

コンクリートの応力緩和に関する一研究

A STUDY ON THE STRESS RELAXATION OF CONCRETE

西林新蔵*・木山英郎**

By Shinzo NISHIBAYASHI and Hideo KIYAMA

1. ま え が き

ここ数年来、従来の弾性論を中心とした許容応力度設計方法にかわって、部材あるいは構造物としての降伏・崩壊などの機構的な限界状態を基準にした限界状態設計方法が各国で実用化されようとする動きが盛んになってきた。それとともに、コンクリートの高応力、高ひずみ下での応力-ひずみ挙動を明らかにする必要性が高まってきた。そこで、その基礎研究として前報¹⁾においては、変位制御方式による圧縮剛性試験を実施し、破壊前・後を結ぶ完全な応力-ひずみ曲線を求め、特に破壊後・崩壊に至るまでのひずみ軟化のコンクリートの種類による特徴に関して報告した。

コンクリートの高応力下の応力-ひずみ挙動には、こうした本質的には時間に依存しない性質とともに、粘性流動に代表される時間依存性も重要な問題となることは想像に難くない。後者、いわゆるコンクリートの粘弾性挙動の解明に当っては、応力を固定した場合のひずみの時間的变化(遅延現象)を調べるクリープ試験と、ひずみを固定した場合の応力の時間的变化(緩和現象)を調べる緩和試験とが基本となる。クリープ試験については、実用面からの強い要求もあって、数多くの優れた研究²⁾が行われてきたが、それに比べると緩和試験は実験が困難なこともあって報告数も少なく、必要に応じてクリープ試験の結果を用いて解釈されているのが実情である。この間の事情は、Taylor, M.A. および Maurer, G.K. の応力緩和試験に関する最近の論文³⁾にも述べられている。

Taylor らは、まずコンクリートのクリープ試験に比し応力緩和試験の実施例の少ないことを指摘するとともに、それら従来の緩和試験のほとんどがひずみ拘束(一

定ひずみの保持)の方法に欠点のあることを指摘している。ついで、緩和試験においても、クリープ試験と同様に、① 初期応力水準(ひずみ拘束時の設定応力)、② 養生ならびに試験時の湿度条件、③ 供試体の配合および強度、④ 試験時材令、⑤ 骨材の最大粒径、粒度、性質、⑥ その他として、セメントの種類、供試体の寸法などが重要な影響因子になるであろうと予想している。さらに、通常の短時間圧縮試験に現われる時間依存性に関する限り、クリープ現象よりはむしろ短期間(1日以内)の応力緩和現象が重要な影響力を有するのではないかも述べている。

これらの考察のもとに、Taylor らは上記要因のうち、①、②、③の検討を目的に、目標強度 141~352 kg/cm² の普通コンクリートを用い、試験時材令 40 日の完全湿潤および室内乾燥状態の供試体について、設定応力水準を圧縮強度の 15~80% 間にとり、ひずみ拘束後 400 秒間の短期緩和試験を実施した結果を報告している。

ところで、筆者らが Neville のクリープに関する著書⁴⁾を参考にして本研究を計画した時点においては、コンクリートの応力緩和現象に関する新しい情報は、斉藤・川本らのモルタル供試体の剛性ならびに緩和試験に関する報告⁴⁾のみであった。そこで先に報告した普通および軽量コンクリートの剛性試験に関連して、供試体の破壊前・後の応力-ひずみ挙動の解明に焦点を絞って、高ひずみ下の緩和現象を明らかにすることを目的として本研究を計画した。それは、コンクリートの剛性試験が、試験機と供試体との系の安定性を維持するために、通常の圧縮試験におけるような短期間載荷の条件(荷重速度 2~3 kg/cm²/sec, ひずみ速度に換算すると $\dot{\epsilon}=600\sim1000 \times 10^{-6}/\text{min}$)からはずれて、いくぶん長い載荷時間(ひずみ速度にして、 $\dot{\epsilon}=133 \times 10^{-6}/\text{min}$)を要する。そのため、コンクリートの時間依存性の効果が試験結果に影響していることが懸念されたからである。その場合の時間依存性は、載荷が変位制御方式によっているため、ク

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

リーブ現象よりも応力緩和現象の影響が本質的であること、しかも数秒からせいぜい数分にわたるきわめて短時間の緩和現象が重要であることが推論され、早急にそれらを究明することが望まれた。さらに、破壊後の供試体の時間依存性の解明に関する限り、応力制御形態をとるクリープ試験は実施不可能であり、いきおい応力緩和試験によらざるを得ないことも、この研究を実施した大きな理由の一つであった。

Taylor らが破壊荷重の 15~80% 域の短時間緩和現象を論じているのに対し、筆者らは破壊荷重の 70% から破壊荷重を経て、ひずみ軟化を示す域での短時間緩和現象を対象としており、また前者が試験時材令 40 日であるのに対し、後者の材令約 1 年であるなど、同一要因について相当異なった条件で実施されたこともあって、両者を比較検討することによって今後この方面の研究に一つの目安を与えるものと思われるので、ここに、それらの結果を報告する。

2. 実験概要

(1) 使用材料

使用したセメントは大阪セメント社製の普通ポルトランドセメントで、その物理的性質を **Table 1** に示す。

骨材は天然骨材（川砂・碎石、記号 N）、造粒型人工軽量骨材（記号 L）、非造粒型人工軽量骨材（記号 U）の 3 種類を使用した。これらの物理的性質は **Table 2** に示してある。なお、骨材はすべて表乾状態に調整して使用した。

(2) 配合および養生条件

コンクリートの配合設計にあたっては、セメント量を 275 kg/m^3 (A) を 350 kg/m^3 (B) の 2 水準にとり、スランプが $5.0 \pm 1 \text{ cm}$ になるように試し練りによって配合を決定した。結果を **Table 3** に示す。

