

論文 鋼繊維補強コンクリートの偏心載荷実験

松尾庄二*1・松岡茂*1・益田彰久*1・土井至朗*1

要旨：軸方向圧縮力と曲げモーメントが同時に作用する場合の鋼繊維補強コンクリートの変形特性を把握する目的で、一定軸力作用下での曲げ実験を行った。実験結果によると、鋼繊維の種類あるいは混入率により、ひび割れ発生・進展のパターンや断面耐力に明確な相違が見られた。これは、引張軟化曲線に代表される引張側特性とともに、圧縮側の特性の違いも影響を与えていると考えられる。また、作用軸力によっても、ひび割れパターンやひび割れ深さに相違があることが確認された。さらに、ひび割れ断面モデルを用いたシミュレーションにより実験結果を良く再現できた。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート、引張軟化曲線

1. はじめに

筆者らは JCI 年次大会'97(名古屋)において、鋼繊維補強コンクリートをせん断補強鉄筋を有しない RC 柱に適用することによりせん断耐力・変形性能が改善されることを報告した¹⁾。改善効果の主たる要因は、ひび割れ面における鋼繊維の架橋作用による応力伝達とひび割れ分散効果によるものと考えられる。一方、実験結果を見ると、供試体の最終的な破壊性状は基部のコンクリートの状態に左右されていた。したがって、曲げ破壊先行型部材の変形性能を把握するためには、コンクリートの圧縮側特性をより精度良く把握する必要がある。

鋼繊維補強コンクリートに関する既往の研究例を見ると、引張軟化曲線に代表されるような引張側の特性に関する研究は数多い²⁾のに対し、圧縮側の破壊特性に関する研究は比較的少ない。本研究においては、軸方向圧縮力と曲げモーメントが同時に作用する場合の鋼繊維補強コンクリートの変形特性を把握する目的で、偏心載荷実験(一定軸力下での曲げ実験)を行った。また、ひび割れ断面モデルを用いて断面力の計算を行い、実験結果との比較を試みた。

2. 実験概要

2.1 実験の目的

曲げ破壊先行型部材として柱部材を想定した。柱部材には軸力および曲げモーメントが作用する。軸力は全断面において一様に作用するため、部材中で最も荷重条件が厳しくなるのは曲げモーメントが最大となる柱基部である。したがって、この柱部材において基部の破壊性状がクリティカルとなる。柱基部のモデルとして図-1に示す試験体を用いた。試験体は、載荷版部と試験区間とが一体の構造であり、載荷版部は変形防止のために外側が鉄板で覆われている。

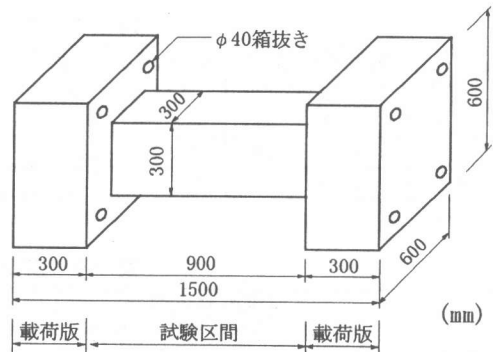


図-1 試験体一般図

*1 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術研究所研究第一部 (正会員)

本実験は、試験体に作用する軸力あるいは偏心モーメントによる荷重-変位関係の違いを確認し、圧縮領域と応力-ひずみ曲線との関係を調べるために行った。また、使用する鋼繊維の種類・混入率を変えた実験を行い、鋼繊維による補強効果の差異についても検討した。

2.2 試験体の製作

試験体は鋼繊維の種類、混入率および軸力比（コンクリートの圧縮強度に対する軸方向圧縮応力度の比）をパラメータとして、表-1に示す6体を製作した。使用した鋼繊維は表-2に示す3種類で、いずれも繊維長 30 mm、公称径 0.6 mm（アスペクト比 50）のものである。

