

V—29 鉄筋のダウエル作用による破壊機構について

北海道大学 正員 古内 仁
 北海道大学 正員 角田与史雄
 北海道大学 正員 能町 純雄

1. まえがき

鉄筋は細い棒状体であるため、鉄筋コンクリート部材としての曲げ剛性に比べて鉄筋自身の曲げ剛性は著しく小さく、従って部材の設計においては鉄筋は専らその軸方向の引張力または圧縮力のみを受けけるものとして取扱われている。しかし部材の引張部のコンクリートにひびわれが生じた後、そのひびわれをはさむ両縁のコンクリートが鉄筋の軸方向と一致しない方向の相対的変位を起こそうとすれば、その鉄筋には軸方向力のみでなく、せん断力も作用する。そのような働きは鉄筋のダウエル作用（ほぞ作用またはだぼ作用）と呼ばれ、部材の耐荷機構にとって複雑な影響を与えるとともに、部材の耐力に対してもある程度の寄与をすることが知られている。

鉄筋のダウエル作用が起これば、図- 1 に示すように伝達せん断力すなわちダウエル力Dの反力がひびわれ近傍のコンクリートに鉄筋との間の支圧力として作用するので、ダウエル破壊は一般に支圧力を受けたコンクリートの破壊によって生ずる。その際、図- 2 に示すようにダウエル力Dがかぶりコンクリートを直接外側へ押し出す方向に作用するとき、かぶりコンクリートの剝落によってダウエル破壊が生ずる。それに対して図- 3 に示すように、ダウエル力Dが部材表面に沿って作用するときには鉄筋による一種のくさび作用によってかぶりコンクリートが側方へはじき出される形態でダウエル破壊が生ずる。本研究は、上記の二種類のダウエル作用について破壊強度を実験的に研究したものである。

この問題については、古くに Jones²⁾ が図- 4 に示すようなモデル化を行なっている。それは斜ひびわれの生じたはりの引張鉄筋のダウエル作用を対象とするもので、ウェブコンクリートを鉛直方向のばねに見立て、かぶりコンクリートと引張鉄筋とからなる仮想上の合成ばねがそのばねによって吊られているとするもので、弾性床さばりのたわみに対する微分方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Ky = 0 \quad (1)$$

を解いて得られるばねの引張力 $q = Ky$ がコンクリートの引張強度 f_{ct} から定まる限界値に達したときにダウエル破壊が起こるとしている。

しかし、その後 Jones の理論では十分でないとして Krefeld³⁾ら、Baumann³⁾ら、Jimenez⁴⁾らなどがそれぞれ独自の実験式を提案している。

これらは、いずれも斜ひびわれの生じたはりの引張鉄筋のダウエル破壊強度という共通の問題を対象としていながら、主要影響因子についてさえ相互に異なったものとなっている。その原因は恐らく従来の実験において調べられた因子の範囲が不十分であることによると思われる。

そこで、各種の因子の値をできるだけ広い範囲で実験を行ない、前述の Jones の理論を基礎としてモデルの各要素の内容について大幅な修正を行なうことを試みた。

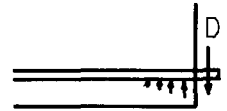


図- 1 鉄筋のダウエル力による支圧力

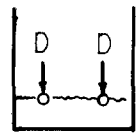


図- 2 かぶり剝落型破壊



図- 3 くさび型破壊

2. 実験方法

本研究において行なった実験は、次の四種類からなる。

(A) 対称複鉄筋長方形断面のはりの中央位置に全断面を貫通するひびわれを人工的に設けた供試体に逆対称荷重を載荷する (図- 5 参照)。(B) コンクリート角柱の両端附近に各1本の鉄筋を横方向に入れ、その突出部の付け根に直接ダウエル力を載荷する (図- 6 参照)。(C) はりの中央部分の引張部のコンクリートをくり抜いた形の供試体を用い、引張鉄筋の両端の突き出た部分の付け根と中央くり抜き部分の付け根とに、逆向きのダウエル力を直接載荷する (図- 7 参照)。(D) コンクリート角柱の中央部に1本または2本の鉄筋を横方向に入れ、その突出部の付け根に直接ダウエル力を載荷する (図- 8 参照)。

