

V-3 鉄筋のダウエル作用による破壊強度と変形について

北海道大学 正員 古内 仁
 北海道大学 葛野 尚文
 北海道大学 正員 角田 与史雄

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造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。本研究は、鉄筋コンクリートはりにせん断ひびわれが発生したときに生ずる鉄筋のダウエル作用に着目し、斜めひびわれを人工的に設けた供試体を用いて、その変形状態を詳細に調べ検討を行った。同時に得られた実験結果をもとに非線形挙動に対する力学モデルをつくり、破壊のメカニズムを明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

本研究における実験では、Krefeld¹⁾ らに準じた供試体を用いた。この供試体は図-1に示すように、はりの中央部に斜めひびわれを想定した人工ひびわれを作製し、そ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。同時に鉄筋に適度な引張力を与えるためには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。載荷方法は図に示すように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載荷した。また、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。

供試体本数は表-1に示す17本で、変数としたパラメータは鉄筋径 ϕ 、鉄筋1本あたりの断面幅 b_1 および底面かぶり厚 c とし、支間は 120cm の一定とした。実験に際して、ダウエル作用による鉄筋の変形を調べるため、人工ひびわれが横切る部分から支点までを試験区間とし、鉄筋の上下面のひずみを測定した。また、人工ひびわれ面におけるすべり変位も同時に測定した。

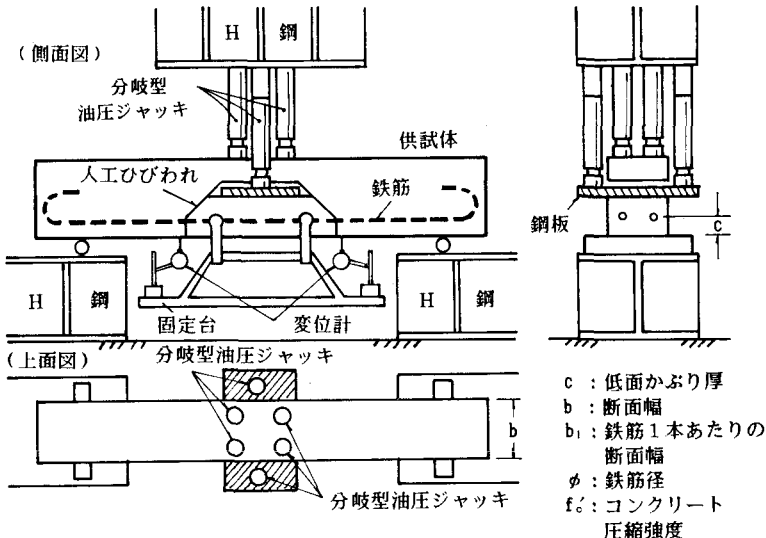


図-1 供試体および載荷装置

表-1 供試体寸法

No.	ϕ (mm)	b_1 (cm)	c (cm)	f'_c (kgf/cm ²)
01	16	7.5	5.0	319
02	16	5.0	8.0	285
03	16	5.0	5.0	298
04	16	5.0	3.0	314
05	16	10.0	8.0	308
06	16	10.0	5.0	320
07	16	10.0	3.0	360
08	10	10.0	5.0	288
09	10	7.5	8.0	322
10	10	7.5	5.0	315
11	10	7.5	3.0	320
12	10	5.0	5.0	341
13	22	5.0	5.0	296
14	22	7.5	5.0	330
15	22	7.5	8.0	329
16	22	7.5	3.0	322
17	22	10.0	5.0	334

使用した鉄筋は、横フシ型異形棒鋼 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51%、目標強度は $300\text{kg}/\text{cm}^2$ である。供試体は、打設後1日で脱型し湿布養生を行い、材令7日で実験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 ダウエル作用の非線形モデル

