

コンクリート構造物の温度ひび割れ解析と 現場実測方法の提案

西土 隆幸^{*1} 河野 豊^{*2}
Nishido Takayuki Kawano Yutaka

コンクリートの表面ひび割れは、主にコンクリート打設後1週間程度の養生後のコンクリート表面と外気温との温度差に伴う温度応力によるものである。ここでは、コンクリートに発生する温度応力に与える影響として日射量を考慮し、その影響を実験、解析で確認した。その結果、コンクリート表面に測定した外気温と日射量による仮想外気温を与えれば、養生後のコンクリートの温度、ひずみ、応力の変化量の再現が可能となる。さらに、気象庁が発表している1ヶ月平均での最高・最低気温と1日の合計日射量を使用し、実測データを使用した場合と同程度の精度でコンクリートに発生する温度応力等の結果が得られる方法を提案した。

また、ここで提案した解析法で、ひび割れ発生の可能性が高い個所に光ファイバーセンサーの一種であるSOFOセンサーを使えば、少ない労力でひび割れ発生個所の検出やその幅の測定などの作業が可能になると考えられる。

キーワード：コンクリート床版、コンクリートひび割れ、日射量、温度応力解析、光ファイバーセンサー

1. はじめに

鋼橋のコンクリート床版では、設計段階で表面ひび割れを防止する対策が検討される。この表面ひび割れは、主にコンクリート打設後1週間程度の養生後に発生する、コンクリート表面と外気温との温度差に伴う温度応力によるものである。これまで、このような表面ひび割れを防止するためにコンクリート温度応力解析プログラム ASTEA MACS⁽¹⁾を使用し、外気温をコンクリート表面に与える方法で事前解析を実施し、適切な養生期間と方法、鉄筋の径や本数の増加などの対策方法が採られてきた⁽²⁾⁽³⁾。しかし、実際のコンクリート

表面温度と外気温に大きな差があり、より精度の高い解析が望まれている。

そこで、養生後にコンクリート表面では直接、太陽光による日照を受けることから、コンクリートに発生する温度応力に与える影響としてさらに日射量を考慮し、その影響を実験、解析で確認した⁽⁴⁾。それらの結果から、日射量の影響は、コンクリート表面で最高・最低の温度変化量で約25℃、コンクリート内部の応力変化量で約0.9N/mm²となり無視できない量であることが明らかとなった。今回は実験のために熱電対による外気温、日射計による日射量を1時間ごとに測定することが可能であったが、設計段階で架設地点のそのような

*1：研究開発センター センター長 工学博士 技術士（建設部門） P.E.（Civil Eng.） 芝浦工業大学大学院非常勤講師

*2：研究開発センター 研究開発グループ 次長 コンクリート診断士

データを測定することは、ほぼ不可能である。そこで、気象庁が発表している1ヶ月平均での最高・最低気温と1日の合計日射量を使用し⁽⁵⁾、実測データを使用した場合と同程度の精度でコンクリートに発生する温度応力等の結果が得られる方法を提案した⁽⁶⁾。

本方法により、設計段階で表面ひび割れに対する精度の高い検討結果を提案でき、より有効な対応策によりコンクリート構造物の耐久性を向上させることが可能となる。

また、打設後のコンクリート表面のひび割れ発生個所の検出やその幅の測定は、目視による検査が必要になる。しかし、ここで提案した解析法で、ひび割れ発生の可能性が高い個所に光ファイバーセンサーの一種であるSOFO(Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques)センサー⁽⁷⁾を使えば、少ない労力でこれらの作業が可能になると考えられる。また、ひび割れ幅の測定に一般的に使われているパイ型変位計とほぼ同じ精度で、測定が可能となる。

2. 実験方法

今回の実験では、日射量の影響を確認するために供試体(コンクリート床版+鋼桁)を作成した。図1に供試体の外形と実験方法を示す。供試体の製作では、床上にテフロン®板を敷き、鋼桁をその上にセットして型枠を組み立て、コンクリートを打設した。打設後は、コンクリート表面を養生マットとブルーシートで覆い、養生中は湿潤状態に保つように散水した。養生後(脱形後)は鋼桁が単純支持となるようセットし、コンクリート表面は太陽光による日照が全面に当たるように、また、そのほかの部分は当たらないように遮光シートを図1のようにセットした。

