鋼繊維補強セメント系複合材料 の新分野への応用

—鋼構造簡易柱脚に関する基礎実験—

NEW APPLICATION FIELD OF STEEL FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

—Experiment on simple column base system in
steel structures—

金子佳生 —*1 三橋博三 —*2
桐越一紀 —*3 佐々木 徹 —*4

Yoshio KANEKO —*1 Hirozo MIHASHI —*2
Kazuki KIRIKOSHI —*3 Toru SASAKI —*4

キーワード：
鋼繊維補強, セメント系複合材料, 簡易柱脚, 根巻き柱脚

Keywords:
Steel fiber reinforcement, Cementitious composite, Simple column base
system, Concrete encased column base

In this paper, a simple column base system in steel structures is proposed and the structural performance is experimentally examined. The column base is encased by filling steel fiber reinforced cementitious composites. In the test, cantilever column specimens are employed for both the proposed system and the ordinary column base embedded in normal concrete base, and cyclic load is applied. The results show that the specimens of proposed system give relatively ductile hysteresis characteristics for the limit drift ratio of 0.01-0.02(rad) in comparison to the specimens of the ordinary column base. It is concluded that the proposed simple column base system is applicable.

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震によって、柱脚部の被害が多数生じた。そのうち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¹⁾。そのため兵庫県南部地震以降、根巻き柱脚の使用頻度は減少し、主に埋込み柱脚が用いられるようになった。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点を含んでいる。そのため、柱脚部の要求性能を満たし、かつ施工性にも優れた簡便な構工法の開発が望まれる。一方、建築基準法改正に伴い、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、より特徴のある廉価な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の種々の構工法の可能性がある。

筆者らは、これまで Densit セメント²⁾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・高靱性な鋼繊維補強セメント系複合材料 (Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites: SFRCC) の材料実験³⁾を行い、これら材料実験結果に基づいて SFRCC の構成モデル⁴⁾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、ブラケット長さ、充填材、スラブ補強、載荷履歴の影響に着目して、Densit セメント²⁾を基材とする SFRCC を使った接合部を有する部材実験⁵⁾により、鋼構造柱梁接合法の構造性能を実験的に検証した。さらに、柱梁接合部の局所変位が架構全体の挙動に与える影響を明らかにするため、接合部の変形特性を数値解析的に評価できる接合部バネモデルを提案した⁶⁾。

本研究は、これまで開発してきた鋼構造の簡易柱梁接合法に加え、鋼構造柱脚の簡易化に着目し、根巻き型柱脚に対してより施工を簡便にした工法として、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、及び鉄筋との高い付着力⁷⁾を活用したものであり、根巻き頂部上端レベルを床面以下とすることにより、施工性の向上のみならず、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出来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/柱せい比(ℓ/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概念的な比較を示す。本研究で提案する簡易柱脚は、SFRCC と鉄筋を用いて、鋼柱とコンクリート基礎を接合し、埋込み柱脚と同等の構造性能を目指した工法であり、根巻き高さ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⁸⁾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、特別な補強をせず、SFRCC

*1 東北大学大学院工学研究科 助教授・Ph. D.
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

*2 東北大学大学院工学研究科 教授・工博

*3 東北大学工学部 教務職員

*4 住友大阪セメント(株) 修士(工学)

*1 Assoc. Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Ph. D.

*2 Prof., Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dr. Eng.

*3 Research Assistant, Tohoku University, Faculty of Engineering

*4 Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd., M. Eng.

図1 鋼構造柱脚の簡易化

の耐荷性能を明らかにするための基礎実験を報告する。なお、本柱脚の適用範囲は、必要性能により条件が異なるが、基本的に低層の鋼構造建築を対象としている。

本研究に先立って行なった予備実験⁹⁾では、 $l/D=1.5$ と 3.0 を対象に、根巻き部及び基礎部に普通コンクリートを用いた試験体と、SFRCCを用いた試験体を採用した。各試験体は、対称性を利用した単純梁形式で片振り繰返し載荷を行なうために、2本の鋼柱の根巻き部を単純梁中央部で一体打ちとしている。詳細は文献⁹⁾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 ($l/D=3.0$)、及び支圧による根巻き頂部の大きなひび割れと剥離 ($l/D=1.5$) が観察されたのに対し、SFRCC試験体 ($l/D=3.0, 1.5$) は若干の曲げひび割れが見られたのみで、鋼柱が降伏しても顕著な損傷は見られず、耐力的には十分な性能があることが明らかとなった。

