

コンクリートの加温乾燥のくりかえしによる残留変形について

正員 大 浜 文 彦*

ABOUT CUMULATED STRAINS IN CONCRETE AND MORTAR DUE TO REPEATED WETTING AND DRYING WITH WARMTH.

Fumihiko Ohama, C.E. Member.

Synopsis :

We considered the cumulated strains due to repeated wetting and drying with warmth, as a factor of initial stresses inside the structures of concrete and mortar. At first, we introduced some mathematical expressions for drying shrinkage and shortening of such a prism as that we used in our experiments.

Then, we reported experimental observations of cumulated deformations of concrete and mortar-prisms due to repeated wetting and drying with warmth. And we lead to the conclusion that they were the cumulated one of individual dry shrinkage by repetition. At last, we mentioned some proposed method of calculating the initial stress considering the creep.

1. 緒 言

コンクリートは、金属材料にくらべて、熱伝導度が小さいため、構造物に不均等な温度分布を生じやすく、また、硬化セメント相に含まれる水分の蒸発、吸収などによる移動、及び、骨材の変形抑制作用 (restraint) により、Reissner のいわゆる固有応力源を生じ、初応力の存在する可能性が大きい。

野外の構造物は、また、連日にわたり、加温、乾燥、冷却、湿潤のくりかえしを受け、それによる変形も考えられる。後に述べるように、このくりかえしにより、変形が蓄積されるが、その残留変形を初応力の一要素として考えてみたいと思う。

米国においては、この乾湿のくり返しによる試験法が、コンクリートのアルカリ骨材反応と、耐久性に対する一試験法として、広く実施されているようであるが^{(1),(2)}、供試体寸法が比較的大きく、(3×3×15 in)、前にのべたと同じ理由から、初応力が発生し、その供試体についての総括的平均値としての結果が得られるにすぎないようである。

本研究では、小断面供試体、(1×1×10 in)、を用い、この乾潤のくりかえしによる残留変形に関する実験を行い、各種因子との関係を明らかにし、この残留変形は、乾燥収縮の蓄積によるものと考えられるとの推論を得た。以下、乾燥収縮の数学的表現による説明を加え、実験結果を要記し、ついで、初応力の一要素としての考察を行つてみたいと思う。

2. 乾燥収縮、および、角柱の短縮

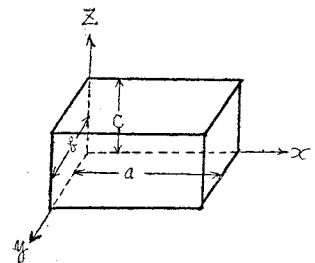
コンクリートの乾燥収縮を、拡散の方程式、すなわち、一般に熱伝導の方程式と称せられるものを用いて表現することの妥当性は、Carlson⁽³⁾、Pickett⁽⁴⁾等が、すでに詳細に論じている。今、ここに、その妥当性を仮定すれば、直六面体の六つの面より乾燥する場合の収縮ヒズミ S は、次式に従う。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

但し、 t は時間、 x, y, z は、図-1 に示すようにとつた、空間座標、 κ は収縮の拡散係数である。

乾燥面の座標、及び、境界条件は次の通りである。

図-1



* 三重大学助教授、農学部農業土木学科

$$\left. \begin{aligned} x=0: \frac{\partial S}{\partial x} - fS=0, \quad x=a: \frac{\partial S}{\partial x} + fS=0 \\ y=0: \frac{\partial S}{\partial y} - fS=0, \quad y=b: \frac{\partial S}{\partial y} + fS=0 \\ z=0: \frac{\partial S}{\partial z} - fS=0, \quad z=c: \frac{\partial S}{\partial z} + fS=0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 f は表面係数 Surface factor であつて、6つの乾燥面において同一とする。

(1), (2) を満足する解は、

$$S = S_{\infty} \left[1 - 64f^3 \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\mu_{2p+1}}{a} x + \frac{fa}{\mu_{2p+1}} \sin \frac{\mu_{2p+1}}{a} x}{\mu_{2p+1}^2 + f^2 a^2 - 2f} \cdot \frac{\cos \frac{\mu_{2q+1}}{b} y + \frac{fb}{\mu_{2q+1}} \sin \frac{\mu_{2q+1}}{b} y}{\mu_{2q+1}^2 + f^2 b^2 - 2f} \right. \\ \left. \times \frac{\cos \frac{\mu_{2r+1}}{c} z + \frac{fc}{\mu_{2r+1}} \sin \frac{\mu_{2r+1}}{c} z}{\mu_{2r+1}^2 + f^2 c^2 - 2f} \cdot \exp \left\{ -\kappa \left(\frac{\mu_{2p+1}^2}{a^2} + \frac{\mu_{2q+1}^2}{b^2} + \frac{\mu_{2r+1}^2}{c^2} \right) t \right\} \right] \quad (3)$$