使用鉄筋は、主筋・配力筋ともD16(異形鉄筋径15.9mm)、鉄筋間隔250mm、かぶり(コンクリート表面から鉄筋表面までの距離)は50mm(一部

30mm)とした。また、コンクリートとの合成のための鋼桁上のスタッドは、径19mm、高さ150mmを使用した。コンクリートの配合を表1に示す。なお、セメントの種類はポルトランドセメントである。

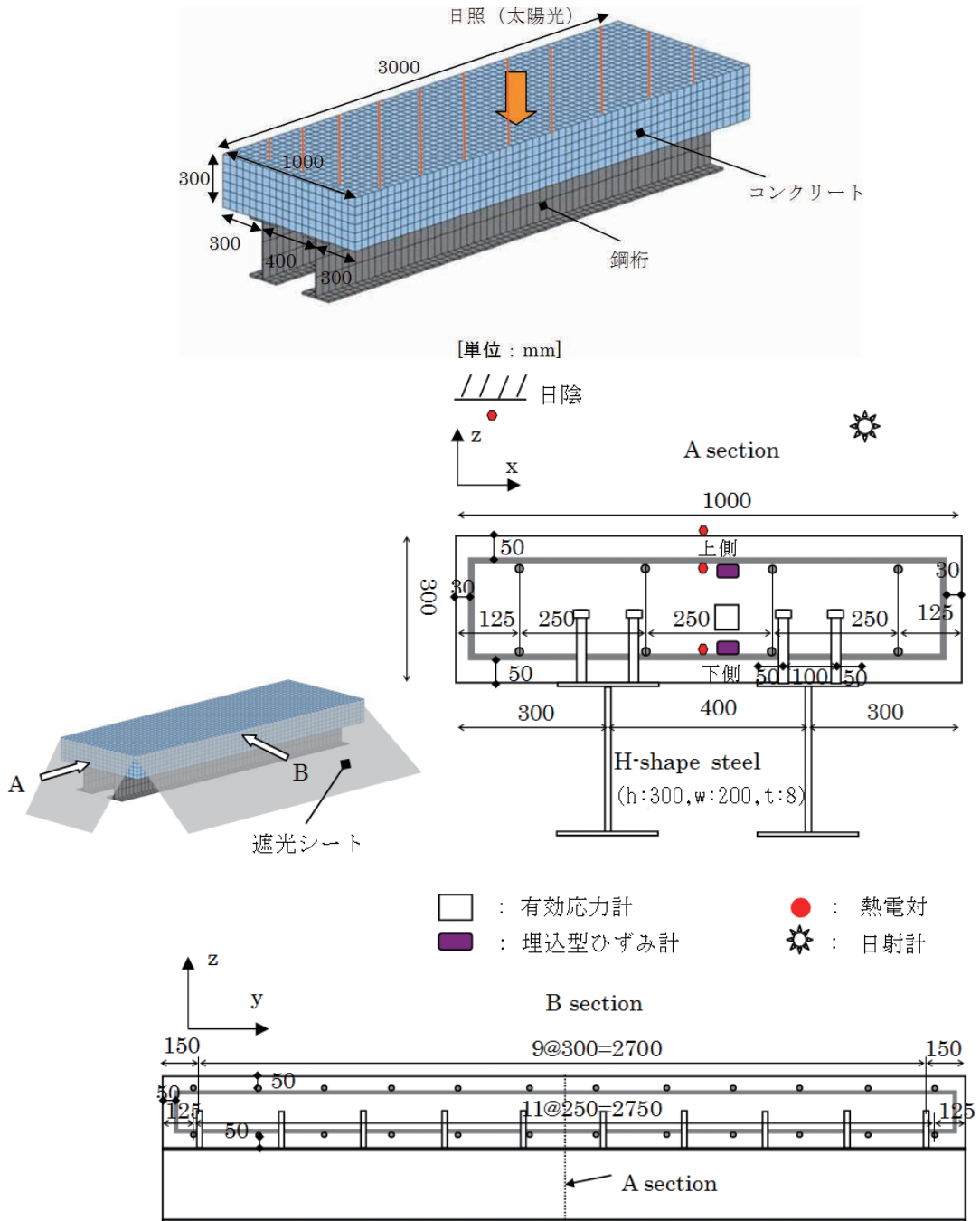
供試体付近で日陰の外気温を熱電対で、日なたの日射量を全天日射計(以後、日射計と省略)で測定した。供試体内部のコンクリートでは、温度を熱電対、ひずみを埋込型ひずみ計、そして応力を有効応力計で測定した。これらの計測は、2006年10/16の打設直後(11:33)から1時間間隔で約3ヶ月間行った。

