

実大基礎ブロックに生ずる温度応力の計測と解析

川 口 徹

Measurement and Analysis of Thermal Stresses in Mass Concrete Block Foundation

Toru Kawaguchi

abstract

This paper discusses the results of measurement and analysis of thermal stresses in mass concrete block foundation. The following results were obtained. Stress meters, if installed properly to connect tightly with the surrounding concrete to be measured, can measure thermal stress with adequate accuracy for practical use. If reliable data concerning the mechanical properties of concrete are available, thermal stresses of the same degree of reliability as stress meters can be obtained with embedded-type strain gages using the evaluation method given in this paper. The results of thermal stress analysis using the 3-dimensional finite element method with the algorithm developed in this paper, coincided well with the measurements of thermal stresses in an actual massive concrete block.

概 要

幅12m, 長さ12m, 高さ9mの実大基礎ブロック施工中の温度応力の計測と, 3次元有限要素法による温度応力の推定を行い, 次のことが明らかになった。①有効応力計は正しく設置すれば, 若材齢時のコンクリートの力学性状がわからなくても, 信頼性の高い温度応力の計測値が得られる。②若材齢のコンクリートの弾性係数の発現性状やクリープ性状がわかっているならば, 今回提示した算定方法を用いることにより, 埋込み型歪計の計測値からでも, 信頼性の高い温度応力の推定が可能である。③温度応力の計測値と解析値の比較から, 今回提示した方法を組み込んだ3次元有限要素法による温度応力の推定は, 実用的に十分な精度を有する。

1. はじめに

超高層RC建物や原子力発電所施設などをはじめとして, 最近の建造物の大型化, 高強度化に伴い, 温度ひび割れ抑制対策を必要とするマスコンクリートの施工が増えている。マスコンクリートの過大な温度ひび割れは, 一般の乾燥収縮ひび割れと同じように, 漏水や鉄筋の腐食などの欠陥を生ずる。耐久性に優れたRC建造物を建設するには, 有害な温度ひび割れをできるだけ少なくする必要がある。

これまでも, フライアッシュ・高炉スラグなどの混和材の有効利用や, 低熱ポルトランドセメントをはじめとする新しい材料の開発, さらに, 液体窒素を使ったブレーキングなどの施工法の開発が精力的に行われ, それなりの成果をあげてきている^{1), 2)}。しかるに, 個々の建造物の設計や施工計画段階で, 費用対効果まで考慮した上で, どこまでの対策を取れば良いかを具体的に検討するための手段, ツールは, 残念ながら整備されているとは言い難いのが現状であろう³⁾。

マスコンクリートの温度ひび割れが発生する基本的なメカニズムとしては, 部材断面内部の温度勾配, あるい

は部材全体の温度上昇・降下により生じる温度応力のうち, 引張応力がある限界値に達するとひび割れにつながると説明されている。しかし, 発生する温度応力の大きさは, 部材内部の温度変化のみならず, コンクリートの弾性係数の発現性状, 若材齢時のクリープ性状などの材料特性や部材の形状・寸法および周囲からの拘束条件によって, 様々な影響を受ける。これらの多くの要因の影響を実験室内の小型試験体で検討することは極めて困難である。一方, 実大建造物で性状を把握するには, 多額の費用を要するため, 基本的な温度応力の計測データの収集もそれほど進んでいない。また, 温度応力の予測に関しても前述のような各種要因の影響を精確に考慮できる汎用性の高い解析方法は今のところ確立されていない。

このたび, 12m×12m×9mの実大基礎ブロックの施工に際し, 温度応力を計測する機会を得た。コンクリートの弾性係数の発現性状や, 若材齢時のクリープ性状に関するデータを取得するための試験も実施した上で, 以下の3課題についての検討を行った。

