

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学)
 同 山田 和夫 (同)
 同 〇富田 彰則 (同)

1. まえがき コンクリートの高ひずみ領域における変形・破壊挙動の解明は、最近のコンクリート工学における重要な研究課題の一つであるが、なかでもコンクリート系構造物の設計に「時間」の因子を導入するためには、コンクリートの時間依存型力学特性に関する資料を早急に整備する必要がある。コンクリートの時間依存型力学特性のうち、応力緩和現象については、クリープ現象と比べて、実験が非常に困難なこと、およびプレストレスト・コンクリートなど一部の構造物を除いては、これが構造耐力上安全側の要因となる場合が多いことなどの理由から、いまのところ、二、三の実験報告がみられるに過ぎない。^{1)~2)} 一方、Brooks・Neville³⁾、Bastgen⁴⁾らは、コンクリートのクリープ試験結果を用いて、応力緩和量を推定する方法を提案しているが、応力緩和に関する実験結果が必ずしも十分に整っていないため、これらの研究成果の汎用性が確かめられるに至っていない。そのため、本研究ではコンクリートの応力緩和に関する2シリーズの実験(実験-Iおよび実験-II)と、応力緩和とクリープの相関性を調べるための実験(実験-III)を行って、これらの時間依存型力学特性に及ぼす粗骨材の品種、混入量、粒径、水セメント比、初期設定応力レベルなどの影響について検討することにした。

2. 実験方法 2.1 実験の概要: 本研究ではTable 1に示すような3シリーズの実験を行った。実験-Iは、ガラス球を粗骨材として用いたコンクリートに関する応力緩和実験であり、実験要因として水セメント比(W/C)、粗骨材容積比(Va/Vc)、粗骨材粒径(ϕ_a)および初期設定応力レベル($\bar{\sigma}_i = \sigma_i / F_c$, ここに σ_i : 初期設定応力度, F_c : 圧縮強度)を取り上げた。実験-IIは、粗骨材として川砂利および人工軽量骨材を用いたコンクリートの応力緩和実験であり、実験要因として水セメント比(W/C)、粗骨材容積比(Va/Vc)および初期設定応力レベル($\bar{\sigma}_i$)を取り上げた。また、実験-IIIでは、粗骨材品種および初期設定応力レベル($\bar{\sigma}$)を実験要因として、応力緩和とクリープの比較実験を行った。試験体はすべて、直径10cm、高さ20cmの円柱体とした。3シリーズの実験で用いた試験体総数は467個である。 2.2 試験体の製作方法: 試験体の製作には、普通ポルトランドセメントおよび川砂(最大粒径2.5mm)を使用し、粗骨材としては、実験-Iではガラス球($\phi_a = 12.3$ mmおよび24.6mm)を用い、実験-IIでは川砂利と非造粒型人工軽量骨材を用いた。また、実験-IIIではガラス球($\phi_a = 12.3$ mm)、川砂利および非造粒型人工軽量骨材の3種類を用いた。使用骨材の性質をTable 2に示す。また、Table 3にコンクリートの調合表を示す。試験体は、材令2日目に脱型後、実験-IおよびIIでは試験材令(4週)まで温度

Table 1 Outline of experiments

(a) Experiment-I

Type of concrete	W/C (%)	V _a /V _c	ϕ_a (mm)	$\bar{\sigma}$ (= σ_i/F_c)	Number of specimen
G-50-0.2-12	50	0.2	12.3	0.3	30
G-50-0.4-12	50	0.4	12.3	0.6	30
M-50	50	0	—	0.8	30
G-40-0.4-12	40	0.4	12.3	1.0	30
G-65-0.4-12	65	0.4	12.3	0.9*	30
G-50-0.4-24	50	0.4	24.6	0.8*	30
				0.6*	30
				0.3*	30

