

[59] 鉄筋コンクリート柱のせん断ひびわれ荷重推定の一方法

正会員 六 車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 渡 辺 史 夫 (京都大学工学部)
 正会員 河 野 恒 平 (大建設計)
 正会員 ○上 田 忠 男 (京都大学工学部)

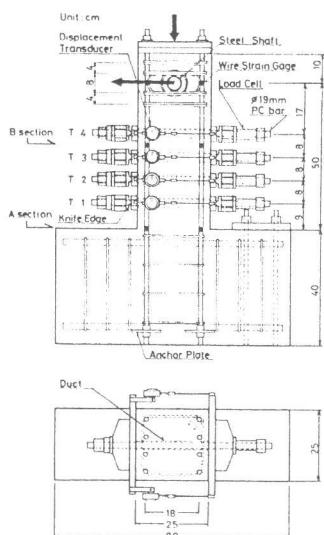
1. まえがき

昨年の講演会において、外部せん断補強法を用いた鉄筋コンクリート柱のせん断実験について報告した。¹⁾ 今回は昨年度の結果とさらに追加実施した実験の結果を引張鉄筋の張力分布について再整理し、所謂はり作用の喪失がせん断ひびわれ発生と対応しておこる事を示し、この物理現象をコンクリート片持ばりの破壊とむすびつけてせん断ひびわれ荷重の推定方法を提示した。

2. 引張主筋の付着応力変化

曲げモーメントとせん断力が同時に作用する鉄筋コンクリート部材では、主筋とコンクリートの間に付着応力が生じ、曲げひびわれの発生後は、はり材では常用の $\tau = Q / \sum \phi \cdot j \cdot d$ 式によって付着応力を求め得る。せん断ひびわれの発生後は、図1に示すようにせん断補強筋のトラス作用とコンクリート片持ばりの残存抵抗により引張主筋張力変化が生じ、せん断ひびわれ発生前とは全く異った内部応力状態となる。そこで、図2に示す供試体に対して実施した柱せん断試験において図2中のA断面とB断面における引張主筋張力に注目する事にした。図3にA断面およびB断面引張筋張力の差、 $T_A - T_B$ 、および、これより求めたA、B断面間の付着応力度と、供試体たわみとの関係の一例を示す。同図より明らかなように、せん断ひびわれの発生により付着応力が急変することがわかる。ここで上に述べた所のせん断ひびわれ発生後のトラス作用による付着応力度を求めるため、図1で示した扇形モデルを用いた。このモデルによる主筋張力変化量 $T_A - T_B$ は次式で求められる。

$$T_A - T_B = \sum_{i=1}^n \frac{T_w^i}{\tan \theta_i} = \sum_{i=1}^n \frac{T_w^i \cdot l_i}{d} \quad (1)$$



(1)式中、 T_w^i は柱はり接合面から i 番目のせん断補強筋張力、 l_i は柱はり接合面からの距離、 θ_i は仮想圧縮束の角度、 \tilde{d} は応力中心距離である。計算結果は図 3 中に黒丸で示されているが、同図中の 2 本の曲線の差がコンクリート片持ばりの抵抗によるものと考えられる。そこでより詳細に調査する為に、これら 2 曲線の差よりコンクリート片持ばりの抵抗による付着応力度 τ_{eq} を求め載荷せん断力に対してプロットしたのが図 4 である。なお同図における供試体名の意味は次のとおりである。
(例) 2 TRH-6-0.3-1/3
① - $w f_y = 6000 \text{ (kgf/cm}^2)$ ② - $p_w = 0.3 \%$ ③ - $\sigma_o = f'_c / 3$ (無表示は $\sigma_o = f'_c / 6$)

曲げひびわれの発生までは一様弾性体と考えられ次式が成立する。

$$\tau_{eq} = \frac{Q}{\Sigma \psi} \cdot \left(d - \frac{h}{2} \right) \cdot n \cdot A_s t \cdot \frac{1}{I_{eq}} \quad (2)$$

ここで d は断面有効高さ、 h は全高さ、 n は弾性係数比、 $A_s t$ は引張鉄筋断面積、 I_{eq} はコンクリートに換算した等価断面 2 次モーメントである。曲げひびわれ発生後は常用の $Q / \Sigma \psi \cdot j \cdot d$ により、せん断力増分と付着応力度増分が関係づけられるものと考え図中に(2)式および常用式で計算した結果を示したが実験結果とよく一致している。すなわち、曲げひびわれの発生後コンクリート片持ばりが抵抗する事によりはり作用が維持されるがこれの破壊により斜めひびわれが発生するものと考えられ、これが図 4 中の τ_{eq} 値の急変点(頂点)に対応しているといえる。そこで著者らは、最初 Kani によって提唱された Tooth 理論を軸力の存在する場合に拡張して比較的せん断スパン断面高さ比の大きい柱のせん断ひびわれ発生荷重を推定する事とした。

