

論文 部材損傷に着目したRCおよびSRC柱の靱性能評価法に関する実験的研究

内藤 英樹<sup>\*1</sup>・清水 真介<sup>\*2</sup>・青木 茂夫<sup>\*3</sup>・鈴木 基行<sup>\*4</sup>

要旨：RC と SRC 柱の正負交番載荷実験を行い，両者において軸方向鉄筋の座屈に伴いかぶりコンクリートが大きく剥落し，荷重 - 変位関係に明確な耐力低下を見出せることが確認された。そこで，RC 柱の正負交番載荷実験を基に構築した軸方向鉄筋の座屈解析による靱性能評価法を SRC 柱にも適用し，その妥当性を検討した。その結果，1) 鉄骨とコンクリートの付着による応力伝達を無視する，2) 軸方向鉄筋の塑性化領域を塑性ヒンジ長とする，ことで，RC 柱と同様の手法を用いて，正負交番載荷を受ける SRC 柱のかぶりコンクリート剥落時変位を精度良く評価できることが確認された。

キーワード：RC 柱，SRC 柱，正負交番載荷実験，軸方向鉄筋の座屈，曲率分布

1. はじめに

現行の鉄道構造物等設計標準<sup>1)</sup>(以下，鉄道標準)では，曲げ破壊型の RC 柱と充腹形鉄骨構造の SRC 柱について，損傷レベルと部材角による制限値を規定している。しかし，正負交番載荷実験<sup>2),3)</sup>の回帰式により算定されるこれらの部材角と損傷状況との対応に力学的根拠はなく，広範な諸元に対する適用性も検討が必要となる。

著者ら<sup>4)</sup>は，軸力が小さい RC 柱では，かぶりコンクリートの剥落(以下，かぶり剥落)と軸方向鉄筋の座屈が同時に生じ，荷重 - 変位関係に明確な耐力低下を見出せることから，軸方向鉄筋の座屈解析に基づく断面の終局曲率算定法を提示し，既往の RC 柱の正負交番載荷実験との比較によりその妥当性を確認した。一方で，SRC 柱においてもかぶり剥落は重要な部材損傷点となるが，既往の実験供試体の多くは軸力が大きい建築構造物を模していることから，提案手法の妥当性は十分に検討されていない。そこで，本研究では，曲げ破壊型の RC と SRC 柱の正負交番載荷実験を行い，かぶり剥落点における柱基部の曲率分布などの実験データを収集することで，提案手法の SRC 柱への適用を検討する。さ

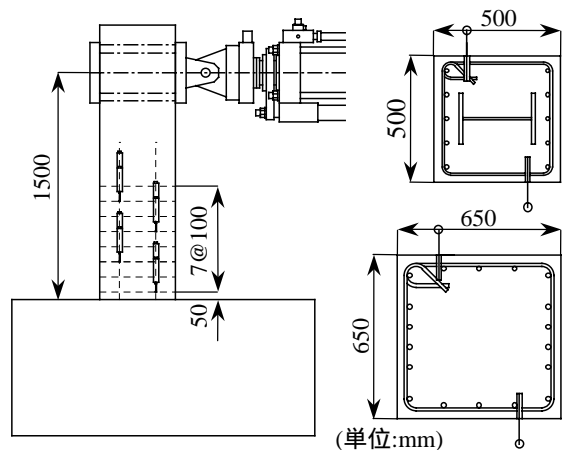


図 - 1 供試体概略図

らに，既往の SRC 柱の正負交番載荷実験との比較により，提案手法の精度検証を行った。

2. RC および SRC 柱の正負交番載荷実験

2.1 実験概要

供試体概略図と供試体諸元を図 - 1 と表 - 1 に示す。せん断スパンは全て 1500mm とする。はじめに曲げせん断耐力比 2.0 程度を有する RC 供試体を作製し，これを基準として水平耐力および曲げせん断耐力比を同程度とした鉄骨鉄筋比の異なる 3 体の SRC 供試体を作製した。これらの曲げせん断耐力比は，鉄道標準<sup>1)</sup>を用いて評価

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助手 修(工) (正会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