Table 1 Physical Properties of Cement

| Specific gravity | Fineness (blains) cm^2/g | Setting | | | Soundness | Flow mm | Strength (kg/cm^2) | | | | | |
|------------------|--|---------|-------------|-----------|-----------|---------|--------------------------------------|----|----|-------------|-----|-----|
| | | W/C % | Initial h-m | Final h-m | | | Flexural | | | Compressive | | |
| | | | | | | | 3 | 7 | 28 | 3 | 7 | 28 |
| 3.15 | 3 230 | 29 | 2-55 | 4-05 | good | 252 | 35 | 52 | 75 | 143 | 244 | 416 |

Table 2 (a) Physical Properties of Fine Aggregates

| Kinds of aggregate | Specific gravity | Water absorption % | Bulk density kg/m^3 | Grading (passing % by weight) | | | | | | Fineness modulus |
|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|------------------|
| | | | | 5.0 mm | 2.5 mm | 1.2 mm | 0.6 mm | 0.3 mm | 0.15 mm | |
| River sand (N) | 2.63 | 1.2 | 1 710 | 97 | 84 | 68 | 42 | 20.1 | 4 | 2.85 |
| Pelletized type A.L.A. (L) | 1.92 | 3.9 | 1 380 | 99 | 75 | 52 | 34 | 27.4 | 18 | 2.95 |
| Coated type A.L.A. (U) | 1.89 | 14.0 | 1 070 | 100 | 96 | 64 | 42 | 22.0 | 10 | 2.66 |

Table 2 (b) Physical Properties of Coarse Aggregates

| Kinds of aggregate | Specific gravity | Water absorption % | Bulk density kg/m^3 | Grading (passing % by weight) | | | | Fineness modulus |
|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------|-------|------|------------------|
| | | | | 20 mm | 15 mm | 10 mm | 5 mm | |
| Crushed stone (N) | 2.67 | 1.68 | 1 660 | 100 | 84 | 35 | 2 | 6.61 |
| Pelletized type A.L.A. (L) | 1.31 | 2.60 | 890 | 100 | 99 | 62 | 0 | 6.38 |
| Coated type A.L.A. (U) | 1.39 | 17.50 | 820 | 100 | 96 | 45 | 2 | 6.53 |

Table 3 Mix Proportions

| Mix | Slump cm | Air % | W/C % | C kg/m^3 | W kg/m^3 | S/a % | S kg/m^3 | G kg/m^3 | Chemical admixture (Pozzolith No. 8) | |
|-----------------------|----------|-----------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Normal concrete | N-A | 5 ± 1 | 5.5 ± 0.5 | 56.0 | 275 | 158 | 41.0 | 764 | 1 160 | $0.25\% \times C$ |
| | N-B | " | " | 43.0 | 350 | 150 | 43.0 | 808 | 1 082 | " |
| Light weight concrete | L-A | " | " | 66.4 | 275 | 183 | 43.2 | 562 | 539 | " |
| | L-B | " | " | 50.5 | 350 | 175 | 41.5 | 525 | 536 | " |
| | U-A | " | " | 59.0 | 275 | 163 | 46.0 | 612 | 593 | " |
| | U-B | " | " | 44.9 | 350 | 154 | 39.5 | 572 | 464 | " |

コンクリートの練りまぜは四切可傾式ミキサによって行い、供試体の締め固めは棒状バイブレーターを用いて行った。供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱形で、打設後 24 時間は型枠のまま恒温室 ($20^\circ\text{C} \pm 2 \text{ deg.}$, R.H. $90 \pm 5\%$) に置いた。脱型後はただちに水中に投じ、材令 28 日目まで実験室内に放置し、供試体の約半数 (350 本) は材令 6 か月で高応力下の疲労試験およびクリープ試験に供し、残りの供試体約 350 本につき、材令約 1 年で前報¹⁾ の剛性試験と当応力緩和試験に供した。

(3) 緩和試験の方法

本試験は、先の剛性試験と併せてコンクリートの破壊前後の応力-ひずみ挙動を明らかにする目的で計画されたもので、Fig. 1 に示すように設定応力 σ_i (ひずみ ϵ_i) を破壊応力 σ_f の 70% 以上とした高応力・高ひずみ下の緩和試験である。

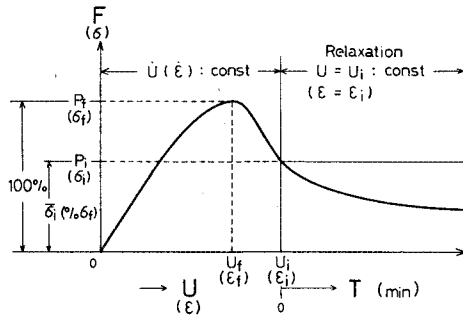


Fig. 1 Relaxation test

ところで、ひずみの拘束にあたって、そのひずみ量を規定するのに、直接、破壊時のひずみ ϵ_f に対する一定比率のひずみ量で規定する方法と、破壊時の応力 σ_f に対する一定比率の応力値 σ_i で間接的にひずみ量を規定する方法とが考えられる。ここでは、結果の整理の便を考慮して後者の応力比率によるひずみ設定を行った。

すなわち、設定応力 $\bar{\sigma}_i$ を破壊強度 σ_f に対する % で規定し、破壊までの設定応力は $\bar{\sigma}_i = (\sigma_i / \sigma_f) \times 100 = 70, 80, 90, 100\%$ の 4 水準を選び、破壊後の荷重下降域に対しても 10% 間隔で設定し、 $\bar{\sigma}_i = 90, 80, 70, 60, 50, 40\%$ のように記し、前者と区別して表わした。なお、破壊後供試体に対する σ_f の値はそれ自身の強度値を用い、破壊前の供試体に対する σ_f の値は前者の平均値を用いることにした。

さて、Fig. 1 に示すように設定応力までの载荷は剛性試験と同じ変位速度制御方式で行った。設定応力 σ_i に達すると即時に変位一定制御方式に切り換えて、以後 σ_i に対応する変位 u_i (ひずみ ϵ_i) に変位 (ひずみ) を一定に保って、時間とともに緩和する応力値を測定した。なお、予備試験の結果、約 10 分間の測定で応力緩

