

[2004] マスコンクリートの温度応力のリラクゼーション解析

正会員 ○平田正成 (菊水化学工業技術開発部)
 正会員 森本博昭 (岐阜大学工業短期大学部)
 正会員 小柳 洽 (岐阜大学工学部)

1. まえがき

近年のコンクリート構造物の大型化、高機能化に伴い、セメント水和熱による温度応力に起因する、温度ひび割れに対する関心が高まってきている。温度応力を解析により予測する際、コンクリートの粘弾性的性質による温度応力の緩和現象をいかに評価するかが、精度の高い解析を行うための要件となっている。現在一般的には、クリープ特性を基に応力の緩和量が算出されているが、温度ひずみが拘束され生じるといふ、温度応力の基本的な発生ならびにその緩和メカニズムからは、クリープよりはむしろリラクゼーション特性を用いた方がより合理的かつ直接的であると考えられる。

本研究は、より精度の高い温度応力解析手法の確立を目的とし、その一環として、実験により得られた若材令コンクリートのリラクゼーションならびにクリープ特性を基に、橋脚ならびに厚壁に対する温度応力の解析を試み、リラクゼーション特性を用いた解析手法の合理性を検証したものである。

2. 解析概要

2.1 解析手法

本研究では、熱伝導解析および温度応力解析は三次元有限要素法を用いた。また応力の緩和現象に対する解析手法としては、初期応力法によるリラクゼーション解析ならびに初期ひずみ法によるクリープ解析を行い、比較のため弾性解析もあわせて行った。なお解析に用いたリラクゼーション特性は、次に述べるような実験により得られたものを用いた。

2.2 リラクゼーションならびにクリープ特性

本研究ではリラクゼーション解析を行うに先立ち、解析に用いる若材令コンクリートのリラクゼーション特性ならびにクリープ特性を明らかにするための実験を行った。以下にその概要を述べる。

リラクゼーション特性については表-1に示すコンクリート配合により、載荷時材令1, 3, 7, 14, 21日、載荷応力レベル30, 50, 80%の試験条件で100時間程度の圧縮リラクゼーション試験を実施した。その得られた試験結果に対し、リラクゼーション関数として次式を用いてその特性を評価し、リラクゼーション解析に用いた。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + Ct}{A + t} \quad (1) \quad \begin{array}{l} t : \text{載荷時間 (h)} \quad A : \text{実験定数 (h)} \\ \sigma_t : \text{時間 } t \text{ での応力} \quad C : \text{実験定数} \\ \sigma_i : \text{初期載荷応力} \end{array}$$

ここに、実験定数A, Cはリラクゼーションにおける特性値として、Aは応力の緩和が進行し、最終的な応力の緩和量の1/2が緩和するのに要する時間、1/2緩和時間を表し、また、Cは無限時間後に残留する応力の初期載荷応力に対する比率、終局残留応力度を表す。各試験結果から得

表-1 実験に用いた
コンクリート示方配合

slump (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単位量 (kg/cm ³)			
			W	C	S	G
15	44	50	173	346	793	996

