論文 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 -

佐々木 徹*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、根巻型柱脚のコンクリート部分に高強度・高靭性を有する鋼繊維補強セメント系複合材料を適用し、実験的に力学的性能及び施工性を検証することで、その妥当性を評価したものである。

キーワード:鋼繊維補強、セメント系複合材料、根巻型柱脚、鋼構造

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。日本建築学会近畿 支部で行った被害調査によれば、調査した 988 棟の被害建物のうち 218 棟の建物で柱脚の被害 が認められている¹⁾。そのうち大半は露出型柱 脚であることが確認されており、根巻型柱脚の 被害例についてもいくつか報告されている。一 方、埋込型柱脚については顕著な被害は報告さ れていない。

兵庫県南部地震以来、根巻型柱脚の使用頻度 は減少し、主に埋込型柱脚が用いられるように なった。しかし、埋込型柱脚は、基礎梁の主筋 の配置が複雑であることや、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²⁾を満たし、 かつ施工性にも優れた簡便な構法の開発が望ま れる。

筆者らは、鋼構造架構の簡便な施工法を目指 して、鋼繊維補強セメント系複合材料(Steel Fiber Reinforced Cementitious Composite : SFRCC)を用いた柱梁接合部の構法について研 究してきた。筆者らは材料実験結果³⁾に基づい て SFRCC の構成モデル⁴⁾を定式化し、その妥当 性を評価した。さらに、構築した構成モデルを

- *1 東北大学大学院工学研究科 (正会員)
- *2 東北大学大学院工学研究科 助教授(正会員)
- *3 東北大学大学院工学研究科 教授(正会員)
- *4 東北大学工学部 教務職員 (正会員)

非線形有限要素法に組み込んだ数値解析により SFRCC を使った簡易鋼構造柱梁接合部要素の 力学特性を評価し⁵⁾、充填材にコンクリートと SFRCC を使用した場合の部材の力学特性より、 SFRCC の有用性を実験的に示唆した⁶⁾。

SFRCCの結合材にはDensit セメント⁷⁾を使用 している。この結合材は粒径が 0.5~100 µmの 範囲のセメントと 50 ~ 0.5 µ m の超微粒子で あるマイクロシリカから構成されており、マイ クロシリカは結合材量の 20~25% (重量比)を 占めている。また、セメント粒子の分散性を高 めるために粉体の高性能減水剤(ナフタリン系) がプレミックスされている。この結合材を使用 することにより、マイクロシリカがセメント粒 子間を埋めて非常に緻密なセメント硬化体とな るため、超高強度のモルタルやコンクリートを 製造することができる。その緻密さが凍結融解 に強く、透過性が低く、付着性がよいという性 質を持っている。この材料は強度が出る反面脆 くなってしまうが、強い細骨材や繊維補強がそ の埋め合わせをしてくれる。

以上述べた研究背景に基づいて、本研究では、 鋼構造柱脚の新しい構法の開発として、根巻型 柱脚の根巻部及び基礎部に SFRCC を適用した ものを検証する。比較的施工性の良い根巻型柱

-1711-

脚について、図1、図2に示すように、根巻部 及び基礎部にSFRCCを用いて埋込型柱脚と同 等の力学的性能を得ることを目標とする。施工 面では、埋込型柱脚にあるような複雑な基礎部 の配筋を簡素化することが可能となり、また、 アンカーボルトを使用しないことにより不明瞭 な破壊挙動が制御できると考えられる。根巻部 に関しても、図2に示すように、柱脚部の要求性 能を満たす限り、根巻高さを可能なまでに低く することにより、施工性の向上、及び建築面積 の有効利用につながると考えている。

