

論文 RC 部材のダウエル作用に及ぼす軸方向鉄筋の引張力の影響

品川 幸二郎^{*1}・日比野 憲太^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*3}

要旨：RC はりのせん断破壊時は，軸方向鉄筋には降伏点を越えるほどの過大な引張ひずみが生じており，鋼材のダウエル作用を検討する際には鉄筋に引張力を作用させた状態で行う必要がある。そこで，本研究では鉄筋のダウエル作用の破壊機構および変形性能や耐力等を把握するため，軸方向鉄筋の引張力および鉄筋径の違いが鉄筋のダウエル作用にどのように影響を及ぼすかについて実験検討を行った。その結果，鉄筋に引張力が作用した状態ではダウエル耐力は減少すること，また鉄筋径の増加に伴いダウエル耐力は増加することを明らかにした。

キーワード：せん断引張破壊，ダウエル作用，引張力

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造は，コンクリートと鉄筋という 2 つの異種材料から構成される複合構造であり，その複合耐力機構により様々な外力に抵抗している。なかでも，せん断破壊は曲げ破壊とは異なり，破壊進行が急激で韌性に欠け破壊が脆性的であるため，構造物に致命的な損傷を与えるものである。そのため，鉄筋コンクリートのせん断伝達機構の解明が必要不可欠であるが，まだ十分な解明には至っていない。

現在，RC 部材のせん断耐力機構として，コンクリートの圧縮部による抵抗，骨材のかみ合わせ作用，軸方向鉄筋のダウエル作用，せん断補強筋による抵抗の 4 つが知られている。なかでも，ダウエル作用についての研究はこれまでいくつかなされているが，いずれも供試体の形状，実験要因や実験方法が異なっており，いまだ不明な点が多いのが現状である。ダウエル作用は，斜めひび割れ面での鉄筋とコンクリート間で伝達される支圧応力および鉄筋の曲げ剛性によって外力に抵抗する作用であるが，RC 部材のせん断破壊時には軸方向鉄筋に作用する引張力の作用によって降伏点を越えるほどの過大な引張ひ

ずみが生じている。特に，せん断引張破壊は鉄筋のダウエル作用が部材の耐荷性状に対して複雑な影響を与えており，ダウエル作用を検討する際には，せん断破壊時のように鉄筋に引張力を作用させた状態でその破壊機構，変形性能や耐力等を検討する必要がある。そこで本研究は，鋼材に作用する引張力ならびに鋼材径に着目し，それらの影響が鋼材のダウエル耐力に及ぼす影響に関して，実験的な検討を試みたものである。

2. 実験概要

2.1 実験要因

表-1に実験要因を示す。昨年度の研究¹⁾では，鉄筋のダウエル作用に影響を与えるパラメータとして側方かぶり厚さに関して実験検討を行った。本実験では，鉄筋のダウエル作用に影響を与えるパラメータとして軸方向鉄筋の鉄筋径お

表-1 実験要因

目標圧縮強度 (N/mm ²)	軸方向鉄筋	鉄筋ひずみ (μ)
30	D25 D22 D19	0
		$0.5\varepsilon_v$
		$0.8\varepsilon_v$
		$1.0\varepsilon_v$

*1 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 修士課程

*2 (株) 国際建設技術研究所 ポストドクトラルフェロー 工博 (正会員)

*3 立命館大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

よび鉄筋に与える引張力を変化させた。その際、鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y を基準として、鉄筋のひずみが 0, $0.5\epsilon_y$, $0.8\epsilon_y$, $1.0\epsilon_y$ となるように引張力を作用させた。なお、鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y は、各鉄筋径別の基準試験体から得られた曲げモーメント-たわみ関係で判断される部材の降伏時における、人工ひび割れ面から 50mm の位置に貼付した鉄筋ひずみゲージの値を用いた。

2.2 供試体諸元

(1) 使用材料

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、コンクリートの目標圧縮強度は 30N/mm^2 とした。