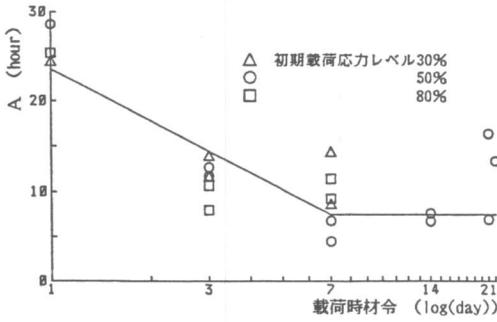


図-1 載荷時材令とAの関係

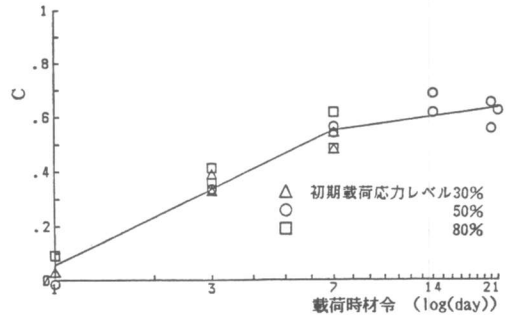


図-2 載荷時材とCの関係

られたこれらの特性値A, Cの値と、載荷時材令の常用対数の関係を表すと、図-1, 2に示す様な載荷時材令に対する傾向が得られる。そこで、本研究では以下の式(2), (3)によりリラクゼーション特性値A, Cを評価した。

$$T < 168: A = -8.25 \log(T) + 49.7$$

$$C = 0.26 \log(T) - 0.76 \quad (2)$$

$$T \geq 168: A = 7.4$$

$$C = 0.07 \log(T) + 0.18 \quad (3)$$

T : 載荷時材令(h)

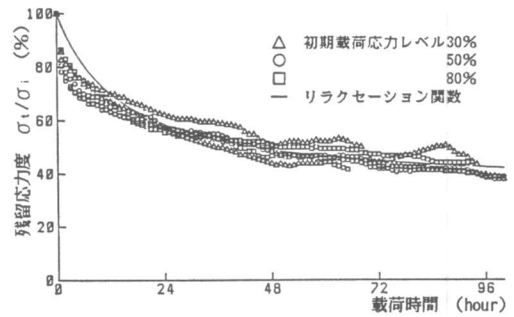


図-3 リラクゼーション試験結果

なお、図-3に載荷時材令3日でのリラクゼーション試験結果、ならびに式(1)~(3)によるリラクゼーション関数をあわせて示す。

一方、クリープ特性に関してもリラクゼーション特性と同配合のコンクリートにより、載荷時材令1, 3, 7, 14, 21日、載荷応力レベル30%の試験条件で200時間程度の圧縮クリープ試験を実施した。その得られた試験結果に対し、クリープ関数として次式を用いてその特性を評価した。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i \varphi_t = \frac{\sigma_i}{E_i} \varphi_t \quad (4) \quad \varepsilon_t : \text{載荷時間 } t \text{ でのクリープひずみ} \quad \varepsilon_i : \text{載荷時のひずみ}$$

$$E_i : \text{載荷時の弾性係数} \quad k : \text{実験定数}$$

$$\varphi_t = k \log(t) \quad (5) \quad \varphi_t : \text{載荷時間 } t \text{ でのクリープ係数}$$

