

# マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析に関する研究

## STUDY ON THE RELAXATION ANALYSIS OF THERMAL STRESS IN MASS CONCRETE

森本 博昭\*・小柳 治\*\*

By Hiroaki MORIMOTO and Wataru KOYANAGI

Generally, creep analysis method is adopted in thermal stress analysis of concrete structure, in order to take into account the effect of stress relaxation caused by viscoelastic behaviour of concrete. As relaxation analysis method reflects the effect of stress relaxation more precisely and directly than creep analysis method does, it is considered to be more favorable to use the former in thermal stress analysis.

This study deals with the thermal stress analysis for three types of mass concrete structures by both creep and relaxation analysis methods. Thermal stresses calculated with the two methods are compared with measured values in field testing by stress meters. The effectiveness of the analysis method based on relaxation function was approved.

*Keywords : mass concrete, thermal stress, relaxation, creep, FEM*

### 1. 概 説

応力緩和を考慮した温度応力解析は、基本的には材料非線形の応力解析問題であり、その理論的な取り扱いはほぼ確立されたものとなっている<sup>1)</sup>。材料非線形問題では、いかに材料構成則を合理的に表現するかが精度のよい解析結果を得るためにの要件の1つとなっている。コンクリートの粘弾性構成則を多軸変動応力または、ひずみ場において記述する場合、一般的には状態方程式法、履歴理論、および粘弾性モデルなどが用いられるが<sup>2)</sup>、コンクリートのクリープの履歴依存性から、従来より履歴理論が多く用いられてきた。その際、クリープ関数を用いると応力履歴でひずみを規定する形式となり、一方、リラクセーション関数を用いるとひずみ履歴で応力を規定する形式となるが、一般的には資料の蓄積の比較的豊富なクリープ関数が多く用いられてきた。履歴理論により構成式を記述する場合、図-1(a), (b) に示すように、通常は各時間ステップにおける応力またはひずみ増分が一定に保たれるものとして、一定応力またはひずみ条件下で得られたクリープ関数または、リラクセーション関

数を用いて、任意時刻のひずみまたは、応力が重ね合せの原理により評価される。しかし、クリープ関数を用いる場合、図-1(a) の各時間ステップにおける応力増分  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2$  などは、実際にはコンクリートの粘弾性的挙動により減少していくと考えられ、この点がクリープ関数を用いた場合の1つの難点となっている。ただし、各時間ステップにおいて、その時点までのすべての応力増分に対して応力緩和を考慮したうえで、各応力増分によるクリープひずみ増分を評価し、それらを重ね合わせるなどの手法をとれば上で述べた難点を克服することも可能であるが、この場合、計算処理の複雑化ならびに計算量の増加は非常に大きく、実際の解析においてこのような手法を採用するのは容易ではないと考えられる。一方、リラクセーション関数を用いる場合は、各時間ステップにおける弾性ひずみ（拘束ひずみ）の増分が用いられる。温度応力は、基本的には温度ひずみの拘束により生じる応力であり、これがコンクリートのリラクセーションにより減少していく。この際、図-1(b) の各時間ステップで生じた拘束ひずみの増分  $\Delta\varepsilon_{e1}$ ,  $\Delta\varepsilon_{e2}$  などは、応力増分に比べて以後の変化が小さいと考えられ、各時間ステップでのひずみ増分は一定に保たれるという構成式記述上の基本仮定とよく合致する。したがって、一般的に履歴理論を用いる場合には、クリープ関数よりむしろリ

\* 正会員 工修 岐阜大学工業短期大学部  
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

\*\* 正会員 工博 岐阜大学工学部(同上)

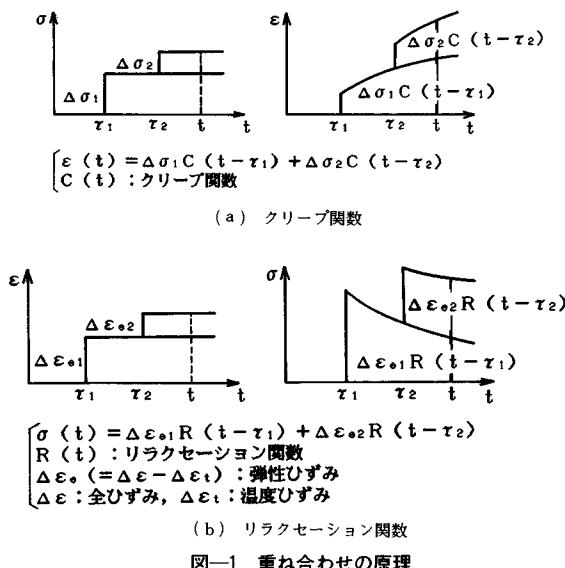


図-1 重ね合わせの原理

ラクセーション関数を用いた方が、合理的に構成式を記述できると考えられる。また、リラクセーション関数は応力緩和現象そのものを簡明に表現しているので、これを用いた構成式の物理的意味も明快となる。さらに、リラクセーション関数は温度応力の減少を直接的に与えるので温度応力の各種簡易解法において、応力緩和の影響を考慮する際にも便利に用いることができる。本研究は、著者らが提案している若材令コンクリートの圧縮ならびに引張リラクセーション関数<sup>3), 4)</sup>により記述した構成式を用いた解析手法(以下、本文ではこれをリラクセーション解析という)により、コンクリート壁体2例ならびにコンクリート橋脚1例の、計3例のマスコンクリートの温度応力解析を実施し、各解析結果とおのおのの構造物に対するコンクリート有効応力計による実測値との対応などを検討することにより、本手法の適用性を明らかにするものである。さらに、本研究では、従来から一般的に採用されているクリープ関数による構成式を用いた手法による解析(以下、本文ではこれをクリープ解析という)も実施し、リラクセーション解析との関連性についても明らかにしている。