和曲線を十分の精度で、解析可能であると判断されたので、測定時間を変位拘束後 10 分間とした。供試体数は各グループについて、設定応力 $\bar{\sigma}_i (\% \sigma_f)$ ごとに各 3 本とし、その平均値をもって代表値とした。なお、供試体のグループは、前述の骨材種別と配合条件による 6 種類のそれぞれに、打設日による区別 (記号 I, II, III) を付して 1 グループとした。

3. 実験結果とその考察

応力緩和試験における試験条件の例として、供試体強度 σ_f 、設定応力 σ_i 、拘束ひずみ ϵ_i の実測値を Table 4 に示す。また得られた応力緩和曲線の一例を Photo. 1 に示す。

Table 4 An Example of the Conditions in the Relaxation Test

| Mix | Number of test pieces | $\bar{\sigma}_i$ % σ_f | P_f ton | σ_f kg/cm ² | ϵ_f 10 ⁻⁶ | P_i ton | σ_i kg/cm ² | ϵ_i 10 ⁻⁶ | |
|-------|-----------------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|------|
| N-A I | 3 | 70 | (28.4) | | | 19.9 | 254 | 728 | |
| | 3 | 80 | | | | 22.7 | 289 | 1010 | |
| | 3 | 90 | | | | 25.6 | 326 | 1180 | |
| | 3 | 100 | 27.3 | 348 | 1630 | 27.3 | 348 | 1630 | |
| | 3 | 90 | 27.3 | 348 | 1970 | 24.6 | 313 | 2820 | |
| | 3 | 80 | 30.0 | 383 | 2020 | 24.0 | 306 | 3020 | |
| | 3 | 70 | 29.2 | 371 | 2070 | 20.4 | 260 | 4310 | |
| | 3 | 60 | 29.7 | 379 | 1630 | 17.8 | 227 | 3600 | |
| | 3 | 50 | 31.4 | 400 | 1970 | 15.7 | 200 | 4340 | |
| | 4 | 40 | 28.8 | 367 | 2010 | 11.5 | 147 | 5850 | |
| | L-A I | 3 | 70 | (15.7) | | | 11.0 | 140 | 770 |
| | | 3 | 80 | | | | 12.6 | 161 | 1230 |
| 3 | | 90 | | | | 14.1 | 180 | 1460 | |
| 3 | | 100 | 14.8 | 188 | 1590 | 14.8 | 188 | 1590 | |
| 3 | | 90 | 14.8 | 189 | 1780 | 13.3 | 170 | 1970 | |
| 3 | | 80 | 17.3 | 220 | 1970 | 13.8 | 176 | 2400 | |
| 3 | | 70 | 15.6 | 199 | 1710 | 10.9 | 139 | 2710 | |
| 3 | | 60 | 17.0 | 216 | 1730 | 10.2 | 130 | 2730 | |
| 3 | | 50 | 18.7 | 238 | 2110 | 9.4 | 119 | 3760 | |
| 2 | | 40 | 17.8 | 226 | 1830 | 7.1 | 90 | 2710 | |
| U-A I | 2 | 80 | (17.0) | | | 13.6 | 173 | 1490 | |
| | 3 | 90 | | | | 15.3 | 195 | 1520 | |
| | 3 | 100 | 17.3 | 221 | 1870 | 17.3 | 221 | 1870 | |
| | 3 | 90 | 17.5 | 223 | 1850 | 15.8 | 201 | 2050 | |
| | 3 | 80 | 19.2 | 244 | 2030 | 15.4 | 195 | 2420 | |
| | 3 | 70 | 17.0 | 217 | 1620 | 11.9 | 152 | 1950 | |
| 3 | 60 | 15.7 | 200 | 1610 | 9.4 | 120 | 2500 | | |

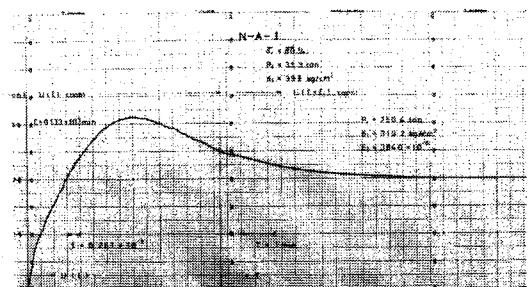


Photo. 1 Relaxation curve

(1) レオロジーモデルによる検討

コンクリートが遅延現象や緩和現象を示すことは周知のとおりである。これら粘弾性挙動の考察にあたって、Maxwell や Voigt が用いたレオロジーモデルによる検討が現象面の把握には有効である場合が少なくない。この場合、基本的には Fig. 2 に示すように 2~4 要素モデルの適用性が検討の対象となる。

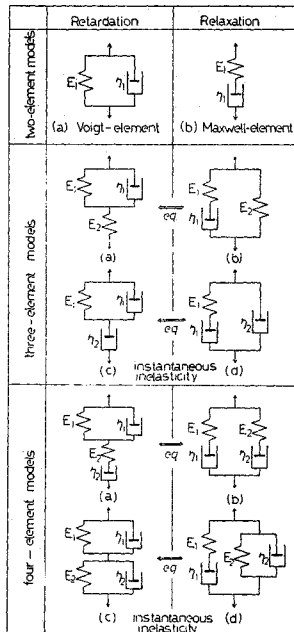


Fig. 2 Rheological models

図において、3 要素以上の多要素モデルには等価な異型のモデルが必ず存在すること、緩和現象の記述には (b) および (d) 型が便利であること、および 3 要素、4 要素モデルのうち、(c) および (d) 型は瞬間弾性を表わさないことなどを考慮すれば、緩和現象に関しては (b) 型を対象に論ずれば良いことになる。