3. 解析方法

本解析は、コンクリート構造物専用の3次元非線形温度応力解析プログラムASTEAMACS⁽¹⁾により行った⁽⁴⁾。本解析では、鋼桁とコンクリート床版をソリッド要素によりモデル化した。コンクリート床版内の鉄筋は、鉄筋比で表現した。また、鋼桁とコンクリートは完全合成として、両者の接合部を同一節点とした。コンクリートの実測圧縮強度は、7日28.0N/mm²、14日35.9N/mm²、28日38.4N/mm²、また、引張強度(割裂試験法)は、7日2.5N/mm²、14日2.9N/mm²、28日3.2N/mm²となった。

これまでの温度応力解析ではコンクリート構造物付近の外気温の平均値をコンクリート表面に与えていた。しかし、コンクリート表面では外気温以上になっていることをしばしば経験し、外気温のみをコンクリート表面に与えるのは適切ではないと考えられる。コンクリート表面が外気温以上の温度になるのは、日照による日射量が要因となっており⁽⁸⁾、対象構造物に与えられる熱エネルギーは、式(1)のようになる。

$$\text{熱エネルギー} = \text{対流(風による熱と水蒸気の輸送)} + \text{放射(全天日射、大気放射)} \quad (1)$$



[単位 : mm]

図 1 供試体の断面構成と測定位置

表 1 供試体コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	最小単位セメント量 (kg/m ³)
30	8±2.5	4.5±1.5	20	300

これまでの解析で考慮していた外気温は、式(1)の対流部分のみである。放射現象の中の全天日射は、対象構造物に入射する直達日射と天空散乱光の総称であり、放射の大部分を占める。また、全天日射は、日射計により測定できる。具体的に、解析で考慮する熱エネルギーを式(2)のような仮想外気温として定義した。

$$T_{eq}(t) = T_0(t) + \frac{q}{\mu} \quad (2)$$

ここで、 T_{eq} (°C)：仮想外気温、 T_0 (°C)：日陰の外気温、 q (W/m²)：日射量、 μ (W/(m²·°C))：熱伝達率、 t (hr)：時間。

今回の解析では、熱伝達率を40とした。これは、500×500×120mmの体積を持つコンクリート表面で風速条件を変化させた場合の熱伝達率の測定結果に基づいており、風速2m/sのときに相当する値である⁽⁹⁾。なお、日射計により測定できるのは流入日射量のみで、また、流出量は流入量に比べ小さいことから流出量はゼロとした。養生中(11/16-11/22)にはコンクリート表面は養生材により覆われており、日射の影響はないので1項目のみ、養生後(11/23)は2項目も考慮した仮想外気温をコンクリート表面に与えた。また、コンクリート表面以外は、遮光シートがセットされているので1項目のみ与えた。なお、本解析では、時間きざみを1時間として行った。

図2にコンクリート表面の10/16の11:33から2週間の仮想外気温(T_{eq})と日陰の外温度(T_0)を示す。日陰の外気温は、1日の最高・最低で約10°C変化するのに対し(○で表示)、仮想外気温は約25°C変化し、最高温度は40°C近くに達している。この影響は大きく、コンクリート内部に発生するひずみや応力にも影響を与えると予想できる。また、図3のコンクリートの実測表面温度との比較では、日射の影響を考慮すると養生後(11/23)の実際の温度変化に近いことがわかる。

