

論文 温度応力に及ぼす影響要因に関する基礎的研究

藤森 勇希^{*1}・小俣 貴洋^{*1}・大野 美緒^{*2}・溝渕 利明^{*3}

要旨：セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れは、構造物の形状、使用材料、配合条件、環境条件など種々の影響を受けることがよく知られている。本研究では、温度ひび割れに影響を与えるこれらの要因のうち、コンクリートの配合および建設場所の環境条件に着目し、関東地方でのレディーミクストコンクリート工場の配合報告書の調査結果を基に、工場近郊で同一条件のコンクリート構造物を施工した場合を想定した温度応力解析を行った。本報文は、それらの結果を基に地域・環境条件を考慮した温度ひび割れの簡易評価法の提案を行ったものである。

キーワード：温度応力、地域特性、環境条件、簡易評価法、マスコンクリート

1. はじめに

セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れは、構造物の形状や規模、使用材料や配合条件、外気温などの環境条件、施工手順、一回に施工する部材高さ（厚さ）や長さ、打込み予定日などの施工条件の種々の影響を受ける。温度ひび割れ発生の可能性を事前に検討する場合には、上記に示した各種条件を基に、セメントの水和発熱特性やコンクリートの熱特性、力学特性、外気温などの温度解析に必要な入力条件を選定する。これらの入力条件を用いて温度解析を行い、部材内に生じる温度変化を計算する。温度解析で得られた各部位の温度変化をひずみに変換して剛性変化を考慮した応力解析を行い、算定した応力値がその部材の引張強度を超えた時点でひび割れが生じるとして評価している。ただし、材料や力学特性値のばらつきを考慮して、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では発生応力と引張強度との比に対するひび割れ発生確率として評価している。

上記に示した事前解析を行う場合、大容量解析が可能なパソコンや解析ソフトの普及によって、最近では2次元や3次元の有限要素法を用いて行う場合が多くなってきている。しかしながら、入力条件の設定や解析モデルの選定、要素分割など煩雑な手順を踏む必要があり、解析業務に対して経験が豊富な技術者でないと効率的にかつ的確に検討業務を遂行していくことが難しいのが現状である。また、温度ひび割れ発生可能性があるという評価となった場合、その抑制対策をどのように講じるか検討していく必要があり、その場合には各種入力条件の変更、施工条件の変更、設計条件の見直しまで行う必要がある。その場合、解析モデルの変更などを行って

いく必要がある。

このような事前検討において、詳細な解析を実行する前に概略の評価を与えることができれば、検討作業の効率化だけでなく解析業務に対して経験の浅い技術者に対しても、ひび割れ発生の可能性の評価を比較的簡便に行っていくことが可能となる。

本研究では、温度ひび割れ発生の可能性を簡便に評価できるシステムの構築を目的として、温度ひび割れ発生に大きな影響を与える要因を選定し、それらの要因とひび割れ指数(ある材齢での引張強度(N/mm²)と対象部位での最大引張応力(N/mm²)との比)との関係を求めて、簡便な評価法を提案するものである。

本報文では、温度ひび割れ発生に大きな影響を与える要因のうち、セメントの水和熱に影響を与えるコンクリート配合および打込み温度や打込み後の温度変化に影響を与える外気温に着目した簡便なひび割れ評価法の検討を行った結果についてとりまとめたものである。

2. コンクリート配合の実態調査

本検討では、温度ひび割れ発生に大きな影響を与える要因の一つであるコンクリート配合について、実情に沿ったデータを収集することを目的として、関東地方のレディーミクストコンクリート工場約800工場に同一配合条件を提示して、配合報告書の提供を依頼し、400近い工場から回答を得ることができた。

2.1 コンクリートの配合条件

今回関東地方のレディーミクストコンクリート工場に依頼したコンクリートの配合条件は、土木構造物で比較的多く用いられている粗骨材最大寸法 20mm、呼び強度 24N/mm²(保証材齢 28 日)、スランプ 12cm、使用セメ

*1 法政大学 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 戸田建設(株) (非会員)

