

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破壊挙動に関する解析的研究

大作 亮平^{*1}・金子 佳生^{*2}・三橋 博三^{*3}

要旨：鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた簡易柱脚は，鋼構造柱脚の簡便で信頼性の高い施工法として開発が進められている。本論文では簡易柱脚の性能評価に関する基礎的研究として，柱脚部の破壊挙動を数値解析的に評価し，その抵抗機構について検討したものである。

キーワード：鋼構造，簡易柱脚接合，非線形有限要素法，破壊挙動，バネモデル

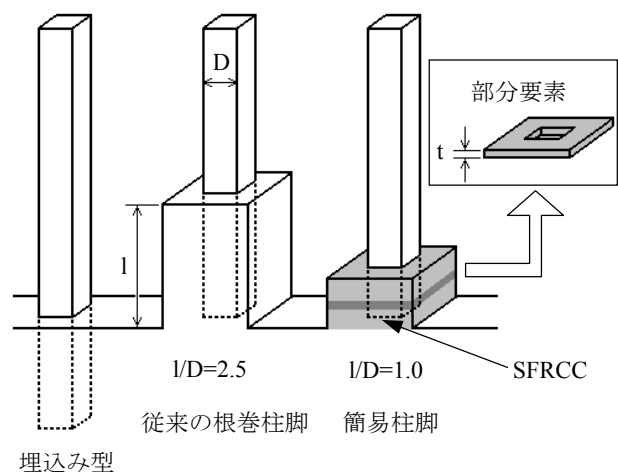
1. はじめに

本研究は，鋼構造柱脚のより生産性が高く信頼性を損なわない簡便な工法として，鋼繊維補強セメント系複合材料（Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites：SFRCC）を用いた簡易柱脚接合の実験に対して，その破壊機構に着目し数値解析的評価を行なったものである。図－1に各柱脚の比較と簡易柱脚部分要素の概念図を示す。根巻部に高強度・高靱性 SFRCC を用いた簡易柱脚工法は，低い根巻高さにも関わらず十分な構造性能を維持することが可能である。これにより施工性の向上や建築スペースの有効利用などが期待される。

これまで金子らは，簡易柱脚の基本モデルの実験^{1),2)}を行い，その構造性能を明らかにした。簡易柱脚は根巻部材料に SFRCC を適用することで，根巻高さ／柱せい比 (l/D) を 1.0 まで低くしても最大耐力，剛性は埋込み柱脚と同等レベルの性能を保持できることが確認されている。

本研究では簡易柱脚の実験結果を基に，簡易柱脚工法の変形特性を評価する手法の構築を目的としている。簡易柱脚は，根巻き高さが従来の根巻柱脚に比べ低いために，従来の根巻柱脚とは異なった評価法が必要となる。筆者らは，根巻き高さの低下によって，柱に対する根巻部

分の抵抗機構が，柱軸方向を含む 3 次元的なものから 2 次元に近い水平平面的なものとなっていることに着目し，根巻部分の一定の厚みを持った水平断面である部分要素の力学特性から部材全体の変形挙動を評価するモデル化手法を数値解析的に検討した。



図－1 各柱脚の比較と簡易柱脚の部分要素

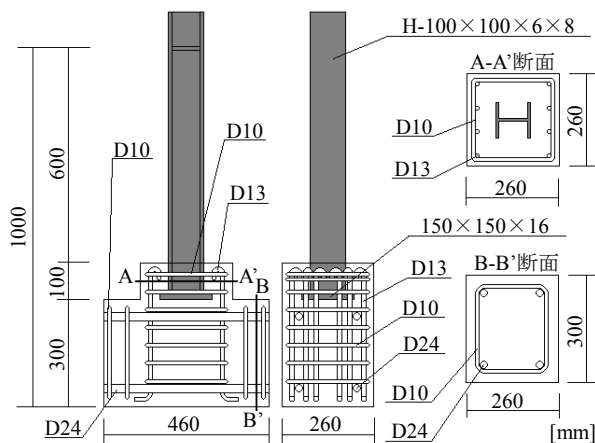
2. 簡易柱脚実験の概要

解析対象となる簡易柱脚の基本モデル実験^{1),2)}の概要を図－2と表－1に示す。なお実験詳細は，文献^{1),2)}を参考されたい。基本モデル実験では，根巻部分に SFRCC を用いた鋼構造柱脚の試験体に対し，正負交番繰り返し載荷を行っている。簡易柱脚の根巻部に SFRCC を適用すること，