\*3 オリエンタル建設(株) 技術研究所主任研究員

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表 - 1 供試体諸元一覧

供試体 番号	断面寸法 幅×高さ (mm)	せん断 スパン (mm)	有効 高さ (mm)	H形鋼寸法 $H_s \times B_s \times t_w \times t_f$ (mm)	軸方向鉄筋		帯鉄筋		鉄骨 鉄筋比	曲げ せん断 耐力比
					径・本数	鉄筋比 (%)	径・間隔 (mm)	体積比 (%)		
No.0	650×650	1500	600	---	D19×18	1.22	D13@100	0.91	---	1.9
No.1	500×500	1500	450	300×200×10×15	D16×10	0.79	D10@100	0.66	4.4	2.1
No.2	500×500	1500	450	300×80×10×15	D22×10	1.55	D10@100	0.66	1.3	2.2
No.3	500×500	1500	450	300×250×10×15	D13×10	0.51	D10@100	0.66	8.1	2.0
No.4	500×500	1500	450	300×250×10×15	D13×10	0.51	D6@300	0.10	8.1	1.5
No.1S	500×500	1500	450	300×200×10×15	D16×10	0.79	D10@100	0.66	4.4	2.1

した。また、水平耐力を等しくするために RC と SRC 供試体では断面寸法が異なる。さらに、帯鉄筋による影響を評価するため、No.3 の帯鉄筋量を大幅に低減させた No.4 を作製した。なお、No.1 から No.4 では、H形鋼をフーチング内に定着させるため、D19 鉄筋を H形鋼に貫通または溶接している(以下、スタッド筋)。そこで、スタッド筋が柱の塑性変形能に与える影響を確認するため、No.1 と同一の諸元でありスタッド筋を取り付けない No.1S を作製した。

载荷は、降伏変位  $\delta_y$  の整数倍を载荷ステップとして 3 回の交番载荷を行い、軸力は载荷しない。ただし、No.3 と No.4 については 1 回の交番载荷とした。降伏変位  $\delta_y$  は、ひずみゲージの値から、柱基部の軸方向鉄筋または H形鋼フランジが引張降伏ひずみに達するときの変位とした。材料試験結果を表 - 2 と表 - 3 に示す。

## 2.2 損傷状況と荷重 - 変位関係

各供試体の降伏点と目視によるかぶり剥落点を表 - 4 に、また、No.0 および No.1S の荷重 - 変位関係を図 - 2 および図 - 3 に示す。

载荷装置を設置する際にひび割れが確認された No.1S を除き、いずれも荷重が 50~130kN 程度で柱基部に曲げひび割れが発生した。降伏点の変位と荷重は、ひずみゲージの値から判定される No.1 の降伏変位が大きく示されたが、その他の供試体は同程度である。さらに载荷することで、No.3 を除く RC と SRC 柱の両者にて、かぶりコンクリートの浮き上がりが生じ、軸方向鉄筋の座屈に伴い柱基部から 300~400mm の範囲で

表 - 2 コンクリート圧縮強度 (MPa)

No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1S
20.7	32.0	31.2	29.9	29.1	25.3

表 - 3 鋼材の降伏強度 (MPa)

D6	D10	D13		D16
317	455	435 <sup>1)</sup>	416 <sup>2)</sup>	436 <sup>3)</sup>
D16	D19	D22	H形鋼	
442 <sup>4)</sup>	424	401	324 <sup>5)</sup>	376 <sup>6)</sup>

1) No.0; 2) No.3, No.4; 3) No.1; 4) No.1S;  
5) No.1~No.4; 6) No.1S にて使用。

かぶりが大きく剥落した。このとき、目視による軸方向鉄筋の座屈長とかぶり剥落区間は概ね対応しており、荷重 - 変位関係にも明確な耐力低下が確認された。なお、No.3 では柱基部~100mm の範囲でかぶり剥落が生じ、その後の繰返し载荷にて軸方向鉄筋の座屈が確認された。これらのかぶり剥落点は、RC 供試体では  $6\delta_y$  であるのに対し、SRC 供試体では  $8\sim 10\delta_y$  程度であった。また、SRC 供試体において、No.1 から No.3 の比較、および No.3 と No.4 の比較から、軸方向鉄筋径を大きくすること、または、帯鉄筋量を低減することでかぶり剥落が早期に生じ、かぶり剥落区間が大きくなることが示された。

