

I -20

鋼管橋脚模型の弾塑性動的応答性状に関する実験的研究

開発土木研究所	正 員	谷 本 俊 充
開発土木研究所	正 員	佐 藤 昌 志
(株)日本製鋼所	正 員	小 枝 日出男
(株)日本製鋼所	正 員	別 所 俊 彦
室蘭工業大学	正 員	岸 徳 光

1. はじめに

平成 7 年 1 月 17 日に発生した阪神淡路大地震では道路橋においても多くの被害を受けた。特に鋼製橋脚に関しては、我国において初めて大きな被害を受け、鋼橋に携わっている研究者、施工業者に大きなショックを与えた。その被害は補剛板や鋼管に発生した局部座屈や変形、割れ等である。当面の措置として、建設省では鋼製橋脚に関しては中詰めコンクリートを充填することにより靱性を確保することとした。また、鉄筋コンクリート橋脚では既に考慮されている地震時保有水平耐力照査も行うこととしている。このように、鋼製橋脚においても材料非線形を考慮した靱性率の評価が義務づけられていることより、この種の合理的評価手法を確立すべく鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究が盛んに行われている。

実験研究に関しては、大型橋脚模型を用いた水平単調載荷実験や漸増繰返し載荷実験が行われており、復元力特性や塑性率を評価している。一方、動的実験に関しては振動台を用いる方法、あるいは実験装置と計算機をオンラインで結び相似則を考慮して小型実験から実構造物の応答特性を評価するハイブリット地震応答実験法がある。いずれも高価な実験装置と高度な制御技術等が要求されることにより、未だ限られた機関でのみ実施可能な実験となっている。しかしながら、より耐震性に優れた鋼製橋脚の設計方法を確立するためには崩壊過程までを考慮した動的実験が必須であるものと判断される。

このような観点から、本論文ではアクチュエーターとリニアウェイを用いた簡易振動台を試作し、円形断面橋脚の合理的な耐震設計手法を確立するために、特に動的応答特性に関する基礎データを蓄積することを目的として、鋼管試験体を用いた振動実験を行った。本研究では、各加振実験において加速度、周波数を一定とする定常加振を行い、加速度を段階的に増加させて局部座屈が発生し崩壊に至るまで繰返し実験を行っている。コンクリート充填鋼管に関しても実験を行い、充填率による動的応答性状の違いやその効果について考察している。

2. 実験の概要

2.1. 試験体

本研究では、鋼管模型の動的な基本性状やコンクリート充填による効果を検討することを主な目的としていることより、鋼管の形状寸法を固定し、コンクリートの充填高さのみを変化させて実験を行った。試験体の形状を図-1に、また寸法および試験体パラメータを表-1に一覧にして示している。表-1における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R_t は次式によって定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L'}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}} \quad (1), \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (2)$$

ここで R : 平均半径, L' : 部材長, t : 板厚, r : 断面 2 次半径, E : 弾性係数, ν : ポアソン比, σ_{ys} : 降伏応力である。

試験体の鋼管部は、厚さ 5.7 mm の圧力配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3454 STPG370 90A 熱間仕上継目無鋼

Experimental Study on Elastic-Plastic Dynamic Behavior of Steel-Pipe Pier Models
by Toshimitsu TANIMOTO, Masashi SATO, Hideo KOEDA, Toshihiko BESSYO, and Norimitsu KISHI

表-1 試験体寸法および試験体パラメータ

試験体 No.	荷重点高さ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	コンクリート高さ		半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比		径厚比	
			L_c (mm)	L_c/L' (mm)			L'/R	$\bar{\lambda}$	R/t	R_t
t15-N8-f0-d1	631.5	500	0	0.00	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f0-d2										
t15-N8-f0-d3										
t15-N8-f1-d	631.5	500	125	0.25	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f2-d	631.5	500	285	0.57	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f4-d	631.5	500	500	1.00	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086

