

I-76

1 自由度モデルによる鋼管橋脚の動的応答解析法に関する検討

(株)日本製鋼所	○正員	奥野寛人
開発土木研究所	正員	三田村浩
(株)日本製鋼所	正員	小枝日出夫
室蘭工業大学	正員	岸徳光

1. はじめに

平成8年に改訂された道路橋示方書耐震設計編¹⁾では、コンクリートを充填しない鋼製橋脚に関しては、非線形動的解析により耐震性を判定することが推奨されている。そして、この動的解析に用いる諸数値は、同等の構造細目を有する試験体の繰返し載荷実験に基づいて定めることを原則としている。このような中、小型橋脚模型を用いた繰返し載荷実験結果をもとに復元力モデルを設定し、それを用いた1自由度モデルによる動的応答解析²⁾が数多く行われている。これらの解析結果の検証は、振動台を用いる応答実験³⁾が大きな実験装置や多大な実験費用を要することより、擬似的な応答実験であるハイブリッド地震応答実験との比較により行われている。しかしながら、上部工を考慮した鋼製橋脚を考える場合、地震波入力によって弾性から弾塑性状態に移行する過渡領域では、変位振幅の増大とともに二次項や上部工の回転慣性力等が複雑に連成するものと考えられ、その動的弾塑性挙動は静的載荷挙動と異なることも予想される。したがって、これらの解析方法を実際の鋼製橋脚の耐震性評価に適用するためには、動的応答実験による検証が必須であるものと判断される。

本研究では、先に行われた鋼管橋脚模型を用いた静的繰返し載荷実験⁴⁾から得られた履歴曲線に基づいて、実際にバイリニア型の復元力モデルを作成し、これを用いた1自由度モデルによる動的応答解析を行った。この解析結果を繰返し載荷実験と同一諸元の試験体を用いて行われた正弦波加振実験結果⁵⁾と比較することにより、この動的応答解析法の適用性について検討を行った。特に、バイリニアモデルの設定に関しては、その降伏点座標の与え方による応答の相違について着目した。

なお、本文では正弦波加振実験および繰返し載荷実験については結果のみを示しており、詳細は文献3)および4)を参照されたい。

2. 対象試験体および実験概要

2.1 試験体

先に行われた静的載荷実験⁴⁾と基部加振実験⁵⁾では、鋼種と細長比を固定し径厚比を変化させた小型鋼管橋脚模型(以下、試験体)を用いて実験が行われている。本研究では、これらの実験の中で板厚が1.5 mmおよび2.5 mmの試験体を対象に動的解析を行っている。図-1に試験体の形状を、また表-1に形状寸法および各パラメータを一覧にして示している。なお、表-1における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ および径厚比パラメータ R_t は、次式により定義される。

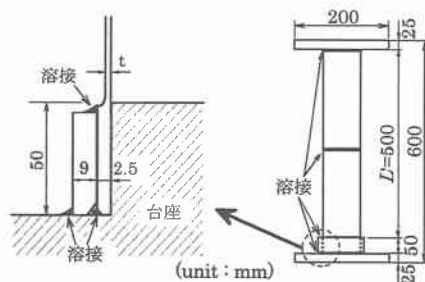


図-1 試験体の概要図

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad \text{----- (1)}$$

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad \text{----- (2)}$$

Single-Degree of Freedom Dynamic Response Analysis of Steel-Pipe Bridge Piers.

by Hiroto OKUNO, Hiroshi MITAMURA, Hideo KOEDA, and Norimitsu KISHI

表－1 試験体の形状寸法および各パラメータ

試験体名	荷重点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	板厚中心半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
t15-C、-D	631.5	500	48.00	1.5	0.511	0.099
t25-C、-D			48.50	2.5	0.506	0.060

ここで、 σ_y は鋼管の降伏応力、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比、 R は平均半径、 t は板厚、 r は断面2次半径、 L は試験体基部から荷重作用点までの高さである。また試験体の名称は、第1項が板厚、第2項が荷重方法(C：繰り返し荷重、D：正弦波加振)を示している。試験体の鋼管部は、全て一般構造用炭素鋼鋼管(JIS G 3444 STK400-E-G 電気抵抗溶接鋼管)から製作した。表－2に使用鋼管の引張試験結果を示している。

