

論文

[2047] 鉄筋コンクリートひびわれ面におけるせん断伝達特性

正会員 ○李 宝禄 (清華大学土木系)

正会員 前川宏一 (東京大学工学部)

正会員 岡村 甫 (東京大学工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物においては、載荷や乾燥収縮などの影響でひびわれが発生することは一般的である。言い換えれば、構造物にひびわれが存在しながらその役割が果たされているのである。プレキャストコンクリート構造、はりや柱の接合部、RCコーベルやブラケットなどの構造物は、ひびわれが生じた後の力学的挙動はそのひびわれ面での応力-変形特性に大きく依存し、構造物全体の終局耐力もひびわれ面の耐力により決まる場合が少なくないと考えられる。一方、RC容器、せん断壁、シェルのような構造物は内圧や地震力などにより平面応力状態にあるが、これらの構造物の解析および設計をするに際して有限要素法がよく応用される。そのため、ひびわれが発生したときのひびわれ面に沿った応力伝達特性を正確に把握しなければならない。本研究では、鉄筋がひびわれの直角方向にあるときのひびわれ面での応力伝達特性を解明するため、RCはりのひびわれ面にせん断力が働くように載荷する実験を行い、また筆者らが提案したプレーンコンクリートひびわれ面での応力伝達モデルと島・岡村により提案された鉄筋とコンクリートの付着モデルとを組み合わせ、RC要素のひびわれ面におけるせん断伝達性状を定式化することを試みる。

2. プレーンコンクリートのせん断伝達モデル

コンクリートのひびわれ面でのせん断伝達特性を定式化するためには、単位面積あたりのひびわれ面を $-\pi/2$ から $\pi/2$ まで連続的に変化する方向分布をもつ数多くの微小平面からなると仮定し、これらの微小平面の方向はひびわれ面に平行するのが多く、垂直するのが少ないことを考慮し、確率密度関数 $\cos\theta$ で表すこととした[1]。ひびわれ面に働くせん断力は各微小平面がそれぞれの方向で接触することにより伝えられ、接触応力と接触面の圧縮変位との関係は剛塑性挙動を示すと仮定する。その結果、単調載荷経路にあるひびわれ面で伝達される圧縮応力とせん断応力は開口変位(ひびわれ幅)とせん断変位(ずれ)の関数として表され、次式のように纏められる。

$$\tau = m \frac{\delta^2}{\omega^2 + \delta^2} \quad (1)$$

$$\sigma = m \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{\omega}{\delta} - \frac{\delta \omega}{\omega^2 + \delta^2} \right]$$

$$m = 3.826 f_c'^{1/3} \quad (\text{MPa})$$

ここに、 τ と σ はそれぞれひびわれ面に働くせん断応力(MPa)と圧縮応力(MPa)で、 ω と δ はそれぞれ開口変位(mm)とせん断変位(mm)を表す。 m はコンクリート円柱供試体の一軸圧縮強度 f_c' だけに依存する材料係数である。幅 ω をもつひびわれ面が δ だけずれたときに伝達され

るせん断応力 τ とひびわれ幅の増大を抑圧する圧縮応力 σ は式(1)により計算することができる。

3. 鉄筋コンクリートひびわれ面でのせん断耐力

3.1 ひびわれ面におけるかみ合いとダボ機構

ひびわれ面に働くせん断力に抵抗する主なメカニズムとしては、骨材間のかみ合い機構と鉄筋によるダボ機構が考えられる。しかし、これらの機構は相互に影響し合うため、ひびわれ面に伝達されるせん断力は両者の簡単な足し合わせで表せるものではない。コンクリートと鉄筋自身の性状、鉄筋比、鉄筋かぶり、スタラップ、鉄筋とコンクリートの付着特性および開口変位とせん断変位などの変化により、かみ合い機構が支配的役割を果たす場合もあれば、鉄筋のダボ機構が主としてせん断力を受け持つ場合もある。このように、せん断面に作用するせん断力に抵抗する骨材間のかみ合い機構と鉄筋のダボ機構の貢献度を定量的に評価することが簡単ではない。にもかかわらず、骨材間のかみ合い機構はダボ機構に比べると重要な役割を果たすことは数多くの研究から指摘されている[2]。また、一般的に鉄筋によるダボ機構の影響が少なく、普通の鉄筋コンクリート構造物を対象にするときに、無視できる程度と考えられる。