1) 有効応力計による温度応力の計測結果は, どの程

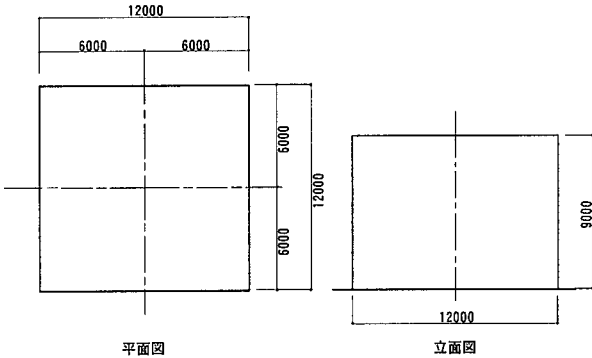


Fig. 1 実大基礎ブロックの形状、寸法
Shape and Dimension of Mass Concrete Block Foundation

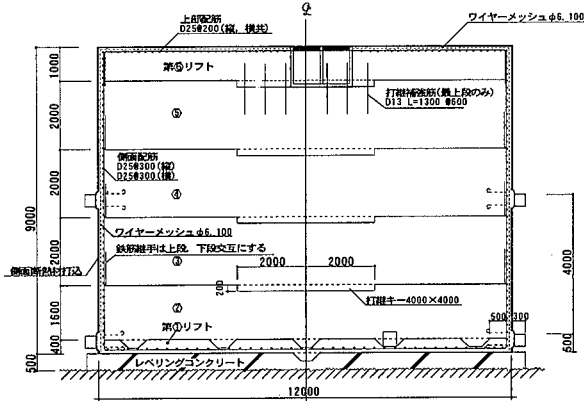


Fig. 2 コンクリート打設区分と配筋状況
Cross-section of Mass Concrete Block Foundation

Table 1 コンクリートの使用材料、調合
Materials and Mix Proportion of Concrete

使用材料			調合 (1m ³ 当り)						
セメント	細骨材	粗骨材	W/C (%)	S/A (%)	セメント (kg)	水 (ℓ)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (kg)
フライアッシュB種	砕砂+陸砂	現成砂岩砕石	55	43	298	164	780	1042	0.745

度の信頼性を有しているか。

2) 埋込み型歪計の計測値から算定した温度応力の推定値は、どの程度の信頼性を有しているか。

3) 有限要素法による解析から推定した温度応力は、計測結果とどの程度の対応関係にあるか。

2. 実大基礎ブロックの概要

2.1 実大基礎ブロックの形状・寸法

実大基礎ブロックの形状・寸法は、Fig. 1に示す通りで、幅12m、長さ12m、高さ9mである。既往の施工実績を踏まえ、できるだけ温度ひび割れの少ない構造物とするため、Fig. 2に示すように6リフトに分割してコンクリートを打設した。なお、打設リフト間の一体性を高めるため、第2リフトから第5リフトの打継ぎ面には、深さ20cm、寸法4m×4mのシアキーを設けた。ひび割れの分散を期待してコンクリート表面部には、鉄筋およびワイヤーメッシュ筋を配置した。また、部材断面内の温度勾配を小さくするため、側面全体にわたり、厚さ

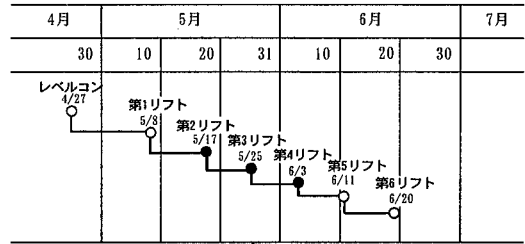


Fig. 3 コンクリートの打設工程
Schedule of Concreting

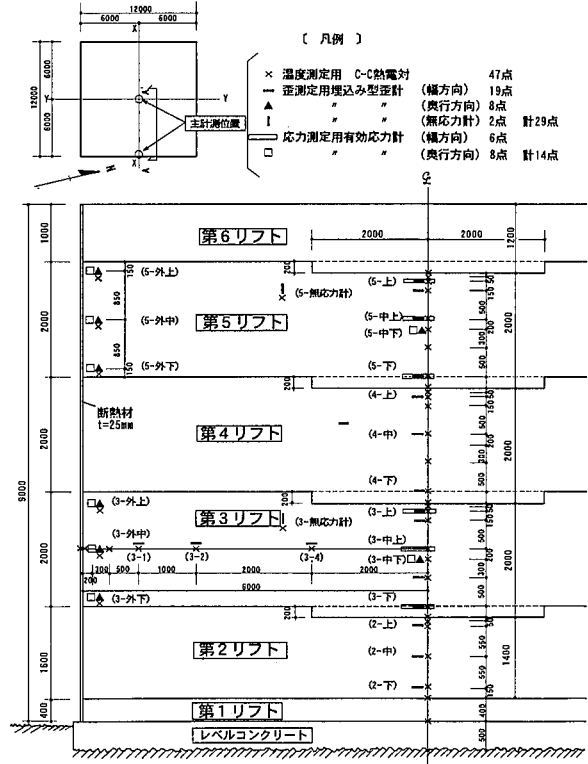


Fig. 4 実大基礎ブロック内の各種計器の埋込み位置
Locations of Instrument in Measured Section

25mmのポリスチレン系の断熱材を設置した。

コンクリートの打設工程は、Fig. 3に示す通りである。このうち、第2リフトから第5リフトでのコンクリート打設後の温度および応力の計測を行った。各リフトの打設終面には遅延剤を散布し、翌日ワイヤーブラシでレイタンスを除去した。ダムコンクリートで行うようなグリーンカットまでは実施しなかった。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの使用材料および調合は、Table 1に示す通りである。セメントには、温度ひび割れの発生をできるだけ低減するため、フライアッシュセメントB種を用いた。

2.3 温度および応力の計測

温度および応力の計測箇所は、Fig. 4に示す通りである。計測は主にブロックの中央部と外側部の2箇所で行った。有効応力計による計測は、第3リフトと第5リフトで実施した。なお、有効応力計の計測箇所では埋込