表-3に試験体に使用したコンクリートの配合を示す。これは JIS に定める 24-18-20N の普通コンクリートをベースに、文献³⁾にしたがって配合補正を行ったものである。鋼繊維はコンクリート打設時にアジテータ車に投入・攪拌し、所定の配合を満足するようにした。コンクリートはフレッシュ性状の確認後に横打ちで打設し、一週間湿潤養生を行った。鋼繊維混入前後のコンクリートのフレッシュ性状は表-4に示すとおりであるが、繊維種類によりスランプロス、空気の巻き込み率等に差が見られた。この原因は、主として鋼繊維の形状によるものと考えられる。

表-1 試験体一覧

供試体名	鋼繊維種類	混入率	軸力比
No. 1	繊維 A	1.0%	0.10
No. 2	繊維 A	1.0%	0.15
No. 3	繊維 A	1.0%	0.20
No. 4	繊維 A	0.5%	0.10
No. 5	繊維 B	1.0%	0.10
No. 6	繊維 C	1.0%	0.10

表-2 鋼繊維形状

種別	形状
繊維 A	両端フック付結束型
繊維 B	三日月形両端フック付
繊維 C	インデント型

2.3 載荷および計測

本実験は以下の手順で行った。載荷版の上下に各々2台ずつの油圧ジャッキをPC鋼棒を介して設置し、試験体に載荷した。まず、4台の油圧ジャッキにより均等に加圧し、試験体に所定の軸力を導入した。次に、所定の軸力を保持しつつ上下の油圧ジャッキに荷重差を与えて、試験体に曲げモーメントを作用させた。一定軸力の保持に留意しながら曲げモーメントを増加させてゆき、軸力の保持が不可能になった時点で載荷を終了した。なお、曲げモーメント載荷の過程において、適宜荷重を保持した状態でひび割れの進展状況を観測した。載荷に使用した装置の概要は図-2に示すとおりである。

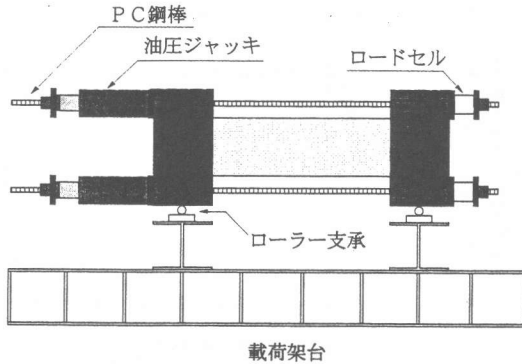
計測は荷重、試験体の変位量（鉛直方向、水

表-3 コンクリート配合表

混入率	最大骨材寸法(mm)	スランプ(cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位使用量(kg)					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	鋼繊維	混和剤
0%	20	18	4.5	56	47	173	309	836	968	0	0.826
0.5%	20	18	4.5	56	51	178	318	883	885	40	0.846
1.0%	20	18	4.5	56	55	183	327	934	797	80	0.870

表-4 フレッシュ試験結果

配合	鋼繊維混入前			鋼繊維混入後			結果	
	スランプ	空気量	温度	スランプ	空気量	温度	スランプ ^o 吋	空気巻込
A-0.5%	18.5 cm	4.2%	21.0°C	18.5 cm	7.0%	22.0°C	0 cm	2.8%
A-1.0%	20.0 cm	3.9%	23.0°C	18.0 cm	6.0%	23.0°C	2.0 cm	2.1%
B-1.0%	19.5 cm	3.9%	22.0°C	16.5 cm	5.9%	23.0°C	3.0 cm	2.0%
C-1.0%	19.5 cm	4.9%	23.0°C	14.0 cm	6.5%	22.0°C	5.5 cm	1.6%



