

I-77

鋼管橋脚模型の弾塑性挙動におよぼす載荷方法の影響

(株)日本製鋼所 ○正員 小枝 日出夫
 開発土木研究所 正員 池田 憲二
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光
 室蘭工業大学 正員 小室 雅人
 (株)日本製鋼所 正員 小野 信市

1. はじめに

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震では、比較的高い耐震性を有していると考えられていた鋼製橋脚にも多くの損傷が生じた。このような内陸型大地震に対する鋼製橋脚の耐震性を向上させるために、これらの弾塑性挙動に関する実験的解析的研究^{1)~3)}が数多く行なわれている。実験的研究としては、橋脚模型を用いた単調水平載荷実験や漸増繰返し載荷実験等の静的実験が行なわれ、耐荷力や変形性能などの観点から検討されている。一方、動的实验に関しては、振動台を用いる応答実験³⁾ががかり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¹⁾が行なわれている。また、鋼製橋脚の耐震設計法の一つである1自由度モデルによる動的応答解析では、静的繰返し載荷実験結果をもとに設定された復元力モデルが用いられており、その解析結果の検証はハイブリッド地震応答実験結果との比較¹⁾により行なわれている。これらの解析や評価法では、鋼製橋脚の弾塑性挙動が地震荷重下と静的荷重下で等価であることを前提条件としている。しかしながら、上部工を考慮した鋼製橋脚を考える場合、地震波形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。

このような観点から、本研究では先に著者らによって行なわれた鋼管橋脚模型を用いた静的繰返し載荷実験²⁾と基部加振実験³⁾の結果をもとに、鋼管橋脚の耐荷力と変形性能におよぼす載荷方法の影響を検討した。さらに、この加振実験から得られた応答変位波形を用いた静的繰返し載荷実験を行ない、両者の実験から得られる履歴曲線、包絡線および局部座屈形状等を比較することにより、これらの実験法の工学的な等価性について検討を行なった。

2. 実験の概要

2.1 試験体

先に行なわれた静的載荷実験²⁾と基部加振実験³⁾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)を用いて実験が行なわれている。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。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_r}{E}} \dots\dots\dots(1)$$

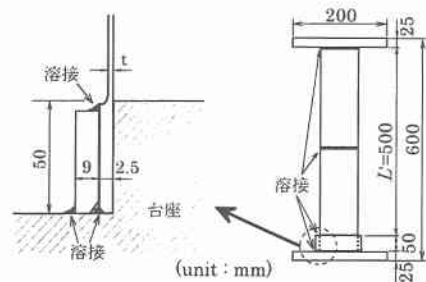


図-1 試験体形状および寸法

表－1 試験体の形状寸法および各パラメータ

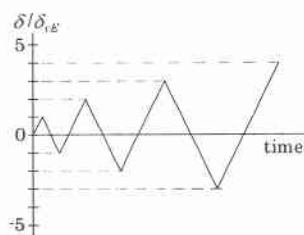
試験体名	荷重点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	板厚中心半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
t10-C、・D	631.5	500	47.75	1.0	0.514	0.147
t15-C、・D、・R			48.00	1.5	0.511	0.099
t20-C、・D			48.25	2.0	0.508	0.074
t22-C、・D			48.35	2.2	0.507	0.068
t25-C、・D、・R			48.50	2.5	0.506	0.060

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (2)$$

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 は荷重点高さ(試験体基部から鉛塊重心位置までの高さ)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、R：応答変位荷重)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。なお、試験体の製作方法等については文献2)、3)を参照されたい。

表－2 鋼管の引張試験結果

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



図－2 繰り返し荷重方法

2.2 実験装置および荷重方法

水平荷重実験装置および加振実験装置は、それぞれ文献2)と文献3)で使用したものと同様であるので、ここでは省略する。詳細については各文献を参照されたい。

(1) 静的水平荷重実験

実験は水平変位制御により、次の2種類の荷重方法で行なった。1) 1サイクルごとの漸増変動変位による繰り返し荷重(以下、繰り返し荷重)、2) 次項の基部加振実験から得られる鉛塊の応答変位波形を用いた繰り返し荷重(以下、応答変位荷重)である。1)の繰り返し荷重の方法は、図－2に示すように、水平変位 δ を降伏水平変位 δ_{1E} を基準にして各サイクルで漸増しながら繰り返し与えている。ただし、降伏水平変位 δ_{1E} は、次式で定義される降伏荷重 H_1 に相当する変位として実験より求めている。

$$H_1 = \frac{(\sigma_y - P/A)I}{(R+t/2)L} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 H_1 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。