ただし、 μ_{2p+1}, \dots 等は、次式のそれぞれ、 $(2p+1)$ 番目……等の根である。

$$\tan \mu_x = \frac{2fa\mu_x}{\mu_x^2 - f^2 a^2}, \quad \dots \text{等}$$

しかして、 x 軸方向に測つたときの、供試体の短縮量 ΔL_x は、式 (3) で表される収縮ヒズミを、 yz 面で平均した値を、 x 軸に沿つて、0より a まで積分すれば、 t における値が得られる。

$$\Delta L_x = 64 S_{\infty} a \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{1}{\mu_{2p+1}^3 (\sec \mu_{2p+1} - 2f)} \cdot \frac{1}{\mu_{2q+1}^3 (\sec \mu_{2q+1} - 2f)} \\ \times \frac{1}{\mu_{2r+1}^3 (\sec \mu_{2r+1} - 2f)} \left[1 - \exp \left\{ -\kappa \left(\frac{\mu_{2p+1}^2}{a^2} + \frac{\mu_{2q+1}^2}{b^2} + \frac{\mu_{2r+1}^2}{c^2} \right) t \right\} \right] \quad (4)$$

式 (3), (4) は収束が速くて、 f が $\sec \mu_{2p+1}, \dots$ 等に対して無視できれば、若しく簡単になる。

上式で明らかのように、短縮量は時間 t に関しては指数関数で与えられ、乾燥の初期は、ほぼ直線的に増加し長時間後では、ある一定の終局値に近づく。

3. 乾燥湿潤のくりかえしによる変形の蓄積

コンクリート中の、セメント相の加温乾燥による収縮は、速く進行するのに対して、冷却湿潤による回復は、比較的徐々である。これは、 f, κ が、乾燥と湿潤とによつて、違つた値をとることによるものと思われる。また、変形(収縮ひずみ)と含水率との関係も、若干変るようである。

前にも述べたように、乾燥収縮は速く進行して一定時間後は終局値に近づくが、湿潤回復は徐々であるため、ほぼ直線的に進行する。乾湿の時間長を、それぞれ一定にしたサイクルをくりかえせば、蓄積される変形量は一定となる。本研究における実験でも、モルタル供試体はサイクル中の乾燥時間の変化に対して、変形量は、ほぼ直線的に変化した。

供試体寸法は $1 \times 1 \times 10$ in (ゲージ長) ($2.2 \times 2.5 \times 25.0$ cm), 配合は、1:2 モルタル、 $W/C=0.45$, 及び、1:2.0:2.54 のコンクリート、 $W/C=0.57$ を標準とし、 $W/C, G/S$, 等の因子を変化させたものは、これら標準配合の前後に、若干変化せしめた。なお、コンクリート供試体では、小断面であるため、寸法最大寸法を最大限 10 mm に制限している。

測長は、Stanton 型のセメントペースト容積変化測定装置のコンパレーターで測定した。

乾燥湿潤のサイクルは、原則として、

- a. 8時間 50°C 湿度 35% の空气中で乾燥
- b. 16時間 一部 21°C 水中で湿潤
一部 21°C, 湿度 80% の空气中で湿潤

計 24 時間を 1 サイクルとし、連日、変形量を測定し、一定になるまでくりかえした。

乾燥時間、及び、乾燥空気湿度の変化による影響を観察するために、それらを若干変化させたが、1 サイクルは常に 24 時間とした。原則として材令 14 日より開始した。

この乾燥の諸条件は、Scholer⁹⁾ 等により、現場記録と、よく合致する結果が得られるとされているものに基づいている。

実験結果は、図-2~10 に示す通りであつて、その結論を列記すれば、次の通りである。

1. くりかえし乾燥湿潤されたものは、水中、または、常温高湿度の空气中におかれたものより、すみやか、か

つ、大きな収縮が蓄積され、このサイクルでの終局値は、モルタル $100 \sim 140 \times 10^{-5}$ 、コンクリート $60 \sim 75 \times 10^{-5}$ 程度に及ぶ。安定時期は、大体 7~14 サイクル間で得られる。

