

# マスコンクリートの温度応力に関する解析的研究

川 口 徹

## Analytical Study on Thermal Stress in Massive Concrete Structures

Toru Kawaguchi

### Abstract

This paper shows that newly developed 3-dimensional finite element method applied superposition method for calculating stress and strain, is very effective for predicting thermal stress in massive concrete structures, compared with the measured results. In this method, elastic modulus development and creep behavior of concrete at early ages are considered as exactly as possible.

Using this analytical method, the effect of basic construction procedures for walls and foundation slabs as typical massive concrete structure, are investigated how much differences of thermal stresses caused cracking.

### 概 要

マスコンクリート構造物に生じる温度応力を解析的に推定する方法として、既往の計測結果との比較により、重ね合わせ法を適用した3次元有限要素法の有効性を明らかにした。

さらに、この解析方法を用いて代表的なマスコンクリートである壁状構造物とスラブ状構造物を対象に、基本的な施工条件の違いによって、発生する温度応力の大きさがどのように変わるかについて解析的な検討を行った。

### 1. はじめに

マスコンクリート構造物ではコンクリート打込み後のセメントの水和反応に伴う発熱により部材内部の温度が上昇する。硬化の進行とともに上昇した温度はある最高温度を履歴し、その後徐々に周囲の外気温まで下がる。このような温度変化に伴う部材断面内の温度差や部材全体の温度上昇・降下によって生ずる温度応力がある限界値を越えると温度ひび割れが発生すると説明されている<sup>1), 2)</sup>。有害な温度ひび割れは鉄筋コンクリート構造物の耐久性を損なうおそれがあるので、できるだけ低減する必要がある。

マスコンクリート構造物に発生する温度応力を解析的に予測する方法については、これまでも多くの研究が行われてきている<sup>2), 3)</sup>。しかし、実際の計測値と解析的な予測値の対応などの面では、必ずしも十分な成果が得られているという状況ではない。

筆者は、実大基礎ブロックに生じる温度応力の計測結果について、同じ使用材料・調合のコンクリートで行った弾性係数発現性状やクリープ性状に関する試験データ (Fig. 1, 2参照) を用いて重ね合わせ法を適用した3次元有限要素法による温度応力の推定を行い、計測結果との比較から実用上十分な精度で温度応力を解析的に予測が可能であることをすでに報告している<sup>4)</sup>。

本論文は、マスコンクリート構造物に生じる温度応力に関する既往の計測結果に対して、この重ね合わせ法を

適用した3次元有限要素法による解析的予測法の有効性を示すとともに、この解析法を用いて、代表的なマスコンクリートである壁状構造物とスラブ状構造物を対象に、基本的な施工条件 (たとえば、一回に打設する区画の大きさや打込み高さ、打継ぎ時間間隔など) の違いによって、発生する温度応力の大きさがどのように変わるかについて解析的な検討を行った結果について報告するものである。

### 2. 既往の計測結果と本解析方法による推定結果の比較検討

#### 2.1 既往の計測結果の概要

ここでは、実大構造物でマスコンクリートの温度応力の計測を行った既往の報告の中から実験条件、計測データが明確になっている代表的な一例を取り上げ、その計測結果と本解析方法による推定結果の比較を行った。

ここで取り上げた既往の実験結果<sup>2), 5)</sup>は、一連の温度ひび割れ制御実験のうち、シリーズ(2)のNo. 2供試体である。この供試体は、コンクリート基礎の上に打設された厚さ1.0m、高さ1.5m、長さ15.0mの壁状構造物である。有効応力計による温度応力の計測は、長さ方向中央から2mずれた位置のFig. 3に示す壁厚中心の高さ方向の上、中、下の3カ所で実施されたものである。コンクリートの使用材料、調合表は、Table 1の調合の種類：Bに示す通りである。なお、調合の種類：Aは、Fig. 1, 2の試験

合の解析を行った。

経過日数5.6日までの解析結果をFig. 17, 18に示す。これらの結果によると、打ち込まれた部材コンクリートの断面内部全域にわたる温度があまり高くないようにするためには、打継ぎ間隔を長くとったほうがよいことは予想される通りである。しかし、部材内部に発生する引張側の温度応力は打継ぎ間隔が長いほど大きくなる傾向にある。特に注意すべきことは打設した層のコンクリートの温度上昇により、すぐ下層で引張応力が急に大きくなり、温度ひび割れが発生しやすい状況が生じることである。

