

## 論文 ハイブリッド実験による SRC 部材の復元力モデルの検証

平 暁\*<sup>1</sup>・村田 清満\*<sup>2</sup>・池田 学\*<sup>3</sup>・木下 雅敬\*<sup>4</sup>

**要旨：**鉄道構造物の新しい耐震設計法では、動的解析により求められた応答値が構造物の所要の耐震性能を満足していることを照査する。動的解析を行うには、部材の履歴特性を適切に表現できる復元力モデルを用いなければならない。筆者らは、静的交番載荷実験を基に鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）部材の復元力モデルを既に提案した。本論文はハイブリッド実験により、提案した復元力モデルの妥当性を検証したものである。

**キーワード：**鉄骨鉄筋コンクリート部材、復元力モデル、ハイブリッド地震応答実験

## 1. はじめに

鉄道構造物の新しい耐震設計法<sup>1)</sup>では、動的解析により求められた応答値が構造物の所要の耐震性能を満足することを照査する。動的解析を行うためには、部材の履歴特性を適切に表現できる復元力モデルを用いなければならない。復元力モデルを静的交番載荷実験の結果に基づき設定することは可能であるが、静的交番載荷実験からは、構造物の動的挙動に関する情報は得られない。そこで、復元力モデルの有効性を確認するためには、このモデルを用いて行う地震動下の構造物の応答解析シミュレーション結果を、何らかの方法で検証する必要がある。そのための手法としてハイブリッド地震応答実験<sup>2)</sup>が一般的に用いられている。

ハイブリッド地震応答実験は、実構造物を質点系モデルに置き換え、実験装置とコンピュータをオンラインで結び、複雑な特性を持つ構造物の復元力特性を時々刻々実験より取り入れて、コンピュータにより運動方程式を順次数値解析して、構造物の応答を求めるものである。この実験は、実際には疑似動的実験であり、リアルタイムで地震応答を再現することはできないの

で、時間（＝速度）に依存する粘性減衰や衝撃の影響は再現できない。また、供試体が小さい場合には、スケール効果などにより誤差が大きくなる。しかし、静的な実験装置を用いて地震時の挙動を表現する方法としては、現在最も真値に近い地震応答を再現できるものである。

本文は、静的交番載荷実験結果に基づく鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCという）部材の復元力モデル<sup>3)</sup>の妥当性を、ハイブリッド地震応答実験により検証したものである。なお、ここでは、鉄道構造物として使用実績の多い、充腹型の鉄骨が鉄筋コンクリートに完全に埋め込まれた形式を対象とする。

## 2. 復元力モデル

## 2.1 復元力モデルの定義

鉄道構造物の新しい耐震設計法<sup>1)</sup>では、橋梁および高架橋の応答値の算定は、非線形スペクトル法もしくは時刻歴動的解析法によるものとしているが、どちらの方法を用いる場合も、地震時の構造物の非線形挙動を算定する必要がある。

構造物の非線形挙動を算定する方法には、大

\*1(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 技師（正会員）

\*2(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 主幹技師 工修

\*3(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 技師 工修（正会員）

\*4 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター 主任研究員 Ph.D.

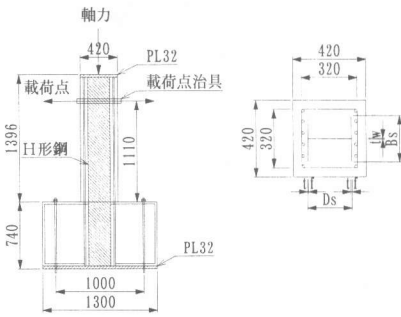


図-1 実験に使用した供試体の概要図

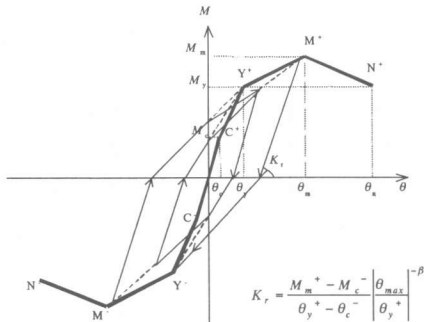


図-2 SRC部材の復元力モデル

別して骨組み解析と有限要素解析があるが、設計実務においては骨組み解析を用いるのが一般的である。そして、骨組み解析では部材を線材とみなし、そこに復元力モデルを定義する。

