

# 軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす 引張力の影響に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF TENSION FORCE ON DOWEL EFFECT OF AXIAL BARS

鈴木基行\*・中村泰介\*\*・堀内 信\*\*\*・尾坂芳夫\*\*\*\*

By Motoyuki SUZUKI, Taisuke NAKAMURA, Makoto HORIUCHI and Yoshio OZAKA

The object of this paper is to investigate experimentally the influence of tension force and cover on the dowel effect of axial bars. Failure mode, dowel force-displacement relationship, dowel capacity and deformation of bars were investigated in detail under dowel load and tension force simultaneously. As a result, we found that dowel capacity increases as the thickness of cover increases, but its capacity decreases exponentially with increasing tension force. Furthermore, it is pointed out that the dowel effect of axial bar depends on the characteristics of concrete rather than those of bar. Finally, the possibilities of introducing the dowel effect into shear strength of RC members in design were discussed.

Keywords: dowel effect, axial bar, tension force, cover thickness

### 1. ま え が き

RC 部材に作用するせん断力は、「コンクリート圧縮部」、「骨材のかみ合わせ」、「鉄筋のダウエル作用」、および「スターラップ」などいくつもの機構により抵抗されていることが知られている<sup>1)</sup>。

現在、各国で用いられているせん断耐力式では、これら抵抗機構のうちコンクリートの圧縮部、およびスターラップによるせん断抵抗が考慮されており、ダウエル作用や骨材のかみ合わせ作用は取り入れられていない。これは、これまでのコンクリート構造の設計においては、部材が降伏することは許されていなかったため、軸方向鉄筋と交わるひびわれの幅もきわめて小さく抑えられ、このため鉄筋のダウエル作用や骨材のかみ合わせ作用はほとんど期待できず、これらをせん断耐力式に取り入れる必要がなかったためと思われる。しかし、現行コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>の「耐震に関する検討」においては、部材は地震時に必要な強度と変形性能とを満足しなければ

ならないと定められており、地震時には部材の降伏以降の性能も期待するようになってきた。これに伴い、軸方向鉄筋のダウエル作用は、他のせん断伝達機構と同様に、きわめて重要な役割を果たすものと思われる。CEB では、最新の Model Code<sup>3)</sup>のせん断耐力評価式において、初めてダウエル作用を直接的な形で取り入れようとしている。しかし、この評価式では、コンクリート強度、鉄筋径およびかぶり（厳密にはかぶりと鉄筋のあきとの和）のみが考慮されており、主として曲げの作用により鉄筋に生じる引張力の影響は考慮されていない。

地震時には、RC 柱や橋脚の軀体部とフーチング部との境界面にかなり大きな曲げひびわれが発生し、このひびわれ面と交差する軸方向主鉄筋には主として曲げの作用により鉄筋降伏点を越える引張ひずみが生じることが考えられる。したがって、鉄筋のダウエル挙動を調べるには、鉄筋に引張力を作用させた条件下で、その破壊機構、変形性能あるいは耐力等を検討する必要がある。

以上のような観点から、本研究は軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす因子のうち、特に引張力およびかぶりの影響を実験的に調べ、合理的なせん断設計方法を確立するための基礎資料を得ることを目的としたものである。

\* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

\*\* 正会員 工修 大成建設土木設計部陸上第一設計室  
(元：東北大学大学院生)

\*\*\* 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

\*\*\*\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

2. 既往の研究とその問題点

鉄筋のダウエル作用に関する研究は、Mattock<sup>4)</sup>をはじめ多くの研究者により行われてきた。既往の研究では、せん断面を横切る鉄筋に間接的にせん断力を加え、コンクリートの支圧破壊により終局が生じる場合の耐力を求めようとする実験的研究が主であった。しかし、実際のはりや柱あるいはこれらの接合部において、ダウエルせん断抵抗が作用し始める段階では軸方向鉄筋にかなりの引張力が作用しているため、最近になって鉄筋引張条件下でダウエル作用を検討するようになってきた。以下において、このような条件下で行われた研究のうち代表的なものを示し、それらの特徴および問題点を指摘する。

Dulacska<sup>5)</sup>は、図-1に示すように、鉄筋をせん断面に対して斜めに配筋し、せん断力を加えることにより、間接的に鉄筋に引張力を導入させて実験を行った。せん断面近傍において鉄筋に作用する力およびコンクリートの破壊領域を、図-2のように仮定し、コンクリートの圧壊により終局となる場合の耐力評価式として次式を導いている。

$$D_u = \rho d_b^2 \gamma \sigma_y n \cdot \sin \theta \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma_c}{3 \rho \gamma^2 \sigma_y n \sin^2 \theta}} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $D_u$ ：破壊荷重、 $d_b$ ：鉄筋の直径、 $\theta$ ：せん断面に垂直な面に対する鉄筋の角度、 $\gamma$ ：定数、 $\sigma_y$ ：鉄筋の降伏応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_c$ ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $n$ ：コンクリートの局部圧縮係数、 $\rho$ ： $1 - N^2/N_s^2$ 、 $N$ ：鉄筋に作用する引張力、 $N_s$ ：純引張状態で鉄筋に降伏を誘発させる引張力