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

ントを高炉セメントB種としたものである。高炉セメントB種としたのは、公共工事で多く用いられているものの、近年の初期強度増大を目的として高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくする傾向にあり、暑中時にはスラグの活性化により、普通ポルトランドセメントよりも断熱温度上昇が高くなる場合もあるという報告²⁾もあることから、温度ひび割れの可能性の評価に適していると判断したためである。

2.2 調査結果

各レディーミクストコンクリート工場から提供された配合報告書のうち、単位セメント量の分布と単位水量の分布を図-1および図-2に示す。図-1から、単位セメント量は、最も少ない工場で247kg/m³、最も多い工場で335kg/m³であった。また、平均値は293kg/m³であった。単位水量は図-2に示すように、最も少ない工場で142kg/m³、最も多い工場で175kg/m³であった。また、平均値は163kg/m³であった。今回の調査結果から、同一配合条件で単位セメント量が他の地域に比べて多いのは、群馬県であった。コンクリート配合の場合、使用骨材や混和剤によって異なってくるが、今回の調査で同一配合条件であっても単位セメント量で90kg/m³近く差異があることがわかった。このことは、施工する場所によってひび割れ発生の可能性も大きく異なってくることを示すものである。

3. 温度ひび割れ簡易評価法

温度ひび割れを簡易的に評価する方法としては、ACI207委員会³⁾で提案されているような構造部材の応力再配分を考慮した簡便な算定方法や、小野ら⁴⁾や万木ら⁵⁾が提案している統計的に整理した簡便法がある。ここでは、コンクリートの配合調査結果と配合報告書の提供のあった工場近郊で同一条件のコンクリート構造物を施工した場合を想定して、工場所在地近くのアメダスデータ⁶⁾を用いて、3次元有限要素法を用いた温度応力解析を実施した。次に、得られた解析結果を基に、単位セメント量、打込み温度、水セメント比の解析条件を説明変数として重回帰分析を行い、解析を実施しなくてもひび割れ指数を推定するための評価式の算定を行った。

3.1 解析方法

本検討で解析対象としたのは、前述したように配合報告書の提供があった392のレディーミクストコンクリート工場とし、その近郊を建設場所と想定した。解析対象とした構造物は、壁状構造物およびスラブ状構造物である。各構造物の形状・寸法は、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⁷⁾に示されている標準形状を用いた。各構造物の解析モデルを図-3および図-4に示す。

