

若材令コンクリートのリラクセーション特性と その評価法に関する研究

ON THE STRESS RELAXATION OF CONCRETE IN EARLY AGES AND ITS ESTIMATION METHOD

森本博昭*・平田正成**・小柳 治***

By Hiroaki MORIMOTO, Masanari HIRATA and Wataru KOYANAGI

Stress relaxation of concrete, especially in early ages, is one of an important property for thermal stress analysis in concrete structure. But, the information on the relaxation is very small because of an experimental difficulty in maintaining a specimen at a constant deformation. This paper describes the results of compression and tension relaxation tests on concrete in early ages. Test were performed by electro-hydraulic closed-loop testing machine system for compression and by loading frame with high rigidity for tension. Based on the test results, the influences of the age of loading and stress level upon the compression and tension relaxations are fully discussed and estimating equations for the relaxations at various ages are proposed.

Keywords : concrete, stress relaxation, tensile stress, compressive stress, age

1. 概 説

コンクリートの施工段階で問題となるセメントの水和熱に起因する温度応力は、コンクリートが若材令であるため、コンクリートのリラクセーションの影響が特に顕著である。したがって、精度のよい温度応力解析を行うためには、解析で用いるコンクリート構成式において、リラクセーション挙動を合理的に表現することが必要となる。コンクリートのリラクセーションとクリープとは、コンクリートの粘弾性的性質に起因する現象であり、この意味において両者は表裏一体のものと考えられ、理論的にも両者を一対一に関係づけることが可能である。コンクリートのクリープについては現在まで数多くの研究が行われており資料の蓄積も比較的豊富である。このため従来から、温度応力解析においては、もっぱらクリープ特性が用いられてきた。代表的なものとして、McHenry¹⁾, Raphael²⁾, Carlson³⁾, Arutyunyan⁴⁾, さらに君島⁵⁾などの報文がある。これらの研究では、いずれも、変動応力場に対するコンクリート構成式として、ク

リープ関数を用いた重ね合わせの原理に基づく履歴理論により導き出されたものが基本的に用いられている。この場合、構成式は応力を未知関数とする積分方程式となり、これを解くことによりリラクセーションの影響を求めることができる。しかしながら、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、これが時間の経過に伴って緩和していくのであるから、変動応力場に対する構成式表示法として重ね合わせの原理を用いる場合でも、クリープ関数よりむしろ、ひずみで応力を規定する形、すなわちリラクセーション関数を用いた方が直接的かつ物理的意味も明快になると考えられる。さらに、リラクセーション特性は、温度応力のリラクセーション量を簡略的に推定する目的にも有効に利用できる利点を有している。このように、コンクリートのリラクセーション特性は、温度応力解析において重要な力学的特性であるにもかかわらず、これに関する実験的研究がきわめて少なく、特に若材令におけるリラクセーション特性に関しては過去に1, 2の報告例^{6), 7)}を数えるのみである。このような理由として、リラクセーション試験を実施する際に、供試体に対するひずみ制御および応力緩和量の検出などにおいて多くの測定技術上の困難を伴うことなどが考えられる。すなわち、一定ひずみ負荷条件下におけるリラクセーション試験においては、試験実施

* 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 工修 菊水化学工業株式会社
(〒484 犬山市羽黒新田)

*** 正会員 工博 岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

中、長期間にわたり供試体のひずみを一定に制御しながら、継続的に負荷応力の変化量を記録してゆく必要があるが、実際の試験においてこれらを精度よく行うことは、相当の試験技術を必要とするのである。しかし、近年の各種実験測定機器への電子技術の導入と実験技術の飛躍的な向上により、従来は実施困難な試験の1つであったコンクリートのリラクセーション試験が比較的精度よく行うことが可能となった。

著者らは、供試体のひずみ制御を精度よく行うことを念頭において構築した試験機システムを用い、温度応力解析において特に重要となる若材令コンクリートの圧縮および引張りリラクセーション特性について、その一部をすでに報告している^{8)~10)}。本研究は、これら著者らの既往の研究にさらに多くの系統的に計画された実験を追加し、圧縮ならびに引張りリラクセーション特性とこれに及ぼす載荷材令ならびに載荷ひずみ（応力）レベルの影響を明らかにするとともに、実験より得られたデータをもとに、圧縮ならびに引張りリラクセーション特性に対する評価式の提案を行ったものである。

2. コンクリートのリラクセーション特性に関する既往の研究

コンクリートのリラクセーション特性に関する既往の報文は、クリープに関するものに比べてきわめて数が少ない。Hanson¹¹⁾は、材令28日（圧縮強度約360 kgf/cm²）と材令90日（圧縮強度約370 kgf/cm²）の各材令において、強度の8%の圧縮応力を導入した場合のリラクセーション特性について、材令300日における緩和量は14.7 kgf/cm²（対導入応力比50%）および11.4 kgf/cm²（対導入応力比39%）であったことを報告している。Ross¹²⁾は、材令7~10日（推定圧縮強度約480 kgf/cm²）において、強度の30%、および22%の応力を導入した場合のリラクセーション特性について、材令140日の緩和量は、前者で75 kgf/cm²（対導入応力比51%）、後者においては57 kgf/cm²（対導入応力比54%）であったことを報告している。Chang and Kesler¹³⁾は、材令45日（圧縮強度357 kgf/cm²）、同100日（圧縮強度250 kgf/cm²）および同217日（圧縮強度287 kgf/cm²）の3種類の供試体で、導入応力をおのおの圧縮強度の67%、82%および58%とした場合の緩和量は、それぞれ8日経過後90 kgf/cm²（対導入応力比37%）、82日経過後92 kgf/cm²（対導入応力比45%）および35日経過後82 kgf/cm²（対導入応力比49%）であったことを報告している。以上の各研究に対し、Taylor and Maurer¹⁴⁾は、従来のリラクセーション試験においては、供試体ひずみの拘束方法に問題があったことを指摘し、電子負荷制御付油圧試験機を用いて圧縮リラクセーション

