

1. 概要

鉄筋コンクリート構造物の設計計算における当面の課題は、従来のような許容応力度を中心にした弾性学的な手法から脱却して、その極限強さ(破壊強さ)を対象にした塑性論的な方式に移行することにあるが、その際の最大の隘路は、部材のせん断強さ(斜引張破壊に対する抵抗力)の問題が未解決のままに残されている点にある。本文は、この問題に対する筆者の基本的な見解を述べ、その解決方法について新しい提案を試みたものである。

2. はりの破壊の性状

鉄筋コンクリートばりの各所に単一の集中荷重を加えて試験すると、一般に図-1に示すような各種の破壊の形式が出現する。すなわち、スパンの中央付近に載荷すると、通常は、荷重の直下に発生した縦ひびわれが上昇し、曲げによって破壊するが、載荷位置が支承に近付くと、これと支承とを結ぶ線上に発生した斜めのひびわれが拡大して、せん断破壊を起こす可能性が強くなり、また、支承の真上付近に載荷すると、支圧による縦ひびわれが発生して破壊する。この場合の曲げ破壊荷重は通常の極限強さの計算式によって予知され、また、支承付近に起こる支圧破壊に対しては、載荷板の直下または支圧板の直上のコンクリートに働く圧力が限度を越えない限り安全であるから、その対策も容易である。また、図には、スターラップを用いて十分に補強してある場合と、これを欠く場合の2種類のせん断抵抗力を示してあるが、後者については、多数の実験値を累積してその安全範囲を示したACI-ASCE連合委員会の報告書^(注1)や、はり全体をタイドアーチに見立てて解析するように提唱したKani教授の論文^(注2)等があるが、純理論的とは言えないまでも、かなり信頼度の高い推定計算ができるので、ここでは前者のみをとりあげることにする。なお、スターラップや折曲鉄筋を配置してあっても、それが不十分であったり、荷重が支承に接近して、斜めのひびわれと交差する鉄筋の数が減ってくると、ひびわれが発生する前にコンクリートが負担していたせん断力を、それらの鉄筋によって伝達できなくなるので、事実上、鉄筋がないのと同じになる。この点は誤解されやすいので、注意を要する。

3. 計算理論における未知量とその処理方法

筆者は、長方形断面のばりに単一の集中荷重を加えた状態をせん断試験における最も基本的な形と考へ、はりの各所に荷重を加えて、その性状を追究しているが、一般に、破壊に直結する斜めの主ひびわれは、図-2に示すような位置に発生する。この部分にスターラップや折曲鉄筋が存在すると、それがひびわれの拡大を抑制して、コンクリートの代わりにせん断力の伝達を受け持つようになるのに、さらに荷重が増大しくも、十分にこれに對抗する。しかし、荷重の増加によるひびわれの拡大が続いて、その先端が上昇すると、遂には、上部に残されたコ

図-1. はりの破壊荷重

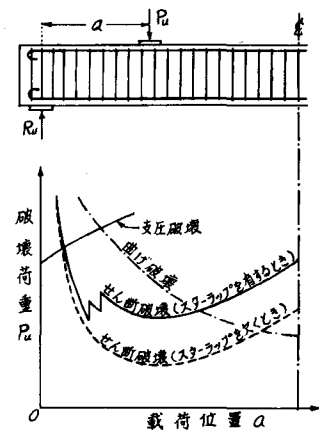
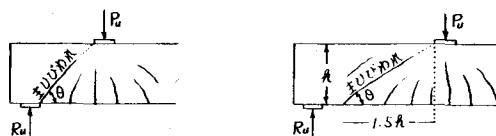


図-2. 主ひびわれの発生位置

(a). 荷重の位置が支承に近いとき (b). 荷重の位置が支承から遠いとき



ンクリートだけでは、荷重による直接的な圧力に曲げ圧力の累加した大きな圧縮力に対抗できなくなり、この部分のコンクリートが圧潰して、最終段階に到達する。

いま、斜めのまひびわれと、その先端を通る鉛直断面とで区別された図-3のような支承ブロックについて考えると、ひびわれの傾斜角 θ とその先端の位置 x 、上部のコンクリートに働く水平圧縮力 C_c とその作用位置 $k_2 z$ 、この部分に残留するせん断抵抗力 S_c 、引張鉄筋に働く水平引張力 T_s とそのせん断抵抗力 S_s 、各スターラップに働く引張力 T_b と支承反力 R_u がこの場合の関係因子となり、このうち、スターラップはこれを強に配置してあって、これに働く引張力が図のように左右対称の中荷の形に分布するものと想定して、その全合力 S_b を、

$$S_b = \frac{\bar{\sigma}_b a_v l_c}{S} = \frac{\bar{\sigma}_b a_v}{S \tan \theta} (d - z) \quad (1)$$