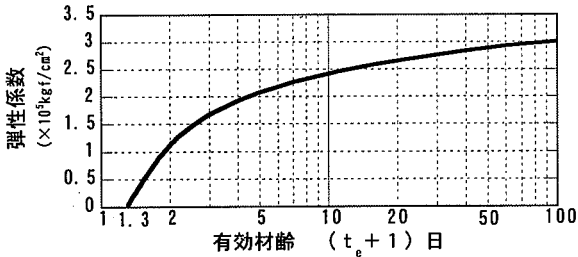


Fig. 5 弾性係数の発現性状
Development of Young's Modulus

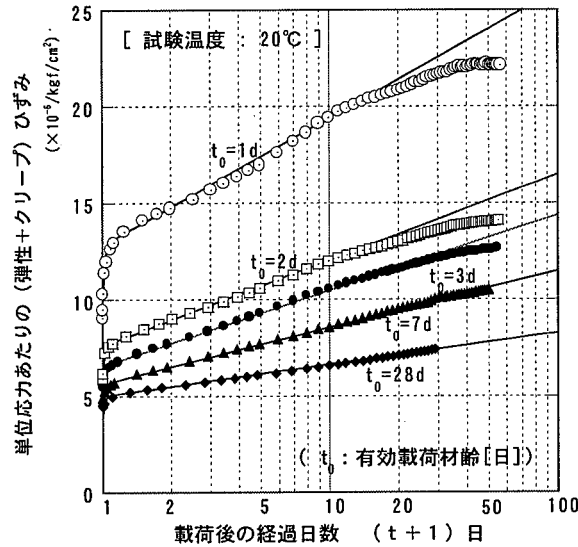


Fig. 6 コンクリートのクリープ性状
Creep Behavior of Concrete

み型歪計による計測も同時に行った。全計測数は、温度計測用熱電対が47点、有効応力計が14点、埋込み型歪計が無応力計を含め29点である。

3. コンクリートの力学性状

歪計の計測値から温度応力を推定したり、温度解析結果をもとに温度応力を予測する場合には、コンクリート打設直後からの弾性係数の発現性状や若材齢クリープ性状をできるだけ正確に把握しておく必要がある。実大基礎ブロックに使用したコンクリートと同一材料・同一調合のコンクリートで若材齢時の強度試験、クリープ試験を行った⁴⁾。

その結果、弾性係数の発現性状に対する温度の影響は、基準温度を0℃とする有効材齢で評価できること。また、若材齢クリープ性状への温度の影響は、载荷材齢に同じ有効材齢の考え方を適用すればよく、充分硬化したコンクリートのクリープ性状について指摘されているような温度が高くなることによるクリープ変形の割増しを必要としないことが明らかになった。

なお、弾性係数の発現開始時期は、文献5)、6)などを参考にして有効材齢0.3日と設定した。以後の検討に使用した弾性係数と有効材齢の関係は、Fig. 5に示す通りである。同じく単位応力あたりの(弾性+クリープ)歪み曲線は、試験データからFig. 6のように設定し、線形

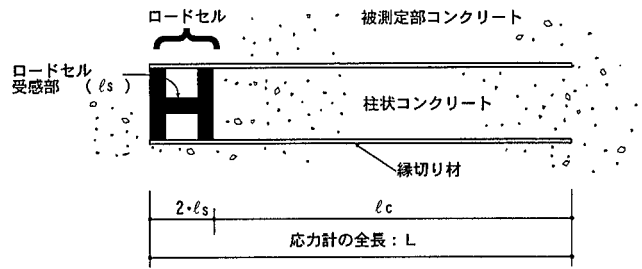


Fig. 7 有効応力計の基本機構
Basic Structure of the Stress Meter

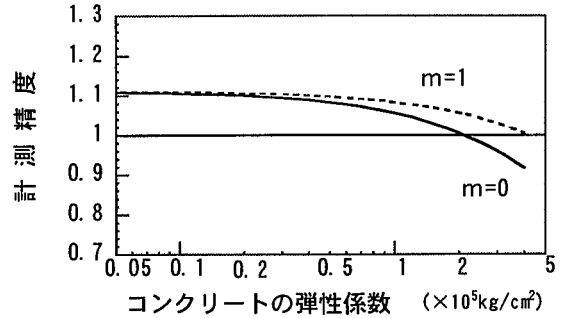


Fig. 8 一定持続荷重を受けた場合の有効応力計の計測精度
Relationship between Measurement Accuracy of the Stress Meter and Elastic Modulus of Concrete Subjected to Sustained Constant External Load

補完法を適用して任意の有効载荷材齢に対するクリープ歪を算定するのに用いた。

使用したコンクリートの線膨張係数は、実大基礎ブロックの施工時に別途供試体を探取して、充分硬化してから20~65℃間で2サイクルの加熱試験を実施して求めた。熱膨張係数として、 $9.11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ が得られた。マスコンクリートの硬化時の線膨張係数は、硬化の前後で大きく変化するという報告もあるが^{5)、7)}、今回の検討では、時間によらず一定であるとして取り扱った。

