

正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状

岸 徳光^{*}, 佐藤昌志^{**}, 小枝日出夫^{***}, 小室雅人^{****}, 小野信市^{*****}

^{*} 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

^{**} 工博 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062-8062 札幌市豊平区平岸1-3)

^{***} (株)日本製鋼所主任研究員 室蘭研究所 (〒051-8505 室蘭市茶津町 4 番地)

^{****} 工修 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

^{*****} 工博 (株)日本製鋼所主幹研究員 室蘭研究所 (〒051-8505 室蘭市茶津町 4 番地)

本研究では、コンクリートを充填した鋼管橋脚の合理的な耐震設計手法確立のために必要な基礎データを得ることを目的として、半径 48 mm、板厚 1.5 mm、鋼管高さ 50 cm の小型鋼管柱模型を用いた振動実験を行った。振動実験は、試験体上部に橋梁上部工の質量を模擬した 1.2 ton の鉛塊を設置し、試験体下部を加振する方法で行った。実験結果より、充填コンクリートの有無や充填率が鋼管橋脚の耐震性に与える影響について検討した。得られた結果をまとめると、1) コンクリート充填率が大きいほど、固有振動数および減衰定数ともに増加する傾向にある。2) コンクリート充填無し鋼管柱では、基部近傍の片面のみに局部座屈が発生し倒壊する。3) コンクリート充填鋼管柱では、基部近傍に全周にわたる象の脚型の局部座屈が発生するが、倒壊には至らず自立している。これより、コンクリートを充填することによって鋼製橋脚の耐震性が向上することが確認された。

Key Word : Steel-pipe pier, Filled concrete, Shaking test, Local buckling

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、平成 8 年に改訂された「道路橋示方書・同解説 耐震設計編」¹⁾においては、鉄筋コンクリート橋脚と同様、コンクリート充填橋脚についても地震時保有水平耐力照査を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耐力や塑性率の評価が義務づけられていることより、これらの合理的評価手法の確立を目的とした鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的・解析的研究^{2)~5)}が盛んに行われている。

実験的研究に関しては、大型あるいは小型橋脚模型を用いた水平単調荷重実験や漸増繰返し載荷実験等の準静的実験が行われており、耐荷力、復元力特性および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⁶⁾、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⁷⁾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エ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の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、小型鋼管柱模型を用いた振動実験を行った。本研究では、充填コンクリートの有無や充填率が鋼管柱模型の耐震性に与える影響を検討するため、コンクリート充填無し鋼管柱模型 3 体とコンクリート充填率を変化させた鋼管柱模型 3 体の計 6 体を用いて、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。なお、加振方法は加速度、周波数を一定とする定常加振とし、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。

表-1 形状寸法および試験体パラメータ

試験体名	荷重作用点高さ* 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 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
			L_c (mm)	L_c/L' (mm)				
f0-d1 f0-d2 f0-d3	631.5	500	0	0.00	48.0	1.5	0.479	0.086
f1-d			125	0.25				
f2-d			285	0.57				
f4-d			500	1.00				

*荷重作用点高さとは、試験体基部から鉛塊重心位置高さまでを意味する。

2. 実験の概要

2.1 試験体

本研究では、鋼管柱模型の動的応答特性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、鋼管柱の形状寸法を変化させず、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。図-1に試験体の形状を、また表-1に形状寸法および試験体パラメータを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。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (2)$$

ここで、 L ：荷重作用点高さ（試験体基部から鉛塊重心位置までの高さ）、 R ：平均半径、 t ：板厚、 r ：断面二次半径、 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としている。板厚および径の加工公差は ± 0.05 mm である。また基部は剛体変形をできるだけ防ぐため、図-1に示すように凸状の台座に鋼管を差し込み、さらに外側に板厚 9 mm の鋼製リングをはめ込み溶接して固定している。試験体の上部部には橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊を固定するための幅 200 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 は鋼管高さ L' 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。