管)を所定の長さに切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。なお、製作精度を保つために、試験体は2本の鋼管を突合せ溶接して所定の長さに行っている。また基部は剛体変形をできるだけ防ぐため凸状の台座に鋼管を差し込み、かつ外側に9 mmの鋼製リングをはめ込み溶接固定している(図-1参照)。試験体の上下端部には試験体を振動台に固定するための台座や橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊を固定するための幅300 mm板厚25 mmの正方形板を周溶接により取付けている。コンクリートは試験体上板の中央に開けられた穴から所定の高さまで中詰めした。コンクリートの充填高さ L_c は鋼管の高さに対する比 L_c/L' で $L_c/L' = 0.0, 0.25, 0.57, 1.0$ の4種類とした。

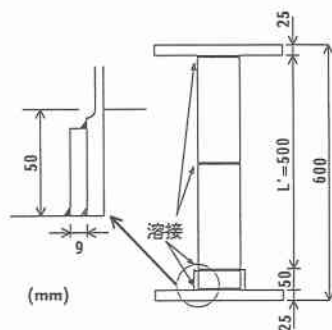


図-1 試験体の形状および寸法

2.2. 材料試験

使用鋼管の機械的性質を求めるために、鋼管から JIS 6 号試験片を製作して引張試験を行った。結果は降伏応力： $\sigma_{ys} = 336 \text{ MPa}$ ，公称引張強さ： $\sigma_u = 452 \text{ MPa}$ ，弾性係数： $E = 206 \text{ GPa}$ ，ポアソン比： $\nu = 0.3$ である。また充填コンクリートは設計規準強度を $f'_{ck} = 17.7 \text{ MPa}$ とし配合設計を行った。実験時の材料定数はそれぞれ、圧縮

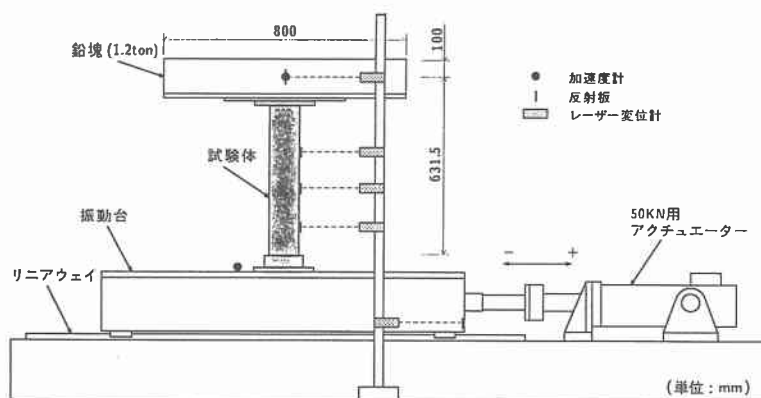


図-2 実験装置の概要

強度: $f'_c = 19.2 \text{ MPa}$, 弾性係数: $E_c = 16.7 \text{ GPa}$, ポアソン比: $\nu_c = 0.21$ である.

2.3. 実験装置および実験方法

図-2に簡易振動台を用いた実験装置の概要を示す。簡易振動台は2本のリニアウエイ上に設置している。その振動台はボールジョイントを介して最大荷重 50 kN、油圧吐出量 31.7 l/min のアクチュエーターに接続されている。本アクチュエーターは 0.5 Hz 以下に対して 50 mm、1 Hz で 40 mm、15 Hz で 2 mm の加振周波数に対して多折線状に変化するストローク能力を有している。試験体上部には橋梁上部工の質量を模

擬した全質量 1.2 ton の鉛塊 (800 × 800 × 185 mm) が設置されている。実験における測定は振動台および鉛塊の高さ方向重心位置の加速度、振動台、試験体、鉛塊各点の変位および試験体各点の歪波形である。加速度は容量 2 G の歪ゲージ型加速度計を、変位は設置位置に応じてストローク 80 mm, 200 mm のレーザ変位計を用いて測定している。出力波形は全