#### 4. まとめ

マスコンクリート構造物に生じる温度応力を解析的に推定する方法として、既往の計測結果との比較により、重ね合わせ法を適用した3次元有限要素法の有効性を明らかにした。

さらに、この解析方法を用いて代表的なマスコンクリートである壁状構造物とスラブ状構造物を対象に、基本的な施工条件の違いによって、発生する温度応力の大きさがどのように変わるかについて解析的な検討を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) 壁状構造物の場合、壁厚の違いや使用する型枠の種類により、部材内部の温度履歴は大きく異なるが、一回の打込む壁長さが20m程度になると、発生する引張側の温度応力は、いずれの場合もコンクリートの引張強度を越えるようになり、温度ひび割れが発生しやすくなる。
- 2) また、一回に打設する壁の長さが長くなるほど発生する引張側の温度応力が大きくなり、温度ひび割れが発生し易くなる。したがって、長い壁状の部材や構造物を打設する場合には、できれば、5m以下の間隔でひび割れ誘発目地を設けることが望ましい。
- 3) 基礎スラブ状構造物の場合、一回の打込み高さを小さくすると、部材内部の最高温度は、低く抑えることはできるが、発生する引張側の温度応力は必ずしも小さくならないので注意が必要である。
- 4) 厚さの大きい基礎スラブを何回かに分けて打設する場合には、打込み間隔が短い方が、発生する引張側の温度応力を小さく抑えることができ、温度ひび割れ対策上有効である。

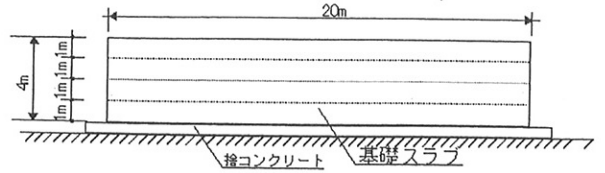


Fig. 16 打継ぎ間隔の影響検討用解析モデル Analytical Model for Placing Intervals

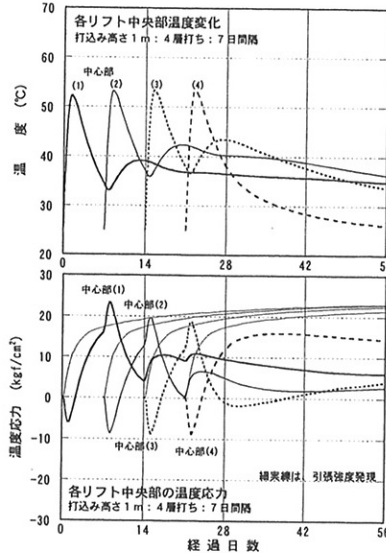


Fig. 17 打継ぎ間隔の影響についての解析結果 (打継ぎ間隔: 7日間) Analytical Results for Placing Intervals (in case of 7 days)

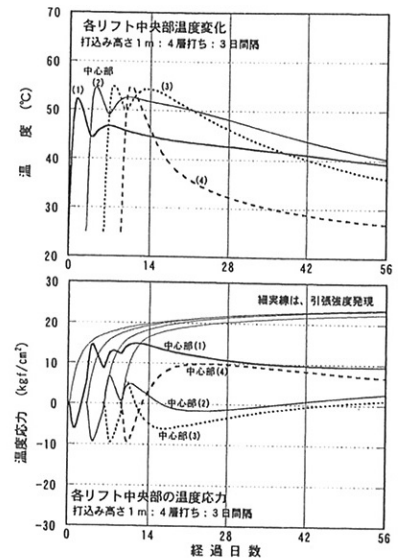


Fig. 18 打継ぎ間隔の影響についての解析結果 (打継ぎ間隔: 3日間) Analytical Results for Placing Intervals (in case of 3 days)

