

九州大学 生産研 正員 江崎哲郎  
工学部 徳光善治

## 1. まえがき

時間依存の変形挙動によるモーメントの再分配や構造安全などを求める応力が変化する場合の解析的研究の多くは線型の応力-ひずみ-時間の関係と前提としているので常用設計荷重程度の低い応力レベルの場合にしか適用できない。高応力レベルまでを含めた解析では、非線型の応力-ひずみ-時間の関係に基づいた増分形式による方法によらざるを得ない。ここでは、部材断面を多くの Fiber に分割し、応力分布の変化や中立軸の移動を考慮した高応力レベル持続荷重下における R.C. 柱の時間依存の挙動の解析方法を示した。次にこの方法による解析例として偏心圧縮長柱の実験結果と比較検討することにした。

## 2. 解析方法

(1) 仮定 柱断面を図-1のようにN個に分割し、同一分割区画内では、その重心における応力-変形に従うものとして、次のような仮定のもとに柱の変形・応力解析を行なう。(i) 横方向のためみ曲線は正弦曲線。(ii) 断面の平面保持が成立する。また鉄筋とコンクリートの接着は完全。(iii) 鉄筋の応力-ひずみ関係は台形として、レラクビゼーションはない。(iv) 圧縮をうけるコンクリートに対しては非線型の $\sigma$ - $\epsilon$ の関係が成立。(v) 引張をうけるコンクリートは時間依存の変形をしない。引張強度 $\sigma_t$ 以上になると破壊する。

(vi)  $\sigma$ - $\epsilon$ の関係は過去の履歴荷重から独立している。

(2) 応力-ひずみ-時間の関係 コンクリートの全ひずみ $\epsilon$ は非時間依存性のひずみ $\epsilon_\sigma$ と時間依存性のひずみ(収縮ひずみを含む) $\epsilon_t$ の和として示され

$$\epsilon = \epsilon_\sigma(\sigma) + \epsilon_t(\sigma, t) \quad \cdots \cdots (1)$$

微分して整理すると  $\dot{\sigma} = E\epsilon(\sigma, t) \cdot (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_t) \quad \cdots \cdots (2)$

ここに  $E\epsilon(\sigma, t) = V(\frac{\partial \epsilon_\sigma}{\partial \sigma} + \frac{\partial \epsilon_t}{\partial \sigma}) \quad \cdots \cdots (3)$  で、もし $\sigma$ - $\epsilon$ 関係が

linearならば“有効係数”に相当するものである。鉄筋の $\sigma$ - $\epsilon$ 関係は、

弾性領域では  $\sigma_s = E_s \epsilon_s$ ,  $\dot{\sigma}_s = E_s \dot{\epsilon}_s \quad \cdots \cdots (4)$   $E_s$ : 鉄筋のヤング率

塑性領域では  $\sigma_s = \sigma_{sy}$ ,  $\dot{\sigma}_s = 0 \quad \cdots \cdots (5)$   $\sigma_{sy}$ : 降伏応力

(3) 変形条件 図-1のような断面の応力-変形を考える。曲率 $\kappa$ とすると、図-1. 断面の分割および応力-変形

四側縁よりyなる位置のFiberのひずみ $\epsilon_y$ は  $\epsilon_y = \kappa \cdot (y - c) \quad \cdots \cdots (6)$

c: 四側縁より中立軸までの距離, (6)より  $\dot{\epsilon}_y = (\dot{\kappa} \cdot (y - c) - \kappa \cdot \dot{c}) \quad \cdots \cdots (7)$

(7)と(2)および(4)に代入して  $\dot{\sigma}_y = E\epsilon \cdot [(\dot{\kappa} \cdot (y - c) - \kappa \cdot \dot{c}) - \dot{\epsilon}_t] \quad \cdots \cdots (8)$

$\dot{\sigma}_s = E_s [(\dot{\kappa} \cdot (d - c) - \kappa \cdot \dot{c}) - \dot{\epsilon}_t]$ ,  $\dot{\sigma}_s' = E_s [(\dot{\kappa} \cdot (d' - c) - \kappa \cdot \dot{c}) - \dot{\epsilon}_t] \quad \cdots \cdots (9)$

(4) 平衡条件 軸力Pの大きさは不変なので  $\dot{P} = 0$ , 軸方向の釣り合い

から  $A_s \dot{\sigma}_s + A_s' \dot{\sigma}_s' + b \int_0^y \dot{\sigma} dy = 0 \quad \cdots \cdots (10)$

外力モーメント  $M = P(e + \delta)$  の変化速度 $\dot{M}$ とすれば、モーメントの釣り

合いから  $A_s \dot{\sigma}_s d + A_s' \dot{\sigma}_s' d' + b \int_0^y y \dot{\sigma} dy = \dot{M} \quad \cdots \cdots (11)$

(8)(9)および(10)(11)と整理すると次のような連立方程式となる

$$\left. \begin{aligned} C_{11} \dot{\kappa} + C_{12} \dot{c} &= C_{13} \\ C_{21} \dot{\kappa} + C_{22} \dot{c} &= C_{23} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (12)$$

(12)より曲率の変化速度 $\dot{\kappa}$ および中立軸の移動速度 $\dot{c}$ が求まり、

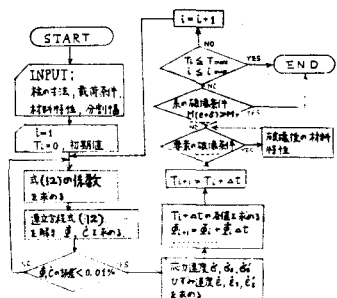
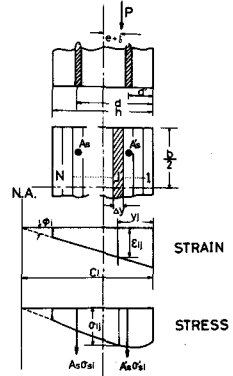