表－2 鋼管の引張試験結果

降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	縦弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
384	516	206	0.30

表－3 繰り返し荷重実験結果

試験体名	H_y (kN)	δ_{yE} (mm)	H_m (kN)	δ_m (mm)
t15-C	6.06	5.62	8.76	15.8
t25-C	10.51	5.87	15.72	23.5

2.2 繰り返し荷重実験および基部加振実験

繰り返し荷重実験は、試験体に鉛直荷重を常時作用させた状態で、降伏水平変位 δ_{yE} を基準にして水平変位 δ を各サイクルで漸増しながら繰り返し与える実験である。ただし、降伏水平変位 δ_{yE} は、次式で定義される降伏荷重 H_y に相当する変位として実験より求めている。

$$H_y = \frac{(\sigma_y - P/A)I}{(R+t/2)L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 H_y は鋼管基部最外縁が降伏応力に達するときの水平力、 P は軸力、 A は鋼管の断面積、 I は断面2次モーメントである。また、降伏応力 σ_y には引張試験により得られた実測値を用いている。表－3に、繰り返し荷重実験から得られた降伏荷重 H_y 、降伏変位 δ_{yE} 、最大荷重 H_m および最大荷重時の変位 δ_m を一覧にして整理している。

また加振実験は、所定の入力加速度および周波数を有する正弦波で試験体の基部を加振する実験である。表－4には、入力加速度、加振周波数および実験から得られた試験体の固有振動数を一覧にして示している。

表－4 加振実験の条件

試験体名	固有振動数 (Hz)	加振周波数 (Hz)	入力加速度 (gal)
t15-D	4.12	3.0	500
t25-D	5.38	4.0	875

3. 動的応答解析

3.1 運動方程式

上部工の質量(鉛塊)を考慮した鋼管橋脚模型に関して1質点系の振動モデルを作成し、線形加速度法を用いて応答解析を行うこととする。したがって、質点は鉛塊重心位置に取り、試験体基部を加振するものとする。このモデルの運動方程式は次式で表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{x}_0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 x は相対変位、 m は鉛塊の質量(1200 kg)、 c は減衰率、 $Q(x)$ は復元力、 $\ddot{x}_0$ は入力加速度であ

る。基部加振の入力加速度 $\ddot{x}_0$ は実験における入力加速度を用いている。なお、本解析では $c = 0$ とし試験体の減衰率を考慮しない。

3.2 復元力モデル

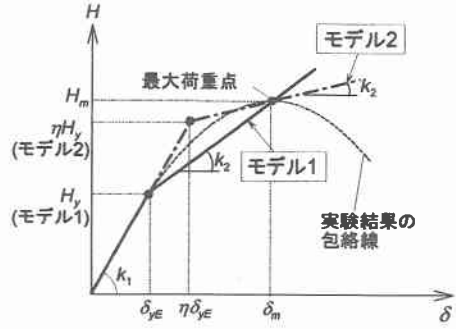
復元力モデルは、2次剛性を有するバイリニアモデルとし、繰り返し載荷実験結果から得られた水平荷重－水平変位履歴曲線をもとに作成している。図－4に復元力モデルの模式図を示す。本解析では、弾性域における応答の精度を確保するために、繰り返し載荷実験の初期勾配を復元力モデルの初期剛性 k_1 とし、降伏荷重点と最大荷重点を結んだ直線の傾きを2次剛性 k_2 としている。また、降伏荷重点の設定に関しては、次の2種類の方法について検討を行った。

- 1) 繰り返し載荷実験から得られた降伏荷重 H_y を直接用いる方法(モデル1)、
 - 2) 初期剛性の延長上でかつ履歴吸収エネルギーが実験結果と等価になるように降伏荷重を η 倍に修正する方法(モデル2)
- である。