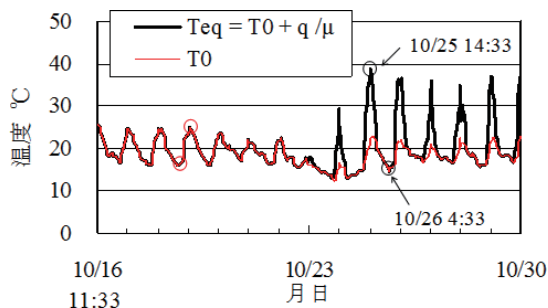


図2 仮想外気温

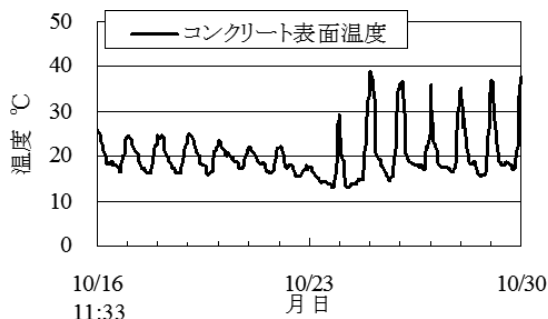


図3 供試体の表面温度

なお、10/23は雨、11/24は曇りであり、仮想外気温、コンクリートの表面温度ともその後の晴天時に比べ低い温度となっている。

4. 結果と考察

4.1 温度

図4にコンクリートの内部(上側の埋込型ひずみ計位置)温度の実験結果と解析結果を示す。

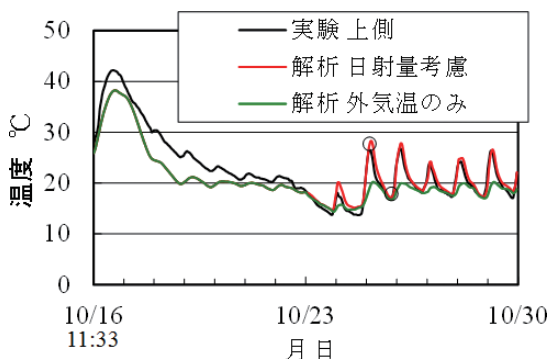


図4 温度 実測値と解析値の比較

養生後に温度変化は激しくなり、仮想外気温の影響を強く受ける上側では、その最高・最低温度の変化量は実測で約 10℃となる（○で表示、以後同様）。なお、下側も同じ傾向であるので省略している。養生後の解析結果は実験結果とよい一致を示しており、日射量を考慮した解析方法は妥当であるといえる。

4.2 ひずみ

図 5 にコンクリート内部（上側）の発生ひずみの実験結果と解析結果を示す。ひずみも温度と同じく、養生後に激しく変化している。日射量を考慮した解析では、養生後のひずみは -50μ 付近を境に変化しているが、実測値では、 -25μ 付近が境となる。養生後（10/24）の実測値と解析値では、最小値のひずみに差があるが、そのほかの位置では日射量を考慮した解析により実際のひずみ変化の傾向を再現できている。10/16 から 10/23 までの養生中では、実測値と解析値に差があるが、これは解析ではコンクリートの線膨張係数を、打設直後の粘性体から硬化後の固体までプログラム上の制約により、同じ値としていることに原因があると考えられる。なお、下側も同じ傾向であり省略している。

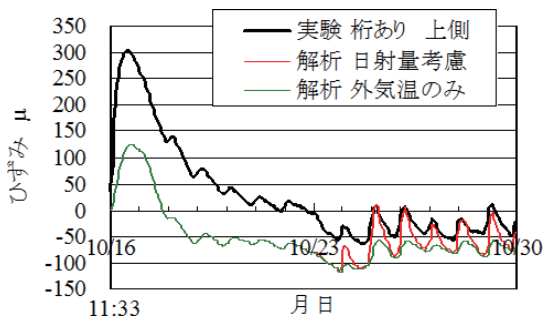


図 5 ひずみ 実測値と解析値の比較

4.3 応力

図 6 にコンクリート内（上側、下側）の発生応力の解析結果を示す。鋼桁の拘束により下側に引張応力が発生しており、日射量を考慮した解析では、養生後の最大・最小の変化量は約 0.3N/mm^2 となり、外気温のみを考慮した場合に比べ約 0.15N/mm^2 引張応力が大きくなる。上側は圧縮応力となっており、その変化量は下側より激しく、約 0.6N/mm^2 となる。

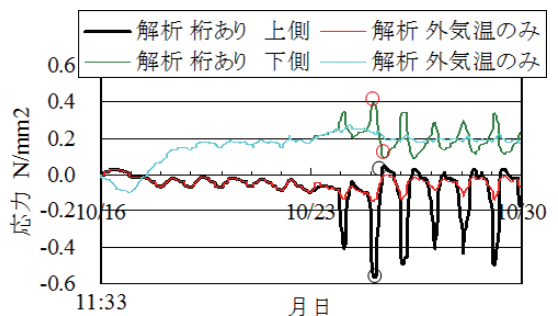


図 6 応力（上側、下側）

図 7 にコンクリート中央部の実験値と解析値の発生応力を示す。実測の最大変化量は、10/25 の約 0.9N/mm^2 となる。同日の外気温のみ考慮した解析値との最大引張応力の差は約 0.6N/mm^2 、日射量を考慮した解析値では約 0.3N/mm^2 になる。実際の橋梁では、コンクリート床版部で発熱量や拘束条件が厳しくなることが考えられる。また、夏場ではさらに日射量が多くなる。これらの理由により、コンクリート強度が完全に発現していない打設後 1 週間付近では、発生応力の 1 日の変動量によりひび割れが発生する可能性がある。しかし、外気温のみを考慮した解析では、ひび割れの発生を十分に予測できないことがわかる。