2. 水量の多いコンクリート程、残留変形も増大するが、G/S の多大の変化によつては、認められる程変化しない。

3. 貧配合程、早く安定し、水量による残留変形の大きさの差も大である。

4. 1 サイクル中の乾燥時間が長ければ、終局の残留変形量は大きとなり、モルタルでは、乾燥時間と直線の間係が認められた。

5. 乾燥空気湿度の高い方が、かえつて、変形の進行速度がすみやかで、早く安定し、大きな変形が残留する。これについては、P. Haller⁽⁶⁾ の指摘しているように、速い乾燥処理により、表層のゲル塊の核 Kern より水分が滲出して、水分が蒸発し難くなるためと考えられる。

6. モルタルに比し、コンクリートでは、諸因子の変化による残留変形の差異が小で、残留変形そのものも小である。

7. 各実験共、第1サイクルによる処女乾燥 The first shrinkage による残留変形が最大で、各因子による差異も大きく、その後サイクルを重ねるにつれて小となり、後には一定の変形増加が認められ、最後には、残留変形量は一定となる。

これについては、最近の Pickett⁽⁷⁾ の報告と似た傾向があるが、乾燥時間及び方法が、相当異なるので、その仮説をそのまま受取り難い点も多く、更に今後の研究にまちたいと思う。

4. 実験結果の考察

前にも述べたごとく、乾燥と吸湿による収縮と回復の速度の差によつて、加温をともなつた、くりかえし乾湿作用を受けたコンクリートおよびモルタル供試体は、そのサイクルが重ねられるにつれて、各サイクルごとに一定量の水分が失われて収縮が進行する。この進行の状況は、図-2~10 に示す通りであつて、各サイクル中の乾燥及び湿潤の時間が同一であれば、式(4)と同じく、時間 t の指数函数として表わされる。すなわち、便宜上、各サイクル中に失われる水量が、くりかえしでない乾燥によつて、ある一定時間内に失われるのと同様に考えることができる。

しかし、式(4)は、 f 、 ϵ 、すなわち、コンクリート表面の水分伝達率、及び、内部の水分伝導率、または、これらから計算される surface factor 等が簡単には測定できないので、数値計算が困難であるが、これを、第1項のみで表わして差しつかえないものと仮定して、

$$\Delta L = A(1 - e^{-\lambda t})$$

の形において、 A 及び λ を実験値より求めれば、

図-2 において、

気中乾燥(くりかえし)

$$\Delta L = 240(1 - e^{-0.30t})$$

図-2 残留変形の一般的傾向
(1:2 モルタル W/C=0.35)

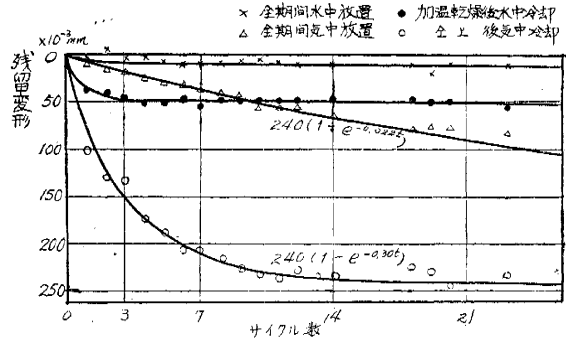


図-3 モルタルの配合変化と残留変形 (フロー値一定)

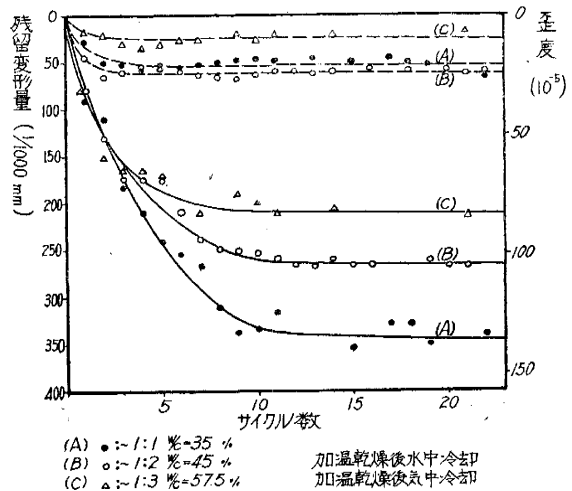


図-4 コンクリートの配合の変化と残留変形
(フロー値一定)