本研究では、予備実験に基づき、根巻き頂部上端レベルが床面以下となる条件として、 $l/D=1.0$ と 0.5 を採用する。また、予備実験

と異なり、基礎部にコンクリートを打設後、根巻き部のみ SFRCC を後打設した簡易柱脚試験体を用いる。本実験では、軸力変動のない中柱を想定し、水平交番繰返し載荷試験を行ない、その構造性能と実現性を明らかにする。

2. 実験概要

本実験の簡易柱脚試験体は、先述した構造条件に加え、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、簡易柱脚の基本モデルと位置付ける。

図2に基本モデルの試験体形状と載荷方法を示す。また、表1に全試験体概要を示す。H形鋼を用いた埋込み柱脚(EMB-H)は、提案した簡易柱脚(SFR100-H、SFR50-H)との性能比較を対象とした試験体であり、角形鋼管を用いた簡易柱脚(SFR100-BOX)は鋼柱の断面形状の違いによる簡易柱脚の性能比較を行なうための試験体である。載荷は軸力を与えず、水平方向に漸増交番繰返し載荷とし、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。なお、部材角 θ は図2における載荷点の水平変位を基礎上端部から載荷点までの高さ $L(=700\text{mm})$ で除した値とする。 $\pm 1/200(\text{rad})$ 以下の変形領域では使用限界性能の観点から、試験体の剛性レベルに着目する。また、 $\pm 1/200(\text{rad})$ を超える変形領域では、最終破壊モードが確定するまで載荷し、各試験体の安全限界性能を把握する。耐荷性能に応じて設定した載荷変位履歴を図3及び以下に示す。

- EMB-H : $0_{\pm 1/400} \pm 1/200 \pm 1/100 \pm 1/50 \pm 1/30 \pm 1/20_0$
- SFR100-H、SFR100-BOX : $0_{\pm 1/400} \pm 1/200 \pm 1/100 \pm 1/75 \pm 1/50 \pm 1/40 \pm 1/30_0$
- SFR50-H : $0_{\pm 1/600} \pm 1/400 \pm 1/300 \pm 1/200 \pm 1/150 \pm 1/100 \pm 1/75 \pm 1/50 \pm 1/40 \pm 1/30_0$

図2 簡易柱脚基本モデルの試験体形状 (EMB-H、SFR100-H、SFR50-H) と載荷方法

セメント系材料の硬化後の物性（載荷時材齢 1 週）及び鋼材の物性を表 2、表 3 にそれぞれ示す。SFRCC の結合材には Densit セメントを用いて、水結合材比を 0.20、砂結合材比を 1.353 とした。SFRCC の鋼繊維（直径 0.4φ×長さ 12mm のストレートファイバ、引張強度=1350N/mm²、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%³⁾ とした。実験では根巻き部の破壊機構に着目するため、基礎部コンクリートの破壊を極力抑えるように、基礎部で一般に用いられているコンクリートよりも高強度とした。

打設は基礎部、根巻き部ともに合板枠を用いた上部開口の箱型とし、上部から振動機、突き棒を用いて行った。まず基礎部のコンクリートを打設し、翌日にベースプレート底部のキャッピング処理及び根巻き部の打設を行った。コンクリート、SFRCC とともに流動性に特に問題はなく、振動機と突き棒を用いて打設を行うことが可能であった。また、養生は 1 週間の気中封かん養生を行った。

図 3 荷重変位履歴 (SFR100-H、SFR100-BOX)

表 1 試験体概要

試験体	柱脚	鋼柱	根巻き高さ (mm)	ℓ/D
EMB-H	埋込み柱脚	H-100*100*6*8		
SFR100-H	簡易柱脚	H-100*100*6*8	100	1.0
SFR50-H	簡易柱脚	H-100*100*6*8	50	0.5
SFR100-BOX	簡易柱脚	□-100*100*6	100	1.0

表 2 セメント系材料の硬化後の物性（材齢 1 週）

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	動弾性係数 (kN/mm ²)
SFRCC	61.4	7.8	41.6
コンクリート	32.7	3.5	34.5

表 3 鋼材の物性

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
根巻き部主筋 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
BASE PLATE-16	320	450	32

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状

図 4 に、部材角 1/50(rad) 時での全試験体のひび割れ写真を示す。EMB-H 試験体は、部材角 +1/50(rad) 到達時に圧縮、引張両側の鋼柱脚部フランジに降伏(ひずみ 0.2% で判定)が確認された。1/50(rad) を超えた領域では、基礎コンクリートに鋼柱脇からの微細ひび割れが進展したが、試験体の耐力に影響を与えるものではなかった。また、-1/20(rad) 到達時には引張側鋼柱フランジと基礎コンクリートの離間が確認された。

