

[2113] 横方向鉄筋を有する軸方向鉄筋のダウエル作用における变形性状について

正会員○ 古内 仁（北海道大学工学部）

正会員 角田 与史雄（北海道大学工学部）

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の耐荷挙動の解析的研究においては、コンクリートおよび鉄筋の非線形性はもとより、鉄筋とコンクリートの共同作用や界面挙動のモデル化も重要な問題である。鉄筋のダウエル作用（ダボ作用）はその問題の一つであり、様々な構造物の局部的現象として発生し、その構造物の挙動を極めて複雑にしている要因となっている。本研究では鉄筋のダウエル作用の力学的モデル¹⁾²⁾を用いて、軸方向鉄筋のダウエル作用に対する横方向鉄筋（スターラップ）の影響による变形性状を調べて検討を行なった。

2. 実験概要

本研究における実験では、図-1に示すように Krefeld³⁾ らに準じたはり供試体を用いた。この供試体は、はりの中央部に斜ひびわれを想定した人工ひびわれを作製し、鉄筋を横切る位置から支点までを試験区間とした。変数は、表-1に示すように軸方向鉄筋の鉄筋径とスターラップの鉄筋径および人工ひびわれ面からの距離とした。人工ひびわれは、骨材の摩擦を取り除くため、1mm厚のプラスチック板2枚の間にグリースを塗布して形成した。載荷方法は、図-2に示すように、人工ひびわれが鉄筋を横切る部分でダウエル力Dが作用するように、人工ひびわれ上端に載荷を行った。同時に軸方向鉄筋に適度な引張力を与えるために、はりの上面中央部にも載荷を行った。ただし、本研究で扱うDは鉄筋1本あたりのダウエル力と定義する。加圧は、分岐型油圧ジャッキを使用し、各々のジャッキに同等の圧力が加わるようにした。実験に際して、ダウエル作用による軸方向鉄筋の変形を調べるために、試験区間の数カ所において鉄筋の上、下面のひずみを測定した。また、人工ひびわれ面の鉛直方向のずれ変位も同時に測定した。

使用した鉄筋は、横フジ型異形棒鋼SD35である。コンクリートは、早強ポルトランドセメントおよび天然骨材を用い、水セメント比は54%、目標強度は300kgf/cm²である。供試体は、打設後1日で脱型し湿布

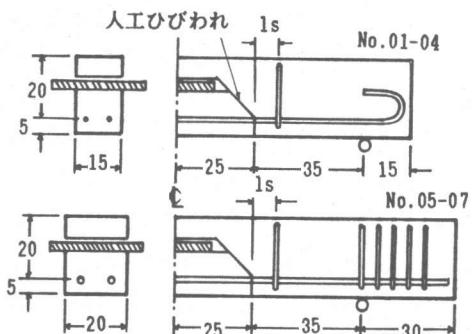


図-1 供試体

表-1 供試体寸法

No.	軸方向 鉄筋径 (mm)	スター ^{ラップ} 鉄筋径 (mm)	スター ^{ラップ} 位置 (cm)
01	16	6	3
02	16	6	7
03	16	10	7
04	16	13	7
05	22	10	3
06	22	10	7
07	22	6	3