かぶり剥落後は、RC 供試体の No.0 では繰返し载荷に伴い軸方向鉄筋の座屈が進展し、側面のかぶりコンクリートも剥落することで、図 - 2 のように大きく耐力が低下した。これに対し、図 - 3 に示される SRC 供試体の No.1S では、かぶり剥落後も降伏荷重程度の耐力を維持してお

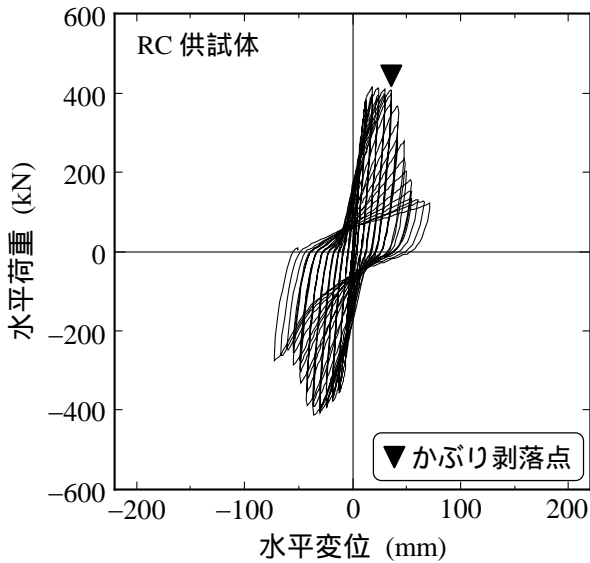


図 - 2 No.0 の荷重 - 変位関係

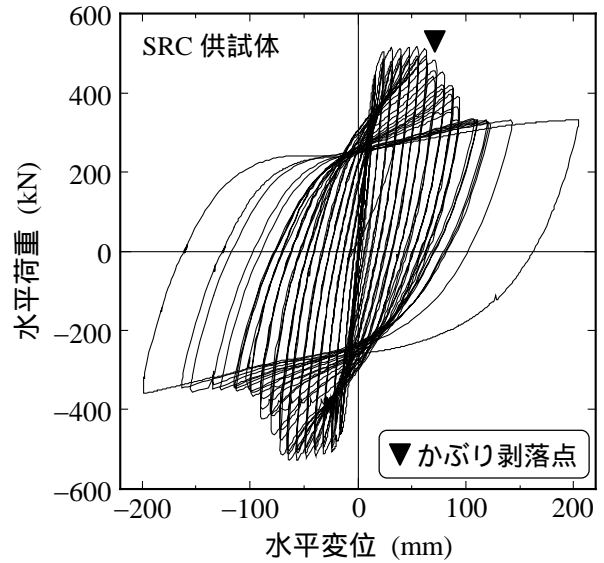


図 - 3 No.1S の荷重 - 変位関係

り、 $\pm 200\text{mm}$  の交番載荷においても紡錘形の履歴ループ形状を示すなど、優れた靱性能を有することが確認された。しかし、フーチング内にスタッド筋を取り付けた SRC 供試体では、いずれもスタッド筋位置で H 形鋼フランジが破断することで、大幅な耐力低下が生じた。なお、スタッド筋の有無をパラメータとした No.1 と No.1S において、柱の損傷状況や荷重 - 変位関係、また、軸方向鉄筋と H 形鋼のひずみ分布などの比較から、スタッド筋がかぶり剥落までの柱の塑性変形能に与える影響は確認されなかった。そのため、以降のかぶり剥落に着目した SRC 柱の靱性能評価法に関する検討では、これらの実験結果も参照する。

### 3. かぶり剥落に着目した SRC 柱の靱性能評価法

#### 3.1 概説

本実験では、RC と SRC 供試体の両者にて、かぶり剥落と軸方向鉄筋の座屈が同時に生じ、荷重 - 変位関係に明確な耐力低下が見出せることが確認された。そこで、著者ら<sup>4)</sup>が提案した RC 断面における軸方向鉄筋の座屈発生時曲率(以下、座屈曲率)の算定手法を SRC 断面に適用し、実験時に計測した柱基部の曲率分布と比較することで、その妥当性を検討する。さらに、実験結果からの逆解析を行い、算定される座屈