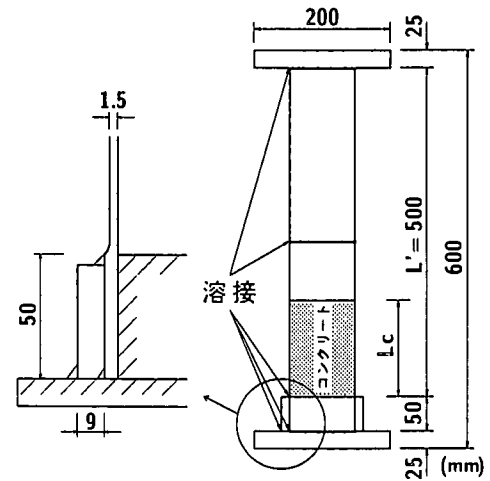


図-1 試験体の形状および寸法

2.2 材料試験

試験体の機械的性質を調べるために、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 $\sigma_{ys} = 336$ MPa、引張強さ $\sigma_u = 452$ MPa、弾性係数 $E_s = 206$ GPa、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ である。また充填コンクリートは設計基準強度を $f'_{ck} = 17.7$ MPa とし配合設計を行った。実験時の材料定数はそれぞれ、圧縮強度 $f'_c = 19.2$ MPa、弾性係数 $E_c = 16.7$ 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本のリニアウェ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、油圧源吐出量 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加振振幅の能力が 0.5 Hz 以下に対して 50 mm、1 Hz で 40 mm、15 Hz で 2 mm と折線状に変化するものである。試験体上部には橋

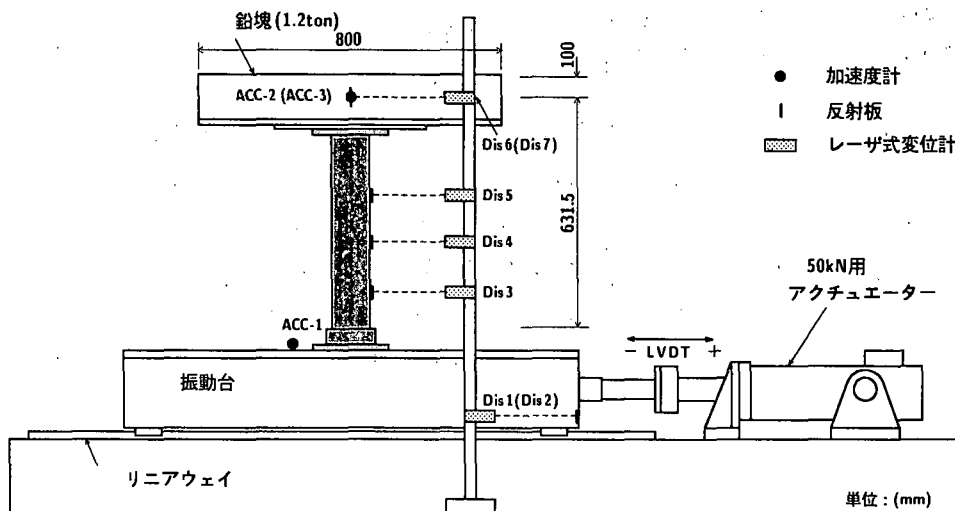


図-2 実験装置の概要

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。本実験では、鋼管柱模型の動的挙動特性を把握するために、歪ゲージ式加速度計 (容量 2G) を振動台および鉛塊の高さ方向重心位置の 3 カ所、レーザー式変位計 (ストローク 80 mm または 200 mm) を振動台、試験体、鉛塊の高さ方向重心位置の計 7 カ所に設置した。計測は全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、減衰定数を求める実験、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とした。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 H_y 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。実験は加振周波数 $f_i = 2.5 \text{ Hz}$ のコンクリート充填無し試験体 (f0-d1) を除き、試験体が崩壊あるいは基部近傍に局部座屈が発生するまで入力加速度を増加し、局部座屈発生後は同一入力加速度で加振を行うこととした。なお、アクチュエーターの限界加振時においても、崩壊に至らない場合に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。本実験では、コンクリート充填無し試験体 (f0-d) 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 試験体に関しては加振周波数を $f_i = 2.5 \text{ Hz}$, 3 Hz, 5 Hz に設定した。また、コ

