

マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討

Evaluation of effective young's modulus used to presume thermal stress of mass concrete.

江渡正満, 丸山久一, 野添秀昭

Masamichi Eto*, Kyuichi Maruyama**, Hideaki Nozoe***

* 工修, 清水建設株式会社 土木本部技術第一部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1の2の3)

** 工博, 長岡技術科学大学教授, 工学部環境建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603の1)

*** 清水建設株式会社 九州支店土木部 (〒810-8607 福岡県福岡市中央区赤坂1の1の29)

In the mass concrete structure, the crack by the thermal stress occurs. It is necessary to presume the thermal stress to prevent the crack. In general, the thermal stress is presumed by the finite element method. The factor which greatly influences the calculation of the thermal stress of mass concrete is Young's modulus and a creep value. In general, effective Young's modulus is used as a method of evaluating these. On the other hand, a concrete thermal stress changes at time. The research on the evaluation of effective Young's modulus in such a state is a little. Therefore, it is necessary to obtain more data of effective Young's modulus. This report is an examination of the method of evaluating effective Young's modulus based on the thermal stress observation result in the prestressed concrete bridge.

Key Words. mass concrete, thermal stress, effective young's modulus, prestressed concrete

1. はじめに

コンクリートの硬化過程において発生する温度応力によるひび割れは、鉄筋の腐食や、止水性の阻害をもたらすなど、構造物に要求される機能を損なう要因となる。そのため近年はコンクリート構造物の設計あるいは施工を通じてコンクリートのひび割れ制御、特にマスコンクリートのひび割れ制御対策が施される。

温度ひび割れの制御対策を検討する場合は、構造物の施工条件を考慮した精度の高い温度応力の推定が必要となり、そのために形状や境界条件、打設条件などが詳細に考慮できる有限要素法が用いられる。有限要素法による温度応力を計算する場合、計算結果に特に大きく影響する要因としては、境界条件の他に温度解析においては、断熱温度上昇に関する定数（断熱温度上昇量やその発熱速度に関する定数）、熱伝達係数などがある。また応力計算においては、線膨張係数、ヤング係数、クリープ特性値などがある。温度応力を解析により求める場合は、一般にコンクリートを弾性体と仮定した有効ヤング係数によりクリープ現象を評価する方法が用いられるが、マスコンクリートでは温度変化にともない応力変化が時系列で発生しており、それに対応したクリープ現象の評価、とくに引張時のクリープを考慮した有効ヤング係数の評価が重要になると考えられる。このことから、コンクリート標準示方書・施工編¹⁾(以下RC示方書)やマスコンクリート

の温度ひび割れ制御指針²⁾(以下マスコン指針)では温度降下時のクリープによる静ヤング係数の補正係数を小さく設定している。一方、マスコンクリートの温度応力算定を前提にした有効ヤング係数の実験的評価については青景³⁾ 野村⁴⁾ 平本⁵⁾の報告などがあり、平本らは、室内での実験結果をもとにした検討においてRC示方書での静ヤング係数の補正係数の見直しの必要性を指摘している。また、入矢⁹⁾は硬化過程で生じる圧縮応力増加過程、圧縮応力減少過程、引張応力増加過程それぞれでのクリープ評価が重要としている。

以上のように、有効ヤング係数を用いた温度応力解析がRC示方書などにおいて広く認知されているにもかかわらず、解析精度を左右する有効ヤング係数については、実測値に基づいたデータの積み重ねが不足していると考えられる。

本論文は、以上の観点から温度応力が顕著に発生する早強セメントを用いたプレストレストコンクリート橋の上部工の柱頭部マスコンクリートにおける実測結果をもとに、解析精度の向上を念頭に置き、有効ヤング係数の評価に関し考察を加えたものである。

2. 解析構造物の概要

2.1 構造物の形状と計測位置

構造物の寸法および計器設置位置を、図-2.1に示す。

計器の仕様などを表-2.1に示す。本構造物は、既設橋脚上にコンクリートブロック仮査および本設査によって支持されている。マスコンクリート部の寸法は、奥行き約17m、高さ5.1m、幅3.8mであり、打設は冬季に3週間間隔で2リフトに分けておこなわれた。埋設した計器は、温度計、ひずみ計、無応力計および有効応力計である。なお、計測期間中は、張り出し架設などの外力は作用しない。

ひずみ計はその設置した部分の全ひずみが計測され、無応力計はひずみ計を周囲から隔絶するための絶縁容器で覆うことによって、計測対象位置の温度、湿度が同条件のもとでの拘束のない自由収縮ひずみが計測される。また、温度計測と対応することによって線膨張係数が計測される。有効応力計は計測対象のコンクリートを検出器本体に充填し、変換器の一部として機能させることにより、みかけのヤング係数をコンクリートのヤング係数と常に一致させることによって、生じている応力が直接計測される¹⁴⁾。