## 2. 既往の研究

温度応力に対するクリープの影響は、温度応力の研究が本格化した1930年代からすでに認識されており、興味ある報文も散見される。以下に当時から現在に至るまでの研究の流れを概観する。Blanksら<sup>5)</sup>は、一軸拘束試験により、温度応力発生に関するシミュレーション実験を実施し、温度応力はクリープにより著しく緩和されることを指摘している。McHenry<sup>6)</sup>は、履歴理論により

クリープ関数を用いたコンクリート粘弹性構成方程式を導き、これをもとに実測ひずみを応力へ変換するための実用的手法を提案している。Mendelsonら<sup>7)</sup>は、コンクリート粘弹性構成則として状態方程式法を用い、クリープ問題に対する一般的な基礎方程式を導いている。小沢<sup>8), 9)</sup>は、Compensation Line法および差分法を用いたダムコンクリートについての温度応力解析を報告している。解析ではクリープの影響を考慮するため、クリープ特性から推定したリラクセーション関数を用いている。Arutyunyan<sup>10)</sup>は、履歴理論によるコンクリート粘弹性構成則を用い、多軸応力場におけるクリープ応力解析問題に関する一般的な基礎方程式を導いている。Greenbaumら<sup>11)</sup>は、有限要素法により軸対象体のクリープ解析を行っている。粘弹性構成則は状態方程式法(時間硬化則とひずみ硬化則)を用いている。Zienkiewiczら<sup>12)</sup>は、トンネル周辺応力のクリープ解析などを報告している。構成則はレオロジーモデルを用いており、これにより粘弹性クリープの履歴依存性を考慮することが可能なことを述べている。ACI 207委員会<sup>13)</sup>は、拘束応力の算定の際、持続弾性係数を用いてクリープの影響を考慮する方法を提案している。塙山<sup>14)</sup>は、温度応力の簡易計算法において、若材令コンクリートのクリープ試験をもとに決定した有効弾性係数によりリラクセーションの影響を考慮している。夏目ら<sup>15)</sup>は、新旧コンクリートの打継部の温度応力の計算法において、各タイムステップでの弾性応力増分に対して、クリープ係数から求めた応力低減係数を適用することによりリラクセーションの影響を考慮している。原口ら<sup>16)</sup>は、ダムかさ上げ時の温度応力を有効要素法により検討している。コンクリートの粘弹性構成則は状態方程式法を用いている。野中<sup>17)</sup>は、応力緩和関数を用いた一軸応力下における積分方程式型の構成式をもとにし、これを簡易的に解くことにより温度応力を求める解析法を提案している。大崎ら<sup>2)</sup>は、マスコンクリートの粘弹性問題に対する取り扱いに関して、クリープ則は状態方程式法を用い、クリープにおける時効性ならびに温度依存性は載荷材令影響係数と温度移行関数で考慮すること等を提案している。

## 3. 解析手法

本研究では、三次元有限要素法により各構造物の温度解析、リラクセーション解析ならびにクリープ解析を実施した。以下に、それぞれについての概要を述べる。

### (1) 解析構造物

本研究で解析対象としたものは、橋脚1体と壁2体(以下、それらを壁(A)、壁(B)とよぶことにする)の計3体のマスコンクリート構造物で、特に注目した部分はいずれの場合も新規打設部分(新コンクリート)で

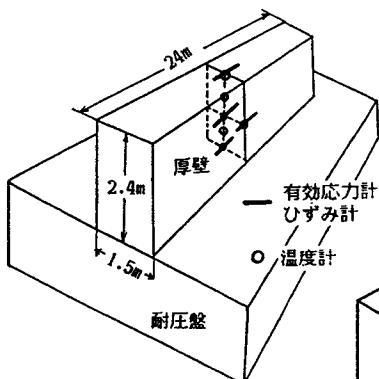


図-2 壁 (A)

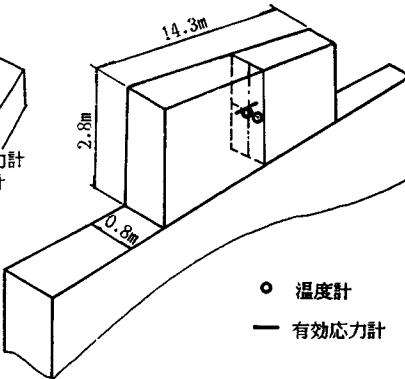


図-3 壁 (B)