復元力モデルは、初期荷重に辿るルートと定義する骨格曲線と、除荷、再荷重時に辿るルートと定義する履歴法則により定義される。SRC部材は、一般にせん断変形や軸方向力による塑性変形の影響を無視できる荷重範囲で使用されるため、復元力モデルとしては、曲げ剛性に関するもののみを定義する。また、曲げ剛性の定義法として、部材全体の曲げ剛性、すなわち、材端曲げモーメントと部材角の関係（以下、 $M-\theta$ モデル）を定義する場合と、部材断面の曲げ剛性、すなわち、断面の曲げモーメントと曲率の関係（以下、 $M-\phi$ モデル）を定義する場合がある。ここで部材角は、部材の非線形性を部材端部に集約したバネの回転角を指す。

## 2.2 骨格曲線

鉄道構造物の新しい耐震設計法<sup>1)</sup>では、SRC部材の骨格曲線の形状を、 $M-\theta$ モデル、 $M-\phi$ モデルとも以下の点を通るテトラリニアモデルとしている。

- ①ひび割れ点（C点）
- ②軸方向鉄筋の降伏点（Y点）
- ③最大水平抵抗荷重程度を維持する最大変位点（M点）
- ④降伏荷重相当の水平抵抗を維持する最大変位点（N点）

これらの折れ点の算定手法は、図-1に示す曲げ破壊モードのSRC柱部材による交番荷重実験結果を基に既に提案している<sup>4) 5)</sup>。

## 2.3 履歴法則

SRC部材の履歴特性は、最大荷重程度までは鉄筋コンクリート部材とほぼ同様な傾向を示す。一般に、最大荷重以降の劣化域においては、鉄筋コンクリート部材に見られるピンチング現象は認められず、鉄骨の影響により比較的安定した紡錘形のループをなす傾向を示す。

そこで、SRC部材の履歴特性を表現するモデルとして、文献6)に示す鉄筋コンクリート部材の復元力モデル（武田モデルを3折4勾配のテトラリニアに拡張したモデル）を若干修正した、以下のような復元力モデルを提案する。図-2に提案する復元力モデルを示す。図中の太線は骨格曲線を示している。以下は、 $M-\theta$ モデルにおける正荷側側の骨格曲線上からの除荷と、負荷側側の再荷側のルールである。

(1) 骨格曲線上から曲げモーメント0までの除荷

①  $\theta_{max} \leq \theta_c$  の場合は、除荷剛性は初期剛性と同じ。

②  $\theta_{max} > \theta_c$  の場合は、除荷剛性  $K_r$  は式(1)による。

$$K_r = \frac{M_m^+ - M_c^-}{\theta_y^+ - \theta_c^-} \left| \frac{\theta_{max}}{\theta_y^+} \right|^{-\beta} \quad (1)$$

ここに、 $M_m^+$ ：正荷側側の  $Mm$

- $M_c^-$  : 負荷荷側の  $M_c$
- $\theta_{y^+}$  : 正荷荷側の  $\theta_y$
- $\theta_{c^-}$  : 正荷荷側の  $\theta_c$
- $\theta_{max}$  : 除荷開始点の  $\theta$
- $\beta$  : 除荷剛性低下率

(2) 曲げモーメント0から負荷荷側の骨格曲線への再荷荷

- ① 負荷荷側で  $C^-$  点を超えていない場合は、負側の  $C^-$  点を目指す。
- ② 負荷荷側で  $C^-$  点を超え、 $Y^-$  点を超えていない場合は、過去の最大変形点を目指す。
- ③ 負荷荷側で  $Y^-$  点を超え、 $M^-$  点を超えていない場合は、負側の  $Y^-$  点を目指し、変形0の点または曲げモーメント0の点を超えると、負側の最大変形点を目指す。
- ④ 負荷荷側で  $M^-$  点を超えている場合は、負側の  $M^-$  点を目指し、変形0の点または曲げモーメント0の点を超えると、負側の最大変形点を目指す。

(3) 曲げモーメント0点から負荷荷側の骨格曲線への再荷荷途中での除荷

曲げモーメント0までは、正側の除荷剛性  $K_r$  の直線上を進み、曲げモーメント0からは、正側での最大変形点を目指す。

## 2.4 復元力モデルの履歴の適応性

提案する復元力モデルの妥当性について検証するために、**図-1**と同形式の供試体による静的交番荷重実験結果を用いて、実験値と計算値の比較を行った。**図-3**に荷重-変位履歴曲線の比較、**図-4**に累積吸収エネルギー量の比較を示す。累積吸収エネルギー量は、荷重-変位履歴曲線が囲む面積として算定している。