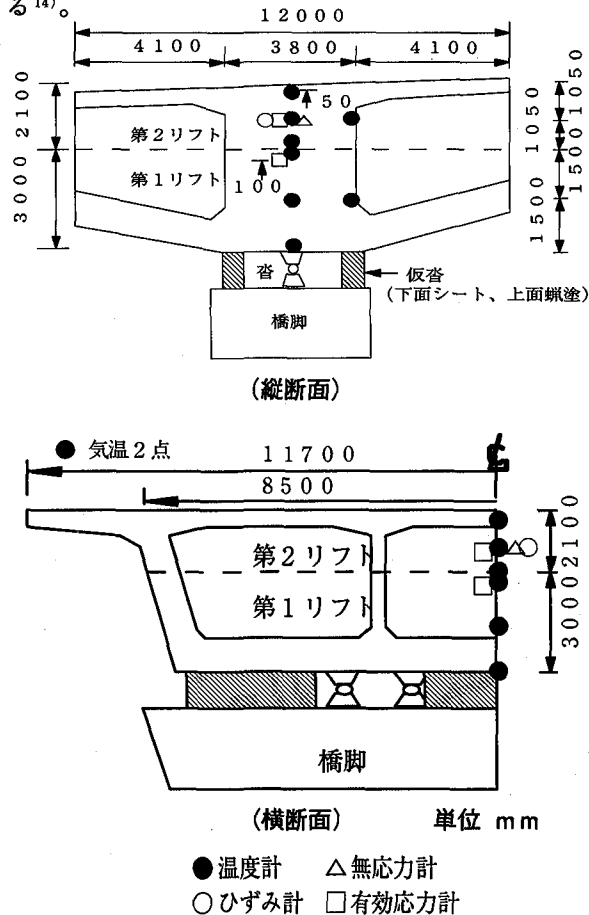


図-2.1 構造物の寸法と計器設置位置

表-2.1 計器の仕様

計器の種類	製造会社	型番	個数
温度計	東京測器	C-C	8
ひずみ計	東京測器	KM-100B	1
有効応力計	東横エルメス	GK-100-505	2
無応力計	東京測器	KMF-51	1

第1リフトにはコンクリート表層に、第2リフトにはコンクリート内部に計器を設置した。この理由は、各リフトに発生する温度応力は第1リフトでは内部拘束、第2リフトでは外部拘束が卓越すると考え、それぞれ引張応力が発生する位置を選んだためである。

有効応力計の測定結果すなわち温度応力 σ および(1)式で示される拘束ひずみ ϵ は、弾性変形、クリープ変形、塑性変形および自己収縮の影響が含まれていると考えられる。しかし自己収縮ひずみについては不明な点があるため、ここでは考慮しないこととする。

$$\epsilon = \epsilon_m - \epsilon_0 \quad (1)$$

ϵ_m : ひずみ計測定結果 (実ひずみ)

ϵ_0 : 無応力計測定結果

なお、本構造物ではひび割れの発生は認められていない。

2.2 材料特性

表-2.2、図-2.2にコンクリートの配合および強度発現性状をしめす。使用したセメントは早強ポルトランドセメントで、設計基準強度 (設計材齢28日) は40 N/mm²である。コンクリートの強度試験結果より、積算温度M (°C・時間) との関係性を求めた結果を以下に示す。

$$F'c = 16.8 \log_{10} M - 18.5 \quad (M < 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{時間})$$

$$F'c = 35.1 \log_{10} M - 68.9 \quad (M > 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{時間}) \quad (2)$$

単位 N/mm²

表-2.2 コンクリートの配合

G _{max} mm	スラグ cm	W/C %	air %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad
20	12	38	4.5	44.6	160	421	804	1008	3.15

Ad. 高性能A E減水剤

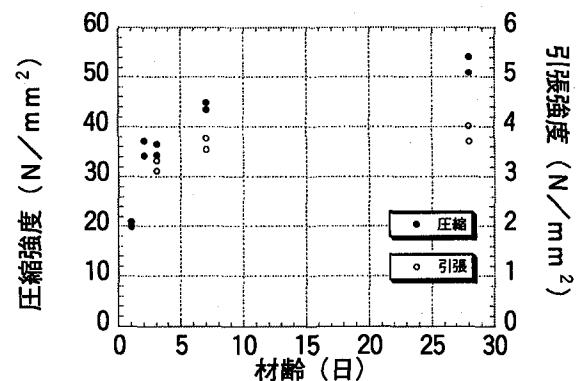


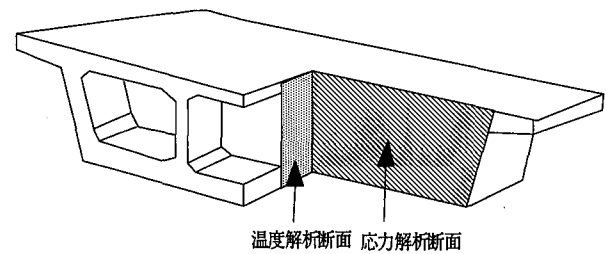
図-2.2 強度発現性状

3. 検討方針

本検討では、以下の手順で有効ヤング係数に関する考察を行った。

① 図-3.1に示す断面について2次元有限要素法により温度解析 (非定常熱伝導解析) をおこない実測値を再現する。

②温度解析結果をもとに温度解析断面に直交する断面について2次元平面応力場での温度応力解析を実施する。応力解析では、温度解析断面中央（躯体中央）における高さ方向の温度分布を、端部を含め応力解析断面の水平方向各部に均一に与える。



