

論文 ダウエル作用と付着作用によるひび割れ発生について

徳田源介^{*1}、古内仁^{*2}、上田多門^{*3}、角田與史雄^{*4}

要旨: RCはりの斜め引張破壊の終局時において発生する水平ひび割れの挙動について検討を行った。実験は、鉄筋に作用する引張力とダウエル力の比を変数として行い、その結果から引張力が大きく作用するにつれて小さなダウエル力で水平ひび割れが発生することが明らかとなった。またFEM解析を用いて、はりの断面についてダウエル作用と付着作用の挙動を調べた結果、鉄筋周囲のコンクリートの変形が両者でほぼ同様であることが明らかとなつた。これらの結果を基に、ダウエル作用に対しては、引張力の影響を考慮した弾塑性モデルによって表すことができ、また水平ひび割れ発生基準についても定性的な評価ができた。

キーワード: 斜め引張破壊、付着作用、ダウエル作用、水平ひび割れ

1. はじめに

斜め引張破壊が生じる際、斜めひび割れが軸方向鉄筋を横切る位置から支点に向かって水平ひび割れが生じる。このひび割れは鉄筋に作用する引張力とダウエル力によるものであると考えられている。ダウエル力はかぶりコンクリートを直接的に割り裂く作用をし、引張力は異形鉄筋のふしを介してかぶりコンクリートを割り裂く作用をしている。このような両者の複合的な作用を考慮して水平ひび割れに対して行われた研究はあまり多くない。本研究は、鉄筋に作用するダウエル力と引張力を変数として実験を行い、水平ひび割れ発生について検討を行ったものである。

2. 実験概要

本研究における実験は以下に示す2種類の供試体を用いて行った。

鉄筋に引張力のみ、あるいは引張力とダウエル力を作用させる実験では、Krefeld^[1]らの実験に準じた供試体を用いて行った。

この供試体は、図-1に示す

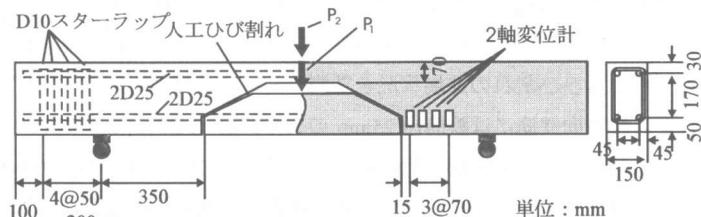


図-1 実験供試体

表-1 各供試体の荷重比

Specimen No.	94-4	94-1	94-2	94-3	96-2	96-3
$P_1 : P_2$	1:0	1:1	1:2	2:5	1:10	0:1

ように、はり中央部に斜めひび割れを想定した人工ひび割れを設けたものである。載荷は、分岐型油圧ジャッキを用いて行い、はり人工ひび割れ上部に P_1 と上面中央部に P_2 を載荷させることにより、軸方向鉄筋に引張力とダウエル力を作用させることができる。このとき、引張力とダウエル力の比（以下 T/Vd と書くことにする）は、荷重 P_1 と P_2 の比を変えることにより任意に与えることができる。また、引張力のみ作用させる場合（No.96-3）には、人工ひび割れ内側のブ

*1 三菱重工業（株）広島製作所、（正会員）

*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻、（正会員）

*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

ロックを取り除き、はり上面中央部のみ載荷を行った。これにより軸方向鉄筋には曲げモーメントによって生じる引張力のみが作用することになる。なお、この実験における供試体は、全部で6体作製し、その荷重比は表-1に示すとおりである。人工ひび割れは骨材の摩擦を取り除くため1mm厚のプラスチック板に粘土を薄く貼りつけたものを使用して作製した。

ダウエル力のみ作用させる実験では、図-2に示すようにコンクリートブロック内部に油圧ジャッキを設置することにより、軸方向鉄筋に直接ダウエル力のみを作用させることができる。供試体は、構造的にジャッキ荷重による支点反力が生じないため、曲げモーメントの影響がなくダウエル力が卓越した載荷状態を作ることができる。

