コンクリートの初内應力について

大濱　文彦

1. 概説

コンクリート構造物の一大欠点は、往々にして不測の原因によりCrackの発生をみることである。設計計算では安全と信じられていても、実際には、Crackの発生をみない事は、殆んどないと言つて差支えないであろう。現在、コンクリート構造物におけるCrack発生は、当然のこととして諦められているようであるが、これは明らかに一種の破壊を意味している。従つて、このCrack発生の防止は、我々コンクリート学者にとつて、最大の課題である。

目下、このCrack防止の見地から、溫度応力収縮応力の研究が試みられ、又、振動論による応力の再検討がなされているようである。

著者は、ここに主として初内応力（Initial stress）の諸因子を検討し、それらが、初内応力に如何に応用するかについて、簡単な試算を行つた。以下、それについて述べたいと思う。

2. 初内應力の因子

今、コンクリートの初内応力を大別して、これらに影響する主なる因子を挙げれば次の通りである。

a. 溫度応力（熱応力）
　水和熱量、冷却速度、発熱速度、彈性係数、膨張係数

b. 収縮応力
　乾燥収縮速度、乾燥収縮量、彈性係数

c. クリープ応力
　クリープ量、クリープ速度、彈性係数

即ち、コンクリート体内では、応力σと歪εは、1対1の対応をなすことができず、同一歪であつても、応力度は時間とともに変化し、応力はεと時間tと函数となる。しかも、これに影響する因子は、前述の如く、コンクリートの性質及び構造物の環境全般にわたり、きわめて複雑である。

又、嚴密に言えば、コンクリートは多少塑性を有し、重合の法則は適用できない。しかし、応力度が小さい限度であれば、重合の法則を準用することができる。

3. 溫度歪

コンクリートの膨張係数βであるとき、溫度θ°の上昇による歪をε_θとすれば、

$$\varepsilon_\theta=\beta\theta \qquad (1)$$

膨張係数βは吉本氏によれば、セメント量の多いもの程多少大きくなるが、$1\sim1.1\times10^{-5}$である。

溫度θは、セメントの水和熱量及びそれが傳導により分布され、更に、外気との境界面で放熱冷却する狀態に左右される。一般に使用セメントの化学成分と、位置（x, y, z, 又はr, θ, z等）及び時間tの函数である。

その内、水和熱量は、Davis, Byram, 及び、Steeleによれば、打設直後より、6～10時間において発熱速度が最大であつて、以下、時とともに減少し、終極における総発熱量は全一セメントを同量使用した場合、略一定である。又24時間以後においては、これを指数函数の形で表すことができる。

又、熱傳導，傳播，傳達は、コンクリートの熱的性質，構造物の形狀環境等に左右され、溫度に略々比例する。これらの解析は今後に期することとして、ここでは、コンクリート体内の一点附近の小部分について考えれば、Boulder damにおける観測結果及び中條氏の実験により、次の如く変化すると考えられる。

即ち、打設後60時間附近で、上昇溫度は最大となり、それまでは次の形をとる。

$$\theta=T_0(1-e^{-mt}) \qquad (2)$$

茲に、T_0, mは常数である。

次に、これより、溫度は下降して、次の形で表される。

$$\theta=T'_0(1-e^{lt'})+\theta_{max} \qquad (2')$$

但し、t'は溫度が下降し始めてよりの時間とし、T'_0, lは常数、θ_{max}は最高上昇溫度である。

今、打設後60時間で、$\theta_{\max}$ に達するものとすれば、式 (2) より、$\theta_{\max}=T_0(1-e^{-60m})$ となる。

$$\therefore \theta=T'_0\{1-e^{l(t-60)}\}+T_0(1-e^{-60m})$$
$$=(T_0+T_0')\{1-T_0/(T_0-T'_0)e^{-60m}$$
$$-T_0'e^{-60l}\cdot e^{lt}\}=T(K_T-Ae^{lt}) \qquad (3)$$