ン特性に及ぼす導入応力レベル、湿度条件、コンクリート強度および再負荷などの影響を検討している。試験材令は大部分が42日となっている。試験の結果、載荷応力レベルが高くなればリラクセーションも大きくなる、湿度が乾湿いずれの方向であれ変化する場合には緩和速度が大きくなる、強度の影響は明確ではない、Ross¹⁵⁾の提案したクリープ実験式がリラクセーション関数として適用できることなどを明らかにしている。西林、木山¹⁶⁾は普通ならびに軽量コンクリートの破壊前後の高応力、高ひずみ下での圧縮緩和現象を明らかにしている。試験材令は約1年で、載荷はひずみ負荷制御装置付剛性試験機を用いている。実験の結果、リラクセーション関数としてRossの式と類似の双曲線型の実験式を用いることができる、緩和量が終局緩和量の1/2となる時間は6分前後である、終局緩和量はコンクリートの種類による変化は少なく導入応力レベルに比例し、比例定数は強度破壊点までは7~8%でそれ以降は13~15%となることなどを報告している。木山、西林、井上、北村¹⁷⁾は、材令3か月の普通ならびに軽量コンクリートの引張りリラクセーションを明らかにしている。導入応力は、引張強度の30~90%としている。実験の結果、引張りリラクセーション関数として西林、木山がすでに提案した¹⁶⁾圧縮下のリラクセーション関数と同型の実験式を用いることができる。1/2緩和時間は0.4~1.8分となり、引張緩和現象はきわめて短期終結性である、終局緩和量は圧縮下の特性と同様、導入応力レベルに比例するが、その比例定数は0.03~0.06となり圧縮緩和の約半分となることなどを報告している。野中^{6),7)}は、若材令コンクリートの引張りリラクセーション特性に及ぼす載荷材令と養生方法の影響について検討を行っている。載荷材令は5, 8, 11日の3レベル、養生方法は水中と気中の2種類とし、載荷応力は引張強度の40%としている。結論として、西林、木山^{16),17)}が若材令コンクリートの引張りリラクセーション関数として適用可能である、1/2緩和時間は水中養生で4~9時間、気中養生では3~6時間となる、終局緩和量は概略70%以下となることなどを報告している。野中の研究は、温度応力の解析を念頭において行われたものであり、若材令における特性を対象としている点では注目に値するが、供試体ひずみの制御法にやや問題があり、実験により得られた結果のばらつきはきわめて大きく、このため引張りリラクセーション特性に及ぼす載荷材令などの影響は必ずしも明らかになっていない。また、載荷材令の影響を考慮した引張りリラクセーション特性評価式の提案までには至っていない。

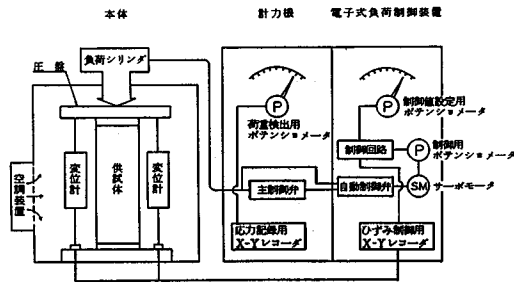
3. 試験機システム

(1) 圧縮リラクセーション試験

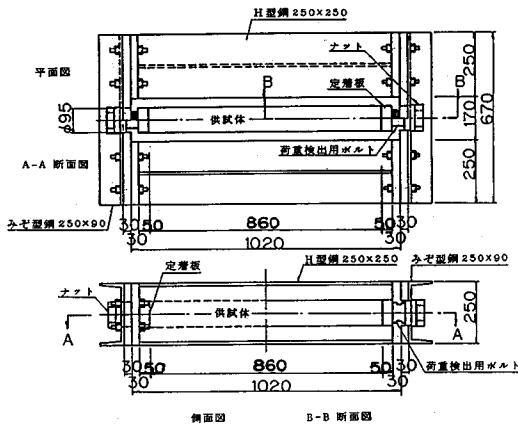
圧縮リラクゼーション試験は、図—1に示すように電子式荷重制御装置付万能試験機を主体とするものである。図において、供試体のひずみは試験機圧盤間変位として変位計により検出される。供試体のひずみは、ひずみ制御用 X-Y レコーダを介して荷重制御回路に入力される。制御回路では、入力された供試体のひずみ量と試験条件として規定されたひずみ設定値とを比較し、両者の差をもとにポテンシオメータを介してサーボモータで制御弁を動作させ、圧盤間変位を補正することにより供試体のひずみを一定に保つような機構になっている。一方、供試体における応力緩和量は、荷重検出用のポテンシオメータの出力として X-Y レコーダ上に記録される。なお、本研究ではひずみ検出用の変位計として 1/1 000 mm 精度のものをを用いたが、試験機システムの総合的な制御精度は、変位計のほかに電子制御回路の調整、増幅アンプの安定性、油温等いくつかの要因に影響を受ける。本研究で用いた試験機システムの総合的な制御精度は、供試体ひずみに対して $\pm 1\%$ 以内であることを確認している。

(2) 引張りリラクゼーション試験

引張りリラクゼーション試験は、図—2に示すような、高剛性荷重フレームにより実施した。供試体への引張り



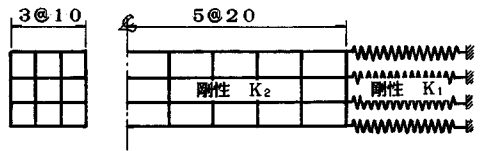
図—1 圧縮リラクゼーション試験装置



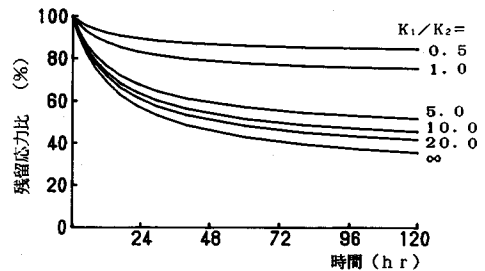
図—2 引張りリラクゼーション試験装置

ずみの導入は、供試体両端に埋設された定着盤を介した特製ボルトによるボルト締めにて行った。供試体に引張りひずみを導入すると、その反力により載荷フレームには弾性変形が生じるが、この変形は供試体のリラクゼーションに伴い弾性回復する。したがって、フレームの変形が大きい場合は、一定ひずみの保持という点において、実験精度上、大きな問題が生じるものと考えられる。

