

## 鋼製橋脚のモデル化と非線形動的解析の一例

深谷茂広<sup>1</sup>・尾山靖史<sup>1</sup>・瀬能浩実<sup>2</sup>・嶋原 徹<sup>3</sup>・松田 宏<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社 長大 （〒305-0821 茨城県つくば市春日3-22-6）

<sup>2</sup>正会員 株式会社 オリエンタルコンサルタンツ （〒213-0011 神奈川県川崎市高津区久本3-5-7）

<sup>3</sup>セントラルコンサルタント株式会社 （〒144-0035 東京都大田区南蒲田2-16-2）

<sup>4</sup>正会員 日本電子計算株式会社 （〒135-0016 東京都江東区東陽2-4-24）

### 1. はじめに

コンクリートを充填した鋼製橋脚は、鉄筋コンクリート橋脚に準じて、地震時保有水平耐力法による耐震設計を行うことができる。しかし、コンクリートを充填した鋼製橋脚でも、免震支承の採用や基礎の影響が大きいと考えられる場合は、橋脚の非線形性と同時に免震支承や基礎の非線形性も考慮する必要があり、この場合は動的解析を行い、その結果を設計に反映させるのが望ましい。

ここでは、コンクリートを充填した鋼製橋脚の非線形動的解析に用いる実用的なモデル化を示すとともに、モデル化の相違による非線形動的解析結果の相違について報告する。

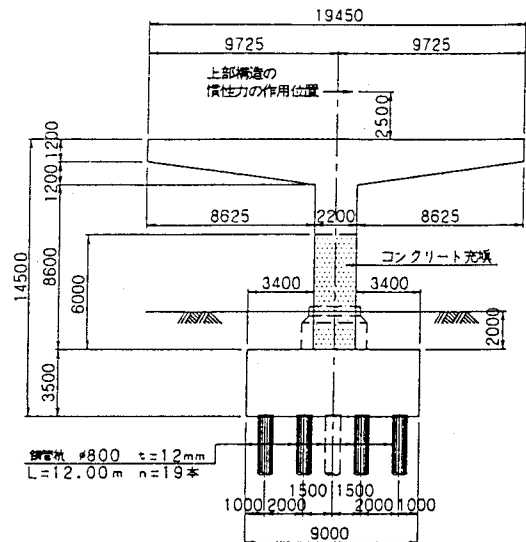


図-1 解析対象の鋼製橋脚

### 2. 解析対象橋梁

解析対象の橋脚は、図-1に示すコンクリートを充填した鋼製橋脚の設計例である<sup>1)</sup>。橋梁諸元は、表-1に示すとおりである。

このコンクリートを充填した鋼製橋脚は、終局荷重が橋脚基部のコンクリート充填部で決定され、その荷重状態で非充填部は弾性範囲に入るように、地震時保有水平耐力法により設計されている。

表-1 解析対象の橋梁諸元

橋梁形式	10径間連続鋼Iげた橋
支間割	40m × 10径間
幅員	全幅員 19.450m
支承種類	ゴム支承(タイプB), 2方向弾性支持
橋脚	コンクリート充填した鋼製T型橋脚
基礎	鋼管杭
耐震条件	B種の橋梁、A地域、II種地盤

### 3. 解析モデルと解析条件

#### (1) 解析モデル

コンクリートを充填した鋼製橋脚の場合、終局荷重は橋脚基部のコンクリート充填部で決定され、その荷重状態で非充填部は弾性範囲にとどめる設計が基本である。

ここでは、1つの橋脚とそれが支持する上部構造部分の重量からなる橋脚単体モデルを対象に動的解析を行った。

充填した鋼製橋脚の復元力モデルは、充填部を鉄筋コンクリート橋脚に準じて算定した<sup>2)</sup>。この復元力特性を回転バネあるいはせん断バネにより考慮したモデルのほかに、充填部を非線形な曲げモーメント(M)と曲率( $\phi$ )の関係(以下、M- $\phi$ 関係と略す)を有するはりにモデル化することが考えられる。

本検討で比較解析を行った解析モデルの一覧を表-2に示す。

表-2 鋼製橋脚の解析モデル

	はり・回転バネモデル	せん断バネモデル	はりモデル
固定支持の場合			
弾性支持の場合			
基礎を含む場合			

凡例 — 剛部材 — 弾性部材 — ばね部材  
 M-φ部材

(2)モデル化

モデル化の概要について以下に示す。なお、解析モデルの詳細は文献に示している<sup>3)</sup>。

(a)はり・回転バネモデル

このモデルでは、橋脚の弾性変形および塑性変形を柱基部の回転バネの回転角で再現している。従って、はり部材は剛体とした。

(b)せん断バネモデル

このモデルでは、上部構造慣性力作用位置の水平荷重による水平変位が等価となるように橋脚のバネ( $K_s$ )および基礎地盤のバネ( $K_P$ )を換算した。

従って、橋脚のバネの変形には橋脚天端のたわみ角により生じる上部構造の剛体変位を含む。また、基礎地盤のバネの変形には基礎の変形による橋脚及び上部構造の剛体変位を含む。

