

【討 議】

プレストレスト コンクリート シリンダーの熱応力に関する研究

(土木学会論文集第 147 号 昭和 43 年 11 月所載)

藤 田 亀 太 郎 著

討 議 者：森 忠 次 (京都大学工学部)

【討 議】 熱応力に関する実験的研究は、通常の載荷実験以上に関連因子が多くて案外に困難であって精度にも疑問の多いことは、この種の実験を行なう者が誰しも経験するところであり、実験の遂行に非常な努力を払われたことと推察します。

論文中にかなり疑問箇所があり、そのために著者の結論が成立するかどうか再検討の必要があると思いますので、以下にそれらの要点を記します。ただし、著者の説明と式の意味するものとの関連がはっきりつかめず、かつ式に誤植が多いので、推測による思い違いがあれば訂正願います。

(1) この実験のように、構造物が 2 種の材料で構成され、かつ温度変動と力の両者が荷重となっている場合には、材料の熱膨張係数はできるだけ正しい値を採用するのが基本原則である。熱応力は熱膨張係数に直接的関係を有し、しかもコンクリートにおいては、使用するセメントと骨材の種類ならびに配合などの諸条件によって熱膨張係数に大きい差の生ずることは、公表されている多くの試験結果より明らかである。したがって、コンクリートの熱膨張係数を実測するか、そうでなくても慎重に推定した値を用いるべきであった。

(2) ひずみの測定値から、材料のクリープを考慮して応力を求めるための基本関係式はつぎのとおりである。

直応力 σ によるその方向の直ひずみ ϵ は、

$$\epsilon(t) = \int_0^t \left\{ \frac{1}{E(K)} + Q(K, T) \right\} \frac{d\sigma}{dK} dK \dots\dots (a)$$

であって、直角座標に関する直応力と直ひずみとの関係は、

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \{(1-\nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)\}, \dots, \text{等} \dots\dots (b)$$

である。

ここに、 E : 弾性係数、 Q : 単位クリープ、 ν : ポアソン比、 K : コンクリート材令、 T : 載荷継続時間、 t : 当該材令

したがって、 ϵ_x などを測定して式 (a) の積分方程式を解けばよく、この数値計算は古くから step-by-step computation¹⁾ として実行されており、少し計算を便利にする方法も工夫されている²⁾。せっかくひずみを測定したからには、この方法でも用いて応力を求め、その実情を把握すべきであったと思う。この方法では、微小時間中は応力が一定であると仮定する以外に近似をしていないが、著者はさらに多くの仮定を導入し、それらの仮定によってひずみ経歴を計算してみて、これが実測値とやや似た傾向であるから応力計算方針が妥当であると推定している。このときに採用された仮定における疑点をつぎに記す。

半径方向直ひずみ ϵ_r を測定していないため正しい応力は求められないが、その場合には半径方向直応力 $\sigma_r = 0$ と仮定してもかなりよい近似が得られると思われる。著者のように $\epsilon_r = 0$ と仮定すれば、適合条件式 (つり合い条件式ではない。原式 (12)) が満足するためには、原式 (14 a) のように $\epsilon_\theta \times r = \text{一定}$ となり、これは半径方向の変位が不変であるという不自然な状態を認めていることになる。

原式 (17) は、

$$\int_a^b \Delta\sigma_\theta \cdot dr = 0 \dots\dots (c)$$

すなわち、半径方向断面の直応力の合力に時間的変化がないという意味にとればよいであろう。そうすれば、外周から PC 鋼線によってプレストレスを与えているときに、クリープを生じても半径方向断面の合力は減じないと仮定したことになる。円筒の軸方向応力についても、式 (22) によれば、コンクリートにクリープを生じても導入されたプレストレスの合力は不変であると仮定しているわけである。

図-23 において、 ϵ_θ の実測値の変化と材料の 1 軸圧縮によるクリープとを比較して、前者が後者の約 1/2 であるから、実験円筒のクリープ (3 軸圧縮のクリープ) を 1 軸試験のクリープの 1/2 として計算してられる。しかし ϵ_θ は σ_r, σ_z の関数であるから、これらの応力の影響を差し引いたもので比較しなければならない。