図一 2 荷役装置概要

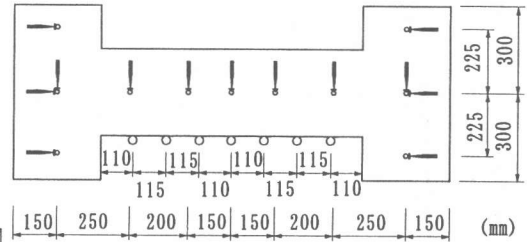
平方向), 上面コンクリートのひずみ量およびひび割れ開口幅について行った。計測器設置位置を図一3に示す。

3. 実験結果

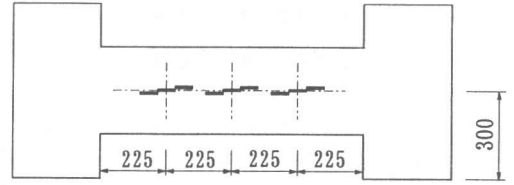
3. 1 No. 1 試験体

偏心荷重実験当日に行う直径 100 mm, 高さ 200 mm の円筒供試体による圧縮強度試験結果から試験体に作用する軸力を決定した。圧縮強度は 25 ~ 28 N/mm²程度 (試験材令 30 ~ 44 日) であった。

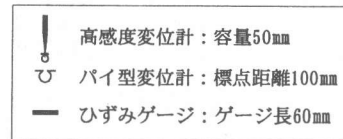
今回の実験の基準試験体である No. 1 試験体の実験結果を以下に示す。図一4は試験体表面で観測されたひび割れ進展状況を示す。また, 図一5は試験体下面のパイ型変位計により計測されたひび割れ開口変位と曲げモーメントとの関係である。図一4に見られるように試験体表面には複数本のひび割れが発生し, 圧縮縁方向へと進展していった。曲げモーメント 31.0 (kN·m) 時に最初のひび割れが観測され, 最終的に 39.4 (kN·m) まで観測を行った。最終観測時以降曲げモーメントは多少上昇しつつ, ひび割れ開口変位が増加した。軟化域に入ると図一4に示す左側のひび割れの開口が進み, なおかつ上方への進展が見られた。荷重終了時にはその上部の圧縮縁において圧縮破壊が確認された。また, その他のひび割れは軟化域では閉塞の方向に向かった。図一5に示すように, 複数のパイ型変位計によりひび割れ開口変位が記録されているが, 他試験体との比較時にはこのうち代表的な