本研究ではリラクゼーション実験に先立ち、図—3に示す解析モデルを用いて拘束体 K_1 と供試体 K_2 の比 K_1/K_2 が実験結果に及ぼす影響を、有限要素法による数値シミュレーションにより検討を行った。解析は、 K_1/K_2 を 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 および無限大 (供試体完全拘束) の 6 ケースについて実施した。解析手順としては、最初に供試体に初期ひずみを導入し、その後の時間経過に伴うばね反力の変化を求め、これを供試体のリラクゼーション測定値とした。載荷材令は 3 日とし、コンクリートの弾性係数ならびにリラクゼーション特性は、著者らが先に実験により求めたものを用いた^{8)~10)}。図—4に解析結果を示す。図から剛性比 K_1/K_2 はリラクゼーション測定値に大きな影響を及ぼし、 K_1/K_2 が小さくなると完全拘束の場合に比べて緩和量を小さく測定する傾向にあることがわかる。一方、緩和の進行率は各解析ケースともほとんど変化がない。完全拘束状態における終局緩和量を基準として、剛性比が 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 および 20.0 となった場合の誤差は、それぞれ 77%, 63%, 26%, 16% および 9% となる。以上のような数値シミュレーションの結果から、拘束体と供試体の剛性 K_1/K_2 が 10 程度以上であれば実用上十分な精度で完全拘束状態におけるリラクゼーション特性を求められることができると判断した。



図—3 解析モデル



図—4 解析結果

本実験においては、後述のように断面が10×10 cm、長さ86 cmのコンクリート供試体を用いているので、弾性係数を 30×10^4 kgf/cm²とすると供試体の変形は0.0287 mm/tとなる。本研究では、先に述べた有限要素法による引張りラクセーション試験の数値シミュレーション結果をふまえて、試験時に生じる載荷フレームの変形が、供試体の変形の1/10以下、すなわち0.002 mm/t以下になるよう、250×250 H型鋼および250×90 溝型鋼の大断面型鋼により構成された載荷フレームを用いた。応力緩和量の検出は、ひずみ導入用ボルトの一部に電気抵抗線ひずみ計を貼付し、その出力をX-Yレコーダに記録することにより行った。供試体は弾性的に支持されており、また、試験時に供試体にできるだけ均一なひずみが導入できるように、供試体中央の4面に貼付した4枚の電気抵抗線ひずみ計の出力を常にモニターできるようにしている。実験に際しては、載荷時偏心を小さくするため、載荷フレーム、型枠、定着板の組み立てならびに供試体の作成には万全を期した。これにより、載荷時における供試体4面でのひずみのばらつきを15 μ 以下に抑えることができた。

4. 実験方法

(1) リラクセーション試験

本研究では、コンクリートのリラクセーション特性に大きな影響を及ぼすと考えられる、載荷材令と載荷ひずみレベルの2つを実験因子として取り上げた。載荷材令は、圧縮リラクセーション試験、引張りラクセーション試験とも1日、3日、7日、14日および21日の5材令とした。供試体に対する拘束ひずみの規定については、本研究では直接的なひずみを用いる方法にかえて、圧縮あるいは引張強度に対する一定比率の応力により間接的にこれを規定した。すなわち、試験時の供試体への載荷レベルは、応力-強度比により決定した。本実験での導入応力レベルは、圧縮リラクセーション試験については、圧縮強度の30%、60%および80%の3レベルとした。一方、引張りラクセーションでは手動によるボルト締め載荷のため、正確な応力レベルのコントロールが困難となり応力レベルにばらつきを生じる。このため本研究では、試験結果を整理するにあたり応力レベルの範囲を設定し、これを引張強度の30%以下、30~50%および60%以上の3レベルとした。表-1にリラクセーション実験各シリーズにおける実験条件を示す。供試体は、圧縮リラクセーション試験では10×10×40 cm、引張りラクセーション試験では10×10×86 cmの角柱供試体を用いた。各供試体は試験直前まで温度20°C、湿度90%以上の恒温室内で養生を行い、試験時には供試体からの水分の逸散を防ぐために表面にパラフィンを塗布し

た。そして、試験実施中は、圧縮リラクセーション試験については空調機を用いて(図-1参照)、また、引張りラクセーション試験では恒温室内で実験を行うことにより供試体温度を常に $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内に保った。各リラクセーション試験に先立ち、圧縮および引張強度試験を行い、これらの強度実測値を用いて供試体への載荷応力の値を決定した。なお、材令1日での引張強度は直接引張試験から、その他の材令については割裂試験により求めた。

(2) 供試体

供試体作成に用いたコンクリート用材料としては、セメントは普通ボルトランドセメント、細骨材は川砂(比重2.58, F.M. 2.53)そして粗骨材は碎石(比重2.60, 最大寸法25 mm)を用いた。コンクリートの示方配合を表-2に、また、材令1日、3日、7日、および28日における圧縮強度、引張強度および弾性係数を表-3に示す。

表-1 実験条件

供試体	載荷応力	載荷材令 (day)	載荷 応力比(%)
C1030	圧縮	1	30
C1050	圧縮	1	50
C1080	圧縮	1	80
C3030	圧縮	3	30
C3050	圧縮	3	50
C3080	圧縮	3	80
C7030	圧縮	7	30
C7050	圧縮	7	50
C7080	圧縮	7	80
C14050	圧縮	14	50
C21050	圧縮	21	50
T1030	引張	1	0~30
T1060	引張	1	30~60
T3030	引張	3	0~30
T3060	引張	3	30~60
T7060	引張	7	30~60
T70100	引張	7	60~80
T14060	引張	14	30~60
T140100	引張	14	60~80
T21030	引張	21	0~30
T21060	引張	21	30~60
T210100	引張	21	60~80