ンクリート充填試験体 (f1, f2, f4-d) に関しては試験体数が各一体であることより $f_i = 3 \text{ Hz}$ に固定して実験を行った。

3. 実験結果および考察

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減衰定数を示す。表より、コンクリート充填無し試験体 (f0-d) の場合は、最低時固有振動数が 4.1 ~ 4.2 Hz 程度、また減衰定数は大略 2.2 ~ 2.8 % となっている。一方、コンクリート充填試験体 (f1, f2, f4-d) 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傾向を示している。コンクリート充填率 100 % の試験体 (f4-d) の場合には固有振動数が 5.6 Hz、減衰定数は 14 % 程度となっている。

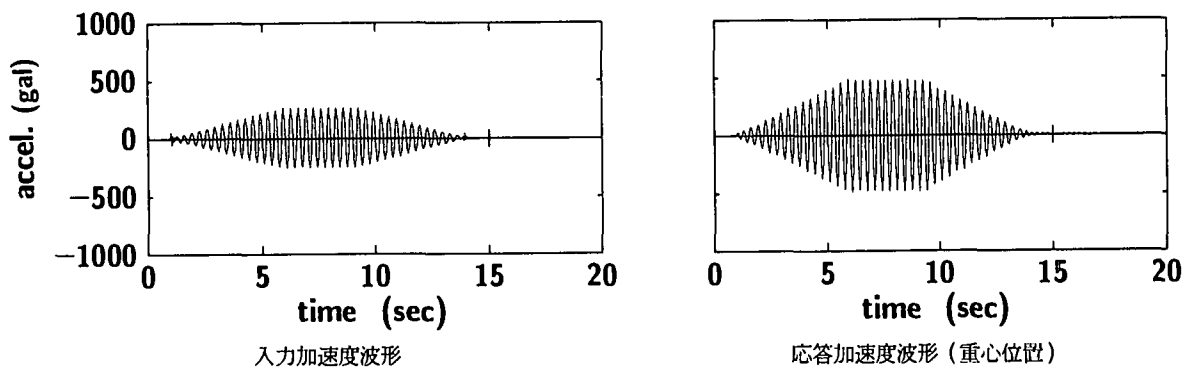
3.2 加振実験結果

図-3 に入力加速度波形と応答加速度波形の一例としてコンクリート充填率 25 % の試験体 (f1-d) における入力加速度 $\alpha_i = 250 \text{ gal}$ および $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 加振時の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。図 (a) より、入力加速度 $\alpha_i = 250 \text{ gal}$ の場合には、入力加速度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。応答加速度波形においても入力加速度波形と同様な分布となっていることがわかる。なお、この場合の応答加速度倍率は約 1.93 である。一方、図 (b) より、入力加速度 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ の場合には、入力加速度波形は設定入力加速度に達した後、定常振動状態となっているが、応答加速度波形は定