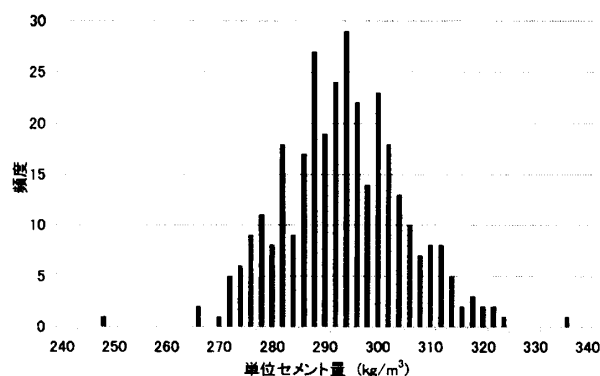


図-1 単位セメント量の分布（関東地方）

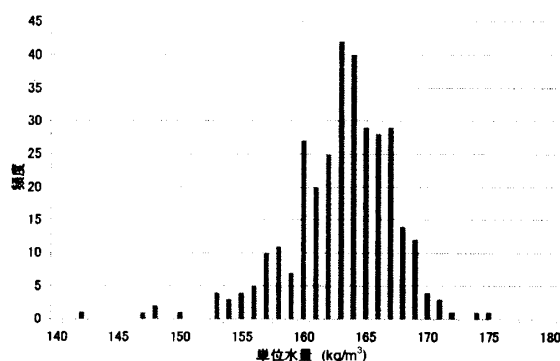


図-2 単位水量のヒストグラム（関東地方）

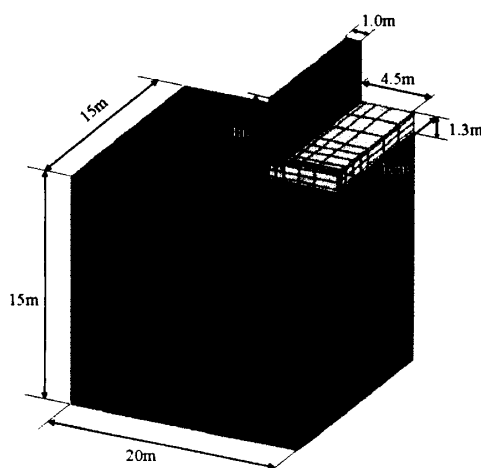


図-3 解析モデル（壁状構造物）

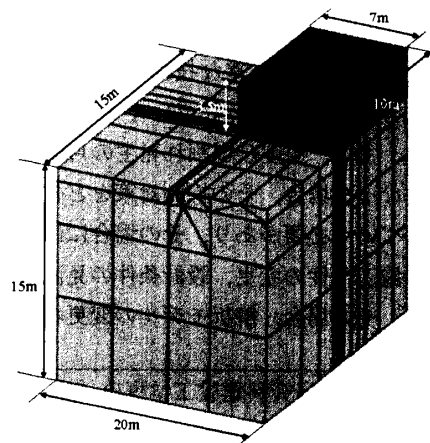


図-4 解析モデル（スラブ状構造物）

解析は、温度・応力とも3次元有限要素法を用いて行った。解析パラメータとしては、打込み時期（2月、5月、8月、11月）とし、今回の解析では検討ケースが膨大となることから、構造物の形状・寸法をパラメータには選定していない。構造物の形状・寸法に関しては別途検討して行く予定である。

解析期間は、壁状構造物だけでなく、スラブ状構造物も対象部材としたことから、打込み後1年とした。

3.2 解析条件

解析条件は、“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⁶⁾に示されている条件に準拠した。解析条件を表-1に示す。

4. 解析結果

4.1 壁状構造物

壁状構造物の場合、これまで実施した解析結果から、部材中央部の温度は壁厚が2m程度であっても、コンクリート打込み後1ヶ月以内で外気温とほぼ同様の温度となり、最小ひび割れ指数に達する時期もほぼ同様の時期となることから、本検討ではコンクリート打込み後1ヶ月までの最小ひび割れ指数と最小ひび割れ指数に達した時点での発生応力を最大引張応力として評価することとした。また、温度降下量は最高温度から打込み後1ヶ月での温度との差とした。解析結果の評価位置は、中央断面内の壁中央部とした。

各打込み時期での単位セメント量と温度降下量との関係を図-5に示す。図-5から、単位セメント量の増加に伴い温度降下量も増加する傾向にあった。また、打込み温度と外気温の変動に相当する打込み時期ごとで比較すると、打込み温度が同様となる5月、11月はほぼ同じような傾向を示し、打込み温度および外気温の低い2月打込みでは、単位セメント量の増加に伴う変化が他の時期に比べて小さい傾向にあった。8月の打込みは、他の時期に比べて単位セメント量の影響を大きく受ける結果となった。以上のことから、温度降下量は、単位セメント量と打込み温度に影響を受けているものと思われることから、重回帰分析算定の際にこれらを説明変数として考慮することとした。

次に、各打込み時期での温度降下量と最小ひび割れ指数との関係を図-6に示す。図-6から、温度降下量の増加に伴い最小ひび割れ指数が小さくなる結果となった。ただし、2月打込みの場合だけ他の時期と傾向が異なり、温度降下量の増加に伴って最小ひび割れ指数はほとんど変化しないか若干大きくなる傾向を示した。壁状構造物の場合、外部拘束が卓越しているので、温度降下量と比較的高い相関があることは予想され、本検討結果においてもほぼ同様の傾向が得られたことから、温度降

