

報告 鋼繊維補強コンクリート柱の交番載荷試験

益田 彰久^{*1}・松岡 茂^{*1}・松尾 庄二^{*1}・武田 康司^{*1}

要旨：鋼繊維補強コンクリートを用いた部材はプレーンコンクリートを用いた部材に較べ優れた断面耐力・じん性等を有することが知られている。ここではせん断に着目し、鋼繊維を混入することによるRC部材のせん断耐力およびひび割れ発生後の変形性能に対する影響を確認することを目的に、鋼繊維補強コンクリート柱の交番載荷試験を行った。その結果、せん断破壊先行型の部材が曲げ破壊先行型へと移行し、せん断耐力・じん性共向上することが確認された。せん断スパンの小さな部材については曲げ破壊先行型へと移行はしなかったが、曲げ降伏発生後にせん断破壊が発生した。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート、せん断、じん性、破壊

1. はじめに

先の兵庫県南部地震では多数の構造物が甚大な被害を受けた。コンクリート構造物もその例に漏れず様々な損傷を被ったが、特に旧来の設計基準によるコンクリート構造物においてはせん断によるひび割れの発生が多数見受けられた。また倒壊したコンクリート構造物では部材のせん断破壊が原因であると認められる例が多く、このように部材のせん断強度は構造物の耐震性に大きく関係しているものと考えられる。

一般にプレーンコンクリートにひび割れが発生すると、そのひび割れ面間には応力の伝達はほとんど存在しないと考えられている。それに対し鋼繊維補強コンクリート（SFRC）の場合には、混入している鋼繊維がひび割れ面で架橋効果を発揮し、そのため応力の伝達が存在するようになる。その結果、SFRCを用いた部材ではプレーンコンクリートを用いた部材に較べ断面耐力の増加が見られ、また最大断面耐力以降も荷重を保持するために優れたじん性があることが確認されている[1]。

そこでSFRCを用いたRC部材の変形挙動を把握する目的で、交番載荷試験を行った。試験に使用した供試体は、鋼繊維混入によるRC部材のせん断耐力への影響を確認するためにせん断破壊先行型として作成した。

2. 試験方法

2. 1 供試体

供試体は高架橋の柱を対象として、図-1に示すような構造を基本とした。柱断面は実物大を想定して80cm×80cm、その1/2モデルとして40cm×40cm、またせん断スパン比を変えた70cm×40cmのものとした。せん断破壊先行型の部材とするため、帯鉄筋は実物大モデルでは9mm丸鋼を150または300mmピッチで配置（組立筋程

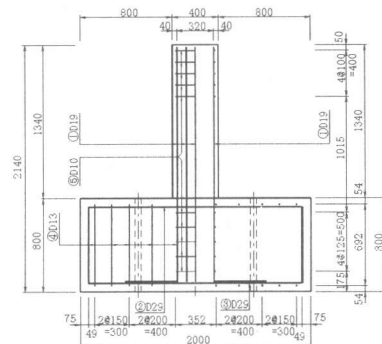
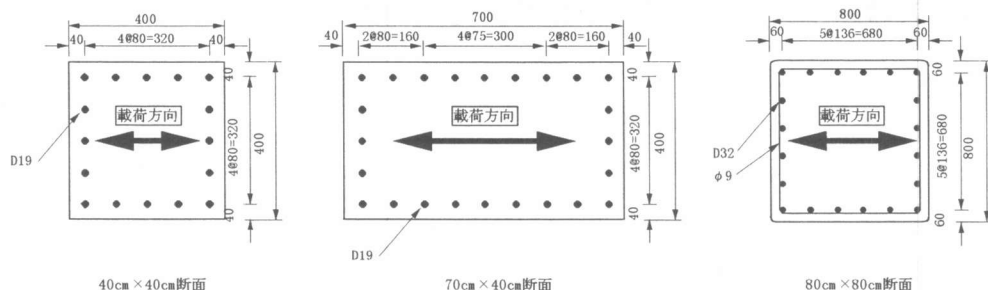


図-1 供試体概要図(40cm×40cm断面)