実験に使用した鉄筋は、軸方向鉄筋に異形鉄筋 D25, D22, D19, せん断補強筋に D10 を用いた。鉄筋の力学的特性を表-2 に示す。

表-2 鉄筋の力学的特性

使用鉄筋	降伏強度 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	伸び率 (%)
D25 (SD295)	324	506	26.7
D22 (SD295)	332	527	25.1
D19 (SD295)	336	530	25.7
D10 (SD345)	380	577	24.2

(2) 供試体寸法

図-1 に供試体寸法を示す。供試体寸法は、 $b \times 240 \times 1600\text{mm}$ (供試体幅 $b=125\text{mm}$ (D25), 122mm (D22), 119mm (D19)) とし、有効高さ 197.5mm の位置に軸方向鉄筋を 1 本配置した。供試体内部の上面かぶり厚さを 30mm , 下面かぶ

り厚さを c ($c=30\text{mm}$ (D25), 31.5mm (D22), 33mm (D19)), 側方かぶり厚さを 50mm ですべて一定とし、鉄筋径 D25, D22, D19 の供試体をそれぞれ 6 体ずつ計 18 体作製した。

(3) 供試体作製方法

本実験で用いる供試体は、既往の研究^{2),3)}における供試体を参考にしたもので、図-1 に示すように供試体中央部に斜めひび割れを想定したひび割れを設けたものである。作製手順として供試体外部を打設し、その 1 日後に残りの供試体内部を打設した。その後、脱型して 4 日間散水養生し材齢は 7 日とした。ここで、供試体内部の打設には人工ひび割れは供試体外部との骨材摩擦を避けるため 3mm 厚のスチレンボードを挿み形成した。また、供試体片側にせん断補強筋を配筋することによりダウエル作用による割裂ひび割れ (以後、ダウエルひび割れ) がせん断補強筋を配筋していない方へ卓越するようにした。なお、せん断補強筋は D10 を使用し、配置間隔は 100mm とした。

(4) 荷重方法

図-2 にダウエル荷重装置を示す。供試体外部上面への荷重は油圧式荷重試験機を使用し、支持スパン 1200mm の対称二点荷重とした。なお、せん断スパン有効高さ比 (a/d) は 1.0 と全て一定とした。また、ダウエル力は、図-2 (断面図) に示すように供試体内部上面に鋼板を差し込み、供試体上部を跨ぐ荷重フレームを設置し、人工ひび割れが鉄筋を横切る部分でダウエル力が作用するように油圧ジャッキを使用して荷重した。

