論文 短繊維補強された RC はりの斜めひび割れ特性の評価

児玉 亘^{*1}·大寺 一清^{*2}·二羽 淳一郎^{*3}

要旨:試験体寸法および軸方向鉄筋比が短繊維補強された RC はりに生じる斜めひび割れの特性 に与える影響を把握することを目的として, RC はりのせん断載荷試験,試験時に撮影された画 像による画像計測,および非線形 FEM 解析を行った。その結果,せん断スパン有効高さ比およ び軸方向鉄筋比の増加にともない,斜めひび割れの角度は減少する傾向が認められた。また,斜 めひび割れ幅は,圧縮縁から有効高さの約3/4の深さにおいて最大となることを確認した。 キーワード:斜めひび割れ,角度,分布,短繊維補強,画像計測,非線形 FEM 解析

1. はじめに

コンクリートに長さ数 10mm の短繊維を混入し た短繊維補強コンクリートは、コンクリートの弱 点である引張力作用下における破壊力学特性が改 善され、靭性に富んだ複合材料である。現在では、 主に剥落防止を目的としたトンネル覆エコンクリ ートや高架橋上部構造に適用されている。さらに は、RC はりにおけるひび割れ発生・進展の抑制、 あるいはせん断耐力向上などに有効的であること が報告されている^{1),2)}。

コンクリートを構造部材として使用するために は、そのせん断耐力に関する適切な評価が必須と なるが、短繊維補強された RC はりのせん断耐力を 精度良く推定できる式は提案されていない。著者 ら³⁾は、斜めひび割れ面における力の釣合を考慮し た、短繊維補強された RC はりのせん断耐力推定手 法を提案した。しかしながら、検討に使用した実 験データ数が少ないため、斜めひび割れ特性(角度, ひび割れ幅,ひび割れ幅の分布)の定量化に関する 検討は不十分であった。

そこで、本研究では、短繊維補強された RC はりの斜めひび割れ特性を把握することを目的として、 RC はりのせん断載荷試験、試験時に撮影された画像による画像計測および非線形 FEM 解析を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に、使用したコンクリートの示方配合を 示す。コンクリートには、両端がフック加工され ている鋼繊維を、外割体積比率で1.0%混入した。 表-2に、鋼繊維の物性値を示す。示方配合にお いて、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減 水剤を、セメント量に対して0.3%添加した。

2.2 実験ケース

表-3に、実験ケースを示す。試験体は、せん 断スパン有効高さ比 *a*/*d*、有効高さ *d*、軸方向鉄筋 比 *p*wを変化させ、計5水準とした。

図-1に、試験体の概要を示す。斜め引張破壊 を再現するために、試験体断面を T 型とした。軸 方向鉄筋には、ネジ状 PC 鋼棒(SBPD930)を、組立 鉄筋には SD295A(f_{wy} =325MPa)を使用した。表-3 に、使用した軸方向鉄筋の断面積 A_s および降伏強 度 f_y を示す。また、軸方向鉄筋を十分定着させる ために、試験体端部より鉄筋を突出させ、アンカ ープレートを介してボルトで固定した。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は油圧式 2000 kN 万能試験機にて静的単調 2 点載荷を行った。可動支点と試験体の間には減摩

| | | 表一 | 1 示 | 方配合 | | | |
|------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|------|--|
| G _{max} | W/C | s/a | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
| (mm) | (%) | (%) | W | С | S | G | |
| 20 | 55 | 45 | 172 | 313 | 815 | 1000 | |

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

*2 前 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 修(工)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 教授 工博 (正会員)



| | | | 武歌14 门 | 11111111111111111111111111111111111111 | | | | | |
|----------|-----|------|--------|--|-------|----------|-------|---------------------|--|
| 試驗休夕※ | | 有効高さ | せん断スパン | ウェブ幅 | 試験体長さ | 断面積 | 降伏強度 | 軸方向鉄筋比 | |
| | a/d | d | а | b_w | L | A_s | f_y | $p_w(=A_s/(b_w d))$ | |
| | | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm^2) | (MPa) | (%) | |
| 25-200-A | 2.5 | 200 | 500 | 100 | 1600 | 387.1 | 1051 | | |
| 35-200-A | 3.5 | | 700 | | 2000 | | | 1.94 | |
| 45-200-A | 4.5 | 200 | 900 | 100 | 2400 | | | | |
| 35-200-В | 2.5 | | 700 | | 2000 | 794.2 | 1208 | 3.97 | |
| 35-400-A | 5.5 | 400 | 1400 | 200 | 3600 | 1588.4 | 1208 | 1.99 | |
| | | | | | | | | | |