表-2 コンクリートの示方配合

スランパ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比(%)	細骨材率 s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				C	W	S	G
8	1.5	50	44	346	173	793	996

表-3 コンクリートの力学的特性

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)
1	44	4.3	1.0
3	177	15.7	2.0
7	280	23.3	2.4
28	388	25.0	2.9

5. リラクゼーション関数

本研究では、リラクゼーション関数として西林、木山^{16),17)}の研究を参考にして、式(1)に示すような双曲線型の実験式を考え、圧縮ひずみ拘束下においても、引張ひずみ拘束下においてもこの実験式によりリラクゼーション特性を表わすことにした。

$$\frac{\sigma}{\sigma_i} = \frac{A+Ct}{A+t} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 σ : 荷重 t 時間後の応力、 σ_i : 初期応力、 A, C : 実験定数

実験定数 A, C は、次のような物理的意味をもつ。式(1)において、 $t \rightarrow \infty$ とすると、 $\sigma/\sigma_i = C$ となる。すなわち、定数 C は、初期応力に対する終局残留応力の比率を表わす。したがって、 $(1-C)$ が終局緩和量を表わすことになる。また、 $t = t_a$ のとき、 $\sigma = \sigma_a = (\sigma_i + \sigma_v)/2$ とおけば、 $t = A$ となる。ただし、 σ_v は終局残留応力である。すなわち、定数 A は、緩和量が終局緩和量の 1/2 に達する時間を表わしている。

6. 実験結果と考察

(1) 圧縮リラクゼーション特性

図-5~9 に、荷重材令 1, 3, 7, 14 および 21 日における、各応力レベルに対する圧縮リラクゼーション試験結果を示す。各図において、縦軸は初期応力に対する残

留応力の比率を、また横軸は応力導入後の経過時間を表わす。さらに、図中には、後述のように実測値から最小二乗法を適用して求めたリラクゼーション関数も合わせて示してある。各実験結果から、一部の実験曲線において温度変化に伴う供試体ひずみ検出用変位計の出力変動に起因すると考えられる周期的な変動が認められるが、一般的にはなめらかなリラクゼーション曲線が得られている。各材令、各応力レベルに共通した定性的特徴として、荷重後 1 時間以内に全緩和量の 25~40% 程度の応力緩和が急速に進行し、その後はだいに緩慢となり荷重後約 100 時間程度ではほぼ最終的な緩和量に達することが挙げられる。すなわち、リラクゼーションは、クリープに比べてかなり短期終結性であると考えられる。図-5の、荷重材令 1 日におけるリラクゼーション曲線につ

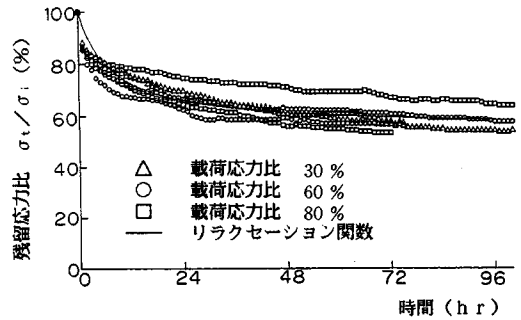


図-7 圧縮リラクゼーション曲線 (材令 7 日)

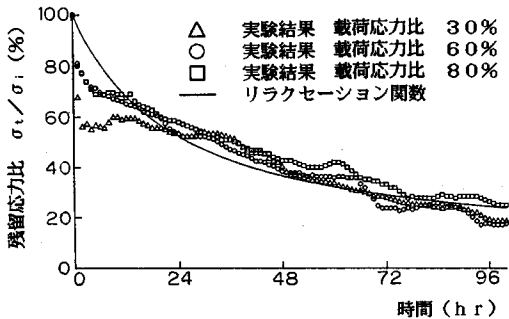


図-5 圧縮リラクゼーション曲線 (材令 1 日)

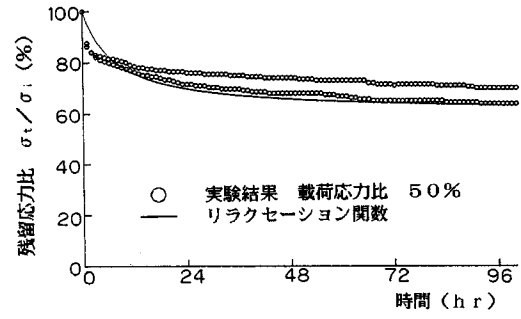


図-8 圧縮リラクゼーション曲線 (材令 14 日)

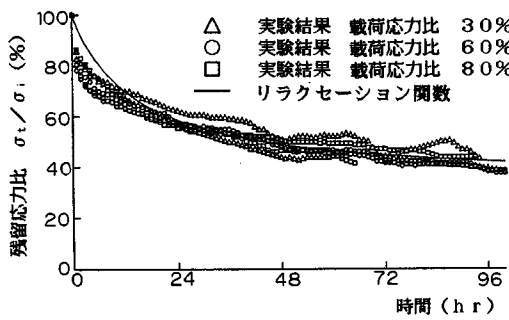


図-6 圧縮リラクゼーション曲線 (材令 3 日)

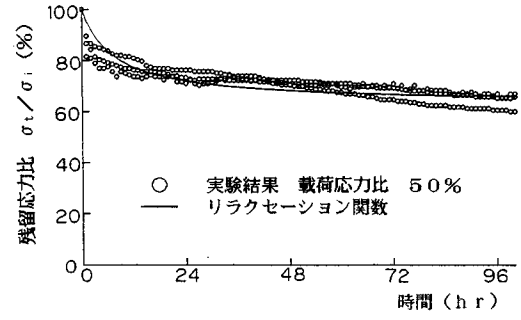


図-9 圧縮リラクゼーション曲線 (材令 21 日)

