

論文 横方向プレストレスRC柱の能動的拘束効果と破壊メカニズム

宮野 覚也^{*1}・篠原 保二^{*2}・渡部 洋^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨: 横補強筋を用いてプレストレスを導入し、能動的に三軸圧縮応力状態を作り出した RC 柱の拘束効果と破壊メカニズムを解明するため、三次元有限要素法解析を行った。その結果、横方向プレストレスを導入することによって、表面近傍のコンクリートは横補強筋位置において損傷を受けるが、部材内部のコンクリートは等価拘束圧が上昇するために、せん断ひび割れの発生、および、せん断ひび割れ幅の成長が抑制され、部材の剛性低下の開始を遅らせることができ、耐力も上昇させる効果があることが分かった。

キーワード: プレストレストコンクリート, 損傷度, 等価拘束圧, 能動的拘束効果, FEM

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱は、上部構造の自重を支持する役割を担うため、大地震に対しても粘り強く抵抗する必要がある。そのため、現在の設計においては、せん断補強筋を密に配筋することによって、コンクリートの膨張による横補強筋の拘束力や、ひび割れ発生後の鉄筋の引張力に期待している。横補強筋を持たないプレーンコンクリートに比べ、そのような粘り強いコンファインドコンクリートを梁および柱部材等の断面の圧縮部分に用いると、それらの部材は粘り強く耐震的なものになる。さらに、建物の高寿命化のためには過大なひび割れを防止しなければならない。そこで、積極的な策として、高強度横補強筋を使用し、横方向プレストレスを導入することにより、能動的に三軸圧縮応力状態を作り出す実験的研究^{1),2)}が進められている。

本研究では、コンクリート強度とプレストレスの導入量を変動要因とした計 6 体の横方向プレストレス RC 柱を対象とし、三次元有限要素法解析（汎用ソフト DIANA）により、その RC 柱の能動的拘束効果と破壊メカニズムに及ぼす横方向プレストレスの影響について検討した。