モデル2における履歴吸収エネルギーは、実験において荷重が最大荷重に達するまでの各サイクル毎のエネルギー吸収量の積算値としている。表－4には解析に用いた降伏荷重、初期剛性および2次剛性を整理して示している。また、図－5には試験体 t15-C における履歴吸収エネルギーを実験と解析モデルで比較して示している。同図よりモデル1では実験結果に比較して履歴吸収エネルギーを小さく見積もっているのに対し、モデル2を用いた場合には、実験結果を非常に良く近似していることがわかる。

4. 解析結果および考察

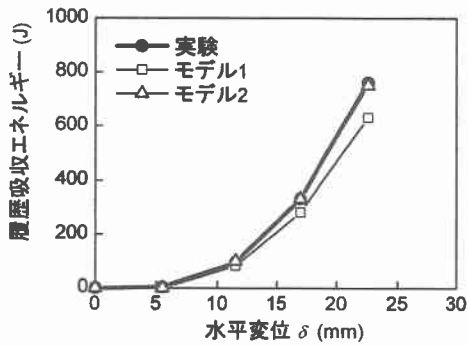
図－6は、試験体 t15-D ($R_L = 0.099$) における入力変位および入力加速度波形を示している。また、図－7には解析から得られた水平荷重－水平変位履歴曲線、応答変位および応答加速度波形を実験結果と比較して示している。なお、履歴曲線における水平荷重には、応答加速度から換算した慣性力を用いている。解析による応答変位および応答加速度は、モデル1に対しては3.5秒、モデル2に対しては4.5秒程度まで実験結果をほぼ再現していることがわかる。これは、モデル2では実験における応答加速度が最大値に達するまでの領域について、実験結果をほぼ再現しているのに対し、モデル1では、試験体の弾性領域の応答のみを再現しているためと考えられる。したがって、試験体 t15-D に関しては、繰り返し載荷の履歴吸収エネルギーが実験結果と等価になるように降伏点荷重を設定することにより、実験にお



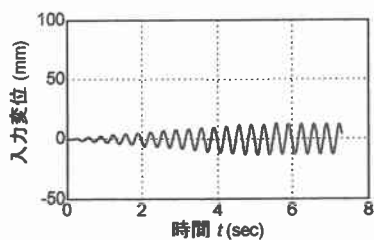
図－4 復元モデルの模式図

表－5 解析に用いた降伏荷重、初期剛性、2次剛性

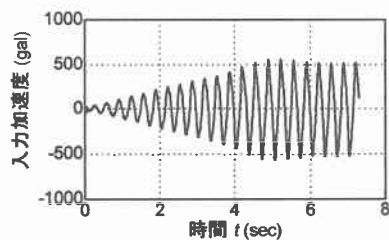
		モデル1	モデル2
t15-C	降伏荷重 (kN)	6.1	6.6
	初期剛性 k_1 (kN/m)	1078.4	
	2次剛性 k_2 (kN/m)	264.0	217.8
t25-C	降伏荷重 (kN)	10.5	12.3
	初期剛性 k_1 (kN/m)	1789.5	
	2次剛性 k_2 (kN/m)	295.0	202.9



図－5 履歴吸収エネルギー (t15-C)

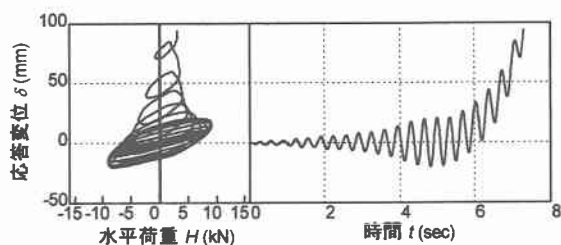


(a) 入力変位

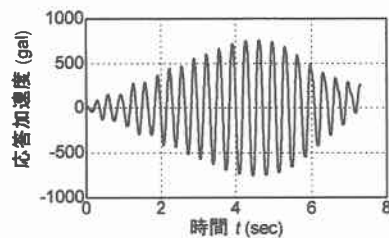


(b) 入力加速度

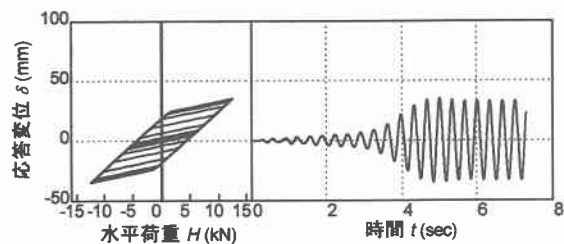
図-6 入力波形 (t15-D)



