

[136] 鉄筋コンクリート柱のせん断耐力評価に関する研究

正会員 六車 照 (京都大学 工学部)  
 正会員 ○渡辺 史夫 (京都大学 工学部)

1. まえがき

軸力、曲げモーメントおよびせん断力を同時に受ける鉄筋コンクリート（以下RC）柱がせん断破壊に至る過程には3つの重要な限界点が存在する。それらは、①曲げひびわれの発生、②斜張力ひびわれの発生および、③せん断補強筋の降伏の3つである。本研究では、これら3つの限界点を経験した後最大耐力に到達する破壊形式を、せん断破壊基本型と呼ぶことにし、この基本型を主たる議論の対象とした。但し、RC柱のせん断破壊形態は、種々の要因により影響される為、必ずしも基本型で破壊するとは限らないのは当然である。②の斜張力ひびわれの発生以後、せん断補強筋が効果を発揮する訳で、本論においては斜張力ひびわれ耐力とせん断補強筋降伏時負担せん断力の和として単調荷重下でのRC柱のせん断破壊基本型に対する耐力を定義し、既往の実験結果と比較した。また、繰返し高応力を受ける柱に関しては、載荷実験におけるせん断補強筋ひずみ実測結果より、せん断補強筋の挙動、コンクリートの負担せん断力に関する考察を行い、せん断耐力評価法について論じた。

2. 単調荷重下でのせん断耐力

図1に対象としたRC柱の応力状態を示す。外力せん断力 $Q$ と鉄筋および圧縮域コンクリートで負担されている曲げ圧縮力 $C$ が斜め圧縮合力となって柱に伝達されるわけであるが、その一部は斜張力ひびわれ上部を直接伝わるコンクリート圧縮力により負担され、残りがせん断補強筋により負担される。この機構については、服部・柴田・大野による提案<sup>(1)</sup>および吉岡・岡田・武田による提案<sup>(2)</sup>等があるが、ここでは後者によって塑性ヒンジ領域における応力伝達機構として示されたものと類似のモデルを用いて説明する。図2がそのモデルであり、斜張力ひびわれ発生後のまだ荷重の小さい段階での状態を力の多角形 $\textcircled{O}\textcircled{D}\textcircled{I}\textcircled{H}\textcircled{O}$ で、より荷重の大きい段階でのそれを $\textcircled{O}\textcircled{E}\textcircled{G}\textcircled{F}\textcircled{O}$ で表してある。 $\textcircled{O}\textcircled{D}$ および $\textcircled{O}\textcircled{E}$ が曲げ圧縮力 $C'$ および $C$ に、 $\textcircled{O}\textcircled{H}$ および $\textcircled{O}\textcircled{F}$ がコンクリートを直接伝わる斜め圧縮力 $C_c'$ および $C_c$ でこの $Q$ 方向成分が一般に言われているコンクリート負担せん断力 $Q_c$ である。 $\textcircled{H}\textcircled{I}$ および $\textcircled{F}\textcircled{G}$ が斜張力ひびわれ下部に形成される扇形機構<sup>(4)</sup>の圧縮合力 $C_{R'}$ および $C_R$ であり主としてせん断補強筋により支持される。

図2 (a) に示すように、本論ではコンクリートの負担せん断力は、外力せん断力の大きさに拘らず一定 $Q_c$ であると仮定している。同図 (b) には、圧縮束合力 $C_R$ の支持機構が力の多角形 $\textcircled{F}\textcircled{G}\textcircled{J}\textcircled{K}$ で示されている。 $\textcircled{G}\textcircled{J}$ が斜張力ひびわれを横切るせん断補強筋の張力和、 $\textcircled{J}\textcircled{K}$ が斜張力ひびわれ面に働く骨材のかみ合い力および主筋ダウエル力の和、 $\textcircled{K}\textcircled{F}$ が主筋の付着