(2) 基部加振実験

加振実験は次の2種類について行なった。1) アクチュエーターをシャットダウンさせることにより試験体に自由振動状態を励起させ最低次固有振動数を求める実験、2) 試験体の動的弾塑性挙動を検討するために、所定の入力加速度および周波数を有する正弦波で基部加振する実験である。

加振実験における入力加速度は、静的水平載荷実験より得られた最大耐荷力を参考にして設定している。また加振周波数は、1)の実験により得られた固有振動数の約75%に設定している。表-3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。なお、振動実験における加振方法は、アクチュエーターが設定加速度の振動状態に達するまでに数秒間の時間を要することより、加振時間を統一化するために加振開始から8秒後にアクチュエーターを停止し徐々に振幅を減少させている。

表-3 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)
t10-D	3.56	2.5	300
t15-D	4.12	3.0	500
t20-D	4.87	3.5	600
t22-D	5.19	3.7	750
t25-D	5.38	4.0	875

3. 実験結果および考察

3.1 加振実験における加速度波形

図-3に加振実験における入力加速度波形と応答加速度波形の一例として、 $R_t=0.099$ の試験体(t15-D)における振動台および鉛塊重心位置で測定された加速度波形を示す。(a)図より、入力加速度波形は加振開始後ほぼ線形に増幅し、5秒程度で所定の振幅となり定常的に振動している。加速度波形は7.5秒付近で終了しているが、これは試験体が倒壊し加振を終了させたためである。一方、(b)図より、鉛塊重心位置の応答加速度波形は定常振動状態に至らず、振幅が最大値に達した後徐々に減少していることがわかる。これは、基部近傍に発生した局部座屈によって加振エネルギーが吸収され、試験体上方にエネルギーが伝達されないためと考えられる。

3.2 局部座屈の状況

図-4には、 $R_t=0.099$ の試験体に関する各実験終了後の試験体基部における局部座屈の発生状況を示

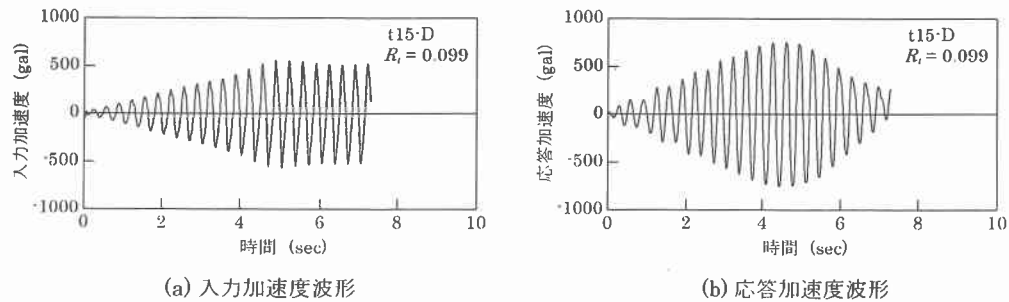


図-3 加速度波形の一例(t15-D, 入力加速度: 500 gal, 加振周波数: 3 Hz)

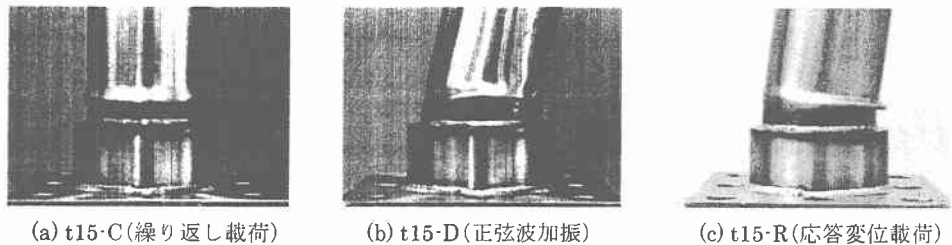


図-4 実験終了後の試験体基部における局部座屈状況($R_t=0.099$)