(b) Experiment-II

Type of concrete	W/C (%)	V _a /V _c	Type of aggregate	$\bar{\sigma}$ (= σ_i/F_c)	Number of specimen
N-50-0.4	50	0.4	N	0.3	30
N-65-0.4	65	0.4		0.6	30
N-40-0.4	40	0.4		0.8	30
N-50-0.2	50	0.2		1.0	30
M-50	50	0	—	0.9*	30
L-50-0.4	50	0.4	L	0.8*	30
				0.6*	30
				0.3*	30

(c) Experiment-III

Type of concrete	W/C (%)	V _a /V _c	Type of aggregate	$\bar{\sigma}$ (ton)	Number of specimen
G-50	50	0.4	G	1.0	35
L-50			L	1.0	36
N-50			N	2.0	36
					2.4

[Notes] W/C: Water-cement ratio, V_a/V_c: Aggregate volume concentration, ϕ_a : Diameter of glass balls, σ_i : Initial stress, F_c: Compressive strength, M: Mortar matrix, G: Glass balls, N: River gravel, L: Lightweight aggregate, *: Values at descending portion of σ - ϵ curve.

Table 2 Properties of aggregate

Type of aggregate	ϕ_a (mm)	ρ_a	W _a (%)	F.M.	V _w (kg/m ³)
Glass balls	12.3	2.50	—	4.00	—
	24.6				
River gravel	5.0, 15.0	2.56	1.88	6.71	1661
Lightweight	5.0, 15.0	1.36	8.76	6.42	846
River sand	<2.5	2.53	2.56	2.63	1556

[Notes] ϕ_a : Aggregate size, ρ_a : Specific gravity, W_a: Water absorption, F.M.: Fineness modulus, V_w: Bulk density.

Table 3 Mix proportions of concrete

Type of concrete	(kg/m ³)			
	Cement	Water	Fine agg.	Coarse agg.
G-50-0.2-12	574	287	804	500
G-50-0.4-12	427	213	597	1000
G-40-0.4-12	565	226	226	1000
G-65-0.4-12	319	208	703	1000
G-50-0.4-24	427	213	597	1000
M-50	722	361	1010	—
N-50-0.4	427	213	597	1024
N-65-0.4	319	208	703	1024
N-40-0.4	565	226	452	1024
N-50-0.2	574	287	804	512
L-50-0.4	427	213	597	576

20°±1°Cの恒温水槽中で養生を行った。一方、実験-Ⅲでは材令4週まで水中養生を行った後、試験材令(17週)まで温度23°±3°Cの室内で、空中養生を行った。なお、この実験では試験体内部の水分の移動をなるべく小さくするために、材令8週目に試験体表面をエポキシ樹脂でコーティングした。

2.3 荷重および測定方法：応力緩和測定用試験体の荷重には、一定ひずみ拘束が極めて容易にできる100 t高剛性圧縮試験機を使用した。応力度(σ)が初期設定応力度(σ_i)に達するまでは、ひずみ速度($\dot{\epsilon}$)を一定($\dot{\epsilon}=1 \times 10^{-3}/\text{min.}$)として荷重し、応力度が所定の設定応力度に達した時点で、試験体のひずみ度を一定に保持した。荷重の測定は、試験機付属のロードセルによって行い、ひずみ度(ϵ)の測定には、試験体の両端間(測定長180mm)に取り付けた2個のひずみゲージ型変位変換器を用いた。荷重時間は原則として30分とした。一方、実験-Ⅲのクリープ測定用試験体の荷重には、最大容量12 tおよび20 tのコイルバネ式クリープ試験機を使用し、設定応力度(σ_i)に達するまで油圧ジャッキで加圧した。荷重は、コイルバネの両端間に取り付けた2個のダイヤルゲージの読みと校正表を用いて測定し、ひずみ度(ϵ)の測定には、試験体の両端間に取り付けた2個のダイヤルゲージを用いた。荷重期間は、原則として4週とした。