3.2 せん断耐力の定式化

式(1)にあるせん断応力 τ と圧縮応力 σ はせん断変位と開口変位の比 δ/ω の関数に書き換えることができる。ここで δ/ω を式(1)より τ の関数に変更し、それを σ の式に代入すれば、次のような τ - σ 関係式が得られる。

$$\sigma = \sigma(\tau) = m \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{m}{\tau} - 1 \right)^{1/2} - \frac{(m/\tau - 1)^{1/2}}{m/\tau} \right] \quad (2)$$

あるいは、 $\tau = \tau(\sigma)$

すなわち、ひびわれ面に一定の圧縮応力 σ が働くと、それに対応するせん断強度 (τu) がずれとひびわれ幅に関係なく一義的に決まる。Bazantら[5]の非線形弾性モデルにおいては τu が ω の関数とされているが、式(2)はPaulayらの実験結果と一致する[6]。仮にRCひびわれ面でのせん断伝達耐力は鉄筋のダボ機構に関係なく、鉄筋が降伏するときのひびわれ面に働く圧縮応力に依存すると仮定すれば、そのせん断耐力はコンクリートの強度と鉄筋の降伏強度のみの関数として決めることができる。Mattockらは、あらかじめひびわれが導入されたpush-offタイプの鉄筋コンクリート供試体を使い、鉄筋がひびわれの直角方向にある場合のせん断耐力について調べた[3]。図1にその供試体及び加力方法を示す。Pはせん断面に加えるせん断力である。

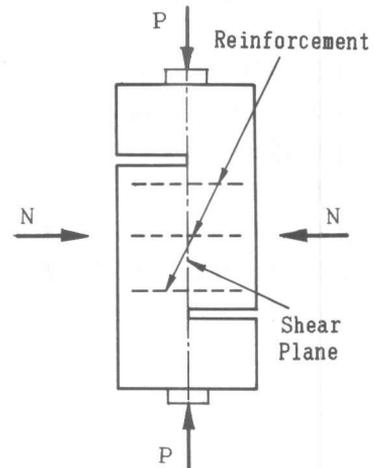


図1. Push-offタイプ供試体

鉄筋が降伏するときにひびわれ面に対する圧縮応力 ρf_y を式(2)の σ のかわりに代入して得られたひびわれ面が負担できる最大せん断応力 τu とMattockらの実験結果との比較を図2(a)に示す。図から分かるように、実験値と算定値の比は平均0.93で、変動係数は14%である。また、図1に示した供試体にNで示した外力を加えたときのひびわれ面のせん断強度を計算し、それと実験値との比較を図2(b)に示し

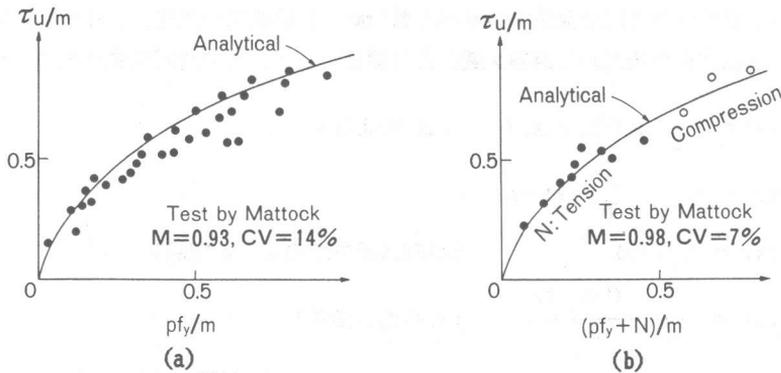


図2 鉄筋コンクリートひびわれ面のせん断強度

た。ここに、Nは圧縮の場合にプラス、引張の場合にマイナスとして、 $(f_y + N)$ の値を σ のかわりに式(2)に代入した。このとき実験値と算定値の比は平均0.98、変動係数は7.47%である。

式(2)はひびわれ面にある骨材の噛み合い機構のみを考慮したもので、鉄筋のダボ機構の影響が入っていない。鉄筋のダボ作用は破壊形式や付着などに影響を及ぼすことが予想されるが、ひびわれ面に沿って伝達されるせん断耐力に対してはダボ作用の影響が少ないと考えられる。

