

論文 山口県の実構造物のデータベースの温度応力解析による分析

大野 又稔^{*1}・細田 暁^{*2}

要旨: 三次元 FEM による温度応力解析を用いて、山口県の実構造物のデータベースの分析を行った。実構造物の打設管理記録から入力値を定めた標準解析と、実構造物の温度計測結果と整合させた同定解析を行った。山口県の実構造物はひび割れ抑制システムにより、ひび割れ制御指針のひび割れ発生確率と比べて、温度ひび割れ発生確率が最大で 25% 低く、予測したひび割れ幅と比べて最大ひび割れ幅も抑えられていることが分かった。さらに同定解析の結果から打込み温度と熱伝達係数が温度応力解析に与える影響について考察した。
キーワード: 山口県, データベース, 温度応力解析, ひび割れ指数, ひび割れ発生確率, 温度ひび割れ幅

1. はじめに

マスコンクリートの竣工検査時におけるひび割れ発生の有無や、発生した場合のひび割れ幅が大きな問題となっており、マスコンクリート構造物の設計、施工では適切な温度ひび割れの抑制対策が必要である。

JCI による「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」¹⁾ (以下マスコン指針) では、温度応力解析結果を用いた温度ひび割れ発生確率および温度ひび割れ幅の予測手法が示されており、実務で広く活用されている。

現在山口県では「ひび割れ抑制システム」²⁾ による、有害な温度ひび割れが懸念される構造物でのひび割れ抑制が行われている。県発注の新設土木構造物のうち RC 構造物に対し、有害な温度ひび割れなどの施工時に生じる不具合を抑制するため、施工の基本事項の遵守や材料等によるひび割れ抑制対策が行われ、打込みに関する情報やひび割れ発生状況についてのデータベースが県の HP に公開されている。

本研究では山口県の実構造物のデータベースである打設管理記録を用いて温度応力解析を行い、実構造物のひび割れ指数と温度ひび割れ発生確率の関係を調べ、さらに最大ひび割れ幅予測式の精度を検証する。マスコン指針に準じた「標準解析」、コンクリート中心部の温度履歴を実測値と合うように打込み温度と熱伝達率の入力値を変更した「同定解析」を行う。同定解析を行う過程で、コンクリートの施工記録である打設管理記録に残された種々の情報を活用し、山口県のひび割れ抑制システムで行われた施工における配慮などがひび割れ抑制に及ぼす影響についても検討を行う。

2. 解析条件

2.1 対象構造物

山口県のひび割れ抑制システムで公表されている「打設管理記録」を活用する。打設管理記録は、構造物の形

状、寸法、配筋に関する情報と、コンクリート材料、施工に関する情報が記録され、ひび割れ発生状況も記録されたものであり、施工者に提出が義務付けられたものである。また義務ではないが、打込み後のコンクリート温度を計測した結果も多くの構造物で記録されている。

本研究では、この打設管理記録のデータベースのうち、橋台たて壁・胸壁で、形状や養生条件の特異な構造物を除いた、67 構造物 158 リフトを分析の対象とした。補強材料としてアラミド繊維、ガラス繊維を用いた構造物は除外した。たて壁 136 リフトの内、ひび割れありが 92 リフト、ひび割れなしが 44 リフトであった。胸壁 22 リフトの内、ひび割れありが 11 リフト、ひび割れなしが 11 リフトであった。

「同定解析」では、そのうち温度測定位置が明確な 37 構造物 99 リフトを対象とした。対象構造物の範囲を表 1 に示す。

2.2 解析手法

解析ソフトには三次元 FEM 温度応力解析が可能な

表 1 対象構造物の範囲

構造形式	寸法 (m)		
	高さ	厚さ	長さ
橋台 たて壁	1.1-5.4	0.9-3.0	3.1-25.0
データ数	鉄筋比 (%)	ひび割れ幅 (mm)	最高温度 (°C)
136 リフト	0.04-1.27	0.00-0.40	40.2-75.5
構造形式	寸法 (m)		
橋台 胸壁	高さ	厚さ	長さ
	0.5-3.6	0.5-1.5	5.4-25.0
データ数	鉄筋比 (%)	ひび割れ幅 (mm)	最高温度 (°C)
22 リフト	0.10-1.13	0.00-0.40	23.3-56.5