図－3． 1 解析断面

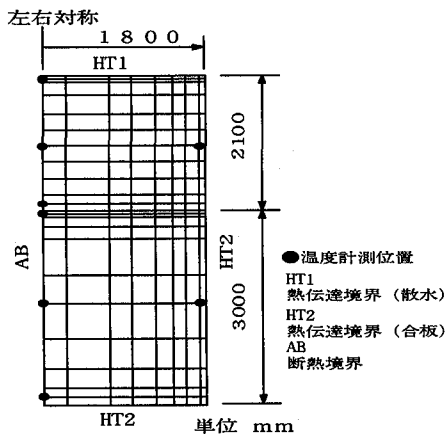
解析に際しては各種の有効ヤング係数（実測に基づいた値やこれまでの提案法）を用いた各時間ステップに関する増分法による解析を行い、実測と比較することで有効ヤング係数に関する評価を行う。なお、構造物の形状を考えると3次元解析が妥当であるが、本論で主に議論の対象とした第2リフトでは、計測結果に影響すると考えられる上床版部分は、マスコンクリート部分の20％程度であること、また温度変化が検討期間に比べて比較的初期（数日）に終了していることなどから、本論では2次元解析とした。

4. 計測結果を考慮した温度解析

4. 1 解析モデルおよび境界条件

図－4． 1 に温度解析に使用した解析モデルおよび境界条件を示す。

表－4． 1 に解析に使用した定数を示す。



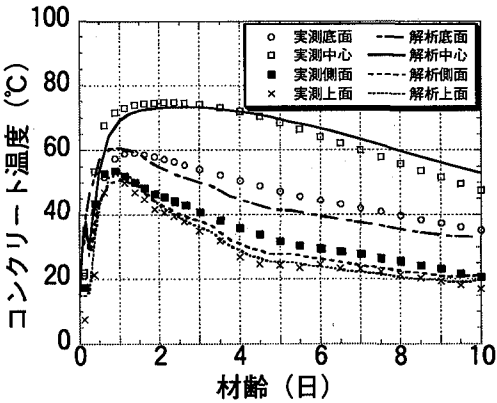
図－4． 1 解析モデルと境界条件

表－4． 1 解析に使用した定数

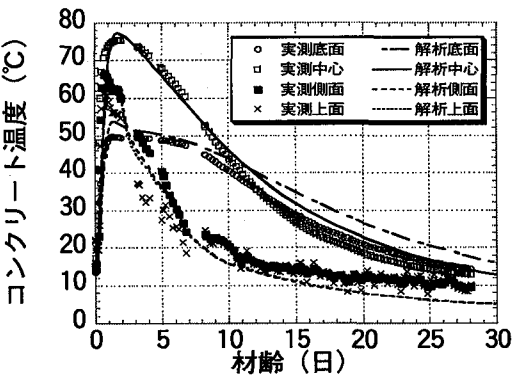
種 類	単 位	数 値
打込み温度	℃	13～15℃
断熱温度上昇 曲線式 $Q(t)$	℃	1リフト $Q(t)=60(1-\exp(-3.5t))$ 2リフト $Q(t)=65(1-\exp(-2.0t^2))$
熱伝導率	W/m℃	2.56
熱容量	KJ/m ³ ℃	2888
熱伝達率	W/m ² ℃	散水面 9.3 合板面 側面 5.8 下面 3.0
外気温度	℃	実測に対し±5℃内で変化

4. 2 解析結果

図－4． 2、4． 3に第1、2リフトの温度解析結果を実測値と比較して示す。解析値は実測値をほぼ再現している。解析による実測の再現は、熱伝導率、比熱を固定し、断熱温度上昇に関する特性値、熱伝達係数、外気温度を種々変化させて行った。また、第2リフトの内部温度については、実測温度が温度ピーク後に2～3日間緩慢な温度降下を示す状態や、材齢5～6日ごろからの温度低下速度の変化が生じている状況が完全に再現できていないが、内部温度の最大値や最終安定温度がほぼ実測と一致していることから、得られた温度解析結果を用いて応力解析に移行した。