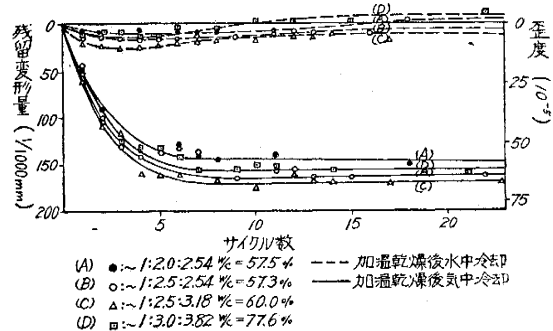


図-5 モルタルの水量の変化と乾燥収縮

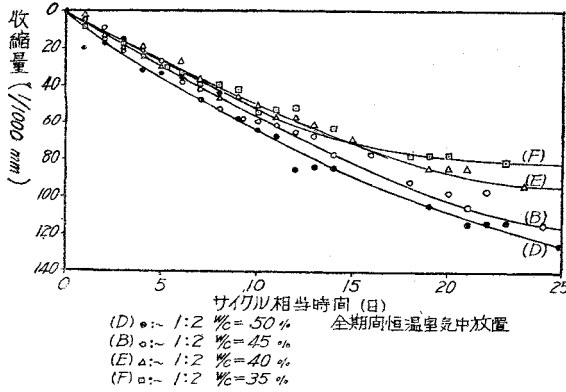


図-6 モルタルの W/C 変化による残留変形の差異

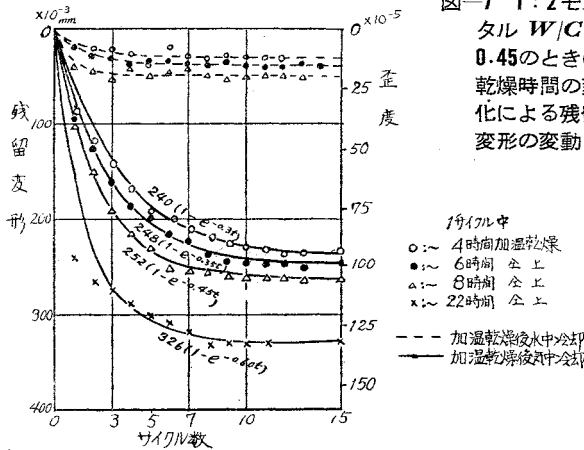
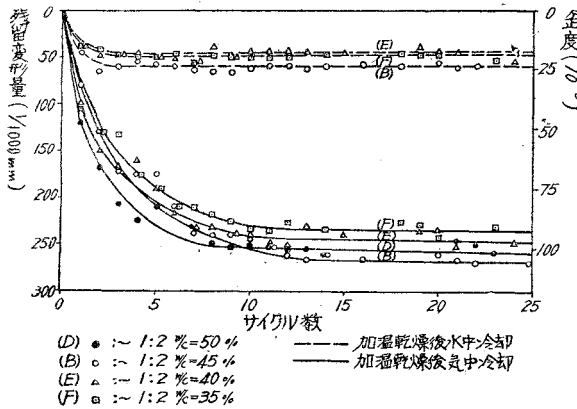
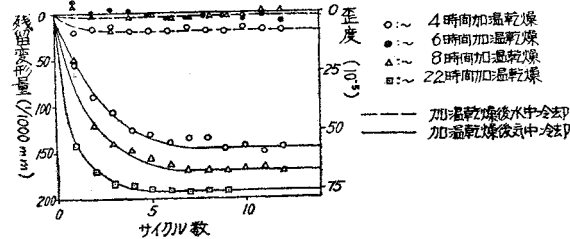


図-7 1:2モルタル W/C=0.45のときの乾燥時間の变化による残留変形の変動

図-8 1:3.00:3.82 W/C=77.6 骨材最大寸法 10 mm のコンクリートの乾燥時間の变化による残留変形の変動



恒温乾燥 (くりかえしでない場合)

$$\Delta L = 240(1 - e^{-0.022t})$$

となる。すなわち、くりかえし加温乾燥を受ける場合と、そうでない場合と A を同一と仮定すれば指数が 1 桁以上異なる。

以上の両実験式の A は、 $t = \infty$ における終局安定短縮量であつて、便宜上、この計算では、単なる収縮の場合も、くりかえし受ける場合と同一の値を仮定しているが、実際には、相当長時日の測定によつて、定めるべきものである。また、図-6、図-7 にみられるように、乾燥、湿潤時間の異なるサイクルをくりかえし受ければ、この A も変化している。

