

論文 鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造簡易柱脚の開発

諏訪内 由紀^{*1}・金子 佳生^{*2}・三橋 博三^{*3}・桐越 一紀^{*4}

要旨：本論文は、鋼構造柱脚の簡便で信頼性の高い施工法を開発するための基礎的研究として、根巻き柱脚の根巻き部に高強度・高靱性を有する鋼繊維補強セメント系複合材料を適用し、柱脚固定度を含む構造性能に関する実験を行い、本工法の妥当性を検証したものである。

キーワード：簡易柱脚，鋼繊維補強，セメント系複合材料，根巻き柱脚

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、柱脚部の被害が多数生じた。そのうちの大半は露出柱脚であり、根巻き柱脚の被害例についてもいくつか報告されたが、埋込み柱脚については顕著な被害は報告されていない。そのため兵庫県南部地震以降、主に埋込み柱脚が用いられるようになり、根巻き柱脚の使用頻度は減少した。しかし、埋込み柱脚は、鋼柱と基礎梁主筋の納まりが複雑であり、また排土量が多量にわたることなど、施工面における問題を含んでいる。よって、柱脚部の要求性能を満たし、施工性にも優れた簡便な構工法の開発が望まれる。さらに、建築基準法の改正に伴い、法規上規定される性能を満足すれば、性能レベルは特定されるものではなく、高い性能レベルから法規上規定される性能レベルまで、さまざまな性能レベルが構築されることになる。

このような社会背景に対して、今後期待される建築システムの一つとして、より特徴のある材料を適材適所に配置することにより、建築構造的に必要な性能を明確にした建築物があげられる。特に性能の観点から、構造システムの変形性能を定量的に評価することにより、複雑なものから簡便なレベルのものまで種々の構工法の可能性がある。

2. 簡易柱脚に関する研究

金子らは、これまで Densit セメントを用いて繊維混入率及び水結合材比をパラメータとした高強度鋼繊維補強セメント系複合材料(Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites:以下 SFRCC)の材料実験¹⁾を行い、これら材料実験の結果に基づいて SFRCC の構成モデル²⁾を定式化し、その妥当性を検証した。また、SFRCC を鋼構造柱梁接合部に適用し、従来の溶接やボルト接合にかわり、より生産性が高く信頼性を損なわない簡便な柱梁接合法を提案し、部材実験により、SFRCC を用いた鋼構造柱梁接合法の構造性能を実験的に検証した³⁾。本研究は、これまでの SFRCC の研究に加えて、鋼構造柱脚の簡易化として、根巻き柱脚に着目し、根巻き部に SFRCC を適用した簡易柱脚を提案する。本柱脚は SFRCC の高強度・高靱性な材料特性、及び鉄筋

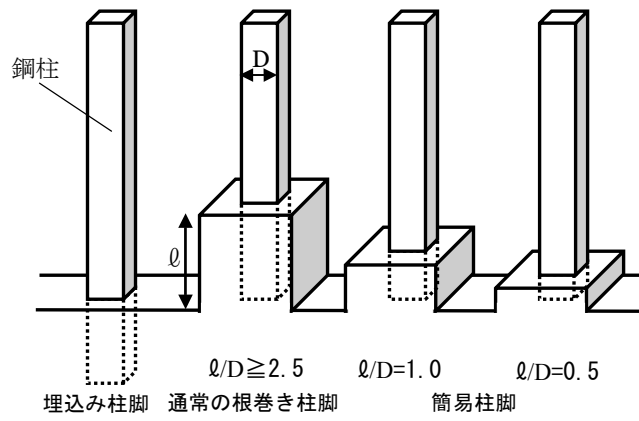


図-1 簡易柱脚の特徴

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻助教授 Ph.D. (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻教授 工博 (正会員)

*4 東北大学 工学部教務職員 (正会員)