SFR100-H 試験体は部材角 1/200(rad) まではひび割れは確認できなかったが、+1/100(rad) 到達時に鋼柱フランジ端部からのひび割れ、及び基礎部と根巻き部の打継面のひび割れが確認された。 $\pm 1/75$ (rad)、 $\pm 1/50$ (rad) の荷重サイクルでは主に根巻き部 SFRCC の局部破壊が進展した。 $\pm 1/40$ (rad) 到達時には打継面のひび割れの進展も見られた。また、このとき支圧により鋼柱フランジ端部から発生・進展したひび割れの幅が大きく開いている。

SFR50-H 試験体は、部材角 -1/200(rad) 到達時に引張側鋼柱フランジ端部より微細ひび割れが発生し、-1/100(rad) 到達時にはこのひび割れが根巻き部側部にまで進展していくのが確認された。-1/75(rad) 到達時には根巻き部の損傷の進展は停滞し、破壊の進展は基礎部コンクリートと根巻き部 SFRCC の打継面の損傷へと移った。打継面のひび割れは部材角の増加にともない、打継面中央部から端部へと徐々に広がった。-1/75(rad) 到達時には約 2mm であった打継面のひび割れ幅は、-1/50(rad) 到達時には約 4mm まで進展することが確認された。

SFR100-BOX 試験体は、部材角 $\pm 1/100$ (rad) 到達時に打継面の微細ひび割れ及び鋼柱脇からのひび割れがほぼ同時に発生した。-1/100(rad) 時には打継面のひび割れ、+1/75(rad) 時には根巻き部 SFRCC のひび割れがそれぞれ進展した。ここから 1/30(rad) までの領域では根巻き部 SFRCC のひび割れを中心に破壊が進行していった。1/30(rad) 到達時には打継面のひび割れ幅も大きく開いた。このように、SFR100-BOX 試験体の破壊進展状況は H 形鋼を用いた SFR100-

図 4 全試験体の部材角 1/50(rad) 時でのひび割れ状況

H 試験体と類似しており、鋼柱の断面形状の違いによる簡易柱脚の力学的挙動と構造性能に大きな差はみられなかった。

3.2 復元力特性

図5に全試験体の荷重-部材角(θ)関係を、(a)全履歴、(b)部材角 $\pm 1/50$ (rad)及び(c) $\pm 1/100$ (rad)までの履歴に分けて示す。また、図中に文献⁹⁾に基づいて算定した鋼柱塑性時荷重と弾性剛性を示す。

ここで、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、簡易柱脚は基礎上端を固定端として評価した。なお、図中の降伏判定は、ひずみが0.2%に達した時点とした。図5(a)の比較において、EMB-H試験体は紡錘形の復元力特性を示し最大耐力も高い値が得られたのに対し、簡易柱脚試験体は根巻き部の損傷が影響し、スリップ形の復元力特性を示していることがわかる。

図5 全試験体の復元力特性 (a) 全履歴 (b) 部材角 $\pm 1/50$ (rad)までの履歴 (c) 部材角 $\pm 1/100$ (rad)までの履歴

ここで、EMB-H 試験体に対する簡易柱脚試験体の最大耐力比は、0.9(SFR100-H、SFR100-BOX)と 0.4(SFR50-H)であり、 $\ell/D=1.0$ の試験体は埋込み柱脚に近い最大耐力値を示したのに対し、 $\ell/D=0.5$ の試験体は低い最大耐力値となっている。この要因として、SFR50-H 試験体では、根巻き部主筋と鋼柱の重なり部が極端に少ないこと、及び根巻き頂部フープ筋レベルがベースプレートレベルに近く、力の伝達機構が充分でないことが上げられる。

図 5(b)の比較において、EMB-H 試験体と他の試験体の差異は減少し、特に SFR100-H 及び SFR100-BOX 試験体は、若干のスリップ性状は見られるもののかなり EMB-H 試験体に近い履歴性状を示している。ただし、SFR50-H 試験体に関してはスリップ性状が緩和されていない。図 5(c)の比較においては、SFR50-H 試験体のスリップ性状は大幅に緩和され、特に部材角 $\pm 1/200$ (rad)以内では、全試験体は、ほぼ線形弾性に近い履歴性状を示している。