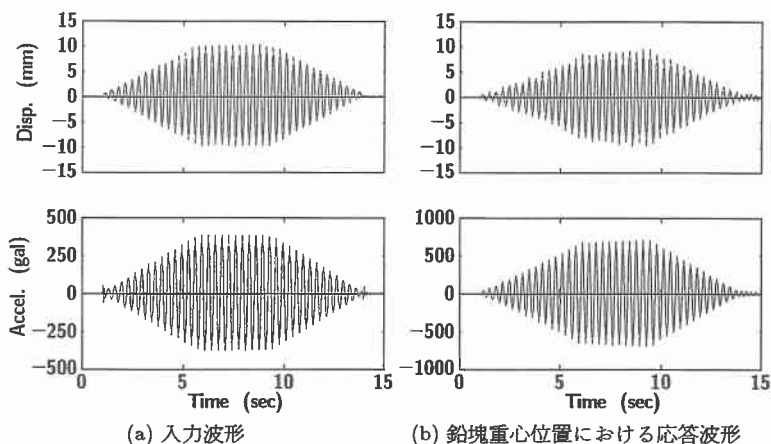


図-3 応答波形の一例 ($f_2-d, f_i=3\text{Hz}$, $\alpha_i = 375 \text{ gal}$)

てアナログ式データレコーダに一括記録の後、A/D 変換を行って整理している。実験は次の 2 種類について行った。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、対数減衰率を求める実験。2) 弾性状態から弾塑性状態までの鋼管柱の動的挙動を検討するために入力加速度を 3 ～ 4 段階設定して行う振動実験である。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振動状態に達するまで数 sec 間の時間を要するため、加振時間を統一化するために加振開始から 8 sec 経過後にアクチュエーターをシャットダウンさせることにした。設定加速度に関しては鉛塊設置時の鉛塊重心位置に作用する降伏荷重を弾性梁理論より $H_y = 5.26 \text{ kN}$ と求め、この値を参考にして 125 gal を加振加速度の初期値および増分加速度とした。実験は t15-N8-f0-d1 を除き、試験体が崩壊するまで入力加速度を増加させることとした。崩壊に至らない場合は崩壊に至るまで同一の加速度振幅で加振を繰り返すこととした。f0 の最低次固有振動数が 4.1 ～ 4.2 Hz 前後であることが明らかになっていることより、f0 の試験体に関しては加振周波数を 2.5 Hz, 3 Hz, 5 Hz, に設定した。また f1, f2, f4, に関しては試験体数が各一体であることより 3 Hz に固定して実験を行った。

3. 実験結果

3.1. 最低次弾性固有振動数

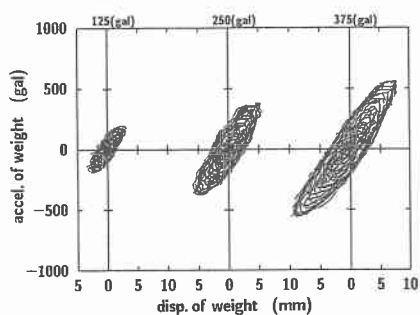
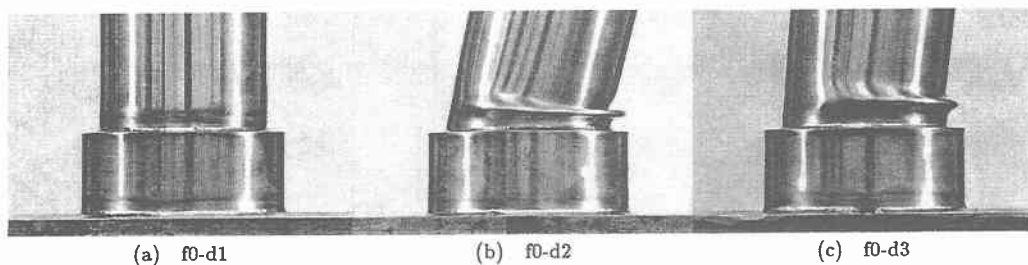
表-2 に実験から得られた最低次弾性固有振動数および対数減衰率を示している。表より、f0 の場合は 4.1 ～ 4.2 Hz 程度、また減衰定数は大略 2.2 ～ 2.7 % となっている。一方、コンクリート充填の場合には充填高さの増大とともに固有振動数、減衰定数ともに増大の傾向を示している。f4 の場合 (コンクリート充填率 100 %) には固有振動数が 5.6 Hz で減衰定数は 14 % 程度となっている。