*1 鉄建建設（株）エンジニアリング本部技術研究所（正会員）



図－２ 供試体柱部断面図

度)するのみとし、1/2モデルでは加力部を除くせん断スパンには全く配置していない。図－２に各モデルにおける柱部の断面図を示す。

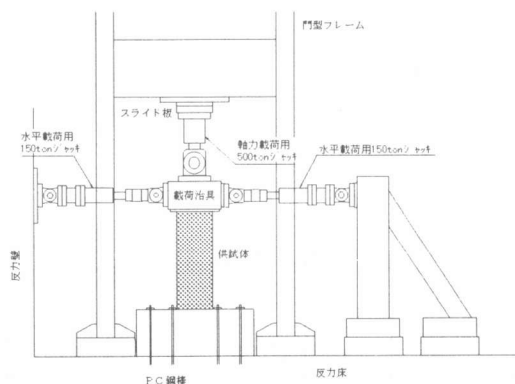
鋼繊維は長さ30mm（アスペクト比50）で表面にインデント加工したものを使用し、混入率は体積百分率で1.0%とした。またコンクリートの最大粗骨材径は鋼繊維長の2/3(20mm)とした。表－１に供試体のコンクリート配合を示す。また、比較のためプレーンコンクリートによる供試体を1/2モデルにて作成した。

表－１ S F R C の配合

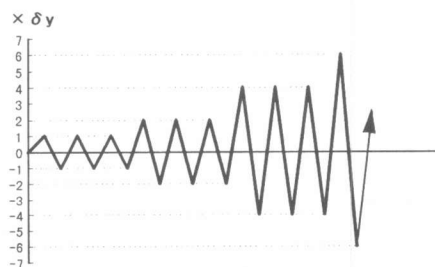
粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	鋼繊維 S F
20	6±2	4±1	44	62	176	401	1035	718	2.00	78

２．２ 載荷方法

載荷は図－３に示す装置により行った。供試体の柱部分に一定の軸圧縮力が作用するよう柱頭部に油圧ジャッキにて鉛直方向に載荷し、この軸力を保持した状態で水平方向に配置した油圧ジャッキにて正負方向への水平載荷を行った。水平荷重を与えた際、引張側の主鉄筋が降伏ひずみに達した時点の変位量を降伏変位 δ_y とし、その後は図－４に示すように降伏変位の偶数倍の変位量を順次与えるよう、変位制御によって正負３往復づつ載荷を行った。変位量が10 δ_y を越えた時点から降伏変位の整数倍を正負１往復づつ与えるようにし、変位が載荷装置能力の限界に近づいた段階では片方向への単調載荷とした。水平荷重が降伏時荷重の80%を下回った、あるいは



図－３ 載荷装置



図－４ 載荷パターン

鉛直荷重を保持することができなくなった時点で試験の終了とした。

2. 3 試験パターン

試験は供試体寸法および軸圧縮力の組み合わせにより 5 通り行った。表－2 に各試験パターンの一覧を示す。計算せん断耐力は二羽らが提案している式(1)により算出した。

$$V_c = 0.94 \cdot f_c'^{1/3} \cdot (100 \cdot p_w)^{1/3} \cdot (d/100)^{-1/4} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

ここに f_c' : コンクリート強度、 P_w : 引張鉄筋比、 d : 有効断面高さ、 a : せん断スパン、 b_w : 幅である。計算曲げ耐力については、同配合による S F R C に対し研究を行っている松尾ら [2] の報告に基づいて引張軟化曲線を定め、この引張軟化曲線を用いて断面条件から算定した。この際 S F R C の圧縮応力－ひずみ曲線は「コンクリート標準示方書」に準拠することとし、限界圧縮ひずみを 3500μ とした。