4. 有効応力計の計測精度⁸⁾

有効応力計は、マスコンクリートの温度応力の計測に盛んに用いられてきている。これは、硬化し始めるコンクリートの複雑な力学性状がわからなくても温度応力が計測できることが大きな特徴である。一般には応力を直接計測することは困難である。このため、有効応力計でも荷重変換器であるロードセルを用いて応力の換算を行っている。

有効応力計は、Fig. 7に示す機構で、ロードセルと被測定部コンクリートと同一時点に打込んだ柱状コンクリートを直列配置したものである。このロードセルと柱状コンクリートは、周囲の被測定コンクリートとは切り離されており、打設直後から時間とともに大きく変化する被測定部のコンクリートの弾性係数と有効応力計全体としての弾性係数とを常にできるだけ一致させることができるようになっている。

この有効応力計の計測精度について、力の釣合いと変形の適合条件をもとに基本的な検討を行った。Fig. 8は、

一定持続荷重を受けた場合の有効応力計の計測精度を算定したものである。実線の $m=0$ は、クリープ変形なしの場合で、破線の $m=1$ は、クリープ係数で1相当のクリープ変形を考慮した場合である。この図より、有効応力計の計測精度はコンクリートの弾性係数の大きさにより変化することがわかる。弾性係数が小さい場合は応力を大きめに評価し、逆に弾性係数が大きい場合には応力を小さめに評価する傾向がある。しかし、実用上は十分な精度を有していると考えられる。

実際の計測でどの程度の信頼性のあるデータが得られるかを確かめるため、実大基礎ブロックで温度応力の計測を行った。

5. 歪計の計測値からの温度応力の算定方法⁸⁾

有効応力計は、測定しようとするコンクリートの弾性係数の発現性状やクリープ性状などの力学性状がわからなくても、温度応力が計測できる長所がある。しかし、計測開始時点で計器が埋め込まれる周囲の部分と同じコンクリートを計器の中に入れる必要があるため、計測できる箇所が限定される。また、計器が高価であり計測点数が制限されるなどの短所がある。

一方、埋込み型の歪計は、有効応力計に比べて小型で安価なうえ、計器設置上の制約をほとんど受けないため現場計測には使いやすい。しかし、打設直後からのコンクリートの力学性状を適正に把握しないと温度応力を正しく評価することが難しいという短所を有している。

ここでは、3節で述べたコンクリートの力学性状を用いて、埋込み型歪計の計測値からどこまで精度よく温度応力が評価できるかを検討した。歪の計測値から温度応力を算定する上で、次の仮定が成り立つとした。

Fig. 9に示す時間区分重ね合わせ法を適用する。時間区分 $\Delta t_i (= t_i - t_{i-1})$ 内でコンクリート弾性係数 E_{ci} は一定であるとする。さらに、その間に発生する温度応力の増分 $\Delta \sigma_i$ は時間区分 Δt_i の中間時点でステップ関数状に作用するとする。また、その間の歪の増分時間区分 $\Delta \varepsilon_i$ ($\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$ 、 ε_i は歪計で計測された時間 t_i での歪。ただし、温度変化による膨張収縮歪は除く)は弾性歪の増分 $\Delta \varepsilon_{ei}$ とクリープ歪の増分 $\Delta \varepsilon_{ri}$ の和であるとする。 $\Delta \sigma_i$ と $\Delta \varepsilon_{ei}$ の間には、フックの法則が成り立ち、クリープ歪は応力に比例するとする。

以上から次式が成り立つ。

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1} = \Delta \varepsilon_{ei} + \Delta \varepsilon_{ri} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta \sigma_i = E_{ci} \cdot \Delta \varepsilon_{ei} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta \varepsilon_{ri} = \Delta \varepsilon_{ri/1} + \Delta \varepsilon_{ri/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta \varepsilon_{ri/1} = \sum_{n=1}^{i-1} \Delta \sigma_n \{ \phi(t_i - t_{on}, t'_{oi}) - \phi(t_{i-1} - t_{on}, t'_{on}) \} \quad \dots\dots (5)$$

$$\Delta \varepsilon_{ri/2} = \Delta \sigma_i \cdot \phi(t_i - t_{oi}, t'_{oi}) \quad \dots\dots (6)$$

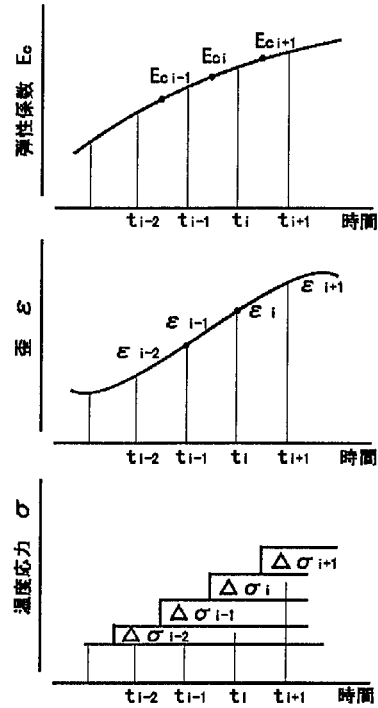


Fig. 9 温度応力算定のための時間区分重ね合わせ法
Time-interval and Superposed Method for Evaluating Thermal Stress of Concrete

$$t'_{oi} = t_{i-1} + \Delta t_i / 2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\phi(t_i - t_{oi}, t'_{oi})$ は、有効荷材材齢(t'_{oi})で載荷された応力によって($t_i - t_{oi}$)時間後に生じる単位応力あたりのクリープ歪である。