との高い付着力を活用したものであり、また、根巻きの上端レベルを床面以下にすることにより、施工性の向上、及び通常の根巻き柱脚においては根巻き部によって失われていた建築スペースを有効利用できるという特徴を持つ。図-1に本研究で目標とする根巻き高さ h と柱せいの比 (h/D) が1.0と0.5の簡易柱脚と、通常の根巻き柱脚及び埋込み柱脚との比較を示す。本簡易柱脚は、SFRCCと鉄筋により鋼柱と基礎コンクリートを接合し、埋込み柱脚と同等の構造性能を目指した工法である。そのため、根巻き高さ h と各種補強法により、SFRCC部の損傷限界状態と柱部材の限界変形性能との関係、及び通常の柱脚⁴⁾に対しどの程度固定度を考慮すべきかについて明らかにする必要がある。本稿では特別な補強を行わない基礎実験⁵⁾⁶⁾⁷⁾に対して、各種補強を行なった補強モデルによる実験結果を報告する。なお、この簡易柱脚の適用範囲として、その必要性能により条件が異なるが、基本的には中低層の鋼構造建築が対象と考えられる。

本研究に先立って行われた予備実験⁵⁾では、 $h/D=1.5$ と $h/D=3.0$ を対象に、根巻き部と基礎部に普通コンクリートを用いて一体打ちにした場合と、SFRCCを用いて一体打ちにした場合に対し、2つの根巻き部を梁中央でつけ合わせた単純梁形式の片振り繰返し載荷を行なった。詳細は文献⁵⁾によるが、コンクリート試験体では脚部の大きな曲げひび割れと主筋・根巻き頂部せん断補強筋の降伏($h/D=3.0$)、及び支圧による根巻き頂部の大きなひび割れと剥離($h/D=1.5$)が確認されたのに対し、SFRCC試験体($h/D=3.0$, $h/D=1.5$)は若干の曲げひび割れが確認されたのみで、鋼柱が降伏しても顕著なひび割れは見られず、耐力的には十分な性能があることが明らかとなった。

次に、予備実験に基づき、根巻き頂部上端レベルが床面以下を想定し、 $h/D=1.0$ と $h/D=0.5$ を対象にして、基礎部にコンクリートを打設後、根巻き部

のみSFRCCを打設した簡易柱脚試験体に対し、軸力変動のない中柱を想定した、水平交番繰返し載荷試験を行ない、埋込み柱脚と比較した⁶⁾⁷⁾。この実験の試験体は、根巻き部に特別な補強筋を施さず、かつ根巻き部のみの性能を評価するため、アンカーボルトを使用せず、ベースプレートと基礎部を機械的に結合しないものであり、本稿で報告する実験の試験体の基本モデルと位置付ける。表-1に試験体シリーズを、図-2にSFR100-H試験体概要を示す。また、部材角 $1/50(\text{rad})$ 付近のひび割れ状況を図-3に示す。詳細は文献⁶⁾⁷⁾によるが、実験結果として、EMB-H試験体は微細なひび割れが見られたのみで紡錘型の復元力特性を示したのに対し、簡易柱脚試験体は根巻き部の損傷が影響してスリップ型の復元力特性を示した。EMB-H試験体に対する最大耐力比は、 $h/D=1.0$ の試験体では0.9と埋込み柱脚に近い最大耐力値を示したのに対し、 $h/D=0.5$ の試験体では0.4と低い値となった。また、簡易柱脚試験体は、 $h/D=1.0$ の基本モデルでは、部材角 $1/50(\text{rad})$ までの範囲で、 $h/D=0.5$ の基本モデルでは、部材角 $1/100(\text{rad})$ までの範囲で、

表-1 試験体シリーズ

試験体名	柱脚タイプ	h/D	根巻き高さ	鋼柱
EMB-H	埋込型			H形鋼
SFR100-H	簡易型	1.0	100mm	H形鋼
SFR50-H	簡易型	0.5	50mm	H形鋼
SFR100-BOX	簡易型	1.0	100mm	角形鋼