表-1 解析条件

項目	解析条件
熱伝導率 (W/m ² ℃)	2.7
密度 (kg/m ³)	2300
比熱 (KJ/kg℃)	1.15
断熱温度上昇特性 (℃)	$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-t_0)})$ $Q_{\infty} = (17.9 + 0.115 \times C) + (-0.419 + 0.000314 \times C) \cdot T_c$ $\gamma = (-0.325 + 0.00156 \times C) + (0.0216 + 0.000039 \times C) \cdot T_c$ $t_0 = (0.279 + 0.000795 \times C) \cdot e^{(0.0693 + 9.04 \times 10^{-3} \times C) \cdot T_c}$
打込み温度 (℃)	打込日の日平均気温+5℃
熱伝達率 (W/m ² ℃)	側面: 14 上面: 14
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'_c = \frac{t_c - 0.42}{8.58 + 0.900(t_c - 0.42)} f'_{c91}$ t_c : 有効材齢 (日) $f'_{c91} = -1.43 + 24.5(C/W)$ C/W: セメント水
ヤング係数 (N/mm ²)	$6300 \times f'_c(t)^{0.45}$
クリープ	ヤング係数低減法 材齢2日まで $\Phi = 0.42$ 材齢3日まで $\Phi = 0.65$
引張強度 (N/mm ²)	$f_t = 0.13 \times f'_c e^{0.85}$
ポアソン比	0.2
熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/℃$)	10
自己収縮	文献 ⁶⁾
外気温 (℃)	施工場所の日別平均気温
その他	地盤の剛性: 600N/mm ²

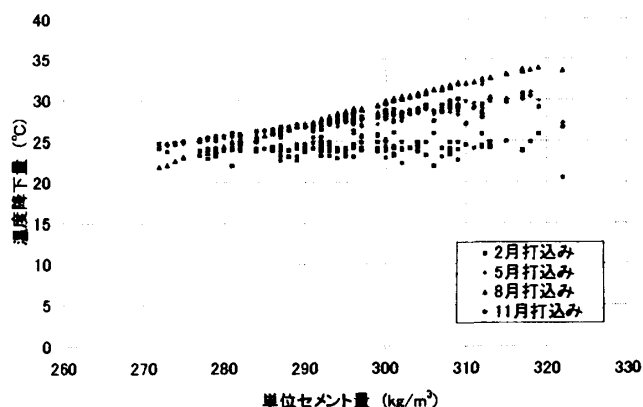


図-5 単位セメント量と温度降下量との関係（壁状）

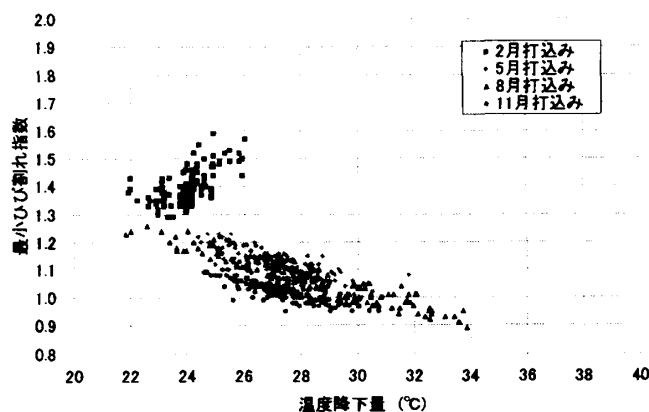


図-6 温度降下量と最小ひび割れ指数との関係（壁状）

下量に影響を与える打込み温度と単位セメント量を最小ひび割れ指数算定のための説明因子として加えることとした。最小ひび割れ指数は、引張強度と発生応力との比であることから、力学特性に關係する水セメント比との關係についても検討を行った。各打込み時期での最小ひび割れ指数と水セメント比との關係を図-7に示す。図-7から、水セメント比の変化に対して最小ひび割れ指数はほとんど変化しない結果となったものの、若干ではあるが水セメント比が小さくなると最小ひび割れ指数が小さくなる傾向が見られることから、水セメント比についても最小ひび割れ指数算定の際の説明変数に加えることとした。

上記の単回帰分析の結果を踏まえて、壁状構造物の温度降下量、最大引張応力および最小ひび割れ指数を目的変数とした重回帰分析を行った。温度降下量に関する重回帰分析では、打込み温度および単位セメント量を説明変数とした。最大引張応力および最小ひび割れ指数に関しては、打込み温度と単位セメント量に加えて水セメント比も説明変数とした。