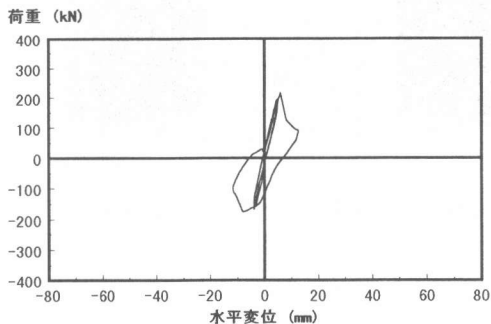
表－2 試験一覧

供試体	断面寸法 (cm)	コンクリート の種類	コンクリート強度 (MPa)	軸力 (MPa) (軸力比)	引張鉄筋比	せん断 スパン (mm)	せん断 スパン比	計算せん断 耐力 (kN)	計算曲げ 耐力 (kNm)
A	40×40	プレーン	33	1 (0.030)	1.30%	1100	3.06	156	252
B	40×40	SF1.0%	33	1 (0.030)	1.30%	1100	3.06	156	281
C	70×40	SF1.0%	33	1 (0.030)	1.04%	1100	1.67	301	786
D	80×80	SF1.0%	31	4 (0.129)	1.19%	2500	3.38	491	2590
E	80×80	SF1.0%	31	1 (0.032)	1.19%	2500	3.38	491	2203

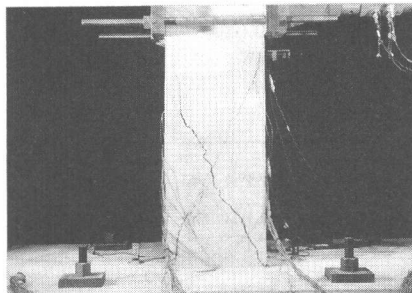
3. 試験結果および考察

3. 1 1/2モデルの試験結果概要

1/2モデルでは配合・断面形状を変えた A, B, C の 3 パターンの試験を行っており、軸圧縮力はいずれも 1MPa としている。図－5 は比較試験として行った 40cm×40cm 断面のプレーンコンクリートであるパターン A の荷重－変位曲線である。降伏変位後、次段階である $2\delta_y$ への载荷途中においてせん断破壊が発生し、耐力が急激に失われてしまっている。写真－1 は試験終了時における供試体のせん断スパン付近であり、せん断破壊面が明確に認められる。

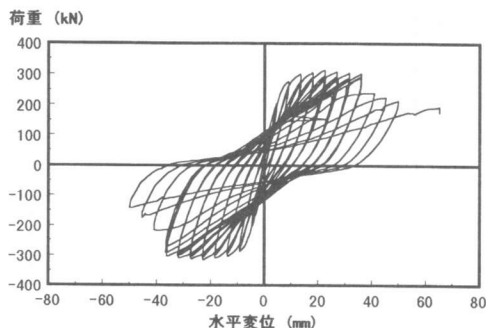


図－5 荷重－変位曲線 (パターン A)

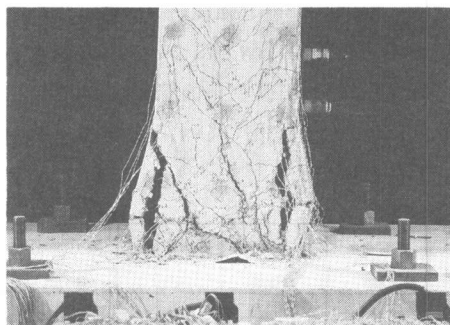


写真－1 試験終了時状況 (パターン A)

図－6 は40cm×40cm断面であるパターンBの荷重－変位曲線である。降伏変位以降も荷重は増加しており、 $5\delta y$ でそのピークを示している。 $8\delta y$ まではほとんど荷重の減少はなく、 $9\delta y$ 以降から荷重の減少の度合いは大きくなっていくが、 $11\delta y$ に達してもまだ100～200kNの耐力を有している。最後は片方向への単調載荷としたが載荷装置の限界に達してしまい、最終的には65mm（約 $14.6\delta y$ ）の変位で200kN近い耐力を有していた。写真－2 は試験終了時における供試体のせん断スパン付近の様子であるが、SFRCの破壊現象の特徴であるひび割れの分散が認められる。またせん断方向のひび割れよりも、主鉄筋より外側のコンクリートが剥離するようなひび割れ面が卓越しており、曲げ破壊が発生している様子がうかがえる。