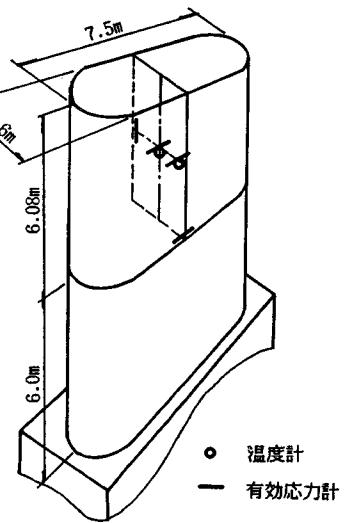


図-4 橋脚

表-1 コンクリート示方配合

	スランプ <sup>°</sup> (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
壁 (A)	15	44	50	173	346	793	966
壁 (B)	8	44.7	55.5	163	294	813	1031
橋脚	8	42	60	163	272	771	1079

表-2 コンクリートの力学的性質 (28日)

	壁 (A)	壁 (B)	橋脚
圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	321	288	258
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	—	21.7	21
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	3.45×10 <sup>5</sup>	2.48×10 <sup>5</sup>	2.53×10 <sup>5</sup>

表-3 解析ケース

	壁 (A)	壁 (B)	橋脚	
リラクセーション解析	圧縮特性のみ使用	R C - A	R C - B	R C - C
	圧縮特性と引張特性を使用	R C T - A	R C T - B	R C T - C
クリープ解析	圧縮特性のみ使用	C C - A	C C - B	C C - C

ある。図-2~4に各構造物の形状ならびに各種測定計器の埋設位置を示す。表-1に橋脚ならびに壁(A), (B)のコンクリート示方配合を、また表-2に各コンクリートの材令28日での強度ならびに弾性係数を示す。

## (2) 解析ケース

本研究の主目的は前述のように温度応力のリラクセーション解析の有効性を検討することにある。したがって、リラクセーション解析については、圧縮リラクセーション特性のみを用いた解析に加えて、圧縮リラクセーション特性と引張リラクセーション特性の相違を考慮した解析手法についても検討を行っている。一方、比較のために実施したクリープ解析については、圧縮クリープ特性のみを用いた場合だけを実施した。全解析ケースをまとめて表-3に示す。

## (3) 热伝導解析

表-4 コンクリートの熱的性質

	壁 (A)	壁 (B)	橋脚
断熱温度上昇	$T = 55.1(1 - e^{-0.574t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.0731t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.03505t})$
コンクリート 熱伝導率 (kcal/mh°C)	2.16	同左	同左
コンクリート 比熱 (kcal/kg°C)	0.24	同左	同左
熱伝達率 (kcal/m <sup>2</sup> h°C)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)	同左	同左
コンクリート 打設温度(°C)	16	25	13

熱伝導解析についてはすべての構造物に対して三次元有限要素法を適用した。温度解析で用いた諸定数のうち、断熱温度上昇特性は、壁(A)については断熱温度上昇試験により、そして、他の2つは既往の研究成果<sup>18)</sup>をもとに、打ち込み温度と単位セメント量から算定した。また、コンクリートの熱伝導率と比熱は、著者らの研究成果<sup>19)</sup>をもとにした仮定値であり、熱伝達率は既往の研究<sup>20)</sup>等を参考にして決定したものである。これらの諸定数をまとめて表-4に示す。なお、解析にあたっては、外気温の変化を考慮することとし、その値は各現場における実測値を用いた。

## (4) リラクセーション解析

等方性材料に対する応力緩和を考慮した構成式は次のように表わされる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_0\} + \{\sigma_r\} = [D_{el}] \{\varepsilon_{el}\} + \{\sigma_r\} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 $\{\sigma\}$ : 応力ベクトル

$\{\sigma_0\}$ : 弹性応力ベクトル

$\{\sigma_r\}$ : 応力緩和ベクトル

$[D_{el}]$ : 弹性マトリックス

$\{\varepsilon_{el}\}$ : 弹性ひずみベクトル





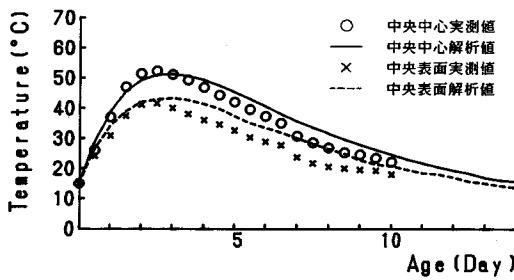


図-5 壁 (A) の温度上昇

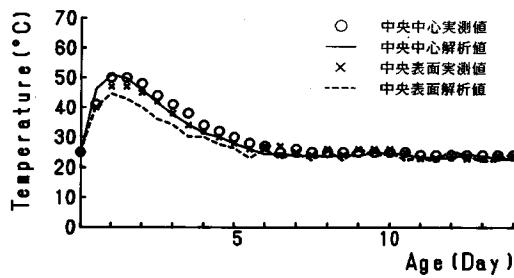


図-6 壁 (B) の温度上昇

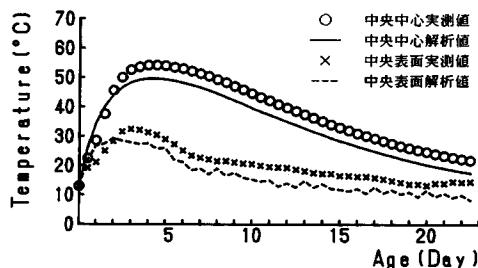


図-7 橋脚の温度上昇

収まっている。

#### b) 壁 (B)

図-6に壁 (B) の中央中心と表面の温度実測値と解析値を示す。図から、中心の最高温度は、実測で材令1~1.5日にかけて $50.0^{\circ}\text{C}$  (打ち込み温度からの温度上昇 $25.0^{\circ}\text{C}$ ) を記録している。実測値と解析値は、中心、表面とも $5^{\circ}\text{C}$  以内の差に収まっている。