なお、実験A、B、Cはかぶり剝落型のダウエル作用を対象としたもので実験Dは、くさび型破壊を対象としたものである。

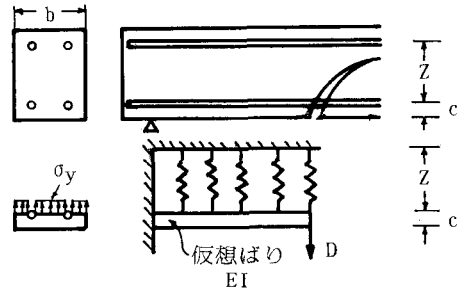


図- 4 Jones のモデル

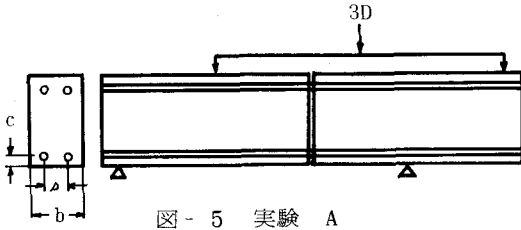


図- 5 実験 A

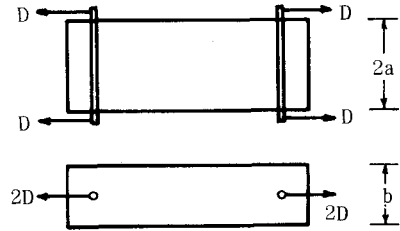


図- 6 実験 B

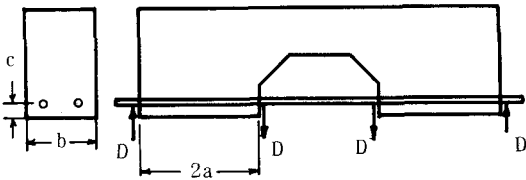


図- 7 実験 C

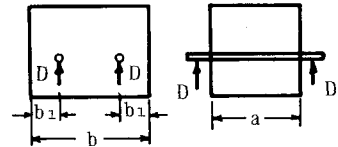


図- 8 実験 D

3. 実験結果

(1) 破壊様式

実験A、B、Cにおいては、鉄筋が曲げ降状したものを除いていずれもかぶり剝落型の破壊が生じた。破壊パターンは、さきの報告⁵⁾に述べてあるように次の3種類が観測された (図- 9 参照)。 b_1 を鉄筋1本当たりの断面幅、 c をかぶり厚とすると、(イ)ひびわれが断面幅全体を貫通する形でかぶりコンクリートの剝落が起こったもので、 b_1/c が2以下の供試体に多く見られた。(ロ)水平ひびわれが生じた後、かぶりコンクリートが一種の曲げ破壊を伴うような形態でかぶり全体の剝落が起こるもので、 $b_1/c = 4 \sim 6$ の場合に多く見られた。(ハ)水平ひびわれが断面全体を貫くことなく、かぶりコンクリートが局部的に剝落するもので b_1/c が8以上の供試体の一部に見られた。

また、 $b_1/c > 8$ の供試体の多くは(ロ)と(ハ)の複合型で破壊が起こった。

実験Dにおいて次の3種類の破壊パターンがみられた(図-10参照)。

(ニ) ひびわれが上方に進み供試体上面まで達する場合で、比較的鉄筋埋込み長 a の小さいものである。

(ホ) 破壊が鉄筋の近傍のみに止まり、ひび割れがかぶり側にそれてしまう場合で、比較的 a が大きいものである。(ハ) ひび割れが上部方向に進まないうちに鉄筋間に亀裂が生じて鉄筋の位置を境にして上下に供試体が分割してしまう場合で、(ニ)、(ホ)の2つとは別に断面幅 b すなわち2本の鉄筋間隔が狭いときに生ずる。