*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)



図－2 簡易柱脚実験の試験体形状

表－1 試験体概要

試験体	工法	鋼柱	根巻高さ
EMB-H	埋込み	H-100×100×6×8	
SFR100-H	簡易	H-100×100×6×8	100 mm
SFR50-H	簡易	H-100×100×6×8	50 mm
SFR100-BOX	簡易	□-100×100×6	100 mm

また根巻高さ、鋼柱の形状を変化させることによる復元力特性、破壊状況の変化を評価し、一般の建築物に多く用いられている埋込み柱脚の特性にどこまで近づけることができるのかについて検証を行なっている。

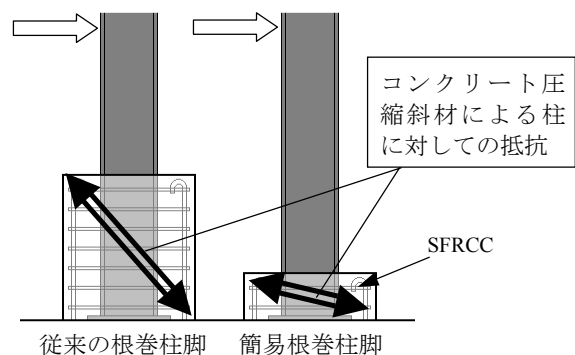
実験では根巻高さ 100mm の試験体は、鋼柱の違いに関わらず埋込み柱脚の耐力値の約 9 割を示し、剛性値は部材角 1/200rad の荷重サイクルまで初期剛性に近い値を維持し十分な性能を示したが、根巻高さ 50mm の試験体は埋込み柱脚に対し、剛性・耐力共に低い値となっている。

3. 解析概要

従来の根巻柱脚と簡易柱脚の抵抗機構の比較を図－3に示す。簡易柱脚は根巻高さが低いために、従来の根巻柱脚の柱に対する抵抗機構とは異なったものになっている。従来の根巻柱脚は、根巻部分でのコンクリート圧縮斜材によって、柱に抵抗する機構が成立するとされている³⁾。これに対し、簡易柱脚は根巻高さが低いために、このコンクリート圧縮斜材と基礎との角度が小さくなり、平面的な抵抗機構が成り立つことが考えられる。

以上の仮定から、本解析ではまず図－1に示

す部分要素の破壊機構を非線形有限要素法解析によって明らかにし、根巻き内部の破壊メカニズムの確認を行なう。次に部分要素の鋼柱とSFRCC部の相対バネを定量化し、線材解析によって根巻部分の変形特性が部材全体の変形挙動に与える影響を確認し、根巻内部の柱に対する平面的な抵抗機構の妥当性の検証を行なう。なお解析対象は実験において、簡易柱脚として良好な値が得られた $l/D=1.0$ の試験体 SFR-100H, SFR-100BOX とする。



図－3 根巻柱脚の抵抗機構の比較

4. 部分要素解析

4.1 材料構成則

ここでは解析によって、部分要素の破壊状況から実験と整合する解析条件の検討を行い、部分要素におけるSFRCCと鋼柱のバネモデルを構築する。解析は有限要素法プログラム ATENA⁴⁾を用いて四角形要素による平面応力解析を行なった。2軸強度包絡線により有効強度を評価し、2軸応力状態を等価1軸応力－ひずみ関係に近似し、載荷点変位制御に対しNewton-Raphson法による収斂計算で解を得た。