実験結果より、Dulacskaは $\rho=1.0$ 、すなわち、軸力が作用していない場合には、 $\gamma=0.05$ および $n=4$ と仮

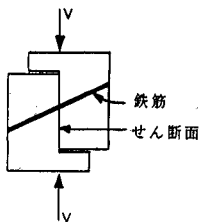


図-1 直接ダウエル試験

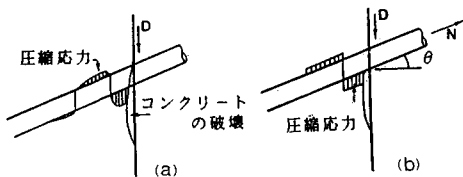


図-2 せん断面における鉄筋の状態 (a) とそのモデル化 (b)

定すればよいとしている。そして、引張力とダウエル力との相関関係を図-3に示す楕円により表わした。Dulacskaの実験では実際に鉄筋に作用していた引張力の大きさが明確にされず、軸力が作用していない場合のみを検討していることが問題点である。また軸力とダウエル力との関係を楕円で表現していることから、ダウエル耐力は鉄筋が降伏に近づくとき急激に減少すると考えていることが特徴である。

Gerglyら<sup>6)</sup>は、引張力によって生じる鉄筋周辺のくさび作用はダウエル耐力にほとんど影響を与えず、鉄筋が降伏するとダウエル耐力は減少すると結論付けている。また、彼らは引張力あるいはダウエル力がそれぞれ単独に作用している実験結果より、引張力とダウエル力との相関関係として次式を提案している。

$$T^2/T_0^2 + D^2/D_0^2 = 1 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $T$ ：鉄筋引張力、 $T_0$ ：割裂破壊を起こす鉄筋引張力、 $D$ ：鉄筋に作用するダウエル力、 $D_0$ ：割裂破壊を起こすダウエル力

しかし、引張力とダウエル力とを同時に作用させた実験結果が非常に少ないため、今後この種の実験を行う必要があることを指摘している。

一方、Tassiosら<sup>7)</sup>はダウエル破壊の形態は、かぶりの大小により、鉄筋の降伏あるいはコンクリートの圧壊により生じる場合と、割裂ひびわれの発生により生じる場合の2通りに分類できるとしている。さらに、ダウエル耐力をコンクリート引張強度、鉄筋径、かぶりと鉄筋のあきとの和、および鉄筋引張力を考慮する係数を因子として評価し、鉄筋が降伏強度の80%程度まで引張られてもダウエル耐力にはほとんど影響がない、と結論付けている。以上述べたDulacska、Gerglyら、およびTassiosらのいずれの研究においても、鉄筋が降伏状態になると、ダウエル耐力は0になると結論付けている点が多様な特徴であるが、この点について実験的裏付けがないのが問題である。

また、角田ら<sup>8)</sup>は図-4に示す分離したはり供試体を用いてダウエル挙動を検討した。その結果、ダウエル力を受ける鉄筋の変形性状は弾性床はりモデルを修正した力学モデルによりとらえられるとしている。さらに、

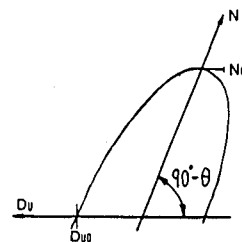


図-3 軸力とダウエル力との相関関係

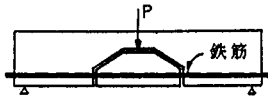


図-4 分離したはり試験

スタラップのある場合もこれを非線形ばねとして考慮すればよいとしている。しかし、このモデルにおけるばね定数など各種の係数および特性値の決定方法が不明確であり、回帰分析により求められた値にもばらつきが大きいこと、および分離したはり供試体に作用させる力の比率の問題等解決しなければならない点があると思われる。

以上のように、既往の研究においては、引張力とダウエル力とを同時に作用させてダウエル挙動を調べた実験は少なく、鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響が十分に解明されているとはいえない。本研究はこれら既往の研究成果を踏まえ、特にかぶりおよび鉄筋に作用する引張力がダウエル挙動に及ぼす影響を実験的に解明し、せん断耐力式にダウエル作用の影響を導入するための基礎資料を得ることを目的としたものである。

### 3. 実験計画

#### (1) 使用材料

実験に使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材は碎石、細骨材には川砂を用いた。なお、供試体載荷時のコンクリート圧縮強度の目標値は約 350 kgf/cm<sup>2</sup> である。