*1 横浜国立大学大学院 環境情報学府 博士課程前期 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授 博 (工) (正会員)

ASTEAMACS (ver.6.4.4) を用いた。打設管理記録を基に 1/2 モデルを作成し、メッシュ分割・主な物性値・計算モデル等はマスコン指針に準拠し、打込み日・セメント種類・配合等は打設管理記録を参照して入力した。自己収縮は考慮しているが、乾燥収縮は考慮していない。第 1 リフトの打込み日の 3 カ月前から地盤の非定常解析を開始し、コンクリート内部の温度が外気温とほぼ平衡状態となる、対象リフトの打込み日から 1 カ月後までの期間を、マスコン指針に示された時間間隔で解析した。打設管理記録のひび割れ調査結果のほとんどがおよそ材齢 1 ヶ月程度のものであることによる。外気温には気象庁発表のデータから、施工場所に最も近い測定点の日別平均気温を用いた。データベースでは、朝昼夕の現地計測気温も公開されているが、休日のデータが欠如していたために用いなかった。気象庁のデータと現場計測の同時刻の気温はほぼ一致していた。なお、日別平均気温を入力した場合と、気温の変動を時間ごとに入力した場合で、解析結果に大きな違いは認められなかった。

「標準解析」では、マスコン指針に示された解析手法に準じ、打込み温度を打込み日の平均気温+5°C として入力し、熱伝達率を打設管理記録の養生条件をもとに、マスコン指針に示されている参考値を参照して決定した。

「同定解析」では、温度解析の精度を高めるために、コンクリート内部の温度履歴が実測値と近くなるように、打込み温度と熱伝達率を決定した。特にひび割れ指数に大きく影響する、最高温度と最高温度到達材齢がなるべく一致するように決定した。最高温度は打込み温度で大きく変化し、最高温度到達材齢は熱伝達率で大きく変化した。なお熱伝達率は打設管理記録における養生期間のみ変更を行い、養生終了後のコンクリート表面はマスコン指針の参考値を参照して 14W/m²°C で一定とした。

最高温度、最高温度到達材齢、材齢 28 日を基本とする最終計測時の温度について、解析値の実測値に対する比の平均値および変動係数を表-2 に示す。最高温度はほぼ一致しているが、温度の実測が朝昼ター回ずつの 1 日 3 回と測定点が少ないため、最高温度到達材齢の精度は少し低くなっている。また養生終了後のコンクリート表面の熱伝達率を 14W/m²°C で一定としたため、最終計測温度の精度は低くなっている。

3. ひび割れ抑制システムの効果の検討

3.1 打設管理記録におけるひび割れ調査結果

打設管理記録のひび割れ調査結果から、対象とするひび割れは、外部拘束の影響が卓越し、打込み後約 1 カ月程度までに発生した鉛直方向のひび割れである。マスコン指針の検査基準を参考に、ひび割れ幅が 0.05mm 以下の場合にはひび割れが発生しなかったものとみなした。ひ