3.実験結果とその考察

3.1 コンクリートの応力緩和特性：Fig.1に実験-Ⅱによって得られた残留応力度(σ_t)と荷重時間(t)との関係の一例を示す。(1) 応力緩和量($\Delta\sigma_t$)と荷重時間(t)との関係：時間 t における応力緩和量($\Delta\sigma_t$)をFig.2に示す。Fig.2によれば、初期設定応力レベル($\bar{\sigma}_i$)が大きくなるにつれて、応力緩和量も増加する傾向を示し、また設定応力レベルが同じ場合は、応力下降域でひずみを保持した場合の緩和量は、応力上昇域での応力緩和量よりも大きくなるのがわかる。(2) 応力緩和の表示式：本研究では、コンクリートの応力緩和量($\Delta\sigma_t$)を次の3式によって表示した。

$$\Delta\sigma_t = \frac{\Delta\sigma_\infty \cdot t}{N + t} \quad \text{----- (1)}$$

$$\sigma(t) = \epsilon_0 (\gamma_M \cdot e^{-t/\tau_M} + \gamma_0) \quad \text{----- (2)}$$

$$\Delta\sigma_t = A \cdot \epsilon_0^m \cdot t^n \quad \text{----- (3)}$$

ここで、 $\Delta\sigma_t$ ：荷重時間 t における応力緩和量、 $\sigma(t)$ ：荷重時間(t)における残留応力度、 $\Delta\sigma_\infty$ ：終局緩和量、 ϵ_0 ：初期設定ひずみ度、 γ_M ：弾性率、 γ_0 ：極限弾性率、 η_M ：粘性率、 τ_M ：緩和時間(η_M/γ_M)、 A 、 m 、 n 、 N ：実験定数。

(1) 式は双曲線式であり、実験定数 N を($e-1$)で割った値は緩和時間($\Delta\sigma_t$ が $\Delta\sigma_\infty/e$ を示すときの荷重時間)を表わす。(1)式を変形して

$$\frac{t}{\Delta\sigma_t} = \frac{1}{\Delta\sigma_\infty} t + \frac{N}{\Delta\sigma_\infty} \quad \text{----- (1)'}$$

が得られるが、上式によれば $t/\Delta\sigma_t$ と t との関係は直線で表わされることになる。本実験結果を両者の関係で表わした一例をFig.3に示す。ただし、図の縦軸の値には圧縮強度(F_c)が掛けてある。実験-Ⅰ、ⅡおよびⅢの結果とも(1)'式では必ずしも表示しえず、むしろ2本の直線で表示した方が、実測値との適合性がよい。そのため、ここでは実験結果を2本の直線で表示して終局緩和量($\Delta\sigma_\infty$)の推定を行うことにした。なお、実験値を2本の直線で表示した場合の交点に相当する時間(t_j)は、約300~540秒となった。(2)式は、Fig.4に示すような3要素レオロジ

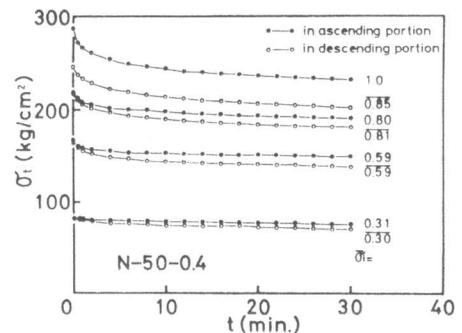


Fig.1 Relation between residual stress (σ_t) and loading period (t)

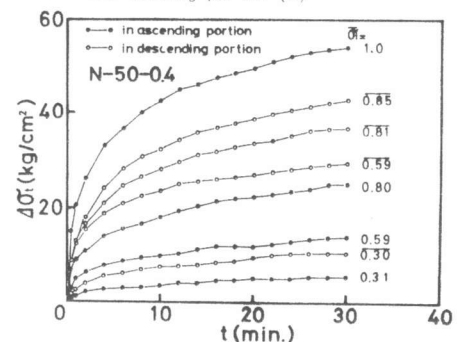


Fig.2 Relation between stress relaxation ($\Delta\sigma_t$) and loading period (t)