なお、式 (a) のように、 E, Q ともに応力が変動する時刻の関数であるが、この点を計算上考慮してられないように推測される。この影響のみであれば応力の減少

は 図—24 (r_0 とあるが σ_0 であろう) ほど著しくないだろう。

(3) p. 33 において内外面温度差 (温度勾配でなくて温度差とするべきだと思います) T による円筒の応力を求めていられますが, 平面ひずみの場合と平面応力の場合とが混同しています。一般にひずみや変位は両者に差があり, とくに熱応力問題では必ず応力も異なります。当面の問題では, 温度変動と変位量が関係するためこれら点を厳密に考察すべきであり, ここでは平面ひずみとして取扱うべきです。原式 (7a) の右辺第 1 項は平面応力状態の変位ですから, 正しくは

$$(U)_{r=b} = \frac{b \alpha T}{1-\nu} \left(\frac{1}{2 \log(b/a)} - \frac{a^2}{b^2 - a^2} \right) - \dots \dots \dots (d)$$

原式 (5) および (9) においても外圧による平面応力状態の解として示されていますが, 平面ひずみ状態の解とすべきです。そうしないと総まとめにした原式 (11) が平面ひずみ状態の解であるから理論が一致しません。なお, これらの式では引張応力を正值としていて, 数値計算では圧縮応力を正值として示されているために困惑されます。

(4) p. 37 の左欄中央に, 「図—19 における円筒の軸方向直ひずみの測定値 ϵ_z をみれば, $\epsilon_z = \text{一定}$ という力学上の仮定が成立していないのは, 円筒が短いため自由端の影響が表われていることによる。したがって σ_z については計算しない。」という意味の記述があるのは問題だと思います。もし 図—19 に示された程度に重大な ϵ_z の変動があれば, 実験全部を不適切だと判定しなければならぬでしょう。また, 自由端の影響がかなり小さいという最初の計算例にも反します。そもそも 図—19 は熱膨張 αT を差し引いたものだから, 図—19 の ϵ_z に αT を加えたものがひずみであって, これが断面中であ

定であるかどうかを確かめなければならない。

(5) p. 39 の左欄では, 原子炉の压力容器と考えたときには, 炉の運転停止によって内側温度が急速降下しても, 円筒温度が定常に達するまでに 1 ヶ月ほどかかるから, この間にクリープによって重大な引張応力が避けられると推定しておられる。しかしながら, このような急激な温度降下を仮定すれば, 非定常温度状態のときに内面に大きい引張応力の発生することは避けられない。むしろ実際の原子炉では, 中性子や γ 線による発熱の影響, 炉の出力低下速度, 冷却能力の制御などによって, 極端に急速な温度低下はないと考えてよいだろう。

なお, 温度上昇の時期は, この論文の仮定よりずっと遅い材令から始まるのが実際であろうから, クリープの影響は計算値よりかなり小さいはずである。

- (6) 気付いた誤植その他の主要なものを記します。
- p. 26 左欄 M_z の式: $\alpha \rightarrow 2$
 - p. 29 左欄 8 行 外水温を一定 \rightarrow 外水温差を一定
 - p. 29 右欄 2 行 $T = \dots$ の式右辺に $+T_b$ を追加
 - p. 30 式 (1): $\alpha \rightarrow 2, l \rightarrow b$
 - p. 32 図—13: 下部の破線は σ_z 計算値か?
 M と M_z, E と E_c, μ と ν, r と r は同じもの。

(7) 以上のような誤りと思われる点および疑点がありますので, 研究結果の総括の (3) 以降についてはどの程度の妥当性があるかをよく検討してみる必要があると思います。ご回示願えば幸いです。

参 考 文 献

- 1) J.M. Raphael: Determination of Stress from Measurement in Concrete Dams, Third Congress on Large Dams, Vol. 1, p. 629 (1948).
- 2) K. Jones: Calculation of Stress from Strain in Concrete, U.S. Bureau of Reclamation, Tech. Memorandum 653 (1955).