び割れ発生の有無と最大温度ひび割れ幅をデータベースから抽出した。

3.2 温度ひび割れ発生確率曲線

山口県の構造物の「標準解析」と「同定解析」、マスコン指針で検討された壁状構造物の解析結果¹⁾を用いて、ひび割れ指数を 0.05 刻みで区分して、ひび割れ発生の有

表-2 同定解析データの温度履歴の予測精度

	平均値	変動係数 (%)
最高温度	1.00	1.23
最高温度到達材齢	1.16	18.45
最終計測温度	0.87	17.13

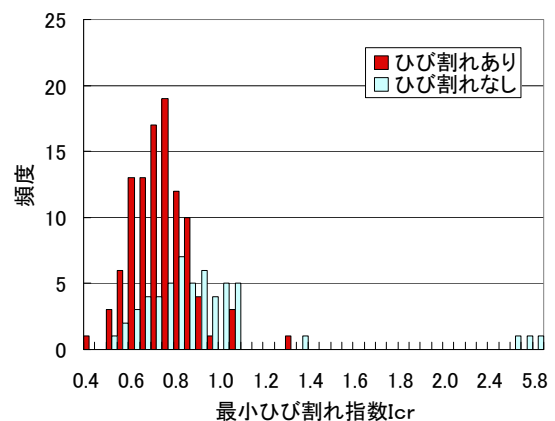


図-1 標準解析結果のヒストグラム

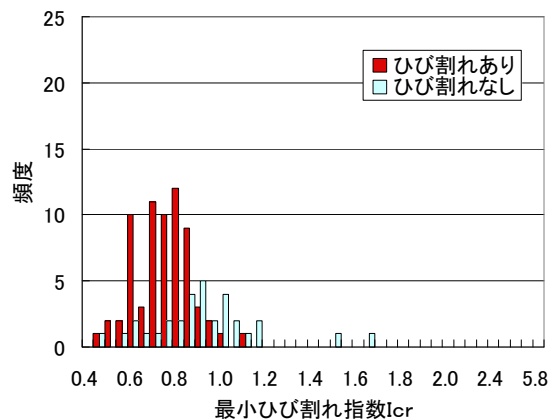


図-2 同定解析結果のヒストグラム

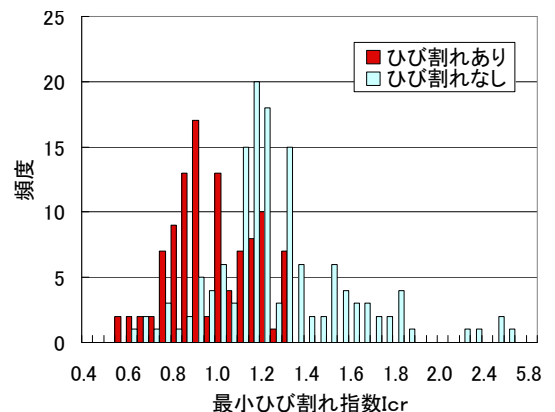


図-3 マスコン指針のヒストグラム

無をヒストグラムにしたものを図-1～図-3に示す。

マスコン指針のデータは65件の既存構造物、724の部材を対象に、マスコン指針に示された解析手法に準じた温度応力解析の結果と温度ひび割れ調査結果に関するアンケート結果から求められたものであり、本研究ではそのうち壁状構造物に関する282の部材のデータを用いた。

それぞれのヒストグラムをもとに、ひび割れ指数0.05刻みの各区間でのひび割れ発生確率をプロットし、各プロットがワイブル分布に適合するとした場合のひび割れ発生確率曲線を図-4に示す。ひび割れ発生確率曲線は実際のデータが存在する範囲を実線で表し、前後は点線で表している。なお区間内のデータ数が5以下の場合、ごく一部の構造物のひび割れ発生がワイブル分布の形状に与える影響が大きくなることから除外した。

この図より、マスコン指針のひび割れ発生確率に比べ、ひび割れ抑制システムのもとで施工された山口県構造物のひび割れ発生確率の方が低くなっていることが分かる。その差は標準解析では $I_{cr}=0.70$ のときに最大となり25%、同定解析では $I_{cr}=0.85$ のときに最大となり20%となった。

山口県の実構造物の温度ひび割れ発生確率がマスコン指針と比べて低くなった要因の一つとして、実構造物のひび割れ発生強度が高かった可能性を考えている。

高炉セメントを用いたコンクリートの品質は、施工の影響を受けやすく、特に石灰石を用いたコンクリートの引張強度が高温履歴に悪影響を受けることも報告されている^{3), 4)}。山口県のひび割れ抑制システムでは施工の基本事項の遵守がシステムとして実現されており²⁾、施工者の努力により型枠存置期間を長くしたり、構造物によっては脱型後に型枠面に乾燥防止のシートを貼り付けるなどの丁寧な対策が行われている。これらの体系的な取り組みが、構造物群のひび割れ発生強度を向上させ、ひび割れ発生確率を小さくする要因となったと推察した。