本論文では、H形鋼根巻型柱脚の柱脚部に SFRCCを適用したものを考え、実験的に力学的 特性及び施工性を検証することで、その妥当性 を評価することを目的とする。



2. 実験概要

本研究では、根巻型柱脚の根巻部及び基礎部 にコンクリート、SFRCCの2種類を使用し、そ れぞれについて根巻高さ150mm、300mmの計 4体の試験体を作製した。行った実験のシリー ズを表1に示す。試験体は対称性を考慮し、2 つの根巻型柱脚の根巻部をつけ合わせた形状と し、試験体中央部の100mm×100mmの鉄板を 介して鉛直方向に載荷する。

表	1	実験	シ	IJ	ーズ
22	1	天阦	2	יי	- ^

充填材	根巻高さ 150mm	根巻高さ 300mm
コンクリート	N150	N300
SFRCC	S150	S300



図4 根巻高さ 300mm 試験体図

試験体にはアンカーボルトをなくし、曲げ特 性のみに着目しており、軸力は与えていない。 試験体概要図を図3、図4に示す。コンクリー トと SFRCC の違い、また根巻高さの違いによ るひび割れ発生、破壊機構、耐力の変化に着目 し、アンカーボルトの無いベースプレート下部 の充填材部分の挙動にも着目する。

水	結合材	細骨材	粗骨材	水結合材比
(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(%)
198	342	803	1042	58
表 3 SFRCC の調合				
水	結合材	細骨材	鋼繊維	水結合材比
(g/l)	(g/l)	(g/l)	(g/l)	(%)
200	1000	1353	537	20

表2 コンクリートの調合

鋼繊維: 0.4mm×12.0mm、比重=7.85、アスペ クト比 30、引張強さ 1350N/mm²

コンクリートは結合材に早強セメントを使用 した。水セメント比 58%、設計基準強度は 24N/mm² となるように JASS 5⁸⁾から算出した。 SFRCC は、従来の研究より高強度・高靭性を発 揮することが確認されている繊維混入率 6.0%³⁾ とした。コンクリートの調合、使用材料を表 2、 SFRCC の調合、使用材料を表 3 に示す。

破壊形式は、根巻高さ 300mm では根巻部の 引張側主筋の降伏による曲げ破壊、根巻高さ 150mm では根巻頂部直上外側の鋼柱の降伏に よる曲げ破壊を想定した。本研究に使用した材 料の力学的特性に関する材料実験結果を表4、 表5に示す。

練り混ぜには強制練り混ぜ機を使用し一度に 40 リットルの練り混ぜを2回行い、150mm、 300mmの両試験体に同時に打ち込んだ。根巻部 は木枠による上部開口の箱型として打ち込みを

	圧縮強度	引張強度	弾性係数
	(MPa)	(MPa)	(GPa)
コンクリート	20.9	1.9	17.2
SFRCC	84.3	12.5	32.1

表4 充填材の力学的特性

	降伏強度	引張強度	伸び
	(MPa)	(MPa)	(%)
異形鉄筋 D10	363	506	25
異形鉄筋 D13	371	512	25
H-100 × 100 × 8 × 6	320	450	32
PL-150 × 150 × 16	368	459	29

行った。材料別に見ると、練り混ぜに関しては、 コンクリートは流動性がよく、打ち込み時も突 き棒、振動機を用いてスムーズに型枠に流し込 むことができた。一方、SFRCCはコンクリート と比較して流動性に劣り、強制練り混ぜ機のア ーム部分に鋼繊維の固まりが溜まってしまい、 練り混ぜに時間を要した。打ち込み時もコンク リートと比較して長時間の振動を要したが、試 験体内は不良もなく均一に打ち込むことができ た。養生は気中養生を1週間行い、その後載荷 を行った。載荷は単方向くり返し載荷とした。

3. 試験体の設計

本研究で行った材料実験結果より試験体の耐 力を想定した。断面計算は鋼構造接合部設計指 針⁹⁾に基づいて行った。断面計算によって得ら れた最大曲げ耐力値を表6に示す。表の設定耐 力が示すように、根巻高さ 300mm の試験体は 根巻部の引張側主筋の曲げ降伏、根巻高さ 150mm の試験体は鋼柱の曲げ降伏によりそれ ぞれ柱脚の耐力が決定されている。