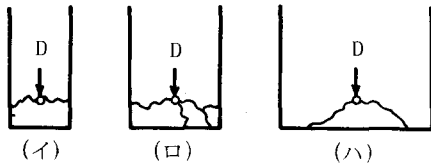


図-9 実験Bの破壊状況

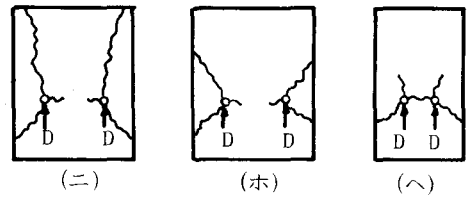


図-10 実験Dの破壊状況

②ひずみ分布

上述のようにかぶり剥落型破壊のパターンは、 b_1/c 比によって異なった。その状況をさらに調べるため、 b_1/c 比の大きな供試体についてコンクリートのひずみ分布の測定を行なった。図-11は、その一例を示したもので、引張ひずみは鉄筋附近に集中して生じており、鉄筋からある程度以上離れた位置では、ほとんど引張応力が作用していないことがわかる。また、コンクリートの引張ひずみ能力は、一般に 200×10^6 前後であることを考慮すれば、 b_1/c の大きな供試体ではかなり早期に鉄筋近傍のコンクリートにひび割れが生じ、それに伴ってダウエル力に抵抗するコンクリートの位置が徐々に外側に移動していく状況が読みとれる。しかし、その場合であってもひずみ勾配は急であり、 b_1 が大きくなってもダウエル抵抗に直接寄与する有効断面は、それ程大きくならないことが示されている。

図-12は、鉄筋の埋め込み長方向の支圧分布について考慮する際の参考資料とするため、側面かぶりの小さな供試体についてコンクリート表面の鉛直方向ひずみの分布を測定したものである。この図にみられるように、ダウエル力の载荷端附近では大きな引張ひずみが生じているが、内部では必ずしも引張ひずみが生ずるとは限らず、ひずみ分布は波打った形となっている。このような性状は一般に弾性床さばりにモデル化することが可能である。

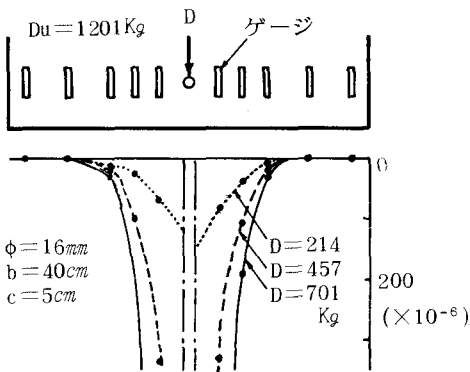


図-11 ひずみ分布の測定結果(断面)

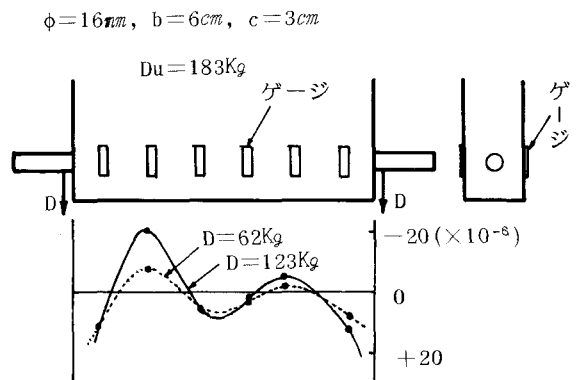


図-12 ひずみ分布の測定結果(側面)

(3)ダウエル変位

図-13は、実験Bの供試体において鉄筋のダウエル変位を測定した例を示したものである。前述のように b_1/c の大きな供試体では、かなり早期にひび割れが発生し、ゲージにより測定される鉄筋近傍のコンクリートのひずみは著しく大きくなるが、この図にみられるようにダウエル変位に対するひび割れの影響はそれ程目立ったものではなくダウエル力-ダウエル変位曲線は、かなり大きな範囲で直線に近似し得ることが認められる。Baumannらの実験においても、ひび割れ発生荷重の近くまではほぼ直線に近い結果を得ており、本実験もそれを裏付けるものとなっている。