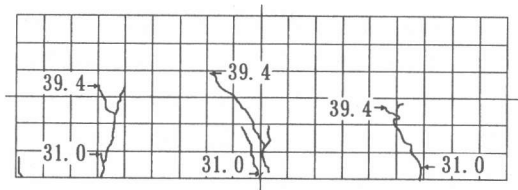
a) 試験体正面



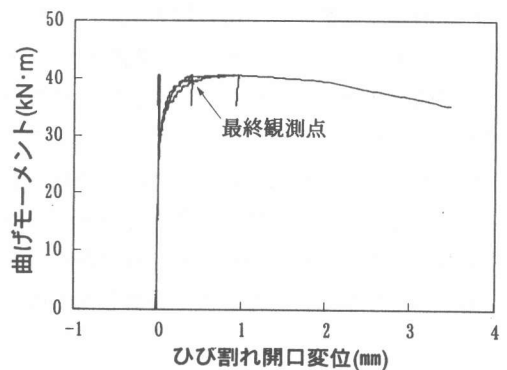
b) 試験体上面



図一 3 計測器設置位置

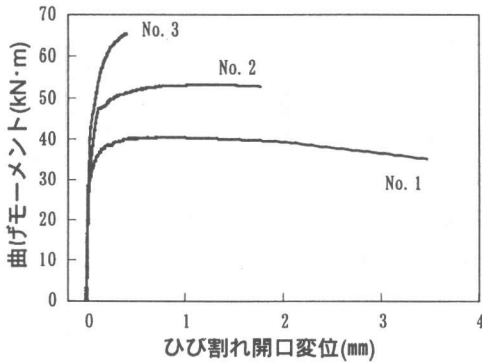


図一 4 No.1 試験体ひび割れスケッチ

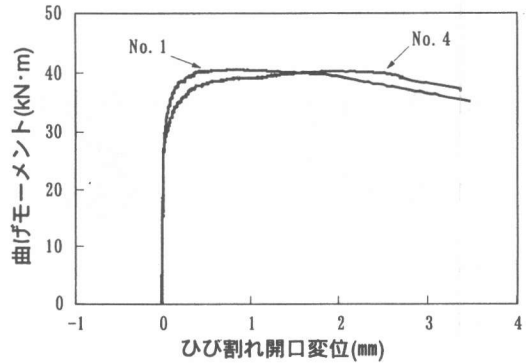


図一 5 No. 1 試験体実験結果

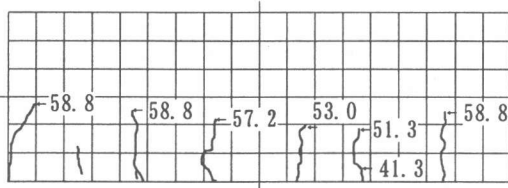
曲げモーメントー開口変位関係を用いるものとする。



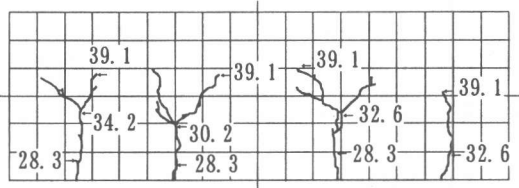
図一六 軸力の影響



図一八 繊維混入率の影響



図一七 No. 3 供試体ひび割れスケッチ



図一九 No. 4 供試体ひび割れスケッチ

3. 2 軸力比

図一六に試験体 No. 1~No. 3 の結果を示す。この3体はいずれも鋼繊維Aを体積比で 1.0% 混入したものであるが、作用する軸力が軸力比でそれぞれ 0.10, 0.15, 0.20 と異なる。なお、実験当日の圧縮強度がそれほど違わないため、高軸力比=高軸力と考えてよい。したがって、軸力比が大きいものほど、ひび割れ発生曲げモーメントや最大曲げモーメントは大きい。

ひび割れ本数に関しては、軸力比が大きいほど多い。また、最終観測時のひび割れ深さ(試験体下縁からひび割れ先端までの高さ)についても、軸力比が大きい No. 3 試験体(図一七)の場合他の2試験体と比較すると小さい結果となった。これは、軸力比が大きいと圧縮領域が広がるため、個々のひび割れの進展が妨げられ結果的にひび割れ発生位置が分散したものと考えられる。

ひび割れ開口は、軸力比が小さいほど変位量が大きくなった。軸力比が大きいすなわち高軸力の場合、ひび割れ開口変位量が小さい段階で圧縮縁のコンクリートひずみが増加し、ひび割れ開口変位量が大きくなった。

に達して破壊に至るため、このような結果が得られると考えられる。また、軸力比が小さい No. 1 の場合、軟化域においてひび割れが局所化したため開口変位の増加が大きくなったのに対し、高軸力比の試験体ではひび割れ本数が多い個々のひび割れ開口変位量は相対的に小さいことも一つの原因である。

3. 3 繊維混入率

図一八は鋼繊維混入率の違いによる比較を試みたものである。試験体 No. 4 は鋼繊維Aが体積比で 0.5% 混入しており、軸力比 0.10 の軸方向圧縮力が作用したものである。

No. 1 試験体の場合比較的小さなひび割れ開口変位で曲げモーメントが最大となりそれ以降は軟化過程をたどったのに対し、混入率の小さい No. 4 では最大曲げモーメント時のひび割れ開口変位量は No. 1 の2倍程度大きな値を示した。この結果は、引張特性の相違によるものと考えられる。筆者らの研究⁴⁾によると、引張軟化曲線における残留強度すなわち鋼繊維により伝達される引張強度を比較すると、混入率