表6 最大曲げ耐力

根巻高さ	M _{u1} (MN• mm)	$M_{u2}(MN \cdot mm)$
150mm	33.6 ^{*1}	40.1
300mm	45.3	40.1 ^{*2}

*1、*2:設定耐力

ベースプレート下面位置での根巻型柱脚の最 大曲げ耐力 M_uは次式による。

$$M_u = \min\{M_{u1}, M_{u2}\}$$
(1)

$$M_{u1} = \frac{cMpc}{1 - \frac{rl}{l}} \tag{2}$$

$$M_{u2} = 0.9a_t F_{ry'r} d \tag{3}$$

M_{ul}:最上部帯筋位置の曲げモーメント_s*M*が柱の 全塑性モーメント_c*M_{pc}*に達する時の、根巻部ベー スプレート下面位置における曲げモーメント *M_{u2}*:根巻鉄筋コンクリートの曲げ降伏により決 まる耐力

l:ベースプレート下面から柱の反曲点までの距離
a_t:引張主筋の断面積

Fry:主筋の降伏強さ

,d:圧縮縁から引張主筋重心までの距離



図5 最大曲げ耐力時の根巻部の応力状態

4 . 実験結果及び考察

4.1 根巻高さ 300mm の実験

図6に荷重-中央変位関係を、図7、図8に根 巻高さ300mmの破壊状況を示す。N300は荷重 0.06MNの時に曲げひび割れがベースプレート 位置縦方向に、根巻頂部に支圧ひび割れが現れ た。0.09MN時には、縦方向曲げひび割れ、載 荷板に向かって45度方向の斜めひび割れが底 部から現れ、根巻頂部の支圧ひび割れの数も増 加した。0.11MNまで荷重を増加させるとひび 割れの数はさらに増え、0.13MN時には曲げひ び割れのひび割れ幅が広がっているのが確認で きた。荷重が0.11MNに到達した時に根巻部の 引張側主筋、鋼柱の降伏が確認された。また、 0.13MNに到達した時には頂部せん断補強筋の 一部と圧縮側の鉄筋の降伏も確認された。

S300 は最初にひび割れが確認されたのが 0.12MN の時で、ベースプレート位置に曲げに よる縦方向ひび割れが現れた。0.15MN 時には 根巻位置に曲げによるひび割れが発生した。ま



図 6 荷重-中央変位関係(根巻高さ 300mm)

た、根巻頂部に引張側鋼柱脇からひび割れが発 生した。荷重を増加させていってもひび割れ幅 は変わらず、ひび割れ数の増加も確認できなか った。荷重が 0.12MN に到達した時に鋼柱の降 伏が確認された。また、荷重が 0.16MN に達し た時は引張側主筋の降伏も確認された。



図7 N300の破壊状況



図8 S300の破壊状況

4.2 根巻高さ150mmの実験

図9に荷重-中央変位関係を、図10、図11に 根巻高さ150mmの破壊状況を示す。N150は荷 重0.03MN時に根巻頂部に引張側鋼柱脇からの ひび割れが確認された。荷重を0.05MNまで増 加させると45度より縦よりのひび割れが複数 確認された。ひび割れは試験体底部から載荷板 端部に向かって入っており、ベースプレート間 にはひび割れは入っていなかった。また、試験 体側面にもひび割れが多数確認できた。0.07MN 時にはひび割れが進展し、ひび割れ幅も大きく なった。試験体側面には支圧によると考えられ るひび割れが多数確認できた。荷重が最初に 0.07MN に到達した時に頂部せん断補強筋の一



図 9 荷重-中央変位関係(根巻高さ 150mm)

部に降伏が確認された。2回目に荷重を0.07MN まで上昇させた時には、頂部せん断補強筋各部、 鋼柱、主筋に降伏が確認された。

S150 は根巻部側面には載荷終了までひび割れは確認できなかったが、荷重 0.1MN 時に根巻 頂部にひび割れが数本確認された。この時、鋼 柱は降伏していることが確認された。