温度降下量に対する重回帰式を以下に示すとともに、重回帰分析結果と解析結果との關係を図-8に示す。重相関係数は0.84であり比較的高い相関關係となった。

$$\Delta T = 0.127C + 0.168T_c - 14.05 \quad (1)$$

ここで、 ΔT は温度降下量(°C)、 C は単位セメント量(kg/m³)、 T_c は打込み温度(°C)である。

図-8から、主に2月打込みのケースとなる温度降下量の小さい領域では、解析値と重回帰式からの推定値にばらつきが見られるものの、その他の領域はほぼ線形關係にあった。ただし、推定値が解析値に比べて1°C程度低い結果となった。

次に、最大引張応力に対する重回帰式を以下に示すとともに、重回帰分析結果と解析結果との關係を図-9に示す。重相関係数は0.91であり比較的高い相関關係となった。

$$\sigma_t = 7.77 \times 10^{-3} C + 0.0321 T_c - 0.0258 W/C + 0.383 \quad (2)$$

ここで、 σ_t は最大引張応力(N/mm²)、 W/C は水セメント比(%)である。

図-9から、打込み時期ごとでグループ化されているように見受けられるが、解析値と重回帰式による推定値はほぼ比例關係にあり、構造物の形状やセメントの種別は限定されるが、単位セメント量や打込み温度の変化に対して温度応力解析を実施しなくても最大引張応力を比較的高い精度で推定することが可能と考えられる。

最小ひび割れ指数の重回帰分析から得られた重回帰式を以下に示す。重相関係数は、0.76であり上記の2つの目的変数に比べて若干低い相関關係となった。

$$I_{cr} = -5.45 \times 10^{-3} C - 0.01361 T_c - 0.0105 W/C + 3.614 \quad (3)$$

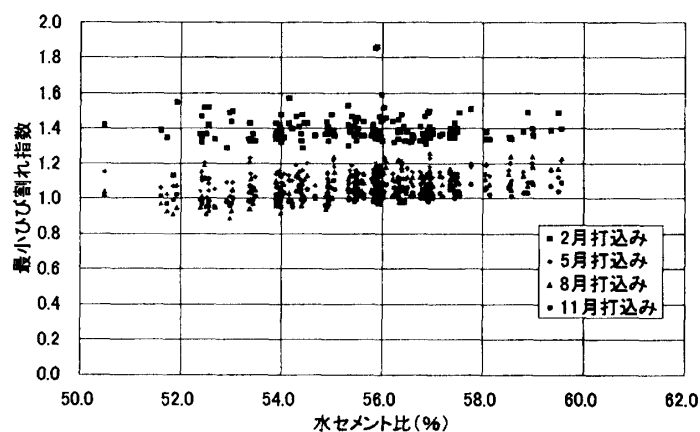


図-7 水セメント比と最小ひび割れ指数との關係(壁状)

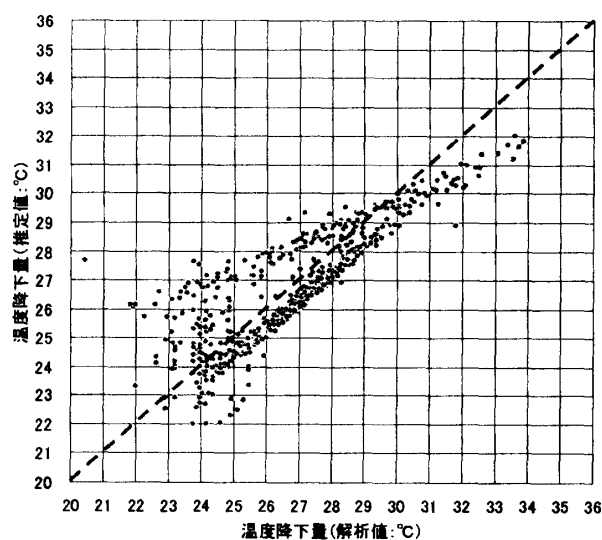


図-8 温度降下量の比較(壁状)