2. 解析概要

2.1 対象試験体・要素分割

解析対象試験体、および要素分割図を図 - 1 に示す。試験区間は 900 mm で、現在研究が進

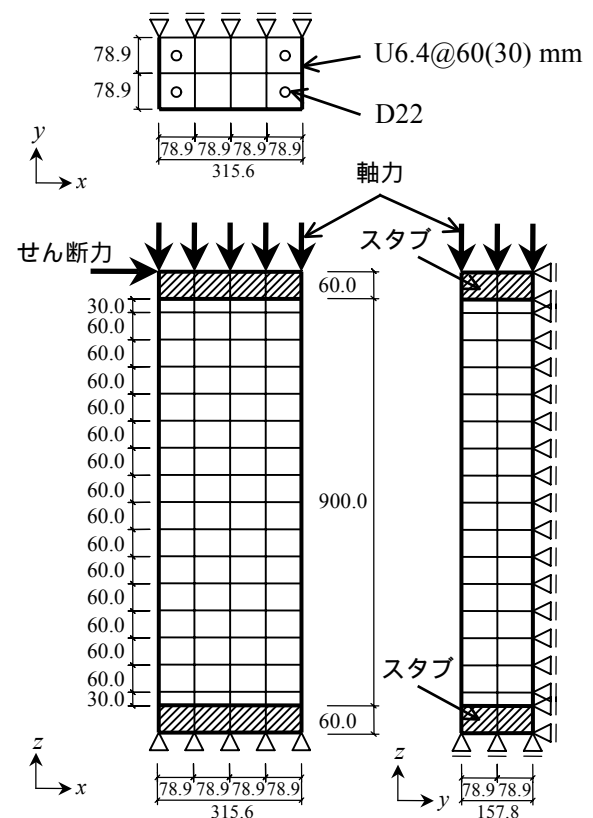


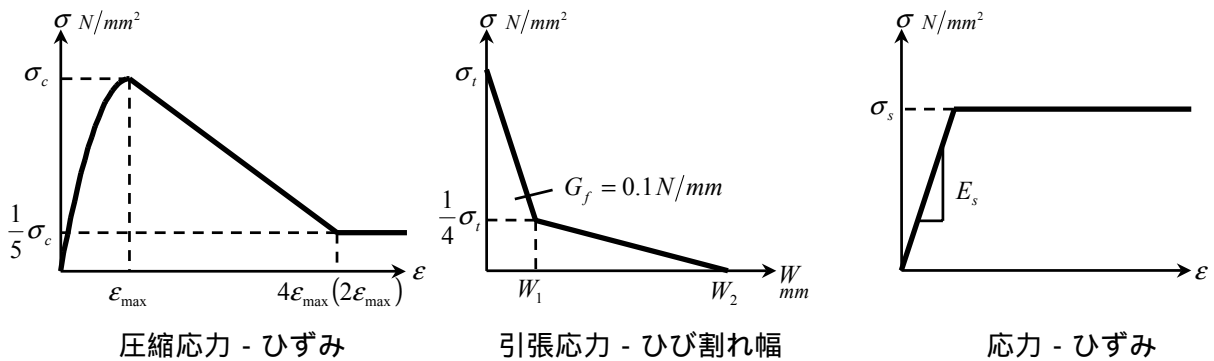
図 - 1 試験体・要素分割図 単位: mm

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 (正会員)

*2 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 博士 (工学) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻 修士 (工学) (正会員)

*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 博士 (工学) (正会員)



σ_c (N/mm ²)	ε_{max}	σ_t (N/mm ²)	W_1 (mm)	W_2 (mm)	E_c (N/mm ²)	ν
30	0.002	2.2	0.041	0.2	2.57E+04	0.2
60	0.002	3.5	0.026	0.13	3.35E+04	0.2

コンクリート

	σ_s (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)
D22	1019.1	1.97E+05
U6.4	1440.8	1.97E+05

鉄筋

図 - 2 構成則

められている実験ではコンクリートのかぶりを含めて、幅×せいが 340 mm×340 mm であるが、本解析ではコア部のみを解析対象としている。また、試験体の対称性を考慮して断面（x-y 面）を 1/2 としている。対称切断面においては y 方向のみ支持した。逆対称加力とするため、上面節点の鉛直変位を一定とする Tying を設定し、端部にはコンクリートに対して十分な剛性を持った線形材料のスタブを設けている。加力は始めに、横補強筋要素に初期応力（導入量 40%に相当する 500 N/mm² または導入量 80%に相当する 1000 N/mm²）を設定することでコンクリートにプレストレスを導入し、続いて荷重制御で軸力比 0.3 に相当する軸力（Fc30 のシリーズには 500 kN、Fc60 のシリーズには 1000 kN）を加えた後、変位制御でせん断力を与えている。

2.2 構成モデル概要

コンクリートおよび鉄筋の材料特性を図 - 2 に示す。なお、圧縮応力 - ひずみに示した（）内は高強度コンクリートの場合である。コンクリートには 20 節点アイソパラメトリック・ソリッド要素を用いて、圧縮領域には Drucker-Prager 破壊基準を採用し、応力上昇部分には土木学会のコンクリート標準示方書の式を使用した。ヤング係数は RC 構造計算規準・同解説の式より算出している。内部摩擦角は Richart らの拘束圧

表 - 1 解析モデル一覧

試験体名	コンクリート強度	プレストレス導入量
Fc30-0	30 (N/mm ²)	0 (N/mm ²)
Fc30-500	30 (N/mm ²)	500 (N/mm ²)
Fc30-1000	30 (N/mm ²)	1000 (N/mm ²)
Fc60-0	60 (N/mm ²)	0 (N/mm ²)
Fc60-500	60 (N/mm ²)	500 (N/mm ²)
Fc60-1000	60 (N/mm ²)	1000 (N/mm ²)

縮実験に基づき、37.5°としている。引張領域の軟化特性には篠原³⁾のバイリニアモデルを使用し、ひび割れによるせん断剛性の低下については、ひび割れひずみの関数としている。主筋は埋め込み鉄筋要素を用いて、横補強筋には曲げを考慮することのできる梁要素⁴⁾を用いた。鉄筋の材料定数は引張試験による値で、ひずみ硬化は考慮していない。破壊基準は Von Mises 型モデルを用いてバイリニアとしている。鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とした。

3. 解析結果

3.1 せん断力 - 変位関係

図 - 3 の解析結果は、上側はせん断力と水平変位の関係、下側が軸方向変位と水平変位の関係を示す。Fc30 のシリーズにおいては、せん断力が低下するか、ほぼせん断力が一定となるまで解析できており、これを最大せん断耐力と定義する。また、Fc60 のシリーズでは、圧縮軟化