している。(a)図より、繰り返し载荷の場合には、基部から約 20 mm の位置に全周に渡る象の脚型の局部座屈が発生していることがわかる。一方、正弦波加振の場合(b)図)には、繰り返し载荷で現れるような全周に渡る象の脚型の局部座屈は見られず、加振方向の一側面に発生した局部座屈部が鋼管の内側に潰れ、試験体は"く"の字に変形して倒壊している。また、(c)図より応答変位载荷の場合も正弦波加振の場合と同様に、局部座屈が载荷方向の片側のみに発生していることがわかる。しかしながら、鋼管の内側に潰れるような変形は見られず、正弦波加振の場合とは異なった座屈形状を示している。

3.3 履歴特性

図-5 には、 $R_r=0.099$ の試験体について、各载荷実験より得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を示している。これらの履歴曲線において、水平荷重 H と水平変位 δ はそれぞれ降伏荷重 H_r と降伏変位 $\delta_{r,E}$ で無次元化している。なお、加振実験における水平荷重と水平変位には、それぞれ鉛塊に発生した慣性力(応答加速度から換算)と相対応答変位を用いている。また図-6 には、この試験体の加振実験において鉛塊重心位置で測定された応答変位波形を示している。ただし、応答変位は降伏変位 $\delta_{r,E}$ で無次元化している。これらの履歴曲線および応答変位波形より、加振実験ではほぼ正負対称な加振がなされているにも関わらず、鉛塊の振動の中心が一方方向に移動しながら振動していることがわかる。また、応答変位载荷における履歴曲線は正弦波加振の場合と類似の挙動を示していることがわかる。

図-7 には、 $R_r=0.099$ および 0.06 の試験体について、各载荷実験より得られた履歴曲線の包絡線を比較して示している。同図より $R_r=0.099$ の場合には、加振実験から得られた包絡線は繰り返し载荷実験の結果とほぼ一致していることがわかる。しかしながら、応答変位载荷実験との比較では最大耐力力以降に差異が認められる。一方、 $R_r=0.06$ の場合には、加振実験の包絡線はその最大耐力力までは繰り返し载荷実験とほぼ一致しているものの、耐力力の劣化開始が繰り返し载荷実験に比較して早く、またその劣化の変位に対する進行度合も大きい。これは、径厚比が小さい場合には、繰り返し载荷実験の結果から動的応答時の包絡線を必ずしも評価できないことを示唆している。