茲に、$T=T_0+T'_0$, $A=T_0'e^{-60l}$,
$K_T=(1-T_0/Te^{-60m})$

従つて、温度のみにある歪 ε_θ は次の2式であらわされる。

$$\left.\begin{array}{ll} t=0\sim60\text{時間} & \varepsilon_\theta=\beta T_0(1-e^{-mt}) \\ t=60\text{時間}\sim & \varepsilon_\theta=\beta T(1-Ae^{-t}) \end{array}\right\} \quad (3')$$

3. 収縮歪

収縮による歪 ε_s も、溫度上昇と似た曲線を示し、次の形であたえられる。

$$\varepsilon_s=-S_0(1-e^{-nt}) \qquad (4)$$

この S_0 は収縮が、長期間後、一定となつた時の値であつて、Davisによれば、w/c の多いもの程大であり、Puzzolan を混入したものは、更に大となる。養生條件によつても異るが、S_0 は 4×10^{-4} 程度である。又、n=0.0002 程度の値を得ている。

4. クリープ歪

Creep 歪は、一般に応力度、及び応力増加速度の函数である。コンクリートの初内応力は、きわめて除々に変化するので、応力の増加速度による変化は、考慮してもしなくても、殆んど同様である。

Whitney による、クリープ歪 ε_c の表示を用うれば、

$$\varepsilon_c=\int_0^t \frac{\sigma}{E}\frac{d\varphi_t}{dt}\cdot dt$$

但し φ_t はクリープの時間函数

これに基ずいて、Lorman と同じく、指数曲線で表せば、

$$\varphi_t=b(1-e^{-\alpha t})$$

$$\therefore \varepsilon_c=\int_0^t \frac{\sigma}{\varepsilon}\frac{d\{b(1-e^{-\alpha t})\}}{dt}\cdot dt$$
$$=\int_0^t \frac{\sigma}{E}\alpha be^{-\alpha t}\cdot dt \qquad (5)$$

普通、コンクリートのクリープ歪の終局値 b/E は、通常 $30\sim50\times10^{-3}$ 程度である。又、Lormanの実験値より推定すれば、式中の α は、0.001前後の値を採用できるようである。

5. 弾性係数E

一般に、Eは強度の一次函数としてあらわされると言われている。但し、音響法では、Eを強度の平方根の一次式として表したものを採用している。樋口氏によれば、更に W/C によつても変化するとしている。何れにしても、同一コンクリートでは、Eは材令、即ち t の函数である。しかし、吉本氏の実験結果よりしても、その初期を除き、その増加はきわめて小で、一定と考えて差支えないようである。勿論、硬化の初期におけるEは、著るしく小であつて、Eを一定として計算した場合．実際の応力は、計算値よりはるかに小さな応力を発生しているにすぎないであろう。

6. 初内應力

コンクリート体内の微小部分について、以上の各種の歪を生ずるとき、完全にその方向に固定されて、歪を許さないものと仮定して、その方向の初内応力を計算し、前記の諸因子が、如何に影響するかを考察することとする。

この場合、収縮応力を負とすれば、式 (3), (4), (5), より、次式が成立する。

$$-\sigma_c=E[\beta T(K_T-Ae^{lt}-S_0)(1-e^{-nt})+\int_0^t \frac{\sigma}{E}\alpha be^{-\alpha t}\cdot dt] \qquad (6)$$

t のみの函数であるから、之を t で微分して

$$\frac{d\sigma}{dt}=\left\{\beta TlAe^{lt}+nS_0e^{-nt}-\frac{\sigma}{E}\alpha be^{-\alpha t}\right\}\cdot E \quad (7)$$

之を整理すれば

$$\sigma\cdot P+\frac{\alpha\sigma}{dt}=Q$$

但し、$P=\alpha be^{-\alpha t}$
$Q=E(TAle^{lt}+nS_0e^{-mt})$

この解は周知の如く

$$\sigma=\exp-\int Pdt\cdot\int Q\exp Pdt\cdot dt+$$
$$C\exp-\int Pdt \quad (\text{但し}C\text{:常数})$$

式中

$$\int Pdt=\alpha b\frac{1}{-\alpha}e^{-\alpha t}=-be^{-\alpha t}$$

$$\int Q \cdot \exp\int P\,dt \cdot dt = \int E\beta TAl e^{lt} e^{-b\cdot\exp-\alpha t} \cdot dt + \int EnS_0 e^{-nt} e^{-b\cdot\exp\alpha t} \cdot dt$$

$$= E\beta TAl \int e^{lt} \cdot e^{-b\cdot\exp\alpha t} \cdot dt + EnS_o \int e^{-nt} e^{-b\cdot\exp\alpha t}$$