#### c) 橋 脚

図-7に、橋脚中央中心と表面の温度実測値と解析値を示す。図から、実測による中心の最高温度は材令4~4.5日で $54.2^{\circ}\text{C}$  (打ち込み温度からの温度上昇 $41.2^{\circ}\text{C}$ ) を示している。実測値と解析値との対応は壁同様中心、表面とも全般的に良好であり、両者の差は $5^{\circ}\text{C}$  以内くなっている。

### (2) 圧縮特性のみを使用したクリープ解析とリラクセーション解析

#### a) 壁 (A)

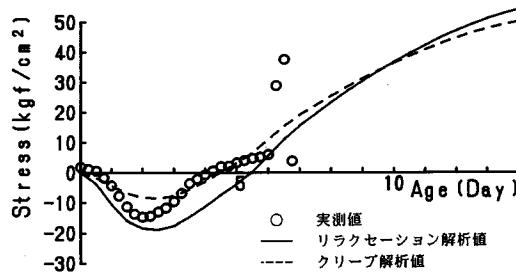


図-8 壁 (A) 中央中心の温度応力

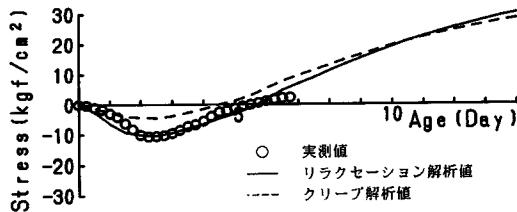


図-9 壁 (A) 底部中心の温度応力

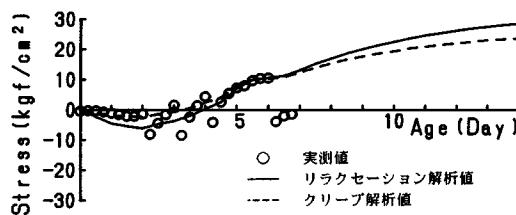


図-10 壁 (A) 顶部表面の温度応力

図-8~10に、壁中央と底部の中心および頂部表面における温度応力の実測値ならびに解析値を示す。

各図から、壁 (A) に発生する温度応力は、いずれの部分においても温度上昇期に圧縮応力が発生し、温度がピークとなる時期に圧縮応力が最大値を示す。そして、それ以後は温度低下に伴い引張応力が増加していく傾向を示している。実測値で壁底部、中央、および頂部の応力をそれぞれ比較すると、中央に最も大きな応力が発生していることがわかる。頂部では気温の変化に伴い応力が周期的に大きく変動している。なお、材令6~7日以降実測値が不連続となっているのは、ひびわれ発生の影響とも考えられるが、ひびわれ発生時としては引張応力が小さいとの感もあり、原因は明確ではない。図-8で、中央中心の実測値とリラクセーション解析値に注目すると、全般的に両者はよく合致しており、最大圧縮応力については実測値の $14.7 \text{ kgf/cm}^2$  に対して解析値は $18.7 \text{ kgf/cm}^2$ 、また材令6日での引張応力は、実測値の $6.0 \text{ kgf/cm}^2$  に対して解析値は $5.7 \text{ kgf/cm}^2$  を与えている。一方、クリープ解析値に注目すると、定性的には実測値、あるいはリラクセーション解析値とよく合致している