0.5%では1.0%の場合の約6割程度にすぎない。したがって、ひび割れ発生直後に開口変位がより速く進行したと説明できる。

ひび割れの進展状況は大きな相違が見られた。すなわち試験体 No. 1 の場合、ひび割れの分岐は若干見られるものの個々のひび割れは比較的スムーズに進展していく。これに対して No. 4 では、**図-9**に示すように4本の主ひび割れのうち3本が断面高さの4割程度でY字状に分岐し、各々進展していった。

3. 4 繊維種別

図-10では鋼繊維の種別の違いを比較した。鋼繊維混入率は全て1.0%、作用軸力は軸力比で0.10とした。試験体 No. 1 の場合、最初から複数のひび割れが発生したのに対し、試験体 No. 5 では1本のひび割れのみが発生し進展していった。ひび割れ深さが断面の4割程度に達したとき初めて、複数個のひび割れが確認された。ひび割れ深さが5割程度に達すると、一ヶ所のひび割れの開口が急速に進行し、直上の圧縮縁の破壊が起こった。曲げモーメントが最大に達した後ほぼ一定の値を保った状態でひび割れ開口変位が増加し5mm前後からようやく軟化域に入っており、ひび割れ開口が急速に進行したことを示している。

試験体 No. 6 の場合も、No. 5 と同様に初期にはただ1本のひび割れの発生が見られた。断面高さの1/3程度までひび割れが進展した後、他の箇所にもひび割れが発生した。複数のひび割れ深さが5割に達した段階から開口変位の集中が見られたのは No. 5 と同じであるが、このひび割れはかなり細かく分岐した(**図-11**)ためひび割れの進行は緩やかであった。ひび割れの集中が見られたため最大曲げモーメント時のひび割れ開口変位量は大きいものの、曲げモーメントの軟化過程は No. 1 と類似している。

最大曲げモーメントは No. 5, No. 6, No. 1 の順で大きくなった。初期のひび割れ分散性能に関しては鋼繊維補強コンクリートの引張特性に

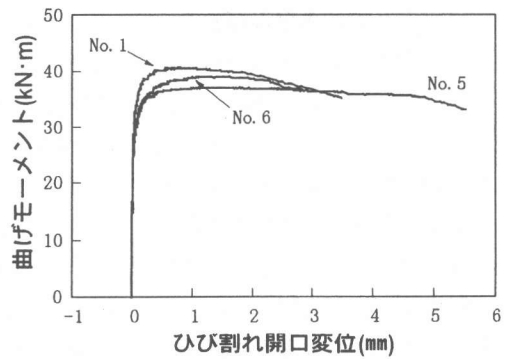


図-10 繊維種別の影響

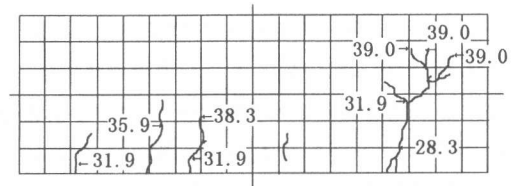


図-11 No. 6 供試体ひび割れスケッチ

由来すると考えられるが、最大曲げモーメントについては圧縮特性に依存するものと思われる。すなわち、補強繊維により圧縮特性も異なるといえる。

4. ひび割れ断面モデルによる解析

4. 1 解析概要

SFR Cのひび割れ断面モデル⁵⁾を用いて実験結果のシミュレーションを行った。この解析手法は、鋼繊維補強コンクリートのひび割れ面における応力・ひずみ分布から導かれる断面力のつりあい式を解くことにより、断面力とひび割れ開口変位すなわちひび割れ断面での変形挙動を決定するものである。プレーンコンクリートの応力・ひずみ分布と異なる点は、ひび割れ面において鋼繊維により伝達される引張応力(伝達応力)を考慮することである。ただし、伝達応力とひび割れ開口変位の関係は1直線モデルの引張軟化曲線で表されるものとした。また、圧縮応力とひずみの関係はプレーンコンクリートと同様にコンクリート標準示方書に示す二次曲線タイプとした。