図-2. 計算のフローチャート

コンクリートおよび鉄筋の応力およびひずみの変化速度が求まる。

(5)破壊条件 分割要素については圧縮強度、引張強度を越えた場合および時間依存の破壊は、応力レベルと破壊時間の関係に従う。一方系としての破壊条件は外力モーメント  $M_a = P(e + \delta_0)$  が内力の抵抗モーメント  $M_r$  および軸力  $P$  と軸方向の内力の総和の釣り合いがとれなくなった場合破壊する。

### 3. 数値計算方法

持続荷重  $P$  が加わると、初期たわみ  $\delta_0$  および偏心量  $e$  による曲げモーメント  $M_0 = P(e + \delta_0)$  ( $\delta_0$  と  $M_0$  がバランスしている) がかわり、曲率  $\phi$  および中立軸の位置  $C_0$  が求まる。フローチャートに示すように時間の増分  $\Delta T$  とすると各々の増分が求まり  $T = T_0 + \Delta T$  のときの応力、ひずみが求まる。

$\sigma - \epsilon$  の関係は前報で示した  $\epsilon_t = 1/\phi \cdot \sigma^p t^q$  (13) を用い  $T = T_0 + \Delta T$  後の応力、ひずみの値がこの式を満足しない場合は誤差が小さくなるまで繰返し計算する。このようにして step-by-step 法により時間経過に伴う応力-ひずみの変化を求めることができる。

断面の分割数  $N$  は多い方が望ましいが、 $N = 10 \sim 20$  になると結果はほとんど変わらない。そこでここでは  $N = 20$  とした。時間間隔  $\Delta T$  は等間隔にとるのが一般的だが、時間が大になると繰返数が膨大となり累積誤差が問題となる。また、ひずみ曲線は時間の対数目盛に対して linear な関係なので、ここでは時間増分  $\Delta T$  を対数目盛で等間隔  $\Delta T = 10^{0.1n} - 10^{0.1(n-1)}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) とし、破壊が近くなるとその  $1/10$  と細かくなるようにした。この場合  $T = T_0$  のときのある値  $f(T_0)$  が既知として  $T = T_0 + \Delta T$  のときの値  $f(T_0 + \Delta T)$  を求めるのに  $f(T_0 + \Delta T) = f(T_0) + f'(T_0) \Delta T$  と前進によって求めるのは誤差が比較的大くなる。そこで次に  $f'(T_0)$  の代りに  $(f'(T_0) + f'(T_0 + \Delta T))/2$  の値を入れて繰返し計算してより正確な  $f(T_0 + \Delta T)$  の値を求めた。収束はあまり速くないが約 30 回の繰返して誤差は約 0.01% 以下となる。さらに step 数 80 回を行なっても誤差は 1% 以下となる。

### 4. 解析結果について

図-3 に示すような偏心圧縮長柱(偏心量  $e = 0.7$  cm)の実験結果に適用した。持続応

力レベルは No.2 ~ No.8 が各々 95%, 90%, 85%, 80%, 70%, 60% および 30% である。

図-4 以下に解析結果を示したが、実験値と比較的よく一致をみている。詳細は講演時に述べ。

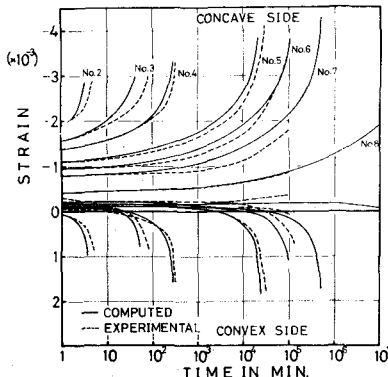


図-6. 凸側および凹側の縁ひずみ

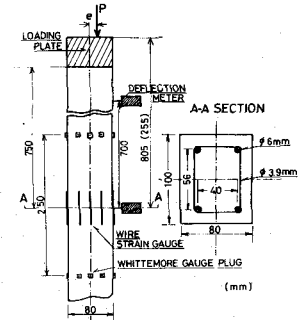


図-3. 実験の供試体

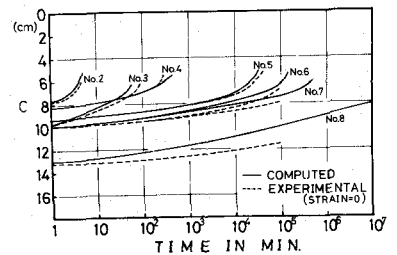


図-4. 中立軸の位置の変化

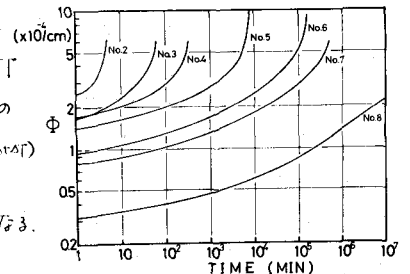


図-5. 曲率の変化

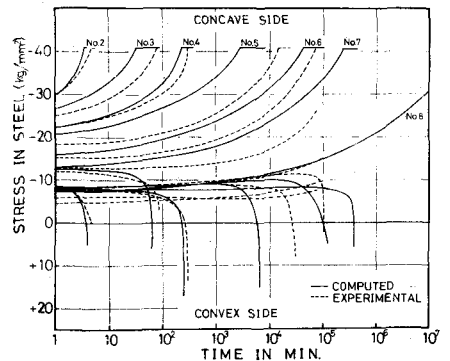


図-7. 凸側および凹側の鉄筋の応力