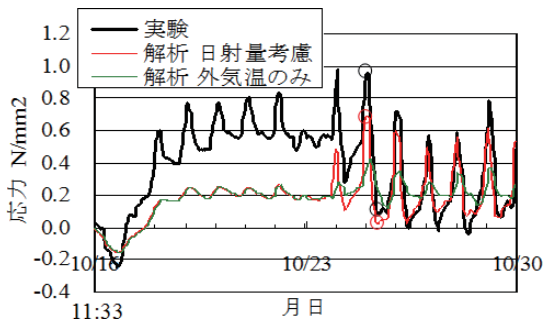


図7 応力 (中央)

4.4 解析の妥当性

これまでの結果より、コンクリート表面の日照による日射量がコンクリート内部の温度、ひずみ、応力に与える影響は大きく、発熱量や拘束条件によってはコンクリートの表面にひび割れが発生する可能性があることがわかった。そして、外気温と日射量の両方を考慮した仮想外気温を使って温度応力解析を実施すれば、それらの養生後の変化量を再現できることがわかった。解析結果からひび割れ発生の可能性があれば、予想強度が得られるまで養生期間を長く取る、鉄筋の径や本数を増やす、あるいは、膨張剤を添加するなどの対策が考えられる。

5. 気象庁データを利用した解析方法

本研究で提案した方法により日射の影響を温度応力解析で考慮すれば、設計段階でさらに精度の高いコンクリート構造物のひび割れ防止のための検討が可能となる。しかし、設計段階で建設地点の外気温や日射量を本実験のように1時間ごとに測定することは、ほぼ不可能である。

そこで、誰でも容易にインターネットにより入手できる気象庁のデータを使用して、仮想外気温を作成する方法について検討する。

5.1 気象庁データ

気象庁のホームページから得られる気象データ⁽⁵⁾

では、全天日射量の値が表示されている場所で1日の合計日射量のデータが入手できる(全国で68ヶ所)。これらの場所では、1971年から2010年までの毎日、10日間、1ヶ月のそれぞれの平均値の気象データが得られる。表2は東京の各月1ヶ月間の平均値データである。そこで、これらの気象データの月平均の最高・最低気温、1日合計の全天日射量(以後、日射量と省略)から仮想外気温を作成する方法を述べる。実験は神奈川県綾瀬市で行われたので、ここでは最も場所が近い東京の気象データを使用した。

表2 気象庁の1ヶ月の平均データ(東京)⁽⁵⁾

要素	気温(°C)			全天日射(MJ/m ²)
	平均	最高	最低	平均
統計期間	1981~ 2010	1981~ 2010	1981~ 2010	1981~ 2010
1月	5.2	9.6	0.9	8.9
2月	5.7	10.4	1.7	10.9
3月	8.7	13.6	4.4	12.5
4月	13.9	19.0	9.4	15.3
5月	18.2	22.9	14.0	16.2
6月	21.4	25.5	18.0	14.0
7月	25.0	29.2	21.8	14.6
8月	26.4	30.8	23.0	15.2
9月	22.8	26.9	19.7	11.1
10月	17.5	21.5	14.2	9.6
11月	12.1	16.3	8.3	8.1
12月	7.6	11.9	3.5	7.8

5.2 実験値に対する近似方法

実験では1時間ごとに測定した日射量を使用した。そこで、気象庁データから得られる10月の1日の合計日射量(9.6MJ/m²)から1時間ごとの日射量を算出した。

図8に、10/25の1時間ごとの実測日射量とSIN波形で近似した結果を示す。ここでは、実測日射量の1日の合計値とSIN波形で仮定した日射量の合計値が等しく(両者の面積が等しくなる)、最大の日射量が12:00となるように近似した。その結果、SIN波形の半周期を8時間とすればよい近

似が得られることがわかった。1日のうちそれ以外の16時間は日射量をゼロとした。図9には、本方法を10/24から11/5までの13日間の実測日射量に適用した結果であり、図8の10/25以外でも本方法による近似がほぼ妥当であることがわかる。