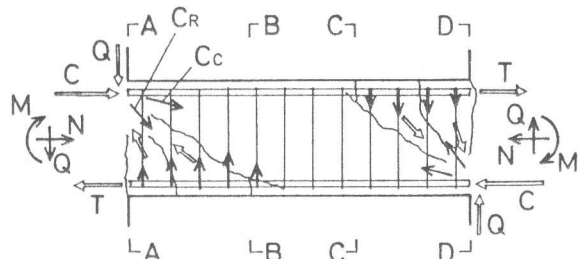


図1 柱の外力および端部での応力状態

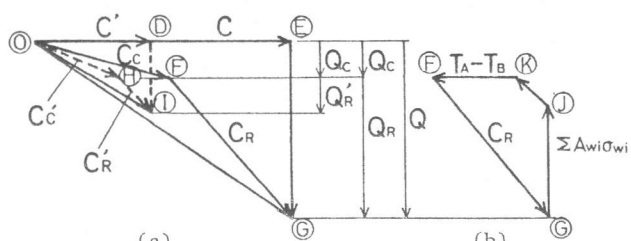


図2 内部における応力伝達機構のモデル

作用である。ここで注意しなければいけないのは、 $C_R$ の $Q$ 方向成分よりもせん断補強筋の張力 $\sum A_w i \sigma_w i$ の方が小さいことであり、その原因はひびわれ面における骨材のかみ合い作用と主筋のダウエル作用にある。以上の基本的考察に基づいて単調荷重下での耐力を求めることにする。まず、コンクリートの負担せん断力 $Q_c$ を斜張力ひびわれ耐力で与える。なぜならば、 $Q_c$ は斜張力ひびわれが発生した直後のせん断補強筋がほとんど効果を発揮していない状態から終局状態に至るまで一定値を保つのであるから、斜張力ひびわれ耐力に等しくなければならない。斜張力ひびわれ耐力式は、主筋の曲げ付着作用に基づいて得られた下式で与えられる。<sup>(3)</sup>

$$Q_c = (9.11 + 0.0716 \frac{A_e}{m}) F_t \cdot b + (1 - (d - 0.5h)n) A_{st} \frac{7d}{8I_{eq}} \cdot Q_0 \quad \text{----- (1)}$$

( 単位,    kgf,    cm,    kgf/cm<sup>2</sup> )

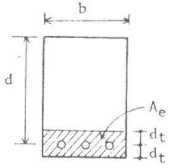


図3

$A_e$ : 引張鉄筋重心を中心を持つコンクリート有効引張断面積 (図3),  $m$ : 引張鉄筋本数  
 $h, d$ : 断面の全丈および有効丈,  $F_t$ : コンクリート引張強度  $I_{eq}$ : コンクリートに換算した断面2次モーメント,  $A_{st}$ : 引張鉄筋断面積,  $n$ : 弾性係数比 ( $E_s/E_c$ ),  
 $Q_0$ : 最大モーメント断面コンクリート引張鉄筋位置応力が零となる時の外力せん断力

但し、得られた $Q_c$ に対応する曲げ付着応力 $\tau_b$ が、主筋の付着耐力より大きい場合には、 $Q_c$ が斜張力ひびわれ耐力を与えないことになる。一方、図4に、著者等の実験で得られたせん断補強筋の補強効果式を示す<sup>(3)</sup>。これは、斜張力ひびわれの発生以後コンクリートの負担せん断力 (図2における $Q_c$ ) を一定 (斜張力ひびわれ荷重) と仮定し、せん断補強筋の降伏時でもってその補強効果を定義して得られたものである。実験データの殆どが  $v_R = p_w \cdot w_f y$  の直線より上部にあるのは、図2 (b) に示したように、 $Q_R$  よりも  $\sum A_w i \sigma_w i$  の方が小さいことに対応している。すなわち、

$$Q_R = 3.0 (p_w \cdot w_f y)^{5/8} b j d \quad \text{---- (3)}$$

で表わせるせん断補強効果式には、鉄筋のダウエル作用およびひびわれ面での骨材のかみ合い作用を含んでいることになる。以上まとめると、単調荷重下でのRC柱のせん断破壊基本型に対する耐力は、(1)式および(3)式の和として、 $Q_u = Q_c + Q_R$  ----- (4)

で与えられる。(4)式の精度を調査する為過去に我が国で行われたRC柱せん断実験供試体に対して、 $Q_u$ を計算し実験より得られた耐力 $Q_u^c$ と比較<sup>(5)</sup>したのが、図5である。同図中には、せん断スパン有効高さ比 $a/d$ が1.5以下の極短柱の例も示してあるが、この場合には、 $Q_c = 0.67 \cdot b \cdot h \sqrt{F_t (F_t + \sigma_o)}$  ;  $\sigma_o$ : 柱軸力による断面重心軸位置コンクリート圧縮応力、により、コンクリート負担せん断力を与えた。同図は縦軸、横軸ともに最大モーメント断面が計算上の曲げ破壊耐力に到達する場合のせん断力 $Q_f$ により無次元化されている。△印で示した供試体において、実験値が計算値を大きく下回っており、先に述べたせん断破壊基本型以外の破壊形式であるものと考えられ、文献<sup>(4)</sup>に示されている解析法により、付着割裂せん断破壊耐力 $m Q_u^c$ を求め $Q_u$ と置換えた結果を●で示したが、実験値と計算値は良く一致している。すなわち、(4)式は、せん断破壊基本型を示すRC柱の単調荷重下での、せん断耐力を評価し得るものと考えられる。