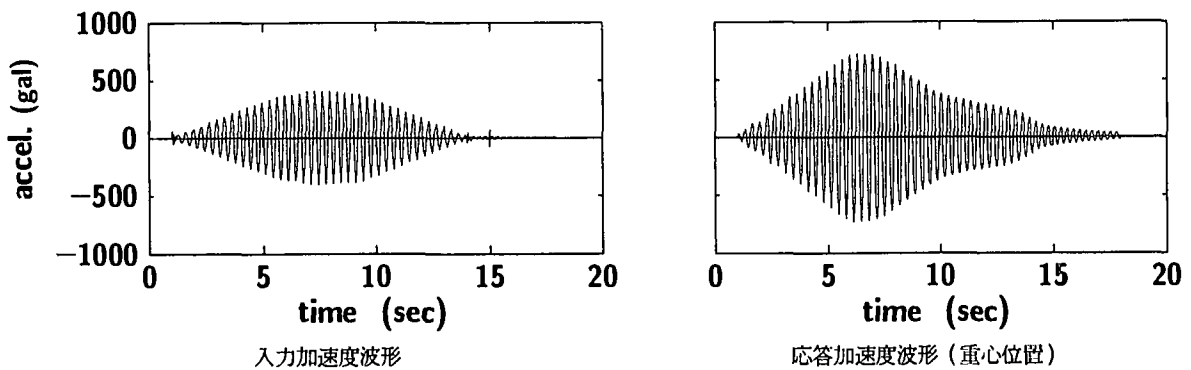
表-2 固有振動数, 減衰定数, 入力加速度および破壊形式の一覧

試験体名	最低次固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	加振周波数 (Hz)	入力加速度 (gal)	破壊形式
f0-d1	4.08	2.7	2.5	125,250,375	基部に残留歪発生
f0-d2	4.23	2.2	3.0	125,250,375	アクチュエーター側のみ EFB が発生
f0-d3	4.09	2.8	5.0	125,250,375,500,625,750	アクチュエーター側に傾斜, 転倒
f1-d	4.38	4.7	3.0	125,250,375,375,375	全周方向に EFB が発生 基部近傍の加振方向両面で亀裂破断が発生 転倒せず自立している
f2-d	4.76	8.7		125,250,375,500,500	
f4-d	5.56	13.6		125,250,375,500,500	

EFB : Elephant Foot Bulge



(a) 入力加速度 $\alpha_i = 250$ gal の場合



(b) 入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal の場合

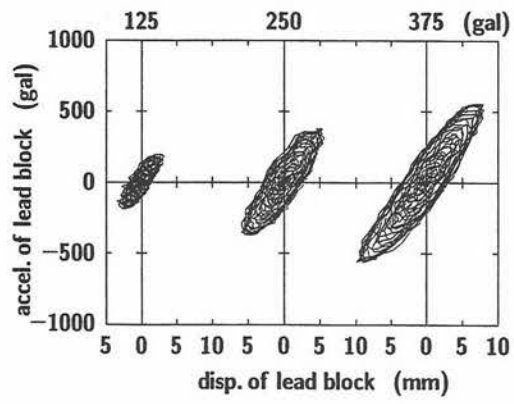
図-3 応答加速度波形の一例 (f1-d, $f_i = 3$ Hz)

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, 後述のように基部近傍に局部座屈が発生したことにより, 加振エネルギーが吸収され試験体上方に伝達されないためと考えられる。

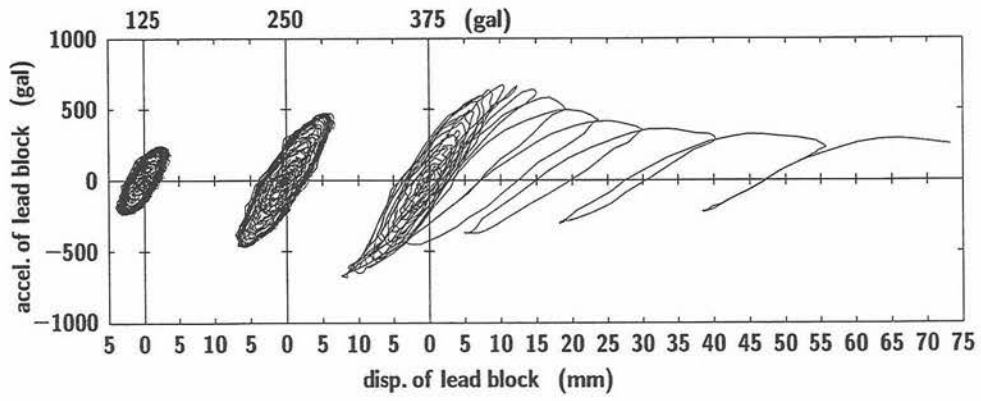
図-4, 5には実験終了までの各加振時における鉛塊重心位置の応答加速度と応答変位に関するヒステリシスループと, 実験終了後の試験体基部における局部座屈発生状況を示している。各ループには加振開始時から静止状態に至るまでが考慮されている。図-4, 5はそれぞ