3. 鉄筋コンクリート柱のせん断ひびわれ荷重の推定

2. で述べたようにコンクリート片持ばりの折れる時をせん断ひびわれの発生と考え図 5 に示すような状況を考える。断面 A はモーメント最大断面で、B 断面は曲げひびわれ発生の限界断面とする。曲げひびわれ間に形成されるコンクリート片持ばりの負担する付着力を ΔT とすれば、

$$\Delta T = \tau \cdot C_w \cdot \Sigma \psi \quad (3)$$

となる。ここで τ は A, B 断面間における平均付着応力度、 C_w は平均ひびわれ間隔、 $\Sigma \psi$ は鉄筋周長和である。一方コンクリート片持ばりの限界条件より次式が得られる。

$$\Delta T \cdot S = (b \cdot C_w^2) \cdot f_t / 6 \quad (4)$$

ここに S はクリティカルなコンクリート片持ばりの長さ、 f_t はコンクリート引張強度である。A および B 断面での引張鉄筋張力 T_A と T_B の差は平均付着応力度 τ を用いて次式で表わされる。

$$T_A - T_B = \tau \cdot a_1 \cdot \Sigma \psi \quad (5)$$

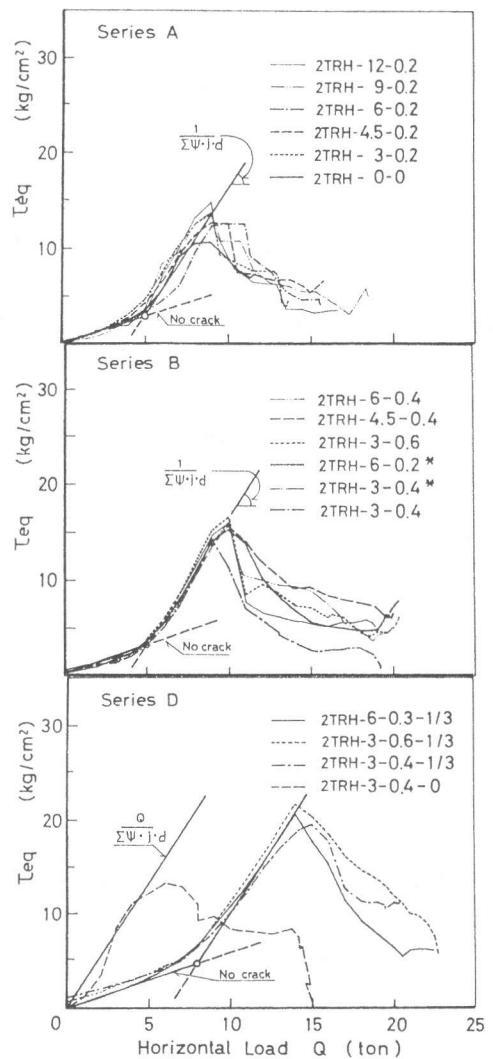


図 4 コンクリート片持ばりの抵抗による
A・B 断面での付着応力度

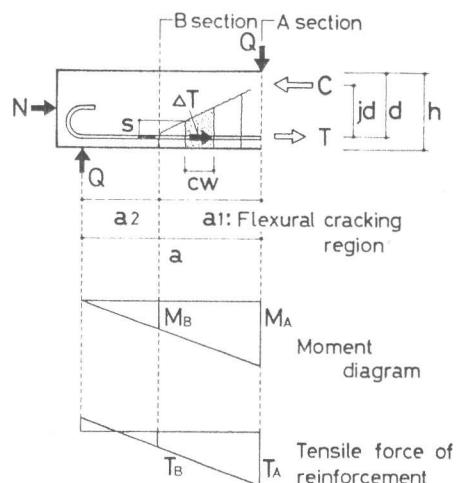


図 5 せん断ひびわれ発生時に対する仮定

ここで a_1 は、 A . B 断面間の距離である。一方、せん断ひびわれ発生時における A および B 断面でのモーメントをそれぞれ M_A , M_B とすると、外力の条件より、