3.2. 加振実験結果

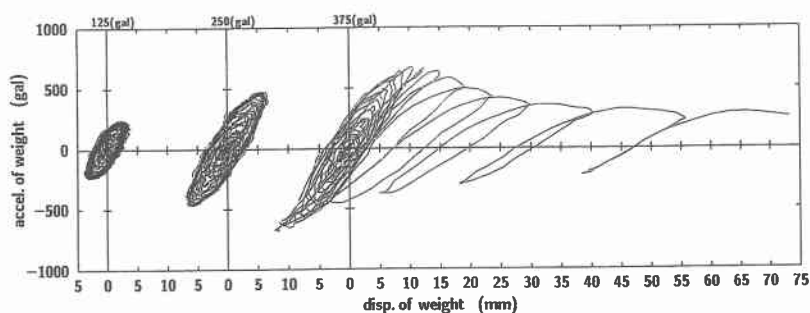
(1) 入力波形と応答波形

図-3 に入力波形と応答波形の 1 例として f2-d 試験体を対象として、周波数 $f_i = 3 \text{ Hz}$, 加速度 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 加振時の振動台および鉛塊重心点で測定された変位、加速度波形を示している。(a) 図より入力波形は加振開始後ほぼ線形に増幅して所定の振幅となり、11 波ほど定常的に振動の後シャットダウンにより、ほぼ線形的に減少しやがて静止している。(b) 図は鉛塊重心位置の応答波形である。弾塑性域に入っていることより変位、加速度応答とも定常加振状態に至っていないようである。応答倍率は変位、加速度がそれぞれ 0.94, 1.87 倍になっている。

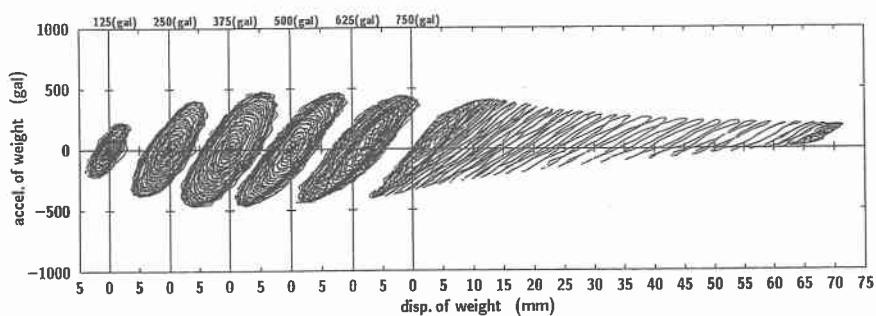
図-4, 5 には実験終了後の鋼管基部の局部座屈発生状況と、実験終了までの各加振時における鉛塊重心位