(4)ダウエル破壊荷重

かぶり剥落型破壊を対象とした実験A~Cについては、ダウエル破壊に対する各種の因子の影響に関する性状は類似

したものとなったので、以下では因子の範囲を最も広く変

化させた実験Bの結果をもとに述べる。また、くさび型破壊を対象にしたものは実験Dをもとに述べる。

a) 断面幅の影響 Jones理論およびKrefeldらなどの実験では、断面純幅がダウエル破壊強度に比例的影響をもつとされている。本実験の結果によれば、図-14にその一例を示すようにダウエル破壊

強度は確かに断面幅の増加とともに大きくなっているが、純幅に比例するような強い影響は示されて

いない。前述のひずみ分布の測定結果から明らかな

ように b_1/c が大きくなってもダウエル破壊抵抗に寄与する有効断面幅がそれ程大きくないことに起因している。

b) かぶり厚の影響 Jones理論では、かぶり厚がダウエル強度に対してかなりの強さをもって影響することを意味しているが、Baumannらの実験では、かぶり厚が影響をもたないとされており、両者は対

称的な結果を示している。本実験によれば、図-15にその一例を示すように b_1/c を一定とし、かぶり厚Cがダウエル破壊に対して比例関係以上の強い影響をもつことが示されている。

c) 鉄筋埋め込み長の影響 図-16にその一例を示すように、断面幅bが比較的小さいのに対して、b

が大きい場合にはかなりの範囲まで埋め込み長の影響が強く現れることを示している。このことは、鉄筋のダウエル破壊強度に対するコンクリートの有効抵抗面積が断面幅と埋め込み長とで相乗効果のある

ことを意味するものである。

d) 鉄筋径の影響 かぶり剥落型の実験の結果によれば、図-17にその一例を示すようにダウエル破壊強度に対する鉄筋径の影響は微小となっている。しかし、実際には断面幅および鉄筋埋め込み長の影響と密接に関係している。それに対して、図-18にあるようにくさび型破壊の実験の結果においては、鉄筋径とダウエル破壊強度はほぼ比例関係にあるとみとめられる。

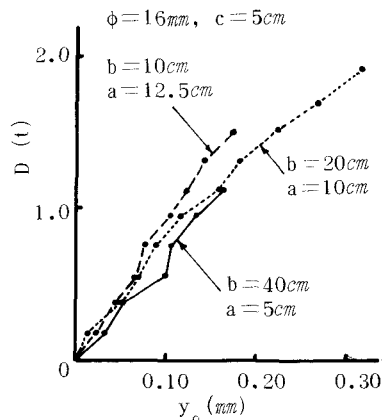


図-13 ダウエル変位

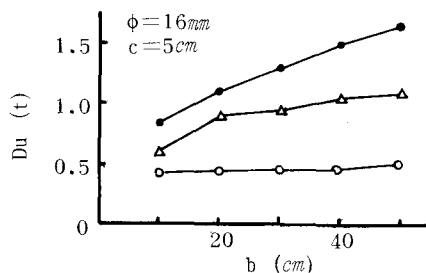


図-14 断面幅の影響

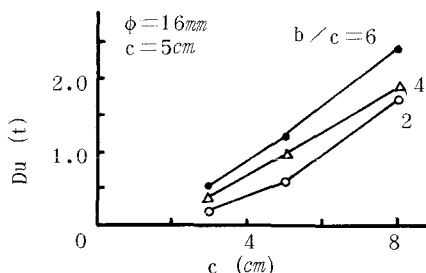


図-15 かぶり厚の影響

e) コンクリート強度の影響 本実験の結果によれば、図-17にその一例を示すようにダウエル破壊強度はコンクリートの強度の増加とともにいく分増加する傾向が示されている。