ここでは、履歴特性に着目するため、モデルの折り返し点は全て実験値を用いた。また、除荷時の剛性低下率  $\beta$  は0.4としている。

**図-3**、および**図-4**は、鉄道構造物に用いられることが多い標準的なSRC柱(せん断スパン比が7以下、軸力比が0.15以下程度)の結果を示しているが、これより提案した復元力

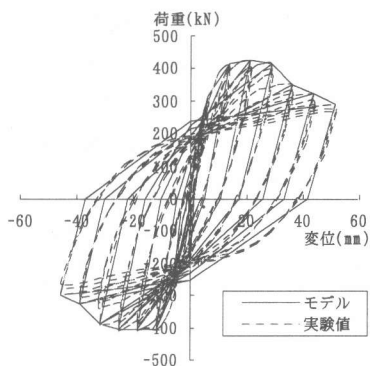


図-3 SRC部材の荷重と変位の関係

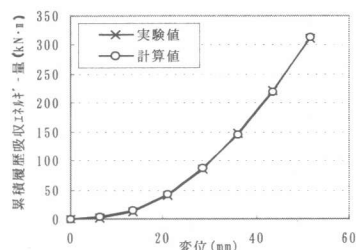


図-4 累積吸収エネルギーの比較

モデルは実験結果とよく一致していることが分かる。また、除荷時の剛性低下率は0.4程度としてよいものと考えられる。ここで言う軸力比とは、作用軸力による圧縮応力度をコンクリートの圧縮強度で除したものを指す。

履歴特性は、部材のパラメータにより、ある程度傾向が異なることが予想される。そこで、部材パラメータの異なる供試体についても同様の検討を行った<sup>7)</sup>。

その結果、上記の供試体の鉄骨断面を半分程度にした供試体(鋼材比2.53)、すなわち鋼材比が小さい供試体については、提案する復元力モデルは、履歴吸収エネルギー面でやや過大評価となった。これは、実験結果の履歴曲線を見ると、SRC部材としては再荷荷時(第2、および4象限)の膨らみが小さく、比較的鉄筋コンクリート部材に近い履歴挙動を示すためと考えられる。したがって、鋼材比が小さいSRC部材については、**文献6)**に示す鉄筋コンクリート部材用の復元力モデルを用いるのがよい。

ここで言う鋼材比とは、柱断面積に対する鉄骨と軸方向鉄筋の総断面積の比率を指す。

また、軸力を2倍にした供試体(軸力比0.2)についても、提案する復元力モデルでは過大評価となった。除荷剛性低下率 $\beta$ を0.6程度とすると履歴吸収エネルギー面ではほぼ等しくなるが、高軸力を受けるSRC部材については、安全を考えて、鉄筋コンクリート部材用の復元力モデルを用いるのがよい。

なお、同様に、せん断補強鉄筋比およびせん断スパン比についても履歴特性への影響について検討したが、履歴特性に相違は認められず、鉄道構造物に用いられる標準的な断面のSRC部材については、提案する復元力モデルを適用できるものと考えられる。

### 3 ハイブリッド実験概要

#### 3.1 供試体の諸元

供試体は、既に実施した静的交番载荷実験に用いた標準ケースである供試体(図-1)と同等の形態を有するものとした。コンクリートは呼び強度 $F_c=24\text{N/mm}^2$ 、鉄骨の材質はSS400、鉄筋の材質はSD295を使用している。供試体の諸元を表-1に示す。

#### 3.2 実験の条件

##### (1) ハイブリッド実験システム

本実験の制御・計測システムの模式図を図-5に示す。実験の制御変位計は、磁歪式の変位計(磁歪現象を利用した小型の非接触式センサ

一)を用いてデジタル信号でコンピュータに接続し、リアルタイムの変位を計測した。その他の変位、ひずみは静的に計測した。

##### (2) 実験の条件

鉛直荷重は柱の軸力比が0.1となるように柱頭部に载荷した。応答計算はSRC橋脚を等価な質量を持つ1自由度系振動モデルと仮想して運動方程式を解いている。そこで質量は、柱の軸力比0.1から定まる上部工重量と橋脚く体重量の0.3倍を足し合わせた重量を等価重量<sup>8)</sup>として、これを質量換算した値を用いた。実構造物と供試体の相似比は3とした。また、運動方