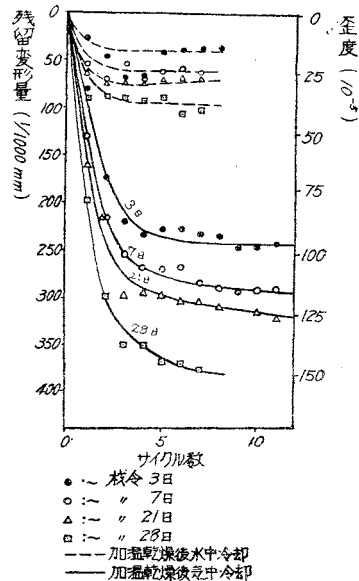
これは、乾燥のくりかえしによつて、完全に水分が失われて、終局安定短縮量に達した供試体が、各サイクル中の湿潤時間中に、その一部を回復するためであつて、各サイクル中の湿潤時間の長いものほど、くりかえし乾燥湿潤による残留変形の安定時の短縮量は小である。

従つて、短縮量が安定したとき、各サイクル中の乾燥の終了時には、この供試体の、最終安定短縮量 S_{∞} に達して、この短縮量が、どのサイクルでも一定であると考えれば、1 サイクルの湿潤時間を t_w とするとき、そのサイクルの安定短縮量 A は、次のようになる。

$$A = S_{\infty} - S_{\infty}(1 - e^{-\lambda w t_w})$$

ただし、実際は吸湿によつて、完全には回復しないかも知れないが、吸湿の時間が短ければ供試体の吸湿による回復が、 $S_{\infty}(1 - e^{-\lambda w t_w})$

図-9 材令と残留変形量 (1:2モルタル W/C=45%)



の形をとるものと仮定する。

従つて

$$A = S_{\infty} e^{-\lambda w t w}$$

本実験における、図-6 のモルタル供試体についての測定結果において、 $S_{\infty} = 339 \times 10^{-3}$ mm, $\lambda_w = 0.432$ と仮定すれば、大体実験値と合致している。

t_w (日)	$A_w (\times 10^{-3}$ mm)	
	実験値	計算値 ($S_{\infty} = 339$ $\lambda_w = 0.432$)
2/24	326	327
16/24	252	254
18/24	248	243
20/24	240	237

以上述べた所により、乾燥湿潤のくりかえしによつて生ずる残留変形は、乾燥と吸湿とによる変形速度の差によつて蓄積された収縮であつて、乾燥及び湿潤時間が一定であり、加温乾燥、湿潤方法等が一定のサイクルのくりかえしによる場合、式(4)であらわされる ΔL の表現式中の t の代りにサイクル数を用いて表してさしつかえないものと考えられるであらう。

5. 残留変形による初応力

上述のごとく、加温を伴つた乾燥と潤湿とを受けるコンクリート及びモルタルは、くりかえされぬ単なる乾燥を受ける場合に比較すれば、いちじるしく大きく、かつ、すみやかな残留変形を生ずる。従つて、今、これによる初応力を弾性体として取扱つて計算すれば、いちじるしく大きな応力度が算出される。しかし、実際のコンクリート及びモルタルは、確かに、このような変形が生じていても、その割に破壊することは少い。これは、クリープによる応力の減退が行われているためと考えられる。

従つて、この残留変形による応力の算定には、必ずコンクリート及びモルタルを塑性体として取扱うべきである。この方法として、今、収縮変形を、Maxwell 要素に、考慮し、収縮歪の函数 $S(t)$ を、シリーズに附加すれば、この要素の変形 ϵ は次式で与えられる。

$$\epsilon = \alpha \sigma + \phi \int_0^t \sigma dt - S(t) \tag{5}$$

ここに、 α はコンプライアンス、 σ は応力、 ϕ は粘性係数の逆数とする。これを微分して、

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \alpha \frac{d\sigma}{dt} + \phi \sigma - \frac{dS(t)}{dt} \tag{6}$$

これが、収縮を考慮したときの、Maxwell の基礎方程式に相当する。

特に、変形を一定に保つとすれば、 $d\epsilon/dt = 0$ とおいて、

$$\alpha \frac{d\sigma}{dt} + \phi \sigma - \frac{dS(t)}{dt} = 0 \tag{7}$$

$t=0$ で、 $\sigma = \sigma_0$ とすれば

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\lambda t} + \frac{e^{-\lambda t}}{\alpha} \int \frac{dS(t)}{dt} e^{-\lambda t} \cdot dt \tag{8}$$