いて、載荷応力レベルが30%、50%および80%と変化しても各曲線間に大きな差異は認められない。すなわち、1/2緩和時間と終局緩和量は、いずれの応力レベルにおいてもそれぞれ25~30時間および95%程度となっている。図—6~9から、その他の材令についても、載荷応力レベルが変化してもリラクセーション曲線には有意な差異は認められない。このことから、載荷材令にかかわらず少なくとも圧縮強度の80%程度の応力レベルまでは、応力緩和量は載荷応力に比例するという線形則がほぼ成立するものと考えられる。次に、リラクセーション特性に及ぼす載荷材令の影響に注目すると、表—4に示すように載荷材令が大きくなるに伴い1/2緩和時間、終局緩和量ともに小さくなっている。すなわち、載荷材令が大きくなると緩和現象の進行速度が大きくなるとともに、終局緩和量は小さくなる傾向を示すことがわかる。さて、前述のように図—5~9の各図中に示されたリラクセーション関数は、各材令におけるすべての実験値に最小二乗法を適用することにより求めたものであるが、各図から、各材令とも載荷初期、特に6時間程度まではリラクセーション関数は実測値より大きな値を与えるものの、全般的にみると実験値とリラクセーション関数とはよく合致している。温度応力などのリラクセーション解析では、解析時間ステップ内での応力緩和増分の評価が必要となる。しかし、時間ステップ内での緩和の過程については特に問題とはならない。一方、マスコンクリートの一般的な温度応力解析では、解析時間ステップを小さく設定する場合でも6時間程度とすれば解析精度的には十分であると考えられるので、各図にみられるようなリラクセーション関数の載荷後6時間以内における誤差は大きな問題とはならず、式(1)を温度応力解析における若材令コンクリートの圧縮リラクセーション関数として用いることが可能であると考えられる。次に、実験から得られたすべてのリラクセーション関数における定数AならびにCの値を、片対数紙上にプロットすると図—10、11に示すようになる。定数Aは1/2緩和時間を、また定数Cは終局残留応力を表わすが、図から、材令の進行に伴い定数Aは減少し、一方、定数Cは逆に増加する傾向を示している。ただし、定数Aは定数Cに比べてかなりのばらつきを生じている。本研究では定数AならびにCの図上での定性的な

傾向から、これらを材令7日を境とした2本の直線で表わすことにした。この際、定数Aについてはばらつきが大きく材令tとの相関も小さいと推定されるが、その評価に際しては、ばらつきの範囲内での平均的な値を与えればよいと考えた。定数AならびにCの評価式として対数関数を考え、最小二乗法によりこれらを次のように決定した。

$$A = -8.25 \log t + 49.74 \quad (t < 168 \text{ h}) \dots\dots (2\cdot a)$$

$$= 7.43 \quad (t \geq 168 \text{ h}) \dots\dots (2\cdot b)$$

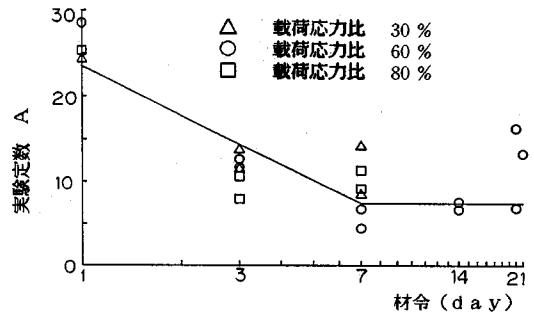
$$C = 0.25 \log t - 0.75 \quad (t < 168 \text{ h}) \dots\dots (3\cdot a)$$

$$= 0.07 \log t + 0.18 \quad (t \geq 168 \text{ h}) \dots\dots (3\cdot b)$$

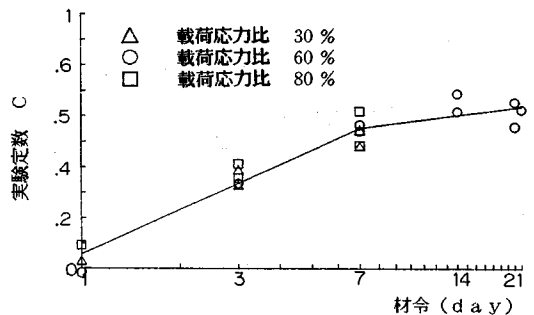
式(2)と式(3)をそれぞれ図—10ならびに図—11に実線で示す。以上、本節で示した実験結果とその解析により、任意材令の圧縮リラクセーション特性が、式(1)、(2)、(3)により評価することが可能となった。

(2) 引張りリラクセーション特性

図—12~16に、載荷材令1, 3, 7, 14, および21日における、各応力レベルに対する引張りリラクセーション試験結果を示す。各図に示すように、各実験結果ともきわめて安定したリラクセーション曲線が得られており、本研究で採用した剛性載荷フレームによる試験システムにより、若材令コンクリートの引張りリラクセーション試験を精度よく実施することが可能であると考えられる。さて、引張りリラクセーション特性の全般的な特徴として、圧縮下の特性よりもさらに短期終結性であり、しかも、



図—10 材令と実験定数Aの関係



図—11 材令と実験定数Cの関係

表—4 圧縮リラクセーション特性に及ぼす載荷材令の影響

載荷材令 (日)	1/2緩和時間 (時間)	終局緩和量 (%)
3	10~14	60~65
7	5~15	40~50
14	7~8	30~40
21	7~15	35~45