表 - 4 実験による降伏点とかぶり剥落点

供試体 番号	降伏点		かぶり剥落点		
	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	剥落範囲 (mm)
No.0	6.4	302	36.2	403	300
No.1	12.0	311	78.1	427	300
No.2	7.1	292	71.4	430	400
No.3	8.4	307	89.6	430	100
No.4	6.9	296	62.9	424	300
No.1S	7.6	311	72.9	501	300

正載荷での最大変位点を示す。

曲率に対応する塑性ヒンジ長を同定することで、かぶり剥落点の算定手法を提示する。

#### 3.2 SRC 断面の座屈曲率の算定

星隈ら<sup>5)</sup>の研究を参考に、図 - 1 のように柱基部の鉛直方向に変位計を設置することで、式(1)を用いて曲率分布を計測した。

$$\phi = \frac{\Delta_T - \Delta_C}{D_i S} \quad (1)$$

ここで、 $\phi$  は計測区間での曲率、 $\Delta_T$  および  $\Delta_C$  は計測区間における引張側面および圧縮側面の相対変位、 $D_i$  は引張側面と圧縮側面に配置された変位計の距離、 $S$  は計測区間長である。各載荷ステップでの曲率分布は正載荷と負載荷で得られた値の平均値とした。なお、鋼材の伸び出し量が含まれる柱基部や、得られる曲率が負となる場合には、その上下の測定区間で得られた曲率

表 - 5 かぶり剥落点における実験結果と解析結果のまとめ

[実験結果]	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1S
軸方向鉄筋の座屈長 (mm)	300	200	400	100	300	300
軸方向鉄筋の塑性化領域 (mm)	550	450	450	350	350	450
H 形鋼フランジの塑性化領域 (mm)	---	250	250	250	350	250
座屈長における平均曲率 $\phi_{u,exp}$ ( $\times 10^{-5}/\text{mm}$ )	4.57	9.74	4.35	10.65	7.79	12.80
躯体の水平変位 $\delta_{u,exp}$ (mm)	29.7	51.1	40.0	55.4	33.0	58.8
実験終了時に確認された座屈長。						
[解析結果]	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.1S
提案手法による座屈曲率 ( $\times 10^{-5}/\text{mm}$ )	4.00	10.62	8.39	10.27	7.20	9.27
提案手法による座屈長 (mm)	300	200	300	100	300	300
逆解析による塑性ヒンジ長 (mm)	623	347	338	403	317	498
Mattock <sup>6)</sup> の塑性ヒンジ長 (mm)	375	300	300	300	300	300
提案式(3)による塑性ヒンジ長 (mm)	---	390	390	390	390	390
躯体の水平変位 $\delta_{u,cal}$ (mm)	21.0	55.9	44.5	54.1	38.5	49.4
$\delta_{u,exp}/\delta_{u,cal}$	1.41	0.91	0.90	1.02	0.86	1.19

の平均値とした。また、載荷点から軸方向鉄筋が塑性化するまでの範囲は、参考文献 4)に示す曲率分布を用いた。曲率分布を積分した躯体変位と、載荷点で測定された水平変位から柱基部での鋼材の伸び出しの影響を除いた躯体変位との比較を行う。ここで、鋼材の伸び出しの影響は、柱基部の変位計を用いて評価した。かぶり剥落点までの載荷ステップ毎の比較を図 - 4 に示す。これらの比較から、本研究の曲率分布の測定は、SRC 柱における  $8\delta_y \sim 10\delta_y$  程度の載荷ステップでも妥当であると判断される。

そこで、各供試体のかぶり剥落時の載荷ステップにて計測された曲率分布と、目視にて確認された軸方向鉄筋の座屈長を図 - 5 に示す。これらの曲率分布に対し、座屈長における平均曲率を座屈曲率  $\phi_{u,exp}$  として、提案手法<sup>4)</sup>との比較を行う。実験から得られた座屈曲率  $\phi_{u,exp}$  を表 - 5 に示す。ただし、No.3 ではかぶり剥落時に軸方向鉄筋の座屈が観察されないことから、実験終了時に確認された座屈長を用いた。提案手法では、コンクリート部分に作用する軸力が解析結果に大きな影響を与えるため、SRC 断面に適用する際には、H 形鋼とコンクリートの付着による応力伝達を適切に評価する必要がある。そこ