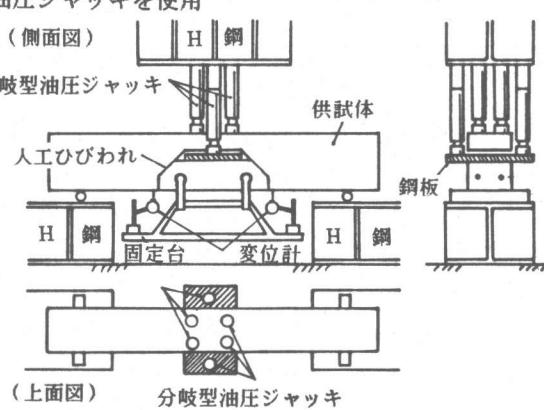


図-2 載荷装置

養生を行い、材令7日で実験を実施した。

3. ダウエル作用のモデル化

本研究では、ダウエル作用の変形に対して、鉄筋を弾塑性バネに支持されたはりにモデル化を行なっている。スターラップの無い軸方向鉄筋のダウエル作用の力学モデルは、既に発表されているが、今回はその力学モデルを簡素化しスターラップの影響を取り入れることを試みた。簡素化されたモデルは、図-3に示すようにひびわれ発生の影響による鉄筋の変形を考慮し、非線形区間を設けている。ひびわれの発生していない領域については弾性域とみなし、定数K(kgf/cm^2)の弾性バネに支持されていると考える。このとき、ダウエル作用に抵抗する有効断面は、図-4に示すように鉄筋とその周囲のコンクリートの円形断面（直径 $\lambda\phi$ ）と仮定し、曲げ剛性を EI_1 とする。また、非線形区間におけるバネは塑性バネとなり、抵抗断面は鉄筋だけのもとの仮定し、曲げ剛性を EI_2 とする。ここで、仮定上のひびわれ発生変位を $y_c(\text{cm})$ と定義し、両区間の境界を表わす変位量とする。それぞれの区間における微分方程式は、(1)式、(2)式を用いる。

$$(\text{弾性}) \quad EI_1 \frac{d^4y}{dx^4} + Ky = 0 \quad (1) \quad \text{ここに} \quad EI_1 = Ec \frac{\pi \phi^4}{64} (\lambda^4 + n - 1)$$

$$(\text{非線形}) \quad EI_2 \frac{d^4y}{dx^4} + q_c = 0 \quad (2) \quad \text{ここに} \quad EI_2 = Es \frac{\pi \phi^4}{64}$$

ここに、 ϕ :鉄筋径 Es :鉄筋のヤング係数 Ec :コンクリートのヤング係数 $n=Es/Ec$ $q_c=K \cdot y$
モデルの係数および変位の特性値に関しては、各々の次の関係式を得ている。ただし、 $\lambda=1.61$ とする。

$$K = 10000 (2.1\phi^2 + 2.7) \quad (3)$$

$$y_c = 0.0000575 \cdot \phi^{0.28} (c/\phi)^{0.66} (b_1/\phi) \quad (4)$$

ここに、 ϕ :鉄筋径 (cm) c :かぶり厚 (cm) b_1 :鉄筋1本あたりの断面幅 (cm)

この力学モデルに対してスターラップの影響を取り入れるため、次のような仮定を行なった。図-3に示すように、スターラップの位置においてモデル中に一本のバネを仮定する。計算の便宜上このバネの定数を $K_s(\text{kgf}/\text{cm})$ と置くことにした。ただし、スターラップの鉛直方向への変形は、コンクリートからの鉄筋の引抜き性状と類似しているため非線形性を持つと考えられ、 K_s は定数とならないことが考えられる。以下、実験結果を用いて、スターラップのダウエル作用に対する特性を考察する。

4. 実験結果および考察

ダウエル作用の変形に対するスターラップの拘束効果を調べるために、図-5に人工ひびわれ位置の鉛直変位とダウエル力の関係を示した。点線は、参考として過去の研究²⁾で得られたスターラップの無い供試体の変位を示し、実線はスターラップのある供試体の変位を示したものである。

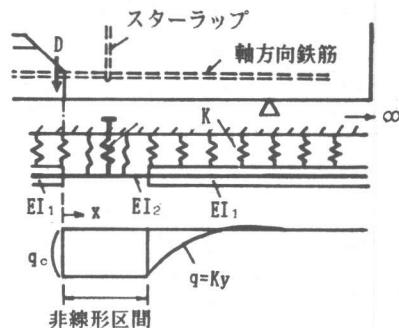


図-3 ダウエル作用の非線形モデル概要図

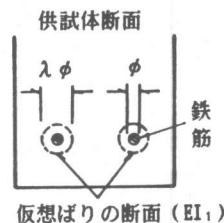


図-4 モデルの仮想ばかり

ダウエル力の小さな段階では、ほぼ同じ程度の変位量に対し、ある荷重段階からは、変位の差が生ずる。また、鉄筋に沿って発達するダウエルひびわれもスターラップ位置に達した後、その進展は遅くなることが実験上確認することができた。これらのことから、ダウエルひびわれの成長がスターラップ位置に達した後、スターラップによる軸方向鉄筋の拘束効果が生ずるものと推測される。