終局緩和量もかなり少ないことなどが挙げられる。すなわち、いずれの載荷材令においても、載荷後2~3時間程度ではほぼ応力緩和挙動が終了し、終局緩和量も載荷材令1日では約25%、その他の材令では15%程度になっている。さらに、各載荷材令において、載荷応力レベルの影響に注目すると、緩和特性に対する載荷応力レベルの影響は認められず、したがって、少なくとも引張強度の80%程度の範囲内では、圧縮下の特性と同様、引張リラクゼーション特性の載荷応力に関する線形則が成立すると考えて大きな誤りはないものと考えられる。次に、引張リラクゼーション特性に及ぼす載荷材令の影響に注目すると、図-12~16ならびに表-5から、載荷材令1日を除き、載荷材令3日以降は材令が変化しても引張リラクゼーション特性はほとんど変化せず、材令3~21日程度の範囲内ではほぼ一定と考えてよいことがわかる。これに対して、載荷材令1日では他の材令に比較して、1/2緩和時間においては明瞭な差異は認められないものの、終局緩和量は10%程度大きくなる傾向にある。次に、図-12~16の各図中に実線で示されたリラクゼーション関数は、圧縮下の特性と同様、最小二乗法により求めたものであるが、各図から、いずれの材令においても実験値とリラクゼーション関数とはよく合致しており、したがって、引張リラクゼーション関数として、式(1)に示す圧縮下におけるリラクゼーション関数と同型の実験式を用いることが可能であると考えられる。次

に、図-17, 18に、すべての実験結果に対する定数A、ならびにCの値を片対数紙上にプロットしたものを示す。図から、材令の増加に伴う定数AならびにCの変化は、圧縮下の特性と比較して小さいことがわかる。定数Aは、定数Cに比べてばらつきも大きく材令tとの相関は明確ではないが、この場合、これをばらつきの範囲内で一定と考えても大きな誤りはないものと考えられる。定数Cについても、材令3日以降はほぼ一定値を示す傾向が認められる。圧縮下の特性と同様、定数A、Cと材令との関係を最小二乗法により決定した結果を、式(4)、(5)ならびに図-15, 16に示す。

$$A = 0.32 \dots \dots \dots (4)$$

$$C = 0.10 \log t + 0.39 \quad (t < 72 \text{ h}) \dots \dots \dots (5 \cdot a)$$

$$= 0.85 \quad (t \geq 72 \text{ h}) \dots \dots \dots (5 \cdot b)$$

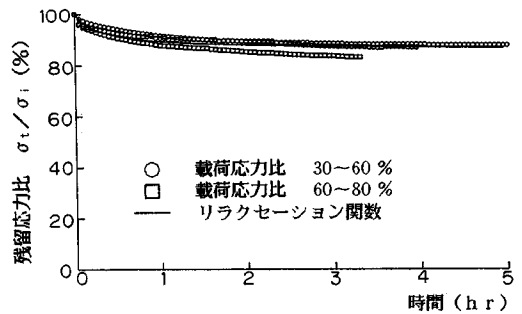


図-14 引張リラクゼーション (材令7日)

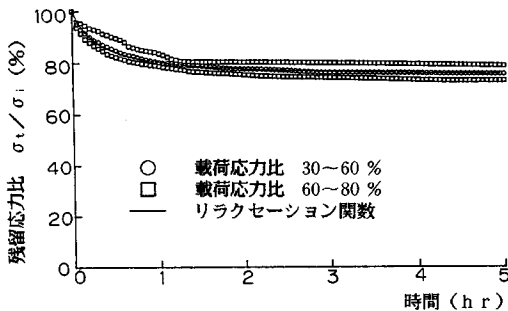


図-12 引張リラクゼーション曲線 (材令1日)

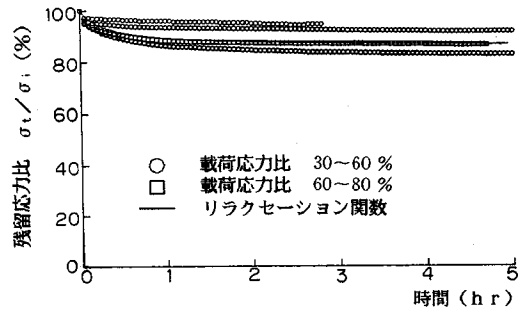


図-15 引張リラクゼーション曲線 (材令14日)

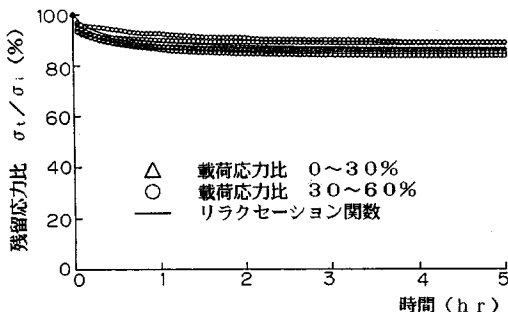


図-13 引張リラクゼーション曲線 (材令3日)

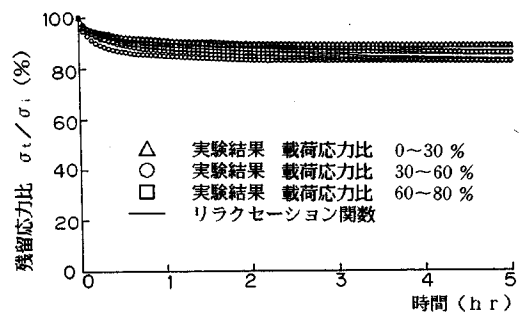


図-16 引張リラクゼーション曲線 (材令21日)

以上、本節で示した実験結果とその解析により、任意材令の引張りラクセーション特性を、式(1)ならびに式(4)、(5)により算定することが可能となった。

(3) 圧縮ラクセーション特性と引張りラクセーション特性の比較

圧縮ラクセーション特性と引張りラクセーション特性とを比較するため、図19~21 および表6に載荷材令1, 7 および 21 日における載荷応力レベル約 50 % での圧縮下の特性と引張下の特性とを合わせて示す。まず終局緩和量に注目すると、すべての材令において、圧縮下での終局緩和量は引張下の特性に比べかなり大きいことがわかる。すなわち、終局緩和量とは逆の終局残留応力でみれば、圧縮終局残留応力は引張終局残留応力に比べてかなり小さくなる。各材令における終局緩和量は、表6に示すように、引張下では圧縮下の 0.27~0.4 倍程度となっており、材令が小さいほど両者の差が大きくなる傾向を示している。次に、1/2 緩和時間は、各材令