ここに、kは実験定数である。各試験結果により得られたkの値と、載荷時材令の常用対数の

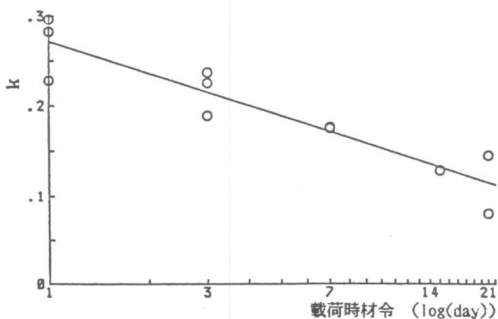


図-4 載荷時材令とkの関係

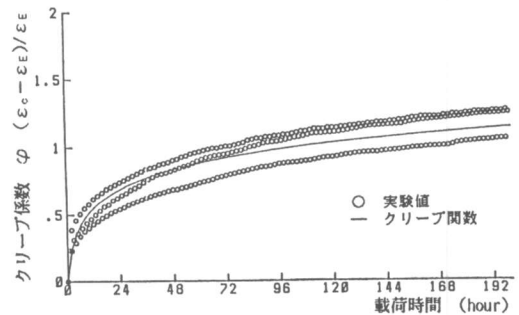


図-5 クリープ試験結果

関係を表すと、図-4に示す様な載荷時材令に対する傾向が得られる。そこで、本研究では以下の式(6)によりkを評価した。

$$k = -0.0515 \log(T) + 0.435 \quad (6)$$

なお、図-5に載荷時材令3日でのクリープ試験結果、ならびに式(4)~(6)によるクリープ関数をあわせて示す。

3. 解析対象

解析対象構造物としては、内部拘束が卓越する例として橋脚柱部、また外部拘束が卓越する例として厚壁の計二種類の構造物をとりあげた。双方とも既設コンクリート(旧コンクリート)上に打設されたものである。なお、解析に際し構造物の対称性を考慮し、柱に対しては1/4、壁に対しては1/2の断面について解析を行った。図-6, 7に両構造物の要素分割図、および表-2~4に両構造物のコンクリート配合ならびに解析に用いた力学的、熱的性質を示す。

4. 解析結果と考察

4.1 橋脚

図-8に、橋脚(新規打設部)の中央部中心における熱伝導解析、および実測による温度の経時変化を示す。

橋脚の中央部中心での最高温度は、実測では材令4~4.5日にかけて最高温度54.2℃(打ち込み温度からの最高温度上昇41.2℃)に達しているのに対し、解析では同じく材令4~4.5日にかけて49.7℃(同36.7℃)であり、解析値の方が5℃程度低い温度上昇を示している。また、中央部表面でも同様に実測が解析値を5℃程度上回っており、両者の差の大部分が温度上昇がピークに達するまでのコンクリートの発熱期に生じていることから、コンクリートの発熱率の評価にやや問題があったと思われる。しかし、温度上昇全般の傾向は両者とも良く合致し、また温度差も5℃程度に収まっており、さらに最高温度に達する時期などの時間的ずれも1~2日程度であることなどから、過去の報告例と比較しても本研究での解析値は実測値と良く合致していると考えられる。

図-9, 10に、橋脚(新規打設部)中央部表面、ならびに中央部中心での各応力解析、および実測による応力の経時変化を示す。

各図から実測値および各解析値とも、全般的な応力の発生傾向は部材中心部と表面部との温度差の増大に伴い、中心部に圧縮、表面部に引張応力が発生する内部拘束が卓越する場合の典型的な傾向を示している。しかし各解析結果のいずれもが、温度が降下

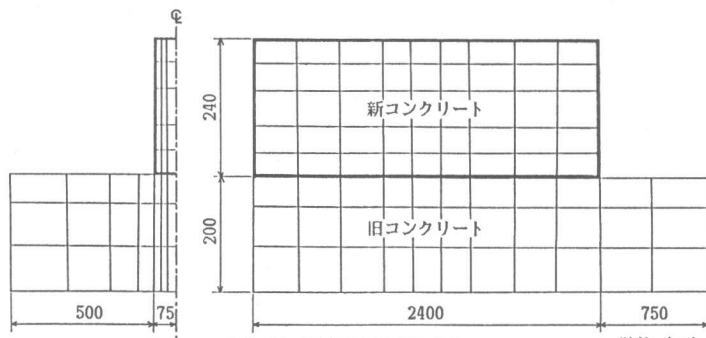


図-7 要素分割図 壁

単位 (cm)

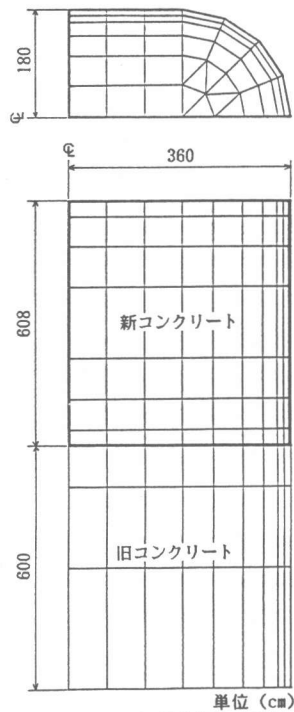


図-6 要素分割図 橋脚

単位 (cm)