図－4． 2 温度解析結果（第1リフト）

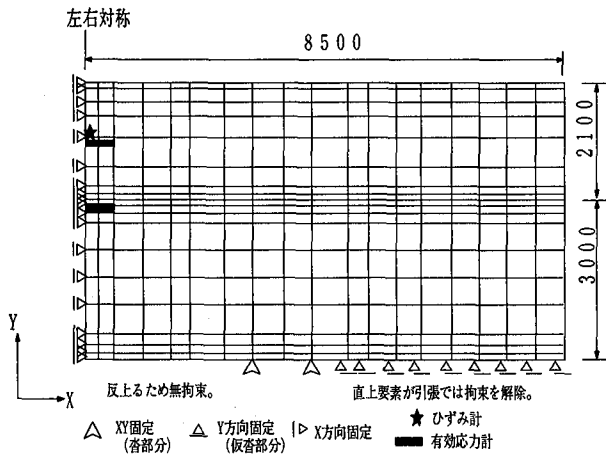


図－4． 3 温度解析結果（第2リフト）

5. 計測結果を考慮した応力解析

5. 1 解析モデルと境界条件

図－5． 1 に応力解析に使用した解析モデルを示す。解析では自重を含め外力は考慮しない。本構造物を支持している仮設のコンクリート柵は、下面はシートが敷かれ、また上面は鐵が塗られており、解析対象の新設コンクリートとは縁が切られた構造になっている。使用した解析プログラムではこのような打ち継ぎ部の評価はできないことから、柵部分を鉛直方向固定境界にしたモデルで事前解析をおこない、固定境直上の要素の鉛直方向応力が引張に転じた時点で、固定境界を取り外した。表－5． 1 に解析に使用した定数を示す。コンクリートの線膨張係数は、無応力計の測定結果から得られた $9.2 \times 10^{-6} \text{ 1/℃}$ を使用した。



図－５．１ 応力解析モデルと境界条件

表－５．１ 解析定数一覧

種 類	数 値
ヤング係数	表－５．２ 参照
ポアソン比	0.2
線膨張係数 $1/^\circ\text{C}$	9.2×10^{-6}

５．２ 有効ヤング係数の評価

表－５．２に解析に使用した有効ヤング係数の種類を示す。タイプ１では、青景らの研究³⁾を参考にして、拘束ひずみおよび温度応力の実測結果より有効ヤング係数を評価した。以下に手順をしめす。

①実測値にふくまれる測定誤差・ノイズの影響を軽減するため、材齢－実測値の関係を、多項式の最小二乗法で回帰したカーブを測定結果の代用値とする。

②拘束ひずみと温度応力の関係から、温度下降域の直線関係部分より有効ヤング係数を以下のように求める。

$$E_{\text{eff}} = \Delta \sigma / \Delta \epsilon \quad (3)$$

(Δ は温度降下時の直線関係にある区間を対象)

材齢 t を通じた有効ヤング係数 E_{eff} を以下のように設定する。

$$E_{\text{eff}}(t) = 0 \sim E_{\text{eff}} 1 \quad (\text{直線変化})$$

$$0 < t < \text{温度ピーク材齢}$$

$$E_{\text{eff}}(t) = E_{\text{eff}} 1 \quad (\text{一定値}) \quad (4)$$

$$\text{温度ピーク材齢} < t$$

さらにタイプ２として本報告では、上記の考え方を拡張し各材齢に対して $E_{\text{eff}}(t)$ を以下のように定義して用いた場合についても考察した。

$$E_{\text{eff}}(t) = \Delta \sigma(t) / \Delta \epsilon(t) \quad (5)$$

タイプ３、４はそれぞれＲＣ示方書およびマスコン指針で示された有効ヤング係数を用いた。

タイプ５は、以下のように平本らが提案している静ヤング係数の補正係数⁵⁾ $\Phi(t)$ を用いた。

$$\Phi(t) = 0.45 \quad 1 \leq t \leq 3$$

$$\Phi(t) = 0.48 \quad 3 \leq t \leq 5$$

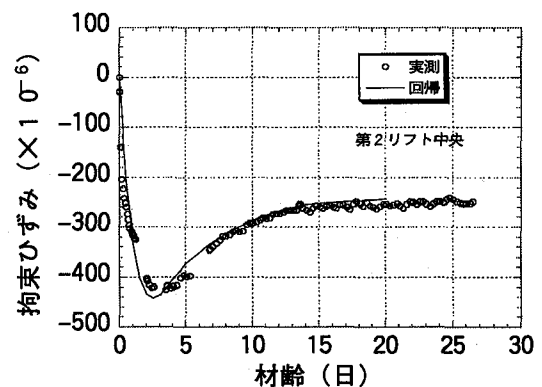
$$\Phi(t) = 0.53 \quad 5 \leq t$$

表－５．２ 有効ヤング係数の種類

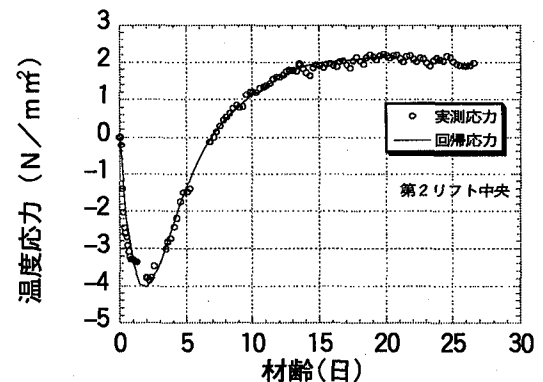
タイプ	内 容
１	実測より青景の方法で設定
２	実測より各解析ステップで設定
３	マスコン指針で設定
４	ＲＣ示方書で設定
５	平本らの方法で設定