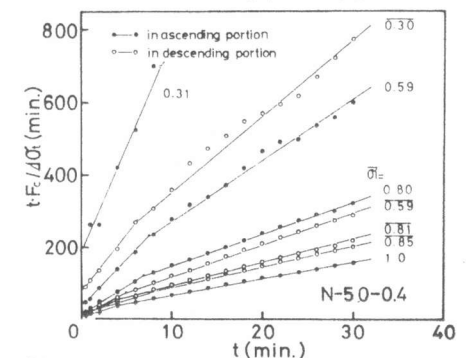


Fig.3 Relation between $t \cdot F_c / \Delta\sigma_t$ and t

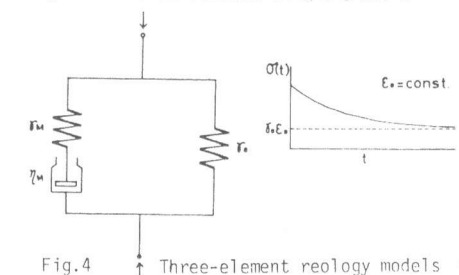


Fig.4 Three-element reology models

一モデルに基づいた表示式であり、 $\epsilon_0 r_0$ の値が残留終局緩和量(σ_∞)を示す。また、(3)式は載荷時間と設定ひずみ度を変数とした表示式である。

載荷時間(t)に対する応力緩和量($\Delta\sigma_t$)の実測値と上記の三つの式による計算値とを比較した一例がFig.5である。低応力レベルでは3式ともよく実験値と適合するが、高応力レベルでは、(1)式が最も実測値とよく一致する。

(3)終局緩和量($\Delta\sigma_\infty$)に及ぼす各種要因の影響：Fig.6, Fig.7およびFig.8は、(1)式を用いて推定した終局緩和量($\Delta\sigma_\infty$)と初期設定応力レベル($\bar{\sigma}_i$)との関係を、実験値の平均曲線で比較したものである。

ただし、これらの図の(b)および(c)の縦軸は、それぞれ圧縮強度(F_c)および初期設定応力度(σ_i)で除して無次元化してある。i)初期設定応力レベル($\bar{\sigma}_i$)の影響：Fig.6, Fig.7およびFig.8の(b)図によると、前述のように各コンクリートとも終局緩和量($\Delta\sigma_\infty$)は、 $\bar{\sigma}_i$ の増加とともに増大し、 $\bar{\sigma}_i$ の値が同じ場合には、応力度-ひずみ度曲線の応力下降域における $\Delta\sigma_\infty$ の方が応力上昇域におけるそれよりも大きい。これは最大荷重を過ぎると、コンクリート中のマイクロクラックが急増し、試験体が流動性を増して不安定な状態になるためと考えられる。一方、これらの図の(c)図に示した $\Delta\sigma_\infty/\sigma_i$ の値は、応力上昇域では $\bar{\sigma}_i$ の増加とともに増加するが、応力下降域では、 $\bar{\sigma}_i$ の増加とともに、わずかに増加するに過ぎず、なかには逆に減少するものもみられる。

ii)骨材品種の影響：Fig.6は水セメント比(W/C=50%)、粗骨材容積比($V_a/V_c=0.4$)を一定にした場合の終局緩和量を粗骨材品種別に比較したものである。