この項のうち

$\int e^{lt} \cdot e^{-b\cdot\exp-\alpha t} \cdot dt$ において $e^{-\alpha t} = x$ とおけば

$$e^{lt} \doteqdot X^{-l\alpha}$$

之を用いて展開すれば

$$\int e^{lt} \cdot e^{-b\cdot\exp\alpha t} \cdot dt = \int X^{-\frac{l}{\alpha}} e^{-bX} \frac{1}{-\alpha X} dX$$

$$= -\frac{1}{\alpha}\int X^{-\frac{n}{\alpha}-1} e^{-bX} dX$$

$$= \frac{e^{-bX}}{\alpha b}\left[X^{-\frac{l}{b}-1} - \frac{-\frac{l}{\alpha}-1}{b} X^{-\frac{n}{\alpha}-2} + \frac{(-\frac{l}{\alpha}-1)(-\frac{l}{\alpha}-2)}{b^2} X^{-\frac{l}{\alpha}-3} - \cdots\cdots \right]$$

こゝで、$b = E \times (30 \sim 50. \times 10^{-3})$, $l = 0.002$ 以下, αは0.001程度, 故に第2項は、第1項の 0.001以下で、これを無視すれば

$$\int e^{lt} e^{-b\cdot\exp-\alpha t} \cdot dt = \int X^{-\frac{l}{\alpha}} e^{-bx} dt = \frac{e^{-bx}}{\alpha b} \times^{-\frac{l}{\alpha}-1}$$

$$= \frac{e^{-b\cdot\exp-\alpha t}}{\alpha b} \epsilon^{(l+\alpha)t}$$

次に $\int e^{-mt} e^{-b\cdot\exp-\alpha t} \cdot dt$ は、以上の l が $-n$ になつたものにすぎない。

$$\therefore \int X^{\frac{n}{\alpha}} e^{-bX} dt = \frac{e^{-bX}}{\alpha b}\left(X^{\frac{n}{\alpha}-1} - \frac{\frac{n}{\alpha}-1}{-b} X^{\frac{n}{\alpha}-2} + \frac{(\frac{n}{\alpha}-1)(\frac{n}{\alpha}-2)}{b^2} X^{\frac{n}{\alpha}-3} - \cdots\cdots \right)$$

n =0.0002 程度であるから、第2項は、第1項の 0.0025 程度で、これも無視できる。

$$\therefore \int X^{\frac{n}{\alpha}} e^{-bX} dt = \frac{e^{-b\cdot\exp\ \alpha t}}{\alpha b} \cdot \epsilon^{(-n+\alpha)t}$$

$$\therefore \sigma = e^{b\cdot\exp-\alpha t}\left\{ \frac{E\beta TAl}{\alpha b} e^{-b\cdot\exp-\alpha t} e^{(l+\alpha)t} + \frac{EnS_o}{\alpha b} e^{-b\cdot\exp-\alpha t} e^{(-n+\alpha)t} \right\} + C e^{b\cdot\exp-\alpha t}$$

$$= \frac{E}{\alpha b}\left\{ \beta TAl e^{(l+\alpha)t} + nS_o e^{(-n+\alpha)t} \right\} + C e^{b\cdot\exp-\alpha t} \tag{8}$$

式中、Cは $t = 60$ でθが最大となるものと仮定し、その時のσを境界條件として求める。

$t = 60$ までは次式が成立する。

$$-\sigma = E\left[\beta T_o(1 - e^{-mt}) - S_o(1 - e^{-nt}) + \int_0^{30} \frac{\sigma}{E} \alpha b e^{-\alpha t} \cdot dt\right]$$

尚、式中Eはtの函数として求むべきであるが、前述の如く、ここでは一定とする。この解は、

$$\sigma = \frac{E}{\alpha b}\{ -\beta T_0 m e^{(-n+\alpha)t} + ns_0 \epsilon^{(-n+\alpha)t} \} + C' e^{-b\cdot\exp-\alpha t}$$