実験に用いた鉄筋は横フシ異形鉄筋で、D 16 (SD 35) を用いた。鉄筋の引張試験の結果を表-2に示す。

#### (2) 供試体諸元

表-3に供試体の変動要因の一覧表を示す。表中、 $d_b$  は鉄筋径 (16 mm)、 $f_y$  は鉄筋降伏荷重を意味する。変動要因は側面のかぶり厚と鉄筋にあらかじめ与える引張力である。図-5に示すように、供試体は3つのブロックからなり中央の部分を試験部分とした。またダウエル力を受ける鉄筋 (D 16) を2本平行に配置し、4か所でせん断力に抵抗させた。せん断面での骨材の摩擦抵抗を

表-1 示方配合表

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランパ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					W	C	S	G
20	8±2.5	6±0.5	44	44.5	160	364	698	1131

セメント: 早強ポルトランドセメント、粗骨材: 碎石、細骨材: 川砂  
混和剤: 1パックを規定量 0.728 (kg/m<sup>3</sup>)

表-2 鉄筋引張試験結果 (非加工品)

呼び径	規格	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)
D16	SD35	1.923	3855	2200	4440	1.90×10 <sup>6</sup>	17.2

表-3 供試体変動要因

供試体 No.	側面かぶり C s (mm)	引張力 T
C1-C3	5d <sub>b</sub> =80 4d <sub>b</sub> =64 3d <sub>b</sub> =48 2d <sub>b</sub> =32	1.0f <sub>y</sub> 1.0f <sub>y</sub> 1.0f <sub>y</sub> 1.0f <sub>y</sub>
C1-H C3-H C4-H	5d <sub>b</sub> =80 4d <sub>b</sub> =64 3d <sub>b</sub> =48 2d <sub>b</sub> =32	0.5f <sub>y</sub> 0.5f <sub>y</sub> 0.5f <sub>y</sub>
C1-N C3-N C4-N	5d <sub>b</sub> =80 4d <sub>b</sub> =64 3d <sub>b</sub> =48 2d <sub>b</sub> =32	0 0 0 0

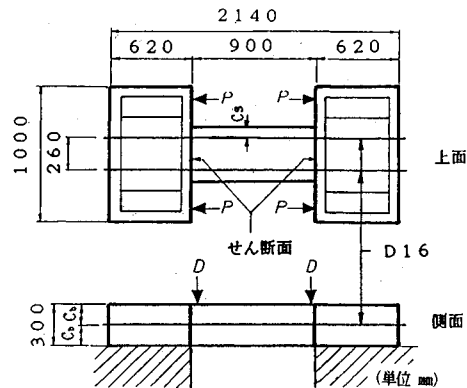


図-5 供試体寸法および荷重模式図

完全になくすため、せん断面はパラフィンコートしたブリキ板で仕切り、コンクリートを打設した。試験部分の全長は 90 cm としたが、これはダウエル力により左右両側のせん断面から進展する割裂ひびわれが互いに影響を及ぼさないようにするため、小林ら<sup>9)</sup>の実験結果を参考にして決めた。また、すべての供試体においてダウエル鉄筋の中心間隔を 26 cm とし、2本の鉄筋が互いに影響し合わないようにした。また、上下方向のかぶり (15 cm) は側面のかぶりに比べ大きくとり、側面に割裂ひびわれが発生しやすくした。鉄筋に与える引張力は全く与えないもの (T=0)、鉄筋降伏強度の 50% に相当する引張力 (T=0.5 f<sub>y</sub>) および降伏強度に相当する引張力 (T=1.0 f<sub>y</sub>) の 3通りとした。なお、本実験は、かぶりや引張力がダウエル耐力に及ぼす基本的影響を調べることに主眼を置いたので、試験部分には横補強筋は配置していない。本研究でかぶりとは鉄筋中心からコンクリート表面までの最短距離をいう。

#### (3) 荷重方法

荷重方法の模式図を図-5に示す。鉄筋に引張力を作用させる場合には、供試体を所定の位置にセットし、供試体の左右のブロック間に取り付けた2本の油圧ジャッキにより、ダウエル鉄筋のせん断面におけるひずみが所定の値になるように制御した。ダウエル力は供試体上方のジャッキにより、せん断面から 10 cm 以内に作用さ

せた。ダウエル力加载中，作用軸力は初期に導入したままとした。また，左右のせん断面はダウエル力加载中常に平行を保つよう，供試体左右のブロックはPC鋼棒にて載荷フレームにセットした。なお，測定にはデジタルひずみ計を用いた。