Fig.6(b)によれば、設定応力レベル($\bar{\sigma}_i$)が約0.6以上の範囲の $\Delta\sigma_\infty/F_c$ の値は、粗骨材品種によって若干相違し、普通骨材コンクリートが最も大きく、人工軽量コンクリートが最も小さい。すなわち、コンクリート内部の力学的非均質度が大きいものほど $\Delta\sigma_\infty/F_c$ の値は大きくなる。

iii)水セメント比(W/C)の影響：Fig.7は粗骨材容積比(V_a/V_c)が、0.4の普通コンクリートの終局緩和量($\Delta\sigma_\infty$)に及ぼす水セメント比(W/C)の影響を示したものである。Fig.7(b)および(c)によれば各W/Cに対する実験値はほぼ同一の曲線で表わされ、水セメント比による相違は、ほとんど認められない。

iv)粗骨材容積比(V_a/V_c)の影響：骨材容積比(V_a/V_c)が終局緩和量に及ぼす影響を示したFig.8(b)または(c)図によれば、 $\Delta\sigma_\infty/F_c$ および $\Delta\sigma_\infty/\sigma_i$ の値は、一般に粗骨材容積比が小さいほど大きくなる傾向を示す。すなわち、コンクリートの幾可学的非均質度が小さく脆性的な挙動を示すものほど $\Delta\sigma_\infty/F_c$ および $\Delta\sigma_\infty/\sigma_i$ の値は大きくなる。

3.2 コンクリートのクリープ特性

(1)クリープひずみ(ϵ_c)と載荷時間(t)との関係：実験-IIIによるコンクリートのクリープひずみ(ϵ_c)と載荷時間(t)との関係をFig.9に示す。また、Fig.10は ϵ_c を設定応力度(σ_0)で、Fig.11は ϵ_c を初期設定ひずみ度(ϵ_0)で除した場合の結果の一例である。Fig.9によれば、当然のことながら載荷応力レベル($\bar{\sigma}_i$)が大きくなるにつれて、クリープひずみも増加する傾向を示している。

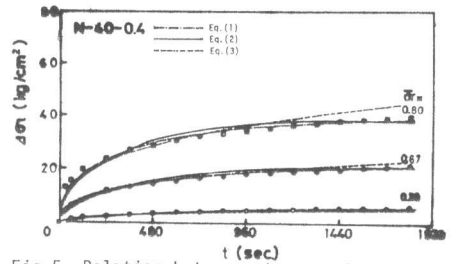


Fig.5 Relation between stress relaxation ($\Delta\sigma t$) and loading period (t)

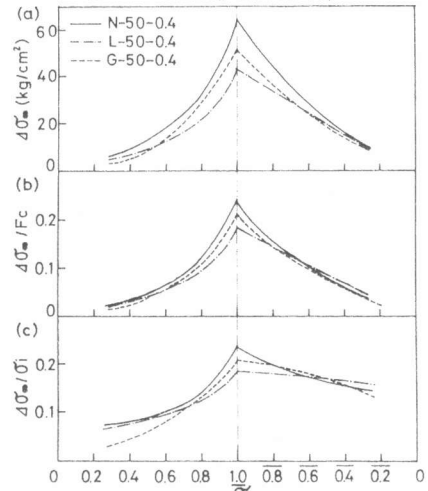


Fig.6 Effect of aggregate type on relation between $\Delta\sigma_\infty$ and $\bar{\sigma}_i$

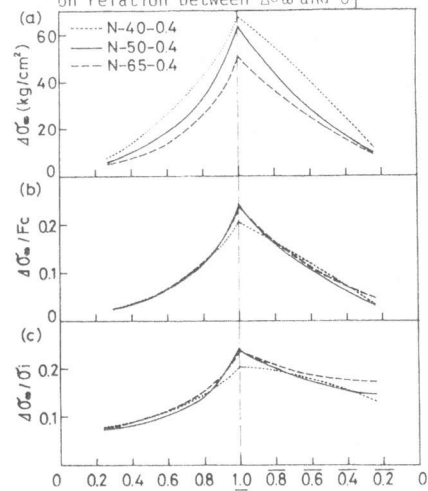


Fig.7 Effect of water-cement ratio on relation between $\Delta\sigma_\infty$ and $\bar{\sigma}_i$