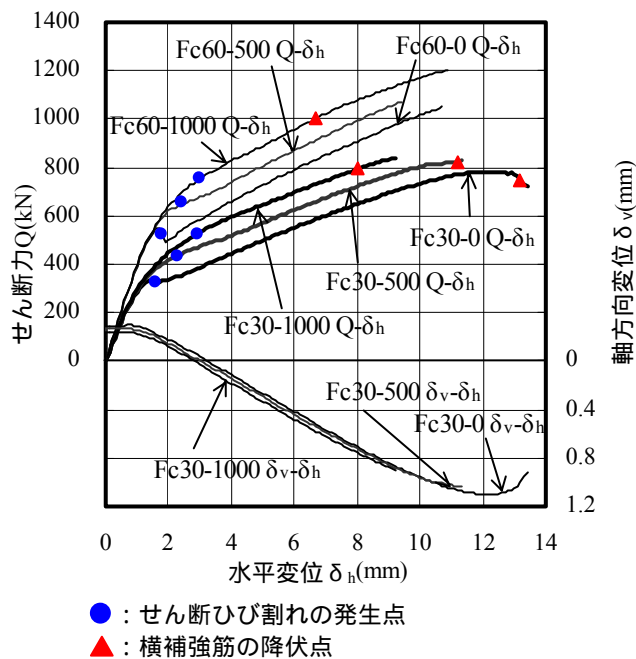


図 - 3 せん断力 - 変位関係

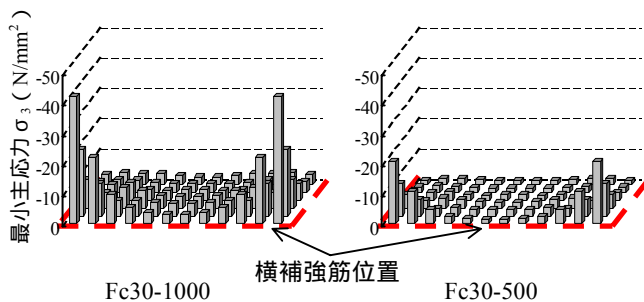


図 - 4 プレストレス導入時の最小主応力の分布

勾配を Fc30 の 2 倍 (図 - 2 参照) としたことで急激な圧縮破壊を引き起こし、解析が発散したため、最大せん断耐力を定義出来なかった。両シリーズともプレストレスを導入することにより、せん断ひび割れ発生時の水平変位は Fc30-0 に対し、Fc30-500 で 1.4 倍、Fc30-1000 で 1.8 倍となり、Fc60-0 に対し、Fc60-500 で 1.3 倍、Fc60-1000 で 1.7 倍となったことから、せん断ひび割れ発生を遅らせる効果があることが分かる。また、導入量が多くなるに伴い横補強筋の降伏は早い段階で生じている。最大せん断耐力は Fc30-0 に比べ Fc30-500 で 1.05 倍、Fc30-1000 で 1.07 倍上昇する。Fc30-0 は水平変位 12 mm を越え、せん断力の低下に伴って、軸方向変位も減少に転じ、圧縮破壊している。図 - 4 よりプレストレス導入時の Fc30-1000 と Fc30-500 の