全ての実験に共通して、供試体側面の軸方向鉄筋に沿った位置(70mm間隔)に、2軸ひび割れ変位計を貼りつけダウエルひび割れの進展状況を計測した。軸方向鉄筋には鉄筋径25mmの異形鉄筋(SD345)を2本用い、鉄筋の変形性状を調べるために鉄筋の各位置(人工ひび割れ面から0mm×4ヶ所, 20mm, 60mm, 100mm, 140mm, 180mm, 220mm, 260mm)にひずみゲージを上下に貼りつけて防水処理を施した。なお防水加工が鉄筋の節による付着作用に影響を与えないように、鉄筋に溝を設け、その内側にひずみゲージを貼りつけた。また、はりの供試体では、載荷点附近で圧壊が生じないように、D25の圧縮鉄筋を2本配置した。端部定着のためのスターラップは、D10(SD295A)の鉄筋を50mm間隔に配置した。コンクリートは、早強ポルトランドセメント、海砂および川砂利を用いて作製し、その配合は単位水量160kg/m³、水セメント比48~50%である。実験は、1週間湿潤養生した後に行った。

3. 実験結果

(1) 軸方向鉄筋の引張力とダウエル力

各供試体における水平ひび割れ発生荷重およびコンクリート圧縮強度を表-2に示す。図-3は、人工ひび割れ位置における軸方向鉄筋に作用している引張

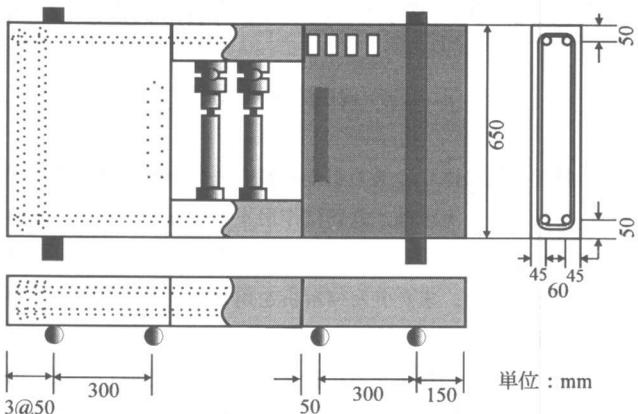


図-2 実験供試体 (No.96-1)

表-2 実験結果

Specimen No.	T _{cr} (kN)	V _{d,cr} (kN)	T/V _d	f _{c'} (MPa)	type
96-1	0.00	5.16	0.00	21.2	実験2
94-4	10.80	4.88	2.19	30.4	実験1
94-1	21.25	4.29	5.12	25.6	"
94-2	28.96	3.68	8.18	23.1	"
94-3	35.73	3.47	10.3	25.3	"
96-2	51.70	1.42	39.0	24.8	"
96-3	69.37	0.00	----	26.5	"

注) T_{cr}: 水平ひび割れ発生時の引張力

V_{d,cr}: 水平ひび割れ発生時のダウエル力

T/V_d: 各供試体の載荷中における引張力/ダウエル力の平均

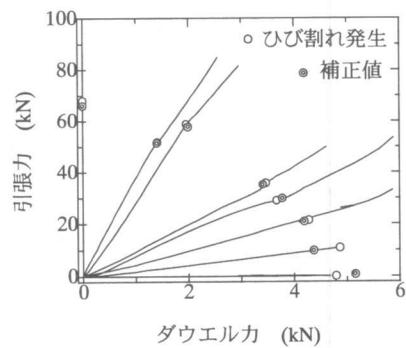


図-3 引張力とダウエル力

力とダウエル力の関係を示したものである。なお、引張力 T は人工ひび割れとの交差する位置における鉄筋のひずみに実断面積とヤング率を乗じて求めた。また、ダウエル力 V_d は、人工ひび割れ面での力の伝達が無いものと仮定して、ジャッキ荷重のみが直接鉄筋にせん断力を伝えるものと考え、 $P_i/4$ とした。図中の○印は各供試体の水平ひび割れ発生荷重を示す。また、各々の供試体におけるコンクリートの圧縮強度（表-2 参照）が異なるため、Krefeld, Tepfers^[2] らの耐力式を参考にしてひび割れ発生荷重の補正を行った。補正是ダウエル耐力も付着割裂耐力もコンクリートの圧縮強度の平方根に比例すると仮定し、各実験値に $\sqrt{f_c' / 245}$ を乗じて補正した（図-3 中の○）。この結果より、引張力が鉄筋に大きく作用する場合は小さなダウエル力でひび割れが発生することが明らかとなった。

(2) 水平ひび割れおよび発生荷重について

軸方向鉄筋に沿って生ずる水平ひび割れは、比較的にはやい段階で人工ひび割れ付近に微小なものが観察されたが、その後ひび割れの成長はそれ程大きくなく、終局時に、急激に進展して破壊に至った。図-4 はその一例を示したもので、4ヶ所の位置でほぼ同時に大きな開口変位を示している。また、他の供試体についても同様の傾向が見られる。水平ひび割れ発生荷重は、このような急激なひび割れ開口変位があらわれたときと定義した。