*試験体名の表記方法: [a/d]-[有効高さ]-[軸方向鉄筋比を表す記号(2.0%以下を A, 2.0%以上を B とする)]

パッドを挿入し,支点の拘束による水平反力を取 り除いた。

測定項目は、荷重、変位(スパン中央および支点)、 コンクリートの圧縮縁ひずみ(スパン中央)、鉄筋ひ ずみ(スパン中央)、曲げひび割れ幅および斜めひび 割れ幅 w とし、目視により破壊モードおよびひび 割れの観察を行った。斜めひび割れは位置に依存 して水平方向に対する傾きが変化したため、その 角度βは斜めひび割れが軸方向鉄筋位置と交わる 点と斜めひび割れの先端を直線近似することで得 た角度とした。wは、二軸型亀裂変位計をせん断ス パン内に配置し、得られた測定値を、βを用いてひ び割れの直交方向に変換することによって求めた。

2.4 画像計測方法

本研究では,格子法⁴⁾による画像計測を行った。 この方法は,試験体に貼付したターゲットの動き をデジタルカメラなどで撮影し,ひずみを算出す る方法である。図-2に,本研究の計測手順を示 す。まず,試験体に直径 5mm あるいは 9mm の赤 色のターゲットを格子状に貼付し,デジタルカメ ラを用いて載荷にともなうターゲットの移動量を 撮影した。得られた画像から画像処理によりター ゲットのみを抽出し,その重心の座標を求めた。 画像処理には汎用の画像処理ソフトを用いた。こ うして得たターゲットの座標位置を節点とする定 ひずみ三角形要素を作成し,有限要素法の手法を 用いてひずみを算出した。



0.01mmまで直読可能なマイクロメータを用いて, 計測精度の確認を行った。マイクロメータにター ゲットを配置し,ターゲットの位置を 0.1mm 刻み で 3.0mm まで移動させ,画像計測による計測値と マイクロメータの設定値を比較した。図-3に, その結果を示す。両者の値はほぼ一致しており, 0.1mm刻みの微細なターゲットの移動に対しても, 十分な計測精度を有していることがわかる。

| 了一个小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小 | | | | | | | | | | | |
|---|----------|----------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------|----------|------------|
| | 試験体名 | <i>f</i> _c ' (MPa) | f_t (MPa) | G_F (N/m) | V _{exp} (kN) | V_c (kN) | V _{exp} /V _c | v _{exp} (MPa) | v_{sta} | β (度) | w_u (mm) |
| | 25-200-A | 24.7 | 2.03 | 4039 | 57.1 | 28.5 | 2.00 | 2.9 | 0.98 | 38.2 | 0.76 |
| | 35-200-A | 40.7 | 2.96 | 5193 | 65.4 | 29.5 | 2.21 | 3.3 | 0.95 | 26.1 | 1.85 |
| | 45-200-A | 31.6 | 2.53 | 4538 | 50.9 | 25.0 | 2.03 | 2.5 | 0.80 | 22.8 | |
| | 35-200-В | 29.9 | 2.28 | 4501 | 64.9 | 33.8 | 1.92 | 3.2 | 1.05 | 21.8 | 1.59 |
| | 35-400-A | 29.9 | 2.38 | 4375 | 214.4 | 90.3 | 2.37 | 2.7 | 0.86 | 24.7 | |

表一4 試験結果

3. 実験結果

3.1 試験結果

表-4に、使用したコンクリートの材料特性お よび載荷試験結果を示す。ここで、 f_c および f_t はそ れぞれ使用したコンクリートの圧縮強度、引張強 度であり、破壊エネルギー G_F は、JCI 規準 JCI-S-001-2003 および JCI-S-002-2003 に準拠した 切欠きはりの 3 点曲げ試験の結果から算出した。 また、 V_c は、次式⁵⁾によって算出した普通コンクリ ートにおけるせん断耐力である。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} \left(\frac{d}{1000}\right)^{-1/4} p_w^{1/3} \left(0.75 + 1.4\frac{d}{a}\right) b_w d \qquad (1)$$