さらに、同定解析の温度ひび割れ発生確率曲線では、曲線の勾配が大きくなっている。ひび割れ指数で1以上の領域にも点線でワイブル分布に従うとした場合の曲線を描いたが、データは存在せず、図-2を見てもひび割れ指数が1を超える領域ではひび割れ発生確率はほぼゼロになると推察される。一般にひび割れ発生は大きなばらつきを伴う現象とされているが、山口県の構造物では、施工の基本事項の遵守を含むひび割れ抑制システムの効果²⁾で、構造物中のコンクリートの品質のばらつきが抑制されたことと、形状の類似した部材を分析の対象としたことにより、曲線の勾配が大きくなったと考えている。またひび割れ発生確率曲線の勾配の増加は、同時にマスコン指針の解析手法が、山口県の構造物のような施工の基本事項を遵守した、再現性ある部材に対して、特に有効であることも示している。

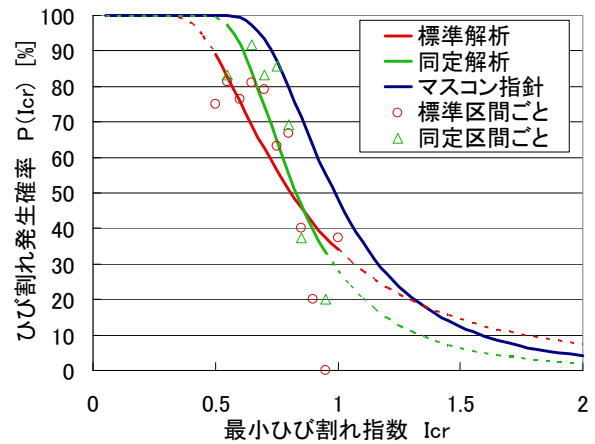


図-4 温度ひび割れ発生確率曲線

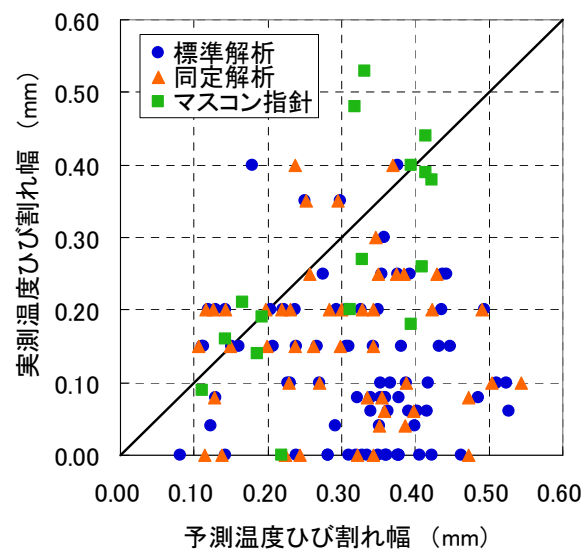


図-5 温度ひび割れ幅の予測と実測の比較

3.3 温度ひび割れ幅

マスコン指針では実物大実験の結果を基に、以下の温度ひび割れ幅予測式が示されている。

$$w_c = \left(\frac{-0.071}{p} \right) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (1)$$

ここに、 w_c : 最大ひび割れ幅、 p : 鉄筋比、 I_{cr} : 最小ひび割れ指数である。

標準解析と同定解析で得られた最小ひび割れ指数を用いて、この予測式による最大ひび割れ幅を算定した。標準解析は83リフト、同定解析では49リフトが予測式の適用範囲内であった。

適用範囲内のリフトについて、それぞれの予測値と実測値を比較した結果を図-5に示す。マスコン指針の実物大の試験では、それなりの相関が見られるものの、標準解析では9割程度、同定解析では8割程度のデータにおいて実測値が予測値よりも低く、山口県の実構造物では予測値に比べて温度ひび割れ幅が抑制されている傾向が認められる。