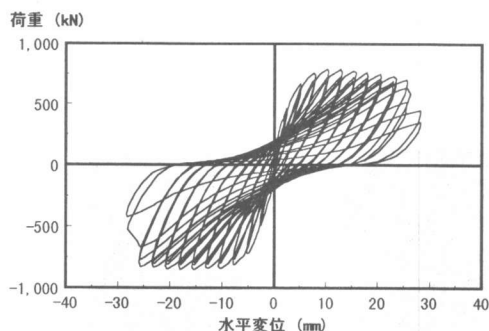


図－6 荷重－変位曲線（パターンB）

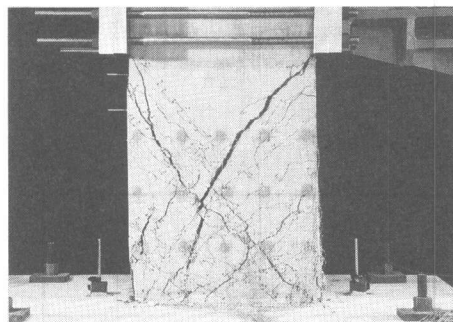


写真－2 試験終了時状況（パターンB）

図－7 はパターンBに対しせん断スパン比を変えた70cm×40cm断面であるパターンCの荷重－変位曲線である。降伏後における荷重ピークの発現、また荷重の緩やかな軟化等はパターンBと近い特徴を示している。しかしパターンCでは緩やかな荷重の軟化は $10\delta y$ まで続き、 $11\delta y$ において急激に荷重が減少したため試験を終了している。写真－3 はその時の供試体の様子であるが、ひび割れの分散が起こってはいるものの、せん断スパンにせん断破壊面が形成されているのが認められる。



図－7 荷重－変位曲線（パターンC）

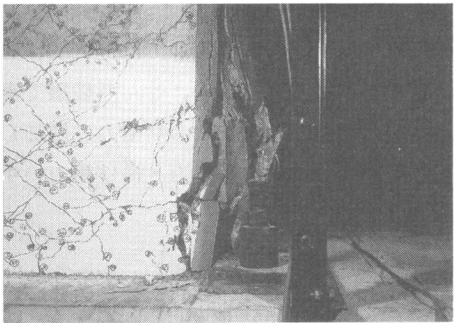


写真－3 試験終了時状況（パターンC）

3. 2 実物大モデルの試験結果概要

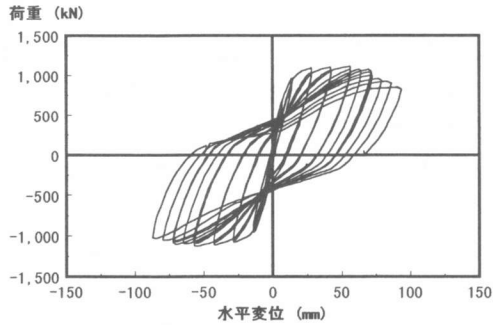
実物大モデルでは断面形状を変えずに軸圧縮力を変えたパターンD・Eの2種類の試験を行った。それぞれの試験結果の荷重－変位曲線を図－8・9に示す。 $6\delta y$ 付近での荷重のピーク、ピ

ーク以降の荷重の軟化など、両者の特徴は似通っている。ただし軸圧縮力をパターンDで4MPa、パターンEで1MPaと変えているため、最大荷重値はパターンDの方がEを上回っている。またパターンDでは13 δy で試験を終了してしまっているが、これは試験の都合から途中で打ち切ってしまったものであり、実際にはパターンEのように試験装置の限界まで荷重は保持されるものと考えられる。パターンEの最終値は147mm (約18.8 δy) の変位で約800kNであった。ひび割れの発生状況については両パターンほぼ同様であり、写真－4に示すようにひび割れの分散がおき、主鉄筋より外側のコンクリートの剥離が見られる。