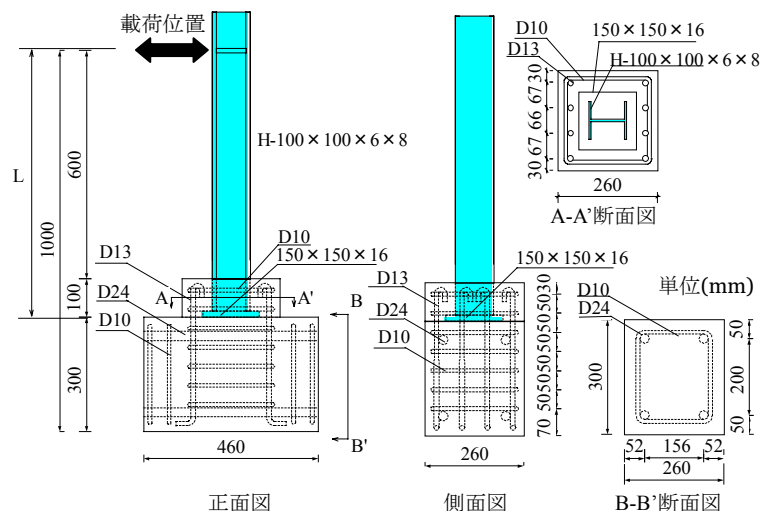


図-2 試験体概要(SFR100-H)

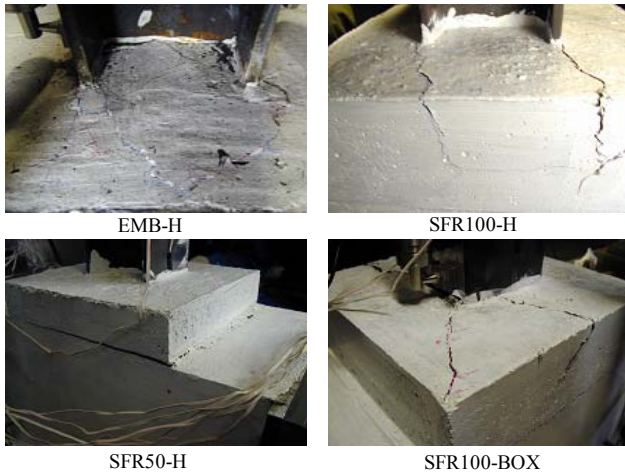


図-3 部材角 1/50rad 付近のひび割れ状況

埋込み柱脚に近い構造性能を示し、 $l/D=1.0$ の基本モデルでは、H 形鋼及び角形鋼管ともに、同様の損傷挙動と復元力特性を示した。

本稿は、基本モデルに対して補強を行なった簡易柱脚試験体を補強レベル1として、水平交番繰返し載荷試験を行ない、基本モデル及び埋込み柱脚と比較することによりその補強効果及び構造性能を実験的に検証した。

3. 補強モデルによる実験

3.1 補強方法

根巻き部の補強としてコの字型の鉄筋(D13)を根巻き部上部から基礎部まで差し込むように設置する。これにより基本モデルにおいて根巻き部上面で確認された鋼柱フランジ端部からのひび割れを抑制する。この補強筋を以下 Stapler 補強筋と称する。また、ベースプレートと基礎部を結合し、打継面の離間を防ぐためにアンカーボルト(M12)を2本使用した。なお、このアンカーボルトは曲げモーメントを伝えない位置に設置した。さらに、

基本モデルでは根巻き部頂部補強フープ筋は一重であったが、補強モデルでは、通常の根巻き柱脚と同様に二重とした。

3.2 実験概要

表-2 に示すように、試験体シリーズは基本モデルの SFR100-H 及び SFR50-H 試験体に対し上記の補強を加えた SFR100AS-H 及び SFR50AS-H と、SFR100-BOX に対しアンカーボルト以外の上記の補強を加えた SFR100S-BOX の3体とする。図-4 に SFR100AS-H 試験体の概要を示す。鋼柱は基本モデルと同様に H 形鋼(H-100×100×6×8)と角形鋼(□-100×100×6)を使用した。

SFRCC の結合材には Densit セメントを使用し、水結合材比を 0.20 とし、鋼繊維(直径 0.4φ×長さ 12mm のストレートファイバ、引張強度=1350MPa、密度=7.85g/cm³)の混入率は靱性能が大きく向上した体積比 6%¹⁾とした。また、基礎部コンクリートには早強ポルトランドセメントを使用し、根巻き部の破壊機構に着目するため基礎部の破壊を極力抑えるように、基礎部で一