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はりにモデル化し、次の仮定を行った。鉄筋は、その近傍のコンクリートと一体となって働くため、図-2に示すように、モデル上の仮想の合成ばりは、鉄筋と直径 $\lambda\phi$ の円形範囲のコンクリート断面からなる剛性 EI_1 を有するものとする。この合成ばりは、バネ定数 K の仮想のバネによって支持されているものと仮定する。これらの仮定は、主に変形がある程度小さな範囲に限られるものである。ダウエル力が大きくなるとコンクリートには鉛直方向の引張応力が大きくなり、当然のことながら割裂ひびわれが生じる。このひびわれに伴うバネ定数および合成ばりの剛性の低下を表わすため、図-3に示すように、モデルには非線形の範囲を設けるものとする。非線形区間においては、仮想バネは塑性バネとなり、合成ばりの剛性は鉄筋のみのものとなる。ここで、仮定上のひびわれ発生変位すなわち弾性限界を表わす変位を y_c とする。また、破壊時における最大の変位量を破壊発生変位 y_u とする。上記の仮定を y_c 、 y_u を用いて、バネ力 q との関係および合成ばりの剛性との関係を定性的に表わすと各々図-4と5のようになる。

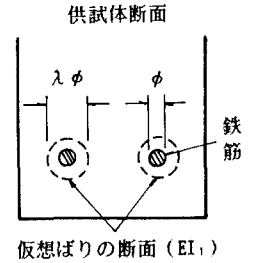


図-2 モデルの仮想ばり

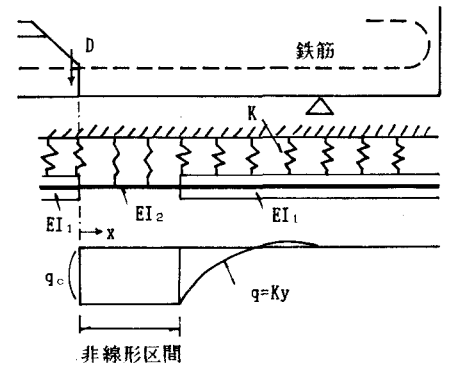


図-3 ダウエル作用の非線形モデル概要図

また上記のモデルにおける微分方程式は、次のとおりである。

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

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

ここに、 E_s : 鉄筋のヤング率 E_c : コンクリートのヤング率 $n = E_s / E_c$ $q_c = K \cdot y_c$

3.2 実験結果の検討

実験から得られた鉄筋のひずみをもとに、鉄筋の曲率分布を求めた。この曲率分布の形は、弾性支持バネを持つはりの変形に類似しており、前述のモデルによる適用がまちがいでないことを示している。ひびわれ発生前における曲率分布は弾性的な性質を示し、荷重の増加に対して曲率の増加も一定値に近いものとなっている。しかし、ダウエル力が破壊荷重

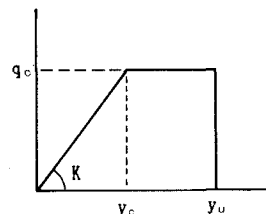


図-4 バネ力-変位

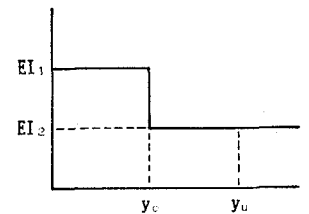


図-5 剛性-変位

に対しておおよそ 1/5～1/3 程度の大きさになると、ひびわれの発生により曲率分布は非線形的な性質があらわれ、荷重に対する曲率の増加が過大となり、波形も様相を変えるようになる。これらの性質を踏まえて、力学モデルの定量的な解析を行なった。