4. 実験結果および考察

実験結果の一覧表を表-4に示す。割裂ひびわれとは軸方向鉄筋（ダウエル鉄筋）に沿って側面に現われたひびわれのことである。本実験では，ダウエル荷重（ $D$ ）-変位（供試体下面でのたわみ量  $\delta$ ）曲線において，割裂ひびわれが発生し，約1割の荷重が増加した後，剛性の急激な低下がみられた。しかし，その後，荷重はほぼ一定値を示した。 $D$ - $\delta$  関係において最大耐力以降の変形の増大は，鉄筋に作用するダウエル力によって生じる鉄筋の伸び変形と判断し，また，せん断伝達機構のうちダ

ウエル作用において，最大耐力が重要な因子であるとの判断から，本研究においては，最大耐力時を終局と判断した。終局時の変形は，終局時における供試体下面のたわみ量である。表-4の割裂ひびわれ発生荷重およびダウエル終局耐力は，供試体に加えた荷重を示してあり，この実験ではダウエル力の作用点は4か所であるため，鉄筋1本当当たりのダウエル力の4倍の値を示してある。なお表-4の補正值はダウエル耐力に及ぼすコンクリート強度の影響を考慮するため，実験より得られたダウエル力に（350/コンクリート圧縮強度）を剰じたものであり，作用点1箇所当たりのダウエル終局耐力を示したものである。

(1) ダウエル荷重-ダウエル変位関係 ( $D$ - $\delta$  関係)

せん断面に作用するダウエル荷重-ダウエル変位関係の一例を図-6 (a)~(d) に示す。この図においてダウエル荷重とはせん断面において鉄筋1本に作用するダウ

表-4 実験結果一覧表

供試体 No.	円柱供試体 ***			実験結果				補正值
	平均圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂ひびわれ発生荷重 * (tonf)	割裂ひびわれ発生時変形量 (mm)	ダウエル終局耐力* (tonf)	ダウエル終局時変形量 (mm)	
C1	346	32	2.89	22.0	5.1	23.6	7.7	6.0
C2	368	34	3.30	19.8	3.7	23.0	4.7	5.5
C3	362	33	2.79	13.2	1.6	15.1	6.3	3.7
C4	362	33	2.79	2.2	0.3	11.6	8.9	2.8
C1-H	261	28	2.34	18.7	1.7	20.7	2.3	7.0
C2-H	261	28	2.34	15.1	1.6	16.7	2.9	5.6
C3-H	346	32	2.89	18.7	1.1	20.7	2.3	5.2
C4-H	261	28	2.34	2.9	0.0	19.0	2.0	6.4
C1-N	346	32	2.89	34.5	1.9	37.0	2.0	9.4
C2-N	261	28	2.44	23.9	2.1	26.1	2.6	8.7
C3-N	362	33	2.79	25.1	1.1	27.7	2.5	6.6
C4-N	362	33	2.79	11.3	0.6	19.2	3.4	4.7

\*実験結果はダウエル力の作用点が4箇所あるため，鉄筋1本当当たりの4倍の値を示している。  
 \*\* C4-Hは実験加载中に不都合が生じダウエル耐力がかなり大きくなっている。 \*\*\* 円柱供試体は，各供試体毎に3体用いている。