５．３ 拘束ひずみおよび温度応力計測結果の考察

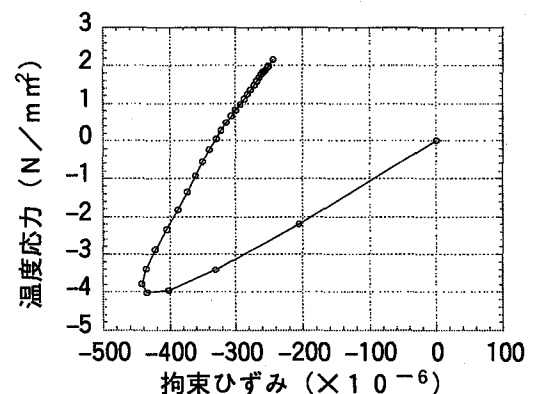
図－５．２、５．３に第２リフト中央部の拘束ひずみと温度応力の多項式回帰分析結果をしめす。図－５．４に多項回帰で得られた温度応力と拘束ひずみの関係を示す。



図－５．２ 拘束ひずみの実測と回帰



図－５．３ 温度応力の実測と回帰



図－５．４ 拘束ひずみと温度応力の関係

この結果を用い(5)式により計算した有効ヤング係数 $E_{eff}(t)$ を静ヤング係数 E の推定結果とともに図-5.5に示す。なお、静ヤング係数 E は、(2)式で求めた圧縮強度 f'_c より、以下の関係式により求めた。⁶⁾

$$E = 0.25 \times 10^5 \times f'_c{}^{0.41939} \quad (6)$$

有効ヤング係数は、材齢2～3日の温度ピーク時に不連続を示し、その後材齢7日まではほぼ静ヤング係数と同程度の値となっている。その後は静ヤング係数を下回る傾向が認められる。

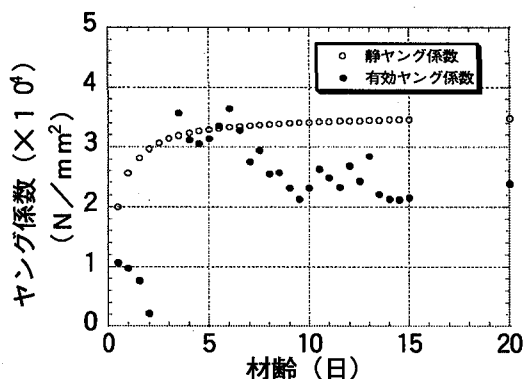


図-5.5 静ヤング係数と有効ヤング係数

図-5.6は、第2リフトに関し、温度応力が圧縮領域を示す期間での、圧縮強度と温度応力(実測データ)およびその比率の経時変化である。これより、強度データの無い材齢1日以前は不明であるが、その後の硬化過程を通じて温度応力は圧縮強度の20%以下であり、計測された拘束ひずみは弾性変形およびクリープ変形が起因し塑性ひずみは無視できると考えられる。

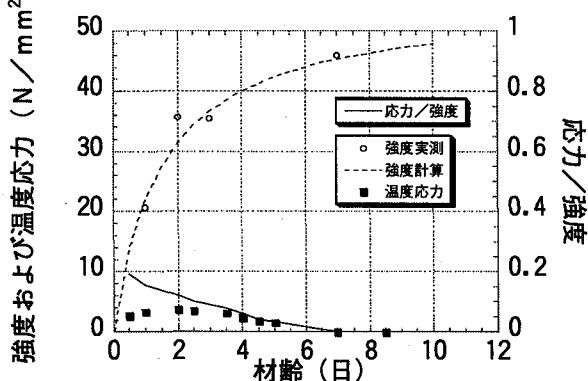


図-5.6 圧縮応力と圧縮強度の比率

図-5.7は、静ヤング係数のクリープによる補正係数 ϕ の経時変化である。

$$\phi = E_{eff}/E \quad (7)$$

ここで E_{eff} はタイプ2により実測値から、また E は(6)式で求めた値である。

ϕ は温度ピークや応力の反転が生じる材齢2～3日付近では不連続となり、また多項式回帰曲線の精度に起因するバラツキが生じているが、圧縮応力が生じる温度上昇時の補正係数は、引張応力に転じる温度下降時にくらべ

て小さく、圧縮応力下でのクリープは引張応力下での値に比べて大きいとするこれまでの報告⁷⁾⁸⁾と一致する現象が認められる。また、圧縮応力減少過程(材齢3日～材齢7日)での補正係数は引張応力下での値よりも小さく、これも室内試験で得られた傾向⁹⁾と一致する現象である。