表-2 試験体シリーズ

験体名	l/D	根巻高さ	Stapler 補強筋	アンカーボルト	鋼柱
SFR100AS-H	1.0	100mm	○	○	H 形鋼
SFR50AS-H	0.5	50mm	○	○	H 形鋼
SFR100S-BOX	1.0	100mm	○	×	角形鋼

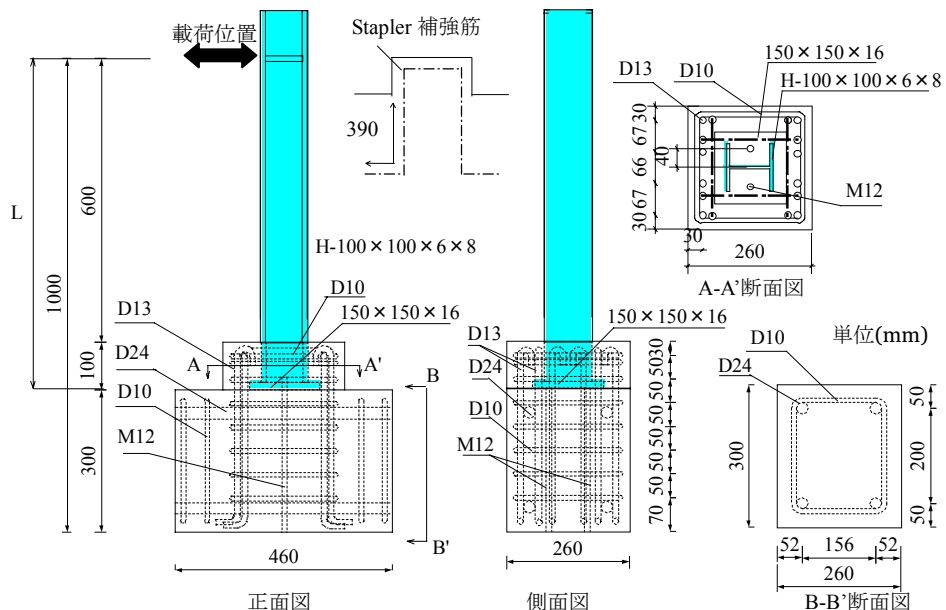


図-4 試験体概要(SFR100AS-H)

般的に用いられているコンクリートよりも高強度なコンクリートを用いた。打設はまず基礎部にコンクリートを打設後、翌日に根巻き部のみ SFRCC を打設し、10 日間の気中封かん養生を行なった。セメント系材料の硬化後の物性は表-3、鋼材の物性は表-4 に示す。載荷は軸力変動のない中柱を想定し、軸力を与えず水平方向に漸増交番繰り返し載荷とし、柱脚部の変形を含む柱部材角 θ を指標とした変位制御とした。部材角 θ は載荷点の水平変位を基礎部上端から載荷点までの高さ L ($L=700\text{mm}$) で除した値とする。各試験体の載荷変位履歴は以下に示す。(単位は rad)

・ SFR100AS-H、SFR100S-BOX

0→±1/400→±1/200→±1/100→±1/75→±1/50
→±1/40→±1/30→±1/20→0

・ SFR50 AS-H

0→±1/600→±1/400→±1/300→±1/200→±1/150
→±1/100→±1/75→±1/50→±1/40→±1/30
→±1/20→0

3.3 ひび割れ性状

補強モデルでは、基本モデルと異なり、1/50(rad)到達時では明確に確認できるひび割れが発生しなかったため、1/20(rad)到達時の各試験体のひび割れ状況を図-5 に示す。SFR100AS-H 試験体では、基礎部と根巻き部及び打継面全体に微細なひび割れが分散して発生したが、1/20(rad)到達時においても特に卓越したひび割れは確認されなかった。