(d) f0-d1, $f_i = 2.5 \text{ Hz}$

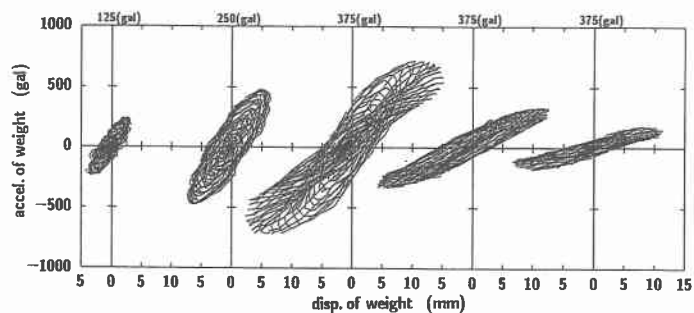
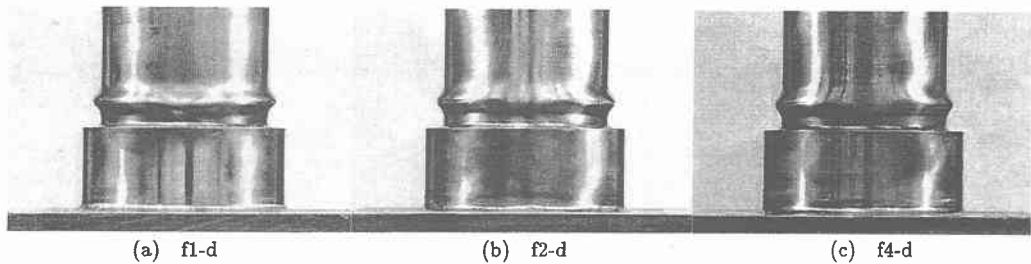


(e) f0-d2, $f_i = 3.0 \text{ Hz}$

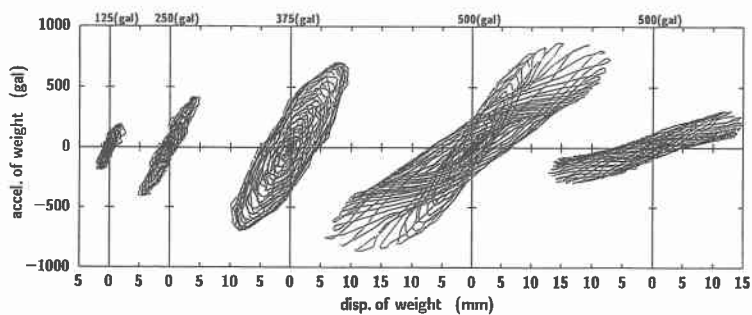


(f) f0-d3, $f_i = 5.0 \text{ Hz}$

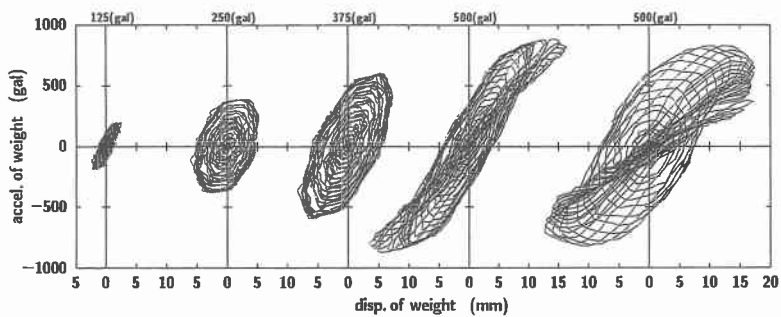
図-4 f0の実験終了後の基部変形状態と鉛塊の加速度-変位のヒステリシスループ



(d) f1-d, $f_i = 3.0 \text{ Hz}$



(e) f2-d, $f_i = 3.0 \text{ Hz}$



(f) f4-d, $f_i = 3.0 \text{ Hz}$

図-5 f1, f2, f4 の実験終了後の基部変形状態と鉛塊の加速度-変位のヒステリシスループ

表－２ 固有振動数，減衰率，入力加速度および破壊形式の一覧

試験体名	最低次 固有振動数 (Hz)	対数 減衰率 (%)	加振 周波数 (gal)	入力加速度 (Hz)	破壊形式
t15-N8-f0-d1	4.23	2.2	2.5	125,250,375	基部に残留歪発生
t15-N8-f0-d2	4.08	2.7	3.0	125,250,375	ジャッキ側に傾斜，転倒 (ジャッキ側のみ EFB)
t15-N8-f0-d3	4.09	2.8	5.0	125,250,375,500,625,750	ジャッキ側に傾斜 (ジャッキ側のみ EFB あり)
t15-N8-f1-d	4.38	4.7	3.0	125,250,375,375,375	全周方向にE.F.B. 発生 最終的には基部で亀裂破断
t15-N8-f2-d	4.76	8.7	3.0	125,250,375,500,500	
t15-N8-f4-d	5.56	13.6	3.0	125,250,375,500,500	