さらに山口県のひび割れ補修基準である 0.20mm 以上のひび割れが予測されているにもかかわらず、ひび割れが発生していないデータも多く確認される。実測値と予測値を比べた場合、標準解析では平均で 0.18mm、最大で 0.47mm、同定解析では平均で 0.11mm、最大で 0.35mm、実測値が小さい値を示した。田村らも、既往のひび割れ幅算定式では山口県の構造物のひび割れ幅を高い精度で予測することはできないとしており⁵⁾、山口県のデータベースに基づく算定式を提案している⁶⁾。ひび割れ幅算定の手法については今後も検討の余地が大きい。

標準解析の結果について、使用したセメント会社別にプロットした結果を図-6 に示す。ひび割れ幅算定式の適用範囲内の 83 リフト中 18 リフトはセメント会社が不明であり、56 リフトが同一のセメント会社のセメントを使用していた。他のセメント会社のデータ数は少ないが、セメント会社によっては、予測温度ひび割れ幅に比べて実測温度ひび割れ幅が大きく抑制されている傾向を示した。高炉セメントは、同じ B 種でもセメント会社により温度ひび割れに関係する特性に大きな違いがあることが報告された事例⁴⁾もあり、実構造物のひび割れ幅にセメントの特性が影響を及ぼした可能性も否定できない。今後データが蓄積され、セメントの特性が温度ひび割れ幅に与える影響が解明されることが期待される。

次に使用した生コン会社別にプロットした結果を図-7 に示す。図-6 と見比べると、例えば A 社のセメントを用いている生コン会社 A 社と B 社では、同じセメント会社のセメントを使用していたとしても、ひび割れ幅の分布が異なることが分かる。生コン会社ごとの骨材種類や技術力の違いが、温度ひび割れ幅の違いにつながった可能性があり、今後の継続的な検討が期待される。

山口県の構造物群の分析結果から、山口県の構造物ではマスコン指針に従った数値解析結果よりも温度ひび割れの発生や、温度ひび割れ幅が抑制されている傾向が明らかとなった。現状の数値解析の入力では十分に考慮されていない材料や施工の特性があるものと考えている。実際のひび割れ抑制には、コンクリートの材料と施工が重要であることを改めて認識させられる結果である。

4. 温度応力解析の入力値についての考察

4.1 考察に使用したデータ

同定解析に用いた打込み温度と熱伝達率の入力結果から、温度応力解析における打込み温度と熱伝達率の影響について考察を行った。

考察には温度履歴を精度良く表現できているデータのみを用いることとした。同定解析を行った 99 リフトの内、解析値の実測値に対する比が最高温度で $\pm 3\%$ 、最高温度到達材齢で $\pm 20\%$ 以内の 59 リフトを対象とした。

検討対象のリフトの最高温度・最高温度到達材齢・最終計測時の温度について、解析値の実測値に対する比の平均値および変動係数を表-3 に示す。表-2 と比較すると、最高温度の変動係数が低くなり、最高温度到達材齢の平均値は 1 に近く、変動係数は低くなっており、温度履歴の精度が高いデータ群となったことが分かる。

4.2 打込み温度

温度応力解析における打込み温度についての検討を行った。打込み時期別の同定解析での打込み温度の入力値と標準解析での打込み温度の入力値の関係を図-8 に示す。また打込みの時期別に同定解析入力値の標準解析入力値に対する比の平均値および変動係数を表-4 に示す。