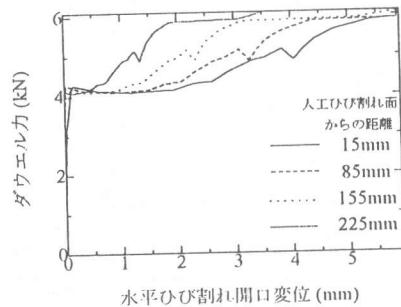
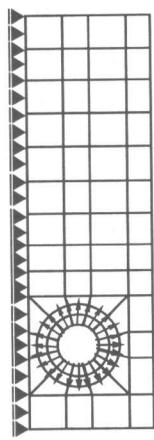
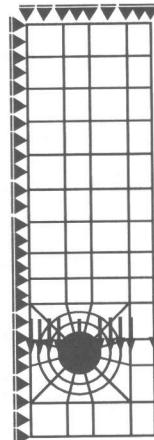
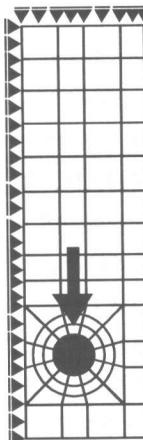


図-4 ダウエル力とひび割れ開口変位



4. 解析概要

4.1 供試体断面の有限要素解析

図-5 解析 1

図-6 解析 2

図-7 解析 3

4.1.1 解析プログラム

本解析において、鉄筋コンクリート梁部材用 2 次元有限要素解析プログラム WCOMR^[3]を使用した。なお、解析ではコンクリート要素と鋼要素だけを用い、ひび割れ後のコンクリートの構成則としてラインハルトの引張軟化モデルが組み込まれているプログラム^[4]を用いることにした。

4.1.2 解析供試体

実験供試体断面について、以下に示す 2 つの解析を行った。なお、断面は、左右対称であるので、右側半分を解析断面とした。

(1) ダウエル力によるひび割れ発生に対する解析について

解析 1：ダウエル力のみ鉄筋に作用させたときの解析は、実験で用いた供試体断面を奥行き 10mm の要素を作成し、直接鉄筋を変位させて、そのときの周辺のコンクリートのひび割れを追跡した（図-5 参照）。

解析2：解析1で鉄筋に直接変位を与えたが、供試体上面から鉄筋までの間のコンクリートの伸びを含んでいる。この変位を鉄筋周辺コンクリートの絶対変位として抜き出すため、鉄筋を水平に横切る面に一様に変位を与え、鉄筋中心部から供試体上部間の伸びを解析した（図-6参照）。

上記の解析1の変位より解析2の変位を差し引いて、ダウエル力による鉄筋の変位と定義した。

(2) 引張力によるひび割れ状況の解析

解析3：引張力に対しては、異形鉄筋のくさび作用によって鉄筋の周方向に均等な変位を与えると仮定して、ひび割れ状況を確認した（図-8参照）。

(1), (2)の解析に共通して解析断面では、ひび割れの進展は水平方向であった。また、ひび割れがコンクリート内部側（あき方向）に達したときにコンクリートの鉄筋位置における引張応力がピークとなることが明らかとなった。また、図-9は鉄筋の水平面におけるコンクリートの作用荷重-変位との関係を示したものである。解析3における作用荷重は、鉄筋を横切るコンクリートの水平面における引張応力を積分して求めたものであり、強制変位は鉄筋に上端と下端の相対変位を表している。この結果から、両者でその傾きの大きさと増加傾向は類似しており、異なる種類の作用力であっても鉄筋を横切る水平面に着目すれば、同様に扱えると考えることができる。

4.2 解析モデル

有限要素解析の結果から、断面内でのコンクリートの変形が明らかとなったが、この結果を基に鉄筋の変形性状についてモデル化を試みた。ダウエル作用に対しては、既往の研究^[5]において弾塑性モデルとして示されているが、本研究では、引張力がこのモデルにおいてどのように影響するのか検討を行う。なお、弾塑性モデルの基本方程式は以下に示すとおりである。

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + ky = 0 \quad (y < y_r) \quad \cdots(1)$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + q = 0 \quad (y \geq y_r) \quad \cdots(2)$$