SFR50AS-H 試験体では、微細なひび割れが根巻き部の上面から側面にかけて、また、鋼柱フランジ端部、打継面にも発生した。1/50(rad)サイクル以降から、鋼柱端部のひび割れと打継面の離間が開き始め、1/20(rad)サイクルにおいて 2mm 程度まで開いた。

SFR100S-BOX 試験体では、打継面と根巻き部及び鋼柱の端部から微細なひび割れが発生した。-1/20(rad)到達時には根

巻き部上面のひび割れが 2mm 程度まで開いた。

3.4 復元力特性

各試験体の荷重 - 部材角 (θ) 関係を、(a)全履歴と(b)部材角±1/50(rad)および(c)±1/100(rad)までの履歴に分け、基本モデルと比較して図-6 に示す。また、比較対照のために埋込み柱脚の履歴も併せて示した。図中の鋼柱塑性時荷重と弾性剛性は文献⁴⁾に基いて算定した。簡易柱脚の弾性剛性は基礎上端を固定端とし、EMB-H の弾性剛性は基礎上端から柱せいの 1.5 倍下がった位置を固定端として評価した。図中の降伏判定は、鋼柱のひずみが 0.2%に達した時点とした。

図-6 (a)の比較において、SFR100AS-H は多少のスリップ性状は確認されるものの埋込み柱脚と同様の紡錘型の復元力特性と、より高い耐力が得られた。

SFR50AS-H はスリップ型の復元力特性を示したが、基本モデルと異なり、最終サイクルまで耐力の低下は確認されなかった。また、この復元力特性は基本モデルの SFR100-H 試験体の復元力特性と類似している。

SFR100S-BOX は、アンカーボルトを適用した

表-3 セメント系材料の物性

材料	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	動弾性係数 (GPa)
SFRCC	64.8	13.8	42.4
コンクリート	36.3	2.5	39.1

表-4 鋼材の物性

	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び(%)
根巻き部主筋 Stapler 補強筋 D13	371	512	25
根巻き部フープ筋 D10	363	506	25
H-100×100×6×8	368	459	29
□-100×100×6	394	453	34
ベースプレート(板厚 16mm)	320	450	32

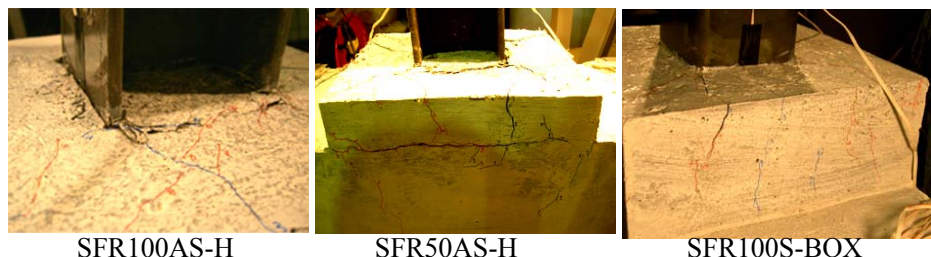


図-5 1/20(rad)時のひび割れ状況

SFR100AS-Hと比較すると、多少スリップ性状が見られるが、おおよそ紡錘型の復元力特性が得られた。また、SFR100S-BOXとSFR100AS-Hの比較により、アンカーボルトの設置によるスリップ性状の緩和が確認できる。

図-6の(a)(b)(c)の比較より、 $l/D=0.5$ の試験体は(c)の部材角 $\pm 1/100(\text{rad})$ まで、 $l/D=1.0$ の試験体は(b)の部材角 $\pm 1/50(\text{rad})$ までの履歴では、基本モデルとの顕著な差は見られないことが確認できる。

基本モデルを含めた各試験体の最大耐力と埋

込み柱脚に対する耐力比を表-5に示す。SFR100AS-H、SFR100S-BOXは埋込み柱脚より高い耐力が、SFR50AS-Hは埋込み柱脚の約8割の耐力が得られた。また、表-6に基本モデルを含めた各試験体の弾性剛性に対する各部材角到達時の割線剛性の比率を示す。表より基本モデルの試験体において、特にSFR50-H試験体で見られた顕著な剛性低下は、補強レベル1の試験体においてはある程度抑えられている。また、 $l/D=0.5$ の簡易柱脚試験体における弾性剛性に対する比率は低く、通常の根巻き柱脚の剛性評