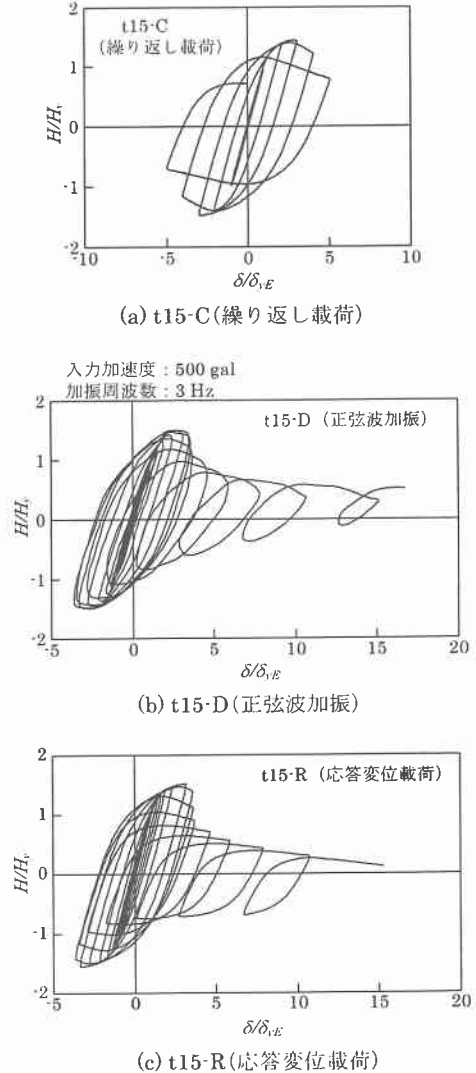


図-5 水平荷重-水平変位履歴曲線

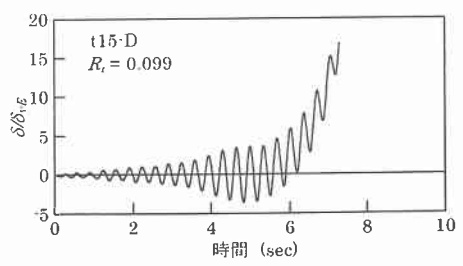


図-6 加振実験における応答変位波形

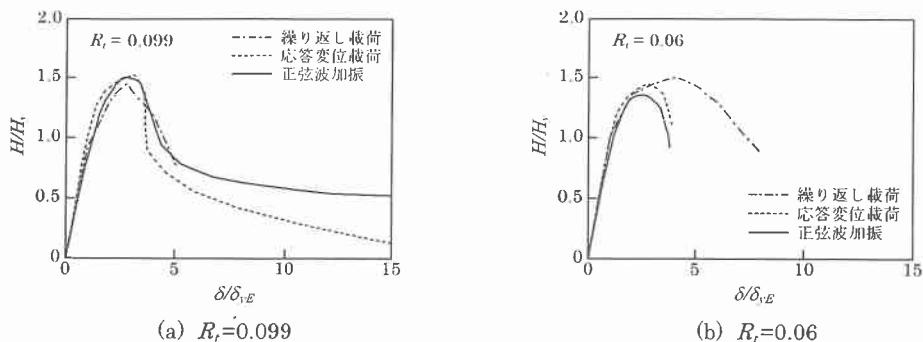


図-7 水平荷重－水平変位履歴曲線の包絡線

表-4 最大荷重および塑性率

試験体名	荷重方法	R_r	δ_{yE} (mm)	H_m (kN)	H_m/H_y	δ_m (mm)	$\mu_m = \delta_m/\delta_{yE}$
t10-C	繰り返し載荷	0.147	5.07	5.75	1.49	11.8	2.34
t15-C		0.099	5.62	8.76	1.45	15.8	2.82
t20-C		0.074	5.67	12.43	1.50	20.5	3.61
t22-C		0.068	5.74	13.96	1.52	23.2	4.04
t25-C		0.060	5.87	15.72	1.50	23.5	4.01
t15-R	応答変位載荷	0.099	5.62	9.20	1.52	17.4	3.09
t25-R		0.060	5.87	15.09	1.44	15.9	2.72
t10-D	正弦波加振	0.147	5.07	5.91	1.53	12.7	2.50
t15-D		0.099	5.62	9.11	1.50	14.9	2.66
t20-D		0.074	5.67	11.71	1.42	15.2	2.68
t22-D		0.068	5.74	12.70	1.39	14.6	2.54
t25-D		0.060	5.87	14.26	1.36	14.5	2.47

δ_{yE} : 実験での降伏変位, H_m : 最大水平荷重, δ_m : 最大水平荷重時の水平変位

3.4 最大耐荷力および塑性率

鋼製橋脚の耐震性、特に耐荷力と変形性能は、一般に静的繰り返し載荷実験から得られる最大耐荷力と塑性率により評価されている。また、鋼製橋脚の設計法の一つである動的応答解析に用いられる復元力モデル¹⁾は、この最大耐荷力と塑性率をもとに設定される場合が多い。本節では、最大耐荷力と塑性率におよぼす載荷方法の影響を検討する。なお、塑性率の考え方は種々提案されているが、ここでは、降伏変位 δ_{yE} に対する最大荷重時の変位 δ_m の比と定義することにする。