#### 参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, 1996
- 2) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひびわれ制御指針, 1986.3
- 3) ACI 207.2R-90: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete, 1990
- 4) 川口 徹: 実大マスブロックに生ずる温度応力の計測と解析, コンクリート工学論文集, Vol. 10, No.1, 133-142, 1999
- 5) 首都高速道路公団: マスコンクリートのひびわれ制御実験報告書, 1984.3
- 6) 川口 徹: 施工条件がマスコンクリートの温度応力に及ぼす影響に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第535号, 21-28, 2000.3
- 7) 川口, 他: 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, pp.29-32, 1985

に、また、スラブ中央の表面付近のコンクリート温度と温度応力の変化をFig. 15に示す。なお、ここでの表面付近とは、コンクリート表面から15cm内側に入った位置である。

これらによると、断面中心部のコンクリート温度は、通常予想される通り打込み高さが大きくなるにしたがい最高温度が高くなっており、外気温まで下がる時間も長くなってきている。断面中心部の温度応力は、コンクリート温度が上昇中は圧縮応力が蓄積されるが、温度の降下に伴い引張応力へ移行している。打込み高さが小さいほど若材齢時に引張側応力に移行している。

上表面付近のコンクリート温度は、打込み高さが違ってそれほど大きな変化はない。一方、上表面付近の温度応力は、断面中心部とは反対にコンクリート温度の上昇中に引張応力が蓄積され、温度降下に伴い圧縮側応力へ移行している。材齢初期に蓄積される引張応力は、打込み高さが2 mを越えると大きくなり、打込み高さ4 mの場合には20kgf/cm<sup>2</sup>もの引張応力が生じている。

発生する温度応力と予想されるコンクリートの引張強度発現とを比較すると、断面中心部の温度応力は打込み高さが低い0.75m, 1.00mの場合に引張強度を上回っており、温度ひび割れが発生しやすい状況にあることを示唆している。一方、上表面付近の温度応力は、打込み高さが大きい場合に引張強度を上回っている。今回の解析例では、打込み高さが1.5~2.0m程度の範囲であれば、発生する温度応力がコンクリートの引張強度を上回ることはなさそうである。

**3.3.2 打継ぎ間隔の違いによる影響** ある程度の高さのある基礎スラブを数回に分けて、打継ぎ間隔をあけて打設するような場合に、その打継ぎ間隔の長さによって発生する温度応力がどのように変化するかを解析的に検討した。

設定した解析モデルは、Fig. 16に示す高さ4m、長さ20m、奥行き20mの岩盤上に打設される基礎スラブ状構造物である。一回の打込み高さを1mとして、打継ぎ間隔を7日間とした場合と3日間とした場

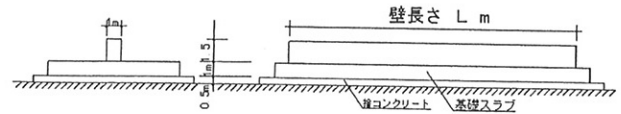


Fig. 10 打込み長さの影響検討用解析モデル Analytical Model for Placing Lengths

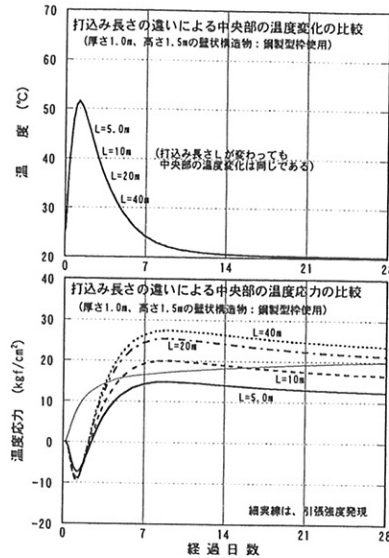


Fig. 11 打込み長さの影響についての解析結果 (鋼製型枠の場合) Analytical Results for Placing Lengths (in case of steel form)