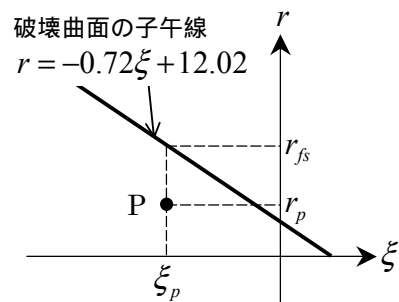


図 - 5 損傷度の概念図

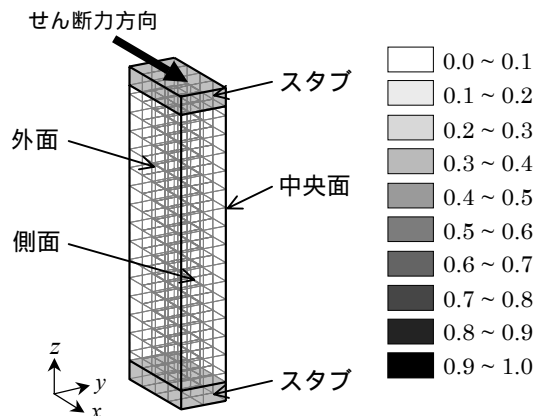
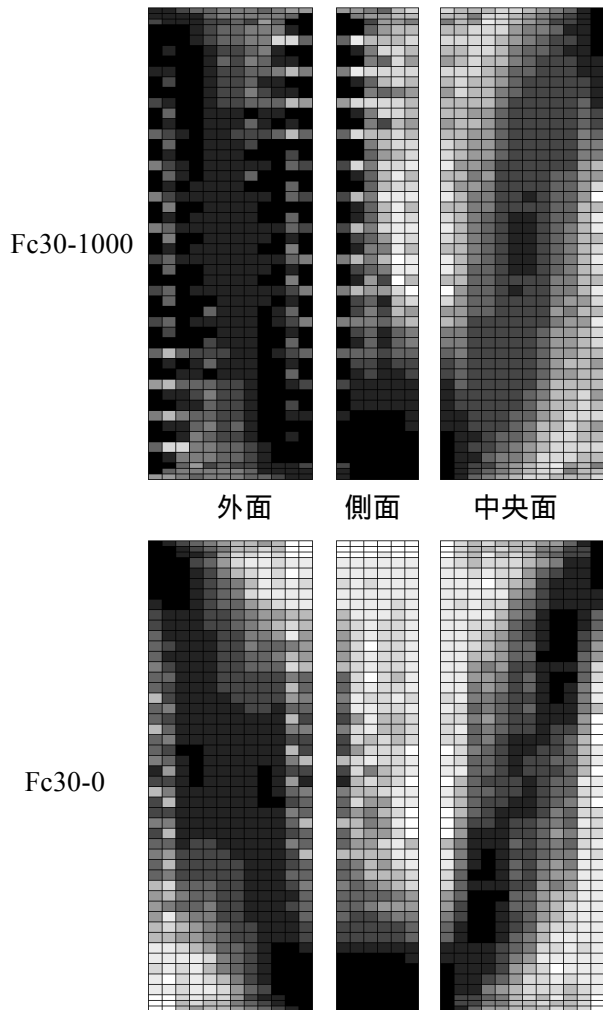


図 - 6 損傷度の比較 (水平変位 5 mm)

横補強筋位置の断面（x-y 面）における最小主応力分布は、Fc30-1000 は - 2.5 ~ - 42.3 N/mm² で、Fc30-500 では - 1.3 ~ - 20.7 N/mm² であった。

3.2 損傷度⁵⁾

ここで用いる損傷度 D_r は、図 - 5 に示すように、（Drucker-Prager の）破壊曲面の偏差応力 r_{fs} に対するその時点の偏差応力 r_p との比とし、静水圧軸（ ξ 軸）上で 0、破壊曲面上で 1 と定義した（ $D_r = r_p / r_{fs}$ ）。ただし、 I_1 は応力の一次の不変量、 J_2 は偏差応力の二次の不変量であり、 $\xi = I_1 / \sqrt{3}$ 、 $r = \sqrt{2J_2}$ とする。

図 - 6 に Fc30-1000 と Fc30-0 の水平変位 5 mm 時のガウス積分点における損傷度を示す。なお、この水平変位時のせん断力は Fc30-1000 が Fc30-0 に比べ 1.29 倍となっている。この時点ではコンクリートは圧縮応力 - ひずみにおいて軟化領域には至っていない。外面においては Fc30-1000 の方が損傷度は大きい、これはプレストレスを導入することによりコーナー部のコンクリートが局所的に損傷しているためであり、プレストレス導入時から高い損傷度となっていた。中央部に関しては、Fc30-1000 の方が損傷度は少なく、圧縮破壊を抑制していることが分かる。Fc30-500 に関しては Fc30-0 と Fc30-1000 の中間的な損傷の程度であった。

横補強筋降伏以降の Fc30-1000 は図 - 3 で示したように、最大せん断耐力以前に横補強筋が降伏し、横方向の拘束が一定となって拘束効果が低減するためコンクリートの損傷が増大し、最大せん断耐力以降に横補強筋が降伏する Fc30-0 よりも損傷が大きくなる傾向が見られた。

3.3 等価拘束圧⁵⁾

拘束効果の尺度として用いる等価拘束圧とは、一般応力状態を側圧一定の三軸圧縮実験経路上の応力分布に換算した場合の側圧と定義する。側圧 σ_c 一定の三軸圧縮試験においては、図 - 7 (a) のように主応力を仮定した場合、図 - 7 (b) における応力点 A の座標は次のようになる。