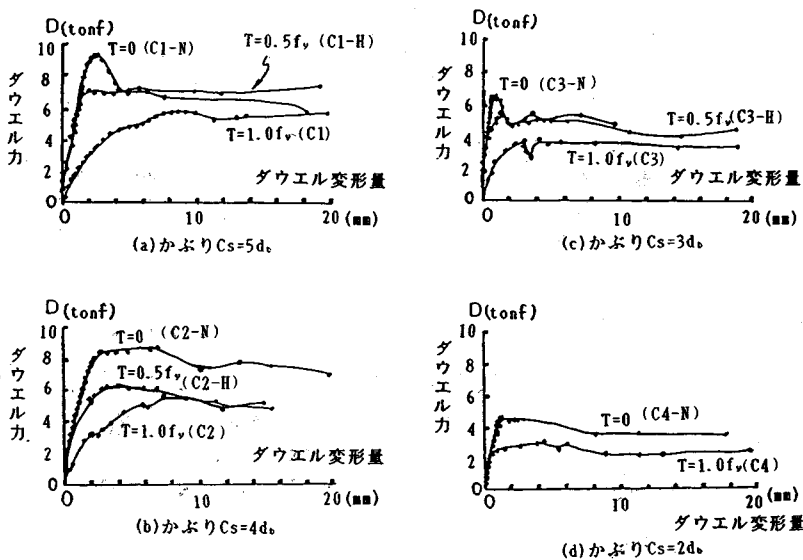


図-6 ダウエル荷重-ダウエル変位関係

エル力である。これらの図から明らかなように、引張力を作用させていない供試体の  $D-\delta$  関係は、割裂ひびわれ発生あるいは最大荷重時に至るまで、ほぼ弾性的挙動を示したが、作用引張力を大きくするにつれて、 $D-\delta$  関係の初期の段階から緩やかなカーブを描いている。いずれの供試体も最大荷重に達した後、ほぼその荷重を維持したまま変形量が増加している。ダウエル耐力をかぶり別にみると、側面のかぶりが厚くなるにつれてダウエル耐力も増加し、初期剛性 ( $D-\delta$  の弾性域における傾き) も大きくなる (図-6 参照)。これは、かぶりが大きくなると、ダウエル力の作用により供試体側面方向に生じる引張応力に抵抗する領域は広くなるが、かぶりが小さい場合にはこの領域は狭く、鉄筋からコンクリートに伝達される引張力により周囲のコンクリートに生ずる引張応力度がコンクリートの引張強度に早期に達し、割裂ひびわれが発生しやすくなるためと思われる。図-7 からわかるように、かぶりの増加につれてダウエル耐力はほぼ比例的に増加してゆく。

また、作用引張力が増加するにつれて、終局時の変形量も大きくなる。これは鉄筋に引張力を作用させ、鉄筋が降伏あるいは降伏に近い段階では、鉄筋周辺に内部ひびわれが発生したり<sup>10)</sup>、また、せん断面付近においては引張力の作用によりロート状のひびわれが発生する可能性が大きい<sup>10)</sup>、ダウエル鉄筋とコンクリートとの付着が低下し、鉄筋の引き抜き量が大きくなるためと考えられる。

また、図-7 から、鉄筋が完全に降伏するまで引張力を作用させた場合のダウエル耐力は、鉄筋に引張力を作用させない場合と比べて約3割ないし4割程度低下することがわかる。このように、ダウエル耐力に及ぼす引張力の影響はきわめて大きいので、設計においてもこの影響を合理的に考慮しなければならないと思われる。

図-8 は引張力の大きさと初期剛性 ( $D-\delta$  関係における初期剛性) との関係を示したものである。鉄筋に作用させた引張力が大きくなるにつれて初期剛性が低下している。これは、引張力が作用することにより鉄筋周辺に内部ひびわれが進展して鉄筋周辺のコンクリートが軟化

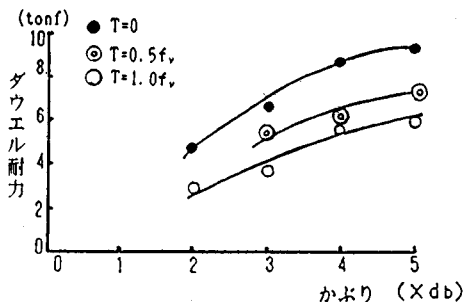


図-7 かぶりとダウエル耐力との関係

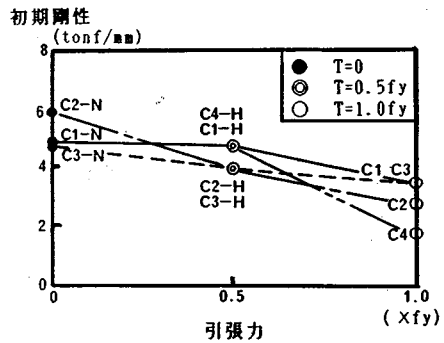


図-8 引張力と初期剛性との関係

するためと考えられる。

### (2) ひびわれ状況および破壊状態

ひびわれ状況の一例を図-9 に示す。引張力を作用させたいずれの供試体についても引張力の作用によりせん断面が開き始め、ダウエル力の低い段階で割裂ひびわれが供試体側面に発生した。しかし、その後ほとんどひびわれの進展がみられず、最大耐力付近でひびわれが急激に進展して終局に至った。

引張力を与えない供試体では、ダウエル荷重を載荷し始めてまもなくせん断面にひびわれが入り、そのひびわれ幅はダウエル力を増加させても、ほとんど拡大しなかった (せん断面でのひびわれ幅の測定は 1/100 mm ダイヤルゲージにより行った)。割裂ひびわれの進展状況は引張力を作用させた供試体と同様であった。

### (3) ダウエル鉄筋の変形性状およびひずみ分布

本実験では、鉄筋のひずみ分布および曲率を調べるため、鉄筋の縦リブ両面にひずみゲージを所定の間隔で貼付け、縦リブが上下面になるようにセットして、コンクリートを打設した。鉄筋のひずみ分布の一例を図-10 に示す。

いずれの供試体もほぼ同じひずみ分布を示していた。ひずみの測定から、鉄筋上面はせん断面付近では圧縮、そしてせん断面から 50~100 mm 離れた位置からは引張のひずみになっていた。また、鉄筋の下面では、これとは逆にせん断面付近で引張、そしてせん断面から 50~100 mm 離れた位置からは圧縮のひずみへと変化していた。これにより、ダウエル力により、鉄筋には純せん断変形が生じるのではなく、局部的な曲げ変形が生じてい