但し、 $\lambda = \frac{\phi}{\alpha}$

上式の第1項は、収縮を考慮しないときの応力であり、第2項は収縮による応力を表わす。

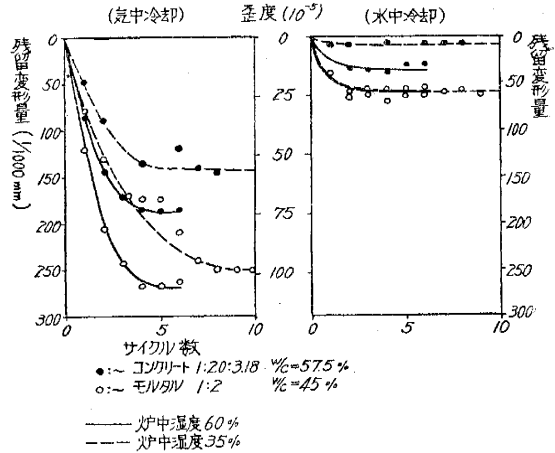
σ を一定にした場合は、簡単であるので省略する。

次に、ある構造物の一断面に、残留変形が分布し、それが、ある変形拘束条件下にあるときには、拘束されない場合の残留変形による応力に、その拘束条件により生ずる応力を重ねて考えればよろしい。

この拘束条件によつて生ずる反力は、たとえば、式(4)のような、部材全体の変形とその支持条件によつて定まる。しかし、外力、又は反力による応力の解析はすでに大部分が解決済みであるので、ここでは、自由に変形し得る場合の応力について考えることとする。

今、説明を簡単にするため、 x 軸、および z 軸に関して、収縮量に変化しない次元の場合を考える。

図-10 乾燥空気中の湿度と残留変形



固体内では、この変形の分布、すなわち応力源は、自由に変形することが許されず、連続の条件に適合させようとする応力によつて抑制されている。

Poisson 比効果を見れば、適合の条件は、

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

ここに、 e_x は、残留変形と応力とにより生ずるヒズミとの代数的差である。すなわち、 x 軸方向の引張応力 σ_x のとき、式 (5) より、

$$e_x = \alpha \sigma_x + \int_0^t \phi \sigma_x dx - S(t) \quad (10)$$

外力が作用しない場合を考えているので、

$$\int_0^b \sigma_x dy = 0, \quad \int_0^b \sigma_x y dy = 0 \quad (11)$$

式 (10) を、0 より b まで積分すれば、

$$\int_0^b e_x dy = \alpha \int_0^b \sigma_x dy + \phi \int_0^t \int_0^b \sigma_x dy dt - \int_0^b S(t) dy \quad (12)$$

式 (11) より、右辺の第1項と第2項は零となる。

$$\therefore \int_0^b e_x dy = - \int_0^b S(t) dy \quad (13)$$

同様にして

$$\int_0^b e_x y dy = - \int_0^b S(t) y dy \quad (14)$$

式 (9), (13), (14) を満足する解は、

$$e_x = \left(6 \frac{y}{b} - 4\right) \frac{1}{b} \int_0^b S(t) dy + \left(6 - \frac{12}{b} y\right) \frac{1}{b^2} \int_0^b S(t) y dy \quad (15)$$

これは、Pickett のクリープを考慮しない場合⁹⁾ に一致する。

すなわち、このような応力源による変形は、外力が作用しなければ、クリープの影響を受けない。従つて、変形のみを考えるときは、弾性体として取扱つてもよいことがわかる。

式 (15) と式 (10) とより σ_x を求めれば

$$\sigma_x = \frac{e^{-\frac{\phi}{\alpha} t}}{\alpha} \int_0^t e^{\frac{\phi}{\alpha} t} \left[\frac{dS(t)}{dt} + \left(6 \frac{y}{b} - 4\right) \frac{1}{b} \int_0^b \frac{dS(t)}{dt} dy + \left(6 - \frac{12}{b} y\right) \frac{1}{b^2} \int_0^b \frac{dS(t)}{dt} y dy \right] dt \quad (16)$$

すなわち、 σ_x は t の函数であつて、固体内の応力源による変形の内、弾性変形と、クリープによる塑性変形との比率は、時間と共に変化するが、両者の総和、すなわち、総変形量は時間の経過による変化があらわれない。