ここに、 a_v : 1個所あたりのスターラップの断面積
 S : スターラップの配置間隔
と表わすとしても、スターラップの平均応力度 $\bar{\sigma}_b$ がこれに加わるから、関係する因子の数は9個にも達する。従って、実験の結果からひびわれの傾斜角 θ と極限反力 R_u を定めても、残りの7個の未知量に対して、通常の上下、左右および回転の3個の力の釣合条件だけでは、とうてい解決できないことになる。

このため筆者は、コンクリートの水平圧縮力 C_c とその作用位置に対しては、従来の極限強式に準じて、 $C_c = k_1 \sigma_{cu} b z$ 、 $z = d - k_2 x$ としたときの Stüssi の係数 k_1, k_2 を、図-4のような応力状態を考慮して $k_1 \approx 0.7$ 、 $k_2 \approx 0.6$ と定め、引張鉄筋のせん断抵抗力 S_s はこれを微小とみなして無視することにより、未知量の数を4個に整理しうえ、図-5に示すような荷重の伝達経路を考えて、スターラップの分担するせん断力を $S_b = R_u f(\theta)$ 、コンクリートの分担力を $S_c = R_u \{1 - f(\theta)\}$ として力の釣合条件を考えることにした。もっとも、このようにしても未知量の数が減るわけではないが、とくに $\bar{\sigma}_b$ を既知量のように考えて、上記の分配関数 $f(\theta)$ を求める関係式を作ると、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} R_u &= \frac{l-a}{l} P_u, \quad \zeta = \frac{\bar{\sigma}_b a_v}{S \tan \theta} \\ \xi &= k_1 \sigma_{cu} b \tan \theta, \quad A = 2 k_2 \xi - \zeta \\ B &= R_u + d(\xi - \zeta), \quad C = 2 R_u a_v \tan \theta - \zeta d^2 \\ x &= \frac{B}{A} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{AC}{B^2}} \right), \quad f(\theta) = \frac{\zeta}{R_u} (d - x) \end{aligned} \quad (2)$$

図-3. 支承ブロックに加わる力

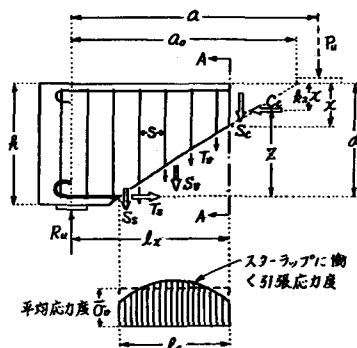


図-4. ひびわれの先端付近の応力分布

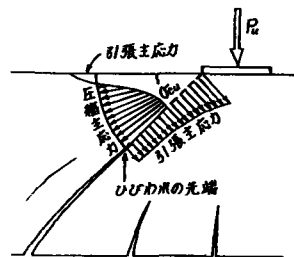
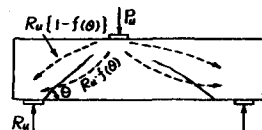


図-5. 荷重の伝達状況



筆者の研究によると、はりの各所に荷重を加えた一連の試験結果に上式をあてはめ、 $\bar{\sigma}_b$ を $2500 \sim 3500 \text{ kg/cm}^2$ 程度のある一定値にとってこれを算定してみると、

$$f(\theta) = \alpha \cot \theta + \beta \quad (\text{ただし、}\alpha, \beta \text{ は実験常数}) \quad (3)$$

の形で表わされる。この場合、ごく常識的に考えると、 $\theta = 90^\circ$ のとき、すなわち、はりを直前に横断するようなひびわれに対しては、スターラップが全く無効になって $f(\theta) = 0$ となるはずであるから、上式において $\beta = 0$ と

なるような $\bar{\sigma}_v$ と $f(\theta)$ を選定することによって、問題が解決される。もっとも、実際には、スターラップの配置の具合等による実験値のばらつきがあるため、これを正確に決定するのは困難であるが、筆者の実験の場合、図-6のように $\bar{\sigma}_v = 3000 \text{ kg/cm}^2$ とすると、この条件がほぼ満足され、