表 4 に各試験体の、弾性剛性に対する各部材角到達時割線剛性の比率を示す。また、() 内に、EMB-H 試験体の弾性剛性に対する、簡易柱脚試験体の各部材角到達時割線剛性の比率を示す。表より、簡易柱脚試験体の剛性比率は低く、図 5 から明らかなように、基礎上端を固定端とした場合、簡易柱脚の剛性を過大評価していることがわかる。特に、根巻き高さ $h=50\text{mm}$ の試験体では、顕著である。これに対し、() 内に示すように、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た EMB-H 試験体の弾性剛性を用いた場合、SFR100-H 及び SFR100-BOX 試験体は、概ね妥当な評価となっており、本簡易柱脚の剛性評価手法に関する重要なデータと考える。また、全試験体の剛性値は、部材角 $1/200$ (rad) 到達時まで、部材角 $1/400$ (rad) 到達時割線剛性に近い値を維持していることがわかる。ただし、 $1/100$ (rad) 到達時には根巻き部のひび割れの影響により、剛性が大きく低下しており、その低下度は根巻き高さが低い程顕著となっている。

表 4 弾性剛性に対する各部材角の割線剛性（正負平均値）の比率

	弾性剛性	1/400(rad)	1/200(rad)	1/100(rad)
EMB-H	1.00	0.93	0.89	0.82
SFR100-H	1.00	0.83(1.22)	0.77(1.14)	0.61(0.90)
SFR50-H	1.00	0.51(0.75)	0.50(0.74)	0.36(0.53)
SFR100-BOX	1.00	0.88(1.07)	0.85(1.03)	0.72(0.87)

() 内は、EMB-H の弾性剛性に対する比率を示す。

3.3 最終破壊モード

実験では、部材角 $1/200$ (rad) 時で全ての簡易柱脚試験体の根巻き部に微細なひび割れが観察されたものの、概ね健全な状態を保っていた。これに対し、図 4 に示すように、部材角 $1/50$ (rad) 時では、各試験体の損傷度合の違いが顕著となっている。即ち、EMB-H 試験体は基礎部がほぼ健全な状態を保っているが、SFR100-H 及び SFR100-BOX 試験体は鋼柱フランジから根巻き部に発生するひび割れが進展し、SFR50-H 試験体は打継面の離間が進展している。

図 6 に各試験体の鋼柱脚部両フランジにおけるひずみ履歴を示す。図中のひずみ 0.2% 線は、降伏判定基準である。なお、測定ひずみは荷重の各荷重サイクルにおける部材角の到達点のみをプロットしている。EMB-H 試験体では、降伏が確認されたのは鋼柱両フランジ

図 6 全試験体の鋼柱脚部両フランジのひずみ履歴

のみであった。基礎部に微細ひび割れが生じ、また、基礎部コンクリートの頂部フープ筋のひずみが比較的大きな値(0.1%程度)を示したが、これらは最終破壊モードに影響を及ぼすものではなく、両フランジの大きなひずみ履歴が示すように、鋼柱の降伏による破壊が支配的となっている。

SFR100-H 及び SFR100-BOX 試験体は、鋼柱両フランジ及び根巻き部頂部フープ筋に降伏が確認された。ただし、鋼柱フランジの最大ひずみ(SFR100-H : 0.25%程度、SFR100-BOX : 0.3%程度)は根巻き頂部フープ筋の最大ひずみ(SFR100-H : 0.3%程度、SFR100-BOX : 1.3%程度)と比較して小さく、また根巻き部主筋の打継面位置にも比較的大きなひずみ(SFR100-H : 0.15%程度、SFR100-BOX : 0.15%程度)が観察され、打継面の離間現象により主筋に大きな引張力が発生していることがわかる。以上より、鋼柱の降伏と拮抗しながらも、最終

破壊モードは鋼柱脚部の曲げ変形と打継面の離間現象に伴う回転変形の連成運動による根巻き頂部でのSFRCCの局部破壊と考えられる。

SFR50-H 試験体では、鉄筋及び鋼柱は降伏には至らなかったが、根巻き頂部フープ筋と鋼柱フランジに 0.1%程度の比較的大きなひびきみが観察された。ただし、根巻き部主筋の打継面位置では最大ひびきみは 0.05%と小さく、根巻き部への主筋の不十分なみこみにより誘発された打継面の離間が試験体の変形挙動を支配していることがわかる。以上より、根巻き頂部での SFRCC の局部破壊と拮抗しながらも、最終破壊モードは、根巻き部 SFRCC への主筋の不十分な定着による打継面での局部破壊と考えられる。