4. 2 解析例および結果

ひび割れ断面モデルを用いたシミュレーション例として、試験体 No.1 の結果を図-12に示す。1直線モデルの引張軟化曲線は残留強度率と引張軟化曲線勾配により決定されるが、2つのパラメータは鋼繊維の種類および混入率によりほぼ一定の値を示す。試験体 No.1 の条件(鋼繊維 A, 混入率 1.0%)について筆者らが直接引張試験から求めた結果⁴⁾は残留強度率: 0.51, 軟化曲線勾配: $0.23(N/mm^3)$ であり、この値を解析に用いた。解析結果は実験結果を多少上回っているものの全体的な傾向はほぼ同じであり、軟化域についても良く再現されている。ただし、解析において限界圧縮ひずみを示方書に示す 0.35%とした場合は、図-12中の A 点で解析が終了している。最大曲げモーメントまでは解析できているがそれ以降の軟化域については表現できていない。これは実際のコンクリートにおいては限界圧縮ひずみを越えても、圧縮応力が残存するからである。また元来、ひび割れ断面モデルは分岐することなく進展するひび割れに対応するモデルであるため、本実験のように複数のひび割れに分岐するような場合は、圧縮ひずみを過小に評価する可能性がある。圧縮ひずみが 1.5%に達するまで計算した結果、図中の B 点まで解析が進み実験結果を良く再現できた。ただし、筆者らが以前行った断面高さ 40 cm の試験体による同様の実験結果⁵⁾を解析したところ、解析上の最終的な圧縮ひずみは 3.5%に達した。このように断面寸法の影響を受けるため、解析にあたっては注意する必要がある。

5. まとめ

本研究により得られた結果を以下に記す。

- (1) 試験体に作用する軸力比が大きいほどひび割れは分散的に発生するが、個々のひび割れ深さは小さい。また、ひび割れ開口変位については軸力比が小さいほど大きい。
- (2) 繊維混入率が小さいものは、ひび割れ発

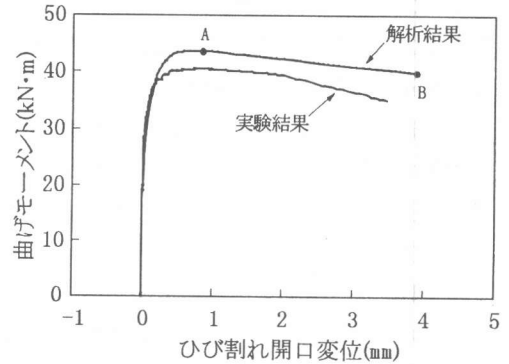


図-12 シミュレーション結果

生直後の開口変位増加量が大きく、また Y 字状に分岐して進展する。

- (3) 繊維の種類によりひび割れの分散性や圧縮特性が異なる。
- (4) ひび割れ断面モデルを用いた解析により実験結果を良く再現できる。ただし、限界圧縮ひずみについては解析対象の断面寸法により異なる。

参考文献

- 1) 益田彰久・松岡 茂・松尾庄二・武田康司: 鋼繊維補強コンクリート柱の交番載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1521-1526, 1997. 6
- 2) 例えば, 六郷恵哲・内田裕市・加藤英徳・小柳 治: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状と引張軟化曲線, 土木学会論文集, No. 460/V-18, pp. 57-64, 1987
- 3) 土木学会鋼繊維補強コンクリート研究小委員会編: 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), 1983. 3
- 4) 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, No. 564/V-35, pp. 145-153, 1997. 5
- 5) 松岡 茂・益田彰久・松尾庄二・柳 博文: 鋼繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工解析に関する研究, 土木学会論文集, No. 585/V-38, pp. 189-198, 1998. 2