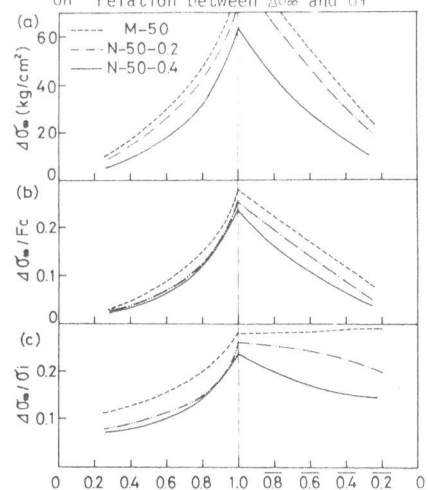


Fig.8 Effect of volume fraction of aggregate on relation between $\Delta\sigma_\infty$ and $\bar{\sigma}_i$

②クリープひずみの表示式：ここでは、コンクリートのクリープひずみ (ϵ_c) を次の3式で表示した。

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{c\infty} \cdot t}{S + t} \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\epsilon_c = \frac{\sigma}{\gamma_k} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \frac{\sigma}{\eta_k} t \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$\epsilon_c = B \cdot \sigma_0 \cdot k \cdot t^l \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここに、 ϵ_c ：載荷時間 t におけるクリープひずみ、 $\epsilon_{c\infty}$ ：終局クリープ量、 σ_0 ：初期設定応力度、 γ_k ：弾性率、 η_k ：粘性率、 τ_k ：遅延時間 (η_k/γ_k)、 B 、 k 、 l 、 S ：実験定数。

(4)~(6)式は、前述の応力緩和の表示式(1)~(3)式にそれぞれ対応している。クリープひずみ (ϵ_c) の実測値を上の各式で表示した一例を Fig. 12 に示す。図によれば、低応力レベルでは3式とも実測値との適合性はよいが、高応力レベルでは(4)式が実験値と比較的よく一致する。(3)終局クリープ量 ($\epsilon_{c\infty}$) に及ぼす各種要因の影響：Fig. 13は(4)式を用いて推定した終局クリープ量 ($\epsilon_{c\infty}$) と初期設定応力レベル ($\bar{\sigma}_i$) との関係を示したものである。ただし、縦軸は、それぞれの圧縮強度 (F_c) で除してある。Fig. 13によれば、設定応力レベルが同じ場合は、人工軽量骨材コンクリートの終局クリープ量 ($\epsilon_{c\infty}$) が最も大きくなる。本実験では、試験体表面にコーティングを施したため、水分移動の影響が小さくなり、したがって粗骨材のクリープ拘束度の小さい人工軽量骨材コンクリートが、大きな終局クリープ量を示したと思われる。

3.3 コンクリートの終局緩和量 ($\Delta\sigma_{\infty}$) と終局クリープひずみ ($\epsilon_{c\infty}$) との関係 実験-IIIの結果を(1)式および(4)式で表示した場合の、各設定応力度ごとの終局緩和量 ($\Delta\sigma_{\infty}$) と終局クリープひずみ ($\epsilon_{c\infty}$) との関係を Fig. 14 に示す。ただし、横軸はクリープひずみに試験体の弾性係数 (E_c) を掛けた値を示している。図から明らかなように、両者の関係は一次式で極めてよく表示できる。これらの関係は、使用骨材によって若干相違するが、普通骨材および人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、実用的に次式で表わしてもよいと思われる。

$$\Delta\sigma_{\infty} = 0.124 E_c \cdot \epsilon_{c\infty} - 4.5 \quad \text{-----} \quad (7)$$

4.むすび 本研究では、時間依存型力学特性のうちの特に応力緩和現象に関する広範囲の実験を行い、各種要因の影響について調べるとともに、従来から比較的資料の整備されているクリープとの対応について検討を行った。理論的検討については、別の機会に報告する予定である。〔謝辞〕本実験に際して御助力を得た西崎和人君、河野貢君および西井正幸君に謝意を表します。

〔文献〕1) M.A.Taylor and G.K.Maurer, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.84, Sep.1973. 2) 西林・木山, 土木学会論報, 昭50.9. 3) J.J.Brooks and A.M.Neville, ACI Journal, No.73-20, Apr.1976. 4) Klaus J.Bastgen, Beton und Stahlbetonbau, Juli, 1977.