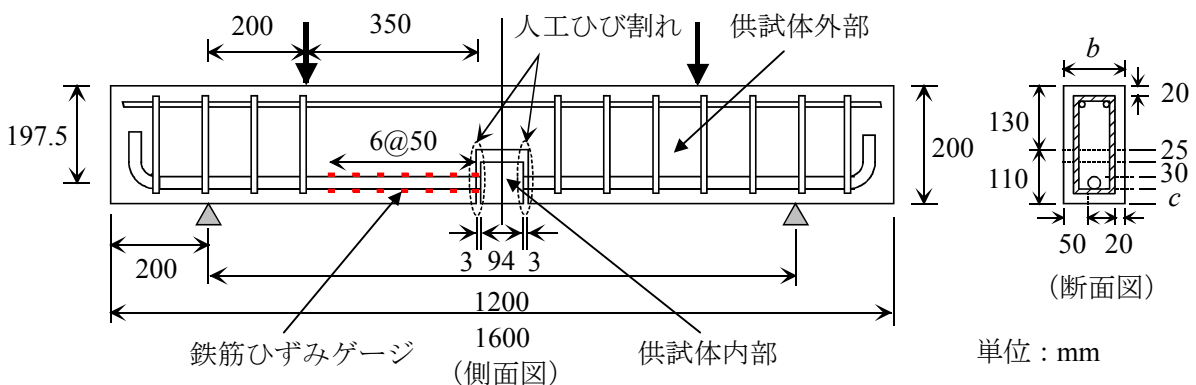


図-1 供試体寸法

なお、油圧ジャッキによる荷重はジャッキ上部に取り付けたロードセルを用いて計測した。

載荷手順として、最初に鉄筋のひずみが所定の値となるように油圧式載荷試験機で載荷させ、その後、油圧ジャッキによりダウエル力を作用させた。その際、鉄筋の引張力（曲げモーメント）が一定になるように、ダウエル力の増加に合わせ油圧式載荷試験機を除荷していった。

2.3 測定項目

(1) ダウエル耐力－相対変位関係

ダイヤルゲージ式変位計を用いて、**図-2**に示す供試体内部上面位置を基準とした供試体内部と供試体外部（I, II）との相対変位を測定した。測定箇所は載荷フレームの左右対称 2 箇所で測定した。

(2) 鉄筋の曲率分布

ダウエル作用によって生じる鉄筋の挙動を把握するため、せん断補強筋が配筋されていない側の鉄筋の上・下面に**図-2**のように人工ひび割れ面から支点方向へ 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300mm の位置に鉄筋ひずみゲージを貼り付け、鉄筋の上・下面のひずみから鉄筋の曲率を求めた。なお、曲率の算出に用いた鉄筋ひずみには、ダウエル試験開始からのひずみの増分値（実験要因となる鉄筋の引張力によるひずみは考慮せず）を用いている。

3. 実験結果およびその考察

表-3 にコンクリートの力学的特性および実験結果を示す。なお、昨年度の研究結果から、せん断補強筋を有さない RC 部材において、ダウエルひび割れ発生後ダウエル力は増加しないことが確認された。この結果を踏まえて、本年度はせん断補強筋を有さない RC 部材のダウエル作用に関しての検討を目的としているため、ダウエルひび割れ発生時の荷重を D とし、 $D/2$ をダウエル耐力とした。また、最終的にダウエル力が上がらなくなったときの荷重を D_{max} とし、 $D_{max}/2$ を最大ダウエル耐力とした。

(1) ダウエル耐力－相対変位関係

図-3 に、ダウエル耐力－相対変位関係を示す。なお、これらの関係は、せん断補強筋を配筋していない側の相対変位（**図-2** の I）を示している。結果から得られたダウエル耐力－相対変位関係は、供試体の形状上、載荷フレームの左右に 2 つの破壊区間を有するため、せん断補強筋を配筋することにより、その破壊区間の制御を試みたが安定した相対変位を得るのは困難な結果となった。そのため、各ケースに関する比較検討は行えないが、全てのケースでダウエルひび割れ発生時までは、比較的、弾力的な挙動をしている。また、ダウエル耐力（図中の黒印）到達以降は、部材剛性が急激に低下し、変位の増加が顕著となった。これは、鋼材側方に発生するダウエルひび割れの開口により、鋼材がコンクリートから受ける支圧抵抗が急激に低下す