SFRCCの引張構成モデル⁵⁾を以下の式(1a)～式(1g)に示す。ひび割れ発生前では、式(1a)に示すように応力－ひずみ関係 ($\sigma_t - \varepsilon_t$) で定式化し、線形関係とする。またひび割れ発生後は、式(1b), 式(1c)に示すように応力－ひび割れ開口変位関係 ($\sigma_t - w_t$) で定式化し、バイリニア型引張軟化モデルとする。

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t \quad (1a)$$

$$\sigma_t = \alpha f_t \quad (1b)$$

$$\sigma_t = \alpha f_t \left(1.0 - \frac{w_t}{w_t^{cr2}} \right) \quad (1c)$$

ここで、

$$\alpha = \left(\frac{2G_F}{f_t w_t^{cr1}} - \beta \right) \quad (1d)$$

$$w_t^{cr2} = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} w_t^{cr1} \quad (1e)$$

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f_t}{E_0} \quad (1f)$$

$$\beta = 0.5\alpha \quad (1g)$$

式中、 f_t は引張強度、 E_0 は初期弾性係数、 ε_{cr} は引張強度に対応した規準ひずみ、 G_F はひび割れ開口変位 w_t^{cr1} までの破壊エネルギー、 α と β は強度低下係数、 w_t^{cr2} は限界ひび割れ開口変位をそれぞれ示す。なお、 w_t^{cr1} は変形性能の高い鋼繊維補強複合材料が完全な破断に至らず、破壊エネルギーの評価が困難なため設けたパラメータで、本モデルでは単純化するために、1.0mm としている。

圧縮構成モデル⁵⁾を以下の式(2a)～式(2c)に示す。圧縮強度に達するまでは、式(2a)に示すように応力-ひずみ曲線 ($\sigma_c - \varepsilon_c$) で定式化し、パラボラ近似とする。また圧縮強度以後は、式(2b)に示すように応力-変位関係 ($\sigma_c - w_c$) で定式化する。

$$\sigma_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (2a)$$

$$\sigma_c = f'_c \left(1.0 - \frac{w_c}{w_c^{cr}} \right) \quad (2b)$$

ここで、

$$\varepsilon_{c0} = \frac{2f'_c}{E_0} \quad (2c)$$

式中、 f'_c は圧縮強度、 ε_{c0} は圧縮強度に対応した基準ひずみ、 w_c^{cr} は限界圧縮変位をそれぞれ示し、本論では w_c^{cr} は 1.0mm とする。

4.2 解析モデルと解析条件

図-4 に解析対象となった部分要素の解析モ

デルを示す。部分要素は厚さ $t=10\text{mm}$ とし、基本メッシュの大きさは 5mm とした。支持条件は内部の主な抵抗機構はコア部が起こっていると仮定し、荷重方向と平行な面のせん断補強筋の位置で固定し、荷重方向に垂直な面は自由とする。

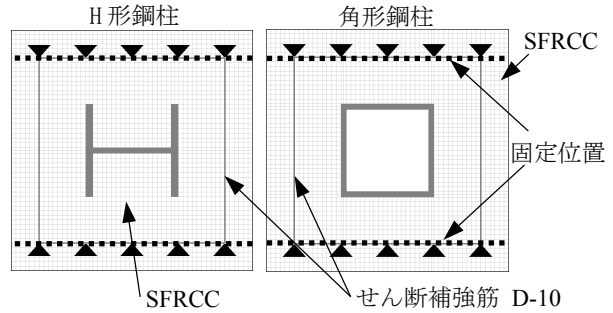
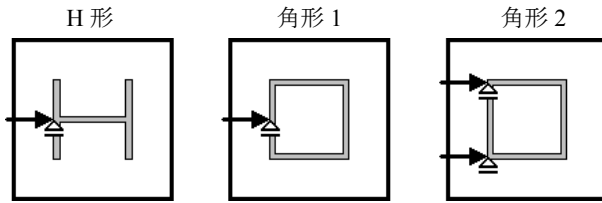