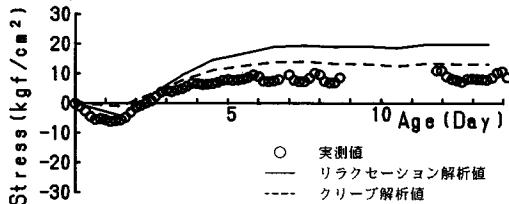


図-11 壁（B）中央中心の温度応力

が、全般的にリラクセーション解析値に比べ応力の緩和量を大きく評価しており、特に若材令においてその傾向が顕著である。たとえば、最大圧縮応力のクリープ解析値は $8.5 \text{ kgf/cm}^2$ で、リラクセーション解析値の45%程度の値となっている。また、材令6日での引張応力は $11.0 \text{ kgf/cm}^2$ で、実測値あるいはリラクセーション解析の2倍程度の値を与えており、圧縮応力減少期から引張応力発生期にかけては、リラクセーション解析とクリープ解析における引張応力増分の差が小さくなり、その結果、材令後期の引張応力についての両解析値の差異は小さくなる傾向を示している。たとえば、材令14日のリラクセーション解析値 $54.3 \text{ kgf/cm}^2$ に対し、クリープ解析は $50.5 \text{ kgf/cm}^2$ とリラクセーション解析値の93%程度の値を与えている。図-9から、底部においても、実測値とリラクセーション解析値は材令7日までは非常に良好な対応を示している。圧縮応力の最大値は、実測値の $10.5 \text{ kgf/cm}^2$ に対し、リラクセーション解析値は $10.3 \text{ kgf/cm}^2$ を与えている。また、材令7日の引張応力は、実測値の $2.2 \text{ kgf/cm}^2$ に対して解析値は $6.9 \text{ kgf/cm}^2$ を与えている。一方、クリープ解析値は中央中心と同様、リラクセーション解析値に比べ応力緩和量をかなり大きく評価する傾向にあり、最大圧縮応力のクリープ解析値は $4.5 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。また、材令7日の引張応力についてのクリープ解析値は $9.6 \text{ kgf/cm}^2$ で、実測値さらにはリラクセーション解析値より大きな値を与えている。図-10から、頂部表面では実測値において気温変化に伴う周期的な変動がみられるが、平均的にみると材令6日までは実測値とリラクセーション解析値は良好に対応している。一方、クリープ解析値は実測値と大きな差異はないが、リラクセーション解析値に比べやはり応力緩和量を大きく評価している。

### b) 壁（B）

図-11に壁（B）中央中心における温度応力実測値と解析値を示す。図から、壁（B）に発生する温度応力は壁（A）同様、外部拘束が卓越する場合の傾向を示すが、壁（A）に比べて壁厚が $80 \text{ cm}$ と、壁（A）の約半分であることから、最大圧縮応力の発生時期ならびに引張応力への反転時期がかなり早くなっている。最大圧縮

応力は、実測値で材令1.5日において $6.0 \text{ kgf/cm}^2$ を記録している。また、引張応力は、材令6日付近で $9\sim10 \text{ kgf/cm}^2$ に達し、それ以降は応力緩和の傾向は認められず、ほぼ一定の値を保っている。実測値とリラクセーション解析値を比較すると材令3日までの材令初期においては、両者はよく合致しており最大圧縮応力の実測値 $6.0 \text{ kgf/cm}^2$ に対して、リラクセーション解析値は $4.2 \text{ kgf/cm}^2$ を与えている。しかし、材令3日以降の引張応力発生期に移ると、解析値の引張応力増分が実測値の約2倍程度の大きさとなり引張応力がほぼ一定となる材令7日においては、実測値の $9\sim10 \text{ kgf/cm}^2$ に対して、リラクセーション解析値は $19\sim20 \text{ kgf/cm}^2$ の値を与えている。次に、クリープ解析値に注目すると、クリープ解析では壁（A）同様、特に若材令においての応力緩和を大きく評価する結果となり、最大圧縮応力のクリープ解析値はリラクセーション解析値の1/4程度の $1.1 \text{ kgf/cm}^2$ を与えており、実測値と比べてもかなり小さい。材令6日以降においては、両手法における引張応力増分値の差が小さくなるため両解析値の差は小さくなり、最大引張応力についてのクリープ解析値は $13\sim14 \text{ kgf/cm}^2$ と、リラクセーション解析値の70%程度の値となっている。この最大引張応力については、リラクセーション解析値よりも実測値に近い値を与えている。

### c) 橋脚

図-12~14に、橋脚中央中心と表面の水平方向応力、ならびに中央表面の鉛直方向応力の実測値と解析値を示す。各図から、橋脚に発生する温度応力は、表面では温度上昇期に引張応力がピークとなり、それ以降、温度の降下に伴い圧縮応力へと移行してゆく。一方、中心では表面とほぼ逆の傾向、すなわち圧縮応力からしだいに引張応力へと移行していく傾向を示す。図-12から、実測によると中央表面では、材令6~7日で引張応力が $13.4 \text{ kgf/cm}^2$ の最大値を示す。そして、材令10日付近で圧縮応力へと反転し、材令15日以降は $5 \text{ kgf/cm}^2$ 前後の値で大きく変化しないことがわかる。次に解析値に注目すると、リラクセーション解析値と実測値との対応は全般的に良好であり、たとえば最大引張応力については、実測値の $13.4 \text{ kgf/cm}^2$ に対して、 $11.8 \text{ kgf/cm}^2$ を与えている。一方、クリープ解析は前述の壁同様、リラクセーション解析に比べ材令初期において応力緩和量を著しく大きく評価しており、たとえば最大引張応力は $4.3 \text{ kgf/cm}^2$ を与えている。これはリラクセーション解析値の36%程度、また実測値と比較してもかなり小さな値となる。材令後期においては、両手法の圧縮応力増分量の差が小さくなるため、両者の差異が小さくなっている。図-13から、実測によると中央中心では材令7日付近で圧縮応力が $21.4 \text{ kgf/cm}^2$ の最大値を示し、そ