4. 鉄筋コンクリートひびわれ面の変形特性

4.1 実験概要

ひびわれたRCのせん断応力伝達特性を解明するには、ひびわれをRCはりの中央部にあらかじめ割裂により導入し、二点支障二点載荷の方法でひびわれ面にせん断力のみが働くように載荷実験を行った。使用した供試体の寸法、鉄筋とコンクリートの性質は表-1に示す。

表-1 使用したRC供試体の性状

供試体			鉄筋					コンクリート
番号	断面 mmXmm	長さ L(mm)	鉄筋比 ρ (%)	直径 (mm)	鉄筋数	降伏強度 f_y (MPa)	弾性係数 E (MPa)	強度 f_c (MPa)
RC-1	150X300	600	0.71	D19	1	389	1.92	41.3
RC-2	150X300	900	0.71	D10	4	429	2.05	32.8
RC-3	200X300	1500	1.88	D25	2	456	1.91	28.0

コンクリートに使われた骨材の最大寸法は15mmで、鉄筋は異型鉄筋を使用した。供試体の長さはそれぞれ直径が異なる鉄筋に十分な定着長をもたせるように決めたもので、供試体の両自由端にある鉄筋とコンクリートの間にすべりが生じないように配慮した。

4.2 せん断伝達モデルと付着モデルとの組合せ

島らは鉄筋とコンクリートの付着実験から、付着応力-すべり-ひずみ関係と呼ばれる付着モデルを提案した[4]。それは次のようである。

$$\frac{\tau_b}{f_c'} = 0.73 \frac{\ln^3(1+5\cdot\zeta)}{1 + \epsilon \cdot 10^5} \quad (3)$$

ここに、 $\zeta = 1000 s/D$ 。 τ_b は付着応力(MPa)、 f_c' はコンクリート円柱体の一軸圧縮強度(MPa)、

s は鉄筋とコンクリートの間に発生するすべり量(mm)、 D は鉄筋の直径、 ε は鉄筋ひずみを示す。そうすると、供試体の自由端から距離 x 離れた位置について、次の諸関係式が成り立つ。

$$\tau_b(x) = \tau_b(s(x), \varepsilon(x)) \quad (\text{式(3)より}) \quad (4)$$

$$s(x) = s_0 + \int_0^x \varepsilon(x) dx \quad (5)$$

$$\sigma_s(x) = E_s \varepsilon(x) \quad (\text{鉄筋降伏までの } \varepsilon - \sigma \text{ 関係}) \quad (6)$$

$$\tau_b(x) = \frac{\pi}{4} \frac{d \sigma_s(x)}{dx} \quad (\text{つりあい条件}) \quad (7)$$

ここに、 s_0 は供試体自由端 ($x=0$) にある鉄筋のすべり量で、定着長が十分長ければゼロである。 $\sigma_s(x)$ は位置 x にある鉄筋の引張応力を示す。任意の位置 x に鉄筋の引張応力 σ が与えられれば、式(4,5,6,7)を連立して、 ε 、 τ_b と s を計算することができる。

つぎに、RC部材のひびわれ面に関するせん断伝達特性について考えてみよう。前章にも言及したように、ひびわれ面のせん断耐力に対する鉄筋のダボ機構の貢献度は骨材の噛み合い機構に比べると少ないため、鉄筋がひびわれ面のせん断剛性に及ぼす影響はダボ機構によるものが少なく、むしろひびわれ面に圧縮力を与えることにより、摩擦と同じような機構でせん断剛性に影響を与えると仮定する。

このように、単調荷経路に適用するプレーンコンクリートのせん断伝達モデルの式(1)を鉄筋とコンクリートの付着モデルと組みあわせて、しかもひびわれ幅をコンクリートから鉄筋の引出し量と等しいとすれば、ひびわれたRCコンクリートのせん断伝達特性を計算することができる。これを次の諸式で表される。