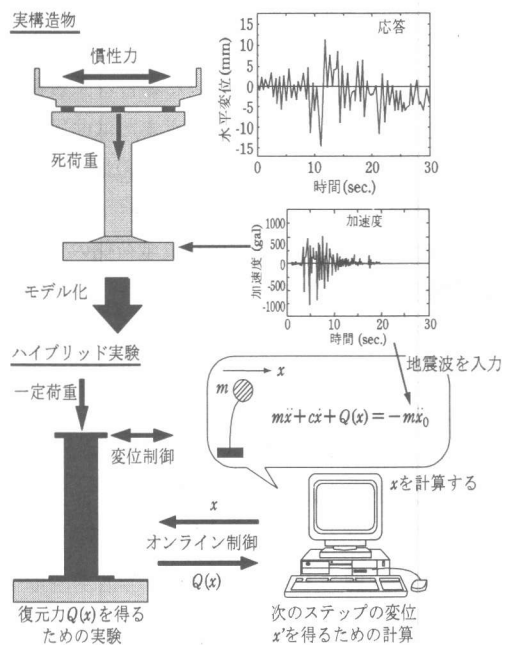


図-5 ハイブリッド実験システムの概要図

表-1 供試体の諸元

供試体 No.	せん断スパン La(mm) (比)	鉄骨(ビルアップ) 寸法 Bs×Ds×tw×tf (mm)	引張鉄筋		せん断補強鉄筋		鋼材比 Ps (%)	鉄骨鉄筋比 Ast/Ar	コンクリート強度 f <sub>c</sub> (N/mm)	軸力比 σ/f <sub>c</sub>
			使用鉄筋	Pt (%)	使用鉄筋	Pw (%)				
KH-1	1,110 (3)	250×250×10×10	6-D13	0.49	D10@226	0.15	5.0	4.80	28.2	0.1

Pt: 引張鉄筋比, Pw: せん断補強鉄筋比, Ps: 鋼材比((Ast+Ar)/(B×D))×100, Ast: 鉄骨断面積, Ar: 鉄筋断面積,

B: 断面幅(=420mm), D: 断面高さ(=420mm), Ast/Ar: 鉄骨鉄筋比, σ: 軸方向圧縮応力度(N/(B×D)), N: 作用軸力

程式の積分刻みは、地震波の時間刻みと同様に 0.01 秒とし、減衰定数は 5% とした。

### (3) 地震波

地震波は、兵庫県南部地震以降、鉄道構造物で暫定的に用いられていた L2 地震動に対応した地震波形 (G2b 波<sup>8)</sup>) を入力した。

## 4 実験結果

図-6 は、KH-1 供試体の柱頭部の時刻歴応答変位を示す。実験で用いた地震波形 (G2b 波) は、5 秒前後に最初の大きな加速度を持った波形であるが、この時点で柱基部に大きな塑性化が発生している。この時の応答変位は、プラス側が 15.0mm (4.9 秒) で、マイナス側が 23.5mm (5.2 秒) となっている。ひび割れ観察では、柱部に曲げひび割れが発生しており、側面には斜め方向のせん断ひび割れも観察されている。しかし、コンクリートが剥落するなどの状況には至っていない。

その後、6 秒以降では、柱基部のコンクリートの小規模な剥落が観察され始めて、徐々に部材軸方向の縦ひび割れが増加して、損傷が進んでいる。その後、柱の応答変位はプラス側に偏る傾向を示している。コンクリートの剥落は軽微なので、これは文献 1) の損傷レベル 2 程度の損傷度と言える。最大変位は 29.2mm (9.6 秒) であった。

実験は、入力地震波を 30 秒載荷した時点で終了したが、その時点での残留変位は約 8 mm であった。

## 5 交番載荷実験とハイブリッド実験の比較

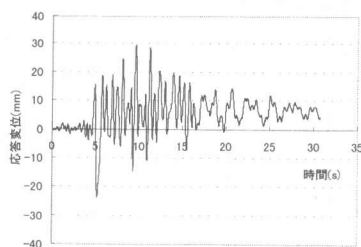


図-6 柱頭部の時刻歴応答変位

図-7 は、既に実施した静的交番載荷実験により得られた A-2 供試体の荷重・変位包絡線と、今回実施したハイブリッド実験により得られた KH-1 供試体の履歴ループを重ねて示したものである。

これより、静的交番載荷実験により得られた荷重・変位包絡線は、最大荷重時まではハイブリッド実験による履歴ループとほぼ一致している。しかし、ハイブリッド実験による損傷は、静的交番載荷実験により得られた荷重・変位包絡線の最大荷重付近に相当するため、最大荷重時以降の劣化傾向に関しては、ハイブリッド実験と交番載荷実験の整合性は今回の実験のみでは検討できない。