$$\tau_b = \frac{d - 0.5h}{I_{eq}} n A_{st} \frac{Q_0}{\Sigma \psi} + \frac{1}{j d \Sigma \psi} (Q_c - Q_0) \quad \text{--- (2)}$$

$\Sigma \psi$ : 引張鉄筋周長和

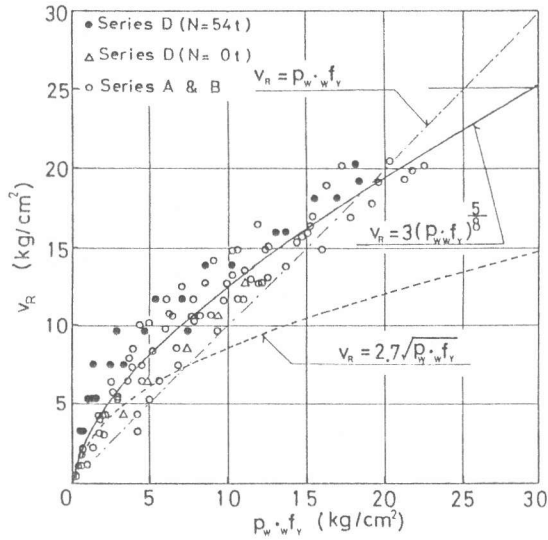


図4 せん断補強筋の補強効果

### 3. 繰返し荷重下でのせん断耐力の評価

#### 断耐力の評価

前節で述べた(4)式によりRC柱のせん断耐力を求めることが出来る。しかし現実の架構が強い地震動を受ける場合には、柱は塑性変形を生じるような高応力繰返し荷重を受け、単調荷重下では曲げ破壊を生じるものでも、急激な耐力低下をともなうせん断破壊を生じる場合がある。ここでは、このような場合におけるコンクリート負担せん断力 $Q_c$ およびせん断補強筋負担せん断力 $Q_R$ について、過去に著者等の行った実験結果を用いて検討した<sup>(6)</sup>。実験の概要を図6に示す。供試体は片持梁形式のもので、付着破壊が生じないように主筋両端は定着鋼板でもって完全に定着されている。なお供試体記号の意味は下のとおりである。図7に代表的な供試体2HB-10Rの正負繰返し載荷実験より得られた $v(Q/bjd) - p_w \cdot wfs$  関係を示す。ここで、 $wfs$ は、斜張力ひびわれ領域におけるせん断補強筋平均応力である。図中には比較の為、先に示したせん断補強効果式(3式)の $wfy$ を $wfs$ で置き直した曲線が示されている。図より明らかなように繰返し回数の増大(たわみ振幅の増大)に伴って、 $wfs$ は増大しているのに耐力が減少していることが解る。そこで、このような $wfs$ と $v$ の変化をより詳細に調査することにした。せん断補強筋の補強効果と柱のたわみじん性率との基本的関係を明らかにする為に、単調載荷供試体の $v_R (= \frac{Q-Q_c}{bjd})$ と $p_w \cdot wfs$ の関係を図8に示す。ここでも、斜張力ひびわれ発生以後、コンクリート負担せん断力 $Q_c$ が一定に保持されるという考えに基づいている。すべての供試体ともに、降伏たわみに到達するまでは、ほぼ3式中の $wfy$ を $wfs$ で置き替えた曲線に一致している。しかし、それ以