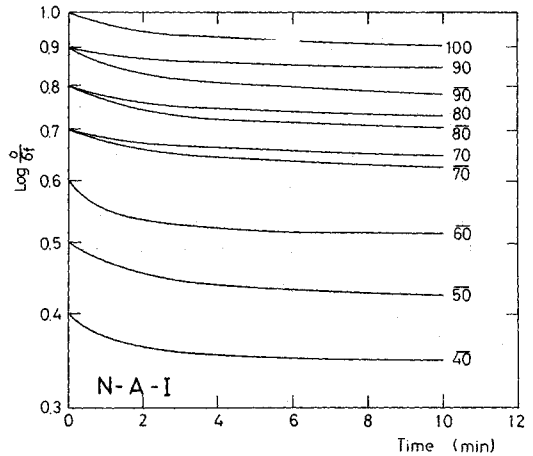
そこで、まず 2 要素モデル (b) として Maxwell 要素を用いると、応力とひずみの関係は次のような簡単な式で表わされる。

$$\sigma = \sigma_i e^{-t/\tau} \dots \dots \dots (3.1)$$

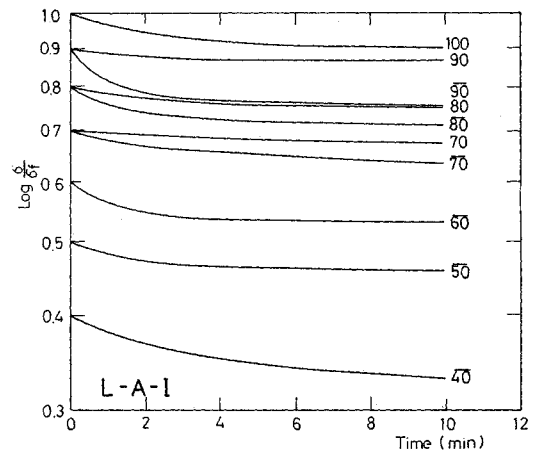
ここに、 τ は材料定数 E_1/η_1 であって緩和時間とよばれる。縦軸に σ/σ_i を log 目盛でとり、横軸に t を普通目盛でとると両者の関係は直線となる。これにしたがって得られた実験結果を整理すると、たとえば Fig. 3 (a) ~ (c) に示すようになる。各曲線はそれぞれ 3 供試体の平均値を用いて求められている。ところで、本試験では設定応力を $\bar{\sigma}_i = \sigma_i/\sigma_f (\%)$ で規定したので、

$$\log \sigma/\sigma_i = \log \sigma/\sigma_f - \log \bar{\sigma}_i \dots \dots \dots (3.2)$$

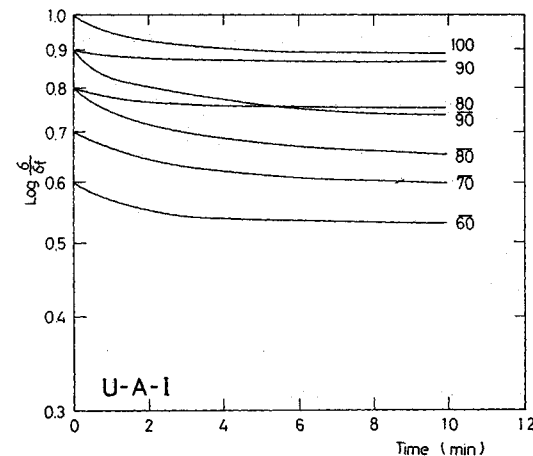
なる関係を考慮し、縦軸は $\log \sigma/\sigma_f$ をとって設定応力



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Relaxation curves of concrete

における差も見られるようにした。したがって $\log \sigma/\sigma_i - t$ 曲線に戻すには、各曲線の原点が 1.0 に重なるように平行移動すれば良く、両座標における曲線の形状は不変である。

この結果、 $\log \sigma/\sigma_i$ と t には直線関係が認められず、さらに $t = \infty$ において $\sigma_\infty \neq 0$ なる残留応力の存在を示している。このことから、4 要素モデルによる整理も不適當であって、3 要素モデル (b) の検討を示唆している。

このレオロジーモデルの緩和試験における応力-ひずみ関係は次のようである。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 e^{-t/\tau} + \sigma_2 \\ \sigma_i &= \sigma_1 + \sigma_2 \\ \varepsilon_i &= \sigma_1/E_1 + \sigma_2/E_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.3)$$

この場合には、 $\log(\sigma - \sigma_2)/\sigma_i$ と t とが直線関係となり、かつ $\sigma_\infty = \sigma_2$ なる終局残留応力を示すこととなる。しかしながら、これにしたがって実験結果を整理した結果も、先の Maxwell 要素の場合 (Fig. 3) と同様に直線性が認められなかった。

(2) 実験式による検討

そこで、コンクリートのクリープ試験における整理法に準拠して、実験式による検討を試みることにした。クリープ現象に対する Ross の実験式⁹⁾をもとに、緩和現象に対する $\sigma - t$ 関係の特性を考慮すると、次の形の実験式が考えられる。

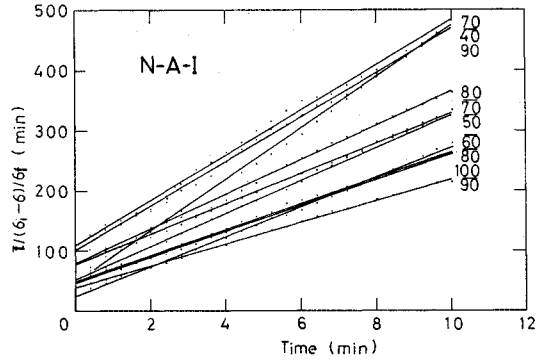


Fig. 4 An example of linear relations between $t/(\sigma_i - \sigma)$ and time t in the relaxation test

$$\sigma = \frac{B + Ct}{A + t} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、 A, B, C は実験定数であり、次のような特性値を表わす定数として導入される。

まず、式 (3.4) において、 $t=0$ のとき $\sigma_i = B/A$ は設定応力として既知であり、 $t = \infty$ のとき $\sigma_\infty = C$ となって定数 C は無限時間後も残留する応力の値 (未知数) を表わすこととなる。さらに、式 (3.4) で $t = t_a$ のとき、

$$\sigma = \sigma_a = (\sigma_i + \sigma_\infty)/2 \dots\dots\dots (3.5)$$

と置けば、 $t_a = A$ となる。すなわち定数 A は応力緩和が進んで緩和量が終局緩和量の半分、 $\sigma_a - \sigma_\infty = (\sigma_i - \sigma_\infty)/2$ になるに要する時間 t_a を表わす。したがって、 σ が σ_i