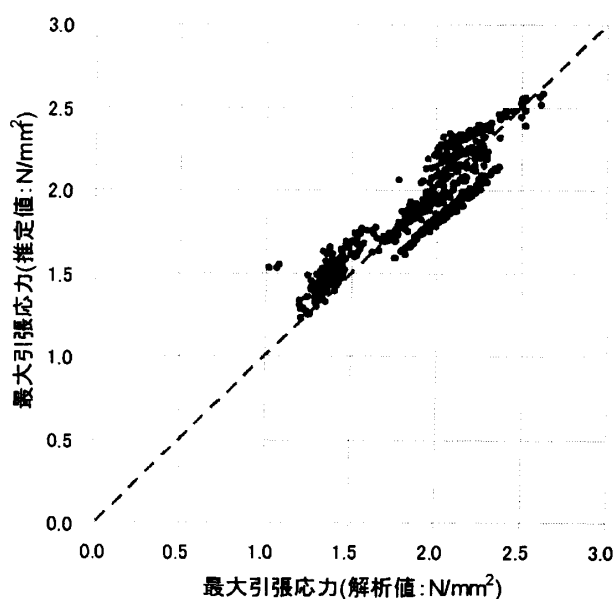


図-9 最大引張応力の比較(壁状)

ここで、 I_{cr} は最小ひび割れ指数である。

壁状構造物の場合、前述したように外部拘束が卓越する構造物であることから、拘束条件が同じであれば温度降下量によって最小ひび割れ指数がほぼ決定されることになる。ただし、温度降下量は温度解析を実施しないと得られないことから、今回は、温度降下量に大きな影響を与えると思われる単位セメント量と打込み温度を代表特性値として説明変数としたが、図-10 に示すように、打込み月ごとでグループ化する結果となった。このことから、説明変数としてはより温度解析に影響が大きい終局断熱温度上昇量および上昇速度に関する定数を用いることを検討していく必要があると思われる。

4.2 スラブ状構造物

本検討で解析を行ったスラブ状構造物は、地盤の剛性が比較的小さいことから、内部拘束が卓越する部材となる。ただし、部材中央部では時間経過とともに地盤の拘束効果を受けることから、部材中央部での打込み後 30 日以降の中・長期材齢では外部拘束効果による引張応力が卓越してくることとなる。そこで、本検討では打込み後 30 日以内については、スラブ表面部での解析結果と影響要因について検討するとともに、打込み後 30 日以降については、中央断面内の部材中央部を評価位置として検討することとした。

各打込み時期での単位セメント量と温度降下量との関係を図-11 に示す。図-11 から、壁状構造物と同様に単位セメント量の増加に伴い温度降下量も増加する傾向にあった。また、スラブ状構造物の場合壁状構造物のように打込み月でのばらつきは見られず、ほぼ同様の挙動を示す結果となった。

次に、温度上昇量とスラブ表面部での最大引張応力とを比較した結果を図-12 に示す。内部拘束の場合、部材中央部の温度が最高温度に達する時点付近で表面部での引張応力が最大に達することから、温度上昇量との比較を行うこととした。図-12 から、温度上昇量とスラブ表面部での最大引張応力との間には、ほとんど相関が見られなかった。したがって、本検討ではスラブ表面部での簡易評価は難しいと判断し、スラブ中央部のみを評価対象とすることとした。

各打込み時期での温度降下量とスラブ中央部での最小ひび割れ指数との関係を図-13 に示す。図-13 から、壁状構造物と同様に温度降下量の増加に伴い最小ひび割れ指数が小さくなる結果となった。ただし、壁状構造物と異なり、温度降下量の変化に対する最小ひび割れ指数の変化が小さい結果となった。また、打込み月ごとでグループ化されており、壁状構造物のように重なり合う部分がほとんど見られない結果であった。