弾性支持の場合および基礎を含む場合の橋脚の重量( $W_r$ )およびフーチング( $W_f$ )の重量は1次の固有周期がはり・回転バネモデルに等しくなるように換算した。

なお、以下では、はり・回転バネモデルとせん断バネモデルを総称して、バネモデルと呼ぶこととする。

(c)はりモデル

このモデルでは、コンクリート充填部はバイリニアのM-φ関係でモデル化し、はり下端から上部構造慣性力作用位置までの部材を剛体とし、その下の鋼断面部を弾性部材としてモデル化した。

上部構造慣性力作用位置における水平荷重と水平変位の関係は図-2に示すとおりである。バネモデルのP-δ関係はバイリニアであるのに対し、はりモデルのコンクリート充填部のM-φ関係はバイリニアであるが、はりモデルのP-δ関係は降伏後の2次勾配の領域でバイリニアのP-δ関係と相違が小さくない。

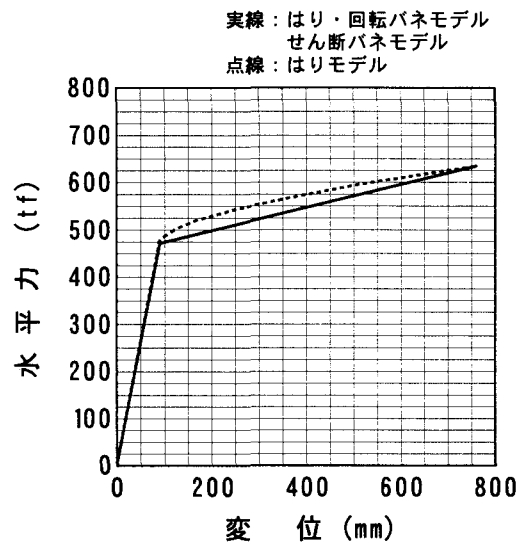


図-2 水平荷重と水平変位の関係

(3)解析条件

(a)非線形時刻歴応答解析法

数値計算はニューマークのβ法(β=1/4)による直接積分法とした。また、応答計算の時間刻みは1/1000秒とした。

(b)減衰定数

本解析における減衰マトリックスは、1次モードの等価減衰定数を用いた剛性比例型とした。この時、ゴム支承、橋脚および基礎地盤の減衰定数は、次の値とした。

ゴム支承	0.02
橋脚(鋼断面部)	0.01
橋脚(コンクリート充填部)	0.02
基礎地盤	0.20

(c)動的解析に用いた入力地震動

時刻歴応答解析に考慮した地震動は、タイプIIのII種地盤に対する標準加速度波形の1波を入力地震動とした。また、地震動の入力方向は橋軸直角水平方向とした。

#### 4. 非線形時刻歴応答解析結果の比較

##### (1) 固定支持のモデル

固定支持のモデルによる動的解析結果を表-3および図-3に示す。

固定支持の1自由度モデルでははり・回転バネモデルとせん断バネモデルの動的解析結果が一致している。一方、2種類のパネモデルとはりモデルの間には相違がある。この相違は、図-2に示したバネモデルとはりモデルとの間の降伏後の荷重変位関係の相違により生じている。

はりモデルの慣性力作用位置の変位および残留変位がバネモデルより小さくなることは、M-φ関係でモデル化したはりモデルの方がバイリニアの荷重変位関係を有するバネモデルより降伏後の剛性が大きいことが原因である。

##### (2) 弾性支持のモデル

弾性支持のモデルによる動的解析結果を表-4および図-4に示す。なお、応答波形については、図-5に示す基礎を含むモデル化の結果と類似しているので省略した。

はり・回転バネモデルとせん断バネモデルの動的解析結果は、橋脚の曲げ変位および残留変位に小さな相違があるが、概ね一致し、その2種類のパネモデルとはりモデルの間には応答値に相違がある。

はり回転バネモデルとせん断バネモデルの僅かな相違は、自由度の相違が原因と解釈される。

固定支持のモデルと同様、はりモデルの橋脚の変位と残留変位はバネモデルより小さく、ゴム支承の水平変位は、はりモデルの方が2割大きい。これは、はりモデルの降伏後の剛性が大きいため、橋脚の変位が小さくなるとともに、上部構造の加速度が大きくなり、ゴム支承の変位が増加したと解釈される。