上記のモデルにおける定数や変位の特性値は、すべてこの曲率の実測値をもとに定められた。最初に、弾性域における定数Kおよびλの値を定める。これらの値は、ひびわれの生ずる前の荷重の小さな段階で得られた曲率分布を用いることにした。各供試体で算出されたλ、Kはともにややばらつきがみられたが、実測された曲率分布において小さな荷重段階では測定誤差が実測値のひずみの変化に対して大きいと、測定誤差の影響と考えられる。λは、このばらつきを考慮して変数とした因子による影響を検討したが、際だった傾向を見ることができなかった。そのため、λは平均値 1.61 を採用することにした。しかし、バネ定数Kについては、ばらつきを考慮にいれるとある程度の傾向は見られた。Kは、ほぼ鉄筋径のみに支配されている傾向を示しており、次の関係を見いだすことができた。ただし、φの単位は cm である。

$$K = 10000 (2.1\phi^{0.2} + 2.7) \quad \dots\dots (3)$$

上記で定められたλ、Kを用いて、ひびわれが生じている荷重段階での曲率分布より、ひびわれ発生変位 y_c を定めた。 y_c は各供試体固有のもので、非線形性を示す各曲率分布に一致するように試行錯誤によって決められた。また、破壊荷重における最大変位である人工ひびわれ位置での変位 y_u も同時に求めた。これらの各供試体の算定値は、表-2に示すとおりである。ただし、 D_u は、実験で得られた破壊荷重を示す。

さらに、得られた y_c 、 y_u については、変数φ、 b_1 、c を取り入れて回帰解析を行った。図-6は弾性限界変位 y_c についての解析結果、図-7は破壊発生変位 y_u についての解析結果である。図中の実線は回帰式をあらわし、○印は各々 y_c 、 y_u の値を示している。ただし、破壊時において鉄筋が降伏してしまった供試体 (No.05 および No.08～12) については y_u の回帰から除外した。回帰式は次に示すとおりである。

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

$$y_u = 0.000409 \cdot \{ (c/\phi) \cdot (b_1/\phi) \}^{1.78} \quad \dots\dots (5)$$

以上の結果から得られた定数および変位の特性値を用いてダウエル作用の変形の適合性について検討を行った。図-8は、解析結果から得られた値を用いて、鉄筋の曲率を計算した一例である。(a) はひびわれ発

表-2 変位特性値

No.	y_c (cm)	y_u (cm)	D_u (kgf)
01	0.00049	0.0797	800
02	0.00083	0.0569	1063
03	0.00046	0.0023	540
04	0.00050	0.0090	430
05	0.00110	0.0889	1475
06	0.00074	0.0556	975
07	0.00061	0.0407	775
08	0.00184	0.0147	525
09	0.00253	0.0102	583
10	0.00117	0.0555	573
11	0.00070	0.2992	643
12	0.00063	0.0454	350
13	—	—	1013
14	—	—	750
15	0.00042	0.0391	1150
16	0.00033	0.0060	550
17	0.00060	0.0144	1100