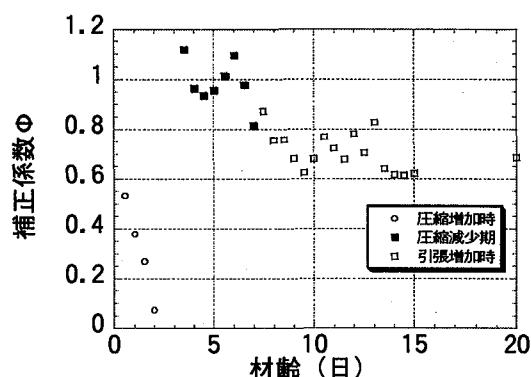


図-5.7 補正係数の経時変化

5.4 各種有効ヤング係数を用いた温度応力解析結果
各種有効ヤング係数を用いて温度応力解析をおこない、有効ヤング係数の設定方法の妥当性を検証する。

図-5.8～5.9に第2リフトの温度応力解析結果を示す。

タイプ1では、拘束ひずみの解析値は実測値に比べて、温度上昇過程における圧縮ひずみが大きく、また温度降下過程では引張ひずみが大きい。また温度応力の解析値に

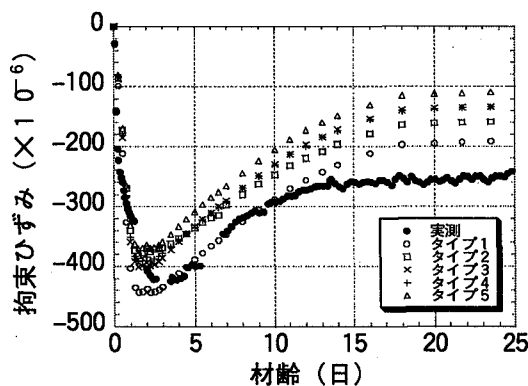


図-5.8 拘束ひずみの解析結果

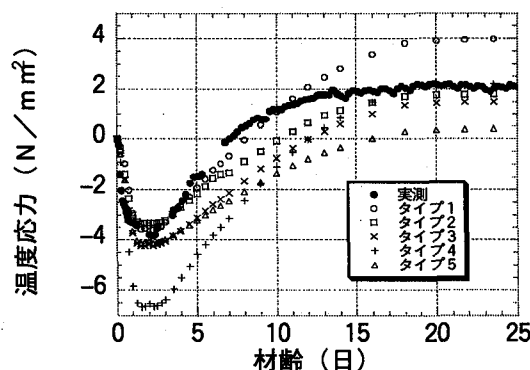


図-5.9 温度応力の解析結果

関しては、温度降下過程での引張応力が実測値を上回っている。このタイプの有効ヤング係数は、実測の拘束ひずみと温度応力から求めたものであるため、解析において有効ヤング係数の設定方法、解析モデル、境界条件が実構造物の挙動を正しく表現できていれば、解析結果は拘束ひずみと温度応力の実測結果に近似すると考えられる。しかし、今上記の差を解消するために、解析モデル、境界条件を再検討し、境界条件等を変更したとしても、拘束ひずみと温度応力は比例（たとえば、圧縮ひずみが増加すれば、圧縮応力は増加する）するため、実測と解析をひずみと応力双方について近似させることはできないと考えられる。以上より、このような計算と実測の差は有効ヤング係数の設定方法に起因すると考えられる。

次にタイプ2では、拘束ひずみの解析値は実測値に比べて、圧縮のピーク値では 5.0×10^{-6} ほど小さい。また、有効応力の解析値も約 0.5 N/mm^2 程度実測に比べて小さい。温度上昇時期での有効ヤング係数は $1.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 程度であるので、上記のひずみ 5.0×10^{-6} に対する応力は、 0.5 N/mm^2 程度となると推察できる。従って、解析モデル、境界条件などを考慮することで拘束ひずみが適切に評価できれば、タイプ2による有効ヤング係数を用いた計算結果は、より実測値に近づくと考えられる。しかしこの場合でも拘束ひずみについては材齢後期では予測精度が低下している。

タイプ3、4は、現在一般的に用いられている有効ヤング係数であるが、タイプ3での応力解析結果の他は実測値との差が大きい。タイプ4では、圧縮応力増加分が約 7 N/mm^2 であり実測値の約 4 N/mm^2 になるためには材齢初期の静ヤング係数の補正係数を、現行の 0.73 から $0.73 \times (4/7) = 0.4$ 程度とする必要がある。

また、引張応力増加分は、約 9 N/mm^2 あり、実測値の約 6 N/mm^2 になるためには同補正係数を 0.65 程度としなければならない。

タイプ5に関しても、実測との差が生じている。本検討に用いた補正係数は、供試体温度 20°C 一定状態でのクリープ試験により求められたものであるが、高温状態にある本構造物の場合には、温度関数 $\Phi_t (T)^{5)}$ が高レベルとなりクリープが増加する。したがってクリープによる補正係数は小さくなるため、計算と実測の差はさらに大きくなると考えられる。

以上よりこれら5つのタイプの中では、タイプ2での設定方法がもっとも妥当と考えられる。ただし、材齢後期の拘束ひずみの予測精度については課題が残る。

図-5.8に第1リフトの温度応力解析結果をしめす。タイプ1、2の有効ヤング係数については、温度分布の違う第2リフトで使用した値と同じものを用いているため、実測値との比較の意義が薄い、タイプ2のケースが最も実測を表現している。