なお、有効材齢(t'_i)の算定には次式を用いるものとする。 T_i は時間 t_i でのコンクリート温度(°C)である。

$$t'_i = \sum_{n=1}^i \Delta t_n \cdot (T_n + T_{n-1}) / 20 \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上から、次式が求まる。

$$\Delta \sigma_i = E_{ci} \{ (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) - (\Delta \varepsilon_{ri/1} + \Delta \varepsilon_{ri/2}) \} \quad \dots\dots (9)$$

ただし、式(9)右辺中にも $\Delta \sigma_i$ が含まれることになるので、実際の数値計算では式(9)と式(6)との間で繰返し計算を行い所定の精度を満たす $\Delta \sigma_i$ を求めることになる。

なお、今回の検討での任意時刻 t_i での歪み ε_i は、温度変化による自由膨張歪みを補正し、さらに、無応力計で生じる歪みを補正したものをもとに検討した。

6. 温度応力の解析方法

有害な温度ひび割れの少ないマスコンクリート構造物を造るためには、施工計画段階で温度ひび割れの原因となる温度応力をできるだけ正確に予測する必要がある。

ここでは、実大基礎ブロックで有効応力計や埋込み型歪計での計測値と比較することにより、温度応力をどこまで解析的に予測することが可能かを検討した。

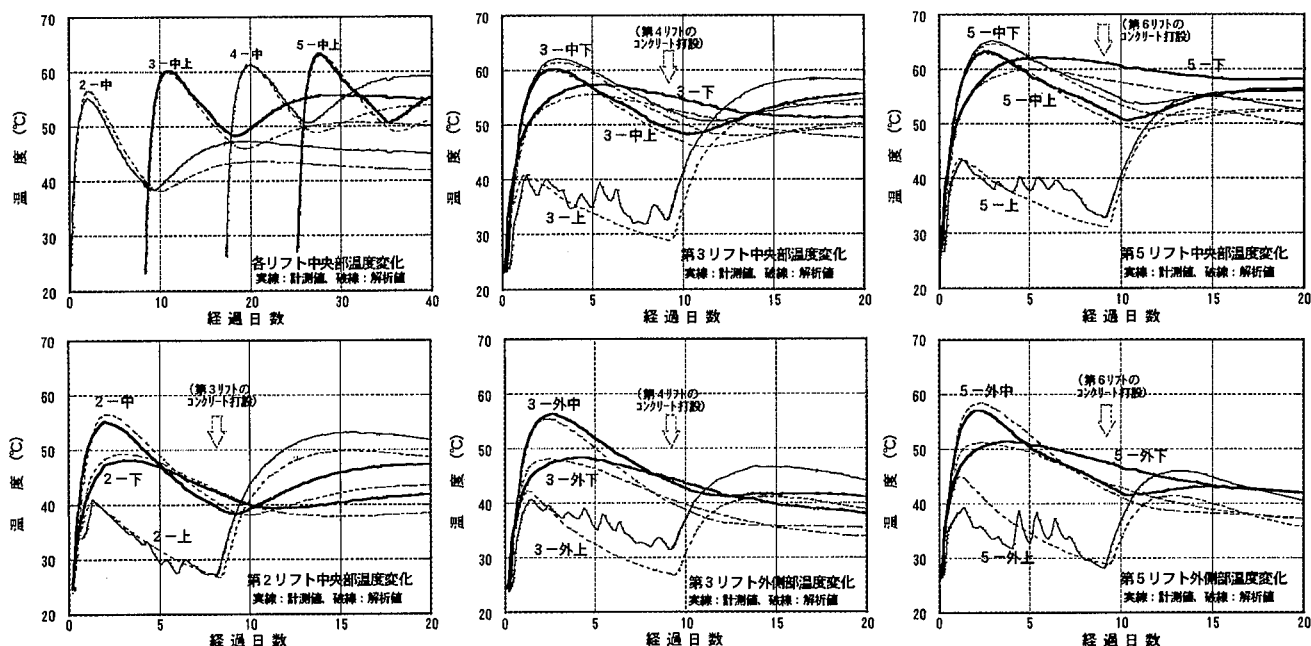


Fig. 12 温度計測結果と解析値の比較

Comparison between Measured and Analytical Results of Concrete Temperature

面ですべりや剥離は一切生じず、完全に一体化していると仮定している。

温度応力解析に使用した岩盤および既設コンクリートの弾性係数は、Table 2に示した通りである。今回の解析では、岩盤、レベルコンクリートおよび第1リフトのコンクリートは弾性体として取り扱った。