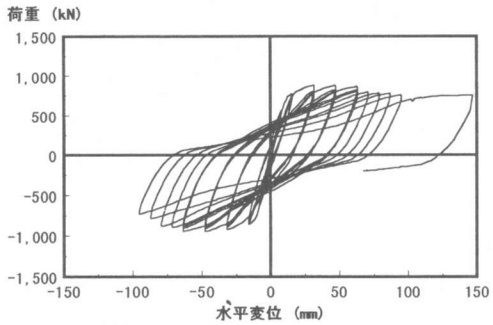


写真－4 試験終了時状況（パターンE）

以上の試験結果を一覧表として表－3に示す。



図－8 荷重－変位曲線（パターンD）



図－9 荷重－変位曲線（パターンE）

表－3 試験結果一覧

供試体	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時 曲げモーメント (kNm)	降伏変位量 (mm)	最大変位量 / 降伏変位量	最大変位時 回転角	破壊形態
A	194	214	235	4.7	2以下	1/184	せん断
B	202	315	347	4.5	14以上	1/17	曲げ
C	463	850	935	2.5	11	1/40	曲げ降伏・せん断
D	688	1127	2818	7.0	13以上	1/23	曲げ
E	563	945	2363	7.8	18以上	1/14	曲げ

3. 3 破壊形態について

B・D・Eの3パターンについては最大荷重後もSFRCの持つじん性能から荷重の低下は少なく、載荷装置の性能の限界により最終状態を押さえることができなかった。しかしこれらは試験終了時の供試体の観察から曲げ破壊が発生してしまっていると判断され、せん断破壊先行型として製作した供試体が、鋼繊維の混入により曲げ破壊先行型の構造物へと移行したと考えられる。一方せん断スパン比を小さくしたパターンCについては、最大荷重が発現しその後せん断破壊が

発生し実験を終了している。よってパターンCではせん断破壊以前に曲げ降伏が発生していると考えられる。これらのことから、1.0%の鋼繊維の混入によりせん断破壊先行型供試体の破壊形態が変化したことが確認された。

3. 4 断面耐力について

前節で述べたようにSFRCでは最終的に曲げ破壊が発生しており、これはせん断耐力が増加した結果であると考えられる。せん断破壊で実験を終了したパターンCにおいても曲げ降伏が確認できることから、やはりせん断耐力は増加しているものと考えられる。表-2と3を比較するとSFRCの場合はせん断耐力・曲げ耐力いずれも実験値が計算値を上回っていることが確認できる。

3. 5 じん性について

最大変形量から算定される回転変形角については、SFRCではすべて1/50以上の値が得られており、特に曲げ破壊先行型に移行したタイプについては1/15~1/20まで変形をしている。プレーンコンクリートのパターンAでは1/184の変形しかしていないことから、SFRCでは変形性能についても改善され、大きなじん性を有していると考えられる。

3. 6 モデルの大きさの影響

実物大モデルと1/2モデルとではせん断スパンなどの構造諸元を大きく変えないように供試体を作成した。試験結果から得られた荷重-変位曲線・ひび割れ状況を見る限り、変形挙動・破壊形態などに関して両者の間(パターンBとD・E)では大きな差異は認められなかった。このことから、せん断・曲げに関する定性的な現象はモデルの大きさに依存しないものと考えられる。

4. まとめ

本試験から次のような現象が確認された。

- ①せん断破壊先行型のRC部材が、鋼繊維を混入することによって曲げ破壊先行型へと移行し、さらにじん性も向上した。
- ②RC部材のせん断スパン比が比較的小さい場合については鋼繊維を混入してもせん断破壊が発生したが、それ以前に曲げ降伏が発生しており、またじん性も向上している。
- ③よって、鋼繊維を混入することによりRC部材のせん断特性に影響が表れたことが確認された。

今後は鋼繊維を混入することによるせん断特性への直接的な影響を調査していく予定である。また、これらの成果を解析等に反映することによりシミュレーションを実現し、破壊形態の変化等の解明に応用していく所存である。

参考文献

- [1] 松岡 茂、松尾 庄二、益田 彰久、柳 博文：鋼繊維補強コンクリートの引張特性試験法に関する研究、土木学会論文集（投稿中）
- [2] 松尾 庄二、松岡 茂、益田 彰久、柳 博文：SFRCの引張軟化曲線の推定法に関する一研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.457-462、1994