表-3 考察に用いるデータ群の温度履歴の予測精度

	平均値	変動係数 (%)
最高温度	1.00	1.14
最高温度到達材齢	1.04	8.67
最終計測温度	0.87	17.03

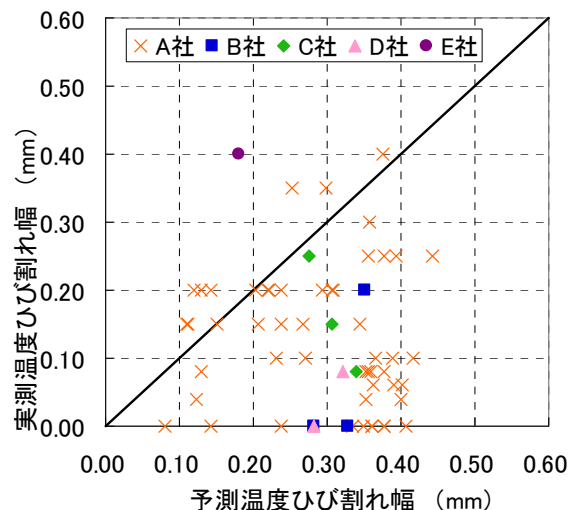


図-6 セメント会社別の温度ひび割れ幅の比較

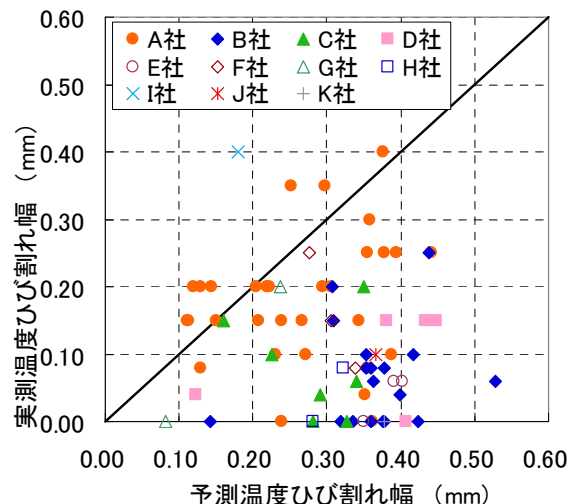


図-7 生コン会社別の温度ひび割れ幅の比較

打込み時期が6～8月、9～11月では同定解析の入力値と標準解析の入力値により高い相関が認められた。3～5月では平均値は1に近いが変動係数が大きい。特に標準解析入力値が20℃以下となる、打込み日の平均気温が15℃程度以下のデータで、同定解析入力値とのずれが大きいことが分かる。12～2月では同定解析で使用した打込み温度の方が平均値も大きく、変動係数も大きい。

一般的にコンクリートの練上がり温度は練混ぜ前の材料温度の影響が大きい。そのため、外気温で保管された骨材や通常の水道水などを用いた時期には、コンクリート温度は外気温と高い相関がみられるが、寒中時等にコンクリート温度を高めるために温水を用いた場合には外気温との相関が低くなったものと思われる。

以上より、温度応力解析において、マスコン指針では外気温を参考に打込み温度の入力値を決定する場合には、常に外気温+5℃としているが、今回の結果から特に冬季においては製造上の配慮を適切に考慮する必要があるといえる。

4.3 熱伝達率

標準解析で養生期間の熱伝達率を6W/m²℃と入力した14リフトと、8W/m²℃と入力した45リフトの、同定解析における養生期間の熱伝達率を図-9に示す。それぞれの平均値を中心円の括弧内に示す。

山口県ではマスコン指針の参考値に比べて、全体的に熱伝達率が低い場合が多いことが分かる。リフトごとに標準解析における熱伝達率の入力値と同定解析における熱伝達率の入力値の比を計算した結果、同定解析の熱伝達率は標準解析の熱伝達率に比べ、平均で32%低くなった。特に型枠に合板を用いている場合の熱伝達率は、マスコン指針の参考値の8W/m²℃に比べ、同定解析に用いた値は平均で4.9W/m²℃と顕著に低い値となった。

これは山口県の橋台の施工では、ひび割れ抑制システムにより、型枠面・打込み面に散水を行っている事例が多く、木製型枠が水分を含んだことで熱伝達が抑制され

表-4 打込み温度の解析入力値の比（同定/標準）

打込み時期	平均値	変動係数 (%)
3～5月	0.98	15.98
6～8月	0.97	5.23
9～11月	0.96	7.89
12～2月	1.22	18.16