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}(3\sigma_c + \sigma_z) \quad (1)$$

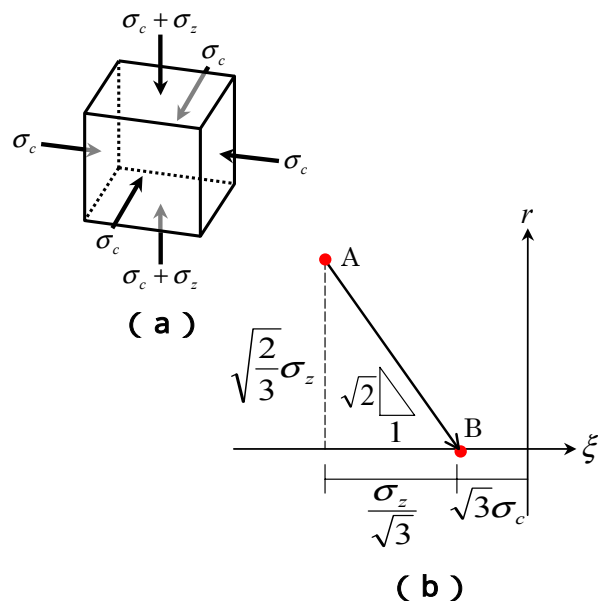


図 - 7 等価拘束圧の概念図

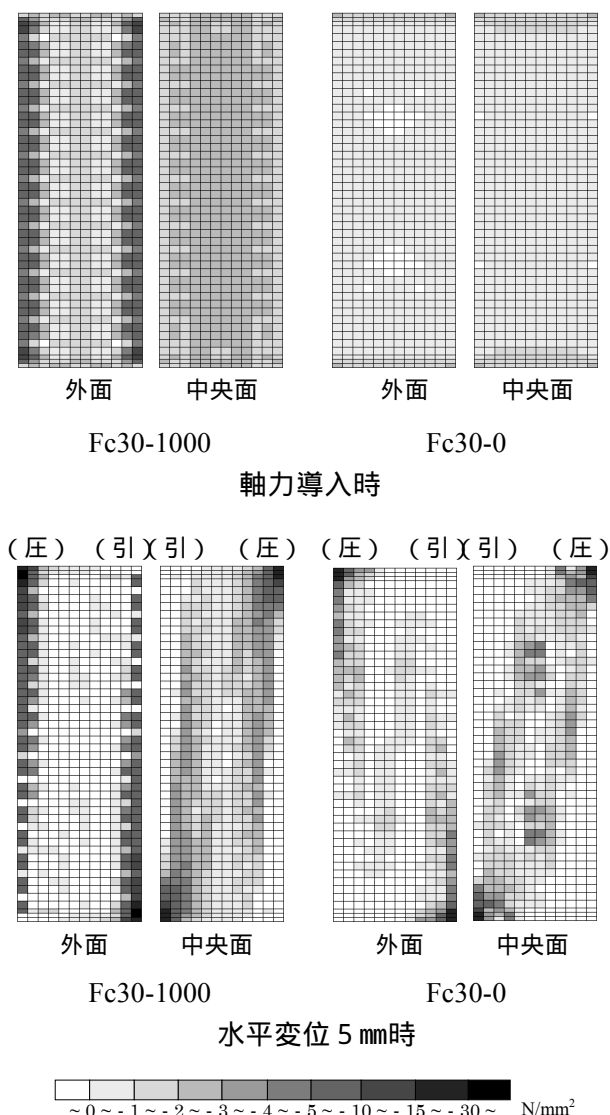


図 - 8 等価拘束圧の比較

$$r = \sqrt{2J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_z \quad (2)$$

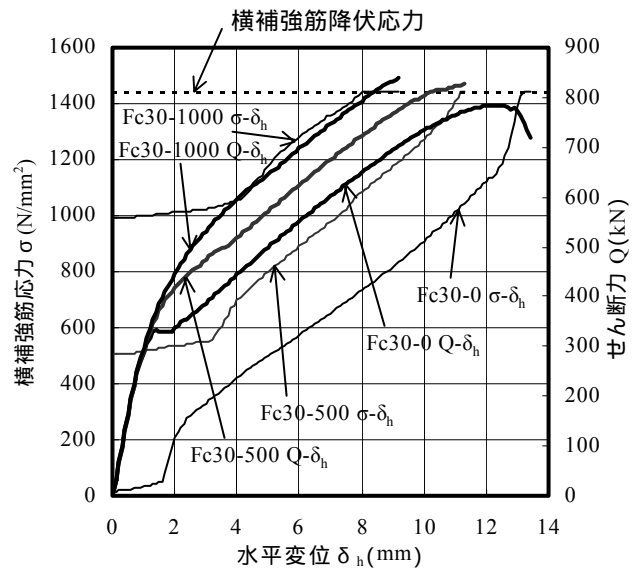
それ故、応力点 A の等価拘束圧は、傾き $-\sqrt{2}$ の直線と静水圧軸（ ξ 軸）との交点 B の静水圧 σ_c となる。