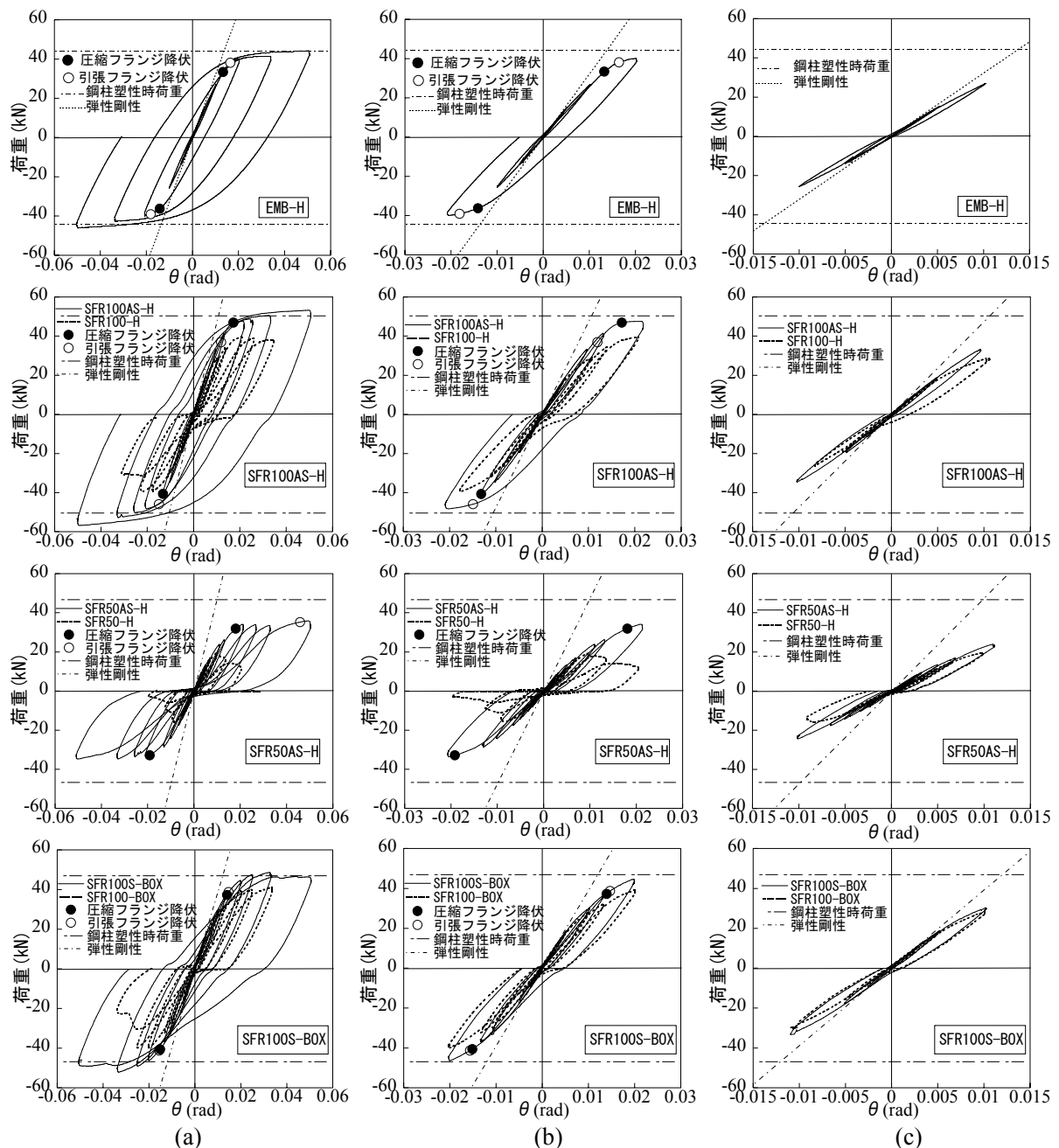


図-6 復元力特性(a)全履歴 (b)部材角 $\pm 1/50(\text{rad})$ までの履歴 (c) $\pm 1/100(\text{rad})$ までの履歴