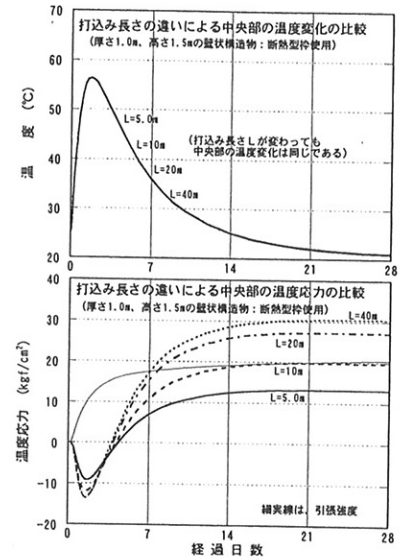


Fig. 12 打込み長さの影響についての解析結果 (断熱型枠の場合) Analytical Results for Placing Lengths (in case of insulation form)

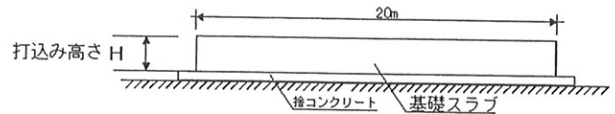


Fig. 13 打込み高さの影響検討用解析モデル Analytical Model for Placing Heights

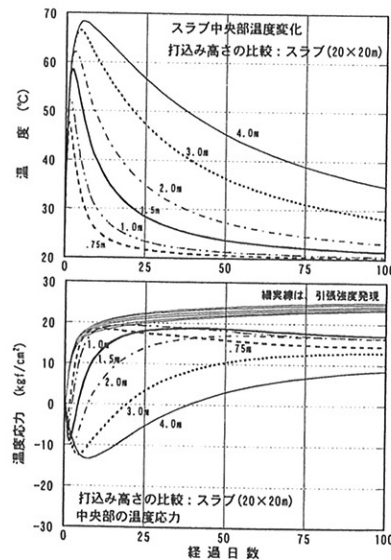


Fig. 14 打込み高さの影響についての解析結果 (断面中心部) Analytical Results for Placing Heights (middle of cross section)

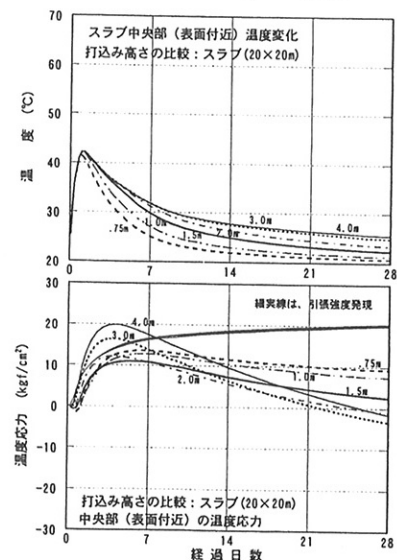


Fig. 15 打込み高さの影響についての解析結果 (上表面付近) Analytical Results for Placing Heights (upper surface of cross section)

リートの引張強度と等しいと考えてよいかどうかには議論の余地がある。このため、ここでは上式から求まる値の80%を評価用の引張強度とした。

断面中心部のコンクリート最高温度は、当然予想されるように壁厚が大きくなるにしたがい高くなる。壁厚の違いによる断面中心部の最高温度の差は、断熱型枠の場合より鋼製型枠の場合のほうが大きい。断面中心部の温度応力は、コンクリート温度の上昇中は圧縮応力が蓄積され、最高温度を経過した後、温度降下に伴い引張側応力へ移行している。このような基本的な応力変化のパターンは、壁厚の違い、型枠種類の違いにかかわらず、変わらない。

鋼製型枠を使用した場合には、型枠面などからの放熱が大きいため壁厚が小さいほど、部材最高温度は低く、かつ早い時期に外気温まで部材温度が下がる。そのため、発生する温度応力も早い時期に引張側へ移行し、最大引張側力に達する材齢は早い。壁厚が1.00mを越えると、最大引張側力はそれほど大きく増えない。

断熱型枠を使用した場合には、保温性が高いため鋼製型枠に比べ部材最高温度は高くなる。型枠の違いによる部材最高温度の差は、壁厚が小さいほど大きい。発生する最大引張側力は、壁厚の違いによる差はほとんどない。

発生する温度応力を予想したコンクリートの引張強度発現と比較すると、今回設定した解析条件では、いずれの場合も断面中心部で発生する温度応力は引張強度を上回っており、温度ひび割れが発生する可能性はかなり高いと推察される。