以上の別解として、微分方程式を用いないで、構造力学的な重合によつても求められる。これは、Pickett⁹⁾ が弾性体について求めたのと同じ方法である。

まず、曲げのみを抑制したときの、その断面に生ずる応力を求め、このときに生ずる曲げモーメントと等しく、向きの逆なモーメントを加えて、このモーメントを解放すれば、外力のないときの応力が求められる。

第1の応力は、

$$\sigma_x' = E \left(S(t) - \frac{1}{b} \int_0^b S(t) dy \right) \quad (17)$$

第2のモーメントは

$$M = \int_0^b E \left(S(t) - \frac{1}{b} \int_0^b S(t) dy \right) y dy = E \left[\int_0^b S(t) y dy - \frac{b}{2} \int_0^b S(t) dy \right] \quad (18)$$

これによる応力は

$$\sigma_x'' = \frac{M(y-b/2)}{1/12 b^3} = E \left(6 - 12 \frac{y}{b} \right) \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b S(t) y dy - \frac{1}{2b} \int_0^b S(t) dy \right] \quad (19)$$

式 (17) と式 (18) との和は

$$E \left[S(t) + \left(6 \frac{y}{b} - 4 \right) \frac{1}{b} \int_0^b S(t) dy + \left(6 - 12 \frac{y}{b} \right) \frac{1}{b^2} \int_0^b S(t) y dy \right] \quad (20)$$

式 (20) は、弾性的に取扱つて得た解である。

式 (15) の示すように、総変形がクリープの影響を受けないと仮定すれば、応力のみが、リラクゼーションによ

り減退する。

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{E} = \left[S(t) + \left(6\frac{y}{b} - 4\right) \frac{1}{b} \int_0^b S(t) dy + \left(6 - 12\frac{y}{b}\right) \frac{1}{b^2} \int_0^b S(t) y dy \right] \quad (21)$$

Maxwell の方程式において、 $d\epsilon_x/dt=0$ とすれば、

$$\sigma_x = \frac{e^{-\frac{\phi}{\alpha}t}}{\alpha} \int e^{\frac{\phi}{\alpha}t} \left[\frac{dS(t)}{dt} + \left(6\frac{y}{b} - 4\right) \frac{1}{b} \int_0^b \frac{dS(t)}{dt} dy + \left(6 - 12\frac{y}{b}\right) \frac{1}{b^2} \int_0^b \frac{dS(t)}{dt} y dy \right] dt \quad (27)$$

これは、前解法において求めた、式(16)と一致する。

上式の $S(t)$ として、Pickett が、 $y=b$ なる面のみより乾燥するとき求めた解⁸⁾ は次の通りである。

$$S = S_{\infty} \left(1 - \sum_1^{\infty} e^{-T \beta_n^2} F_n \frac{\cos \beta_n \frac{y}{b}}{\cos \beta_n} \right) \quad (28)$$

ここに、 $t=0$ で $S=0$ 、 $t=\infty$ のとき S_{∞} とし、 $T = \frac{\kappa t}{b^2}$ 、 $F_n = \frac{2B}{B^2 + B + \beta_n^2}$ 、 $B = \frac{fb}{\kappa}$ 、 β_n は $\beta \tan \beta = B$ の n 番目の根とする。

4. に考察したように、残留変形も収縮の蓄積されたものと考えられるので、式(28)の S_{∞} の代りに A, t の代りにサイクル数を用い、 f 及び κ を残留変形の場合に適合するように選定すれば、式(28)の形で残留変形を表すことができる。

これを式(16)又は式(17)に適用する場合 t をサイクル数で表し、1サイクルによつて生ずる応力のクリープ現象を表わすように ϕ を定める必要がある。

そうすれば、式(28)を式(27)に代入して

$$\sigma_x = \frac{S_{\infty}}{\alpha} \sum_1^{\infty} \left[\frac{1}{p-1} \left(e^{-\frac{\phi}{\alpha}t} - e^{-\frac{\kappa}{b^2} \beta_n^2 t} \right) \left\{ -F_n \frac{\cos \beta_n \frac{y}{b}}{\cos \beta_n} + H_n - \left(6 - 12\frac{y}{b}\right) G_n \right\} \right] \quad (29)$$

ただし $p = \frac{\phi}{\alpha} \frac{\kappa}{b^2} \beta_n^2$

ここに、 $H_n = \frac{B}{\beta_n^2} F_n$ 、 $G_n = \left(\frac{1}{\cos \beta_n} - \frac{B}{2} - 1 \right) \frac{F_n}{\beta_n^2}$ 、 κ は収縮伝導度である。