## 6 復元力モデルの検証

図-8、および図-9 は、KH-1 供試体について時刻歴応答変位の実験結果と解析結果を比較して示したものである。なお、実験装置において、水平載荷用のジャッキと鉛直載荷用のジャッキが離れているため、解析上の質点の位置を実験装置に合わせて補正している。また、応答変位は相似比を考慮して、実験で得られた応答変位を実構造物レベルの応答変位に換算している。

SRC 部材の復元力モデルとして、図-2 に示すテトラリニア型の骨格曲線を提案しているが、応答変位の解析値は、この復元力モデルを用いた動的応答解析から求めたものである。なお、除荷剛性低下率は 0.4、減衰定数は 5% としている。

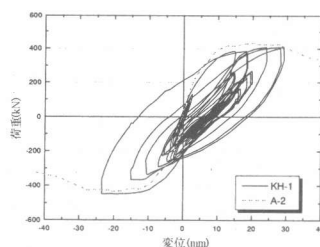


図-7 静的交番載荷実験 (A-2) 包絡線とハイブリッド実験 (KH-1) 履歴ループ

図-8, および図-9より, 解析の結果から得られた時刻歴応答変位波形と, ハイブリッド地震応答実験から得られた時刻歴応答変位波形を比較すると, 最大応答変位量は発生時点と共に実験値と計算値はほぼ一致している。そして, 最大応答変位は, 鉄道構造物の新しい耐震設計で言う損傷レベル2<sup>1)</sup>限界点を少し超えた箇所であり, 部材の損傷度は損傷レベル3以下に納まっていることが分かる。よって, 提案されている復元力モデルは妥当なものと考えられる。

## 7 まとめ

SRC柱の復元力モデルを, 既実施した静的交番荷重実験の結果を基に提案して, その妥当性を検証するために, ハイブリッド地震応答実験を実施した。ここで得られた主な事項をまとめると以下の通りである。

(1) 提案した復元力モデルは, 静的交番荷重実験で得られた履歴形状を妥当に評価する。ただし, 鉄筋量が少ない部材, あるいは高軸力が作用する部材は, 提案したモデルを用いると履歴吸収エネルギーを過大に評価する可能性がある。

(2) 静的荷重実験より得られる荷重・変位包絡線とハイブリッド実験より得られる履歴ループを比較すると, 最大荷重時まではほぼ一致している。

(3) 提案する復元力モデルを用いて時刻歴応答解析を行った結果, 応答変位はハイブリッド実験結果とほぼ一致しており, 復元力モデルの妥当性が検証された。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善, 1999.10
- 2) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英慈, 宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.179~190, 1995.1
- 3) 池田学, 村田清満, 渡邊忠朋, 瀧口将志,

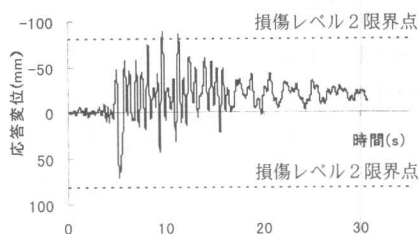


図-8 時刻歴応答変位の実験結果

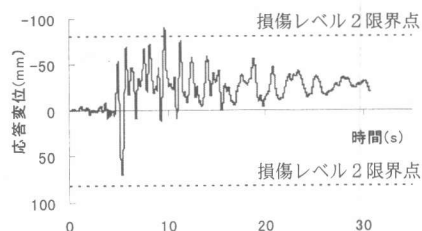


図-9 時刻歴応答変位の解析結果

木下雅敬: SRC 部材の変形性能と復元力特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.4, pp.29~34, 1999.4

- 4) 村田清満, 池田学, 川井治, 瀧口将志, 渡邊忠朋, 木下雅敬: 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
- 5) 平暁, 村田清満, 池田学, 木下雅敬: 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回年次学術講演会講演概要集, I-A160, pp.320~321, 1999.9
- 6) 玉井真一, 瀧口将志, 佐藤勉: RC 部材の復元力特性, 鉄道総研報告, Vol.13, No.4, pp.15~20, 1999.4
- 7) 池田学, 村田清満: 鉄骨鉄筋コンクリート部材の復元力モデル, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, I-A159, pp.318~319, 1999.9
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料, 1996.3