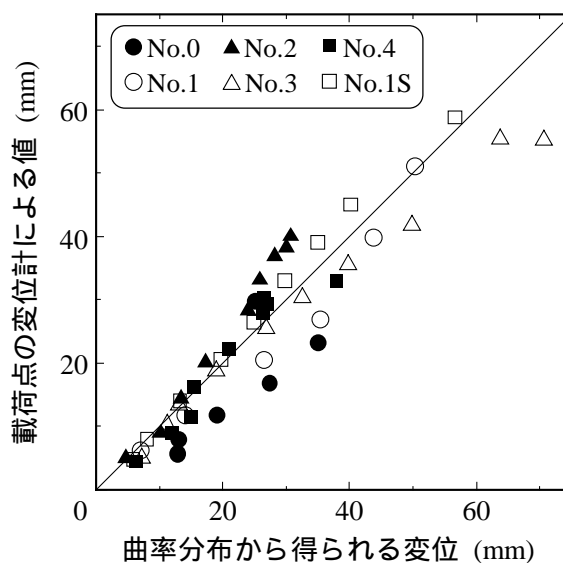


図 - 4 躯体変位の比較

で、かぶり剥落点にて測定されたひずみゲージの値から、SRC 断面の平面保持則の妥当性について検討した。断面の平面保持則を仮定した計算では、軸方向鉄筋と H 形鋼フランジがほぼ同時に降伏するため、柱高さ方向の両者の塑性化領域は同程度となるが、表 - 5 に示すひずみゲージから確認されたこれらの塑性化領域は大きく異なっていることから、平面保持則は成り立たない。また、測定が可能であった柱基部から 350mm 位置 (No.4 のみ 450mm) のひずみゲージの値から、H 形鋼の中立軸位置は 5 体の供試体で

232~253mm の範囲となることが確認され、図心軸位置(250mm)にほぼ一致した。以上より、軸方向鉄筋と H 形鋼の割合に関わらず、柱基部の塑性化区間において H 形鋼とコンクリートの付着による応力伝達は無視できると考えられる。そこで、SRC 断面から H 形鋼を除いた RC 断面に対して、提案手法を適用することで得られる座屈曲率  $\phi_{u,cal}$  を表 - 5 に示す。実験結果との比較から、提案手法は SRC 断面に用いた場合でも、RC 供試体の No.0 と同様に、実験結果を妥当に評価した。特に、表 - 5 に示す解析結果による座屈長は、実験にて確認された軸方向鉄筋径や帯鉄筋量によるかぶり剥落区間の変化を再現できた。

### 3.3 塑性ヒンジ長

座屈曲率  $\phi_u$  が生じていると見なせる塑性ヒンジ長  $L_p$  を用いて、柱高さ方向の曲率分布を仮定することで、かぶり剥落時の変位  $\delta_u$  は式(2)により算定される<sup>4)</sup>。

$$\delta_u = \delta_y + (\phi_u - \phi_y)L_p(h - L_p/2) \quad (2)$$

ここで、 $h$  はせん断スパン、 $\phi_y$  と  $\delta_y$  はそれぞれ降伏曲率と降伏変位である。

そこで、実験結果から得られたかぶり剥落点の躯体変位  $\delta_{u,exp}$  と提案手法による座屈曲率  $\phi_{u,cal}$  を式(2)に代入することで、塑性ヒンジ長を逆解析により算定する。なお、 $\delta_{u,exp}$  は載荷点で測定された水平変位から柱基部での鋼材の伸び出しの影響を除去することで評価した。表 - 5 に示した逆解析による塑性ヒンジ長は座屈長よりも大きく、また、実験結果による軸方向鉄筋の塑性化領域と概ね対応した。著者ら<sup>4)</sup>は、RC 柱の靱性能評価に、部材降伏点から最大曲げモーメントまでの長さを塑性ヒンジ長とした Mattock<sup>6)</sup>の式を用いたことから、その比較を表 - 5 に示す。RC はりの単調載荷実験に基づく Mattock の式を SRC 柱に適用することで得られる値は、いずれも逆算された塑性ヒンジ長よりも小さくなることが示された。そこで、逆解析による塑性ヒンジ長を平均的に評価するため、Mattock の式に 1.3 を乗じた式(3)を提案する。