スラブ状構造物における温度降下量、最大引張応力お

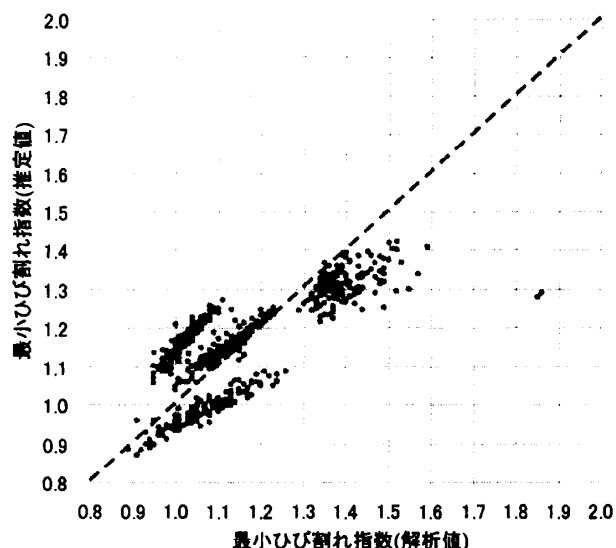


図-10 最小ひび割れ指数の比較（壁状）

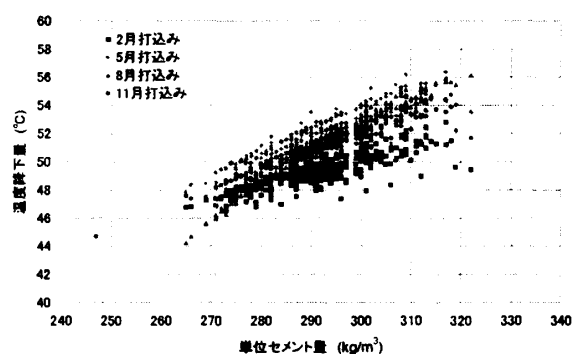


図-11 単位セメント量と温度降下量との関係

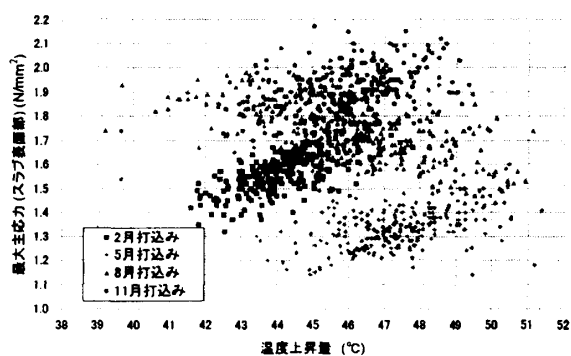


図-12 温度上昇量と表面部最大引張応力との関係

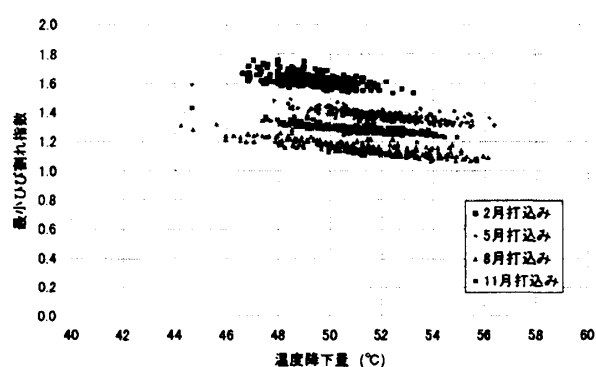


図-13 温度降下量と最小ひび割れ指数との関係

よび最小ひび割れ指数を目的変数とし、単位セメント量、打込み温度、水セメント比を説明変数とした重回帰分析の結果を図-14～16に示すとともに、各目的変数での重回帰式を以下に示す。

$$\Delta T = 0.140C + 0.0795T_c + 8.361 \quad (4)$$

$$\sigma_t = 8.46 \times 10^{-3} C + 0.0353 T_c - 0.0101 W/C - 0.195 \quad (5)$$

$$I_{cr} = -403 \times 10^{-3} C - 0.0191 T_c - 0.0114 W/C + 3.562 \quad (6)$$

式(4)～式(6)の各々の重相関係数は、0.84、0.95 および 0.95 であり、壁状構造物よりも高い相関となった。このことは、スラブ状構造物で部材を貫通するようなひび割れに対する評価式として、式(6)を適用する可能性があることを示すものである。