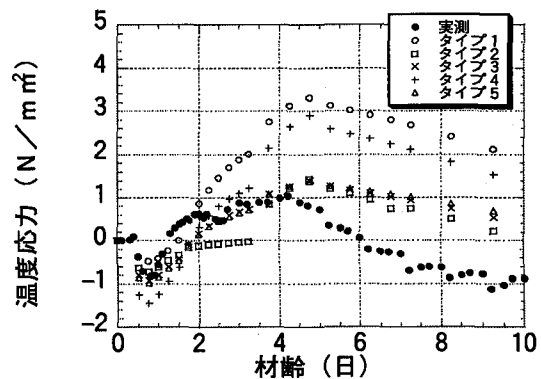


図-5. 10有効応力解析結果 (第1リフト)

6. 実測値に基づいた有効ヤング係数の提案

コンクリートの温度応力を有効ヤング係数を用いた増分法で求める場合、静ヤング係数に対し材齢に応じた補正係数を定めて有効ヤング係数を設定する方法が通常広く用いられている。しかし、過去に提案されている補正係数では十分な解析精度が得られないことが認められた。

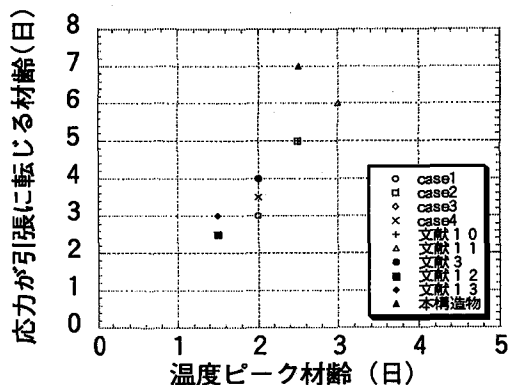
ここでは、本検討における温度応力計測結果と各種の有効ヤング係数を用いた検討結果に基づいて、温度上昇および下降に応じて、圧縮および引張応力が生じる外部拘束卓越型の構造物を想定して、簡易な有効ヤング係数 E_{eff} の設定法を提案する。

すでに検討したように、計測結果をもとにして、有効ヤング係数を各材齢で設定して解析に用いれば、より精度よくコンクリートの温度応力が計算できると考えられる。このことは、クリープによる静ヤング係数の補正係数を材齢に応じて変化して用いればよいことを示している。ここでは実測結果をもとに、補正係数の設定範囲を、圧縮応力増加時、圧縮応力減少時、引張応力増加時の3段階を考えた。この場合低減係数の設定範囲、つまり作用期間をどのように設定するかが問題となる。ここでは、温度解析の結果から以下のように設定する方法を提案する。温度応力解析は、温度解析結果あるいは温度実測結果が得られてから実施される。したがって、圧縮応力が増加する期間の設定値は、ほぼ温度上昇期間であるとすれば、実用的に問題ないと考えられる。次に、その後の圧縮応力減少期間がどの程度続くかは、温度のみの情報からは設定できない。この値は、温度上昇速度や構造物の形状などの種々の条件で変わると考えられ一概に決定できない。ここではこの値を壁状構造物を想定した有限要素法による温度応力パラメータ解析の結果とこれまでの既往の実測結果をもとに検討した。

パラメータ解析の解析条件を表-6.1に示す。図-6.1は、温度ピーク材齢と圧縮応力が引張応力に転じる材齢との関係を、解析結果および実測値^{3)10)~13)}をもとに示したものである。この図より、解析および実測とも応力が引張に転じる材齢は、温度ピーク材齢の $1.5 \sim 2$ 倍となった。しかし本論で検討したプレストレス橋については、温度ピーク 2.5 日に対して引張応力に転じる材齢は 7 日であり約 3 倍弱となっており、この点については今

表一六． 1解析要因と水準など

要因	水準
壁厚 m	1.0, 2.0
その他の寸法 m	壁高1.5、奥行10.0 底版厚 1.0
配合	普通27-12-25
打設時期	夏、冬



図一六． 1 温度ピーク材齢と応力反転材齢

後さらに検討が必要と考える。ここでは、クリープによる静ヤング係数の補正係数をタイプ2での平均的な値を用い、また応力反転材齢についてはパラメータ解析結果や他の実測結果を尊重し、以下のような有効ヤング係数の提案をする。

$$E_{eff} = \phi \times E \quad (8)$$

ϕ : クリープによる補正係数

= 0.40 (温度上昇時の圧縮応力増加時)