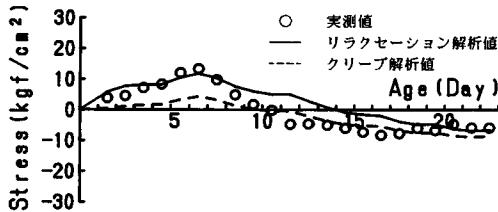


図-12 橋脚中央表面の温度応力

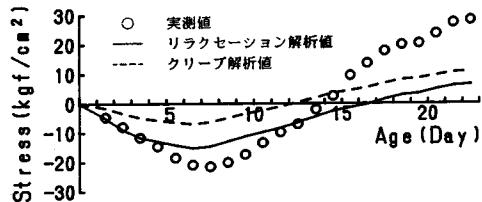


図-13 橋脚中央中心の温度応力

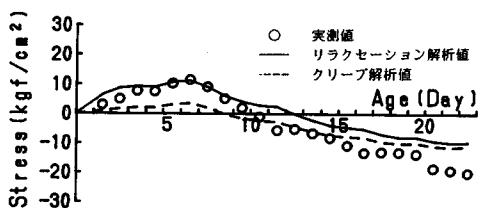


図-14 橋脚中央表面鉛直方向の温度応力

その後、材令 14 日付近で引張応力に転じ、材令 22 日付近で約  $30 \text{ kgf/cm}^2$  に達する。これに対して、リラクセーション解析値では最大圧縮応力が  $15.1 \text{ kgf/cm}^2$  となっており、この時期までは実測値と比較的良好に合致している。しかし、圧縮応力ピーク期以降は、実測値に比べ引張応力増分が約  $1/2$  程度とかなり小さく、材令 22 日での引張応力解析値は  $6.5 \text{ kgf/cm}^2$  となっている。一方、クリープ解析では最大圧縮応力が  $6.9 \text{ kgf/cm}^2$  となっており、表面同様材令初期での応力緩和量を大きく評価している。圧縮応力ピーク期以降の引張応力増分については、表面同様、リラクセーション解析との差異が小さくなっている。図-14 から、中央表面の鉛直方向応力は、実測値、解析値とも図-12 に示した同位置における水平方向応力とほぼ同様の傾向を示し、最大引張応力は実測値で  $11.6 \text{ kgf/cm}^2$  となっている。ただ、材令後期の圧縮応力については水平方向のほぼ 2 倍程度の値を示している。リラクセーション解析値と実測値との対応は全般的に良好であり、またクリープ解析は、特に材令初期においてかなり小さな応力を与えるが、材令後期では、リラクセーション解析との差が小さくなる傾向にある。

#### d) リラクセーション解析とクリープ解析の適用性

3 例のマスコンクリートについて、温度応力のリラクセーション解析値を、実測値およびクリープ解析値と比

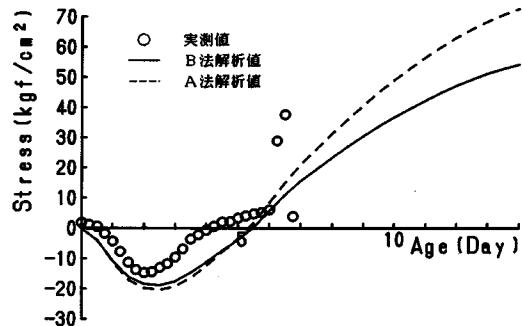


図-15 壁 (A) 中央中心の温度応力

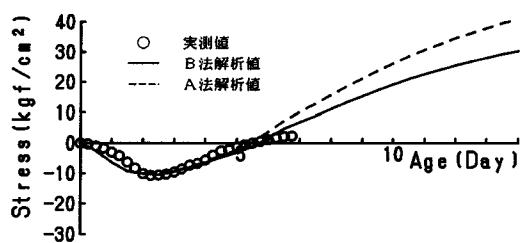


図-16 壁 (A) 底部中心の温度応力

較した。その結果、いずれの構造物においても材令初期ではリラクセーション解析は実測値とよく合致する結果を与えた。一方、クリープ解析値は応力緩和を大きく評価し、リラクセーション解析値あるいは実測値に比べかなり小さな値を与える傾向にあった。中、長期材令になると、リラクセーション解析値とクリープ解析値との差は小さくなるが、実測値との対応は両解析値とも悪くなる傾向にあった。

このような結果を踏まえて、本研究で提案するリラクセーション解析手法の適用性を検討するにあたり、実測値との対応が 1 つの着眼点となる。ここで用いた有効応力計による温度応力の実測値の精度についてはいくつかの論議はあるが<sup>23), 24)</sup>、本研究では、構造物中の温度応力の有力な目安にはなり得るものと考えた。さて、リラクセーション解析手法による解析値は、上述のように実測値との対応も全般的に良好であり、本手法は、応力緩和を考慮した温度応力の解析を行なう際の有用な手法になり得るものと考えられる。一方、クリープ解析手法については、実測値との対応では材令初期においてリラクセーション解析に比べ劣る結果となった。しかし、中、長期材令では、リラクセーション解析より実測値に近い値を与える場合もあり、全般的にみた場合は、本研究の範囲内ではリラクセーション解析に比べ適用性において大きな差は認められなかった。

以上から、本研究で提案するリラクセーション解析手法は、少なくともクリープ解析と同程度の精度あるいは

適用性を有することが検証できたと考える。一方、理論面では前述のように、リラクセーション解析手法は、「温度応力の緩和現象の解析」という解析目的に即した形で簡明に構成式を記述でき、その結果、理論の展開が明快になるという利点を有しているのである。