表-2 コンクリート示方配合

	slump (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単重量 (kg/cm ³)				
				W	C	S	G	PNO _s L
橋脚	8	42	60	272	163	771	1079	0.680
壁	15	44	50	173	346	793	996	—

表-3 コンクリートの
力学的性質 (28日)

	橋脚	壁
圧縮強度 (kg/cm ²)	288	321
引張強度 (kg/cm ²)	21	—
弾性係数 (kg/cm ²)	2.53×10^5	3.45×10^5

し、応力が反転した後の勾配が実測値に比べ緩やかである。各解析結果を比較すると、各々の応力緩和現象の処理法の相違により、発生応力の大きさにかなりの相違がみられる。

表-4 コンクリートの熱的性質

	橋脚	壁
コンクリート断熱温度上昇 (°C)	$T = 37.8(1 - e^{-0.03505t})$	$T = 55.1(1 - e^{-0.574t})$
コンクリート熱伝導率(kcal/mh°C)	2.16	2.16
コンクリート比熱 (kcal/kg°C)	0.24	0.24
表面の熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)
コンクリート打設温度 (°C)	13.0	16.0

この各解析結果における差は、主に材令初期の温度上昇時に生じており、この材令初期での応力の差がそのまま圧縮から引張、あるいは引張から圧縮応力への移行時期にも影響している。

実測値および各解析結果を中央部に着目して比較すると、中央部中心において、温度上昇時に発生する最大圧縮応力は、弾性解析では29.4 kg/cm²、クリーブ解析では6.9kg/cm²、リラクセーション解析では15.1kg/cm²の値になるのに対し、実測では21.4kg/cm²となっている。最大圧縮応力が発生する時期については、実測、解析いずれも材令6.5~7.5日となっている。また、中央部表面における最大引張応力は、弾性解析では24.3kg/cm²、クリーブ解析では4.3kg/cm²、リラクセーション解析では11.8kg/cm²となりし、実測では13.4kg/cm²の値を示している。最大引張応力の発生時期については、実測および解析ともに材令6.5日となっている。

各解析手法による結果と実測値との対応に注目すると、リラクセーション解析は中央部表面の最大引張応力では2~3kg/cm²の差で、クリーブ解析や弾性解析に比べ全般的に比較的良い一致をみせている。特に応力の反転期(材令7日前後)までは、かなり良好な一致を示している。これに対しクリーブ解析では、材令初期においてリラクセーション解析より大幅な応力の低減がみられ、実測値に比べてもかなり小さな値となっている。