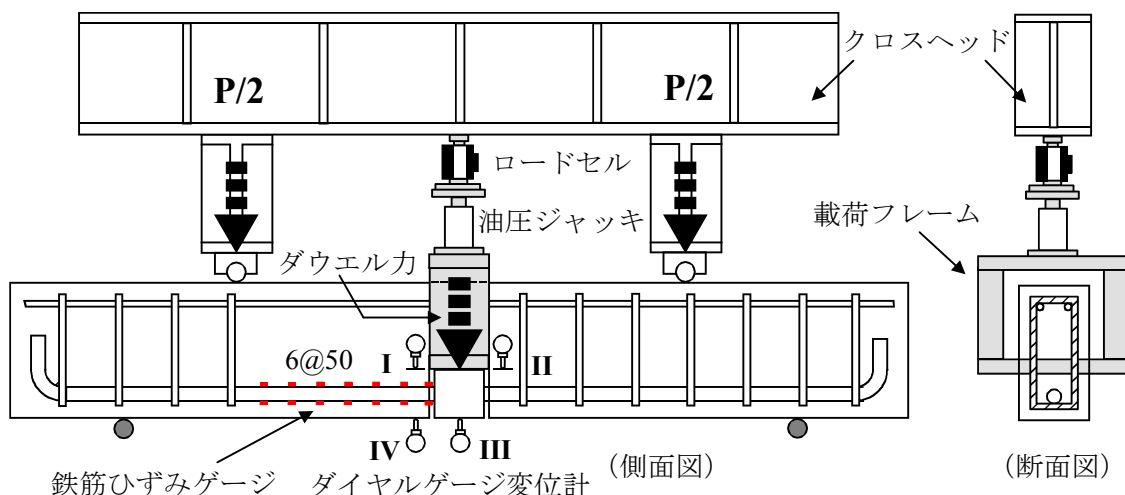


図-2 ダウエル載荷装置

表-3 コンクリートの力学的特性および実験結果

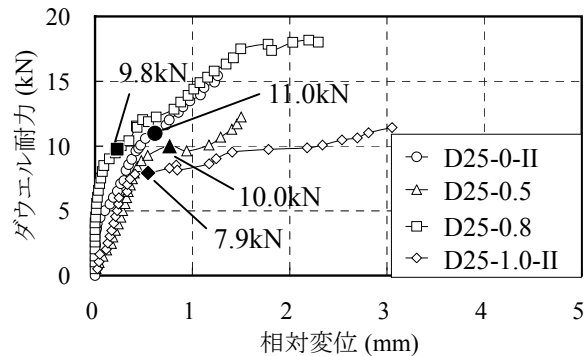
供試体番号	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	鉄筋ひずみ (μ)	ダウエル 耐力 D (kN)	最大ダウ エル耐力 D_{max} (kN)
D25-0-I ¹⁾	33.8	2.71	33.4	0	9.9	16.0
D25-1.0-I ²⁾	30.9	2.51	29.7	1407 (1.0 ϵ_v)	8.7	11.2
D25-0-II	31.0	2.41	31.1	0	11.0	16.5
D25-0.5				853 (0.61 ϵ_v)	10.0	12.2
D25-0.8	30.9	2.51	29.7	1470 (0.83 ϵ_v)	9.8	18.0
D25-1.0-II				1334 (0.95 ϵ_v)	7.9	11.4
D22-0-I ¹⁾	29.3	2.53	29.5	0	8.1	13.5
D22-1.0-I ²⁾				—	—	—
D22-0-II	30.1	2.49	29.2	0	8.2	13.0
D22-0.5				773 (0.53 ϵ_v)	7.1	12.0
D22-0.8				1208 (0.83 ϵ_v)	8.5	11.7
D22-1.0-II				1455 (1.0 ϵ_v)	8.1	11.9
				—	—	—
D19-0-I ¹⁾	32.1	2.51	29.7	0	8.0	12.4
D19-1.0-I ²⁾				1692 (1.0 ϵ_v)	7.4	7.4
D19-0-II	30.3	2.42	31.1	0	7.9	11.5
D19-0.5				842 (0.50 ϵ_v)	7.6	9.1
D19-0.8				1209 (0.71 ϵ_v)	6.5	9.0
D19-1.0-II				1436 (0.85 ϵ_v)	6.5	8.4

1) 鉄筋ひずみゲージを貼付していないもの

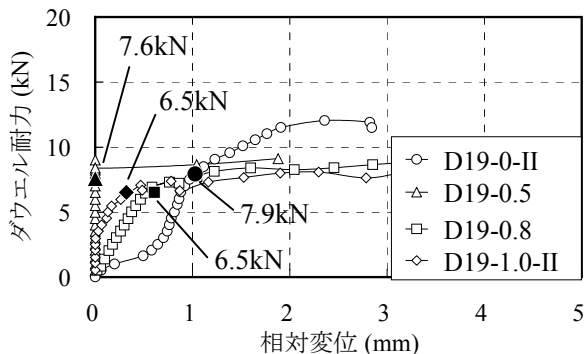
2) 鉄筋ひずみゲージを人工ひび割れ面から 50mm の位置だけに貼付しているもの