$$s = s_0 + \int_0^{L'} \varepsilon(x) dx \quad (8)$$

$$L' = L/2 \quad (9)$$

$$\sigma_s = \rho \sigma_c \quad (\text{釣合条件}) \quad (10)$$

$$\sigma_c = \sigma_c(\omega, \delta) \quad (\text{式(1)より}) \quad (11)$$

$$\tau_c = \tau_c(\omega, \delta) \quad (\text{式(1)より}) \quad (12)$$

$$\omega = 2s \quad (13)$$

ここに、 L は供試体の長さ、 L' は鉄筋の定着長さである。下付き c はコンクリート、 ρ は鉄筋比を表す。

図3(a)はRCひびわれ面におけるせん断応力とせん断変位の関係とを示したもので、黒丸は実験から計測されたデータであり、破線は以上に述べた方法で算定された結果である。前にも述べたように、鉄筋が降伏すれば最大せん断応力が得られ、このせん断強度はモデルから精度よく計算することができる。ところが、鉄筋が降伏するまでの両者を比べてみれば分かるように、せん断剛性の算定値は実験値をやや上回ることになる。また、図3(b)に示したのはせん断応力の増加に伴う変形経路、即ちひびわれ面でのせん断変位と開口変位の関係であるが、鉄筋が降伏すれば、実験と計算値との一致が認められる。しかし、降伏するまでには同じ開口変位に対して、実験より若干大きいせん断ずれ変位の計算結果が得られる。鉄筋が降伏するまでの実験値と計算値が一

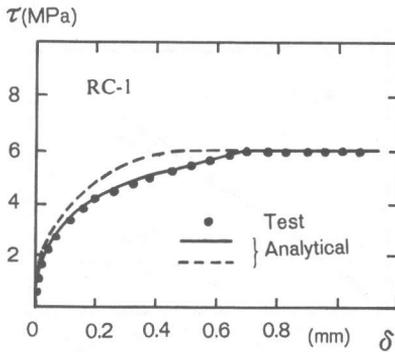
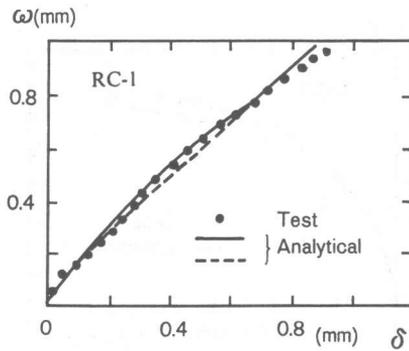


図3 RC-1 (a) $\tau - \delta$ 関係



(b) $\delta - \omega$ 関係

致しないことは実験条件によるものと考えられる。鉄筋は付着実験で引張を受けることに対して、せん断実験では引張、曲げ、さらにせん断を含む複雑な応力状態に置かれる。そのため、ひびわれ近傍にあるコンクリートは鉄筋からの割裂効果などにより付着が破壊され、ある範囲にわたって付着応力が失ってしまう(図4参照)。この付着低下の影響を考慮に入れるために、式(9)と式(13)を修正し、さらに式(14)を導入すれば、より正確にせん断剛性と変形経路を計算することができる。その結果を図3(a,b)に実線で示す。

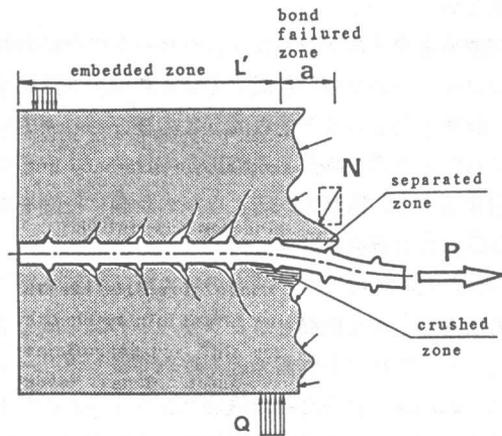


図4 付着の低下機構

$$L' = L/2 - a \tag{9'}$$

$$\omega = 2 [s + a \cdot \varepsilon(x=L/2)] \tag{13'}$$

$$a = 2 D \tag{14}$$

ここに、 a は付着が低下する範囲で、鉄筋径の2倍と仮定されている。そうすると、同じ鉄筋比と異なる鉄筋径を持つRC-2と、鉄筋径と鉄筋比の両方とも異なるRC-3のひびわれ面でのせん断剛性と変形経路も定量的に予測することができる(図5、図6参照)。