**3.2.2 打込み長さの違いによる影響** 次に、一回に打設する壁の長さを変えた場合に発生する温度応力がどのように変化するかを解析的に検討した。設定した解析モデルは、Fig.10に示す壁厚1m、高さ1.5mの壁状構造物である。

一回に打設する壁の長さLを5, 10, 20, 40mと変化させた時に断面中央部で発生する温度応力がどのように変化するかを解析的に検討した。ここでも、鋼製型枠と断熱型枠の2種類について検討した。

経過日数28日までの解析結果をFig.11, 12に示す。両図とも上段は長さ中央、断面中心の温度変化をプロットしたものである。当然、予想されるように打込み長さLが変化しても断面中心の温度変化は変わらない。下段には、長さ中央、断面中心の温度応力の変化をプロットした。断面温度が最高温度までの温度上昇中は圧縮応力が蓄積され、その後、温度降下に伴い引張側へ移行している。温度上昇中に蓄積される圧縮

応力の大きさは、打込み長さLが変わってもほとんど違いはない。一方、温度降下に伴い蓄積される引張側力の大きさは、打込み長さLによって大きな影響を受ける。発生する引張側力の温度応力は、打込み長さLが長くなるほど大きくなるのがわかる。予想されるコンクリートの引張強度発現とそれぞれの温度応力を比較すると、温度ひび割れをできるだけ防止するためには、一回に打ち込む長さをできるだけ短くするか、それとも、あらかじめ4~5mおきにひび割れ誘発目地を設けておく必要があることが理解できる。

**3.3 岩盤上に打設されるスラブ状構造物に関する検討**

**3.3.1 打込み高さの違いによる影響** ここでは、壁状構造物と並んで最も基本的なマスコンクリート構造物の1つである岩盤上に打設される基礎スラブ状構造物を取りあげた。解析モデルは、Fig.13に示す長さ20m、奥行き20mの基礎スラブである。一回に打設する打込み高さ(H)を変化させた時に発生する温度応力の大きさがどのように変化するかについて解析的に検討した。打込み高さとしては、0.75m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 3.0m, 4.0mの6種類を設定した。

解析結果をFig.14, 15に示す。Fig.14は経過日数100日まで、Fig.15は経過日数28日までの解析結果である。スラブ中央での断面中心部のコンクリート温度と温度応力が打込み高さによってどのように変化するかをFig.14

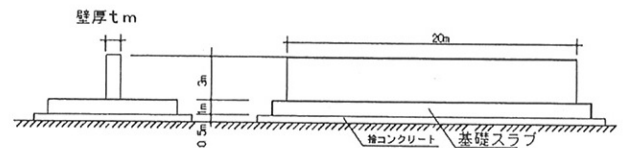


Fig.7 壁厚の影響検討用解析モデル Analytical Model for Thickness of Wall

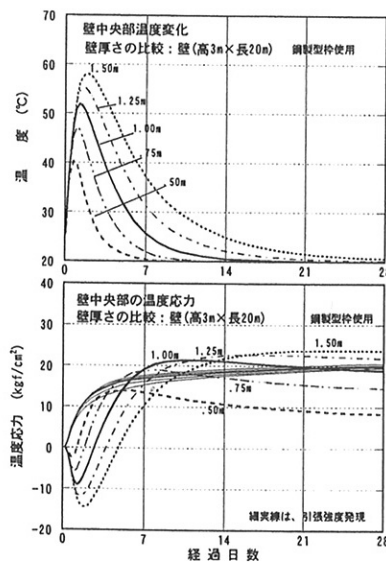


Fig.8 壁厚の影響についての解析結果 (鋼製型枠の場合) Analytical Results for Thickness of Wall (in case of steel form)

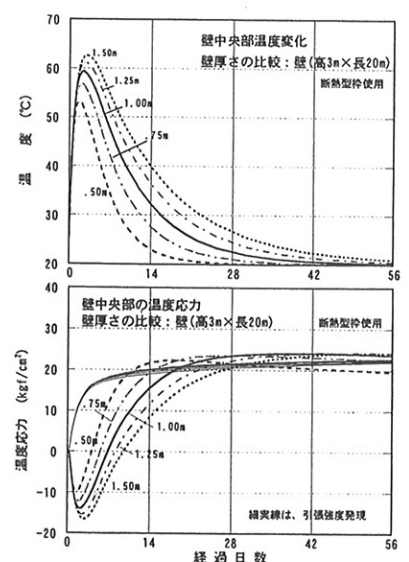


Fig.9 壁厚の影響についての解析結果 (断熱型枠の場合) Analytical Results for Thickness of Wall (in case of insulation form)