れコンクリート充填無し試験体 (f0-d), コンクリート充填試験体 (f1, f2, f4-d) に関する結果である。

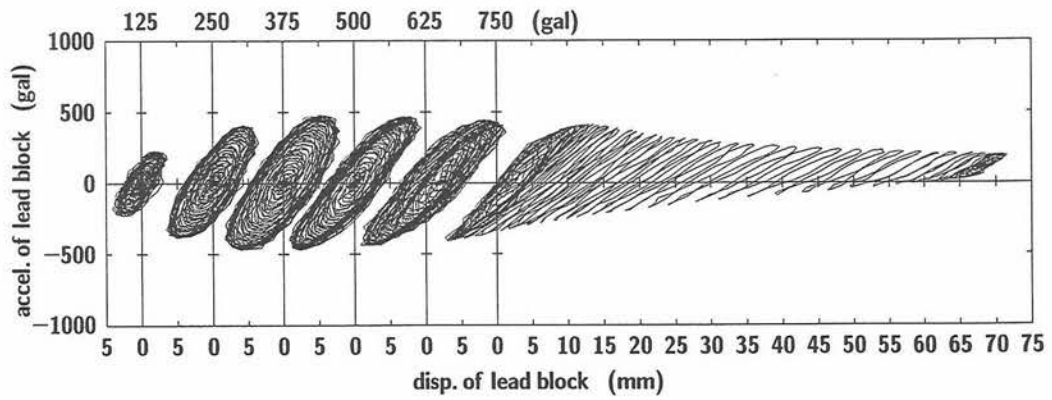
まず, コンクリート充填無し試験体について検討することとする。図-4 (a)より, 基部近傍が降伏した時点で実験を終了した加振周波数 $f_i = 2.5$ Hz の場合 (f0-d1)には, ヒステリシスループには加速度の増幅以外顕著な変化は見られない。また図 (d)より, 実験終了後の試験体基部において目視による損傷は確認できない。一方, 加振周波数 $f_i = 3$ Hz の場合 (f0-d2)には, 入力加速度 $\alpha_i =$