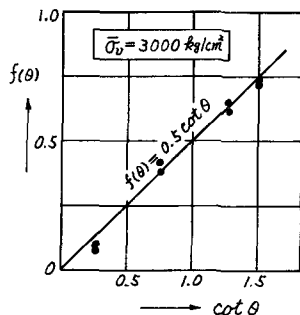
$$f(\theta) = \frac{1}{2} \cot \theta \quad (\text{ただし, } \bar{\sigma}_v = 3000 \text{ kg/cm}^2) \quad (4)$$

となる。このようにして選定された $\bar{\sigma}_v$ の値が適当かどうかは、直接的には、ひびわれ面内に現われる各スターラップのひずみを実測することによって確かめられるが、現状ではそれが技術的に困難であって、立証の極め手を欠くが、筆者は、このような手段によって基本的な諸常数を決定し、それを列種の試験例にも適用して、その正当性を間接的に立証して行くことが、問題を解決する早道になるものと考えている。

4. セン断強さの計算式

スターラップを面に配置した長方形断面のはりに単一の集中荷重を加えた場合、そのせん断抵抗力(斜引張破壊に対する極限荷重)は次式によって算出される。

図-6. $f(\theta)$ と $\cot \theta$ の関係



$$\zeta = \frac{\bar{\sigma}_v a_v}{S \tan \theta}, \quad \xi = \frac{k_1 \sigma_{cu} b}{\zeta} f(\theta) \cdot \tan \theta$$

$$A = 2(1 + k_2 \xi) - f(\theta)$$

$$B = d\{1 + \xi - f(\theta)\} + a_o \tan \theta$$

$$C = 2a_o \tan \theta - d \cdot f(\theta)$$

$$x = \frac{B}{A} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{AC}{B^2} d}\right)$$

$$R_u = \frac{\zeta}{f(\theta)} (d - x), \quad P_u = \frac{\ell}{\ell - a} R_u$$

..... (5)

5. 折曲鉄筋が存在する場合、その他

折曲鉄筋の場合は、斜めのひびわれの発生個所におけるせん断力を伝達するという機能のほかに、ひびわれの拡大を抑制して破壊を遅らせる働きが追加されてくるため、ひびわれとの交差角度によってその効果に差違が現われてくる。筆者の研究によると、はりの軸線に対して α の傾斜角度をもった折曲鉄筋に働く平均引張応力度は、

$$\bar{\sigma}_s = \bar{\sigma}_v (1 + 0.15 \sin 2\alpha \cdot \sin 2\theta) \quad (6)$$

となり、これとスターラップとを併用したときのせん断抵抗力は右の(7)式によって計算される。

なお、上記の各式は、折曲鉄筋やスターラップが面に配置されている場合を想定しているため、その配置間隔が広くて、ひびわれと交差する鉄筋の数が少ないときにこれを用いると、せん断強さがかなり過大に見積られるおそれがある。このような場合の対策や他の荷重状態に対する計算方法等は、別の機会にあらためて発表する積りである。

$$\zeta = \left(\frac{\bar{\sigma}_v a_v}{S} + \frac{\bar{\sigma}_s a_s}{S'} \sin \alpha \right) \cot \theta$$

$$\mu = \frac{\bar{\sigma}_s a_s}{\zeta S'} \cos \alpha (1 + \cot \alpha \cdot \tan \theta)$$

$$\xi = \frac{k_1 \sigma_{cu} b}{\zeta} f(\theta) \cdot \tan \theta$$

$$A = 2(1 + k_2 \xi) - (1 - \mu) f(\theta)$$

$$B = d\{1 + \xi - (1 - \mu) f(\theta)\} + a_o \tan \theta$$

$$C = 2a_o \tan \theta - d(1 - \mu) f(\theta)$$

$$x = \frac{B}{A} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{AC}{B^2} d}\right)$$

$$R_u = \frac{\zeta}{f(\theta)} (d - x), \quad P_u = \frac{\ell}{\ell - a} R_u$$

..... (7)

(注) 上式における a_s は1個所あたりの折曲鉄筋の断面積、
 S' はその水平配置間隔(はりの軸線方向の配置間隔)である。

(注1) ACI-ASCE Committee 326: Shear and Diagonal Tension, Jour. of ACI, Jan. & Feb. 1962

(注2) G.N.J. Kani: The Riddle of Shear Failure and its Solution, Jour. of ACI, April 1964