図-4 部分要素の解析モデル

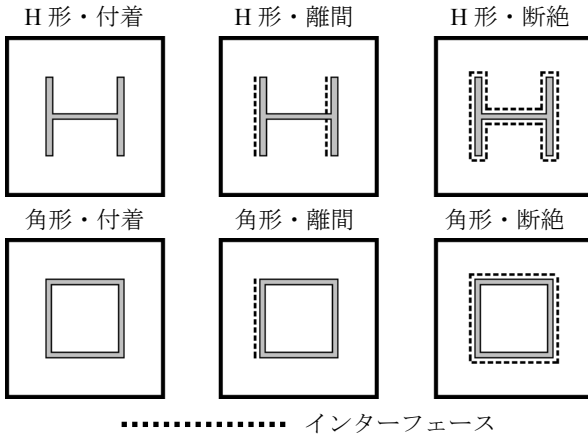
荷重条件は図-5 に示す荷重点に強制変位を与え、反力を測定する。H形鋼はせん断力を伝達するウェブ部分に荷重点を配置し「H 形」とする。角形鋼については H 形鋼と同じ位置である角形鋼の中心に荷重した「角形 1」、せん断力を伝達するウェブ部分 2 点を荷重した「角形 2」とする。

また、実験では荷重によって鋼柱と SFRCC との離間が確認されたため、鋼柱と SFRCC の境界に ATENA の材料モデルの一つであるインターフェース要素を導入し、鋼柱と SFRCC の付着の有無による検討を行なう。インターフェース要素は隣接する要素間の離間や力の伝達を再現するモデルである。本解析ではインターフェース要素の特性を、引張力、せん断力には抵抗せず、圧縮のみに抵抗するものとした。鋼柱と SFRCC の境界条件を図-6 に示す。全ての境界を完全付着としたものを「付着」、荷重方向とは逆側の面のみ離間するものを「離間」、全ての付着がないものを「断絶」とする。

鋼柱の材料モデルは、塑性変形を生じない弾性体と剛体を用いる。ここでは実際の根巻部では、鋼柱は軸方向の変形が卓越することから、部分要素において水平方向の鋼柱の形状の大きな変形は起こらないものと仮定している。各材料モデルの物性^{1),2),5)}を表-2 に示す。表-3 に各解析モデルの一覧を示す。



図－5 荷重条件



..... インターフェース

図－6 境界条件

表－2 材料モデルの物性

	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E_c (GPa)	G_F (N/mm)
SFRCC	61.4	9.0	41.6	8.8
	引張強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)	
D-10	363		210	
			弾性係数 (GPa)	
鋼柱	弾性体		210	
	剛体		2.1×10^{11}	

表－3 各解析モデルの組み合わせ

		境界条件		
		付着	離間	断絶
荷重条件	H 形	H-A-E H-A-S	H-B-E H-B-S	H-C-E H-C-S
		B1-A-E B1-A-S	B1-B-E B1-B-S	B1-C-E B1-C-S
	角形 1	B2-A-E B2-A-S	B2-B-E B2-B-S	B2-C-E B2-C-S
		B2-A-E B2-A-S	B2-B-E B2-B-S	B2-C-E B2-C-S
	角形 2	B2-A-E B2-A-S	B2-B-E B2-B-S	B2-C-E B2-C-S
		B2-A-E B2-A-S	B2-B-E B2-B-S	B2-C-E B2-C-S

(モデル名) -E : 鋼柱に弾性体を使用

(モデル名) -S : 鋼柱に剛体を使用

4.3 解析結果

はじめに弾性体を用いたモデル（付着）の解析終了時のひび割れ変形図を図－7に示す。弾性体モデルでは、境界条件の種類に関係なく全てのモデルにおいて、実験では確認できない平面上の鋼柱の大きな変形を示し、剛体モデルに