表-5 熱伝達率を変更後の温度履歴の予測精度

	平均値	変動係数 (%)
最高温度	1.00	1.09
最高温度到達材齢	1.24	18.67
最終計測温度	0.93	10.23

た可能性が考えられる。

また養生期間終了後のコンクリート表面の熱伝達率についても検討を行った。同定解析において養生終了後のコンクリート表面の熱伝達率は、マスコン指針の参考値を参照し14W/m²℃で一定としたが、そのために養生期間終了後の温度履歴の精度が悪く、最終計測時の温度の実測値と解析値の差が大きくなったものと考えられる。

そこで、同定解析のうち67リフトについて、養生期間終了後のコンクリート表面の熱伝達率を温度履歴がなるべく一致するように変更し、最小ひび割れ指数を算出した。その場合の、最高温度・最高温度到達材齢・最終計測時の温度についての、実測値と解析値との比の平均値および変動係数を表-5に示す。表-2と比較すると、最高温度到達材齢の精度が悪くなっているものの、最高温度は変動係数が小さくなり、最終計測時の温度は平均値が1に近づき、変動係数も小さくなっていることから、特に養生期間終了後の温度履歴の精度が高いデータ群となったことが分かる。

養生終了後のコンクリート表面の熱伝達率を14W/m²℃で一定とした場合の最小ひび割れ指数と、養生終了後の温度履歴がなるべく一致するようにコンクリー

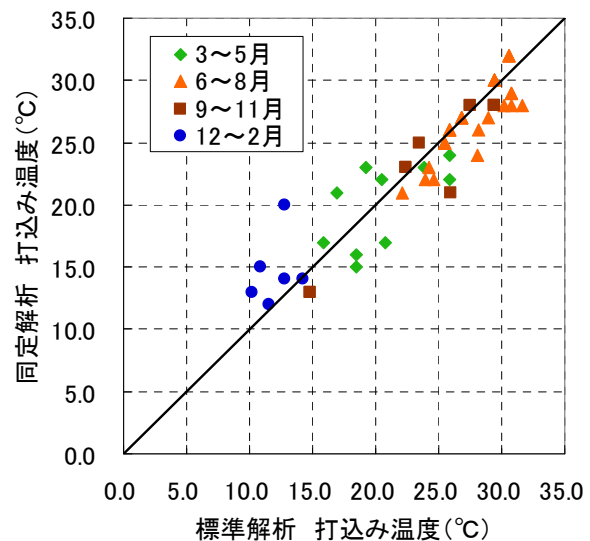


図-8 打込み温度の入力値の比較

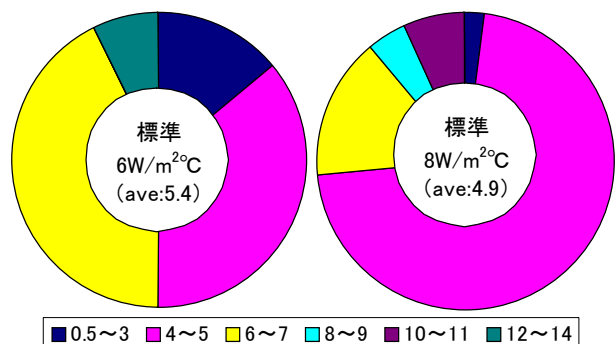


図-9 同定解析の熱伝達率の型枠種類ごとの入力値

ト表面の熱伝達率を変更した場合の最小ひび割れ指数をプロットした結果を図-10に示す。

この図より、養生期間終了後のコンクリート表面の熱伝達率を変更し、養生期間終了後の温度履歴を一致するようにしたとしても、最小ひび割れ指数には影響が小さいことが分かる。

打込み温度、養生期間の熱伝達率、養生期間終了後の熱伝達率のみの変更で、養生期間終了後までの温度履歴を実測値に近くするには、養生期間終了後のコンクリート表面の熱伝達率を $1 \text{ W/m}^2\text{C}$ や $2 \text{ W/m}^2\text{C}$ にする必要があったデータが多かった。これらは現実のコンクリート表面の熱伝達率とは大きく異なると思われた。よって、本研究では、養生終了後のコンクリート表面の熱伝達率をマスコン指針を参考にして $14 \text{ W/m}^2\text{C}$ で一定として計算した結果を同定解析とし、得られた知見について述べた。