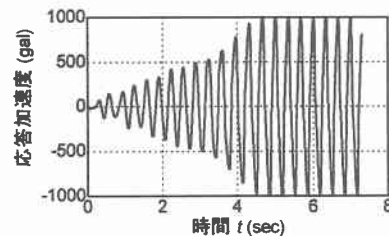
(a) 履歴曲線および応答変位 (加振実験)



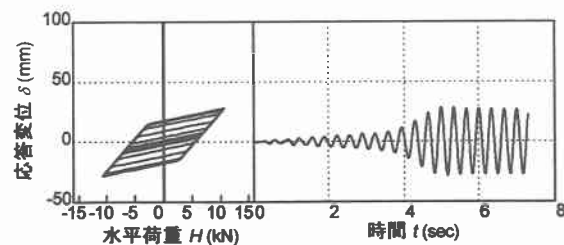
(b) 応答加速度 (加振実験)



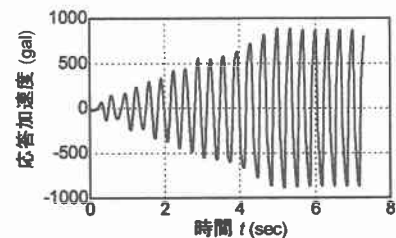
(c) 履歴曲線および応答変位 (解析モデル 1)



(d) 応答加速度 (解析モデル 1)

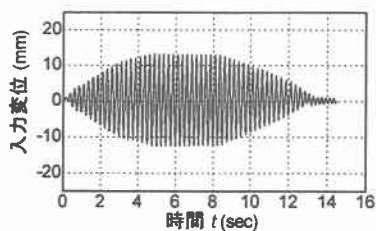


(e) 履歴曲線および応答変位 (解析モデル 2)

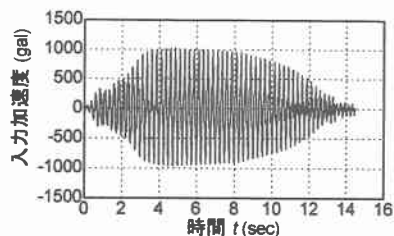


(f) 応答加速度 (解析モデル 2)

図-7 実験結果および解析結果 (t15-D)

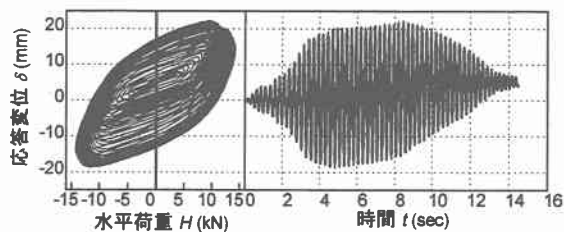


(a) 入力変位

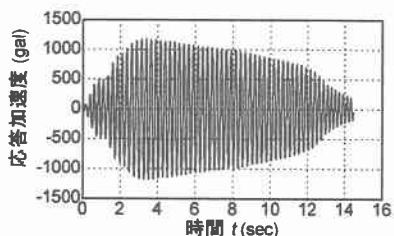


(b) 入力加速度

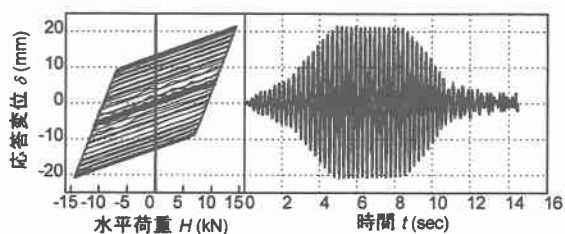
図-8 入力波形 (t25-D)



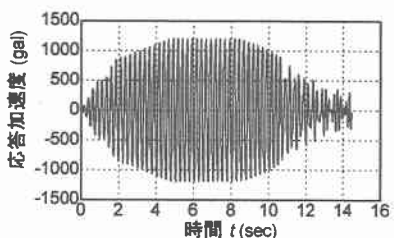
(a) 履歴曲線および応答変位 (加振実験)