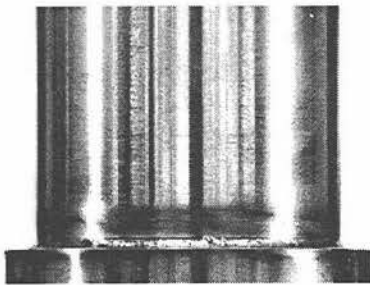
(a) f0-d1, $f_i = 2.5$ Hz



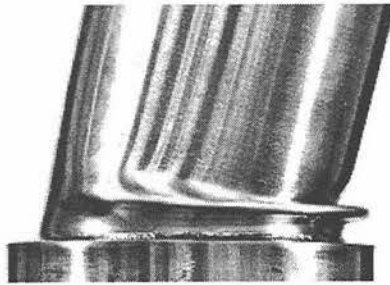
(b) f0-d2, $f_i = 3$ Hz



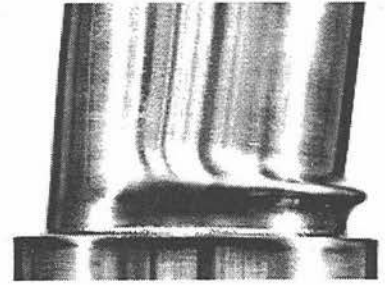
(c) f0-d3, $f_i = 5$ Hz



(d) f0-d1

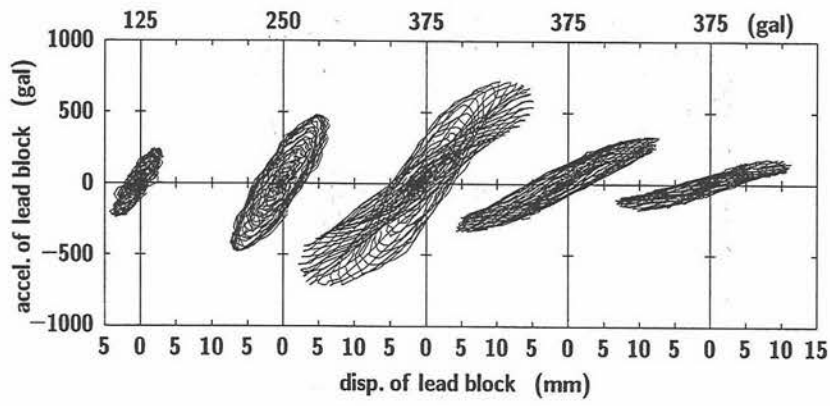


(e) f0-d2

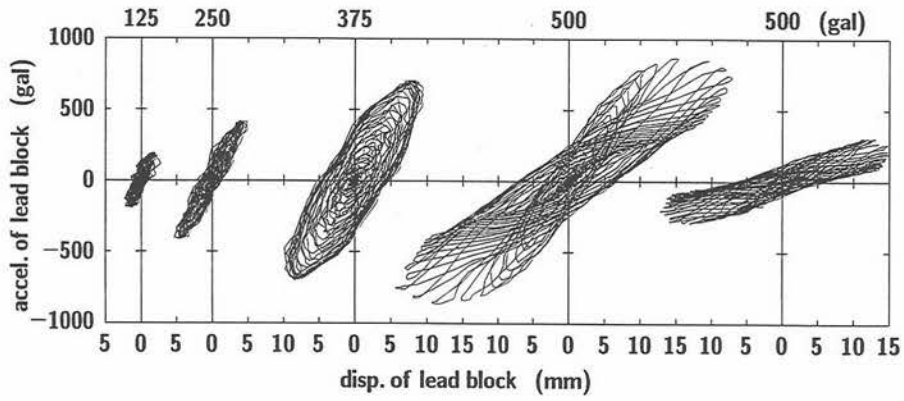


(f) f0-d3

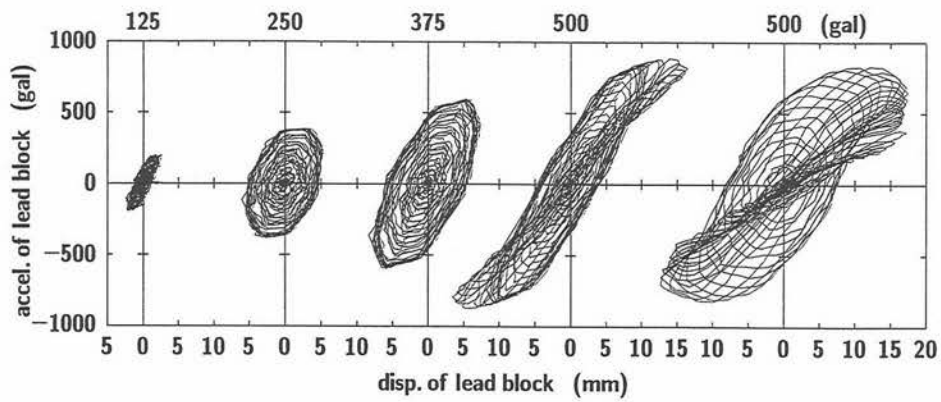
図-4 ヒステリシスループと実験終了後の基部近傍における局部座屈発生状況（コンクリート充填無し）