上式では、$t = 0$ のとき $\sigma \doteqdot 0$

$$\therefore -\frac{E}{\alpha b}(-\beta T_0 m + nS_0) = C' e^b$$

$$\therefore \sigma = \frac{E}{\alpha b}\left[\beta T_0 m\{ e^{-b(1-\exp-\alpha t)} - e^{(-m+\alpha)t} \} - nS_0\{ e^{-b(1-\exp-\alpha t)} - e^{(-n+\alpha)t} \}\right] \tag{9}$$

$t = 60$ とおけば

$$\sigma_{t=60} = \frac{E}{\alpha b}\left[\beta T_0 m\{ e^{-b(1-\exp-60\alpha)} - \epsilon^{60(-m+\alpha)} \} - nS_0\{ e^{-b(1-\exp-60\alpha)} - \epsilon^{60(-n+\alpha)} \}\right] \tag{10}$$

従つて、

$$\sigma = \frac{E}{\alpha b}\Big[\!\Big[\{\beta TA l^{(l+\alpha)t} + nS_0 e^{(-n+\alpha)t}\} + \beta \exp b\,(e^{-\alpha t} - e^{-60t}) \cdot$$
$$[T_0 m\{e^{-b(1-\exp-60\alpha)} - e^{60(m+\alpha)}\} - TAle^{60(l+\alpha)}]$$
$$- nS_0 e^{-b(1-\exp-90\alpha)} \cdot e^{b(\exp-\alpha t - \exp 60\alpha)}\Big]\!\Big] \qquad (11)$$

之を整理すれば、

$$\sigma = \frac{E}{\alpha b}[\{K_1 e^{(l+\alpha)t} + K_2 e^{(-n+\alpha)t}\} + K_3 e^{b\cdot\exp-\alpha t} + K_4] \qquad (12)$$

茲に、$K_1 = \beta TAl = \beta TlT_0{}'e^{-60l}$

$K_2 = nS_0$

$K_3 = T_0 m\{e^{-b(1-\exp 60\alpha)} - e^{60(m+\alpha)}\} - TAle^{60(l+\alpha)} - nS_0 e^{-b(1-\exp-60\alpha)}$

$K_4 = -e^{-60\alpha}$

更に、短時間内の温度変化θ_tが考えられるとき、初内応力σ_iは、θ_tによる応力はクリープに影響されないと考えて、それを式(12)に加えなければならない。

$$\sigma_i = \sigma \pm E_\beta \theta_t \qquad (13)$$

θ_tは通常日射をうけても、最大$^1/_2$(35～50)°C 程度であろう。

7 考　　察

式(12)を考察すれば、各因子の初内応力に及ぼす影響を知ることができる。

a. 温度変化

温度変化量は、その積として影響し、変化の速度を表す指数常数は、積(乗数)及び指数函数との積との和として影響する。

b. 収　　縮

収縮量は乗数として表わされ、直線的影響を与える。収縮速度を表わす指数常数は、乗数及び指数函数との積の和として影響する。

c. クリープ

クリープ量は、すべての種類の初内応力を減少せしめる。クリープ量及び速度を表わす指数常数との積が除数としてσに影響し、更に、各項に指数函数としてこの指数常数があらわれている。

即ち、クリープ量が大きく、且つ速やかなもの程、初内応力は小となる。

以上の考察は、Eを一定としているので、断言はできないが、コンクリートの配合、その他の条件を変化せしめた場合、クリープ量及び速度が初内応力に対する役割を推論することができる。一般に、強度は、クリープ量及び速度と逆の変化を示し、強いコンクリート柱、クリープ量は小で、しかもその速度はおそい。従つて以上の考察に基ずいて、$E/\alpha b$が最小となる如き配合設計を行えば、初内応力を小さくすることができるのではないかと思われる。

これは、更に、今後の研究に期すべき問題である。

8. 結　　論

以上のべた所により、コンクリートの初内応力とその因子との関係を幾分なりとも明らかになし得たと信ずる。コンクリート構造物の Crack 発生の原因が、この初内応力のみによるものとは考えられないが、荷重に対する応力計算では、許容応力を、実験値(但しシリンダーテスト)の$^1/_4$にとり、更に安全率を考慮していることを考えるとき、コンクリート体内における応力の相当大きな部分を、初内応力が占めていることが予想される。