Table 5 Relaxation Test Results, the Experimental Constants A and B in Equation (3.6)

| | Mix | $\bar{\sigma}_i$ (% σ_f) | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 70 | 80 | 90 | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 |
| A (min) | N-A I | 8.0 | 6.89 | 6.86 | 5.67 | 5.19 | 5.60 | 7.60 | 2.37 | 4.57 | 2.87 |
| | | 27.1 | 4.17 | 5.38 | 4.78 | 7.09 | 7.80 | 10.42 | 9.14 | 6.33 | 5.49 |
| | N-B I | 6.31 | 8.85 | 3.97 | 6.03 | 8.04 | 2.75 | 8.92 | | | |
| | | 3.50 | 9.90 | 3.29 | 6.85 | 2.22 | 7.03 | | | | |
| | L-A I | 37.4 | 9.45 | 3.17 | 6.21 | 1.72 | 3.35 | 9.37 | 2.37 | 3.87 | 9.71 |
| | | L-B I | 6.73 | 3.09 | 3.33 | 4.80 | 12.50 | 8.34 | 4.55 | 4.76 | 13.43 |
| | II | 116.0 | 3.30 | 7.71 | 6.28 | 3.44 | 2.92 | 2.79 | 5.98 | 3.21 | 5.74 |
| | | III | | 5.28 | 4.74 | 6.13 | 7.71 | 2.37 | 3.79 | | |
| | U-A I | | 4.23 | 2.94 | 3.11 | 5.23 | 5.89 | 5.09 | 3.22 | | |
| | | II | | 20.71 | 11.23 | 4.37 | 4.34 | 4.34 | 7.72 | 2.60 | 4.13 |
| Mean | | 46.9 | 7.26 | 5.67 | 4.58 | 5.08 | 6.04 | 6.33 | 4.77 | 4.48 | 7.45 |
| C (σ_f) | N-A I | 0.633 | 0.713 | 0.832 | 0.884 | 0.762 | 0.685 | 0.601 | 0.500 | 0.410 | 0.341 |
| | | 0.641 | 0.734 | 0.804 | 0.889 | 0.767 | 0.680 | 0.609 | 0.519 | 0.427 | 0.341 |
| | N-B I | 0.736 | 0.823 | 0.896 | 0.787 | 0.705 | 0.643 | 0.527 | | | |
| | | 0.763 | 0.840 | 0.874 | 0.812 | 0.689 | 0.565 | | | | |
| | L-A I | 0.630 | 0.732 | 0.864 | 0.873 | 0.749 | 0.702 | 0.610 | 0.522 | 0.449 | 0.308 |
| | | L-B I | 0.728 | 0.853 | 0.882 | 0.779 | 0.686 | 0.604 | 0.529 | 0.444 | 0.342 |
| | II | 0.656 | 0.759 | 0.831 | 0.886 | 0.786 | 0.694 | 0.631 | 0.544 | 0.456 | 0.344 |
| | | III | 0.805 | 0.805 | 0.894 | 0.763 | 0.652 | 0.578 | 0.529 | | |
| | U-A I | 0.746 | 0.862 | 0.874 | 0.701 | 0.602 | 0.589 | 0.520 | | | |
| | | II | 0.752 | 0.845 | 0.861 | 0.763 | 0.722 | 0.552 | 0.491 | 0.446 | |
| | Mean (σ_f) | 0.640 | 0.740 | 0.836 | 0.881 | 0.767 | 0.683 | 0.598 | 0.520 | 0.439 | 0.335 |
| | Mean (σ_i) | 0.914 | 0.926 | 0.929 | 0.881 | 0.852 | 0.854 | 0.854 | 0.867 | 0.877 | 0.838 |

の $1/e$ になるに要する時間として定義される緩和時間 t に対応する材料定数を示すものと予想される。これら特性値 A および C と設定応力 σ_i を用いて式 (3.4) を表わすと、

$$\sigma_i = \frac{A\sigma_i + Ct}{A+t} \dots\dots\dots(3.6)$$

実験結果から定数 A, C を決定する手順は次のようである。まず、式 (3.6) を変形して次式を得る。

$$\frac{t}{\sigma_i - \sigma} = \frac{A}{\sigma_i - C} + \frac{t}{\sigma_i - C} \dots\dots\dots(3.7)$$

そこで、各設定応力 σ_i に対して、実測値 (t と σ) を縦軸に $t/(\sigma_i - \sigma)$ 、横軸に t をとって描くと、両者は直線関係を示すはずである。したがって実測値に対して最小自乗法で最適直線を決定すれば、その傾斜が $1/(\sigma_i - C)$ を、縦軸の切片が $A/(\sigma_i - C)$ を、それぞれ与えることになる。

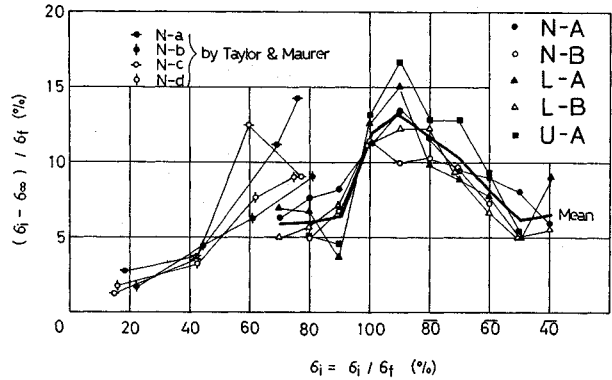
結果の一例を Fig. 4 に示す。なお、同図において応力値を無次元化するため強度 σ_f で除してある。実験結果はすべて十分な直線性を示し、コンクリートの緩和試験に実験式 (3.6) が適用できることが認められた。このようにして得られた特性値 A および C の値をまとめて Table 5 に示す。以下にコンクリートの種類や設定応力値の違いによる緩和現象の特徴を考察することにする。

