990.8
- 4) 万木正弘・坂田昇：壁状構造物に発生する温度ひび割れの実態とひび割れ幅予測, コンクリート構造物の体積変化によるひび割れ幅制御に関する日本コンクリート工学協会コロキウム論文集, pp.31-pp.36, 1990.8
- 5) 長瀧重義・佐藤良一・小島宏：水和熱による温度ひび割れ幅の実用算定法, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.1-pp.4, 1985.7
- 6) BSI: Code of Practice for the Structural Use of Concrete for Retaining Aqueous Liquid, BS 5337,1976
- 7) ACI Committee 207 Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal, Vol.70, 1973
- 8) 賀茂友裕・田邊忠顕：マスコンクリートの温度ひび割れ幅算定方法に関する研究, 第11回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.457-462, 1989.7
- 9) 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, 2008.11