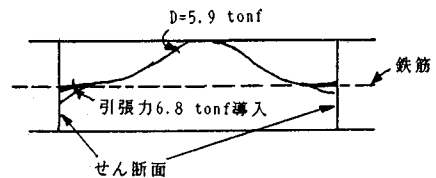
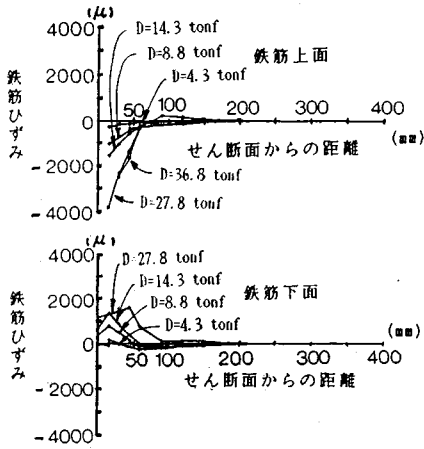


図-9 ひびわれ状況の一例 (供試体 No. C2)

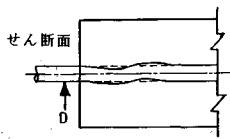


図一10 鉄筋ひずみ分布 (供試体 No. C1-N)

ることがわかる。そして、ダウエル鉄筋は、図一11に示すように変形し、せん断面に抵抗しているものと考えられる。

図一12 (a)~(d) は、ダウエル鉄筋に曲げ変形が生じている範囲を各荷重段階ごとに示したものである。鉄筋の曲率は鉄筋縦リブ上下面に貼付したひずみの測定値から求めたものである。これによると引張力が作用している供試体ではダウエル力が低い段階からせん断面からかなり離れた位置においても鉄筋は曲率をもっていることがわかる。ダウエル力の増加とともに鉄筋周辺のコンクリートに内部ひびわれが発生し、せん断面に最も近い曲率0の位置が供試体中央部へ移るものと思われる。

鉄筋に生じる曲率は、供試体中央に向かうにつれて0に近づく。図一12からダウエル力の増加とともに曲率をもつ範囲が徐々に供試体中央部へ広がっていくことがわかる。荷重の増加とともにせん断面近くではコンク

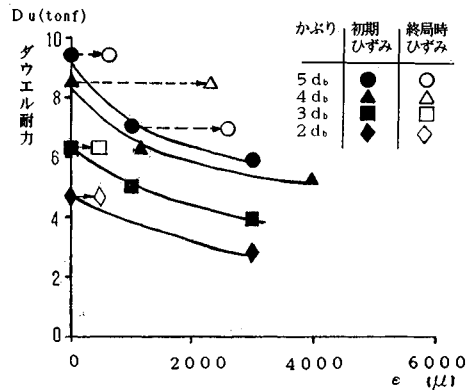


図一11 ダウエル力を受ける鉄筋の概念図

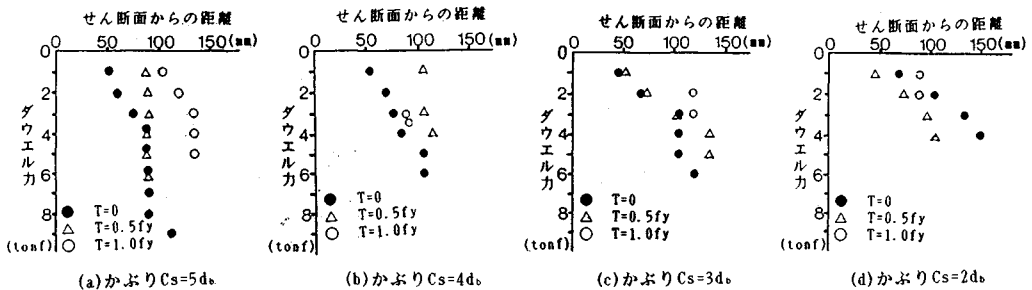
リートが内部ひびわれの発生のため軟化して、ダウエル力の反力がとれなくなるため、曲率0の位置が徐々に供試体中央へ進んだものと考えられる。また、引張力を増加させていくと、曲率0の位置はさらにダウエル鉄筋の奥の方まで進行する。これは引張力が鉄筋に作用することにより鉄筋周辺のコンクリートに内部ひびわれが発生し、ダウエル作用によりコンクリートと鉄筋との離れが生じたためと思われる。