比べ極端に低い剛性を示したため、以後の考察では扱わないものとする。

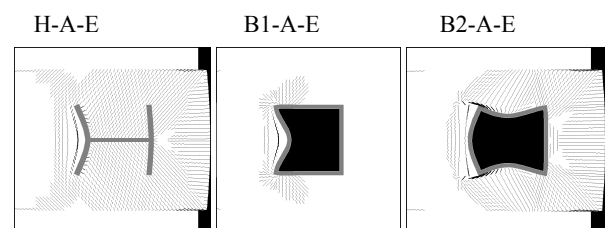
次に剛体を用いたモデルの荷重 - 変位関係、最大荷重付近となった 0.5mm 変形時のひび割れ変形図を図－8に示す。

付着モデルでは最大荷重時に断面全体にひび割れが発生している。H-A-S と B1-A-S では、根巻部分の荷重点側の側面（各図の左側面）がわずかに変形しているのが確認できる。また 2 つの荷重変位関係はほぼ一致したが、B2-A-S は他の荷重条件には見られないような軟化挙動を示した。

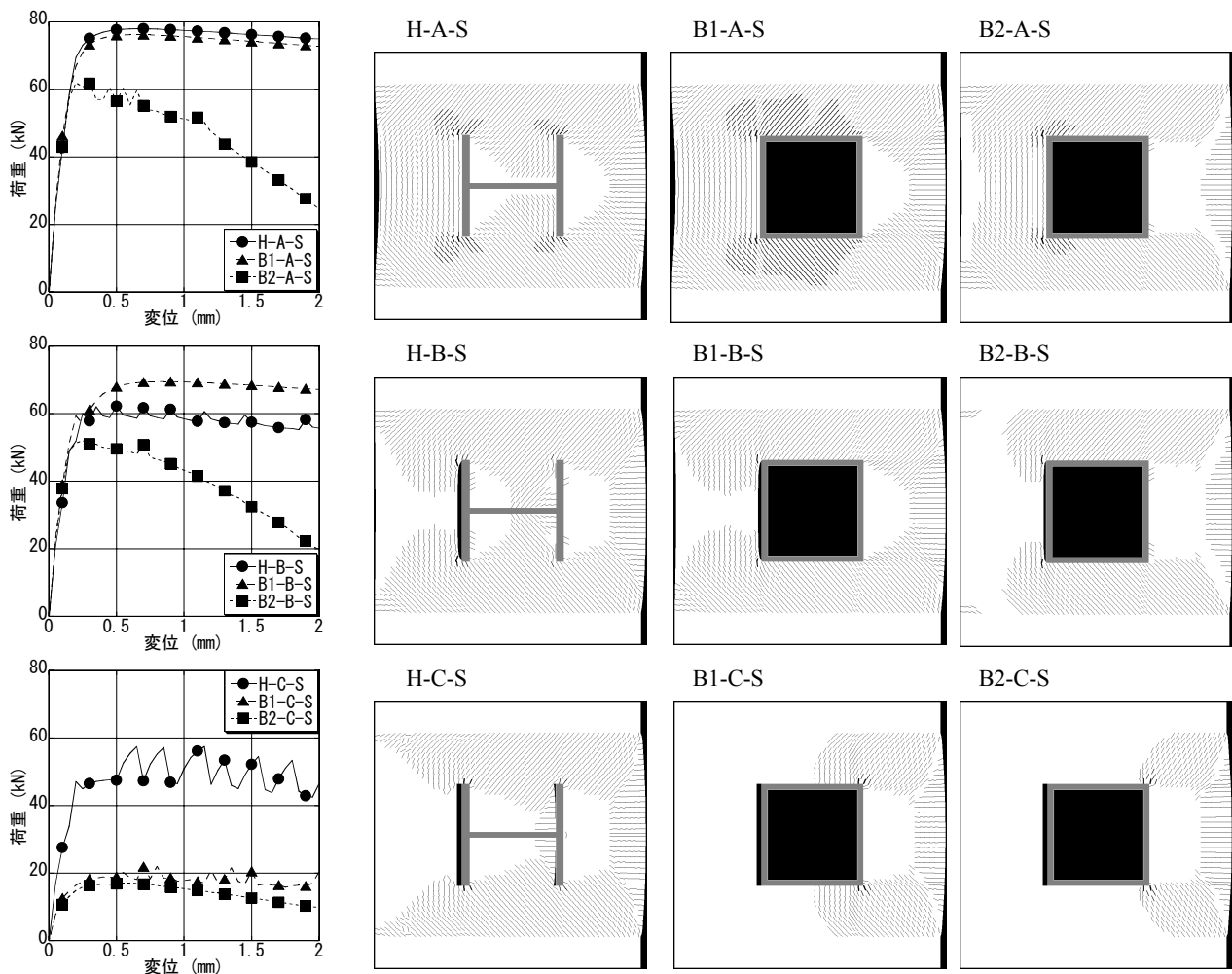
離間モデルの最大荷重時でのひび割れ状況は、SFRCC と鋼柱が離間することにより、付着モデルに比べ根巻部分の荷重点側の破壊がある程度抑えられている。また荷重 - 変位関係では、H-B-S が B1-B-S より若干低い値を示したが、ほぼ同等なレベルの耐力となっている。B2-B-S については付着モデル同様に軟化挙動を示した。