図 10 N150 の破壊状況



図 11 S150 の破壊状況

4.3 考察

図 12、図 13 に載荷点荷重 - 根巻部変形比率 (中央変位に対する根巻部変位の割合)関係を 示す。試験における破壊状況及びグラフより考 察すると、根巻高さ 150mm、300mm いずれの 場合においてもSシリーズはNシリーズと比較 して根巻部変形比率が大きく、1.0 に近い値と なった。これは、SFRCCを適用することで根巻 部の損傷が抑えられ、変形が鋼柱に集中してい るためである。図 14 に根巻高さ 150mm の場合 の引張鋼柱における荷重-ひずみ関係を示す。こ のグラフより、S シリーズは鋼柱が降伏してお り、鋼柱に破壊が集中していることがわかる。 図 15 に根巻高さ 300mm の場合の引張主筋にお ける荷重-ひずみ関係を示す。このグラフでは、 N シリーズの主筋が降伏しており、根巻部が曲 げ破壊を起こしていることがわかる。一方、S シリーズは主筋が未降伏であり、根巻部が健全 な状態を保っていることがわかる。図 16、図 17 に頂部せん断補強筋における荷重-ひずみ曲線 を示す。このグラフからも、Nシリーズはせん 断補強筋に大きなひずみが発生しており、Sシ リーズと比較して根巻部の損傷が大きいことが わかる。これらの結果より考察すると、根巻型 柱脚の根巻コンクリート部に SFRCC を適用す ることで根巻型柱脚の性能を大きく向上させる ことができるということが確認された。また、 SFRCC を適用すれば根巻高さが小さくなって も根巻型柱脚の性能を十分保持できることも確 認された。



図 12 根巻部における荷重-変形比率関係 (根巻高さ 300mm)



図 13 根巻部における荷重-変形比率関係 (根巻高さ 150mm)

5. まとめ

本稿では、SFRCCの根巻型柱脚への適用を目 指した基礎的研究を示した。本研究の範囲内で は、根巻型柱脚の根巻コンクリート部分に SFRCCを使用することは施工性、力学的特性の 面から検討しても十分効果的であると考えられ る。今後は、より良い施工性を追求するために、 さらに根巻高さを小さくした根巻型柱脚につい て検討する。また、施工性を決定する要素とし て、根巻高さだけでなく、せん断補強筋量、主 筋量、SFRCCの繊維混入率・水結合材比などを パラメータとして根巻型柱脚としての性能を評価することも今後の課題として考えられる。





図 17 頂部せん断補強筋における荷重-ひずみ 関係(根巻高さ 300mm)

謝辞

本研究は、東北大学大学院工学研究科金指成 昭氏(現・㈱新日鉄ソリューションズ)の大学 院前期課程の研究の一部として実施したもので ある。ここに記し、謝意を表する。また、本研 究の遂行にあたり、実験用 Densit セメントを御 提供頂いた清水建設㈱に末筆ながら記して謝意 を表する。

参考文献

 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会:1995 年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書、 1995.5

 2)秋山宏:鉄骨構造の耐震設計、技報堂出版、 1985

洞越一紀、金子佳生、三橋博三、阿部孝仁:
高強度高靭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

 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

5) Kaneko Yoshio, Mihashi Hirozou and Kirikoshi Kazuki : MECHANICAL PROPERTIES AND APPLICATION OF STEEL FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITE, Cement Science and Concrete Technology, No.54,pp.723-730,2000

 6) 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、日本建築学会構造系論文集、第 558 号、pp.219-225、2002.8

 Beche,H.H: Densified Cement/Ultrafine Particle-based Materials, presented at Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, Jun.1981

8) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、日本建築学会、pp.140-162、
1993

9) 鋼構造接合部設計指針、日本建築学会、pp.231-240、2001