すべてのケースにおいて、 G_F は 4000N/m より大 きな値を示した。一般に、短繊維を混入しない普 通コンクリートの G_F は 100N/m 程度であることか ら、鋼繊維を 1.0%混入することにより、 G_F は 40 倍以上に増大しており、破壊力学特性が大きく改 善されていることが確認できる。

せん断載荷試験において、すべての試験体で斜め引張破壊が観察された。ここで、本研究では試験体寸法をパラメータとしているため、せん断耐力 V_{exp} を断面積 b_ud で除すことによって公称せん断強度 v_{exp} を求め、さらに、 f_c に起因したせん断強度 v_{exp} のばらつきを考慮するため、 $v_{exp} を f_c$ の1/3 乗で除すことで、補正された公称せん断強度 v_{sta} を算出した。なお、表中に示す w_u は、最大荷重時に二軸型亀裂変位計により測定されたwの最大値とした。

表中の V_{exp}/V_c の値から,鋼繊維を 1.0%混入する ことによって, せん断耐力は普通コンクリートの 2 倍程度に増大していることがわかる。試験のパラ メータによる影響について検討すると, a/dの増大 にともない, v_{sta} およびβは減少し, w_u は増加した。 また, p_w が増加するほど, v_{sta} は高くなり, βおよ び w_u は減少する傾向がみられた。一方, d がβに及



ぼす影響は小さいことがわかった。しかし, 試験 体 35-200-A および 35-400-A の v_{sta}は, それぞれ 0.95, 0.86 であり, 短繊維補強された RC はりのせん断強 度に関する寸法効果を確認することができた。

図-4に、二軸型亀裂変位計を用いて w を測定 することができた3体の試験体について、wのはり 深さ方向の分布,および著者らが仮定した三角形 モデル³⁾を示す。ここで、正規化ひび割れ幅とは、 最大荷重時に各試験体にて測定された斜めひび割 れ幅wをその最大値wuで除した値w/wuである。試 験体 35-200-B では、試験体の両方のせん断スパン で w を測定できたため、最大荷重時に斜めひび割 れがフランジ部まで達し,試験体の破壊に支配的 となった側を1,もう一方を2として,両者の結果 を示した。正規化ひび割れ幅は、圧縮縁からの深 さが 0.5~0.8d の位置で最大となり、軸方向鉄筋位 置ではほぼ 0 となることが確認された。三角形モ デルと比較すると、wが最大となる深さに多少のば らつきがみられるものの,wははり深さ方向に応じ た変化、すなわち、軸方向鉄筋位置に近づくほど 減少する傾向がみられ、三角形モデルとほぼ同様 の傾向を示していることがわかる。

3.2 画像計測結果

図-5(a)および(b)に,斜めひび割れ発生後お よび最大荷重時に試験体 35-200-Bのウェブに発生 した主引張ひずみ分布を,(c)に最大荷重時に撮影

した試験体画像を、(d)に荷重-たわみ関係をそれ ぞれ示す。斜めひび割れ発生後に、2%程度のひず みの集中域が斜めひび割れ位置に形成されている ことがわかる。図-5(a)(b)を比較すると, 主引 張ひずみは、荷重の増加とともに一つの斜めひび 割れ位置に集中するようになり、そのひび割れが 試験体の破壊を支配する形で斜め引張破壊に至っ たことが確認できる。また、ひずみの集中域が斜 め上下方向に拡大していることがわかる。短繊維 を混入しない普通コンクリートでは、斜めひび割 れの発生と同時に、急激な荷重低下をともなう斜 め引張破壊を生じる。しかし、短繊維を混入した 場合には、斜めひび割れが発生しても、繊維の架 橋効果により、荷重の増加が継続し、ひずみの集 中域が拡大することで、終局状態に達することを 確認した。図-5(c)に示す試験体画像と比較する と、本手法により斜めひび割れの位置および形状 を正確に再現できたといえる。