又、最近の外国の報告をみると、単に強さだけを考慮したコンクリート舗装に、著るしい Crack を発生せしめた例が多いようである。ダム工事等のマスコンクリートでは、むしろ、弱い、従つて、セメント量のきわめて少ない(200 kg/m³ 程度以下)コンクリートが、かえつて、良好な結果を示している。この事実より考えても、初内応力の検討が、Crack 発生防止にある程度の手段を教えてくれるであろう事が推

察されるであろう。

從つて、これが果して、Crack 発生防止に解決を与えてくれるものであるかどうかは疑問ではあるが、一応、現狀より新なる前進であるとは言えるものと思う。

溫見堰堤及び隧道の基盤調査

三輪　正房

1. **序**　溫見堰堤予定地は山口縣都濃郡米川村字溫見にして末武川の上流約 12k.m に位置する狹谷でその上流は急に開けた狹谷盆地となつている。ここに貯水した水は河道に沿つて約 4 k.m 下流の高垣部落迄流下し、ここより隧道によつて下松市花岡町に導水し、更らにサイホン、暗渠、開渠等によつて東西に分岐しその大半は灌漑用水、一部を工業用水として利用せんとするものである。

一般に堰堤及び隧道等の築設は電源開発及び農產收量に重大なる関連性を有することは云うまでもないが、これが不幸にして破壞した場合には膨大なる資料を一朝にして失うばかりでなく堰堤の場合にはその下流に及ぼす被害の甚大なることは過去の歷史によつて明かである。而してその破壞の原因の大半は凝灰土の强度の不足によるのではなく基盤よりの漏水によるものである。從つてこれ等の築設にあたつては特にその基盤の調査に細心の注意が払われること当然である。

堰堤及び隧道の築設地としては先づ気象的及び地形的条件を滿足しなくてはならないのは勿論であるが、その附近の基盤が構造物築設後における力の不均衡又は水圧変化に伴う滲透水等に対する岩石の抗力が充分これ等に耐え得るものでなくてはならない。從つて基盤調査に当つては先づ地質調査及び物理的探查等を行つて附近の地質構造及び岩質の変成度等の詳細なる推定を行い、この結果に基づき試錐及び探查坑道を堀り予定地の基盤を構成せる岩石を実際に採集して充分なる檢討を行い然る後初めて実施さるべきものである。

2. **地質**　北部の溫見地域を構成する岩石は花崗岩であるが南部の下松地域は花崗閃綠岩からなつている。その中間地帶は両岩石によつて貫入された大なる楔狀体の山嶽地帶で、これを構成する岩石は山口変成岩に属する石墨片岩類である。

石墨片岩類の片理面は北部は南に南部は北に傾斜する所謂向斜構造をなし甚だしく擾乱されているがこれは花崗岩及び閃綠岩の貫入前に受けたものである。又略東西及び南北に走る断層が発達している。鏡下における鉱物は石墨の流理に平行に黑雲母が配列し、その間を石英及び長石が充塡している。長石は比較的不規則な配列を示し且つ曹長石に近いものからなつている。

花崗閃綠岩は下松市以東に略帶狀に露出し所々に片岩類の捕獲岩を介在している。一般に甚だしく侵蝕され上層はほとんど砂狀を呈し且つ石英を欠ぐため崩壞しやすく山崩れの原因となつている。老鄉地西方において花崗岩と接するも境界不詳で僅かに久米市南方において局部的に両岩石の接触部を認むるのみである。

これによつて両岩石の活動の前後関係を決定することは出来ないが大体において閃綠岩が花崗岩を貫入せるものと思われる。

花崗岩は溫見の下流 4k, m の下谷以北に広く分布している。略東西及び南北の両断層によつて切断されているが一般に東西方向のものが優勢である。閃綠岩と同様その上層部は侵蝕のため砂質狀を呈し甚だしく脆弱にして且つ所により可成り深所迄侵蝕が及んでるようである。又河岸附近に硬質岩が露出せるも一般に節理が