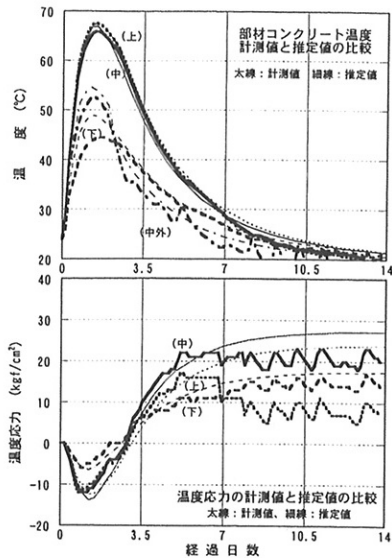


Fig. 6 計測結果と推定結果の比較  
Comparison between Measured and Analytical Results

Table 3 解析に用いた定数  
Material Properties used in Analysis

項目	単位	岩盤	捨コンクリート	コンクリート
比熱	(kcal/kg°C)	0.2	0.29	0.29
密度	(kg/m³)	2,000	2,320	2,320
熱伝導率	(kcal/mh°C)	1.5	1.2	1.8(1.2)
熱伝達率	(kcal/m²h°C)	15	15	15
打込み温度	(°C)	—	—	25
断熱温度上昇量	(°C)	—	—	(図 5-A)
外気温	(°C)	—	—	20(一定)
弾性係数	(×10⁹kgf/cm²)	0.06	2.00	(図 1)
ポアソン比	(°)	1/6	1/6	1/6
単位カブ曲線	(×10⁹kgf/cm²)	(考慮せず)	(考慮せず)	(図 2)
熱膨張係数	(×10⁻⁷°C)	10	9.11	9.11

### 3. 施工条件が温度応力に及ぼす影響に関する解析的検討

#### 3.1 解析上の設定条件

ここでは、代表的なマスコンクリートである壁状構造物とスラブ状構造物を対象に、基本的な施工条件（たとえば、一回に打設する区画の大きさや打込み高さ、打継ぎ時間間隔など）の違いによって、発生する温度応力の大きさがどのように変わるかについて解析的な検討を行った。これにより、温度ひび割れが発生する危険性をできるだけ少なくするためには、施工計画上で、どのようなことに注意すべきかを明らかにしようとするものである。

ここでの検討を行う上での基本的な条件を以下のように設定する。

- 1) コンクリートの使用材料・調合は、Table 1の調合の種類：Aとする。コンクリートの弾性係数の発現性状は、Fig. 1に示す通りとする。若材齢のクリープ性状は、Fig. 2に示す通りとする。
- 2) コンクリートの打込み温度は、25°C一定とする。コンクリートの断熱温度上昇曲線は、Fig. 5の曲線：Aに示す通りとする。外気温は、20°C一定とする。
- 3) コンクリートの熱特性値は、Table 3の通りとする。

また、岩盤、捨てコンクリートの力学特性値、熱特性値は、Table 3の通りとする。

4) 温度応力解析では、コンクリートの乾燥収縮歪や自己収縮歪はすべて無視した。

#### 3.2 基礎スラブ上に打設される壁状構造物に関する検討

3.2.1 壁厚の違いによる影響 最も基本的なマスコンクリート構造物として、Fig. 7に示すような基礎スラブ上に打設される高さ3m、長さ20mの壁状構造物を想定し、その壁厚を変化させた時に発生する温度応力の大きさがどのように変化するかについて解析的に検討した。