この画像計測結果を用いて、最大荷重時の主引



張ひずみ分布について検討した。ここでは、同一 高さにおける要素を比較して、主引張ひずみの最 大値を抽出し、それぞれの高さで抽出した主引張 ひずみを,その最大値 Emax で除すことによって,正 規化主引張ひずみを算出した。図-6に、このよ うにして得た正規化主引張ひずみのはり深さ方向 の分布を示す。前述の三角形モデルと同様に、正 規化主引張ひずみが最大となる要素は圧縮縁から の深さがおおよそ(3/4)d となる位置に集中してお り、圧縮縁および引張縁に近づくにつれて、正規 化主引張ひずみの値は減少する傾向となった。な お、試験のパラメータが、このひずみ分布の形状 に与える影響は明確でなかった。また、圧縮縁か らの深さが 0.3d 以内, すなわちフランジ部では, 正規化主引張ひずみの値が 0.3 以下の比較的小さ な値であったことから,最大荷重時には,フラン ジ部に大きな斜めひび割れが形成されていないこ とが示唆される。以上より、すべての試験体にお いて、図-4で示した二軸型亀裂変位計による測 定値とほぼ同様の傾向を示した。

4. 非線形 FEM 解析

4.1 解析概要

解析コード DIANA を用いた 2 次元非線形 FEM 解析を行うことで、さらに、斜めひび割れ特性の





| 表-5 実験結果と解析結果の比較 | | | | | | | | |
|------------------|-----------|-----------|------------|---------------|---------------|----------------|-----------|-----------|
| | せん断耐力 V | | | | 角度β | ひび割れ幅 w | | |
| 試験体名 | V_{exp} | V_{FEM} | V_{FEM} | β_{exp} | β_{FEM} | β_{FEM} | W_{exp} | W_{FEM} |
| | (kŃ) | (kN) | $/V_{exp}$ | (度) | (度) | $/\beta_{exp}$ | (mm) | (mm) |
| 25-200-A | 57.1 | 58.9 | 1.03 | 38.2 | 37.2 | 0.97 | 0.76 | 2.44 |
| 35-200-A | 65.4 | 66.2 | 1.01 | 26.1 | 27.7 | 1.06 | 1.85 | 3.06 |
| 45-200-A | 50.9 | 46.5 | 0.91 | 22.8 | 24.1 | 1.06 | | 5.00 |
| 35-200-В | 64.9 | 60.9 | 0.94 | 21.8 | 21.5 | 0.98 | 1.59 | 1.95 |
| 35-400-A | 214.4 | 208 | 0.97 | 24.7 | 21.8 | 0.88 | | 4.28 |

検討を試みた。解析において、コンクリートには8 節点アイソパラメトリック平面応力要素を、鉄筋 には埋込み鉄筋要素を使用した。ひび割れモデル については、コンクリートの複雑なせん断伝達機 構に基づいて、精度良く解析できるモデルはほと んど提案されていないため、簡便なモデルである 回転ひび割れモデルを使用した。解析に用いたコ ンクリートの構成則を図-7に示す。斜め引張破 壊となるケースを対象としているため、圧縮モデ ルには Thorenfeldt モデルを使用し、鋼繊維混入に よる影響は考慮しないこととした。引張モデルに は切欠きはりの3 点曲げ試験より実際に得られた 引張軟化曲線のひび割れ幅を要素幅で除してひず みとしたモデルを用いた。

この解析結果に基づき,斜めひび割れの角度βを, 図-8に示すように決定した。つまり,最大荷重 時に同一高さにおけるガウス点の中から,主引張 ひずみが最大値となるガウス点を抽出し,有効高 さ内でプロットし,最小二乗法によって直線近似 し得られた直線の水平方向に対する角度をβとし た。また,最大荷重時における主引張ひずみの最 大値に要素幅を乗じた値をひび割れ幅 wFEM とした。

4.2 解析結果

(1) 実験結果との比較

表-5に、実験および FEM 解析により得られた せん断耐力 V, 斜めひび割れ角度 β , およびひび割 れ幅の最大値 w を示す。なお、解析において、圧 縮強度 f_c , ヤング係数 E_c および引張軟化曲線には、 実験値を用いた。V および β について、解析と実験 を比較すると、実験値に対する解析値の比はそれ ぞれ、0.97~1.03、0.88~1.06 となり、FEM 解析に よって、精度良く再現できていることがわかる。

wについては, w_{FEM} が w_{exp} を大きく上回った。

解析ケ ・ス 名称 $p_w(\%)$ a/d $d \,(\mathrm{mm})$ 15-200-194 1.5 2.5 25-200-194 35-200-194 200 3.5 45-200-194 4.5 1.94 55-200-194 5.5 100 35-100-194 35-400-194 400 35-800-194 800 3.5 35-200-099 0.99 35-200-397 200 3.97 35-200-570 5.70