$$a/M_A = (a - a_1)/M_B \quad \therefore a_1 = (1 - M_B/M_A) \cdot a \quad (6)$$

となる。図 6 に示された任意断面における内力分布状態より、断面モーメントは次式で表わし得る。

$$M = T \cdot j + d \cdot N + (0.5 h - d + j \cdot d), N(軸力) \quad (7)$$

B 断面における鉄筋張力 T_B はコンクリートのひずみとの適合条件より

$$T_B = n \cdot f_t \cdot p_t \cdot b \cdot d \quad (8)$$

となる。(3), (4), (5)および(6)式より

$$T_A - T_B = (a \cdot b / 6) (1 - M_B/M_A) (C_w/S) \cdot f_t \quad (9)$$

(7), (8)および(9)式を用いて、クリティカル断面におけるモーメント 図 6 任意断面における断面内力分布

M_A は次式で与えられる。

$$M_A = \frac{1}{6} \cdot j \cdot b \cdot d^2 \cdot f_t \left(\frac{a}{d}\right) \left(\frac{C_w}{S}\right) \left(1 - \frac{M_B}{M_A}\right) + j \cdot n \cdot f_t \cdot b \cdot d^2 + N \cdot (0.5 h - d + j \cdot d) \quad (10)$$

ここで j は応力中心距離比である。また、 M_B は曲げひびわれ時に対応しており(7), (8)式より求められる。

$$M_B = j \cdot n \cdot f_t \cdot p_t \cdot b \cdot d^2 + N \cdot (0.5 h - d + j \cdot d) \quad (11)$$

(10), (11)式は M_A に対する2次方程式となり、それを解くと下に示す2つの解が得られる。

$$M_A = M_B, \quad M_A = \frac{1}{6} \cdot j \cdot b \cdot d^2 \cdot f_t \left(\frac{a}{d}\right) \left(\frac{C_w}{S}\right) \quad (12)$$

$M_A \neq M_B$ は明白なので後者が正解となる。

4. 実測せん断ひびわれ荷重と本推定方法による計算値の比較

本推定式の妥当性を調査するために文献(5)～(9)に報告されている試験体と、今回行なった実験の供試体計381体に対して試算を行なった。ただし文献(6)には、神戸大学、横国大、東工大、大工大で行なわれた実験の結果が掲載されており、その結果をそのまま引用した。

(12)式を用いてせん断ひびわれ荷重を求めるためには、 j , C_w , S の3つの未知数を適当に定めねばならない。 C_w については下に示す。Gergely and Lutz の式⁴⁾を用いて算定することとした。

$$C_w = 2.16 \sqrt[3]{dc \cdot A} / (1 + 2 ts / 3h) \quad (13)$$

dc :鉄筋中心までのかぶり厚さ ts :鉄筋表面までのかぶり厚さ

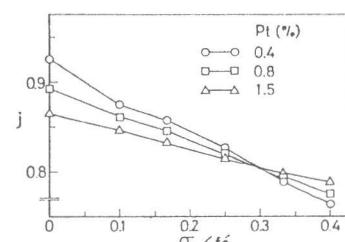
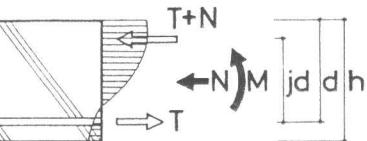
h :断面全高さ n :引張鉄筋本数 $A = 2 \cdot dc \cdot h / n$

断面の合力中心距離比 j は引張鉄筋比 p_t を $0.4 \sim 1.5$, 軸力比 σ_o/f_c' を $0 \sim 0.4$ でコンクリートモデル断面の曲げ解析を行い、得られた結果が図 7 に示すように軸力比 σ_o/f_c' に対してほぼ直線関係を示しているので次式で与えた。

$$j = (0.20 p_t - 0.49) (\sigma_o/f_c' - 0.29) + 0.81, p_t(\%) \quad (14)$$

クリティカルとなるコンクリート片持ばかりの長さ S は、 S/d の比率で与える事とした。これは断面のスケールイフェクトを考慮した為である。 S/d の比率は当初一定値になるものと期待したが、数値計算を進めていく過程で、軸力比が大きいほど S/d 比を小さく仮定する方が、実験値に対する適合性が良くなることを見い出した、よってここでは、 S/d の比率を軸力比の関数として次のとくに与えた。

$$\frac{S}{d} = 0.140 - 0.165 \frac{\sigma_o}{f_c'} \text{ (曲げせん断ひびわれ)} \quad (15)$$



$$\frac{S}{d} = 0.124 - 0.141 \frac{\sigma_0}{f_c} \quad (\text{せん断ひびわれ}) \quad (16)$$