ここに、

EI ：鉄筋の曲げ剛性

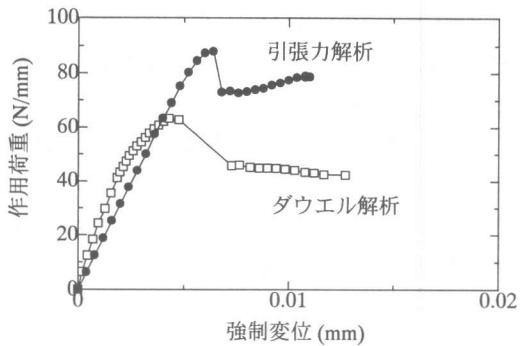
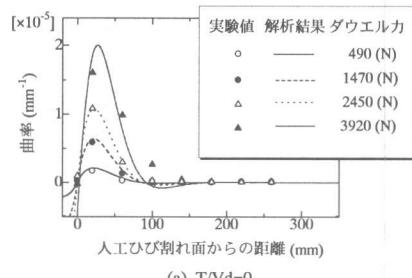
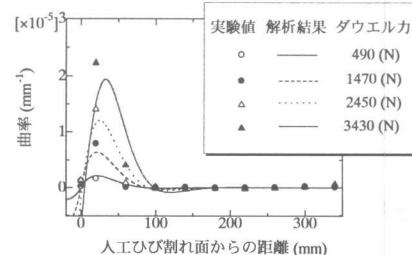


図-8 断面の解析結果



(a) $T/Vd=0$



(b) $T/Vd=2.19$

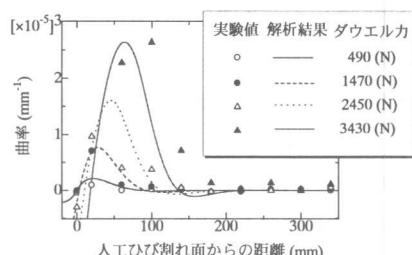


図-9 鉄筋の曲率分布

k : バネ定数
 y : 鉄筋のたわみ
 x : 人工ひび割れ面からの距離
 q : 塑性領域における鉄筋への作用力
 y_r : 弹性限界変位

5. 考察

5.1 鉄筋の変形性状

4.2 で示した解析モデルにおけるバネ定数

k は引張力の大きさにかかわらず断面の解析で得られた図-8 の作用力-変位関係の傾きを用いる。この値はダウエル力が小さい時の鉄筋の軸に沿った曲率分布に影響を与え、引張力の大きさにかかわらず、実験結果とモデルによる推定値とがよく一致することが確認された（図-9 参照）。また、弹性限界の y_r は、各供試体の実験で得られた曲率分布と一致させるように定めた。各供試体で定められたバネの性状を図-10 に表す。この結果から、引張力が大きくなるにつれてダウエル作用の弹性限界が小さくなることが示されている。なお、ダウエル力のみ作用する場合の弹性限界におけるバネ力は、断面の解析で得られた作用荷重のピーク値よりも大きいが、これは鉄筋に直交する平面内の2次元解析においては鉄筋周囲のコンクリートの鉄筋方向のカンチレバー的作用を表すことができないためと思われる。

モデルにおいて引張力の大きさによって弹性限界が異なる結果について考察する。異形鉄筋に引張力が作用するときに、図-11 に示すようにふしから斜めの方向にコンクリートを押し広げる作用力が働く（くさび作用）。その際、鉄筋のすべりとそれに伴って生じる押し広げられた鉛直方向（上下方向）へのコンクリートの変位は、ある範囲まではすべり変位と線形的な関係にあると考えられる。そこで、この鉛直方向へのコンクリートの変位をすべり S に比例すると仮定し、 αS と定義することにした。引張力による弹性限界の減少がこの αS によるものだと考えた。図-12 は、その概念を示したもので引張力の作用していない場合（ダウエル力のみ）の弹性限界に対して、引張力が作用した場合には αS だけ弹性限界が減少するということを表している。ここで、各供試体の人工ひび割れ位置における鉛直変位が弹性限界を迎えるときの鉄筋のすべり量を求めて α を導いた。すべり量の計算は島ら^[6]の異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係を用いた。表-3 は、各供試体の α を示したもので、この結果によればその値は 0.914~0.957 の範囲にあり、ほぼ一定値となった。