### (3) 圧縮ならびに引張リラクセーション特性を用いたリラクセーション解析

本節では、圧縮と引張のリラクセーション特性を用いた解析手法をA法とし、一方前節で示した圧縮リラクセーション特性のみを用いる解析手法をB法と名付けて両手法の比較検討を行う。

#### a) 壁 (A)

図-15, 16に壁 (A) の中央中心と底部中心の温度応力についてのA法、B法の解析結果ならびに実測値を示す。図-14から、中央中心で材令初期の圧縮応力発生期においては、A法、B法ともほぼ同様の値を示し、実測値との対応も良好である。しかし、温度下降期に移ると、A法における引張応力増分がB法に比べて大きく、材令が進行するに伴い、A法の方が大きな引張応力解析値を与えており、たとえば、材令14日での引張応力について、A法は $72.7 \text{ kgf/cm}^2$ 、B法は $54.3 \text{ kgf/cm}^2$ で、A法はB法に比べて34%程度大きな値を与えており、この引張応力発生期においては、A法の方がより実測値に近い値を与えており、図-16から、底部中心においても中央中心同様、圧縮応力発生期においてはA法、B法ともほとんど差はないが、引張応力発生期ではA法の方が引張応力を大きく与える傾向にある。実測値との対応はA法、B法とも差異は認められない。

#### b) 壁 (B)

図-17に壁 (B) の中央中心における応力実測値ならびにA法、B法の各解析値を示す。図から、壁 (B)においても、壁 (A) 同様、材令初期の圧縮応力発生期まではA法、B法ともほぼ同じ解析値を与えるが、引張応力発生期に移るとA法の方が大きな引張応力解析値を与えており、たとえば最大引張応力ではA法の方が43%大きな値となっている。実測値と解析値との対応については、A法が実測値に比べB法よりもさらに大きな値を与えており、

#### c) 橋 脚

図-18, 19に橋脚中央の表面と中心の応力実測値とA、B両法による解析値を示す。図-18から、中央表面では、A法における材令初期での引張応力増分がB法に比べて大きく、最大引張応力ではA法 $17.2 \text{ kgf/cm}^2$ 、B法 $11.8 \text{ kgf/cm}^2$ で、A法の方が45%程度大きな値を与えており、引張応力減少期から圧縮応力発生期にかけては、この間での圧縮応力増分がA法、B法とも大差なく、両解析値の差はほぼ一定値を保っている。実測値

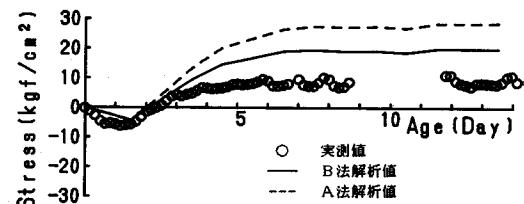


図-17 壁 (B) 中央中心の温度応力

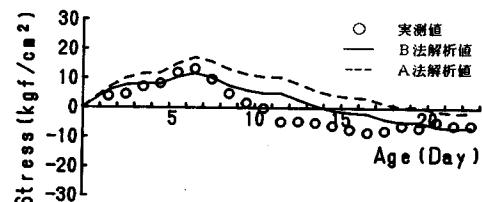


図-18 橋脚中央表面の温度応力

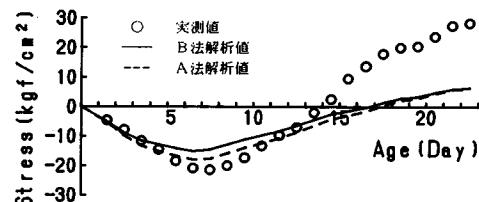


図-19 橋脚中央中心の温度応力

との対応では、A法、B法とも全般的に大差はない。図-19から、中央中心では、材令初期の圧縮応力増加期において、A法による圧縮応力増分がB法よりも若干大きくなるが、最大圧縮応力をみると中央表面の最大引張応力におけるほどの差異は生じていない。そして、圧縮応力減少期以降もA法の引張応力増分はB法のそれよりも若干大きい程度である。実測値との対応ではA法とB法は同程度である。以上のように、リラクセーション解析において応力の正負によるリラクセーション特性の相違を考慮するA法は、圧縮リラクセーション特性のみを用いたB法に比べて、全般的に応力の緩和量を小さく評価し、特に引張応力が増加するような期間においてこの傾向が顕著となることが明らかとなった。たとえば、本研究で解析を行った例では、最大引張応力についてA法がB法に比べて34~45%程度大きな値を与えた。また、実測値との対応では、A法、B法とも同程度であった。

## 5. まとめ

本研究により、マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析において、リラクセーション関数による構成式を用いることの有効性が示されたと考える。本研究で得られた結論をまとめると次のようになる。