図 - 8 に軸力導入時と水平変位 5 mm 時の Fc30-1000 と Fc30-0 の等価拘束圧の比較を示す。なお、面位置は図 - 6 で用いた面と同様である。これより、軸力導入時において Fc30-1000 の外面のコーナー部は、プレストレスを導入している横補強筋により囲まれた局所部分で 8.7 N/mm^2 の高い等価拘束圧となっており、中央部では約 2.5 N/mm^2 となっている。一方 Fc30-0 に関しては、軸力とポアソン効果による横補強筋の受動的な等価拘束圧はわずかであり、外面のコーナー部は 0.2 N/mm^2 で、中央部は約 0.1 N/mm^2 となっている。水平変位 5 mm 時には、Fc30-1000 の中央部では全体的にほぼ一様な等価拘束圧（約 3 N/mm^2 ）が広がっているのに対し、Fc30-0 の中央部では、局所的に高い等価拘束圧（ 4.5 N/mm^2 ）があるが全体的には 0.6 N/mm^2 となっている。

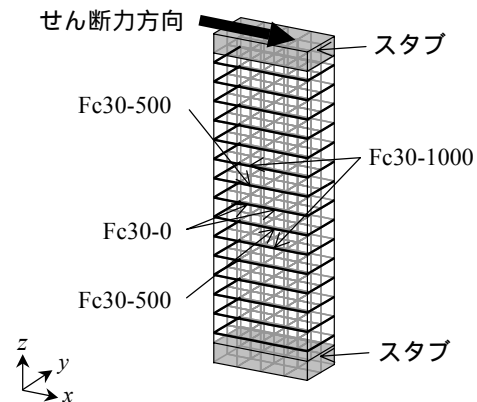
3.4 横補強筋応力 - 水平変位関係

図 - 9 (a) に横補強筋応力およびせん断力と水平変位関係を示す。左側の縦軸に横補強筋の応力を、右側の縦軸には部材のせん断力を示す。ここで用いる横補強筋応力は、各試験体において初めに降伏した横補強筋点を取り出している。その位置は図 - 9 (b) に示した通りであり、プレストレスの導入量が多くなるに従って、降伏する横補強筋の位置は部材の中心部よりも端部方向へ移動するが、その近傍の横補強筋も降伏応力に近いことから、プレストレスを導入することで図 - 8 に見られる一様な等価拘束圧を有する領域が広がったと考えられる。

図 - 9 より Fc30-0 に関しては、水平変位 1.5 ~ 2 mm の区間において部材のせん断力 - 水平変位関係でせん断力は上がらずに水平変位のみ進行する降伏棚のような現象が起きており（図



(a)



(b)

図 - 9 横補強筋応力 - 水平変位関係

- 3 参照) これと同時に横補強筋の応力も急激に増加している。さらに、水平変位が 12 mm を越え、せん断力の低下が始まると同時に横補強筋応力が急増していることから、せん断ひび割れが成長し、耐力を失ったものと推測される。Fc30-500 および Fc30-1000 に関しては、部材のせん断力 - 水平変位関係には Fc30-0 のような降伏現象は現れず、横補強筋応力 - 水平変位関係では、せん断ひび割れに起因したと思われる横補強筋応力の上昇は Fc30-0 に比べ遅れているが、せん断ひび割れ発生後の横補強筋応力は 3 試験体ともほぼ同じ勾配で上昇する。Fc30-500 では Fc30-0 と同様、ひび割れの成長に伴う鉄筋応力の急上昇によって最大せん断耐力に達する。一方 Fc30-1000 では、水平変位 8 mm で横補強