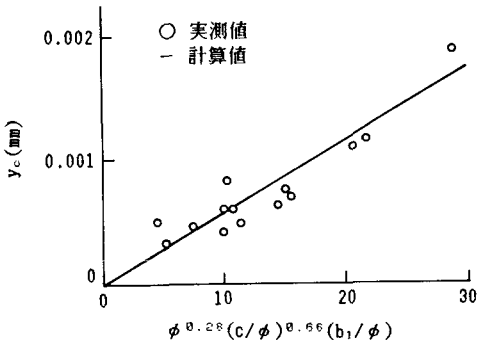


図-6 ひびわれ発生変位の回帰

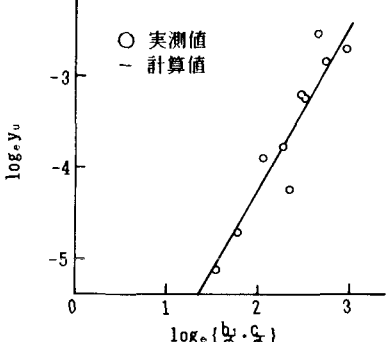


図-7 破壊発生変位の回帰

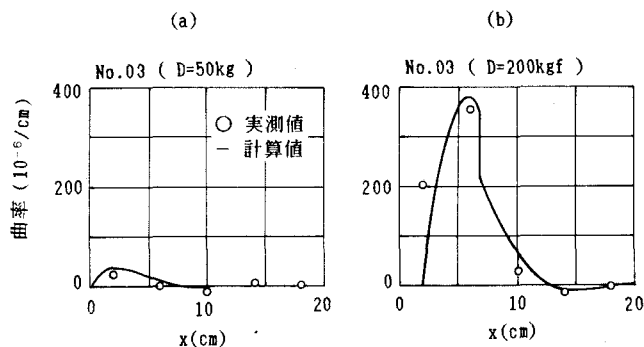


図-8 鉄筋の曲率

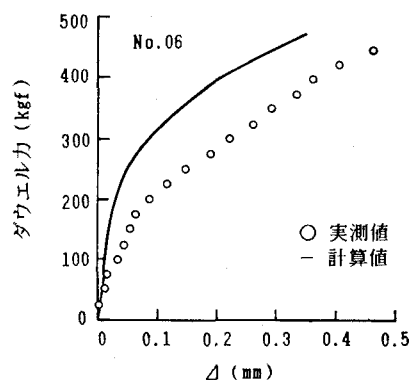


図-9 すべり変位 (ダウエル変位)

生前の変形で、試験区間全域に渡って弾性状態にある場合、(b) はひびわれ発生後の変形で、人工ひびわれ面から約7cm程非線形区間（仮想のひびわれ）があらわれた場合である。他の供試体においては若干精度の悪いものもあったが、全体的には適合性が良く、ほぼ破壊に至るまでの変形をとらえることができた。

また、図-9は実験で測定された人工ひびわれ面でのすべり変位とモデルによって計算されたものを比較したものである。この図からわかるように、実測値は計算値をかなり上回っているが、これは人工ひびわれに囲まれたコンクリートブロックの変形を考慮していないため、実験的に厳密なすべり変位量を得られていないことに起因していると思われる。

しかし、変位はほぼ同じ割合で増加し、曲線形が類似していることから、ダウエル作用の非線形的性質をとらえることができたと思われる。

さらに、力学モデルからダウエル破壊荷重を算定した。図-10は、実測されたダウエル破壊荷重との比較を示したものである。○印は回帰解析で用いられた供試体で、相関係数は0.917と良好な値を得た。図からわかるように、それ程大きくはずれたものがなく、比較的満足の得られる結果が示された。また、参考までに、過去に行なわれた実験で用いた供試体を●印で示したが、これについても良好な値を得ることができた。

今回の解析にあたっては、影響因子の範囲をそれ程大きくとっていないため、それらの上限値および下限値などは不明であるが、上記のモデルは鉄筋のダウエル作用に対して、変形および破壊性状をあらわすことが可能であると思われる。

謝辞：本研究は、北海道大学工学部の木村 勉技官、学生（当時）遠藤勝典氏、山下 修氏の多大な助力をえた。ここにあわせて深く謝意を表します。

参考文献 1) Krefeld, W.J., Thurston, C.W., Journal of American Concrete Institute, Mar. 1966

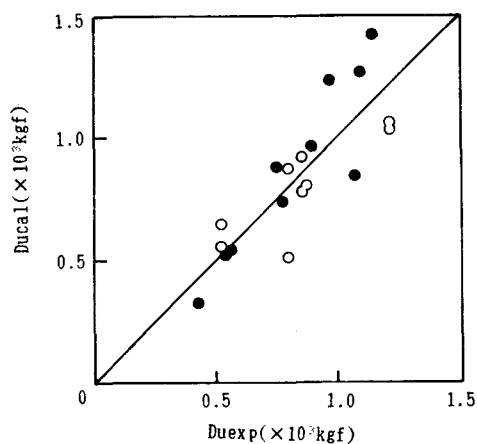


図-10 ダウエル破壊荷重