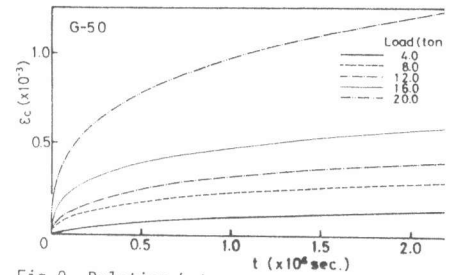


Fig.9 Relation between creep strain (ϵ_c) and loading period (t)

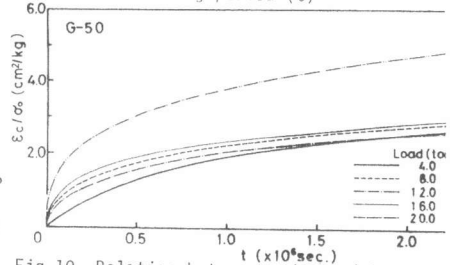


Fig.10 Relation between ϵ_c/σ_0 and t

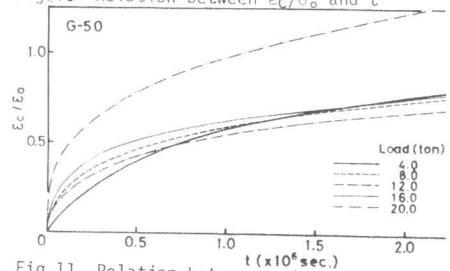


Fig.11 Relation between ϵ_c/ϵ_0 and t

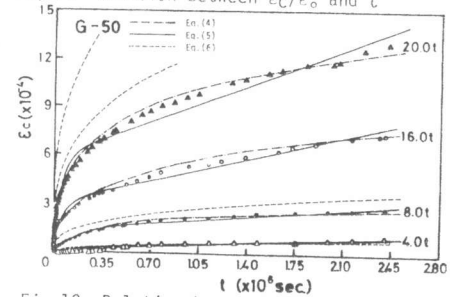


Fig.12 Relation between creep strain (ϵ_c) and loading period (t)

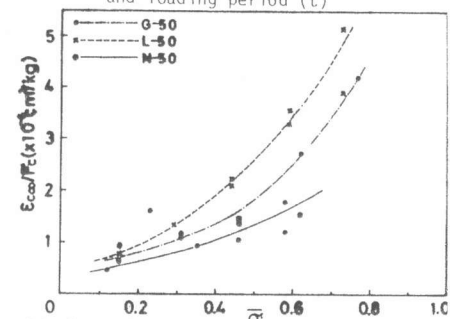


Fig.13 Relation between $\epsilon_{c\infty}/F_c$ and $\bar{\sigma}_i$

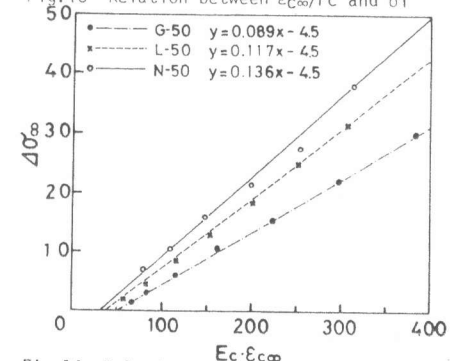


Fig.14 Relation between $\Delta\sigma_{\infty}$ and $E_c \cdot \epsilon_{c\infty}$