回答者: 藤田 亀太郎 (極東鋼弦コンク
リート振興(株))

【回 答】 森 忠次氏のご討議に対し, 最初に総括的に, つぎにご討議の各項目ごとにご回答いたします。

本実験研究は P C シリンダーの熱応力度がコンクリートのクリープの影響を受けてどのように変化するか, その傾向を把握し, より近似度の高い計算方法の開発に役立てようとしたものであって, 熱応力度変化の絶対値そのものを求めようとするものではありません。熱応力度の正確な値を定めようとするならば, より大型の供試体を用いると同時に, 使用コンクリートの各種組合せ応力度状態かつ温度を変えた非常に数多くの

クリープ試験を別々に実施する必要があります。これらあらゆる基礎的資料が十分そろっている場合には, finite element または dynamic relaxation などの手法によって熱応力度を定めることが可能となることは論をまちません。本実験では温度と一軸クリープとの関係を別々に試験しておりますが, 二軸または三軸クリープ試験を各種温度については実施しておりません。したがって計算技術面ばかりでの精度を上げて余り意味が認められませんので, 本論文ではポアソン比の影響を無視して近似計算を進め, コンクリートの応力度が時間的にどのように変化するか, その傾向を示すこととしたのであります。したがって本論文に示す結論は本論文の

出発点となった仮定の範囲内に限られることは当然であります。結論の方向には誤りがあるとは考えておらず、一般的妥当性があるものと信じております。著者は1964年より予備試験を開始し、1965年末より本論文の実験を開始したものであります。1967年3月ロンドンでのPCPVに関する会議でG.L. Englandは“Long term thermal stress in per-stressed concrete structure”なる論文を発表しましたが、熱応力変化については本論文に述べたと同じ傾向にあることを示しています。全く無関係に開始された研究ではありますが、一般的傾向として両者は全く一致しており、著者は本論文の論旨に対する自信を深めている次第であることを申し添えます。

以下討議者の各項目ごとに回答いたします。

(1) について：温度差を急激に与えた場合の軸方向ひずみ ϵ_z を測定すれば、熱膨張係数 α を定めることが可能であります。測定された ϵ_z から求められた α の値は、約 1.2×10^{-5} であります。熱膨張係数はお説のように使用セメント、骨材、配合、等に関係することはもちろんであります。コンクリートの湿度、熱サイクル、等にも関係するものであります。これらを考慮して本論文では α を 1.0×10^{-5} と仮定したものでありまして、討議者のいわれるように十分な検討がなされなかったのではありません。

(2) について：すでに述べたように組合せ応力状態で各種温度をうけたときのコンクリートクリープに関する十分なデータなき場合、数値計算方法だけ複雑としたところで、求められた結果の精度が格別良くなることも期待されないであろうということを考え、本論文では実際の測定ひずみと、近似計算で求めたひずみ変化とを比較したのでありまして、測定ひずみを用いてこれから応力度を定める計算手法がわからなかったのではありません。

ϵ_θ はもちろん σ_r , σ_z の関数であります。シリンダー中心部では、 σ_z の変化は小さく、また σ_r の値も小さいので、 ϵ_θ の変化を求めるにあたって、 σ_z , σ_r の影響はこれを無視したのであります。

もちろんコンクリートクリープによるPC鋼材引張応力に変化を生じますが、これを無視することは単位クリープの仮定におけると同程度の精度範囲と考えております。たとえば、PC合成桁で、プレキャストPC桁と現場打ちフランジ部との乾燥収縮度の差、クリープ差、等による応力度を求める場合、一般にPC鋼材引張応力度の変化を無視していますが、これで十分工学的目的は

達成されるからであります。本論文でも同じ工学的な判断によっております。

(3) について：(5), (7a), (9), (11) 等の諸式はいずれもつぎの同一基本式から求められたものであります。

$$\begin{aligned} \sigma_\theta - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} &= 0 \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_r + \sigma_\theta) + \alpha t \\ \epsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_z + \sigma_\theta) + \alpha t \\ \epsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_z + \sigma_r) + \alpha t \end{aligned}$$