注) D22-1.0-II は、曲げ破壊したため測定できず

るためであると考えられる。



(a) D25



(b) D19

図-3 ダウエル耐力-相対変位関係

(2) 鉄筋の曲率分布

図-4 に、各ダウエル力段階における鉄筋の曲率分布を示す。図から、ダウエルひび割れ発生時までの鉄筋の曲率分布は、人工ひび割れ面から 100mm 以内の領域に集中している。加えて、鉄筋に作用する引張力が大きいほど曲率が大きくなる傾向にあるが、これは鋼材に作用させた引張力に起因するものと考えられる。また、鋼材径が大きくなるにつれ曲率が小さくなる傾向が確認できるが、これは鋼材が有する曲げ剛性に起因したものと考えられる。

ダウエルひび割れ発生後において、曲率分布の最大値はダウエル力の増加に伴い徐々に大きくなりながら支点方向に向かい、やがて 0 に近づく結果となった。これは、鋼材側方に発生するダウエルひび割れの進展により、鋼材がコンクリートから受けることのできる支圧抵抗の領域が、人工ひび割れ面から支点方向に徐々に移行するためであると考えられる。

鋼材径ならびに引張力の影響は、特に引張力に関して、その作用力が小さいほど曲率分布の

最大値は支点方向に移行する傾向が確認できる。これは、引張力が小さい場合、すなわち鋼材のダウエル変形による降伏までに余裕がある場合には、鋼材からコンクリートに伝達される支圧

力によりコンクリートの引張破壊（ダウエルひび割れ）が顕著となり、ダウエルひび割れの支点方向への進展に伴い曲率の最大値も支点方向に移行する。一方、鋼材に作用する引張力が大きい場合には鋼材のダウエル変形による引張降伏が早くなるため曲率の最大値は鋼材の引張降伏位置で最大となり、その位置にダウエル変形が集中し、支点方向への曲率の増加が低下したものと考えられる。

(3) ダウエル耐力—鉄筋ひずみ関係

図-5 にダウエル耐力（ダウエルひび割れ発生時）と鉄筋ひずみの関係、ならびに最大ダウエル耐力と鉄筋ひずみの関係を示す。

ダウエル耐力に関しては、図と表-3 から、D22 では鉄筋ひずみの影響は見られなかったが、D25 と D19 では鉄筋径が大きいほどダウエル耐力は大きくなり、鉄筋ひずみが大きくなるほど多少ながらダウエル耐力は小さくなる傾向にあった。特に、その低下傾向は鉄筋径が大きいほど顕著となり、鉄筋に与えたひずみが降伏ひずみの約 8 割程度まではダウエル耐力の低下はあまりみられなかったが、それ以降は徐々にダウエル耐力は低下していることがわかる。このダウエル耐力に与える引張力の影響は、鉄筋からコンクリートに伝達される付着力により、鉄筋周辺に発生する付着ひび割れが引張力に比例して進展するためであると考えられる。鉄筋径の影響はその径の大きさに比例して鉄筋とコンクリート間の付着面積、すなわち付着力が大きくなるためであると考えられる。また、前述の曲率の考察とも関連し、鉄筋に作用する引張力の影響は初期のダウエルひび割れ発生荷重には顕著な影響を与えず、ひび割れ発生後は試験体の端部にせん断破壊防止のために配置したせん断補強筋が、ダウエル作用による鉄筋の変形に抵抗するためダウエル耐力が増加したものと考えられる。しかし、この詳細は本論文の検討項目では十分な検討が行えないため、今後の検討項目にしたいと考えている。なお、D22-0.5 はダウエル耐力が低くなっているが、これはダウエル