3.4 簡易柱脚の保有構造性能

実験結果に基づくこれまでのひび割れ性状、復元力特性及び最終破壊モードに関する考察より、簡易柱脚の耐荷・変形能に関する保有構造性能を要約すると以下となる。

「根巻き部に特別な補強筋を施さず、ベースプレートと基礎部を機械的に結合しない」という条件に対し、 $\ell/D=1.0$ の簡易柱脚基本モデルの場合、本実験における部材角 $1/50(\text{rad})$ 相当の限界変位レベルに対して、耐力低下のない安定した構造性能を示している。また、 $\ell/D=0.5$ の簡易柱脚基本モデルの場合、本実験における部材角 $1/100(\text{rad})$ 相当の限界変位レベルに対して、ほぼ耐力低下のない安定した構造性能を示している。

基本モデルの保有構造性能に対し、より大きな変位レベルにおいても、埋込み柱脚と同程度の構造性能を確保するためには、 $\ell/D=1.0$ の簡易柱脚応用モデルとしては、根巻き頂部での局部破壊を抑制するため、根巻き部鋼柱周辺に拘束補強筋を配置し、鋼柱脚部の曲げ変形による支圧に誘発されたひび割れを制御するとともに、アンカーボルトを使用し打継面の離間に伴う回転変形を制御することが考えられる。 $\ell/D=0.5$ の簡易柱脚応用モデルとしては、根巻き部 SFRCC と主筋の不十分な定着による打継面の離間破壊を抑制するために、曲げ抵抗を保持できるアンカーボルトや、主筋にかわる根巻き部 SFRCC と基礎部との結合補強筋を配置し、打継面の離間現象に伴う回転変形を制御することが考えられる。さらに、 $\ell/D=1.0$ の簡易柱脚と同様の根巻き部補強筋を配置し、鋼柱脚部の曲げ変形による支圧に誘発されたひび割れを制御することが考えられる。

応用モデルの上記いずれの補強方法においても、必要性能と施工性との重み付けにより決定される必要があり、各種補強法の構築、並びに耐荷機構のモデル化と変形特性評価は、本研究の今後の課題と位置付けている。

4. まとめ

本稿では、鋼構造柱脚の簡易化に着目し、根巻き型柱脚に対してより施工を簡便にした工法として、根巻き部に SFRCC を適用した簡易柱脚を提案した。また、根巻き部に特別な補強筋を施さず、ベースプレートと基礎部を機械的に結合しない基本モデルに対し、ひび割れ性状、復元力特性及び最終破壊モードに着目して水平交番繰返し載荷試験を行ない、その構造性能と実現性を実験的に検証した。本研究の範囲内では、以下の知見が得られた。

- 1) 鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた簡易柱脚は、根巻き高さ／柱せい比(ℓ/D)が 1.0 の基本モデルでは部材角 $1/50(\text{rad})$

相当の限界変位レベルに対して、また $\ell/D=0.5$ の基本モデルでは部材角 $1/100(\text{rad})$ 相当の限界変位レベルに対して、ほぼ耐力低下のない安定した構造性能を示した。

- 2) 根巻き高さ／柱せい比(ℓ/D)が 1.0 の基本モデルでは、H 形鋼及び角形鋼管ともに、同様の力学的挙動を示した。

本研究は、要求性能を満たしかつ施工性にも優れた簡便な柱脚システムに対し、建築物の供用期間と必要性能に応じて基本モデル、及びそれに補強を加えた応用モデルの選択が可能な性能マップを構築するための最初のステップと考える。今後は、本稿で示した基礎実験結果に基づいて応用モデルを構築し、基本モデルと応用モデルの破壊進行状況を解析的に評価し、簡易柱脚の変形性状が架構全体の挙動に与える影響を明らかにする必要がある。

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、謝意を表する。また、実験用鋼材をご提供頂いた(社)日本鉄鋼連盟、並びに実験用 DENSIT セメントと鋼繊維をご提供頂いた清水建設(株)に末筆ながら記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編-3、鉄骨造建築物／シェル・空間構造／容器構造、1997.10.
- 2) Beche, H.H: Densified Cement/Ultrafine Particle-based Materials, presented at Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, June 1981.
- 3) 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、2000.12.
- 4) 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、2000.12.
- 5) 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.
- 6) 金子佳生、三橋博三、佐々木徹：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた鋼構造柱梁接合とその変形特性-せん断破壊力学モデルを用いた接合部パネ評価-、日本建築学会構造系論文集、第 573 号、pp. 169-176、2003.11.
- 7) 塩屋俊幸、栗田守朗、別所友宏、辻秀夫：鋼繊維補強モルタル、H 形鋼を用いたプレキャストコンクリート継手、コンクリート工学年次論文報告集、第 19 巻、第 2 号、pp. 1305-1310、1997.
- 8) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、pp. 217-258、2001.11.
- 9) 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 形鋼根巻き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.

[2004年10月19日原稿受理 2005年2月23日採用決定]