

1. 概 説

P R C とは R C に比較的小量のプレストレスを導入して、コンクリートのひびわれ開口やを許容範囲内に減少させたコンクリートのことで、プレストレス鉄筋コンクリートの略語である。この場合の R C は破壊に対しては所要の安全度をもつように設計されている。国際用語でいえば、P R C は混合鉄筋方式によるパーシャルプレストレスコンクリートに属している¹⁾。P R C の特長や設計および施工の概論についてはすでに^{2,3)}は発表した。

この論文では主として静荷重下における R C 引張部材および R C ならびに P R C 桁のひびわれおよび曲げ性状に関する著者らの研究結果を基にして P R C 桁におけるプレストレス力の算定方法について述べる。

2. 最大ひびわれ間隔および最大ひびわれ中

図-1 に示す両引き試験において、引張荷重が P に達したとき部材長の中央にひびわれが生じたとすると、 l は荷重 P に対するこの引張部材の最大ひびわれ間隔を与える。これを l_{max}^P で表わすと平衡条件から

$$l_{max}^P = \frac{2k_1 A_e \sigma_{ct}}{U \bar{\sigma}_0} \quad (1)$$

Fig.1

を得る。但し A_e は部材のコンクリート断面積、 σ_{ct} はコンクリート引張強度、 U は鉄筋周長、 $\bar{\sigma}_0$ は全長 l に対する平均付着応力、 k_1 は係数である。荷重 P がさらに増えると、新しいひびわれが生じ、(1) 式のひびわれ間隔は小さくなっていくが、図-2 のように露出部の鉄筋応力 σ_{s0} がある値 $\hat{\sigma}_{s0}$ に達したのちは新しいひびわれは生じないで、ひびわれ開口が増えるだけである。このような状態をいま定常ひびわれ状態と呼び、 $\hat{\sigma}_{s0}$ 以前の状態を初期ひびわれ状態と呼ぶものとする。前者の状態では最大ひびわれは一定値となる。また一般にひびわれ中 w は

$$w = \left(\frac{\sigma_{s0}}{E_s} - \frac{\bar{\sigma}_{cm}}{P E_s} \right) l \quad (2)$$

で表わされる。ここで、 l はひびわれ間隔、 P は鉄筋比、 $\bar{\sigma}_{cm}$ は部材断面のコンクリート平均応力度で $\bar{\sigma}_{cm}$ は区間 l における σ_{cm} の平均値である。 $\bar{\sigma}_{cm}$ は σ_{ct} および P と関係をもつが、著者の実験結果⁵⁾によると異形鉄筋の場合は図-3 としてよい。

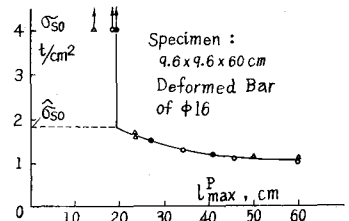


Fig.2

(2) 式から中が w になったときの露出部鉄筋応力度を $\sigma_{s0.w}$ とすると (2) 式から次式が得られる。

$$\sigma_{s0.w} = \frac{E_s w}{l} + \frac{\bar{\sigma}_{cm}}{P} \quad (3)$$

初期ひびわれ状態 ($\sigma_{s0} \leq \hat{\sigma}_{s0}$)

この場合はまだひびわれが十分に発達していない状態である。いま図-4において、任意断面 1-1 が引張荷重をうけて 1'-2'-1' に変形したとき、その代りにコンクリートは平均変形を与える平面 1'-2'-1 と

考えるものとするれば、コンクリートの平均変形 Δ_{cm} と鉄筋の伸びとの差 Δ はかぶりコンクリートの変形はせん断応力によって生ずるものと仮定することにより次の微分方程式が成立する。

$$\frac{d^2 \Delta}{dx^2} - k_3 \Delta = 0 \quad (4)$$

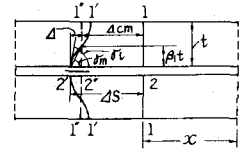
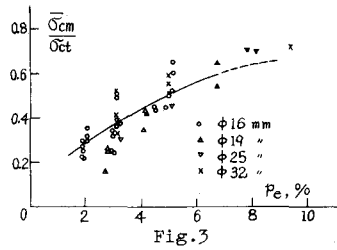