また本研究におけるスターラップを有するすべての供試体は、典型的なダウエル破壊であるかぶり剥落型破壊ではなく、コンクリート圧縮部の圧壊によって破壊に至った。これは、ダウエルひびわれがスターラップ位置を通過した後、ダウエル力に対する抵抗の大半をスターラップが受け持ち、スターラップの無いはりのダウエル破壊耐力をはるかに上回るためと考えられる。

次に前述のモデルを用いてスターラップの影響を検討した。モデルにおける定数 λ 、 K や変位特性値 y_0 は、はりの断面形状によって定まるが、ここでスターラップを仮想したバネの定数 K_s は未知量となっている。そこで、島ら⁴⁾の研究によるコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係を引用し、 K_s の値を算出することにした。ここに、その関係を示すと次の式のようである。

$$\tau / f_{c'} = 0.73 \{ \ln(1 + 5s) \}^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (5)$$

ここに、 $s = 1000S/D$ τ :付着応力 $f_{c'}$:コンクリート強度 S :すべり量 D :鉄筋径 ε :ひずみ

上記の式によって、本研究で用いられた D6、D10、D13 のスターラップについてのすべり-引張荷重の関係を導くと、図-6 に示すような曲線形を得た。この関係を本研究の、力学モデルにおけるスターラップに適用すれば、 K_s は定数とならず、引張力の増加に伴って減少する変数となる。図-7 は、このモデルにより計算した軸方向鉄筋の曲率分布を実測値と比較した一例を示したもので点線が計算値、○印が実測値である。なお、実測値は鉄筋の上面と下面のひずみの測定値の差を鉄筋径で除したものである。また、実線は参考としてスターラップを考慮しない、すなわち $K_s = 0$ のときの計算値を示している。 $K_s = 0$ としたときの計算値は、曲率の波形が支点方向に大きく移行しているが、 K_s の値を与えたときは変形を拘束するため、波形のふくらみも小さく、それ程支点寄りにはならない。ただし、ここで与えた K_s の値は曲率の実測値に比べると過大であると考えられるため、(5)式から得られた引張荷重-すべりの関係から求めた K_s の値をいくらか減少させて再度曲率を算出した。図-8 は、実測された曲率分布に一致するように K_s を減少させたときの計算結果を示している。このとき、軸方向鉄筋が D16 の供試体においては K_s を $1/10$ の値とし、D22 の供試体において