(4) ダウエル耐力に及ぼす引張力の影響

本実験の変動要因である引張力( $T$ )は、 $T=0, 0.5 f_y, 1.0 f_y$  ( $f_y$ :鉄筋降伏荷重)の3通りとしたが、図一13は、せん断面での鉄筋のひずみを因子としてダウエル耐力を描いたものである。かぶりによらず、あらかじめ引張られた鉄筋をもつ供試体は、引張力を作用させないものよりもダウエル耐力が低下し、その低下の様子はあらかじめ与えたひずみの増加とともに指数関数的に減少していることがわかる。そして、わずかな引張力が作用してもダウエル耐力の低下は大きく、逆に鉄筋降伏以上の引張ひずみの作用に対しては、耐力の減少の割合は小さくなっている。これはダウエル作用のメカニズムは、鉄筋よりむしろコンクリートの諸特性に大きく依存しているためと考えられる。1000~1500 $\mu$ 程度以下の引張ひずみを鉄筋に与える場合、鉄筋の周りのコンクリートは内部ひびわれの発生により軟化し始めることが知られて



図一13 ダウエル耐力と鉄筋ひずみとの関係



図一12 ダウエル鉄筋の曲げ変形範囲

いる<sup>10)</sup>。したがって、この内部ひびわれが生じる引張力の範囲でダウエル耐力の低下が著しくなるものと思われる。さらに大きな引張力を与えた場合、内部ひびわれ発生領域は鉄筋軸方向に対して進展するもの、鉄筋軸に垂直な面方向への広がり、ある引張力以上ではそれほど進展しないため、ダウエル耐力の低下はあまり生じないものと思われる。また、大塚ら<sup>10)</sup>の研究によりひずみが $2000\mu$ 以上、つまり鉄筋の降伏点以上では、内部ひびわれによるせん断面近傍でのコンクリートの軟化はあまり進展しないことが明らかにされている。このため、鉄筋降伏点あるいはそれを越える引張を鉄筋にあらかじめ与えても、ダウエル耐力は急激に低下しないものと考えられる。

ここで、引張力を受けた鉄筋のダウエル耐力  $D_u$  を引張力を受けない鉄筋のダウエル耐力  $D_{u0}$  と作用引張ひずみ  $\varepsilon$  とをパラメーターとして表示すると次式が得られた。

$$D_u = D_{u0} \cdot e^{-0.0002\varepsilon} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $D_u$  : 引張力を受けた鉄筋のダウエル耐力 (tf)

$D_{u0}$  : 引張力を受けない鉄筋のダウエル耐力 (tf)

$\varepsilon$  : 引張力によりせん断面の鉄筋に発生するひずみ量 ( $\mu$ )

この式は、鉄筋径が16mm、側面かぶりは $2d_b \sim 5d_b$  ( $d_b$ : 鉄筋径)、コンクリート圧縮強度が約 $350 \text{ kg/cm}^2$ の供試体の実験結果から得られたものである。

すでに述べたとおり、Dulacskaを始めとする、既往の研究者らは実験に基づかずに、引張力とダウエル耐力との相互関係を楕円で表現していた。このため、作用引張力がある程度大きくなるまではダウエル耐力の低下は認められず、引張力が相当大きくなるとダウエル耐力が急激に低下すると考えていた。これに対し、本実験結果ではわずかな引張力が作用しても、ダウエル耐力にかなりの低下がみられた。そして、引張力がある程度大きくなると、引張力の増加に伴いダウエル耐力の減少の割合は徐々に小さくなり、鉄筋が降伏してもダウエル耐力は0にならなかった。図-13には、初期引張ひずみとともに、終局時においてせん断面に生じていた鉄筋ひずみもプロットしてあるが、部材終局時の引張ひずみを考慮したとしても、既往の研究において指摘されているような、鉄筋降伏時におけるダウエル耐力の急激な低下はみられないことが判明した。なお、 $T=1.0 f_y$  供試体では終局時のひずみの測定は不可能であった。

## 5. 軸方向鉄筋のダウエル作用のせん断耐力評価式への適用の可能性について

現在、鉄筋コンクリート部材のせん断耐力の評価方法

としては、コンクリートの負担せん断力とせん断補強筋の負担せん断力との和で与えるもの<sup>11)~13)</sup>、せん断補強筋と上下弦材により形成されるトラス機構に基づく耐力式で与えるもの<sup>14)</sup>および下界定理を用い、トラス機構とアーチ機構とを加えたもの<sup>15)</sup>等がある。

しかし、ダウエル作用および骨材のかみ合わせ作用は、そのメカニズムが十分に解明されていないために、これらの作用はいずれのせん断耐力式にも考慮されていない。鉄筋コンクリート部材のせん断伝達機構に関して、野口<sup>16)</sup>は、斜めひびわれ発生後のダウエル力によるせん断伝達は全せん断力の5~20%程度、骨材のかみ合わせ作用によるせん断伝達は10~30%程度であるとしている。しかし、部材降伏以降終局に至る大変形時におけるせん断伝達機構や力の分担割合についてはまだ十分に解明されていない。今後、これらの問題を明確にして、より実際の挙動を的確に表現するせん断耐力式を確立しなければならない。すでに述べたように、CEBの'90 MODEL CODE (草案)<sup>17)</sup>においてダウエル作用の影響が取り入れられているが、この式においてもダウエル作用に及ぼす引張力の影響は考慮されていない。