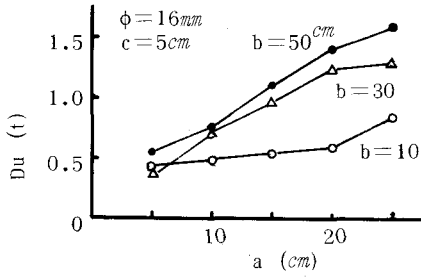


図-16 鉄筋埋め込み長の影響

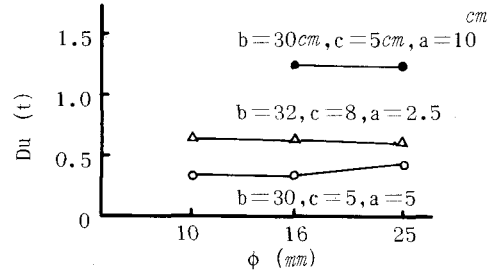


図-17 鉄筋径の影響 (かぶり剥落型)

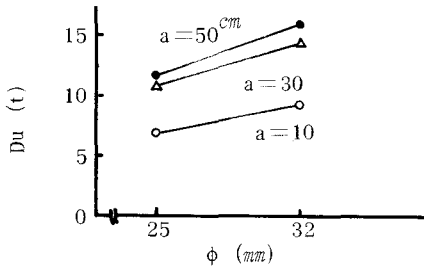


図-18 鉄筋径の影響 (くさび型)

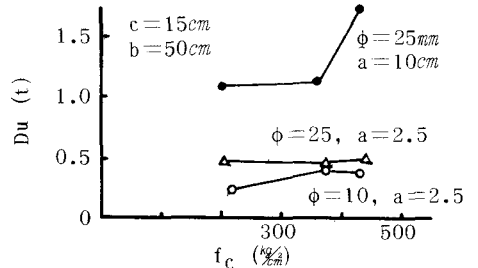


図-19 コンクリート強度の影響

4. ダウエル破壊強度の推定モデル

破壊荷重 Du について、それぞれに影響する因子を取り入れて回帰解析を行った。

(1) かぶり方向にダウエル力が作用する場合 (かぶり剥落型) の破壊強度

実験BおよびCのダウエル作用を弾性床さばりにモデル化すれば、それぞれ図-20 (イ)および (ロ)に示すように表わすことができる。ダウエル破壊強度 Du の式は次のようになる。

$$(イ) \quad Du = \frac{q_0}{2u} \frac{\text{Sinh } 2ua + \sin 2ua}{\text{Cosh } 2ua + \cos 2ua} = \frac{q_0}{2u} F \quad (2)$$

$$(ロ) \quad Du = \frac{q_0}{2u} \frac{\text{Sinh } 2ua - \sin 2ua}{\text{Cosh } 2ua - \cos 2ua} = \frac{q_0}{2u} G \quad (3)$$

また実験Aのように a が大きい場合には

$$Du = \frac{q_0}{2u} \quad (4)$$

$$\text{ここに } u = (K/2EI)^{1/4} \quad (5)$$

$$K = 0.074\phi^{0.629} \cdot Ec \quad (6)$$

$$EI = Ec \pi \phi^4 (15+n)/64 \quad (7)$$

$$n = Es/Ec$$

$$q_0 = \alpha b_n f_{ct} \quad (8)$$

$$\alpha = 0.64 \left(1 + \frac{a}{4\phi}\right) \frac{1 + 0.04(a/\phi)(b_{1n}/c)}{1 + 0.4(b_{1n}/c) + 0.07(b_{1n}/c)^2} \quad (9)$$

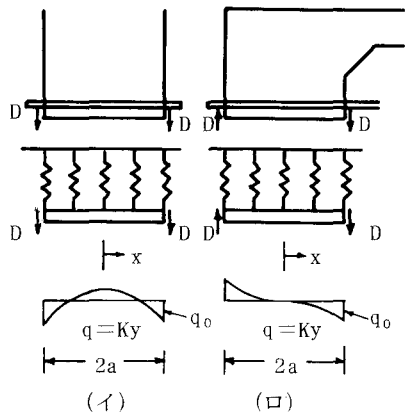


図-20 弾性床さばりモデル

ここに、 a ：鉄筋埋め込み長、 ϕ ：鉄筋径、 f_{ct} ：コンクリート引張強度、 c ：かぶり厚、 b_n ：断面純幅、 b_{1n} ：鉄筋1本当りの断面純幅