この理由としては、等価長さの定め方が明確でな いことや、回転ひび割れモデルでは斜め引張破壊 時のひび割れの回転が急激で、斜めひび割れの再 現性に乏しいこと^のが挙げられる。しかし、解析に おいても、a/d、dの増大および p_w の減少とともに、 ひび割れ幅が大きくなる傾向を表現することがで きた。このため、a/d、dおよび p_w の値を変化させ た FEM 解析によるパラメトリックスタディを行い、 β および主引張ひずみの分布について検討した。

(2) パラメトリックスタディ

表-6に、解析ケースを示す。a/d、dおよび p_w を変化させ、計 11 ケースについて解析を行った。 すべてのケースにおいて f_c =30MPa、 E_c =25GPa、 f_f =2.5MPa、 G_F =4500N/m とした。

解析より得られた β_{FEM} および主引張ひずみが最 大となる深さを図-9に示す。実験結果と同様に, a/dの増加とともに β_{FEM} は減少した。しかし,a/d=4.5以上となると、 β_{FEM} がa/dの値によらず 20 度程度 で一定となった。グラフ上に実線で示した角度 α は, 載荷点と支点上方の軸方向鉄筋位置を直線で結ぶ ことにより求めた角度であり(図-8参照),a/dを 用いて表すことができる。 $\alpha \ge \beta_{FEM}$ を比較すると、 両者の絶対値は異なるが,a/dの増大による α およ び β_{FEM} の低下割合はほぼ等しく、 β_{FEM} は α と強い相 関があると考えられる。dを変化させると、 β_{FEM} は



20~25 度で変化したものの, $d \ge \beta_{FEM}$ の間に相関 があるとはいえなかった。また, p_w の増大にとも ない β_{FEM} は減少する傾向がみられた。

主引張ひずみが最大となる深さは、圧縮縁から 0.6~0.85d 程度であり、a/d、dおよび p_w の違いに よる影響を確認することはできなかった。

解析より得られた主引張ひずみのはり深さ方向 の分布形状について、3.2節と同様の方法を用いて 検討する。図-10 は、すべてのケースにおける結 果をプロットし,三角形モデルと比較した結果で ある。各深さにおいて、正規化主引張ひずみにば らつきがあるものの, a/d, d および pwの違いによ る顕著な傾向は認められなかった。主引張ひずみ が最大となる点は圧縮縁からの深さがおおよそ (3/4)d の付近に位置し、圧縮縁に近づくにつれて、 正規化主引張ひずみの値が 0 に近づく傾向を確認 した。また、各深さにおける平均値を結ぶと、三 角形モデルと形状がほぼ一致した。このことから, FEM 解析の結果においても、二軸型亀裂変位計を 用いて実測した斜めひび割れ幅の分布、および画 像計測より得られた主引張ひずみの分布といずれ も同様の傾向が認められた。

5. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- 斜めひび割れの角度βは, a/d および pwの増大 とともに減少し, a/dを用いて表すことができ る角度αと相関があることを確認した。また, d の影響は受けないことを確認した。
- (2) 二軸型亀裂変位計を用いて計測された斜めひ び割れ幅の分布,画像計測および FEM 解析に



よって得られた主引張ひずみの分布より, 圧縮 縁からおおよそ(3/4)dの深さにおいて, 斜めひ び割れ幅が最大となることを確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり,(財)電力中央研究所の酒 井理哉氏,松尾豊史氏,(株)ブリヂストンの深津章 文氏にご助力を頂きました。謝意を表します。

参考文献

- 柳博文ほか:鋼繊維補強コンクリートのひび割 れ分散効果に対する実験的研究,コンクリート 工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1225-1230, 1998.6
- 2) 土木学会:鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), 1999.11
- 児玉亘ほか: 短繊維補強された RC はりのせん 断耐力に関する研究, コンクリート工学年次論 文集, Vol.26, No.2, pp.1501-1506, 2004.6
- 4) 矢川元基ほか:点認識画像処理を用いた非接触 ひずみ解析法,日本機械学会論文集(A 編),第
 49巻,447号,pp.1435-1443,1983.11
- 5) 二羽淳一郎ほか: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論 文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 6) 山谷敦ほか:回転ひび割れモデルによる RC は りのせん断挙動解析,土木学会論文集, No.62/V-43, pp.187-199, 1999.5