4. 2 壁

図-11に、壁(新規打設部)の中央部中心における熱伝導解析、および実測による温度の経

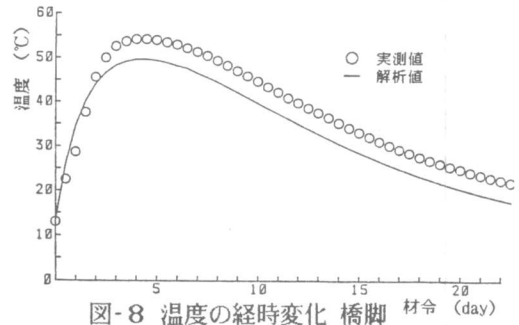


図-8 温度の経時変化 橋脚

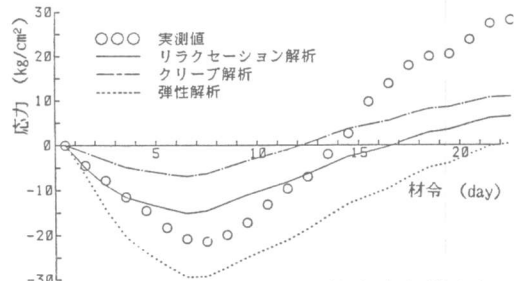


図-9 応力の経時変化 橋脚中央部中心

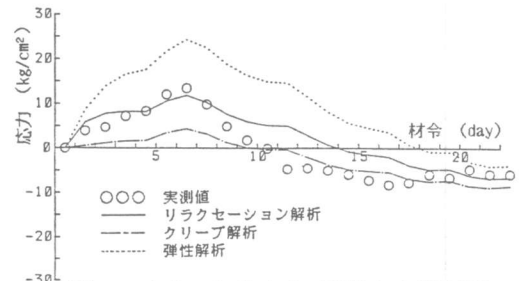


図-10 応力の経時変化 橋脚中央部表面

時変化を示す。

壁において、中央部中心での最高温度は、実測では材令2.5日で最高温度52.4℃(最高温度上昇36.4℃)に達しているのに対し、解析では同じく材令2.5日において52.3℃(同36.3℃)で非常に良く合致しており、その後の温度降下期および安定期においても最大5℃程度の差で良好な対応をみせている。中央部表面においても両者の最高温度は良く合致し、安定期への移行時期、およびその温度などにおいても解析値は実測値と非常に良好な対応を示している。中心部での最終安定温度は、実測では22.2℃、解析値は25.9℃である。

図-12, 13に壁(新規打設部)の中央部中心、ならびに中央部表面における実測および各応力解析手法による応力の経時変化を示す。なお、材令6日において実構造物中央部に貫通びわれが生じたため、以後の実測結果は特異な傾向を示している。

全般的な応力の傾向は、実測値および各解析結果とも、温度上昇にともない圧縮応力が生じ、その後の温度降下につれ引張応力に移行する外部拘束が卓越する場合の典型的な傾向を示している。各解析手法による応力は、全般にわたり定性的には実測値とよく合致している。しかし各解析手法を比較すると、橋脚同様、応力緩和現象の処理法の相違により、最大応力および圧縮から引張応力への移行時期等において差異がみられる。

実測ならびに各解析による応力値を、中央部中心に着目して比較すると、温度上昇時に発生する最大圧縮応力は、弾性解析は37.9kg/cm²、クリープ解析で8.5kg/cm²、リラクセーション解析では18.7kg/cm²で、いずれも材令2.5～3日で生じている。一方、実測では材令2日で14.7kg/cm²の圧縮応力が発生しており、橋脚同様、リラクセーション解析が良好な解析結果を与えているのに対し、クリープ解析は実測値よりもかなり小さな応力を与えている。また貫通びわれが生じた材令6日での中央部中心での引張応力は、実測値が6.0kg/cm²に達しているのに対し、リラクセーション解析では5.7kg/cm²であり、非常に良好な合致をみせているが、クリープ解析では圧縮応力発生時期の大きな応力緩和の影響で引張応力発生期においては、リラクセーション解析よりむしろ大きな11.0kg/cm²の引張応力が発生している。一方、弾性解析では10.5kg/cm²の圧縮応力が発生しており、実測値との差が大きく、特に圧縮から引張への応力の移行時期のずれが実測値などと大きく異なった結果となっている。中央部中心における各解析結果の温度降下後(材令14日)の引張応力は、弾性解析では61.4kg/cm²、クリープ解析では50.3kg/cm²、リラクセーション解析は