ただし、本推定方法はその仮定した機構より a/d 比の小さいものには不適当な為、 $a/d \geq 1.5$ に対して適用した。実験値としての曲げせん断ひびわれ時せん断力 Q_{BS} 、およびせん断ひびわれ時せん断力 Q_s と推定値の比率に対する度数分布を図 8、図 9 に示した。なお、図 8、図 9 に対する標準偏差はそれぞれ 0.31 および 0.33 であった。一方、本推定方法によると (6) 式によりせん断ひびわれ領域を求める事が出来る。そこで著者等の行なった柱せん断試験より得られたひびわれ図と比較した所良好な対応が得られた。 a/d 比が 1.5 以下の場合にはこの推定法よりも弾性解析において重心軸位置での引張主応力がコンクリート引張強度に達した時をせん断ひびわれの発生とする方が良いものと考えられる。図 10 に本報告で扱った供試体のうち $a/d < 1.5$ のものに対して弾性理論で Q_s を求めた結果を示したが、きわめて適合性が良いと言える。

5. 結 語

鉄筋コンクリート柱のせん断破壊実験における引張筋張力分布の観察より、せん断ひびわれの発生が曲げひびわれにより形成されるコンクリート片持ばかりの破壊（はり作用の喪失）により引きおこされるものとし、軸力を含めた形でせん断ひびわれ荷重推定式を導いた。結果はきわめて単純な (12) 式となり、推定値と計算値の間には良好な対応が認められた。また、せん断ひびわれ荷重の推定と同時にその領域が求まることが特長であり、付着割裂タイプの破壊形式を扱う場合に有効となる。 a/d が小さい場合には、弾性計算によりせん断ひびわれ荷重が十分な精度で求まる事より本推定法と併用すれば広範囲にわたる a/d 比をもつ柱に対してせん断ひびわれ荷重を推定できる。本報告では C_w の算定に Gergely and Lutz の式を用いたが、他のひびわれ間隔推定式に比べてこの式が最も適合性がよかったですを付記しておく。

また、コンクリート片持ばかりの破壊条件に曲げ引張強度を使わず、一軸引張強度を用いた点、せん断スパンと曲げスパンにおけるひびわれ間隔を同じとした点に問題があり今後の研究が必要である。

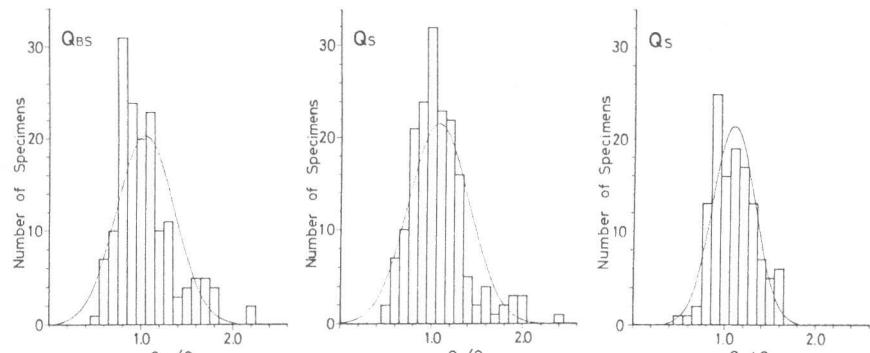


図 8 Q_{BS} / Q_{BS}^{CAL} 度数分布 図 9 Q_s / Q_s^{CAL} 度数分布 図 10 $Q_s / Q_s^{CAL} (a/d < 1.5)$

参考文献

- (1) 六車他, 鉄筋コンクリート柱におけるせん断補強筋の補強効果に関する研究, JCI 大会論文集, 1981, pp. 441~444
- (2) 六車他, 鉄筋コンクリート柱におけるせん断補強筋の補強効果に関する研究(その2), 日本建築学会大会梗概集, 昭和56年9月, pp.1311~1312
- (3) G. N. J. Kani, The Riddle of Shear Failure and Its Solution, J. of ACI, April, 1964, pp.442~467
- (4) P. Gergely and L. A. Lutz, Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, ACI, SP-20 1968
- (5) 六車, 富永, 渡辺, 軽量RC柱のせん断破壊実験と2.3の考察, セメント技術年報, XXV, 昭和46年, pp.357~362
- (6) 広沢, 既往のRC柱実験資料, 建設省建築研究所建築研究資料, NO.2 Mar. 1973
- (7) 荒川, 大野, 新載荷法による鉄筋コンクリート梁の剪断抵抗について, 日本建築学会論文報告集, 第57号, 昭和32年7月, pp. 581~584
- (8) 鉄筋コンクリート柱の崩壊防止に関する総合研究(その6)～(その8), 日本建築学会大会梗概集, 昭和48年10月, pp.1421~1428
- (9) 鉄筋コンクリート柱の崩壊防止に関する総合研究(その11)～(その12), 日本建築学会大会梗概集, 昭和49年10月, pp.1311~1312