ただし、 $a \geq 3.2c$ の場合には上式中の a の値として、 $a = 3.2c$ を代入するものとする。なお、曲げ剛性

EIは鉄筋の囲りの直径 2ϕ の円形部分が関係していると仮定した(図-21参照)。

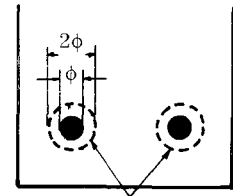
(2)かぶり厚と直角方向にダウエル力が作用する場合(くさび型)の破壊強度

いくぶんデータ不足であるが実験Dのデータを用いて回帰解析を行った。前述のようにダウエル破壊強度 Du は、かぶり厚、鉄筋径、鉄筋埋め込み長、コンクリート強度の増加とともに大きくなる傾向が示された。その実験式は次に示すとおりである。

$$Du = 69.64b_1\phi(1 - e^{-0.3/\phi})f'_c F \quad \text{単位: Kg} \quad (10)$$

ただし $F = 0.45f/b_1$

ここに b_1 : かぶり厚, f : 鉄筋間隔, f'_c : コンクリート圧縮強度



仮想ばりの断面

図-21 仮想ばりの断面

5. まとめ

本研究により得られた主な結果をまとめれば、次の通りである。

- 1) 鉄筋のダウエル作用によるかぶり剥落型破壊のパターンは b_1n/c の値によって異なり、 b_1n/c が2以下では水平ひびわれによるかぶり全体の剥落、 b_1n/c が4~6程度では水平ひびわれと垂直ひびわれとによるかぶり全体の剥落、 b_1n/c が8以上ではかぶりの局部的剥落が起こる。また、くさび型破壊のパターンは鉄筋埋め込み長 a および鉄筋間隔 f によって異なり、 a の小さいものはひびわれが上面まで達し、小さいものは側面にひびわれがそれた。鉄筋間隔の狭いものは、鉄筋を境に割れた。
- 2) 鉄筋近傍のコンクリートには大きな引張力が生じ、 b_1n/c の大きな供試体では最終的な破壊強度に比べてかなり早期から局部的なひび割れが発生する。しかし、鉄筋位置から離れるにつれてコンクリートの引張応力は急激に低下する。
- 3) かぶり剥落型のダウエル強度は、断面純幅、かぶり厚および鉄筋の埋め込み長の増加とともに大きくなるが鉄筋径およびコンクリート強度の影響は比較的小さい。それに対して、くさび型破壊のダウエル強度は断面幅、鉄筋の埋め込み長および鉄筋径が比較的大きな影響を与える。
- 4) かぶり剥落型破壊のダウエル破壊強度は、(7)式で与えられる仮想ばりが(6)式のばねによって吊るされた弾性床土ばりモデルのばねが(8)および(9)式に与えられた限界値に達した時のダウエル力として推定できる。くさび型破壊のダウエル強度は、鉄筋とコンクリートとの界面に支圧力が生じ、支圧部コンクリートに割裂ひび割れを起こさせて破壊に至るもので、各種の因子を用いて最小自乗法により(10)式を得た。

(参考文献)

- 1) Jones, R., Magazine of Concrete Research, Aug. 1956
- 2) Krefeld, W. J., Thurston, C. W., Journal of American Concrete Institute, Mar. 1966
- 3) Baumann, T., Rusch, H., Deutscher Ausschuss für Stahlbeton H. 210, 1970
- 4) Jimenez, R., White, R. N., Gergely, P., Journal of A. C. I., Jan. 1979
- 5) 能町、角田、塚: 鉄筋のダウエル作用による破壊強度について、セ技年報 XXXII, 昭53.