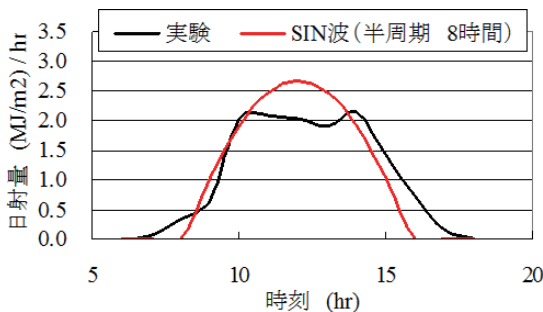


図8 実験結果と SIN 波による近似 (10/25)

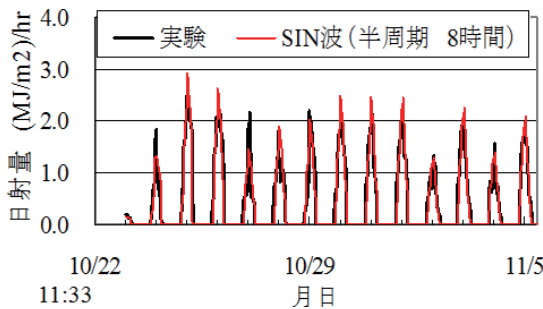


図9 実験結果と SIN 波による近似 (12日間)

外気温は1日の平均気温を使用するのがもっとも簡単であるが、実測外気温の1日の変化量は、図2より約10℃となるので、平均温度を使うと過小評価になる。そこで、最高気温(21.5℃、12:00)と最低気温(14.2℃、24:00)を24時間間隔で繰り返すことにした。

図10に気象庁のデータから得られた外気温(14.2～21.5℃)と日射量(9.6MJ/m²)を使用した仮想外気温と、実測結果により得られる仮想外気温(以後、実測仮想外気温と呼ぶ)を示す。両者の日々の最低温度はほぼ同じであるが、最高温

度は実測仮想外気温の方が約3℃高い。また、両者では10/23、10/24の最高温度に差がある。これは、前述したように10/23は雨、10/24は曇りであったが、気象庁のデータは1ヶ月の平均値で、天候まで考慮できないためである。

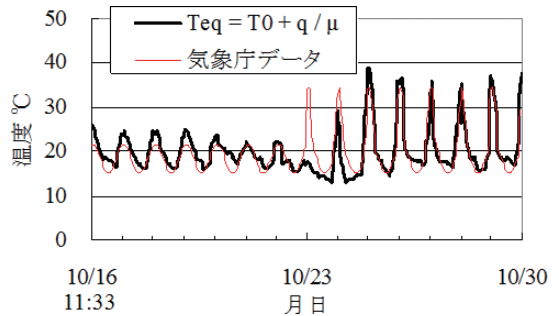


図10 実験値と気象庁データによる仮想外気温

5.3 提案した近似方法の妥当性

図10の気象庁のデータより得られた仮想外気温を使用し、それ以外は3章と同じ条件により得られたコンクリートの温度、ひずみ、応力の解析結果を図11から図14に示す。図11の温度では10/23、10/24で、実測仮想外気温を使用した解析結果(日射量考慮)より最低・最高温度が高くなっている。この理由は、前述したように、気象庁データは平均値で天候の影響を考慮していないためである。10/25以後の晴天後では両者の解析結果は、よく一致している。

図12のひずみ、図13、図14の応力の各解析結果の傾向は、温度と同じである。応力では養生後の変動が激しくなり、10/25では中央部の日射量考慮(図14)の結果は、気象庁データによる近似結果より約0.2N/mm²大きくなっているが、それ以後では両者に差はない。