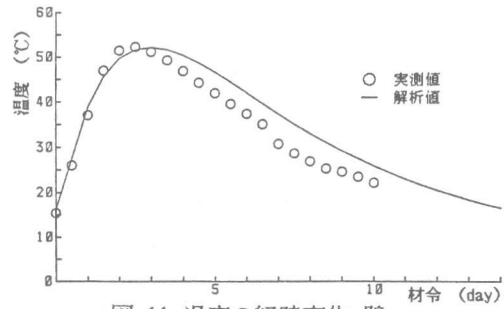


図-11 温度の経時変化 壁

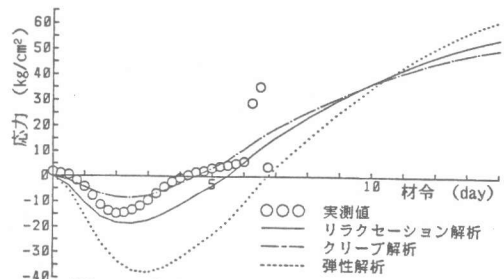


図-12 応力の経時変化 壁中央部中心

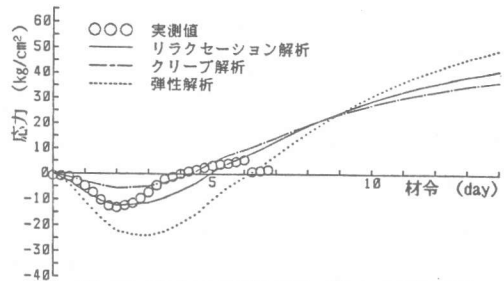


図-13 応力の経時変化 壁中央部表面

54.3kg/cm²となっており、各解析結果の相違は少ない。

ここで、実測値と各解析結果との対応を検討すると、リラクセーション解析では、最大圧縮応力発生後、実測値に追従しきれていない時期がわずかにあるが、その他では最大圧縮応力、ひびわれ発生時の応力など、非常によく合致している。一方、クリーブ解析では橋脚と同様、リラクセーション解析に比べ応力の低減が著しく、実測値と比べてもかなり小さな値しか示さず、特に材令初期においてその傾向が顕著である。

温度応力が問題となる二つの代表的な構造物での温度応力解析結果では、リラクセーション解析結果は実測値と良好な対応を示すが、クリーブ解析では全般的にかなり小さな応力を与える。特に材令3～4日程度までの初期材令における応力の低減が著しく、弾性解析に比べ、リラクセーション解析が5割程度の応力の低減を示すのに対し、クリーブ解析では約8割の応力が低減され、この材令初期での応力緩和量の差がそのまま後の解析結果に影響することが明らかとなった。このような両者の相違は、主として両手法における、リラクセーション特性ならびにクリーブ特性を用いた、多軸変動応力場に拡張されたコンクリート構成則の違いに起因するものと考えられる。温度応力の発生機構はひずみの拘束によるものであり、温度応力はコンクリートの粘弾性挙動により大幅に低減される。すなわち、各解析ステップ内での応力増分は、変動するものとしてとらえる必要がある。これに対し、拘束ひずみは応力ほどの変化を生じないと考えられる。そのため、同じ履歴理論を用いる場合でも、一定ひずみ下で得られたリラクセーション特性の方が、一定応力下で得られたクリーブ特性よりも、より現実に近い形での粘弾性挙動を表しうると考えられる。そのため、リラクセーション解析とクリーブ解析におけるこのような構成則の相違が、コンクリートの粘弾性的性質による応力緩和の影響が大きくそれに伴う応力の変動が大きい初期材令ほど、解析結果に顕著に現れたものと考えられる。

5. あとがき

本研究で行ったリラクセーション解析による結果と実測値との対応は良好であった。一方、クリーブ解析では、全体的に応力の低減がリラクセーション解析よりも大きく評価される傾向にあり、特に材令初期において顕著であった。

リラクセーション解析とクリーブ解析のいずれがより正しい温度応力を与えるかについて、本研究の結果のみで結論づけるのは早計であるが、本研究により、ここで用いたリラクセーション解析手法の有効性が示されたものと考えられる。

《参考文献》

- 1) 森本, 小柳 : コンクリート構造物の温度応力のリラクセーション解析, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 1985.9
- 2) 平田, 河合, 森本, 小柳 : 温度応力解析における若材令コンクリートのリラクセーション特性について, 第8回コンクリート工学協会年次講演会講演論文集 1986.6
- 3) 平田, 河合, 森本, 小柳 : 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回年次学術講演会講演概要集 1986.11
- 4) マスコン委員会 : マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, J C I 1985.11