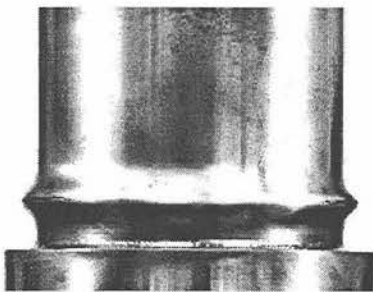
(a) f1-d, $f_i = 3$ Hz



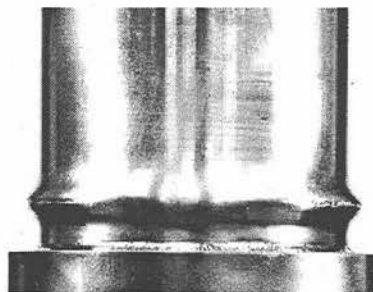
(b) f2-d, $f_i = 3$ Hz



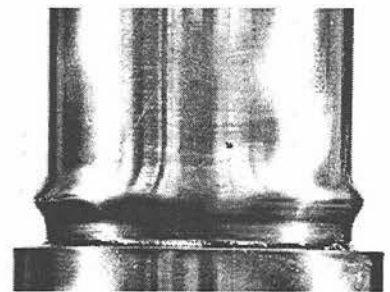
(c) f4-d, $f_i = 3$ Hz



(d) f1-d



(e) f2-d



(f) f4-d

図-5 ヒステリシスループと実験終了後の基部近傍における局部座屈発生状況 (コンクリート充填有り)

375 galにおいて加速度振幅の増幅とともに基部近傍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。図(b)のヒステリシスループには、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。実験終了後の基部近傍の変形状態(図(e)参照)より、基部近傍には静的繰り返し載荷実験で現れるような全周に渡る elephant foot bulge 型の局部座屈は見られず、アクチュエーター側の局部座屈部が潰れ、試験体は“く”の字に変形して崩壊している。

図(c)より、加振周波数 $f_i = 5 \text{ Hz}$ の場合(f0-d3)には、入力加速度 $\alpha_i = 625 \text{ gal}$ において、前述の f0-d2 試験体の $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ の場合と同様に鉛塊の振動中心がアクチュエーター側に移動していることがわかる。なお、この時点での鉛塊重心位置での残留変位は、アクチュエーター側に約 2.7 mm であった。また、 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 以降 750 gal までは入力加速度振幅が増大しているのにも関わらず鉛塊の応答加速度は増幅していないことより、試験体は塑性化が進行しているものと考えられる。最終的には、 $\alpha_i = 750 \text{ gal}$ で $f_i = 3 \text{ Hz}$ 、 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ の場合(f0-d2)と同様、試験体がアクチュエーター側に変形し崩壊している。なお、実験終了後の基部近傍の変形状態も f0-d2 試験体の場合と同様、アクチュエーター側の局部座屈部が潰れている。

図-5はコンクリート充填試験体(f1, f2, f4-d)に対する実験結果を示したものである。これらの試験体は、全て加振周波数が $f_i = 3 \text{ Hz}$ の場合である。図より、f1, f2, f4-d 試験体は、それぞれ入力加速度 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$, 500 gal, 500 gal において復元力特性が加振中に変化していることがわかる。いずれもこの時点で基部近傍に局部座屈が発生したものと考えられる。その後、f1, f2-d 試験体(コンクリート充填率 25%, 57%)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および変位振幅とも減少していることがわかる。図(d), (e)の実験終了後における基部近傍の変形状態より、静的繰り返し載荷実験時と同様に全周に渡って elephant foot bulge 型の局部座屈が確認できる。また、この部分の加振方向両面に亀裂が発生していることがわかる。軟化後の弾性的で小さな応答は、1) この亀裂部で加振エネルギーが吸収され、試験体上方へのエネルギー伝達が減少したこと、2) 亀裂部がヒンジ的な作用をすることにより、試験体上部が剛体運動的な挙動を示すためと考えられる。すなわち、局部座屈とこの亀裂は、いわゆる、免震装置的な働きをしているものと判断される。

一方、図(c)より、コンクリート充填率 100% の試験体(f4-d)の場合には、 $\alpha_i = 500 \text{ gal}$ 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。また、f1, f2-d 試験体の結果から類推すると、局部座屈の亀裂は、 $\alpha_i = 500 \text{ gal}$ の第2回目加振時においてヒステリシスループが楕円状からや