$$L_p = 1.3(0.5d + 0.05h) \quad (3)$$

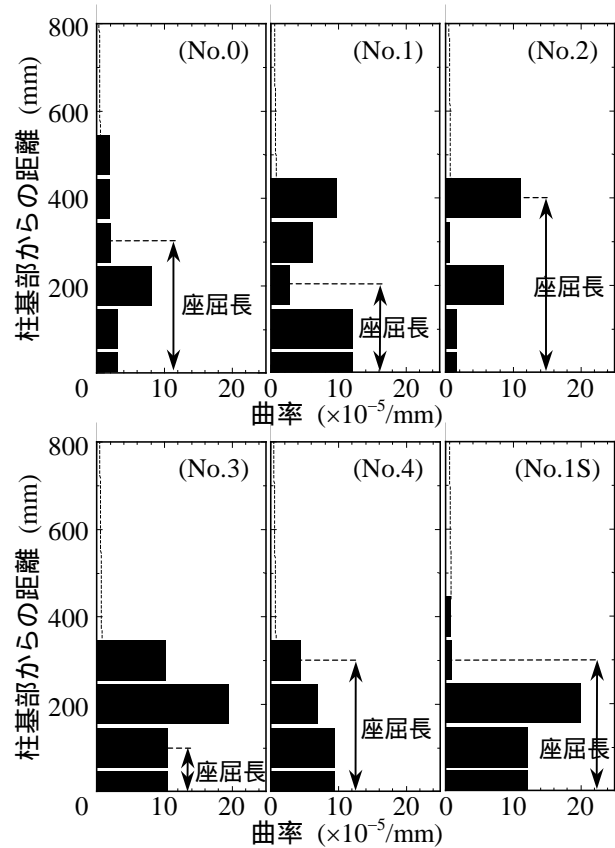


図 - 5 かぶり剥落点における曲率分布

ここで、 $d$  は断面の有効高さである。式(3)の塑性ヒンジ長  $L_p$  と提案手法による座屈曲率  $\phi_{u,cal}$  を用いて式(2)を計算することで、諸元が異なる表 - 5 の実験結果を精度良く評価できた。

### 3.4 既往の実験結果との比較による精度検証

村田<sup>3)</sup>、平ら<sup>7)</sup>の実験では、荷重 - 変位関係において明確な耐力低下が見出せる点を最大荷重点とし、その損傷状況にかぶり剥落が対応することを報告している。そこで、著者らの供試体に、村田、平らの供試体で曲げ破壊した A-2, A-3, C-1, D-1, D-2, E-1, G-1, G-2, G-3, G-4, J-1, J-2 の 12 体を加えた、計 17 体の SRC 柱の正負交番載荷実験との比較により、提案手法の精度検証を行った。また、これらの供試体に対して鉄道標準<sup>1)</sup>を適用した結果も示す。フーチングからの鋼材の伸び出しの影響は、著者らの供試体では実験結果を用い、村田、平らの供試体では、鉄道標準を用いて伸び出しの影響を付加した。なお、軸力を載荷しない著者らの供試体は、鉄道標準では適用範囲外となるが、その規定を無視した。