Fig. 4

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし } k_3 &= \beta G_c \frac{U}{x} \left(\frac{1}{A_s E} + \frac{1}{A_c E_c} \right) \\ \beta &= \delta_i / \delta_m \beta_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

である。微分方程式(4)を解けば、

$$\Delta(x) = \frac{\sigma_{so}}{k_3 E_s} \frac{\sinh k_3 x}{\cosh k_3 l/2} \quad (6)$$

したがってコンクリート中の鉄筋応力度 σ_s および断面平均コンクリート応力度 $\bar{\sigma}_{cm}$ は次式で表わされる。

$$\sigma_s(x) = \frac{p \sigma_{so}}{1 + \eta p} \left(\eta p + \frac{\cosh k_3 x}{\cosh k_3 l/2} \right) \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_{cm}(x) = \frac{p \sigma_{so}}{1 + \eta p} \left(1 - \frac{\cosh k_3 x}{\cosh k_3 l/2} \right) \quad (8)$$

ここで $\bar{\sigma}_{cm}(x=0) = \bar{\sigma}_t$ および $P_{cr} = \bar{\sigma}_t A_c$ とおけば、任意荷重 P に対する l_{max}^P は

$$l_{max}^P = \frac{2}{k_3} \cosh^{-1} \frac{P}{P - P_{cr}} \quad (9)$$

を得る。多くの両引き試験結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾ $\beta = 0.15$ にとれば上の理論式は図-5のようによく実験結果と一致することがわかった。しかし初期ひびわれ状態は弾性域から塑性域に移る不安定状態にあるためかなりばらつきを生ずるので、 $\beta = 0.25$ にとれば図-6のように鉄筋径および断面寸法に関係なく(9)式は測定点のはば外接曲線を与えることがわかる。同様の結果は、多くの

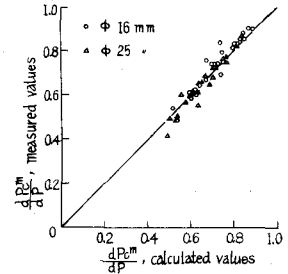


Fig. 5

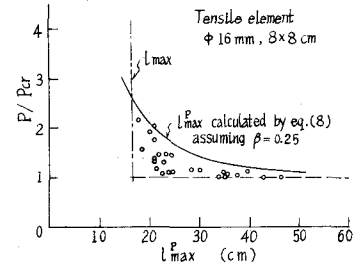


Fig. 6

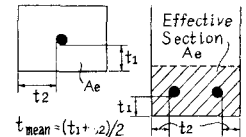


Fig. 7

方形および丁形断面を有するスパン3.0mのRC桁に関する実験結果にも適用されることがわかった(図-8)。ただしこの場合は(9)式の P , P_{cr} の代りに(10)式のように M , M_{cr} を用いるものとし、

$$l_{max}^M = \frac{2}{k_3} \cosh^{-1} \frac{M}{M - M_{cr}} \quad (10)$$

また桁の場合(5)式の A_e は図-7のようにとする。

さらに $\Delta(x=l/2) = W/2$ であるから曲げモーメント M のときの最大ひびわれ W_{max}^M は(2)(10)式より次式で表わされる。

$$W_{max}^M = \frac{2}{k_3} \frac{\sigma_{so}}{E_s} \cdot \frac{\sqrt{M_{cr}(2M - M_{cr})}}{M} \quad (11)$$

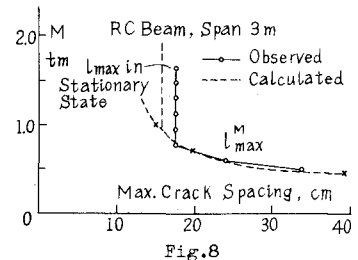


Fig. 8

定常ひびわれ状態 ($\sigma_{so} > \hat{\sigma}_{so}$)