まず、緩和時間に対応する定数 A をみると、全般にばらつきが大きく、骨材の種類やセメント量（あるいは水・セメント比）によって一定の傾向は認め難い。また、設定応力の違いや、破壊の前か後かの違いによっても、それほど顕著な差が認められず、 $\bar{\sigma}_i = 80 \sim 40 \% \sigma_f$ の範囲で、 $A = 4.5 \sim 7.5$ 分、平均 6 分前後の値をとることがわかる。この値はコンクリートのクリープ試験における遅延時間相当値*に比べてきわめて小さく、応力緩和現象が比較的短時間に終結することを示すものと考えられる。

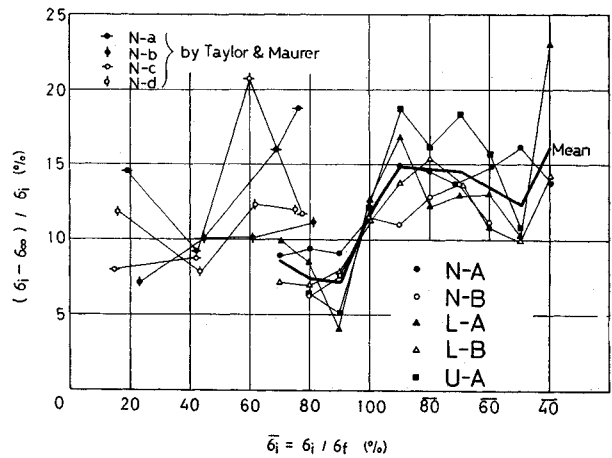
次に、終局残留応力値を示す定数 $C (= \sigma_\infty / \sigma_f)$ をみると、定数 A と異なりきわめてばらつきの小さい結果を示し、緩和現象の特性値として信頼度の高いものと思われる。終局応力値 C は骨材の種類、セメント量などコンクリートの種類による差異は少なく、設定応力の水準 $\bar{\sigma}_i (\% \sigma_f)$ によって主として支配されていることが明らかに認められる。

そこで、各設定応力値ごとに、終局緩和量 ($\sigma_\infty - \sigma_i$)

* 式 (3.6) のもとになったクリープ試験の Ross の式において、 A に対応する値で、クリープ試験では終局クリープひずみ量の $1/2$ のクリープひずみを生ずるまでの時間を表わす。同一供試体について、設定応力 $20 \sim 40 \% \sigma_f$ でのクリープ試験の結果、平均 $10 \sim 25$ 日を得ている。



(a)



(b)

Fig. 5 Ultimate relaxation expressed in the ratio to the strength σ_f (a), and in the ratio to the initial stress σ_i (b)

を图示すると Fig. 5 のようである。同図 (a) は強度 σ_f に対する比率 $(\sigma_f - \sigma_i) / \sigma_f$ を示し、(b) は設定応力 σ_i に対する比率 $(\sigma_\infty - \sigma_i) / \sigma_i$ で表わしてある。

まず、(a) の終局緩和量の強度に対する比率をみると、設定応力水準 $\bar{\sigma}_i$ が $90 \% \sigma_f$ 以下ではほぼ一定の値を示し $6 \% \sigma_f$ と小さい。ところが、破壊直前から緩和量は急増し、破壊直後の $\bar{\sigma}_i = 90 \% \sigma_f$ において最大値 $13 \% \sigma_f$ と破壊前のその 2 倍強の大きな値を示す。その後は設定応力の減少（設定ひずみは増加）とともに緩和量も減少し、 $\bar{\sigma}_i = 60 \% \sigma_f$ 以後に破壊前とほぼ等しい緩和量 $6 \% \sigma_f$ 強に落ち着く。このように終局緩和量は供試体破壊の直前・直後において大きな値を示し、この域で供試体が最も流動性を増して不安定な状態にあることがうかがわれる。

次に、(b) の終局緩和量の設定応力に対する比率をみると、設定応力水準 $\bar{\sigma}_i$ が $90 \% \sigma_f$ 以下において緩和量 $7 \sim 8 \% \sigma_i$ とほぼ一定であること、 $\bar{\sigma}_i = 90 \sim 90 \% \sigma_f$ の最

大荷重域において緩和量が急増し、 $\bar{\sigma}_f = 90\% \sigma_f$ において最大値 $15\% \sigma_i$ と破壊前のその約 2 倍の緩和量を示すことなどは (a) 図に見たものとほぼ同じ傾向にある。しかし、この比率で表わされた場合には、 $\sigma_i = 90\% \sigma_f$ 以降の破壊後供試体の緩和量が設定応力にかかわらず $13 \sim 15\% \sigma_i$ の間でほぼ一定とみなし得るのが特徴である。すなわち、破壊前および破壊後供試体の緩和量とともに設定応力に比例し、その比例定数は最大荷重点を境に急変し、後者の比例定数は前者のその約 2 倍であると結論される。

(3) Taylor and Maurer の実験結果との比較検討

ここに述べた筆者らの試験と同様な試験が Taylor と Maurer³⁾ によって行われることは 1. で紹介した。そこで、両者の試験結果を比較し、二、三考察を加えることにした。Taylor らの緩和試験の概要は次のとおりである。セメントはポルトランドセメント II 型、骨材は河川産 (Bear River, California), 最大寸法 10 mm のものが使用された。Table 6 に示すように、28 日目標強度 $140 \sim 352 \text{ kg/cm}^2$ に 4 水準 (N-a, N-b, N-c, N-d とよぶことにする) を選び、スランプ $7.5 \sim 10 \text{ cm}$ として ACI 法により配合設計が行われている。供試体は $\phi 7.60 \times 26.7 \text{ cm}$ の円柱形で、養生および試験時を通じての湿度条件により dry と wet に区別される。すなわち、28 日間はともに相対湿度約 95%、温度約 20.5°C の恒温室で養生され、その後試験時 (材令 40~42 日) まで同じ恒温室中に保存されかつ湿度 100% 中で試験されたものが wet で、dry は実験室 (相対湿度 20~40%) 中で自然乾燥されかつその状態で試験されたものである。

緩和試験の方法は、445 KN (45.5 t) の油圧試験機を用い、変位制御方式によって行っており、ひずみ拘束後 400 秒を観測時間に選んでいる。これらの条件は筆者らの試験条件とほとんど同様である。ただ、Taylor らは