$t < \text{温度ピーク材齢}$

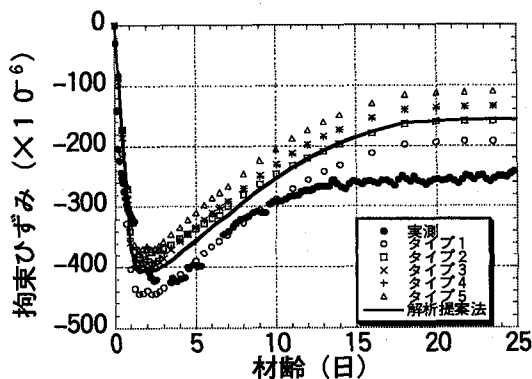
= 1.00 (温度下降時の圧縮応力減少時)

温度ピーク材齢 $< t < \text{温度ピーク材齢の2倍}$

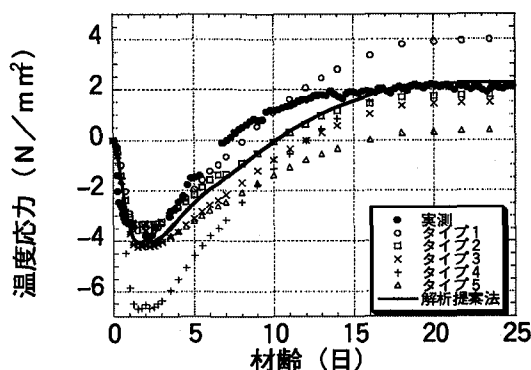
= 0.70 (温度下降時の引張応力発生時)

温度ピーク材齢の2倍 $< t$

図一六． 2、3は、(8)式により有効ヤング係数を設定した場合の解析結果である。図に示すように、(8)式による有効ヤング係数の設定方法は、材齢後期での拘束ひずみの予測精度に課題が残るが、温度応力については実用的な精度で再現できていると思われる。



図一六． 2 提案法での温度応力解析 (ひずみ)



図一六． 3 提案法での温度応力解析 (応力)

7. おわりに

マスコンクリートの温度ひび割れ発生を精度良く予測することを目的として、温度応力が顕著に発生する、プレストレストコンクリート橋の柱頭部マスコンクリートの温度応力計測結果をもとに、有限要素法を用いた増分法解析における有効ヤング係数の設定方法について各種の提案法を踏まえた考察をおこなった。得られた結果を以下に列挙する。

- (1) クリープによる静ヤング係数の補正係数 ϕ は、圧縮応力が生じる温度上昇時に比べ、引張応力に転じる温度下降時が大きくなる。
- (2) 圧縮応力減少過程での補正係数 ϕ はほぼ1.0であり、引張応力下に比べ大きい。
- (3) 適切な解析モデルや境界条件を使用し、拘束ひずみおよび温度応力の測定結果から材齢に対して逐次もめた有効ヤング係数をもちいれば、比較的精度のよい解析結果が得られると考えられる。
- (4) 温度上昇時の圧縮応力増加時、温度下降時の圧縮応力減少時およびその後の引張応力発生時のクリープ現象を有効ヤング係数に的確に組み込むことで、より精度の高い解析結果が得られる。本検討では、外部拘束の卓越する壁状構造物を対象にし、静ヤング係数の補正係数を考察した。その結果補正係数はそれぞれの段階で、0.4、1.0、0.7である。また圧縮応力減少期間は、実用的には温度ピーク～温度ピーク材齢の2倍とすればよい。

(参考文献)

- 1) 土木学会、コンクリート標準示方書[平成8年度制定]・施工編、平成8年3月
- 2) 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、昭和61年3月1日
- 3) 前野、青景、伊藤、大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について：第2回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、1984.3
- 4) 野村、上原、梅原、クリープを考慮したマスコンクリートの温度応力に関する研究：コンクリート工学年次論文

報告集、vol.15、NO.1、1993

5) 平本、入矢、梅原、若材齢コンクリートのクリープを考慮した有効弾性係数の算定：土木学会第51回年次学術講演会、平成8年9月

6) コンクリート技術シリーズ NO.8、マスコンクリート技術の現状と動向、平成6年10月

7) 平本、入矢、スプラティック、梅原、若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性：コンクリート工学年次論文報告集、vol.19、NO.1、1997

8) 森本、岩本、栗原、小柳、若材齢コンクリートの圧縮および引張クリープ特性：セメント・コンクリート論文集、NO.47、1993

9) 入矢、服部、梅原、若材齢コンクリートのクリープモデルに関する一考察：土木学会第52回年次学術講演会、平成9年9月

10) 起橋、東、上西、建築物地中梁の三次元FEM温度応力解析：コンクリート工学年次論文報告集、vol.19、NO.1、1997

11) 土木学会、コンクリートライブラリー51号、コンクリート標準示方書改定資料、P.80～82

12) 毛利、戸田、森本、小柳、2、3の方法によるコンクリート壁の温度応力の実測と解析：第2回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、1984.3

13) 佐藤、氏家、木村、伊藤、温度ひび割れを有するRC部材の鉄筋応力度とひび割れの挙動：コンクリート工学年次論文報告集、vol.14、NO.1、1992

14) コンクリートの技術シリーズNO.24、土木学会コンクリート委員会、クリープ・乾燥収縮小委員会(308)、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮、p51