(4) について：供試シリンダーの長さは、弾性計算で定めたのですが、実験の進行とともにクリープが非常に大きく影響し、供試体長さが不十分であったことは認められました。したがって σ_z のクリープによる変化は理論値に近いものとはなりません。しかし σ_z の σ_θ に対する影響は σ_z の値の変化値にポアソン比を乗じた値となるにすぎません。一般にポアソン比はコンクリートのクリープ進行とともにその値が減少する傾向にありますので、 σ_z の変化が理論値と多少異なっても、クリープによる σ_θ 変化に対する影響は小さいものであるといえます。したがって本回答の当初に述べたような本論文論旨の目的を達成するためには、十分な近似度を有していると考えておりますので、本実験の成立について疑問はないと確信します。

(5) について：シリンダー内側温度の急激な降下に対し、コンクリート応力度に関しては、クリープの効果を考慮すると弾性計算で求められたものよりも有利な結果になることを述べたものであります。これはシリンダーの熱容量に関係することであり、またその時点でのコンクリートのクリープに関係することでもあります。したがってそれぞれの条件を考慮して、本論文に述べた近似計算をすれば良いのであります。討議者のいわれるように、クリープの影響は計算値よりかなり小さくなるはずであるとは断定できません。

(6) について：誤植の件は御指摘の通りであります。p. 32 図-13 下部の点線は σ_z の計算値を、丸は測定ひずみから求めた σ_z の値を、それぞれ示しております。

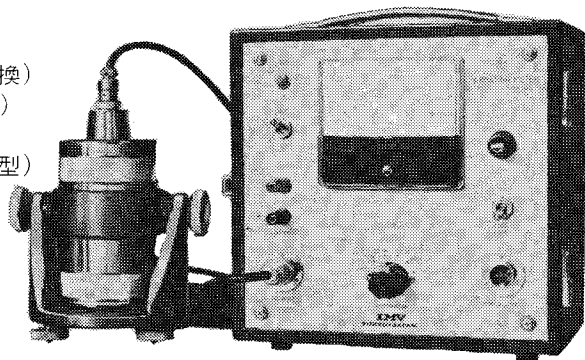
最後に本論文の一語一句まで詳細に精読され、ご討議下された森 忠次氏に感謝いたします。

IMV 振動計には 現場の技術が活かされています

IMV 低域振動計 VM-3300LL

●標準仕様

測定周波数範囲 1~50Hz
 振幅測定範囲 0~±5mm(5段切換)
 加速度 " 0~1.5g(4段切換)
 出力 " 10kΩ
 検出器 VP-3300LL(動電型)
 電源 AC100V±10V
 50,60Hz



●用途

- ダム工事
- ビル工事
- 鉄骨・橋梁工事
- 杭打工事
- その他土木・建築工事



株式会社 国際機械振動研究所

本社・大阪営業所 大阪市北区牛丸町54 東洋ビル TEL 06(372)3296(代)
 東京営業所 東京都千代田区神田錦町1の8伊藤ビル TEL 03(292)3681(代)
 名古屋営業所 名古屋市中区新栄町2の12万津元ビル TEL 052(251)7708・2778
 九州出張所 福岡市箱崎下社家町1935の1 TEL 092(65)3476

カタログ請求券
 土木学会
 論文集



トンネルの
ライニングに
的確な急結効果
を発揮する……

乾式吹付コンクリート用
セメント急結剤!!

QP 500

(クイックセットP-500)

トンネルの一時ライニングに「クイックセットP-500」はその経済性、速効性を、青函トンネル試験坑を始め、各所に於て認められ採用されております。

- 湿砂使用に急結効果を発揮する。
- 使用上の安全性が優れている。
- 付着性が大きく跳返り損失が少ない。
- 吸湿性が小さいため保存性がよい。

カタログ・技術資料贈呈

東京 港区六本木3-16-26 ☎ 582-8811
大阪 市東区北浜3-7 (広銀ビル) ☎ 202-3294
仙台 市東二番丁6-8 (富士ビル) ☎ 24-1631

ボソリス物産株式会社

名古屋市中区新栄町1-6 (朝日生命館) ☎ 262-3661
広島市 入丁堀12-22 (業地ビル) ☎ 21-5571
福岡 市二本木・高岡・札幌・千葉・高松