断絶モデルでは、荷重 - 変位関係において H 形鋼と角形鋼で大きな差が生じた。角形鋼モデルでは B1-C-S, B2-C-S 共に、荷重方向前方 SFRCC のみ破壊している。H-C-S は、付着、離間モデルと同じような破壊状況を示したが、安定した解析が得られなかった。

以上の結果から、実験では H 形鋼と角形鋼による荷重 - 変位関係の違いは確認できなかったこと、根巻部分全体にひび割れが発生したことから、H-A-S, B1-A-S, H-B-S, B1-B-S の 4 モデルが簡易柱脚根巻き部分の内部における抵抗機構を比較的評価していると考えられる。そのためこれら 4 モデルの、SFRCC と鋼柱の相対バネを荷重 - 変位関係のグラフから構築する。



図－7 弾性体モデルのひび割れ変形図



図－8 剛体モデルの荷重 - 変位関係とひび割れ図

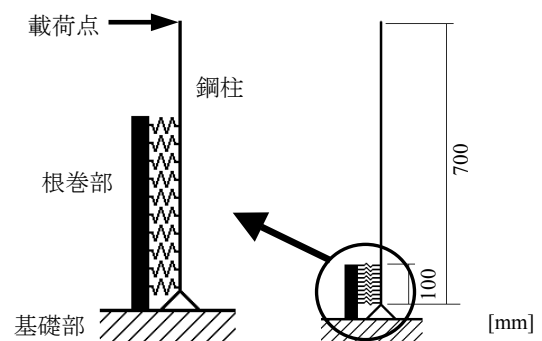
5. 線材架構解析

5.1 解析モデル

ここでは実験との比較によって、部分要素の相対バネが簡易柱脚全体に与える影響を解析により評価しバネモデルの妥当性を検討する。

図－9に簡易柱脚の線材モデルを示す。表－4に解析モデルと使用バネ特性の組み合わせを示す。各バネは部分要素解析の結果を多直線で近似した非線形バネである。

解析モデルは固定基礎に接続した根巻き部分となる剛体と鋼柱、鋼柱と剛体をつなぐ根巻部のバネモデルからなる。鋼柱の下端はピン接合とする。1本のせん断バネは厚さ10mmの部分要素のバネ特性をそれぞれ用いて、鋼柱の下部100mmに10本配置する。鋼柱の上部に単調荷重を行い、荷重 - 変位関係をそれぞれ実験の試験体と比較する。