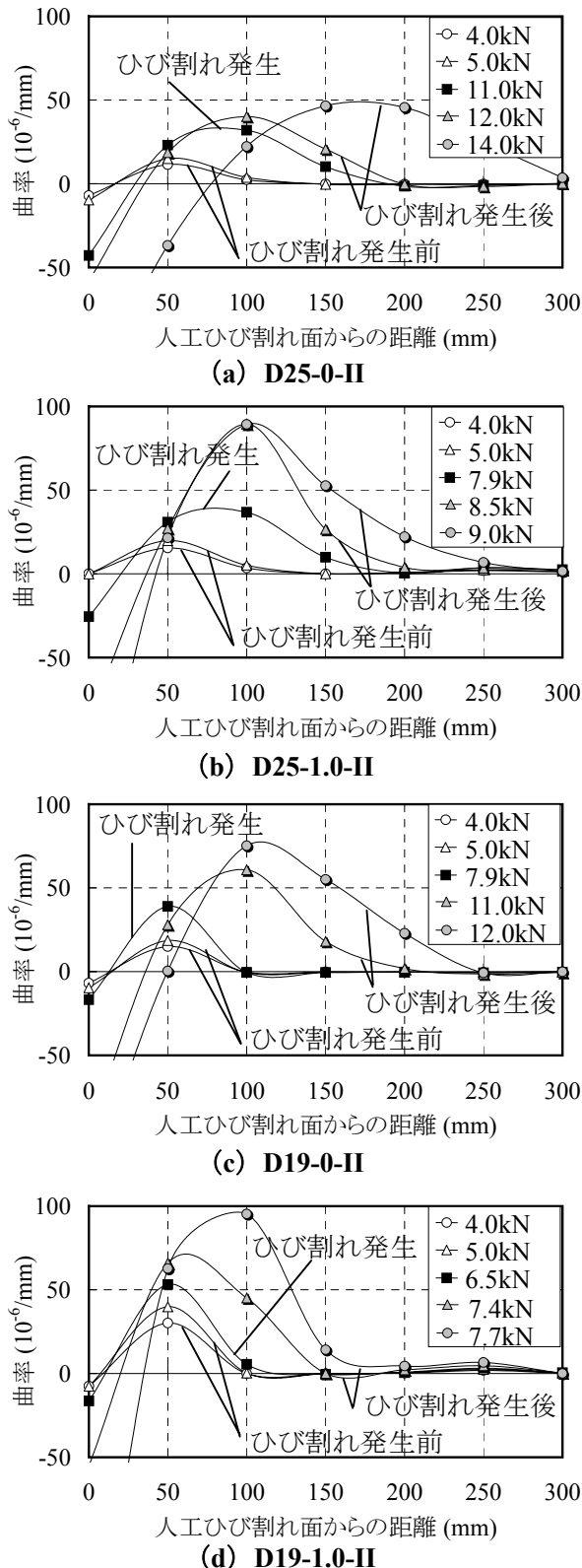


図-4 鉄筋の曲率分布

ひび割れが供試体側面ではなく供試体底面に発生したため、ダウエル作用による支圧にコンクリートが抵抗できなくなったためと考えられる。

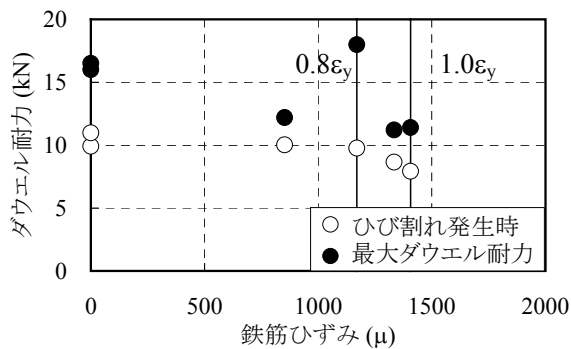
最大ダウエル耐力に関しては、鉄筋径が大きい場合は最大ダウエル耐力の低下率はダウエルひび割れ発生時とあまり差はないが、引張力が大きくなるにつれダウエルひび割れ発生時のダウエル耐力と最大ダウエル耐力の差は小さくなっていくことがわかる。これは、鉄筋径が小さいと鉄筋の曲げ剛性が小さくなること、また鉄筋に作用する引張力が大きい場合は鉄筋のダウエル変形による引張降伏が早くなり鉄筋のダウ

エル作用に対する抵抗性が低下するためと考えられる。

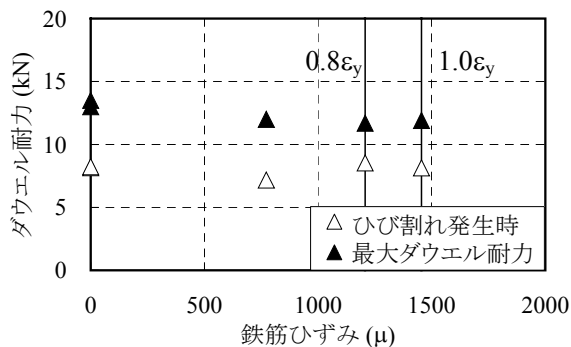
4. 結論

本実験から、以下の結論が得られた。

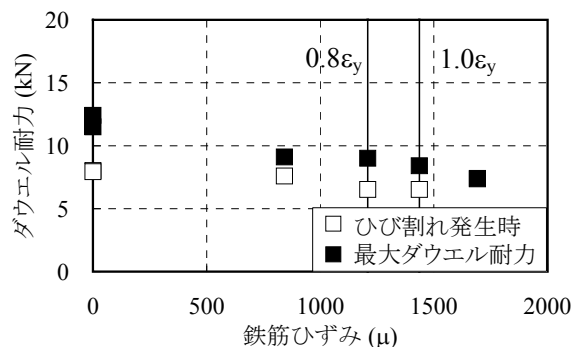
- (1) ダウエルひび割れ発生までは、鉄筋ひずみが大きいほど曲げによるひずみの影響で曲率の最大値は大きくなり、鉄筋径が大きいほど鉄筋の曲げ剛性の違いによって曲率の最大値は小さくなると考えられる。また、ダウエルひび割れ発生後に曲率は徐々に支点方向へ向かい、やがて 0 に近づく。