この場合は (1) 式において $\tau_o = (\bar{\tau}_o)_{max}$ になつたときであるから最大ひびわれ間隔は

$$l_{max} = \frac{2k_1 A_c \bar{\sigma}_{ct}}{U (\bar{\tau}_o)_{max}} \quad (12)$$

で表わされる。従来の多くの研究では、上式中の A_c/U を ϕ/p (ϕ は鉄筋直径) におきかえて

$$l_{max} = K \frac{\phi}{p}$$

の形を用いているが、実験結果に一致しないことが多かったためいくつかの実験的修正が行なわれている。しかしこれは理論的でないで、著者らは多くの実験結果から、^{(4), (5)} 図-9 のように $U(\bar{\tau}_o)_{max}/\bar{\sigma}_{ct}$ と A_c/t_{mean} (t_{mean} は図-7 のようにコンクリートかぶりの平均値) との関には鉄筋直径および部材断面形状に肉関係なく正比例関係を有することがわかったためその比例定数を k_2 とすれば、

$$l_{max} = k_2 t_{mean} \quad (13)$$

という簡易な式が得られる。多くの両引試験の結果、係数 $k_2 = 2k_1/k_2 = 5.4$ とすれば横フシ型異形鉄筋の場合図-10 のように (13) 式の成立することがわかった。(13) 式は単なる実験式でなく理論的に導かれたものであって、Broms⁽⁷⁾ の実験式 $l_{max} = K \bar{\sigma}$ ($\bar{\sigma}$ は観測面から鉄筋中心までの距離) と類似しているが、Broms の式によると図-7 の場合、観測面によってひびわれ間隔が異なることになり実験結果に反している。(13) 式と (2) 式に代入すれば定常状態の最大ひびわれ中は

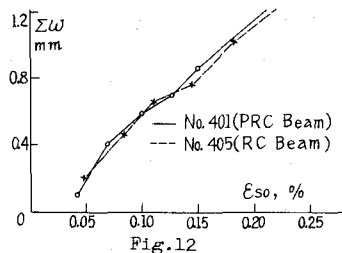
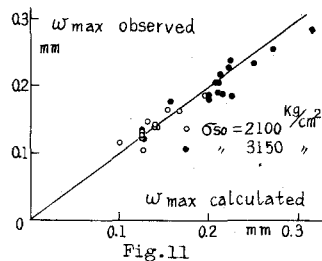
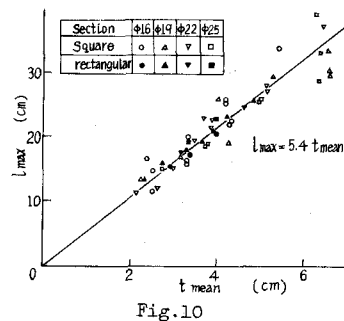
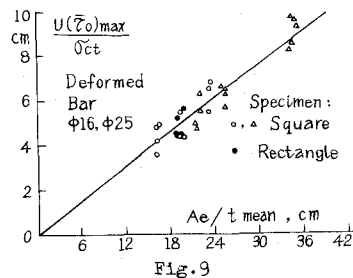
$$w_{max} = \left(\frac{\bar{\sigma}_{so}}{E_s} \frac{\bar{\sigma}_{cm}}{p E_s} \right) l_{max} \quad (14)$$

が得られる。

著者らが行なったスパン 3.0 m の多くの RC 桁についての曲げ試験結果は、^{(4), (5)} 図-11 のように (14) 式は桁にもよく適用されることわかった。

PRC 桁

スパン 3 m、高さ 30 cm で異形鉄筋を用いた RC 桁とこれにプレストレスを与えた PRC 桁について比較試験を行なった結果、^{(4), (5)} その一例を図-12 に示すように、中央 1 m 区間 (荷重間隔) のひびわれの合計 $\sum w$ とひびわれ部鉄筋ひずみ E_{so} との関係図は RC 桁と PRC 桁は一致しており、以上までに述べた理論式の適用されることがわかった。また最大ひびわれ中と曲げモーメントとの関係図については図-13 にその一例を示すように、^{(4), (5)} 両者はほぼ同じ傾向であるが、最初のひびわれのときの曲げモーメント M_{cr} は PRC