がて吸収エネルギーの小さな扁平状のループとなった時点で発生したものと推察される。勿論、実験終了時には f1, f2-d 試験体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。

以上より、鋼管橋脚の耐震性に及ぼすコンクリート充填率の影響を検討すると、充填率が 100% の f4-d 試験体の場合には最終加振状態においても f1, f2-d 試験体と比較して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ことがわかる。これより、本実験の範囲ではコンクリート充填率の大きい試験体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試験体(f0-d)の場合には、“く”の字に変形して崩壊に至っているのに対し、コンクリート充填試験体(f1, f2, f4-d)の場合には充填率が 25% 程度の f1-d 試験体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柱は充填無し鋼管柱と比較して、より耐震安定性に優れているものと判断される。

4. まとめ

円形鋼管橋脚の合理的な耐震設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、小型鋼管柱模型を用いた振動実験を行った。本研究では、特に円形鋼管柱模型の耐震性に関するコンクリート充填効果について検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、

- 1) コンクリート充填率が大きいほど、固有振動数および減衰定数が大きくなる。
- 2) コンクリート充填無し鋼管柱模型の場合には、加振方向の一方方向のみ elephant foot bulge 型の局部座屈が発生し、最終的には、局部座屈が潰れて鋼管が“く”の字に変形後崩壊する。
- 3) コンクリート充填鋼管柱模型の場合には、基部近傍に全周に渡る elephant foot bulge 型の局部座屈が発生し、加振方向の両面に亀裂が発生するものの鋼管柱模型は崩壊せず自立している。
- 4) また、この局部座屈および亀裂は、加振エネルギーの鋼管柱上方への伝達を減少させ、かつヒンジ的な働きをしており、あたかも免震装置的な作用をする。
- 5) 以上の結果から、コンクリートを充填することにより、鋼製橋脚の耐震性は向上するものと考えられる。

謝辞：本実験を行うにあたり、当時室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻の吉川 卓君(現、オリエンタル建設株式会社)および同大学院在学中の梶山義晴君、市ノ渡将得君に多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表す。

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, 1996.12
- 2) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 竹本潔史: 鋼製橋脚モデルの静的および準静的挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 507 / I-30, 99-108, 1995.1
 - 3) 西川和廣, 山本悟司, 名取 暢, 寺尾圭史, 安波博道, 寺田昌弘: 既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 42A, 975-986, 1996.3
 - 4) 葛 漢彬, 高 聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男: 鋼製パイプ断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No.577/I-41, 181-190, 1997.10
 - 5) 後藤芳顯, 王 慶雲, 高橋宜男, 小畑 誠: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No. 591 / I-43, 189-206, 1998.4
 - 6) 小山田欣裕, 佐藤昌志, 谷本俊充, 岸 徳光: 衝撃的載荷重を受ける円形鋼管橋脚模型の動的実験, 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, 183-188, 1997.5
 - 7) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 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, 179-190, 1995.1
(1998年8月17日受付)

ELASTIC-PLASTIC DYNAMIC BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED STEEL-PIPE PIER MODEL UNDER SINE WAVE SHAKING

Norimitsu KISHI, Masashi SATO, Hideo KOEDA, Masato KOMURO and Shin-ichi ONO

In order to study the dynamic behavior of steel-pipe pier models, shaking test is conducted in which a simple harmonic exciting method is applied. Dimensions of the steel-pipe pier models are: radius: 48 mm, height: 500 mm and thickness: 1.5 mm. A lead block with 1.2 ton mass is set on the top of pier model to mock up the mass of superstructure. In this paper, the effects of filled concrete on strength and ductility of pipe-pier models are investigated. The results obtained from this study are as follows: 1) the pipe piers without filled concrete may be collapsed with generating elephant foot bulge (EFB) buckling mode and forming a big break angle; 2) the concrete filled pipe piers may not collapsed in spite of EFB buckling mode generated near the basement; and 3) then, the strength and ductility of steel-pipe piers can be effectively increased by filling concrete.