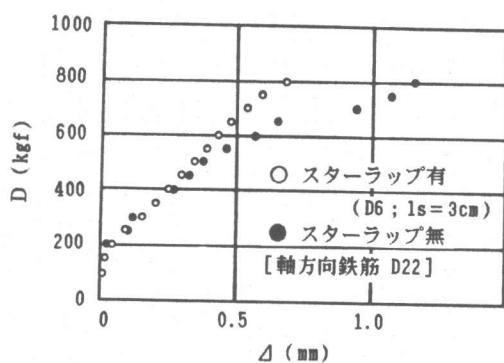


図-5 人工ひびわれ面鉛直変位（ダウエル変位）

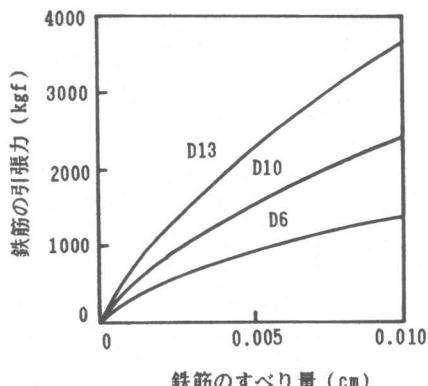


図-6 コンクリートに埋め込まれた鉄筋の引張力-すべり関係

は1/20の値を用いれば曲率分布の実測値に良く一致させることができた。その理由として、軸方向鉄筋の変形によってスターラップが力を受けけるため、スターラップの抜け出しのほかにスターラップ自身の曲げ変形があること、またスターラップの隅角部と軸方向鉄筋の密着性が悪かったことによると思われる。もしも、密着性が悪ければ、隙間のコンクリートが支圧面で圧潰されることが予想される。これらのため、鉄筋に直接引張力を受けて引抜かれるときに比べると、軸方向鉄筋に対する変形の拘束がかなり緩和されていると考えられる。このように、スターラップの剛性のとり方はなお問題があるが、スターラップを非線形バネとモデル化することにより、ダウエル作用時のスターラップの負担する力や軸方向鉄筋の変形を表わすことができると思われる。

さらに、上記のトライアル計算によって得られた人工ひびわれ面での鉛直方向のずれ変位を図-9に示す。実測値を○印、計算値を実線で示している。また、スターラップを考慮していないモデルの計算値を点線で示している。計算値を実測値と一致させることはできなかったが、スターラップを考慮しないときの計算値に比べると比較的近似することができたと思われる。

5.まとめ

- (1) 軸方向鉄筋のダウエル作用に対するスターラップの影響は、力学モデルにおいて、スターラップを非線形バネとして考慮することによってほぼとらえることができる。
- (2) ダウエル作用におけるスターラップの変形挙動は、コンクリートに埋め込まれた鉄筋の引抜き状における非線形バネと仮定した場合と比較したが、実際の剛性はスターラップの曲げ変形などのため、これよりかなり低いことがわかった。

謝辞：本研究は、北海道大学工学部の木村 勉技官、学生（当時）葛野尚文氏、徳永 篤氏の多大な助力を得た。ここにあわせて深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 古内 仁、角田与史雄：鉄筋のダウエル作用における非線形挙動について、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、PP.773-776
- 2) 古内 仁、角田与史雄：鉄筋のダウエル作用の力学モデルに対する研究、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第5部、1987、PP142-143
- 3) Krefeld,W.J., Thurston,C.W., Journal of the American Concrete Institute, Mar.1966
- 4) 島 弘、周 礼良、岡村 甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係、土木学会論文集第378号/V-6、1987、PP.165-174

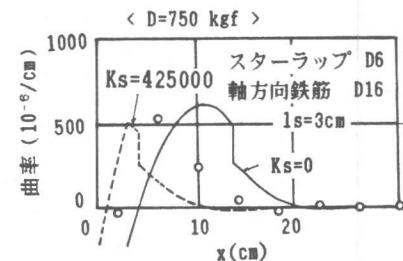


図-7 軸方向鉄筋の曲率分布

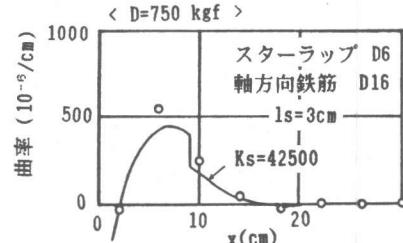


図-8 軸方向鉄筋の曲率分布

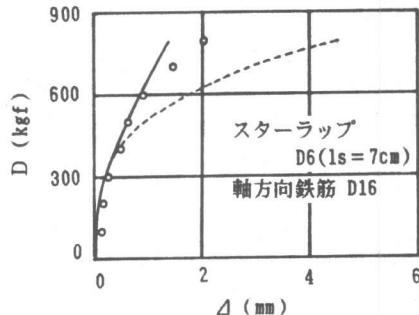


図-9 人工ひびわれ面鉛直変位