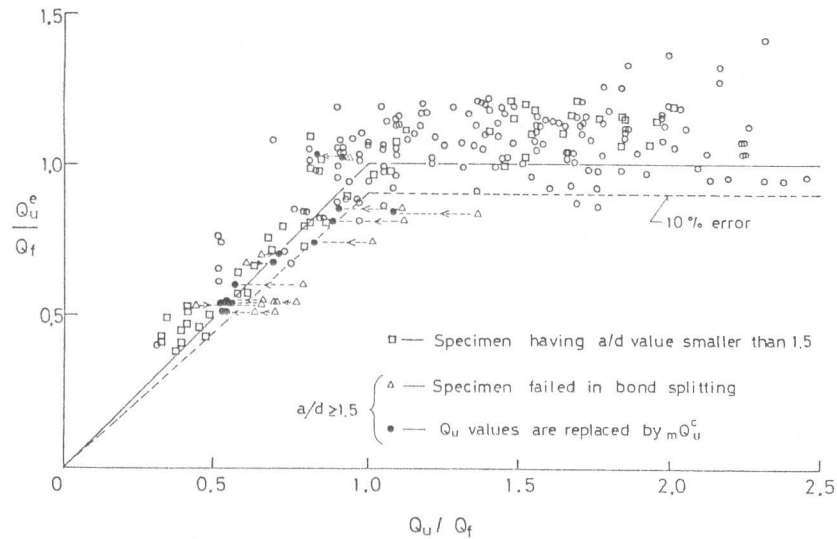


図5 RC柱せん断耐力の実験値と計算値の比較

断力 $Q_c$ およびせん断補強筋負担せん断力 $Q_R$ について、過去に著者等の行った実験結果を用いて検討した<sup>(6)</sup>。実験の概要を図6に示す。供試体は片持梁形式のもので、付着破壊が生じないように主筋両端は定着鋼板でもって完全に定着されている。なお供試体記号の意味は下のとおりである。図7に代表的な供試体2HB-10Rの正負繰返し載荷実験より得られた $v(Q/bjd) - p_w \cdot wfs$  関係を示す。ここで、 $wfs$ は、斜張力ひびわれ領域におけるせん断補強筋平均応力である。図中

には比較の為、先に示したせん断補強効果式(3式)の $wfy$ を $wfs$ で置き直した曲線が示されている。図より明らかなように繰返し回数の増大(たわみ振幅の増大)に伴って、 $wfs$ は増大しているのに耐力が減少していることが解る。そこで、このような $wfs$ と $v$ の変化をより詳細に調査することにした。せん断補強筋の補強効果と柱のたわみじん性率との基本的関係を明らかにする為に、単調載荷供試体の $v_R (= \frac{Q-Q_c}{bjd})$ と $p_w \cdot wfs$ の関係を図8に示す。ここでも、斜張力ひびわれ発生以後、コンクリート負担せん断力 $Q_c$ が一定に保持されるという考えに基づいている。すべての供試体ともに、降伏たわみに到達するまでは、ほぼ3式中の $wfy$ を $wfs$ で置き替えた曲線に一致している。しかし、それ以

2HB-10R  
 R: 繰返し載荷  
 M: 単調載荷  
 $\phi 6$  帯筋間隔 5, 7.5, 10 cm  
 H: 高強度帯筋  $f_y = 11700 \text{ kgf/cm}^2$   
 N: 普通強度帯筋  $f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$