緩和現象に与える供試体湿度条件の影響を主たる研究目標としているため、dry と wet の対比に関する考察が論文の中心となっている。それにあわせて、処女載荷の緩和曲線と再載荷の緩和曲線の差に関する検討が報告されている。

得られ実験結果は、クリープ試験における Ross の式を読み替えた次式で整理されている。

$$C' = \frac{t}{A' + B't} \dots\dots\dots(3.8)$$

ここに、 C' は時間 $t(\text{sec})$ における応力緩和量で、前節までの記号で表わせば $(\sigma_i - \sigma) / \sigma_f$ にあたる。上式を用いた実験結果の処理方法は 3. (2) で述べたのと同様である。その結果求める定数 A', B' のうち、 $1/B'$ が $t = \infty$ における C' すなわち終局緩和量 $(\sigma_i - \sigma_\infty) / \sigma_f$ を与えることは明らかであるが、 A' の物理的意味は明らかにされておられない。彼らが得た実験結果のうち、筆者らの結果と直接比較の対象となる湿度条件 dry に関するものを示すと Table 7 のようである。考察にあたって、 B' の変化が規則的であることおよびばらつきが小さいことを指摘し、一方、 A' の変化が不規則でありかつばらつきが大きいことを述べているが、 A' の物理的意味が明らかでないため、その主張は弱いものとなっていることは否めない。

ところで、Taylor らの用いた Ross の式 (3.8) は筆者らの提案した式 (3.6) と等価であるので、定数 A', B' を A, C に換算することができる。その結果は同じ Table 7 に示す。以下にこれらの結果を 3.2 に述べた筆者らの結果をあわせて比較検討することにする。

まず、緩和時間に対応する特性値 A については、Taylor らが A' において述べたほど無意味なばらつきを示しているのではないことがわかる。終局緩和量の 1/2 の緩和に要する時間 A が Taylor らの破壊前供試体 ($\bar{\sigma}_i = 20 \sim 80\% \sigma_f$) では 1~2 分であることを示す。これは先に述べた破壊前・後の高応力下 ($\bar{\sigma}_i = 80 \sim 90\% \sigma_f$) の供試体の 4.5~7.5 分に比べて相当短いことがわかる。ただし、Taylor らは、Table 7 に示した A', B' を $t = 100 \sim 400$ 秒間の測定値から求め、 $t = 0 \sim 100$ 秒間のそれは、また異なった性質のものとして別に論じていることによるものと思われる。なお、後述の特性値 B に比し、 A のばらつきが大きいことは、材料特性値としての特徴だけではなく、Taylor らも指摘しているように、測定値を式 (3.6) の形の実験式で整理することによって生じる誤差が特に A において大きいことにもよるは事実である。

Table 6 Properties of Concrete Mixes, Used in the Relaxation Test by Taylor and Maurer

| Mix | 28 day target strength N/mm ² | Actual strength at 49 days* N/mm ² | | Water/cement ratio by weight | Cement : sand : aggregate ratio by weight | Unit weight kg/m ³ |
|-----|---|--|---------------|------------------------------|---|----------------------------------|
| | | Dry | Wet | | | |
| N-a | 13.8 [141] | 15.9 [162]** | 10.3 [105] | 0.76 | 1 : 3.49 : 4.26 | 2320 |
| N-b | 20.7 [211] | 22.1 [225] | 16.6 [169] | 0.67 | 1 : 3.05 : 3.72 | 2330 |
| N-c | 27.6 [282] | 31.1 [317] | 25.6 [261] | 0.53 | 1 : 2.33 : 2.84 | 2340 |
| N-d | 34.5 [352] | 38.6 [394] | 35.4 [361] | 0.45 | 1 : 1.90 : 2.33 | 2350 |

* Average of 3 or more $\phi 7.5 \times 26 \text{ cm}$ cylinders
** Figures in brackets are in terms of kg/cm^2

Table 7 The Constants A and B, Determined from the Results given by Taylor and Maurer

| Mix | Given by Taylor & Maurer | | | Calculated by present authors | | | | |
|--|--|------|----|--|---|---|--------------------------------------|---|
| | α $\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_f}\right)$ | A' | B' | A | Ultimate relaxation | | C | |
| | | | | (min) | $(\sigma_i - \sigma_{\infty})/\sigma_f$ | $(\sigma_i - \sigma_{\infty})/\sigma_i$ | $(\sigma_{\infty}/\sigma_f)$ | $(\sigma_{\infty}/\sigma_i)$ |
| | | | | $\left(\frac{A'}{60 B' \alpha}\right)$ | $\left(\frac{1}{B'}\right)$ | $\left(\frac{1}{B' \times \alpha}\right)$ | $\left(\alpha - \frac{1}{B'}\right)$ | $\left(1 - \frac{1}{B' \times \alpha}\right)$ |
| N-a $\sigma_f = 15.9 \text{ N/mm}^2$ $= 162 \text{ kg/cm}^2$ | 0.19 | 968 | 36 | 0.45 | 0.028 | 0.146 | 0.162 | 0.854 |
| | 0.42 | 3533 | 26 | 2.26 | 0.038 | 0.092 | 0.382 | 0.908 |
| | 0.69 | 500 | 9 | 0.93 | 0.111 | 0.161 | 0.579 | 0.839 |
| | 0.76 | 357 | 7 | 0.85 | 0.143 | 0.188 | 0.617 | 0.812 |
| N-b $\sigma_f = 22.1 \text{ N/mm}^2$ $= 225 \text{ kg/cm}^2$ | 0.23 | 2080 | 60 | 0.58 | 0.017 | 0.072 | 0.213 | 0.928 |
| | 0.45 | 723 | 22 | 0.55 | 0.045 | 0.101 | 0.405 | 0.899 |
| | 0.61 | 1116 | 16 | 1.16 | 0.063 | 0.102 | 0.547 | 0.898 |
| | 0.81 | 670 | 11 | 1.02 | 0.091 | 0.112 | 0.719 | 0.888 |
| N-c $\sigma_f = 31.1 \text{ N/mm}^2$ $= 317 \text{ kg/cm}^2$ | 0.15 | 4139 | 83 | 0.83 | 0.012 | 0.080 | 0.138 | 0.920 |
| | 0.42 | 2530 | 27 | 1.56 | 0.037 | 0.088 | 0.383 | 0.912 |
| | 0.60 | 275 | 8 | 0.57 | 0.125 | 0.208 | 0.475 | 0.792 |
| | 0.77 | 908 | 11 | 1.38 | 0.091 | 0.118 | 0.679 | 0.882 |
| N-d $\sigma_f = 38.6 \text{ N/mm}^2$ $= 394 \text{ kg/cm}^2$ | 0.16 | 3558 | 52 | 1.14 | 0.019 | 0.120 | 0.141 | 0.880 |
| | 0.43 | 2955 | 30 | 1.64 | 0.033 | 0.078 | 0.397 | 0.922 |
| | 0.62 | 714 | 13 | 0.92 | 0.077 | 0.124 | 0.543 | 0.876 |
| | 0.75 | 709 | 11 | 1.07 | 0.091 | 0.121 | 0.659 | 0.879 |