筋が降伏応力に達した後も耐力上昇が見られるが、さらなる横拘束が期待できずコンクリートの圧縮破壊面に達したものと思われる。

また、ひび割れ間隔が同じ場合、鉄筋の応力上昇に伴うひずみ増分がひび割れ幅に関係するので、鉄筋降伏以前のひび割れ幅は Fc30-0 の試験体のひび割れ幅に対し、Fc30-500 は 64%、Fc30-1000 では 27%となり、プレストレスの導入がひび割れ幅を抑制していることが分かる。

3.5 ひび割れひずみ図

図 - 10 には Fc30-0 のせん断ひび割れが進行し始める水平変位 2 mm 時、外面のひび割れひずみベクトルを示す。これは、ガウス積分点におけるひび割れのひずみベクトルであるため、実際のひび割れはこのベクトルと直交する。この図より、Fc30-0 ではせん断ひび割れが圧縮ストラットに沿っている。一方 Fc30-1000 では曲げせん断ひび割れは入っているが、せん断ひび割れは入っていないことが確認できる。

4. まとめ

本解析より、以下の知見が得られた。

- 1) 横補強筋を用いてプレストレスを導入することにより、せん断ひび割れの発生およびひび割れ幅の成長が抑制される。
- 2) プレストレスの導入量が多くなるにつれ、横補強筋の降伏は早まるが、部材高さ中心部でコンファインドコンクリートとなる領域が広がり、最大せん断耐力が上昇した。
- 3) 横補強筋に囲まれたコーナー部のコンクリートは、プレストレスの導入により局所的な損傷を受け、プレストレスを導入していないものと比較して部材の表面近傍においては水平変位が進むにつれ損傷は大きくなる。しかし、内部のコンクリートは横補強筋が降伏するまでは、かなり損傷を抑えることができ、プレストレスを導入していないものに比べ、全体的に等価拘束圧が高く、これによりせん断ひび割れの発生を抑制している。

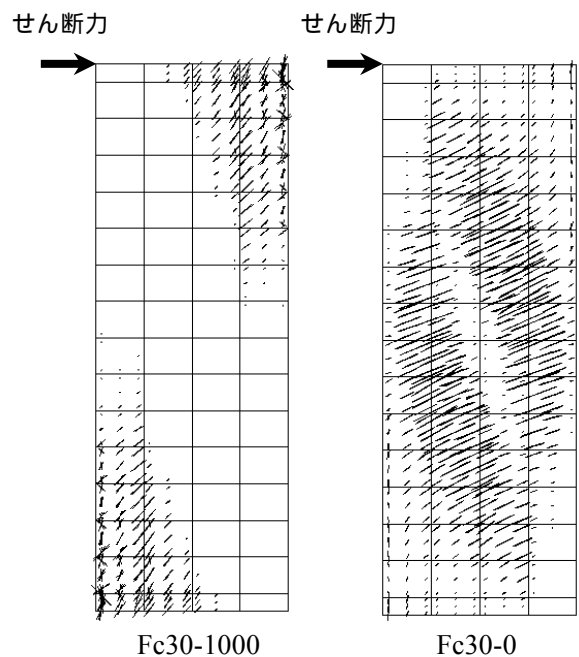


図 - 10 ひび割れひずみ図 (水平変位 2 mm)

今回の解析では、コンクリート強度とプレストレス導入量のみ変動要因とした。その他の変動要因や、せん断挙動に影響を与える分散ひび割れモデルのパラメータおよび、実験との比較は今後検討する予定である。

参考文献

- 1) 渡部洋, 峯村守央, 香取慶一, 林静雄: 横方向プレストレスによる RC 柱の能動的拘束機構と曲げ圧縮性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.561, pp.177-184, 2002.11
- 2) 渡部洋, 横谷榮次, 伊藤嘉則, 有馬裕樹: 高強度横補強筋を用いて横方向プレストレスを導入した RC 柱の圧縮及びせん断応力下の力学的性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.552, pp.133-140, 2002.2
- 3) 篠原保二, 安部武雄, 古村福次郎: ノッチ深さ, 載荷速度, 骨材寸法, 水セメント比, 載荷法, 養生および材令がコンクリートの曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.13-22, 1992.12
- 4) 蔣梅, 柏崎隆志, 野口博: 横補強筋に梁要素を用いた拘束コンクリートの 3 次元 FEM 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.179-180, 2002.8
- 5) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光: 円形コンファインドコンクリート内部の応力と損傷状態に関する FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.97-102, 2002