表-3 固定支持のモデルの解析結果

	はり・回転 バネモデル (1)	せん断 バネモデル (2)	はりモデル (3)
固有周期(秒)	0.885	0.885(1.00)	0.885(1.00)
等価減衰定数 (%)	1.90	1.90(1.00)	1.90(1.00)
加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	-583	-583(1.00)	-589(1.01)
慣性力作用位置 の変位(cm)	51.2	51.2(1.00)	44.9(0.88)
橋脚の残留 変位(cm)	-7.0	-7.0(1.00)	2.2(-0.32)

注) ( ) 内の値は、(2)/(1)あるいは(3)/(1)である。

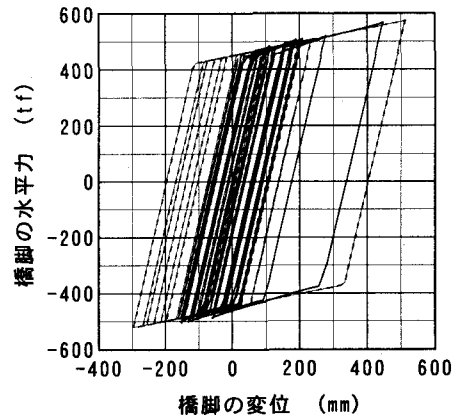
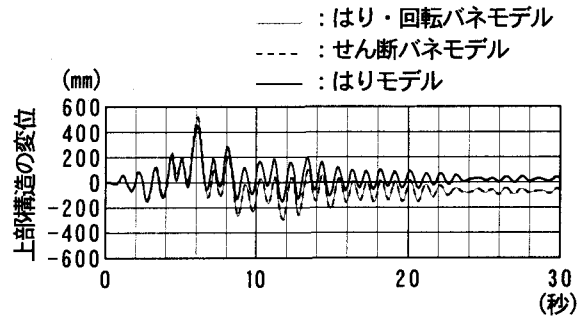


図-3 固定支持のモデルの応答変位と応答履歴

表-4 弾性支持のモデルの解析結果

		はり・回転 バネモデル (1)	せん断 バネモデル (2)	はりモデル (3)
固有周期 (秒)	1次	1.304	1.304(1.00)	1.301(1.00)
	2次	0.162	0.162(1.00)	0.141(0.87)
等価減衰定数 (%)		1.96	1.96(1.00)	1.96(1.00)
慣性力作用位置 の変位(cm)		53.0	53.0(1.00)	51.8(0.98)
ゴム支承の 変位(cm)		14.1	14.0(1.00)	16.3(1.16)
橋脚天端の 曲げ変位(cm)		40.6	41.2(1.01)	37.7(0.93)
橋脚の残留 変位(cm)		15.9	16.9(1.06)	14.2(0.89)

注) ( ) 内の値は、(2)/(1)あるいは(3)/(1)である。

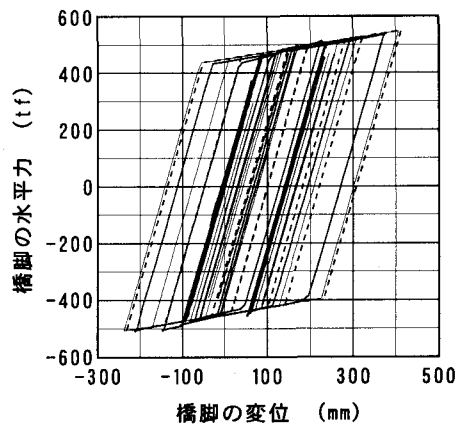


図-4 弾性支持のモデルの応答履歴

### (3)基礎を含むモデル

基礎を含むモデルによる動的解析結果を表-5および図-5に示す。なお、橋脚天端の曲げ変位と橋脚の変位の応答履歴には、基礎の変形を含まない。

はりモデルの応答値は、2種類のバネモデルと比べ、慣性力作用位置と橋脚の曲げ変位と残留変位が小さく、ゴム支承の水平変位が大きい。この傾向は弾性支持のモデルの解析結果と同様である。

はり・回転バネモデルとせん断バネモデルの動的解析結果は、弾性支持のモデルの解析結果と比べ、相違がやや大きい。せん断バネモデルは1次の固有周期が等しくなるようにモデル化されているが、2次の固有周期に相違があり、これが応答値の相違の原因と解釈される。