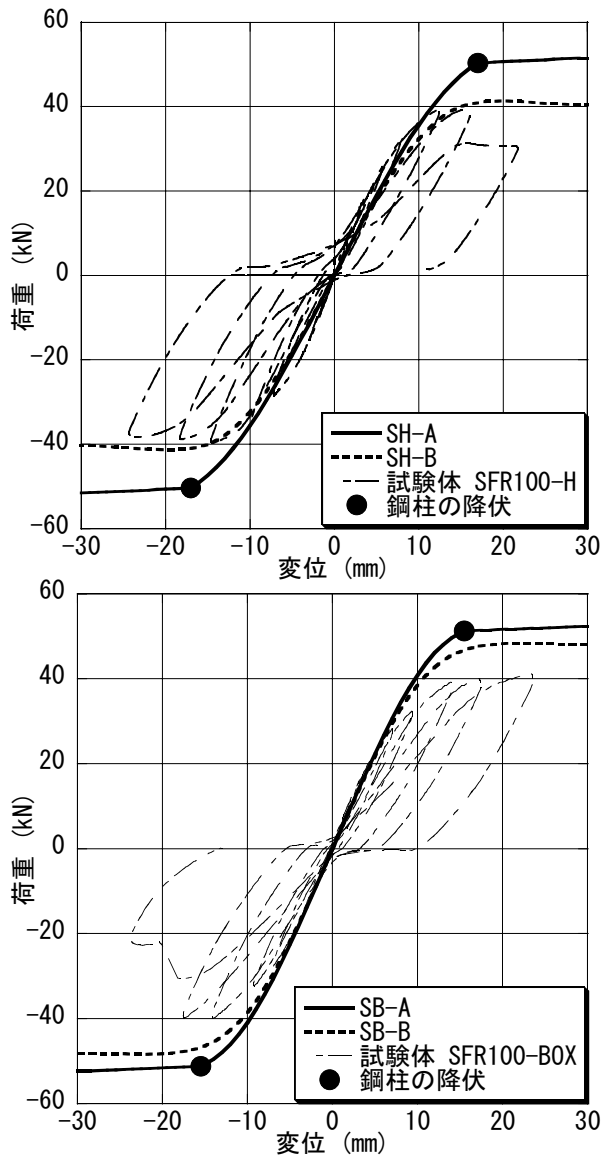
図－9 簡易柱脚の線材モデル化

表－4 各モデルのバネ特性

	モデル名	バネ特性
H形	SH-A	H-A-S
	SH-B	H-B-S
角形	SB-A	B1-A-S
	SB-B	B1-B-S

5.2 解析結果

図－10に解析結果と実験結果の比較を示す。SFR-100H との比較では SH-A, SH-B 共に、実験



図－１０ 解析結果と実験結果の比較

値よりやや低い剛性を示しが、最大耐力に関しては、SH-B は実験値を適切に評価している。なお、実験では鋼柱は完全には塑性化していないが、SH-A は鋼柱の塑性ヒンジが確認された。SFR-100BOX との比較では、SB-A、SB-B どちらのモデルも耐力はやや高く評価しているが、剛性は実験値を適切に評価している。なお、SB-A についても鋼柱の塑性ヒンジが確認された。

以上より、部分要素解析におけるバネモデル H-B-S、B1-B-S のバネ特性を用いた SH-B、SB-B のモデルが、概ね実験を評価できる結果となった。これより、部分要素解析における、H-B-S、B1-B-S の抵抗機構が実際の根巻き内部の破壊機構にある程度対応していると考えられる。

6. まとめ

本稿では、鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた簡易柱脚接合の実験に対して、解析による破壊条件や、線材モデルでの評価を行った。本研究では、根巻高さの低い簡易柱脚では、柱に対する根巻部分の抵抗機構が、3 次元的なものから水平的なものとなっている仮定から、根巻部分のバネ特性を用いて、線材解析による簡易柱脚の評価が可能であることを示した。

今後は部分要素の解析で確認された損傷領域に対し、簡便な力学モデル⁶⁾を用いて定量化することにより、簡易柱脚の変形挙動を評価する手法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.716-762, 2004
- 3) 秋山宏 : 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版(株), 1985.3
- 4) Cervenka Consulting : ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, Prague, 2004.2
- 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の単純化した1軸構成モデル, 日本建築学会技術報告集, 第11号, pp.5 - 8, 2003
- 6) 例えば, 金子佳生, 三橋博三 : コンクリートの直接せん断破壊の力学モデル - 全荷重 - 変位特性の予測 -, 日本建築学会構造系論文集, 第535号, pp.101 - 109, 2004.9