7. 計測結果と解析結果

まず、実大マスブロック内部のコンクリート温度の計測値と解析値を比較してFig. 12に示す。解析値は計測値をよく表している。しかし、コンクリート打ち込み後の時間が経過するにしたがって、その差が大きくなる傾向にある。温度応力を算定するには温度の計測値ではなく、解析値を入力データとして使用した。

有効応力計による温度応力の計測値を解析値と比較してFig. 13に示す。今回有効応力計で計測を行った合計14点のうち、1点だけ計測値が得られなかった。これらの結果は、第3リフトと第5リフトの2回にわたってブロック中央部と外側部の同一位置で計測を行ったものである。第3リフトと第5リフトの同一計測箇所での温度計測結果はほぼ同じ変化を示しており (Fig. 12参照)、温度応力の計測結果も両者はほぼ同じように変化している。特に、ブロック中央部での計測結果は、通常この種の計測でよく見られるように、リフト中部はコンクリート温度の上昇とともに圧縮応力が蓄積され、最高温度を経過後は温度が下がるに従い引張応力へ移行している。反対にリフト上部でははじめに引張応力が生じ、その後圧縮応力へと移行している。このような温度応力の変化の様子や計測された応力の大きさも、ほぼ妥当と判断され、しかも解析値ともよくあっている。これらのことから、若材齢のコンクリートの複雑な力学性状がわからな

くても、有効応力計を正しく設置すれば、信頼性が高い計測値が得られることが確認できた。

次に、有効応力計の計測を行った位置での埋込み型歪計の計測値から算定した温度応力と解析値を比較してFig. 14に示す。それぞれの計測値は、解析値とよく合っている上に、同一計測箇所の有効応力計の計測値とも非常によく合っている。なお、埋込み型歪計のみで計測した第2、第4リフトの中央部の温度応力を解析値と比較してFig. 15に示す。Fig. 14と同じように計測値から算定した温度応力と解析値はよく合っている。これらのことから、若材齢のコンクリートの弾性係数の発現性状やクリープ性状がわかっているならば、今回提示した算定方法を用いることにより、埋込み型歪計の計測値から、信頼性が高い温度応力を算定することが可能であることが確かめられた。

Fig. 13~15に示したように、温度応力の計測値と解析値とは全般によく合っており、コンクリートの若材齢時の力学性状を正しく反映すれば、今回の計測結果との比較では、打継ぎ面でのすべりや剥離を考慮しなくても、3次元有限要素法による温度応力の推定は実用的に十分な精度で可能であることが明らかになった。

なお、今回のブロックの施工では、打継ぎ面中央部にシアキーを設け、ブロック外表面近くには鉄筋を配置している。それらが打継ぎ面でのすべりや剥離を防止した可能性も考えられる。打継ぎ面でのすべりや剥離を考慮する必要性の有無については、今後、施工条件、特に打継ぎ面の処理方法が異なる場合の温度応力の計測データを蓄積した上で検討していきたい。

今回の計測と解析を通じて、層状に打ち重ねられるマスコンクリートに発生する温度応力について、以下のようなことが推察できる。打込み高さや打継ぎ間隔などの施工条件がほぼ同じであれば、それぞれの層で発生する