EFB= Elephant Foot Bulge

置の応答加速度－変位に関するヒステリシスループを示している．各ループには加振開始時から静止状態に至るまでが考慮されている．図－４，５はそれぞれコンクリート充填無し鋼管（f0-d），コンクリート充填鋼管（f1, 2, 4-d）に関する結果である．図－４より，加振周波数 $f_i = 2.5$ Hz の場合には基部が降伏した時点で終了した．ヒステリシスループには加速度の増幅以外顕著な変化は見られない．また，目視による損傷は確認できない．一方， $f_i = 3$ Hz の場合には $\alpha_i = 375$ gal において加速度振幅の増幅とともに基部に局部座屈が発生し，アクチュエーター側に倒れて終了した．ヒステリシスループ図より正負交番加振に関わらず鉛塊の振動中心がアクチュエーター側に移動しながら，振動している状態が示されている．実験終了後の写真より，基部には静的繰返し載荷で現れるような全周に渡る elephant foot bulge は見られず，アクチュエーター側の局部座屈部が潰れ，鋼管は“く”の字に変形して崩壊している． $f_i = 5$ Hz の場合には， $\alpha_i = 625$ gal で前述と同様に振動中心がアクチュエーター側に移動している．また， $\alpha_i = 375$ gal 以降 750 gal までは入力加速度振幅が増大しているのに関わらず鉛塊の応答加速度は増幅していないことより，鋼管は塑性化が進行しているものと考えられる． $\alpha_i = 750$ gal では $f_i = 3$ Hz， $\alpha_i = 375$ gal の場合と同様の挙動を呈している．実験終了後の基部の変形状態も同様である．

図－５のコンクリート充填鋼管に関する結果は全て加振周波数が $f_i = 3$ Hz の場合である．図より，f1, f2, f4-d は，それぞれ入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal, 500 gal, 500 gal において復元力剛性が加振中に変化していることが分かる．いずれもこの時点で基部に局部座屈が発生したものと考えられる．その後，f1, f2 とも同一の加速度振幅で加振されているものの応答加速度振幅，変位振幅とも減少していることが分かる．実験終了後の基部変形状態は静的繰返し載荷時と同様に全周に渡って elephant foot bulge 型の座屈が発生している．また，この部分の加振方向両面に亀裂が発生している．軟化後の小さな応答は，加振エネルギーがこの亀裂によって吸収され，上方に伝達されないためと判断される．いわゆる，免震装置的な働きをしているものと考えられる．一方，f4-d の場合には $\alpha_i = 500$ gal の第１回目，第２回目加振時ともに軟化挙動が示され，軟化が徐々に進行していることをうかがわせる．実験終了時には f1, f2-d と同様局部座屈発生位置に亀裂が発生していることを確認している．コンクリート充填率による耐震性を検討すると f4-d の場合には最終加振状態においてもヒステリシスループ面積が大きく未だ，構造全体でエネルギーを吸収する能力を有しているようであることより，本実験の範囲ではコンクリート充填率の大きい鋼管ほど耐震性に優れているものと判断される．また，コンクリート充填無しの場合には，“く”の字に変形して崩壊しているが，コンクリート充填の場合には充填率が 25 % 程度の f1-d においても倒壊せず，自立している．これより，コンクリート充填鋼管は充填無しに比較して耐震安定性に優れているものと判断される．