これらの結果から、1ヶ月平均の1日合計日射量を使用すれば、仮想外気温の作成も簡単で、設計上十分な精度で設計段階でのひび割れ対策が可能となる。

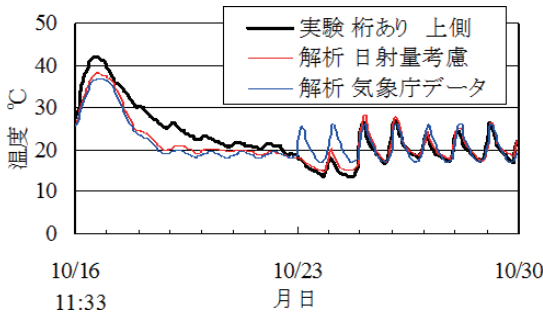


図 11 温度 近似方法との比較

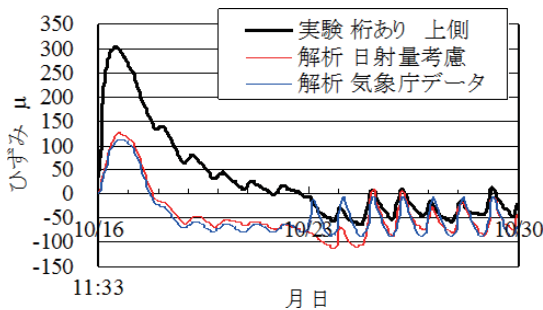


図 12 ひずみ 近似方法との比較

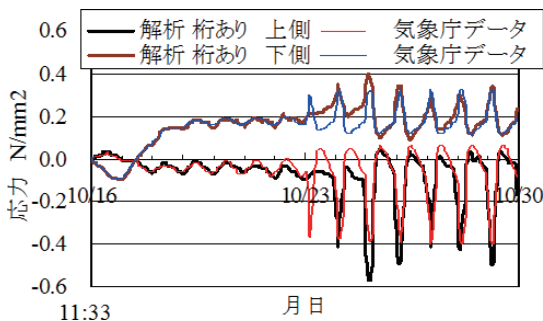


図 13 応力 近似方法との比較 (上側、下側)

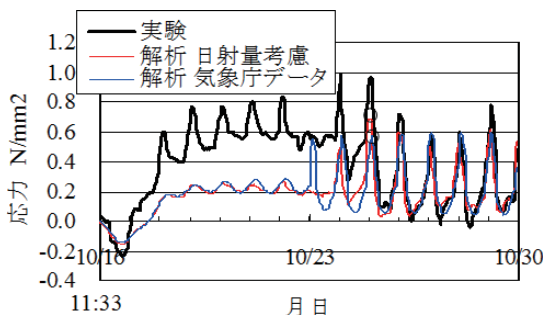


図 14 応力 近似方法との比較 (中央)

6. 実構造物のひび割れ測定

コンクリートの有害なひび割れ幅は、土木学会のコンクリート標準示方書では、かぶりの関数として規定されている⁽¹⁰⁾。例えば、一般の環境で異形鉄筋のかぶり 50mm では、ひび割れの限界値は、0.25mm となる。

コンクリート打設直後にこのようなひび割れが発生した場合には、補修を行うことにより、コンクリート構造物の耐久性が向上する。すべての箇所を目視により検査することは、時間と労力が必要となる。しかし、ここで提案した方法による事前解析を実施し、ひび割れ発生可能性の高い箇所を集中的に検査すれば、省力化が可能となる。

ひび割れ幅を正確に測定するためには、パイ型変位計が使われる。しかし、この方法では、図 15 に示すように、ひび割れをまたぐようにセットすることになり、ひび割れ個所の正確な位置を知る必要がある。

一方、光ファイバーセンサーの一種である SOFO センサー⁽⁷⁾を使えば、その長さの範囲内でひび割れが発生すれば、それを検知でき、ひずみの変化量からひび割れ幅も算定できる。図 16 に示すように、SOFO センサーは 2 種類の光ファイバーからなっている。測定ファイバーには、あらかじめ引張力を与え、構造物に設置した 2 点間での変化により伸び縮みする。参考ファイバーは、らせん状になっており、2 点間での変化の影響を受けない。SOFO センサーはこれら 2 種類の光ファイバーの差を測定する。本センサーの分解能は、その長さにかかわらず 0.002mm、ゲージ長は 0.25 ~ 20m である。図 15 に示すように、本センサーは、コンクリート表面に設置、あるいは、コンクリート内部に埋め込むこともできる。また、腐食等の影響を受けないので、一度設置すれば半永久的に測定が可能となる。なお、図 15 のひび割れ幅の測