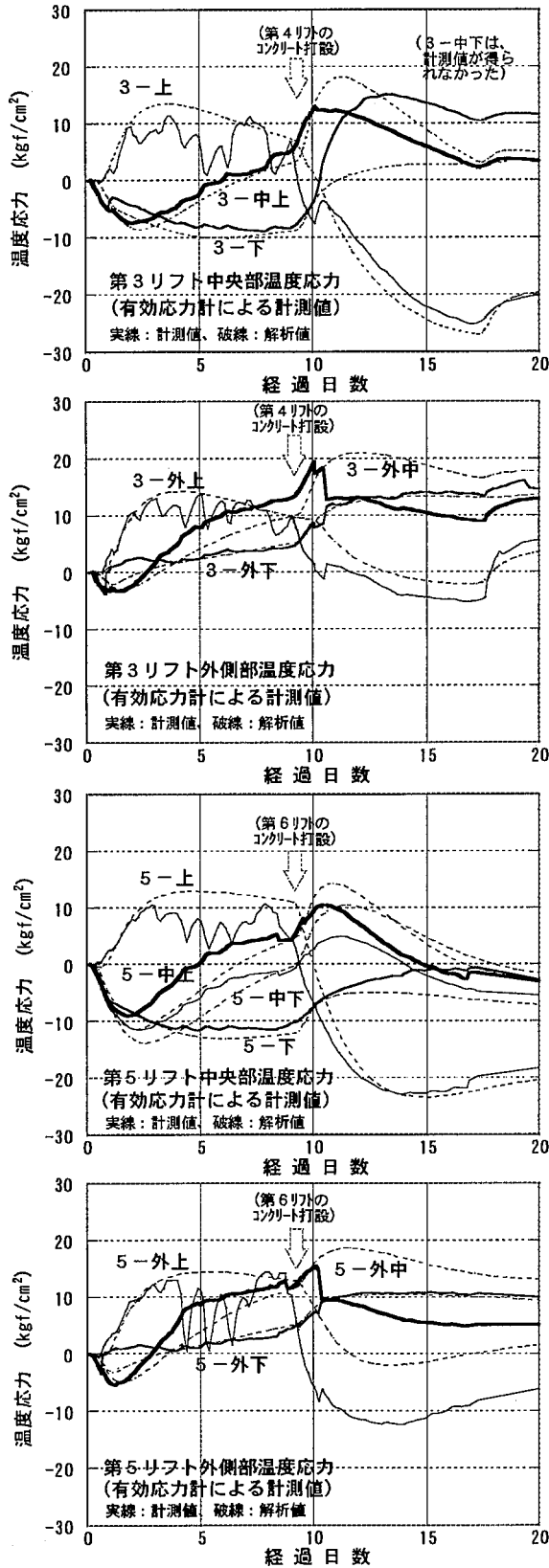


Fig. 13 有効応力計から求めた温度応力と解析値の比較
Comparison between Thermal Stress Obtained with the Stress Meters and Analytical Results

温度応力の発生パターンや応力の大きさは、層の上下位置が異なってもそれほど大きな違いは生じないようである。

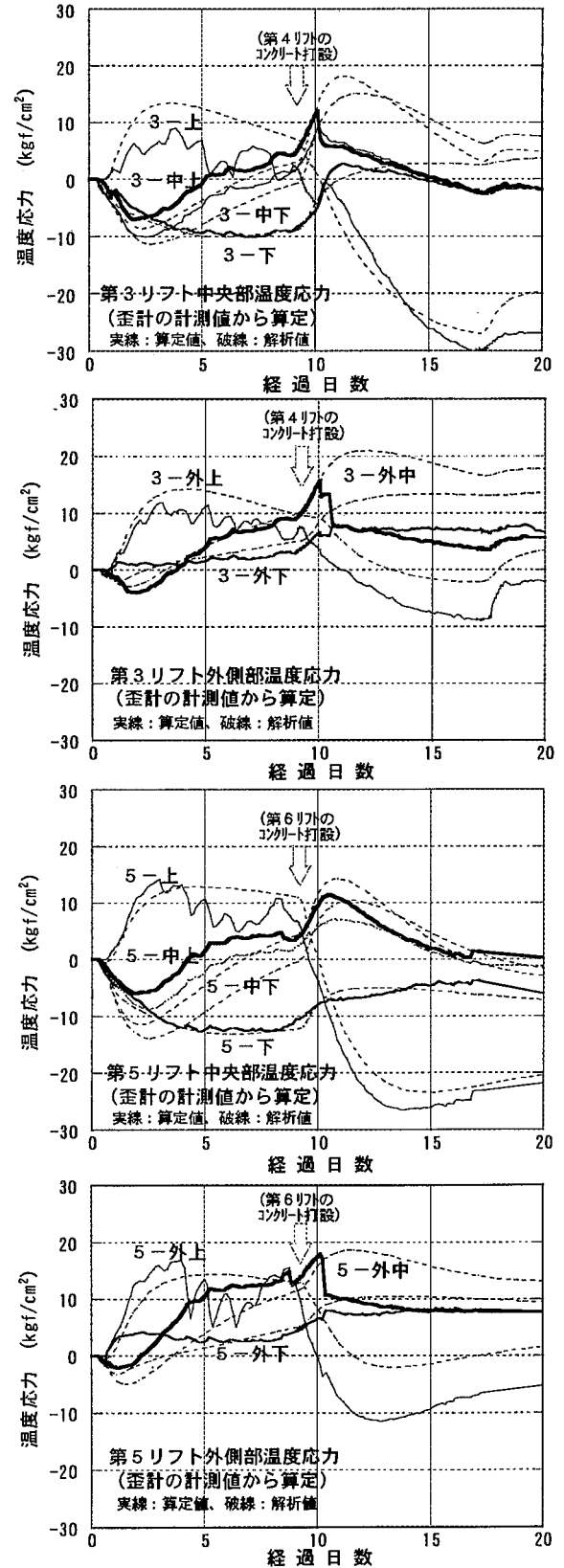


Fig. 14 歪計の計測値から求めた温度応力と解析値の比較
Comparison between Thermal Stress Obtained with Strain Gages and Analytical Results