とも引張下では圧縮下の 0.01~0.04 程度の値となっている。以上のことから、引張りラクセーション挙動は、圧縮下の挙動に比べきわめて短期終結性であることがわかる。さて、圧縮下の特性と引張下の特性とを全体的にみた場合、両者はかなり様相を異にするが、いま、載荷後 1 時間以内のごく初期、すなわち応力緩和が急速に進行する期間に注目すると、両者の緩和挙動がほぼ合致している点が興味深い。すなわち、載荷材令 1 日では、載荷後 1 時間における緩和量は圧縮、引張とも 20 % 程度、載荷材令 7 日と 21 日では、いずれも 10 % 程度となっている。このように、載荷 1 時間までは圧縮、引張ともほぼ同様な緩和挙動を示すが、その後、圧縮下では緩和速度がやや緩慢とはなるものの引続き緩和が進行するのに対し、引張下ではまもなく緩和がほぼ終了する。このような結果に対し、圧縮ラクセーションと引張りラクセーションの生成機構ならびにこれらの相違に関して次のような推論も成り立つと考えられる。コンクリートのクリープならびにラクセーションは、セメントゲル水の圧出(シーページ)、ゲル粒子の粘性流動および粒子間のすべり等に起因する現象と考えられる。ここで、西林¹⁸⁾は、クリープがコンクリートの種類、応力あるいは載荷材令に影響されるのは、それぞれにおけるシーページ効果が異なるためであると述べている。本研究で得ら

表-5 引張りラクセーション特性に及ぼす載荷材令の影響

載荷材令 (日)	1/2 緩和時間 (時間)	終局緩和量 (%)
1	0.37	26
3	0.22	14
7	0.48	15
14	0.30	13
21	0.32	16

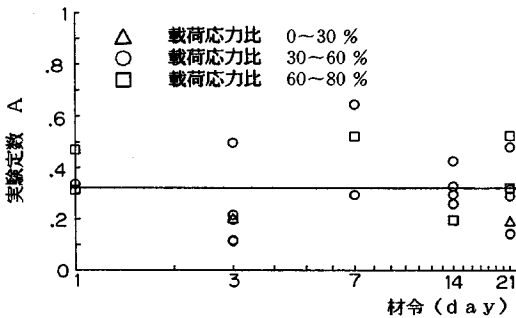


図-17 材令と実験定数 A の関係

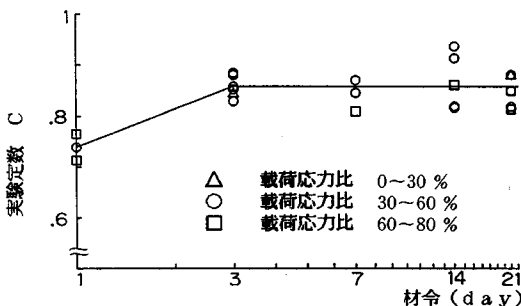


図-18 材令と実験定数 C の関係

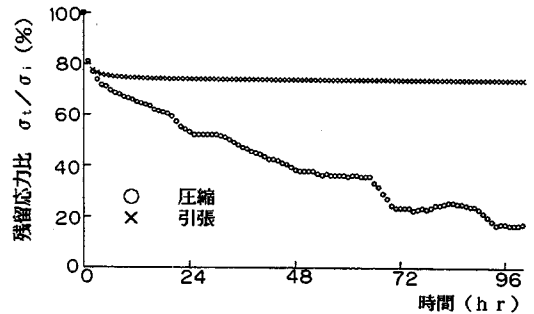


図-19 圧縮ラクセーションと引張りラクセーション (材令 1 日)

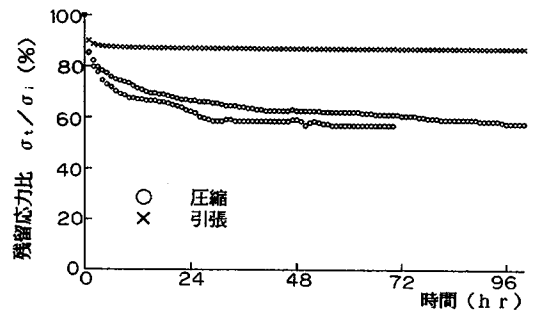


図-20 圧縮ラクセーションと引張りラクセーション (材令 7 日)

れたような、圧縮リラクゼーションと引張りリラクゼーションの相違について、圧縮下と引張下ではシーページ、ゲル粒子の粘性流動あるいは粒子間のすべり等からなるリラクゼーション生成機構の特性値（たとえば、レオロジーモデルにおけるばね定数および粘性係数）の分布が異なり、このため両者における全般的な緩和挙動に違いが現われたものと解釈することもできる。しかし、引張下と圧縮下では、同一応力レベルであっても供試体中の応力の絶対値やマイクロクラックの発生とその影響も異なるため、なお多くの検討が必要である。

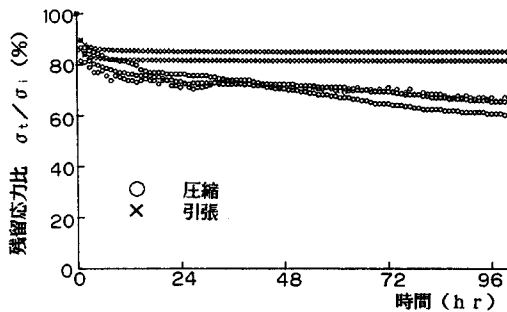
7. ま と め

本研究は、コンクリート構造物の温度応力解析において重要となる、若材令コンクリートの圧縮ならびに引張ひずみ拘束下におけるリラクゼーション特性と、これらに及ぼす載荷材令および載荷ひずみ（応力）レベルの影響を実験的に明らかにしたもので、得られた実験データをもとに圧縮ならびに引張りリラクゼーション特性に対する評価式の提案を行った。