表-5 基礎を含むモデルの解析結果

		はり・回転 バネモデル (1)	せん断 バネモデル (2)	はりモデル (3)
固有周期 (秒)	1次	1.424	1.423(1.00)	1.421(1.00)
	2次	0.197	0.186(0.94)	0.189(0.96)
等価減衰定数 (%)		4.89	4.89(1.00)	4.89(1.00)
慣性力作用位置 の変位(cm)		65.8	63.1(0.96)	59.3(0.90)
ゴム支承の変位 (cm)		14.9	14.5(0.97)	17.9(1.20)
橋脚天端の曲げ 変位(cm)		46.6	43.9(0.94)	38.7(0.83)
橋脚の残留変位 (cm)		18.4	16.0(0.87)	16.4(0.89)

注) ( ) 内の値は、(2)/(1)あるいは(3)/(1)である。

## 5. まとめ

鋼製橋脚の実用的なモデル化と各解析モデルの非線形動的解析結果を検討し、以下の結果を得た。

せん断バネモデルは、はり・回転バネモデルと概ね解析結果が一致する。しかし、基礎を含むモデルのように2次モードが相違する場合には、せん断バネモデルははり・回転バネモデルの解析結果と一致しない。従って、ここで検討した基礎を含むせん断バネモデルのモデル化には改良の余地がある。

M-φ関係を考慮したはりモデルについては、バイリニアの荷重変位関係を有するバネモデルと比べ、橋脚の変位と残留変位が小さく、逆にゴム支承の変位が大きい結果となった。繰り返し載荷実験結果と比べ、バイリニアの荷重変位関係は降伏後の剛性を過小評価していることから、ここで検討したバイリニアの荷重変位関係を有するモデルは、橋脚の変位及び残留変位をやや過大に評価し、弾性支承の変形を過小に評価する可能性が指摘される。

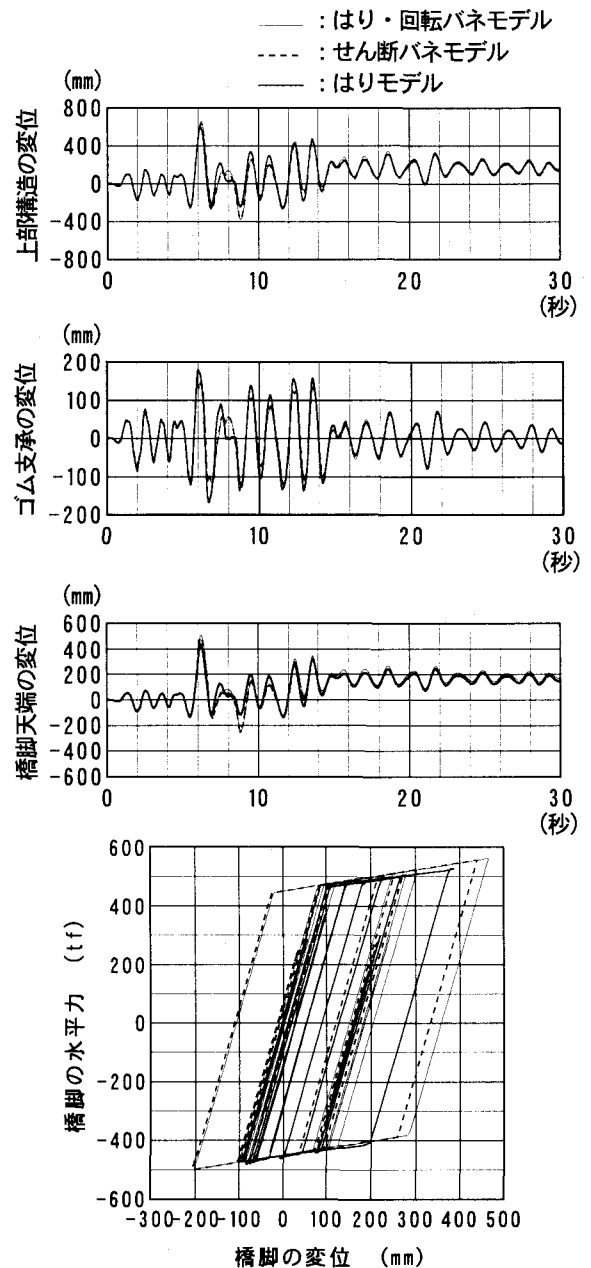


図-5 基礎を含むモデルの応答波形と応答履歴

## 6. おわりに

ここで報告した内容は、(財) 土木研究センター内に設置された耐震ソフトウェアに関する研究委員会で検討された内容の一部である。

### 参考文献

- 1) (社) 日本道路協会 道路橋の耐震設計に関する資料 平成9年2月
- 2) (社) 日本道路協会 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 平成8年12月
- 3) (財) 土木研究センター 平成9年度耐震ソフトウェアに関する研究委員会報告書