以上の結果から、極限られた条件・地域ではあるが、配合条件、外気温を基にした環境条件を元にした温度ひび割れの簡易評価を行うための推定式を提案することができた。ただし、これらの式はあくまでも温度ひび割れ発生の可能性の一次評価（詳細解析実施の必要性の有無の概略の判定材料）であることを十分認識して使用していく必要がある。

5. おわりに

本報文は、セメントの水和熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れの発生の可能性を、できるだけ簡便に評価できる手法の開発を目指し、コンクリートの配合、外気温の影響を考慮した最小ひび割れ指数の推定式の提案を行った。温度ひび割れに関わる要因は非常に多くあることから、今回の推定式は極限られた条件の基で適用が可能なものである。今後は、今回検討していない構造物の形状や養生条件、使用骨材の影響などについても随時検討を行っていきたいと考えている。今回得られたような推定式を評価条件の係数として与え、さらに構造物形状などの条件を加えていけば、より適用範囲が広く、簡便な方法を提案していくことが可能になると思われる。

参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料，土木学会，2002.
- 2) 田辺忠顯編著：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004
- 3) ACI207Committee: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete, 1973
- 4) 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コロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，PP.45-54，1990.08
- 5) 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コロキウム，日本コンクリート工学協会，PP.31-36，1990.08

- 6) 気象業務支援センター：気象データベース・アメダス (CD-ROM)，ウェザートイ，2005.
- 7) 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，2006.06

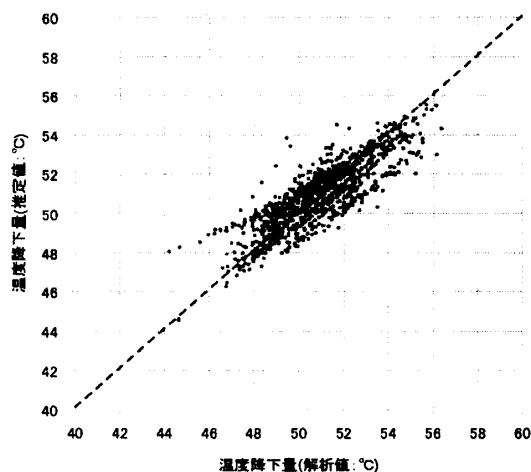


図-14 温度降下量の比較（スラブ状）

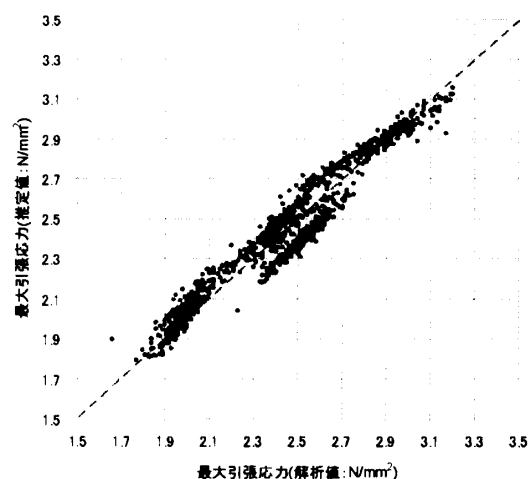


図-15 最大引張応力の比較（スラブ状）

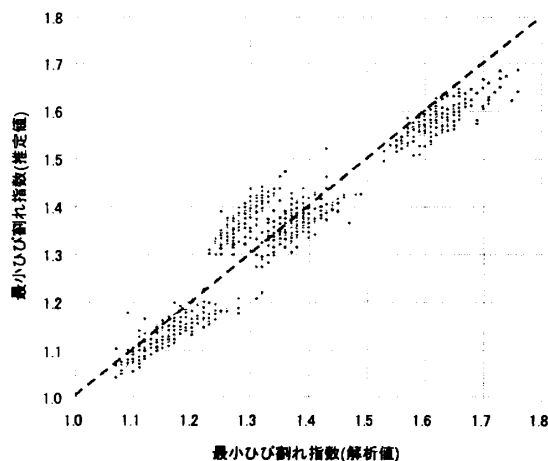


図-16 最小ひび割れ指数の比較（スラブ状）