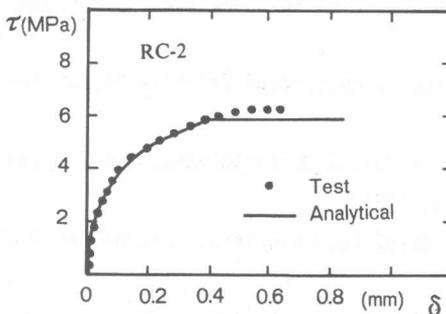
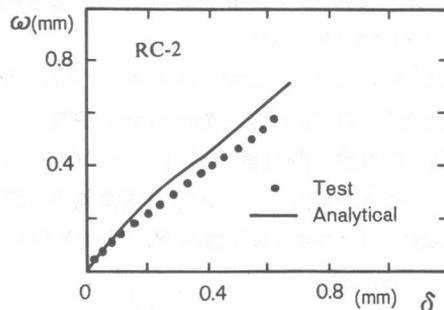


図5 RC-2 (a) $\tau - \delta$ 関係



(b) $\delta - \omega$ 関係

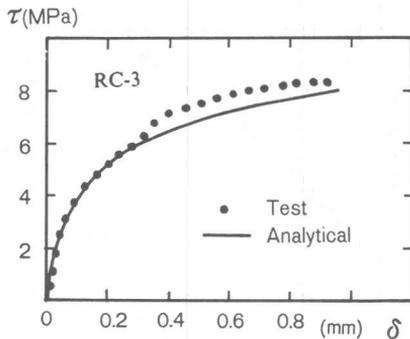
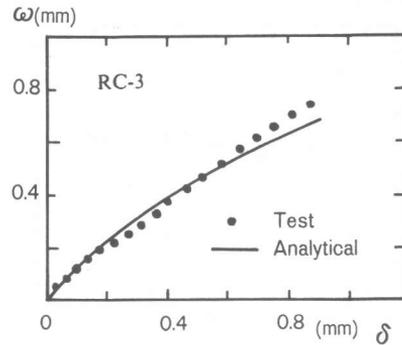


図6 RC-3 (a) $\tau - \delta$ 関係



(b) $\delta - \omega$ 関係

5. まとめ

単調荷を受けるプレーンコンクリートのひびわれ面で伝達されるせん断応力の表示式から鉄筋コンクリートのひびわれ面でのせん断強度を計算することができる。鉄筋がひびわれ面の直角方向に配置されているとすれば、このひびわれ面で伝達される最大せん断応力は鉄筋が降伏するときにひびわれ面に与える圧縮応力で決まる。さらに、ひびわれ面に外的圧縮あるいは引張応力が作用するとき、鉄筋と同時にひびわれ面に圧縮を加え、摩擦機構と同じように、ひびわれ面のせん断耐力に影響を及ぼす。

ひびわれた鉄筋コンクリートのせん断応力伝達特性については、プレーンコンクリートに適する応力伝達モデルを鉄筋とコンクリートの間に成り立つ付着応力-すべり-ひずみ関係と組みあわせて、しかもひびわれ面の近くにあるコンクリートの鉄筋のねじれによる局部的付着の低下を考慮に入れば、ひびわれた鉄筋コンクリートのせん断伝達特性を定量的に予測することができる。これは異なった鉄筋径、鉄筋比、コンクリート強度をもつ供試体にも適用することが実験から検証された。一方、本研究は限られた供試体によるものであるため、モデルの検証をするには、さらに系統的な実験を行うことが必要と考えられる。また、ひびわれ面近傍の付着の低下に関する仮定についても、さらに詳しく検討したいと考えている。

参考文献

- 1). 李宝禄、前川宏一： ” 接触密度関数に基づくコンクリートひびわれ面応力伝達構成式 ”、日本コンクリート工学、Vol.26、No.1、1988-1
- 2). Walraven, J.C. and Reinhardt, H.W.: ” Theory and Experiments on The Mechanical Behavior of Crack in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading, ” HERON, Vol.26, No.1A, 1981
- 3). Mattock, A.H. and Howkins, N.M.: ” Shear Transfer in Reinforced Concrete Recent Research, ” PCI Journal, Mar.-Apr. 1972
- 4). 島弘、周礼良、岡村甫： ” マッシュなコンクリートに埋め込まれた異径鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係 ”、土木学会論文集 No.378/V-6, 1987-2
- 5). Bazant, Z.P. and Gambarova, P., ” Rough Crack in Reinforced Concrete, ” Journal of ASCE ST4, Apr. 1980
- 6). Paulay, T. and Lober, P.J., ” Shear Transfer by Aggregate Interlock, ” Shear in Reinforced Concrete, ACI, SP-42, Vol.1, 1974