全 17 体の供試体から得られた実験結果と解析

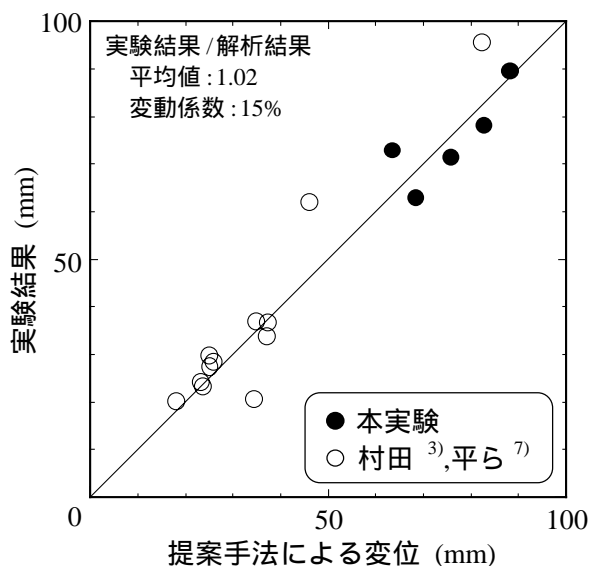


図 - 6 提案手法による算定結果

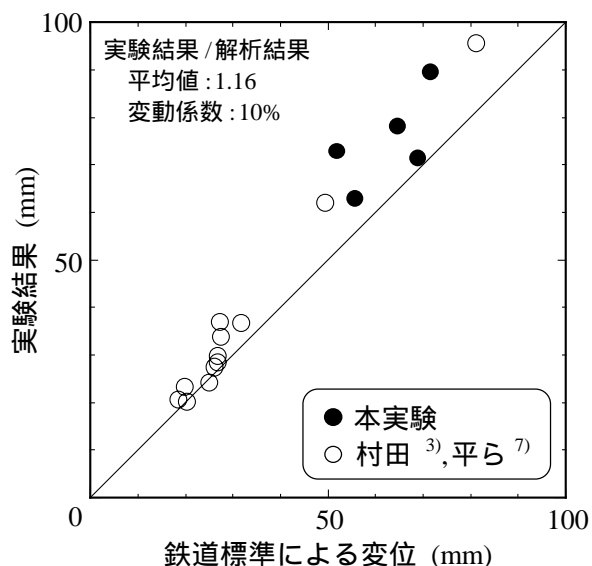


図 - 7 鉄道標準による算定結果

結果との比較を図 - 6 および図 - 7 に示す。これらの比較から、提案手法では、軸力が作用する村田, 平らの供試体に対しても実験結果を精度良く再現できた。また、鉄道標準では、軸力を載荷しない著者らの供試体を過小評価するが、全 17 体の実験結果と解析結果の比による算定精度は、提案手法と鉄道標準で同程度であることが確認された。しかし、提案手法は、軸方向鉄筋の座屈を破壊基準として部材損傷点を力学的に算定することや、RC から SRC 柱までを一元的に評価できるなどの特徴を有している。

## 5. まとめ

RC および SRC 柱の正負交番載荷実験を行い、かぶりコンクリートの剥落に着目した靱性能評価法を提示した。本研究により、1) 鉄骨とコンクリートの付着による応力伝達を無視することで、提案手法は SRC 断面にも適用できる、2) RC と SRC 柱の両者において、軸方向鉄筋の塑性化領域を塑性ヒンジ長とすることで、かぶり剥落点が精度良く算定される、などの新たな知見が得られた。今後、RC と SRC 柱の諸元に応じて軸方向鉄筋の塑性化領域を適切に評価することで、靱性能評価法の精度向上が期待される。

また、本実験の SRC 供試体でも、かぶり剥落後に優れた靱性能を有することが確認されてお

り、かぶり剥落後の SRC 柱の靱性能評価法を構築する必要がある。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999
- 2) 渡邊忠朋ほか：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.31-45，2001.8
- 3) 村田清満ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱の変形性能の定量評価に関する研究，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.235-251，1999.4
- 4) 秋山充良，内藤英樹，鈴木基行：軸方向鉄筋の座屈発生点に対応した終局曲率の簡易算定法および RC 柱と SRC 柱の靱性能評価への適用，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.113-129，2003.2
- 5) 星隈順一ほか：鉄筋コンクリート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1461-1468，2000.3
- 6) Mattock, A. H.: Discussion of Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beam by W. G. Corley, Structure Div., ASCE, pp.519-522, Aug. 1967
- 7) 平暁ほか：鉄骨鉄筋コンクリート部材の変形性能に関する検討，土木学会第 54 回年次学術講演会，I-A160，pp.320-321，1999.9