これに対して、Pickett⁸⁾ が求めた弾性体の解を、これと同じ附号で表せば

$$\sigma_{xe} = \frac{S_{\infty}}{\alpha} \sum e^{-\frac{\kappa}{b^2} \beta_n^2 t} \left\{ -F_n + H_n - \left(6 - 12\frac{y}{b}\right) G_n \right\} \quad (30)$$

式(30)において、 $\frac{\kappa}{b_0} t = 0.01$ 、 $B = \frac{fb}{\kappa} = 5$ のとき、 $y=b$ 、すなわち、表面の初応力について、弾性体として計算すれば

$$\sigma_{xe} = \frac{S_{\infty}}{\alpha} \{ 0.8415(-0.3152 + 0.9123 + 6 \times 0.07950) + 0.1963(-0.2161 + 0.06148 - 6 \times 0.0068) + 0.0084(-0.2161 + 0.01347 - 6 \times 0.0062) + \dots \} = 0.90 \frac{S_{\infty}}{\alpha}$$

残留変形の場合、実験値より、 $S_{\infty} = 100 \times 10^{-5}$ とおいて試算してみれば、 $1/\alpha = 140\,000 \text{ kg/cm}^2$ として、

$$\sigma_{xe} = 126 \text{ kg/cm}^2 \text{ (引張)}$$

これは、モルタル、及び、コンクリートの強度に比べれば、いちじるしく大である。

式(29)によつて、減退した応力を算定するには、目下の所、その諸係数の妥当なる仮定をするだけのデータが不足であつて、目下実験的に追求中である。それについて、更に、今後の研究の進展をまつて報告したいと考えている。

6. 結 語

以上のべた所により、コンクリート及びモルタルが、日射、降雨、又は、夜間の冷却等をくりかえし受ける際に、収縮が蓄積されて、相当大きな残留変形を生ずることが考えられるであろう。これによる初応力の算定には、まだ、数多くの問題はあつたが、一応、実験的に、その残留変形、及び、その初応力に及ぼす影響について明らかになつたものと信ずる。

すなわち、この残留変形は、乾燥収縮の蓄積されたものと考えられ、その進行速度は速やかであり、その大きさも比較的大である。しかし、その進行速度が速やかであるので、ある時期以後は一定として取あつかえるようである。その時は、以上の論述はいちじるしく簡単になるであろう。

又、クリープを考慮した場合の応力も、一応理論的に述べた。便宜上、本稿においては、Maxwell の方程式を用いたが、その対象次第では、より精密な、クリープ特性を用いての論述も可能である。しかし、収縮が拡散の方程式で、どの程度精密に表現できるかを考えるとき、以上の取扱いで十分であるかも知れない。特に、初応力が、ヒビワレ応力の一部にすぎないと考えられる場合、すなわち、外力と、初応力との和が、ヒビワレ応力として作用するときは、以上の取扱いで十分であると思う。

なお、本研究は、その実際への適用に当つては、諸係数の測定又は推定法その他の研究が必要であり、目下研究続行中である。成果を得次第更に発表の予定である。

本研究は、昭和30年度文部省内地研究員として、京大留学中に行つたものである。御指導頂いた近藤教授始め、コンクリート研究室の諸氏、及び、関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) "Material Testing Procedures Manual" Bureau of Reclamation Chapt. IV. I. 近藤泰夫訳、土木材料試験便覧、5章、I. p.187.
- 2) "A Wetting and Drying Test for Predicting Cement-Aggregate Reaction" by C.H. Scholer ASTM 1949 Vol. 49.
- 3) "Drying Shrinkage of Concrete as affected by Many Factors" by R.W. Carlson ASTM Vol. 38 1938.
- 4) "Shrinkage Stresses in Concrete" by G. Pickett Jour. ACI. 1946 Jan. Vol. 17 No. 3.
- 5) 2) に同じ
- 6) "Schwinden und Kriechen von Mörtel und Beton" von P. Haller Diskussions-bericht Nr. 124 E.M.P.A., Zürich.
- 7) Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis concerning Shrinkage" by G. Pickett Jour. of ACI 1956 Vol. 27 No. 5.
- 8) 4) に同じ、(以下引用せる Pickett のデータも同様)

本論文中の T 及び B の数値は、Pickett の計算例の一部と同一数値を仮定している。

(昭 31.11.5)