5. まとめ

山口県の実構造物のデータベースを用いた温度応力解析により、ひび割れ抑制システムの効果の検討と温度応力解析の入力値についての考察を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 解析入力値をマスコン指針に準じた標準解析から、温度ひび割れ発生確率曲線を作成した。ひび割れ抑制システムのもとで施工された構造物では、マスコン指針のひび割れ発生確率と比べて温度ひび割れ発生確率が低くなっていることを明らかにした。最小ひび割れ指数 0.70 での温度ひび割れ発生確率が最大で 25% 低くなっており、要因の一つは、ひび割れ抑制システムの体系的な取り組みによる構造物群のひび割れ発生強度の向上によると推察した。
- (2) コンクリート内部の温度履歴を実測値に近くなるように入力値を変更した同定解析から作成した温度ひび割れ発生確率曲線は、マスコン指針のひび割れ発生確率曲線より大きい勾配を示した。構造物中のコンクリートの品質のばらつきが抑制されたことと、形状の類似した部材を分析の対象としたためと考えられる。
- (3) 山口県の実構造物ではマスコン指針に従った予測値に比べて温度ひび割れ幅が顕著に抑制されている傾向が認められた。
- (4) セメント会社、生コン会社により温度ひび割れ幅に違いがある可能性が示唆された。
- (5) 同定解析における山口県の実構造物の養生期間の熱伝達率は、マスコン指針に示される参考値に比べて小さい傾向にあった。養生期間中に型枠面・打込み面に散水を行っている事例が多く、木製型枠が水分を含んだことで熱伝達が抑制されたためと推察した。

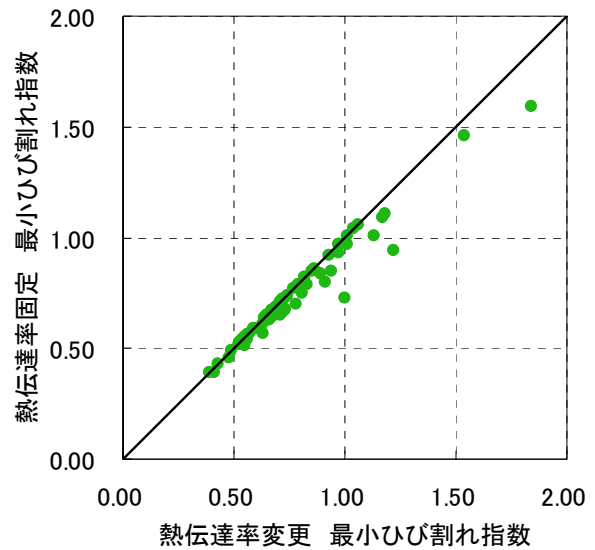


図-10 熱伝達率がひび割れ指数に与える影響

- (6) 温度応力解析における打込み温度の入力値について、特に冬季においては、製造上の配慮を適切に考慮する必要があることが分かった。

謝辞

本研究を行うにあたり貴重なご意見をいただいた、法政大学溝渕利明教授、山口県の二宮純氏、山口県建設技術センターの皆様には、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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, pp.119-125
- 2) 国重典宏, 田村隆弘, 二宮純, 森岡弘道：山口県における「コンクリートひび割れ抑制システム」について, コンクリート工学, Vol.49, pp.91-95, 2011.5
- 3) Ha Ngoc Son, Akira Hosoda: Detection of Microcracking in Concrete Subjected to Elevated Temperature at Very Early Age by Acoustic Emission, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.8, No.2, pp.201-211, June 2010
- 4) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会）No.2, コンクリート技術シリーズ 89, pp.253-334, 2010.5
- 5) 田村隆弘, 稲津貴和子, 国重典宏：実構造物のデータベースを用いた初期ひび割れ幅の予測式に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1331-1336, 2011
- 6) 稲津貴和子, 田村隆弘, 澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1337-1342, 2011