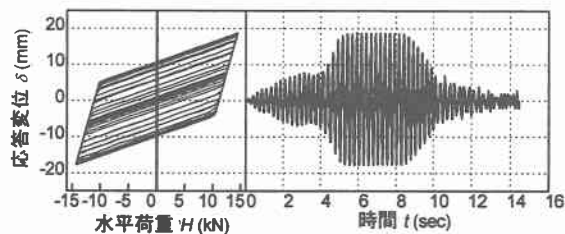
(b) 応答加速度 (加振実験)



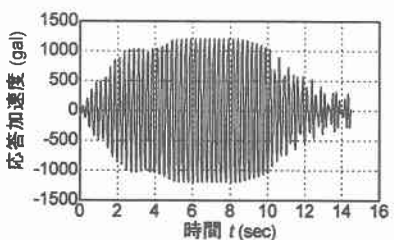
(c) 履歴曲線および応答変位 (解析モデル 1)



(d) 応答加速度 (解析モデル 1)



(e) 履歴曲線および応答変位 (解析モデル 2)



(f) 応答加速度 (解析モデル 2)

図-9 実験結果および解析結果 (t25-D)

ける最大荷重点までの応答挙動を解析によりほぼ再現可能であることがわかる。一方、最大荷重以降に関しては、解析から得られた応答変位および応答加速度は、いずれの場合も実験結果より大きな値を示している。また、実験から得られる座屈発生後の偏心性状は、応答解析においては再現できていない。

図-8には、試験体 t25-D ($R_t = 0.060$)における入力波形を、また図-9には解析結果から得られた履歴曲線、応答変位および応答加速度を実験結果と比較して示している。解析結果は、モデル1の応答変位波形に関しては4.0秒程度まで実験結果をほぼ再現していることがわかる。一方、モデル2に関しては、ほぼ4.0秒後から応答変位振幅が急激に大きくなっており、応答加速度に関して解析による最大値は実験結果とほぼ等しいものの、その波形性状は異なっている。また、応答加速度が最大となる時の応答変位を比較すると、実験結果に対して過大に評価していることがわかる。

以上の結果から、径厚比が大きい場合には、降伏点荷重を適切に設定することで最大荷重点までの応答挙動をバイリニアモデルを用いた解析によりほぼ再現できるものと判断される。一方、径厚比が小さい場合には、バイリニアモデルによる応答解析結果は最大荷重時の変位を過大に評価する傾向にあると思われる。また、バイリニアモデルを用いた解析では、実験の応答変位波形に見られる偏心性状を再現できないようである。

5. まとめ

本研究では、静的繰り返し載荷実験から得られた履歴曲線に基づいて、バイリニア型の復元力モデルを作成し、これを用いた1自由度モデルによる動的応答解析を行なった。この解析結果を正弦波加振実験結果と比較することにより、この動的応答解析法の適用性について検討を行なった。本解析の範囲内で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

- 1) 径厚比が大きい場合には、バイリニアモデルの降伏点を適切に設定することにより、最大荷重までの応答挙動を解析によりほぼ再現可能である。
- 2) 径厚比が小さい場合には、バイリニアモデルによる応答解析結果は最大荷重時の変位を過大評価する傾向にある。
- 3) バイリニアモデルを用いた応答解析により、実験の応答変位波形に見られる偏心性状を再現することは困難である。

参考文献

- 1) 日本道路協会，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 2) 高久達将，池田 茂，岡本 隆，松田 宏，能登有恵，川井 豊：鋼製橋脚のハイブリッド実験と非線形動的応答解析の比較，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，土木学会，pp.301-306，1997.
- 3) 佐藤昌志，三田村 浩，川浪幸一，小枝日出夫，岸 徳光：正弦波加振による鋼管柱模型の弾塑性応答形状，北海道支部論文報告集，第55号(A)，pp.12-17. 1999.
- 4) 松岡健一，小枝日出夫，小室雅人，梶山義晴：鋼管柱模型の繰り返し水平載荷実験と弾塑性解析，北海道支部論文報告集，第55号(A)，pp.18-23. 1999.