5.2 ひび割れ発生荷重について

弾塑性モデルにおいて、水平ひび割れ発生時の人工ひび割れにおける変位を終局変位 y_u として与え

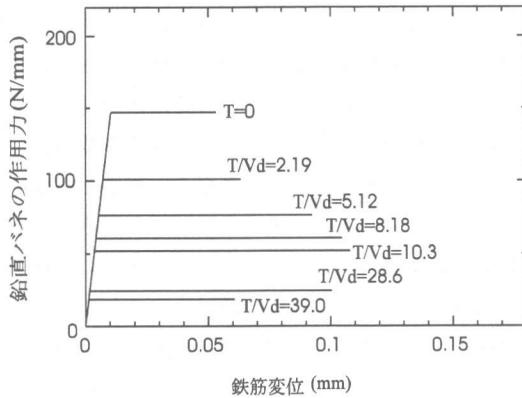


図-10 各供試体のバネの性状

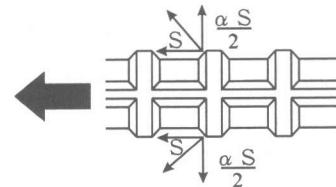


図-11 引張力によるくさび作用

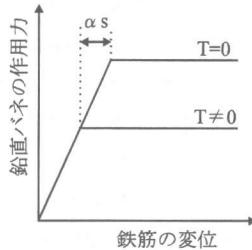


図-12 鉛直バネの概念

表-3 各供試体の α

Specimen No.	α
94-4	0.957
94-1	0.920
94-2	0.914
94-3	0.937
96-2	0.954

ることができる。図-10によれば、 y_u と引張力との相関は見出せないので、その値は平均値をとることとした。その結果、今回の実験における断面の場合には、 $y_u = 0.070\text{mm}$ となり水平ひび割れ発生の基準として与えることができる。しかしながら、引張力が卓越する場合には、すべり変位のような別のひび割れ発生基準が必要となる。なぜならば、ダウエル力の影響が小さくなればそれによる鉛直変位は小さくなるが、前述した節によるくさび作用の影響が支配的となるからである。本研究においては、その範囲におけるデータが不足しているので詳細な検討をすることができなかつた。そこで、引張力のみが作用した場合の水平ひび割れ発生荷重を供試体 No.96-3 で得られた引張力（水平ひび割れ発生時）を上限値とする簡単な仮定を設けることにした。図-13 は、上記のモデルによる水平ひび割れ発生荷重を算定したものである。実験結果を概ね予測していると言える。

6. まとめ

本研究において、はり供試体の軸方向鉄筋にダウエル力と引張力を作用させた実験およびはり断面の有限要素解析と鉄筋のダウエル変形モデルによる解析から以下の知見が得られた。

- (1) 実験において軸方向鉄筋に大きな引張力が作用するにつれて、小さなダウエル力で水平ひび割れが発生することが示された
- (2) 実験により水平ひび割れは徐々にはりの支点方向に進展するのではなく、ある荷重状態に達したときに急激に支点まで伸びることが確認された
- (3) ダウエル力と引張力が作用した場合の鉄筋のダウエル変形は、弾塑性モデルで表すことが可能である。その際、弾性限界変位は引張力の大きさに比例して減少する。
- (4) 水平ひび割れ発生基準は、鉄筋のダウエル変形に終局変位を設けることにより与えることができる。

謝辞

本研究遂行にあたり、北海道大学・佐藤 靖彦助手、木村 勉技官、後輩の小山 聰君はじめ同大学構造工学講座およびコンクリート工学講座の教職員、学生の方々に協力して頂き厚く感謝します。

参考文献

- [1] Krefeld,W.J. and Thurston,C.W. :Contribution of Longitudinal Steel to Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams, Journal of American Concrete Institute, 1966
- [2] R.jimenez, R.N. White and Gergely: Bond and Dowel Capacities of Reinforced Concrete, ACI Journal, 1979
- [3] 岡村 甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版
- [4] 亀谷 秀樹：鉄筋腐食によるかぶりひび割れ性状の解析的研究、北海道大学修士論文、1996
- [5] 古内 仁、葛野 尚文、角田 興史雄：鉄筋のダウエル作用による破壊強度と変形について、土木学会北海道支部論文報告集、第 44 号
- [6] 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、No.378/V-6,pp.165-174,1987.2

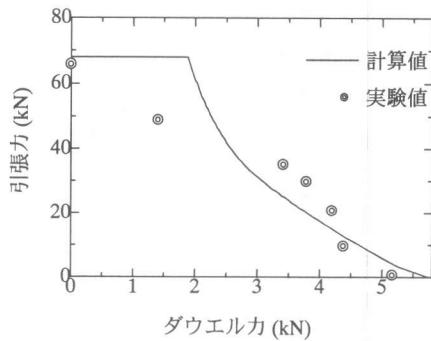


図-13 実験値と計算結果