- (2) 鉄筋径が大きいほどダウエル耐力は大きくなり、鉄筋ひずみが大きくなるほどダウエル耐力は小さくなる傾向にあった。鉄筋の降伏ひずみの約 8 割程度まではダウエル耐力はあまり低下しないが、それ以降は徐々に低下する。
- (3) 本研究では、鋼材に作用する引張力ならびに鋼材径が、ダウエル耐力に及ぼす影響を実験的に検討した。今後は、これらの要因の相関関係を考慮した解析的な検討を試み、鉄筋とコンクリート間のダウエル特性を表現可能な構成則を検討する必要がある。



(a) D25



(b) D22



(c) D19

図-5 ダウエル耐力-鉄筋ひずみ関係

参考文献

- 1) 日比野憲太, 品川幸二郎, 高木宣章, 児島孝之: 離散型要素を用いた鉄筋コンクリート部材のダウエル特性に関する 3 次元有限要素法解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.979-984, 2004.6.
- 2) Krefeld, W. J. and Thurston, C.W.: Contribution of longitudinal steel to shear resistance of reinforced concrete beam, *ACI Journal*, Vol.63, No.3, pp.325-344, 1966.
- 3) 徳田源介, 古内仁, 上田多門, 角田與史雄: ダウエル作用と付着作用によるひび割れ発生について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.717-722, 1997.