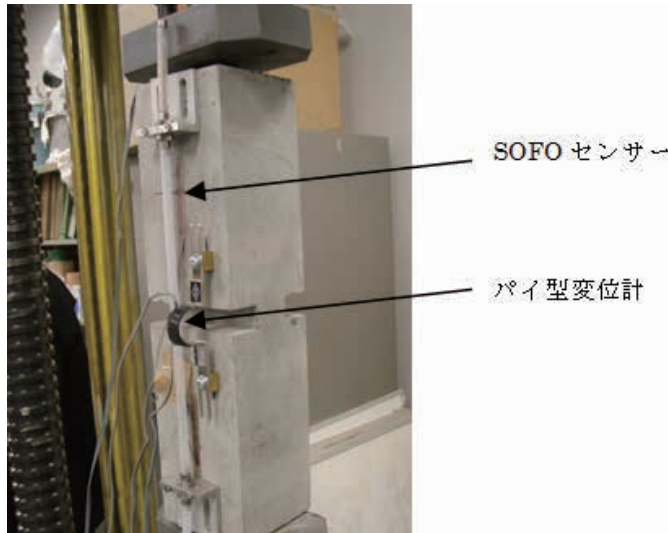


図 15 SOFO センサーとパイ型変位計の設置状況

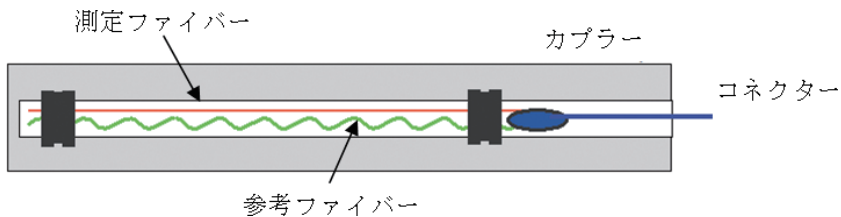


図 16 SOFO センサーの概略図

定では、パイ型変位計との測定誤差は、5%以下となった。

7. 結論

以下に今回の研究で得られた結果を示す。

(1) 温度応力解析で、コンクリート表面に1時間ごとに測定した外気温と日射量による仮想外気温（実測仮想外気温）を与えれば、コンクリート供試体の養生後の温度、ひずみ、応力の変化量の再現が可能となる。

(2) 日射量を考慮した実測結果から、養生後の引張応力の最大・最小の変動値は、コンクリート中央部で約 0.9N/mm^2 となり、発熱量や拘束条件によって実構造物では、ひび割れが発生する可能

性がある。

(3) 気象庁の1ヶ月平均の最高・最低気温を24時間の周期、1日の合計日射量を8時間の半周期となる SIN 波形に近似して仮想外気温を定義すれば、それらの1時間ごとの測定値から得られる実測仮想外気温による結果とほぼ同じものが得られる。

(4) コンクリート打設直後のひび割れに対して、提案した方法による事前解析を実施し、ひび割れの発生可能性の高い個所に SOFO センサーを使い集中的に検査すれば、ひび割れの有無やその幅の測定などの省力化が可能となる。

参考文献

- (1) ASTEA MACS : 株式会社計算力学研究センター、Ver.4 利用者マニュアル、2007
- (2) 塩永亮介、久保田善明、藪野真史、戸田均、西東十郎 : 場所打ち PC 床版のひび割れ抑制 - 佐分利川橋 -、石川島播磨技報、第 43 巻、第 4 号、2003/7、pp.122-128
- (3) T.Nishido, Y.Moroyama and K.Toda : Study on characteristics of long time cracks in concrete slabs, Concrete solutions, Proc. of 2nd intl. conference, June, 2006, pp.602-609
- (4) T.Nishido、R.Shionaga and Y.Moroyama : Thermal stress analysis considering solar radiation for concrete structures, fib symposium, May, 2007, pp.583-590
- (5) 気象庁 : 過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index>
- (6) T.Nishido and Y.Kawano : Preventive measures against cracks on concrete structures in design stage, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Sept., 2015, pp.1064-1073
- (7) 河野豊 : SOFO による橋梁のヘルスマニタリング、IIC REVIEW、No.41、2008、pp.24-30
- (8) 倉田幸弘、河西龍彦、師山裕、雪田憲子、丸山久一 : 鋼 2 主桁橋 PC 床版の輻射熱による変動挙動について、土木学会構造工学論文集、Vol.50A、2004/3、pp.1183-1189
- (9) 師山裕、塩永亮介、倉田幸弘 : 各種養生方法の熱伝達率と風速の関係についての実験的検討、土木学会第 59 回年次学術講演会、2004/9、pp.913-914
- (10) コンクリート標準示方書「設計編」、公益社団法人土木学会、2013



研究開発センター センター長
工学博士 技術士 (建設部門)
P. E. (Civil Eng.)
芝浦工業大学大学院非常勤講師
西土 隆幸
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



研究開発センター
研究開発グループ 次長
コンクリート診断士
河野 豊
TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547