価では簡易柱脚の剛性は過大評価されており、適切な剛性評価は今後の研究課題と考える。

4. まとめ

本稿では、鋼構造柱脚の簡易化として、根巻き柱脚に着目し、根巻き部に SFRCC を適用した簡易柱脚の基本モデルに対し、各種補強を行ない、ひび割れ性状及び復元力特性に着目して水平交番繰り返し載荷を行ない、その補強効果及び構造性能を実験的に検証した。本研究の範囲では、以下の知見が得られた。

- 1) $\ell/D = 1.0$ の試験体は基本モデルを補強することにより、埋込み柱脚と同様の紡錘型の復元力特性が得られ、最大耐力は埋込み柱脚より高い値が得られた。
- 2) $\ell/D = 0.5$ の試験体は基本モデルを補強することにより、 $\ell/D = 1.0$ の基本モデル試験体と同様のスリップ型の復元力特性が得られ、鋼柱は充分塑性化しなかったが、 $\pm 1/20(\text{rad})$ サイクルまで耐力は低下しなかった。
- 3) $\ell/D = 1.0$ の補強モデルにおける H 形鋼と角形鋼の試験体の比較によって、アンカーボルトのスリップ性状を緩和する効果が確認できた。
- 4) $\ell/D = 0.5$ の試験体は部材角 $1/100(\text{rad})$, $\ell/D = 1.0$ の試験体は $1/50(\text{rad})$ 以降における補強効果が大きいことが明らかになった。

謝辞

本研究は平成 14 年度～平成 16 年度の科学研究費補助金(基盤研究(C)(1)(代表：金子佳生，研究課題番号 14550555))による「環境負荷低減を目指した簡易接合構造システムとその性能モニタリングに関する研究」の一部である。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 桐越一紀，金子佳生，三橋博三，阿部孝仁：高強度高靱性を有する鋼繊維補強セメント系複合材料の材料特性，日本建築学会技術報告集，第 11 号，pp.1-4，2000.
- 2) 金子佳生，三橋博三，桐越一紀，阿部孝仁：

表－5 最大耐力と埋込み柱脚に対する耐力比

	最大耐力(kN)	埋込み柱脚に対する耐力比
SFR100AS-H	55.0	1.22
SFR50AS-H	35.3	0.78
SFR100S-BOX	50.4	1.12

表－6 弾性剛性に対する各部材角の割線剛性

	弾性剛性	1/400(rad)	1/200(rad)	1/100(rad)
EMB-H	1.00	0.93	0.89	0.82
SFR100AS-H	1.00	0.89	0.82	0.71
SFR100-H	1.00	0.83	0.77	0.61
SFR50AS-H	1.00	0.63	0.57	0.47
SFR50-H	1.00	0.51	0.50	0.36
SFR100S-BOX	1.00	0.94	0.90	0.76
SFR100-BOX	1.00	0.88	0.85	0.72

鋼繊維補強セメント系複合材料の単純化した一軸構成モデル，日本建築学会技術報告集，第 11 号，pp.5-8，2000.

- 3) 金子佳生，三橋博三，桐越一紀，阿部孝仁：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造簡易柱梁接合-接合部の構造性能に関する実験的検証-，日本建築学会構造系論文集，第 558 号，pp.219-225，2002.8.
- 4) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp.217-258，2001.
- 5) 佐々木徹，金子佳生，三橋博三，桐越一紀：新しい鋼構造柱脚構法の開発に関する研究-H 形鋼根巻型柱脚に関する基礎実験-，コンクリート工学年次論文集，第 25 巻，第 2 号，pp.1711-1716，2003.
- 6) 下川博之，金子佳生，三橋博三，諏訪内由紀：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造簡易柱脚に関する実験的研究(その 1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.759-760，2004.
- 7) 諏訪内由紀，金子佳生，三橋博三，下川博之：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造簡易柱脚に関する実験的研究(その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.761-762，2004.