本研究の成果を要約すれば次のようになる。

(1) 載荷材令1日における終局緩和量は、圧縮下で平均95%、引張下で平均26%となった。同様に、載荷材令3日では、それぞれ63%ならびに14%、載荷材令7日では、45%ならびに15%、載荷材令14日では、35%ならびに13%、そして、載荷材令21日では、40%ならびに16%となった。一方、1/2緩和時間は、圧縮下で5~30時間、引張下では平均0.34時間程度の値となった。

(2) コンクリートのリラクゼーション挙動は、これ



図—21 圧縮リラクゼーションと引張りリラクゼーション (材令21日)

表—6 圧縮リラクゼーションと引張りリラクゼーション

載荷材令 (日)	1/2緩和時間 (時間)		終局緩和量 (%)	
	圧縮下	引張下	圧縮下	引張下
1			95	26
7	7~28	0.3	45	14
21			40	16

と対極的なクリープ挙動に比べてかなり短期終結性である。すなわち、圧縮リラクゼーションの場合、載荷後1時間以内で全緩和量の25~40%程度が速やかに進行が、その後はしだいに緩慢となり載荷後約100時間ではほぼ最終的な緩和量に達する。一方、引張りリラクゼーションはさらにこの傾向が著しく、載荷後2~3時間ではほぼ最終的な緩和量に達する。

(3) 引張りリラクゼーションにおける終局緩和量は、圧縮リラクゼーションの0.27~0.4倍、また1/2緩和時間は0.01~0.04倍程度の値を示す。すなわち、引張りリラクゼーションは、圧縮リラクゼーションに比べきわめて短期終結性で、応力緩和量もかなり少ない。

(4) 載荷後1時間までの、応力緩和が急速に進行する期間における応力緩和量は、圧縮下、引張下ともほぼ同様な値となる。そして、それ以降、圧縮下では引き続き徐々に応力緩和が進行するのに対し、引張下ではまもなく応力緩和が終結する。

(5) 圧縮ならびに引張りリラクゼーションにおける終局緩和量とリラクゼーションの終結時間は、ともに載荷材令の影響を受け、材令が進行するに伴い終局緩和量は小さくなり、終結時間は短くなる。しかし、引張りリラクゼーション特性に及ぼす載荷材令の影響は、圧縮リラクゼーション特性に及ぼす載荷材令の影響に比べ小さい。

(6) 載荷応力レベルが、少なくとも圧縮強度の80%あるいは引張強度の80%以下の範囲内では、応力緩和量は載荷応力にほぼ比例する。

(7) 若材令コンクリートのリラクゼーション関数として、圧縮、引張とも式(1)のような双曲線型の実験式を適用することができる。そして、式中の実験定数は式(2)、(3)あるいは、式(4)、(5)のような載荷材令の関数として求めることができ、これらの評価式により、任意材令の圧縮ならびに引張りリラクゼーション特性を評価することが可能である。

謝 辞：本研究において、実験を実施するにあたっては、河合 敦君（現・愛知県庁）、赤川 徹君（現・名古屋鉄道）の両君に多大の協力を頂きました。また、資料整理にあたっては本学の近藤照子氏の援助を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) McHenry, D. : A New Aspect of Creep in Concrete and its Application to Design, Proc., ASTM, Vol. 43, pp. 1069~1043, 1943.
- 2) Raphael, J. M. : The Development of Stresses in Shasta Dam : Tran., ASCE, Vol. 118, pp. 289~309, 1952.
- 3) Carlson, R. W. and Thayer, D. P. : Surface Cooling of Mass Concrete to Prevent Cracking, Jour. of the ACI,

- Proc., Vol. 29, pp. 107~120, 1959.
- 4) Arutyunyan, L. Kh. : Some Problems in the Theory of Creep in Concrete Structures, Pergamon Press, 1966.
 - 5) 君島博次：ダムコンクリートのクリープに関する研究(第2部)―実在ダムにおける応用に関する研究，電力中央研究所，技術研究所報，第10巻，第5，6号，pp. 47~97，1960.
 - 6) 野中資博：普通ポルトランドセメントコンクリートの温度ひびわれ発生の関与する諸物性について，農業土木学会論文集，91号，pp. 51~58，1981.
 - 7) 野中資博：コンクリートの引張応力緩和に関する研究，農業土木学会論文集，96号，pp. 58~63，1981.
 - 8) 河合 敦・平田正成・小柳 治・森本博昭：若材令コンクリートの引張りラクセーション特性について，土木学会第41回年次学術講演会概要集，pp. 375~376，1986.
 - 9) 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.
 - 10) 平田正成・河合 敦・森本博昭・小柳 治：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年次講演会論文集，pp. 37~40，1986.
 - 11) Hanson, J. A. : A 10-year Study of Creep Properties of Concrete, U.S. Bureau of Reclamation, Concrete Laboratory Report No. SP 38, 1953 (文献14より引用).
 - 12) Ross, A. D. : Creep of Concrete under Variable Stress, Jour. of the ACI, Proc., Vol. 54, No. 9, pp. 739~758, 1958.
 - 13) Chan, T. S. and Kesler, C. E. : Correlation of Sonic Properties of Concrete with Creep and Relaxation, Proc., ASTM, Vol. 56, pp. 1257~1272, 1956.
 - 14) Taylor, M. T. and Maurer, G. K. : Short-term Stress Relaxation of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, pp. 123~135, 1973.
 - 15) Ross, A. D. : Concrete Creep Data, The Structural Engineer, Vol. 15, No. 8, pp. 314~326, 1937 (文献14より引用).
 - 16) 西林新蔵・木山英朗：コンクリートの応力緩和に関する一研究，土木学会論文報告集，214号，pp. 145~153，1975.
 - 17) 木山英朗・西林新蔵・井上正一・北村安朗：コンクリートの引張緩和現象に関する一考察，鳥取大学工学部研究報告，第7巻，pp. 75~84，1976.
 - 18) 西林新蔵：人工軽量骨材コンクリートのクリープに関する研究，コンクリートジャーナル，Vol. 7, No. 1, pp. 2~10，1969.

(1987. 8. 19・受付)