表-4に、各載荷実験から得られた降伏変位 δ_{yE} 、最大耐荷力(以下、最大荷重) H_m 、最大荷重時の変位 δ_m 、塑性率 μ_m 等を一覧にして整理している。また図-8および図-9には、実験から得られた最大荷重 H_m/H_y および塑性率 μ_m を径厚比パラメータ R_r に対し整理して示している。ただし、最大荷重 H_m は降伏荷重 H_y で無次元している。

図-8より、加振実験から得られた最大荷重 H_m/H_y は、 $R_r \geq 0.1$ において繰り返し載荷実験の結果とほぼ一致しているが、 $R_r < 0.1$ の領域では繰り返し載荷実験の結果に比較して小さな値を示していることがわかる。これは、図-9において加振実験の塑性率 μ_m が $R_r < 0.1$ の領域で繰り返し載荷実験の結果に比較して大きく減少していることと対応している。また、加振実験における塑性率は、 R_r に依存せずほ

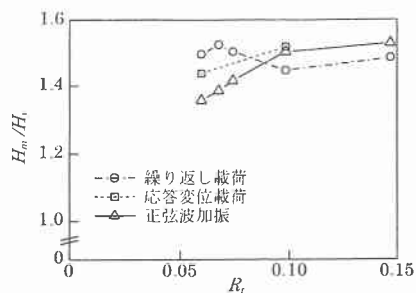


図-8 最大荷重におよぼす載荷方法の影響

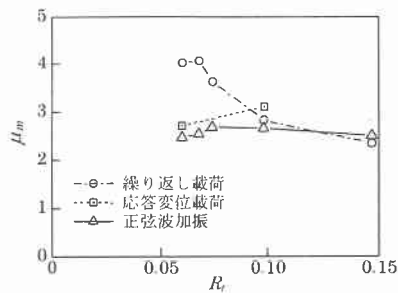


図-9 塑性率におよぼす載荷方法の影響

ば $\mu_m=2.5$ の一定値を示していることが注目される。一方、応答変位載荷実験における最大荷重 H_m/H_s と塑性率 μ_m は、どちらも加振実験の結果とほぼ一致しており、同じ静的載荷である繰り返し載荷実験とは傾向が異なっている。この原因の一つとして負荷履歴の影響が考えられる。つまり、加振実験と応答変位載荷実験では比較的小さな変位振幅が数多く繰り返されるため、耐力力の劣化が繰り返し載荷実験に比較して早く開始すると考えられる。以上の結果は、継続時間が長く繰り返し回数が多い地震の場合には、必ずしも静的繰り返し載荷実験の結果から鋼管橋脚の耐力力とじん性を評価できないことを示唆している。

4. まとめ

本研究では、先に行われた鋼管橋脚模型を用いた静的繰り返し載荷実験と基部加振実験の結果をもとに、鋼管橋脚の耐力力と変形性能におよぼす載荷方法の影響を検討した。また、この加振実験から得られた応答変位波形を用いた静的繰り返し載荷実験を行ない、これらの実験から得られる履歴曲線、包絡線および局部座屈形状等を比較することにより、これらの実験法の工学的な等価性について検討を行なった。本実験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) 正弦波基部加振の場合には、繰り返し載荷実験で現れるような全周に渡る象の脚型の局部座屈は見られず、加振方向の一方方向にのみ局部座屈部が発生する。
- 2) 加振実験から得られる最大耐力力と塑性率は、径厚比パラメータが $R_t \geq 0.1$ において繰り返し載荷実験の結果とほぼ一致するが、 $R_t < 0.1$ では繰り返し載荷実験の結果に比較して小さな値を示す。
- 3) 変位履歴が同一の場合は、静的載荷実験から得られる最大耐力力と塑性率は加振実験の結果とほぼ一致する。
- 4) 以上の結果から、地震荷重下における鋼管橋脚の耐力力とじん性は、漸増変位繰り返し載荷実験のみでは適切な評価を与えない可能性があることが明らかになった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 佐藤昌志, 三田村 浩, 川浪幸人, 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動的応答性状, 北海道支部論文報告集, 第55号(A), pp.12-17, 1999.