また、ひび割れの発生につながり易い引張応力が最も大きくなるのは、すぐ上のリフトのコンクリートが打設されてから、1日半か2日経過した時点で、その層の高

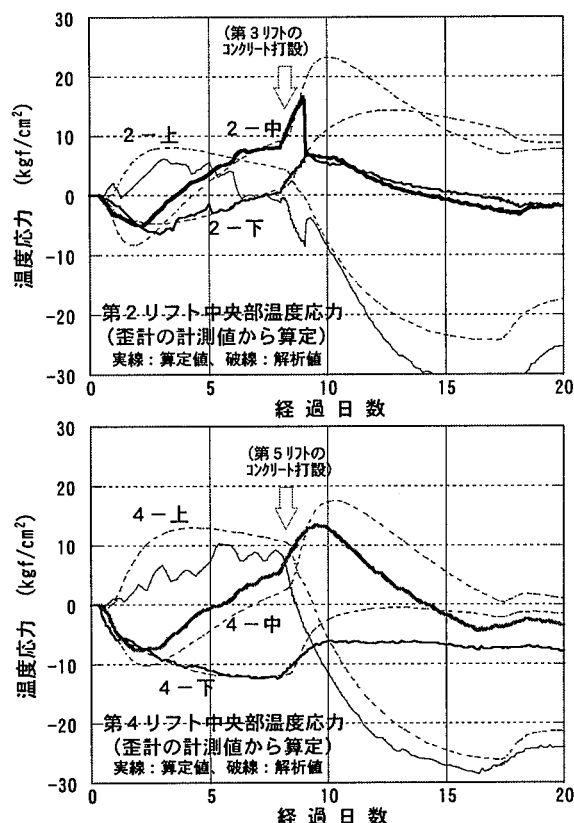


Fig. 15 歪計の計測値から求めた温度応力と解析値の比較
Comparison between Thermal Stress Obtained with Strain Gages and Analytical Results

さ中央部に生じやすいことが明らかになった。このことは、次の層のコンクリートをどういつ時期に、どういつリフト高さで打設するかが、すぐ下の層の温度ひび割れの発生しやすさに大きく影響すると推察される。

なお、Fig. 13～15に示す計測値の時間的変化で、上のリフトが打設された後に、急激な変化が生じているところは、温度応力によるひび割れがその時点で発生しているものと推察される。特に、第3、第5リフトの外側部の(外中)位置の計測では、有効応力計、埋込み型歪計のいずれも、不連続な変化を示している。この部分では解析による温度応力も引張応力が大きくなっており、ひび割れが発生し易い状況にある。ただし、今回の計測およびその後の目視観察からは、ひび割れ幅が0.2mmを越えるような有害な温度ひび割れは、確認できなかった。

8. まとめ

実大基礎ブロック施工中の温度応力の計測と、3次元有限要素法による温度応力の推定を行い、次のことが明らかになった。

- 1) 有効応力計は正しく設置すれば、若材齢時のコンクリートの力学性状がわからなくても、信頼性の高い温度応力の計測値が得られる。
- 2) 若材齢のコンクリートの弾性係数の発現性状やクリープ性状がわかっているならば、今回提示した算定方法を

用いることにより、埋込み型歪計の計測値からでも、信頼性が高い温度応力の推定が可能である。

3) 温度応力の計測値と解析値の比較から、今回提示した方法を組み込んだ3次元有限要素法による温度応力の推定は、実用的に十分な精度を有する。

このほか、層状に打ち重ねられるマスコンクリートに発生する温度応力について、今回の計測と解析を通じて得られた知見について考察を加えた。

今後は、各種のコンクリートについて若材齢時の力学性状に関するデータの蓄積に努めるとともに、解析による温度応力の推定精度の向上に努力したい。

謝 辞

今回の実大基礎ブロックの施工と温度応力の計測は、動力炉・核燃料開発事業団からの委託により実施したものである。貴重なデータの開示を許可いただいたことに心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：マスコンクリート技術の現状と動向，コンクリート技術シリーズ，No. 8，(1994. 10)
- 2) 土木学会：最新のマスコンクリート技術，コンクリート技術シリーズ，No. 14，(1996. 11)
- 3) 森永 繁：ひび割れ制御技術の現状—対策と効果—，コンクリート工学，Vol. 34，No. 8，p. 13～20，(1996. 8)
- 4) 川口 徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価に及ぼす材料特性の数値モデル化の影響，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，p. 29～32，(1985)
- 5) K. Schoppel, et al: The Effect of Thermal Deformation, Chemical Shrinkage and Swelling on Restraint Stresses in Concrete at Early Ages, p. 213～220, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, E & FN SPONS, (1994)
- 6) 太田達美ほか：ポルトランドセメントを使用したコンクリートの初期強度予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，p. 133～136，(1996. 9)
- 7) 竹下治之ほか：マスコンクリート物性の基礎的特性について，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論文集，日本コンクリート工学協会，p. 27～34，(1982. 9)
- 8) 川口 徹ほか：マスコンクリートの温度応力評価方法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 1，p. 1087～1092，(1992)
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，(1996. 3)
- 10) 気象庁：日本気候表その2，日本気象協会(1991. 8)
- 11) 石川雅美：マスコンクリートの温度応力問題における外部拘束に関する研究，法政大学学位論文，(1996. 3)