桁の方がアレストレス P_v による影響をうけて次の ΔM だけ増す。

$$\Delta M = P_v (e_p + e') \quad (15)$$

同様に定常ひびわれ状態では、

$$\Delta M = P_v (Z - \Delta e) \quad 16$$

だけ増すことがわかった。ここに、 e_p , e' は断面重心から PC 鋼および圧縮側鉄筋までの距離、 Δe は PC 鋼と RC 鉄筋との間の距離、 Z はひびわれ断面における内応偶力内の距離である。

3. PRC の設計

まず RC 桁として設計し、ひびわれ条件式

$$\text{死荷重} - f_1 = \frac{M_{w1}}{M_D} \geq f_{1, \text{reg}}, \quad \text{活荷重} - f_2 = \frac{M_{w2} - M_D}{M_L} \geq f_{2, \text{reg}}$$

を校算する。普通は死荷重の場合が問題となるが、条件を満足しないときは

$$P_v \geq \frac{f_1 M_D - M_{w1}}{Z - \Delta e}, \quad w_1 > 0.1 \text{ mm} \quad (17)$$

$$P_v \geq \frac{f_1 M_D - M_{w1}}{e_p + e'}, \quad w_1 = 0 \sim 0.1 \text{ mm} \quad (18)$$

でアレストレス P_v を定める。条件としては $w_1 = 0 \sim 0.2 \text{ mm}$, $w_2 = 0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$, $f_1 = 1.1 \sim 1.4$, $f_2 = 1.4$ ぐらいとする。

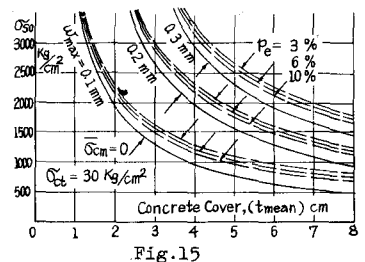
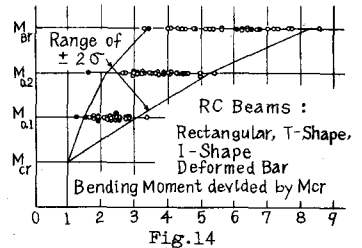
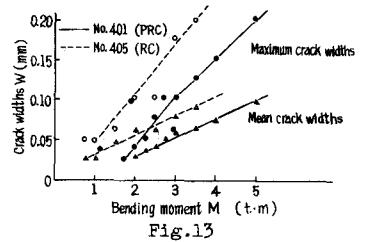
また w のある値に対する M_w の算定には、多くの実験結果の図-14により近似的には

$$M_{0.1} = 1.4 M_{cr}, \quad M_{0.2} = 2.0 M_{cr} \quad (19)$$

又はより理論的には

$$\left. \begin{aligned} w \leq 0.1 \text{ mm の初期状態では (11) 式より } M_w &= \frac{1}{2} M_{cr} \left[1 + \left(\frac{w k_s E_s A_s Z}{2 M_{cr}} \right)^2 \right] \\ w > 0.1 \text{ mm に対しては } M_w &= \sigma_{50} \cdot w A_s Z \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

を用いる。 $\sigma_{50} \cdot w$ に対しては (3) 式または図-15を用いることができる。



文献

- 1) Preliminary Publication, 8th Congress of IABSE, New-York, 1968, P. 447
- 2) 横道・林: PRC工法について, 土木学会19回年次学術講演会, 昭39.5
- 3) 横道: 鉄筋コンクリートの新発展とPRC工法, 土木学会北海道支部, 昭39.2
- 4) 角田: 鉄筋コンクリート桁の曲げひびわれと変形に関する基礎的研究, 北大横道研究室, 昭42.12
- 5) 横道・角田: RC引張部材のひびわれ, セメント技術年報XXII, 1968
- 6) 横道・角田: RCはりの曲げ性状, セメント技術年報XXII, 1968
- 7) Broms: Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members, Journal of ACI, 10, 1965
- 8) 横道・角田: PRCはりのひびわれにおよぼすクランプおよび収縮の影響について, セメント技術年報XX, 1966