この壁状構造物は、岩盤上に厚さ50cmの捨てコンクリートと、さらにその上に厚さ1mの基礎スラブが打設されているものと想定した。解析では、基礎スラブ打設後1週間たってから解析対象とする壁体が打設されると仮定した。壁厚としては、0.50m、0.75m、1.00m、1.25m、1.50mの5種類を設定した。なお、壁体の型枠材料としては、ほとんど保温効果の期待できない鋼製型枠を想定した場合、保温効果を高めた断熱型枠を想定した場合の2条件を設定した。解析上、型枠の種類の影響は、温度分布解析での型枠面での熱伝達係数を変えて検討した。具体的には、鋼製型枠の場合、熱伝達係数を15kcal/m²hr°C、断熱型枠の場合、1.5kcal/m²hr°Cとした。コンクリート天端の熱伝達係数は15kcal/m²hr°Cとした。

壁厚の影響に関する解析結果を型枠の種類ごとにFig. 8, 9に示す。Fig. 8は経過日数28日まで、Fig. 9は経過日数56日までの解析結果である。どちらの図とも上段がコンクリート温度の変化で、下段が温度応力の変化である。これらは壁体の長さ方向中央でかつ壁厚方向中央位置での断面高さ方向の1/2位置での温度変化、応力変化をプロットしたものである。なお、発生する温度応力は、予想されるコンクリートの引張強度発現と対比して図示した。ここでのコンクリート引張強度の発現性状は、次のようにして求めたものである。まず、温度分布解析結果をもとに対象とする部材位置で有効材齢を算定する。次に、圧縮強度と有効材齢の関係式として次式<sup>1)</sup>を用い、それぞれの有効材齢に対応する圧縮強度を求めると。

$$\log(f_c) = \frac{\log(10 \cdot t_e / 3)}{0.1465 \cdot \log(10 \cdot t_e / 3) + 0.1503} \quad (1)$$

ここに、 $f_c$ ：圧縮強度 (kgf/cm²)

$t_e$ ：有効材齢(日) ( $t_e > 3$ )

圧縮強度と引張強度の関係式としては、これまでの実験データを参考に次式を仮定した。

$$f_t = 0.1 \cdot f_c \quad (f_c \leq 200 \text{ kgf/cm}^2) \quad (2)$$

$$f_t = 0.068 \cdot f_c + 6.4 \quad (f_c > 200 \text{ kgf/cm}^2) \quad (3)$$

ここに、 $f_t$ ：引張強度 (kgf/cm²)

温度ひび割れ発生時の温度応力をその時点でのコンク

データを求めたコンクリートの使用材料、  
 調査である。

コンクリート打込み後、14日間にわたって温度および温度応力の計測が行われている。打込み時のコンクリート温度は、24℃であった。供試体の側面は、木製型枠が使用されており材齢2日で脱型されている。なお、供試体の上面は、打込み直後から計測終了まで断熱材が配置されていた。

この壁状供試体の温度履歴および応力履歴の計測結果は、Fig. 6の太線で示す通りである。供試体内部の最高温度は68.2℃であった。目視観察では、打設7日後に最初のひび割れが認められたと報告されている。

2.2 解析条件の設定

以上の計測結果に対して、3次元有限要素法を用いた解析方法による温度応力の推定を試みた。使用した解析モデルは、対称性を考慮してFig. 4に示す通りである。

まず、温度応力解析の入力データとして必要になる供試体の温度履歴を解析的に求めた。コンクリートの断熱温度上昇曲線は、試験結果をもとにFig. 5の曲線：Bのように設定した。その他の解析に使用した熱定数は、Table 2に示す通りである。なお、供試体上面は断熱境界として取り扱った。

温度履歴の解析による推定結果は、Fig. 6の上段の細線で示す通りである。温度の推定結果は計測結果とよく一致している。

次に、この温度履歴の推定結果を入力データとして温度応力の推定を試みた。解析による温度応力の推定を行う場合に必要となる使用するコンクリートの初期材齢からの弾性係数の発現性状と若材齢のクリープ性状の取り扱いに関する詳細については文献(6)を参照されたい。温度応力解析に用いたその他の材料特性値は、Table 2の通りである。

2.3 計測結果と推定結果の比較

温度応力解析による推定結果は、Fig. 6の下段の細線で示す通りである。コンクリート打込み直後から材齢5日までの間の計測結果と推定結果は非常によく合っている。しかし、材齢5日以降に計測結果と推定結果の差が大きくなっている。この原因としては、実際の供試体では温度ひび割れが発生している（目視観察では材齢7日）のに対して、今回の応力解析では温度ひび割れを考慮していないためであると考えられる。