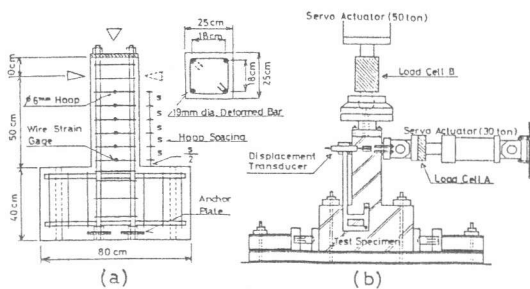


図6 繰返し載荷供試体と試験装置

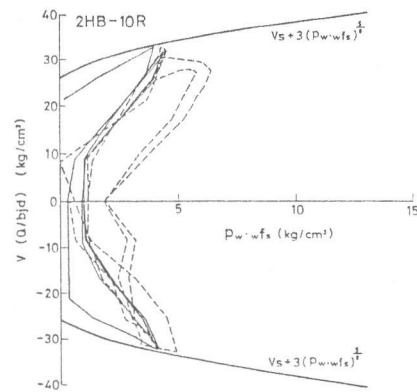


図7 代表的供試体の $v - p_w \cdot wfs$ の関係

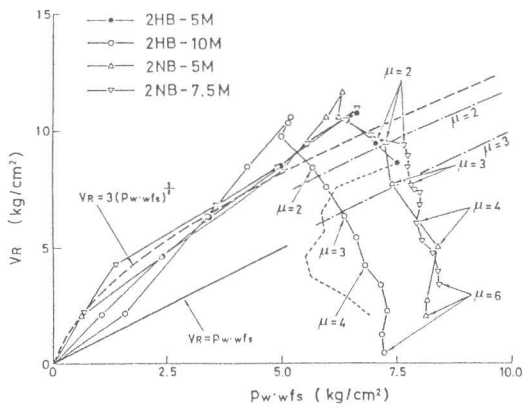


図8 単調荷供試体の  $v_R - p_w \cdot w_f s$  関係

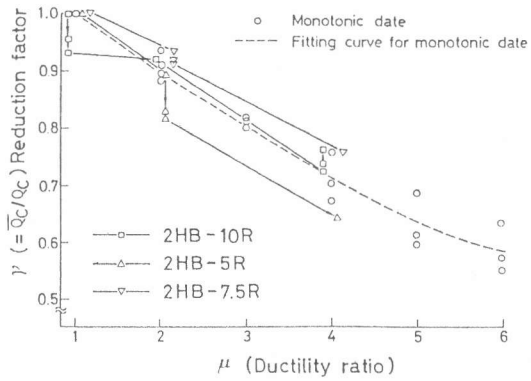


図9 コンクリート負担せん断力の変化

後の変形の増大に伴って  $p_w \cdot w_f s$  は増大するものの  $v_R$  が減少しており、せん断補強筋の効率がたわみの増大とともに徐々に減っていくことになる。例えば、 $\mu = 3$  を確保する為には  $v_R = p_w \cdot w_f s$  式によりせん断補強筋量を決めねばならない。しかし、このようにせん断補強効果式を変更することは甚だ繁雑であり、塑性変形領域では圧縮域コンクリートが大きなダメージを受けている状態を考えあわせると、図2 (a) 中に  $C_c$  で示したコンクリート圧縮力の大きさもしくは勾配を  $\mu$  の値に応じて減じ結果としてコンクリート負担せん断力を減じるのが妥当と考えられる。そこでせん断補強筋の効果は  $3.0(p_w \cdot w_f s)^{5/8} b_j d$  で与え残余のせん断力をコンクリートの負担せん断力として描いたのが図9である。但し同図縦軸は、斜張力ひびわれ発生時のせん断力を基準として無次元化されている。同図より明らかなように、 $\mu$  の増大および繰返し回数の増大に伴ってコンクリート負担せん断力低下率  $\gamma$  が減少しており、柱の必要じん性率、荷重繰返し回数と  $\gamma$  の関係が定量化されれば、 $Q_u = \gamma \cdot Q_c + Q_R$  式により繰返し高応力を受ける柱のせん断設計が可能となる。

#### 4. まとめ

本研究においては、クリティカル断面における力の流れに関する考察より、RC柱のせん断耐力評価法について論じ、斜張力ひびわれ耐力によりコンクリートの負担せん断力を表わし、これと補強効果を加え合わせることで耐力を表すことの意味を説明した。また高応力繰返しせん断荷重下では、コンクリートの負担せん断力を、じん性率、繰返し回数等によって減じるのが一つの方法であることを述べ、その低下率曲線の1例を示した。

#### (文献)

- (1) 服部・柴田・大野，“鉄筋コンクリート部材のせん断抵抗機構に関する考察”，日本建築学会論文報告集第200号，昭和47年10月，pp. 35～44
- (2) 吉岡・岡田・武田，“鉄筋コンクリート柱の変形性能向上に関する研究，第2報，破壊機構ならびに補強筋のひずみ分布について”，日本建築学会論文報告集第282号，昭和54年8月，pp. 37～44
- (3) 六車・渡辺，“鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構に関する研究，その1，せん断ひびわれの発生とせん断補強筋の補強効果”，日本建築学会論文報告集第332号，昭和58年10月，pp. 57～65
- (4) 六車・渡辺，“鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構に関する研究，その2，付着割裂破壊におけるせん断補強筋の効果”，日本建築学会論文報告集第341号，昭和59年7月，pp. 11～18
- (5) 六車・渡辺，“鉄筋コンクリート柱のせん断耐力評価に関する一考察”，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，昭和59年10月，pp. 1763～1764
- (6) 六車・渡辺，“鉄筋コンクリート柱のせん断力伝達機構に及ぼす帯筋降伏強度の影響について”，第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集，1979年，pp. 333～336