### (1) リラクセーション解析手法とクリープ解析手法

により、壁2例と橋脚1例の計3例を解析した結果、クリープ解析における応力緩和量の評価がリラクセーション解析に比べて大きくなる傾向にあった。特に、材令初期でその傾向が強く、著しい場合はクリープ解析値はリラクセーション解析値の25%程度の値となった。ただし、材令後期になると両手法の応力増分評価値の差が小さくなるため、両解析値の差異が小さくなる傾向にあつた。

(2) 実測値との対応では、リラクセーション解析は、特に材令初期で実測値とよく合致する結果を与えた。しかし、中、長期材令になると実測値との対応が悪くなる傾向がみられた。一方、クリープ解析は、材令初期で応力の緩和を大きく評価する傾向にあり、実測値との対応も悪くなる傾向にあった。しかし、中、長期材令ではリラクセーション解析と大差なく、リラクセーション解析より実測値に近い値を与える場合もあった。

(3) リラクセーション解析手法は、実測値との全般的な対応などから、少なくともクリープ解析と同程度の精度あるいは適用性を有するものと判断された。また、理論面では、リラクセーション解析の方が簡明に構成式を記述できる点で有利であると考えられた。

(4) リラクセーション解析において、作用応力の正負によるリラクセーション特性の変化を考慮した場合

(A法)は、圧縮特性のみを用いた場合(B法)に比べ引張応力を大きく評価する。ただし、実測値との対応は両法とも同程度であり、本研究の範囲内ではA法、B法の優劣について明確な判断を下すまでには至らなかつた。

#### 参考文献

- 1) Zienkiewicz, O. C. (吉識雅夫・山田嘉昭監訳)：マトリックス有限要素法、培風館、1975.
- 2) 河田秋澄・大崎幸雄・吉川弘道：マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討、JCIマスコンコロキウム論文集、pp. 49~55、1982.
- 3) 平田正成・河合 敦・森本博昭・小柳 治：若材令コンクリートのリラクセーション特性評価法に関する研究、土木学会第41回年次学術講演会概要集、pp. 377~378、1986.
- 4) 平田正成・森本博昭・小柳 治：マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析、第9回コンクリート工学年次論文報告集、pp. 19~24、1987.
- 5) Blanks, R. F., Meissner, H. S. and Rawhouser, C. : Cracking in Mass Concrete, Proceedings, Journal of ACI, Vol. 34, pp. 477~495, 1938.
- 6) McHenry, D. : A New Aspect of Creep in Concrete and its Applications to Design, Proceedings of ASTM, Vol. 43, pp. 1069~1087, 1943.
- 7) Mendelson, A., Hirschberg, M. H. and Manson, S. S. : A General Approach to the Practical Solution of Creep Problems, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME, Series D., 81, pp. 585~598, 1959.
- 8), 9) 小沢章之：マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究(I), (II), 水力発電, 57, 59, pp. 48~61, 19~39, 1962.
- 10) Arutyunyan, N. Kh. : Some Problems in the Theory of Creep in Concrete Structures, Pergamon Press, 1966.
- 11) Greenbaum, G. A. and Rubinstein, M. F. : Creep Analysis of Axisymmetric Bodies Using Finite Elements, Nuclear Engineering and Design, Vol. 7, pp. 379~398, 1968.
- 12) Zienkiewicz, O. C., Watson, M. and King, I. P. : A Numerical Method of Visco-Elastic Stress Analysis, Int. J. of Mech. Sci., Vol. 10, pp. 807~827, 1968.
- 13) ACI Committee 207 : Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Proceedings, Journal of ACI, Vol. 70, pp. 445~470, 1973.
- 14) 塚山隆一：マッシブな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究、東京大学学位論文、1974.
- 15) 夏目忠広・岩城 良・村山八洲雄・村田俊彦・大貫博司：セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究、鹿島建設土木技術研究所年報、第28号、pp. 45~52、1980.
- 16) 原口 晃・田辺忠顯・阿部博俊・内田敏久：重力式コンクリートダムのかさあげ時における熱応力解析、コンクリート工学、Vol. 15, No. 10, pp. 18~26, 1977.
- 17) 野中資博：コンクリートの引張応力緩和に関する一考察、農業土木学会論文集、第96号、pp. 58~63、1981.
- 18) 田沢栄一・松岡康訓：マスコンクリートの施工法、コンクリート工学、Vol. 15, No. 10, 1977.
- 19) 小柳 治・森本博昭：コンクリート構造物の熱伝導解析についての二・三の考察、岐阜大学工学部研究報告、31号、pp. 135~144、1981.
- 20) たとえば、山川秀次・笠原 清・小林精一：マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討、土木学会第37回年次学術講演会概要集、pp. 415~416、1982.
- 21) 森本博昭・小柳 治：コンクリート構造物の温度ひびわれ予測に関する研究、土木学会論文報告集、第338号、pp. 197~206、1983.
- 22) 森本博昭・小柳 治：コンクリート構造物の温度ひびわれ危険度評価に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8, pp. 67~75, 1988.
- 23) 田沢栄一・飯田一彦：新型応力計について、第2回コンクリート工学年次講演会論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 117~120、1980.
- 24) 竹下治之・浅沼 潔・横田秀彦：マスコンクリートの計器特性について、第2回マスコンコロキウム論文集、JCI-C 7, pp. 1~8, 1984.

(1988.6.9・受付)