以上に示したように既往の計測結果との比較においても、この解析方法によって、温度ひび割れが発生する以前にマスコンクリート構造物に発生する温度応力を、実用的に十分な精度で解析的に推定できることを明らかにすることができた。

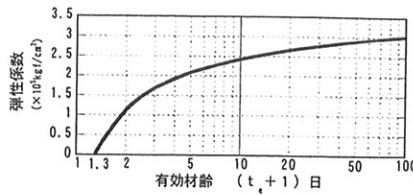


Fig. 1 コンクリートの弾性係数  
 発現性状  
 Development of Elastic Modulus

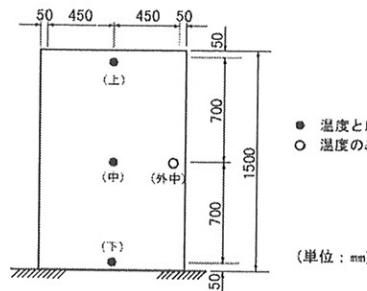


Fig. 3 供試体内部の温度および  
 応力の計測位置  
 Measured Points of Temperature  
 and Stress

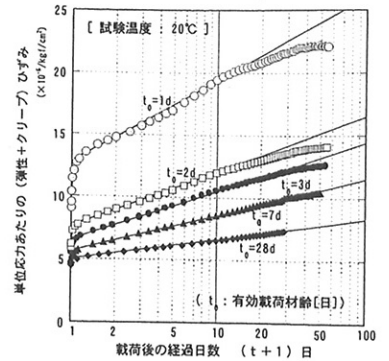


Fig. 2 コンクリートの若材齢  
 クリープ性状  
 Creep Behavior of Concrete

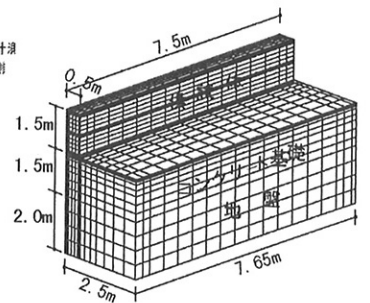


Fig. 4 3次元FEM解析用要素分割  
 Analyzed Model Used in 3-D FEM

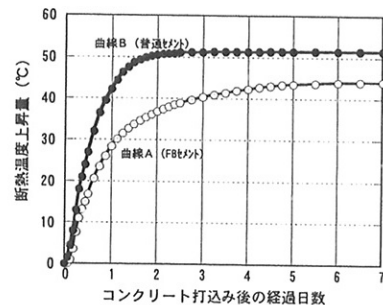


Fig. 5 コンクリートの断熱温度上昇曲線  
 Adiabatic Temperature Curves

Table 1 コンクリートの使用材料と調査表  
 Materials and Mix Proportions of Concrete

調査の種類	使用材料			調査 (1m <sup>3</sup> 当たり)						
	セメント	細骨材	粗骨材	W/C (%)	S/A (%)	セメント (kg)	水 (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (kg)
A	7717722B	砕砂 + 陸砂	炭質砂岩 砕石	55	43	298	164	780	1042	0.745
B	普通	陸砂	砕石	42	40.9	380	160	717	1073	0.760

Table 2 解析に用いた材料定数  
 Material Properties used in Analysis

	地盤	コンクリート基礎	供試体
比熱 (kcal/kg°C)	0.200	0.290	0.290
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2000	2320	2320
熱伝導率 (kcal/mh°C)	1.5	1.2	1.8 (1.2)
熱伝達率 (kcal/m <sup>2</sup> h°C)	—	15.0	4.0 (脱型後 8.0)
打込み温度 (°C)	—	—	24.0
初期温度 (°C)	20.0	20.0	—
外気温 (°C)	—	20.0 (一定)	20.0 (一定)
弾性係数 (×10 <sup>10</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	0.06	2.84	—
ポアソン比 (-)	1/6	1/6	1/6
熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	10.0	7.75	7.75