次に、終局緩和量に関する定数Cについてみよう。Cの値はTable 7に、それから得られる終局緩和量は先のFig. 5に描いてある。Taylorらの結果は、Cの値が同じ設定応力水準に対して、同一骨材を用いても配合N-a-N-dによって、またその強度 σ_f の大小とも無関係に、相当広範囲に変化することを示している。骨材の種類を変えたコンクリートを供し、しかも破壊前・後の高応力水準下における筆者らの実験結果の分布範囲以上に大きくばらつくことは予想外であった。これは、Taylorらの実験結果が各設定応力につき供試体各1個であることの不確かさが原因しているものと思われる。

終局緩和量を強度 σ_f に対する比率で表わした場合(Fig. 5 (a))には、コンクリートの種類によるばらつきは小さくなるが、設定応力による変化が複雑となる。一方、終局緩和量を設定応力 σ_i に対する比率で表わした場合(Fig. 5 (b))には、ばらつきはやや大きくなるが、破壊までの設定応力 $\bar{\sigma}_i = 20 \sim 80\% \sigma_f$ の範囲では緩和率 $10\% \sigma_i$ 前後と一定値を算定し得る可能性がある。

以上のように、材令40日の供試体についてTaylorらが得た緩和量は、材令約1年の供試体について筆者らのが得た緩和量に比し、いくぶん大きな値をとる傾向を示している。他の条件が必ずしも同じとはいえないので、単純に結論するのは危険であるが、両者の緩和量の差は材令が大なるほどコンクリートの緩和現象を示す要素すなわち粘性的性質が減じ、弾性的性質が増加するといったクリープ現象における材令の影響と同様な傾向が緩和現象においても現われるものと思われる。

なお、Taylorらが破壊前の供試体に関して得た、湿

度条件の影響について、たとえば、終局緩和量はdryの方がwetのそれよりも大きく、しかも設定応力が低いほど両者の差が大きかった点について、そのまま破壊後供試体にも適用できるかどうかの検討は今後の課題となる。

4. む す び

コンクリート供試体の破壊前および後を含む、高応力、高ひずみ下の緩和現象に関して得られた知見の主なものを列挙すると次のようである。

(1) コンクリートの緩和現象は、クリープ現象に対するRossの式と類似の実験式(3.6)によって十分の精度で表わし得る。式は3つの実験定数A, Cを含み、定数Aは粘弾性体の緩和時間に対応して、終局緩和量の1/2の緩和が生ずるのに要する時間を表わし、定数Cは終局残留応力の値を表わす。

(2) 実験の結果得られた緩和時間に関する定数Aはばらつきが大きい、コンクリートの種類、設定応力の水準、破壊の前後などに無関係であり、およそ6分前後の値をとる。この値はクリープ試験でRossの式を用いて計算される遅延時間に対応する実験定数の値と比べてきわめて短く、緩和現象の短期終結性を示すものと解される。

(3) 終局応力を表わす定数Cは、Aに比べてばらつきが小さく、緩和現象の特性値として信頼度の高いものであることを示す。終局応力値 $C(=\sigma_{\infty})$ 、したがってまた終局緩和量 $(\sigma_i - \sigma_{\infty})$ は、骨材の種類、セメント量

の多少などコンクリートの種類による変化は少なく、設定応力の水準 $\bar{\sigma}_i$ ($\% \sigma_f$) に主として支配される。

(4) 得られた終局緩和量を強度 σ_f との比率で見ると、破壊応力以下の設定応力では $6\% \sigma_f$ 前後であるが、破壊直後に急増して最大値 $13\% \sigma_f$ を示し、以後のひずみ軟化域では設定ひずみの増加にもかかわらず緩和量は低下する。

(5) 一方、終局緩和量を設定応力 σ_i との比率で見ると、破壊前後を通じて緩和量は設定応力に比例し、その比例定数は破壊点を境に急変し、後者の値 $13 \sim 15\% \sigma_i$ は前者の値 $7 \sim 8\% \sigma_i$ の約2倍である。

(6) 設定応力 $20 \sim 80\% \sigma_f$ の領域で、Taylor らが材令40日の供試体について得た緩和時間 $A=1 \sim 2$ 分および終局緩和量 $10\% \sigma_i$ は、材令約1年の供試体に対する上述の結果に比べて、緩和現象の顕著なことを示し、

緩和現象に与える供試体材令の少なからぬ影響が推論される。

参考文献

- 1) 木山英郎・西林新蔵：コンクリートの破壊前・後の応力-ひずみ挙動，土木学会論文報告集240号，pp. 103~111，1975年8月。
- 2) Neville, A.M. : Creep of Concrete, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1970.
- 3) Taylor, M.A. and G.K. Maurer : Short-Term Stress Relaxation of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, pp. 123~135, 1973.
- 4) 齊藤敏明・石川兼治・川本脩万：ひずみ制御のもとでの岩質材料の変形挙動について，土木学会第28回年次学術講演概要集，第3部，pp. 301~302, 1973.
- 5) Ross, A.P. : Concrete Creep Data, The Structural Engineer, Vol. 15, No. 8, pp. 314~326, 1937 (前出文献2)より引用).

(1974.8.5・受付)