本研究により、鉄筋のダウエル作用によるせん断耐力は、わずかな引張力によっても大きく減少することが明らかとなったことから、CEBのせん断耐力式に取り入れられているダウエル耐力は過大評価されていると思われる。

一般に、軸方向鉄筋がせん断に抵抗し始める場合、鉄筋には降伏ひずみあるいはそれ以上のひずみが生じているものと推察される。したがって、鉄筋のダウエル作用をせん断耐力式に導入するためには、かぶりと設計で許容される鉄筋応力(ひずみ)の状態を考慮しなければならない。図-7から鉄筋を引張降伏させた場合のダウエル耐力は、鉄筋に引張力を作用させず、かつかぶりを約50~60%程度減少させた場合のダウエル耐力とほぼ同程度であることから、ダウエル作用に及ぼす引張力の影響はかぶりを減少させて考えることもできるであろう。

## 6. ま と め

本研究は、かぶりおよび鉄筋に作用する引張力が鉄筋のダウエル作用に及ぼす影響を実験的に検討したものである。本研究の範囲内で次のことが結論づけられる。

(1) 側面のかぶりが大きくなると、ダウエル耐力は増加する。

(2) ダウエル作用により鉄筋が曲率を有する範囲は、引張力が大きいほど、あるいはダウエル力が大きいほど、せん断面から遠方にまで及ぶ。

(3) 引張力を作用させた場合、小さな引張力であってもダウエル耐力の低下が生じる。これは内部ひびわれ

の発生により鉄筋周辺のコンクリートに軟化が生じたためと思われる。

(4) 引張力とダウエル耐力との関係を初期の引張ひずみ量をパラメーターとして回帰式で示した。引張ひずみの増加とともに指数関数的にダウエル耐力は減少する。

(5) 鉄筋のダウエル耐力は、鉄筋そのものよりもコンクリートの特性に大きく依存している。

今後の課題として、ダウエル作用に及ぼすコンクリート強度、鉄筋径、鉄筋のあき、横補強筋等の影響を調べるとともに、交番繰り返し時におけるダウエル耐力およびその劣化状態を詳細に調べ、地震時におけるRC部材のせん断力伝達機構を解明する必要があると思われる。

#### 参 考 文 献

- 1) 後藤幸正・尾坂芳夫・三浦 尚：コンクリート工学(Ⅱ)設計，彰国社，pp.182~189，1988。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，耐震に関する検討，pp.89~98，1986。
- 3) CEB：CEB-FIP Model Code 1990，1988。
- 4) Hofbeck, J. A., Ibrahim, I. O. and Mattock, Alan H. : Shear transfer in reinforced concrete, ACI Journal, Proceedings, Vol.66, No.2, pp.119~128, February, 1969.
- 5) Helen Dulacska : Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete, ACI Journal, Proceedings, Vol.69, No.12, pp.754~757, December, 1972.
- 6) Jimenez, R., White R. N. and Gergly, P. : Bond and dowel capacities of reinforced concrete, ACI Journal, Proceedings Vol. 76, No.1, pp.72~92, January. 1979.
- 7) Vintzeleou, E. N. and Tassios, T. P. : Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions, Magazine of Concrete Research, Vol.38, No.134, pp.13~22, March, 1986.
- 8) 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，JCI，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.773~776，1986。
- 9) 小林克己・野口 博：コンクリートと異形鉄筋の付着作用とダボ作用の相関，鉄筋コンクリート構造のFEM解析の精度向上に必要な基礎実験と解析モデルの開発，昭和63年度科学研究費補助金総合研究(A)研究成果報告書，pp.254~277，1989年3月。
- 10) 鴨志田政仁・大塚浩司・森 楨夫：正負交番荷重を受けるRC柱の主鉄筋定着性状，東北支部技術研究発表会講演概要，土木学会，pp.490~491，1988年3月。
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.137，1986。
- 12) ACI : Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), 11 Shear and torsion, 1984.
- 13) CEB : CEB-FIP Model Code for Concrete Structures No.126, 1978.
- 14) Nielsen, M. P., Braestrup, M. W. Jensen, B. C. and Bach, F. : Concrete plasticity-shear in beams, CEB Bulletin D'information, No.126, pp.286~325, 1978.
- 15) 渡辺史夫：鉄筋コンクリート部材のせん断強度と変形性能，JCI，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.1, pp.105~114，1988。
- 16) 野口 博：鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗機構に関する研究(第1報：せん断補強筋のないモデル試験体のせん断破壊実験)，昭和53年度建築学会関東支部研究報告集，Vol.49, pp.225~228，1979。

(1990.6.14・受付)