

## 衝撃的載荷重を受ける円形鋼管橋脚模型の動的実験

小山田 欣裕\* 佐藤 昌志\*\* 谷本 俊充\*\*\* 岸 徳光\*\*\*\*

\* 工修 北海道管理技術センター 常任参与 (〒060 札幌市北区北 7 条西 2 丁目)

\*\* 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\* 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

\*\*\*\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町 27-1)

鋼管橋脚の耐震性向上に関する基礎資料を得ることを目的として、配管用炭素鋼鋼管柱を用いた静的交番載荷実験および動的特性把握のための振動実験を行った。鋼管橋脚模型は最低次固有振動数を 2 Hz 程度にするために天端に 2 tf の鉛塊を設置している。水平交番載荷実験では  $3\delta_y$  の段階で基部に局部座屈が発生し崩壊に至っている。振動実験結果では基部より 22 cm 上の部分に亀裂が発生し局部座屈によって片振り状態となり崩壊に至っている。

Key Word: Steel-pipe piers, Reverse loading, Vibration test, Local buckling

## 1. はじめに

1995 年 1 月に発生した阪神淡路大地震では、鋼構造物にも多大な被害をもたらした。鋼製橋脚角溶接部の破断に伴う橋脚全体の崩壊や円形橋脚に見られた提灯座屈の現象はこの代表的な一例である。この大地震を契機として、昨年には道路橋示方書の耐震設計編が改訂され、RC 橋脚と同様鋼製橋脚においても靱性能の考え方が導入されている。これと同時に、軸圧縮力と地震力を模擬した水平交番荷重載荷による鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的、数値解析的検討や耐震補強に関する研究が盛んに行われている<sup>1)~7)</sup>。特に水平交番荷重載荷実験では、RC 橋脚の場合と同様橋脚天端部に静的な漸増繰返し荷重を載荷させる方法が一般的である。

本研究では、鋼管橋脚の耐震性向上に関する基礎資料を得ることを目的として、配管用炭素鋼鋼管柱を用いた静的水平交番載荷実験および動的載荷実験を行った。ここでは、阪神淡路大地震において観測された卓越振動数 1 ~ 2 Hz 程度の地震波を模擬した単一波振動入力による挙動実験のための基礎実験として、水平交番載荷実験および簡易振動台を用いた振幅一定とする調和振動入力による加振実験結果について述べることにする。

## 2. 実験概要

## 2.1 鋼管橋脚模型

実験に用いた鋼製橋脚モデルは、JIS 規格の配管用炭素鋼鋼管 (JIS G 3452 SGP150A) を用いた。本鋼管の機械的性質を表-1 に示す。このような鋼管を切断し、旋盤により内外面を切削して 500 mm 長の薄肉鋼管を作製した。これを 4 本突き合わせ溶接し、全長 2000 mm の鋼管橋脚模型を作製している。鋼管橋脚模型天端部には、系の最低次固有振動数を実橋脚と同様 2 Hz 程

度にするために 2 tf の鉛塊を設置している。この時の最低次固有振動数は概算で 1.83 Hz となった。なお、水平交番載荷実験および振動実験はいずれも同様の要領で製作された 3 本の鋼管橋脚模型を用いて行っている。表-2 に供試体の諸量を示している。

## 2.2 実験装置および載荷方法

## (1) 水平交番載荷実験

実験装置の概要を図-1 に示す。水平荷重は圧縮、引張り両用の油圧ジャッキを用いて上載荷重 (重量 2 tf の鉛塊) の高さ方向中心部に載荷している。油圧ジャッキの両端部はピンによって重錘あるいは反力架台と連結されている。実験では水平荷重を交番載荷しているが、初めに引張力を載荷していることによりこれを正載荷とし、圧縮力を負載荷とした。載荷は材料物性値を参考にして、供試体基部の歪が  $1900 \mu$  になった時点で降伏したものと仮定し、正、負載荷時の荷重載荷点に生じる変位を平均し降伏変位  $\delta_y$ 、その時の荷重を降伏荷重  $P_y$  とした。その後、 $\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、… の各変位段階に対して正負 1 回の交番載荷を行った。なお、載荷は荷重が  $P_y$  を下回る程度に減少するまで、あるいは橋脚模型が崩壊に至る

表-1 供試材の機械的性質 (規格値)

| 鋼種       | 外径<br>(mm) | 内径<br>(mm) | 降伏応力<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) |
|----------|------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| SGP 150A | 163.0      | 3.0        | 40.0                           | 45.0                           | 36.0      |

表-2 供試体の諸元

| 鋼管長<br>L(mm) | 半径<br>R(mm) | 板厚<br>t(mm) | 細長比  |           | 径厚比  |       | 軸力<br>p/py |
|--------------|-------------|-------------|------|-----------|------|-------|------------|
|              |             |             | L/R  | $\lambda$ | R/t  | $R_t$ |            |
| 2000         | 78.5        | 3.0         | 26.2 | 0.011     | 26.2 | 0.082 | 0.036      |

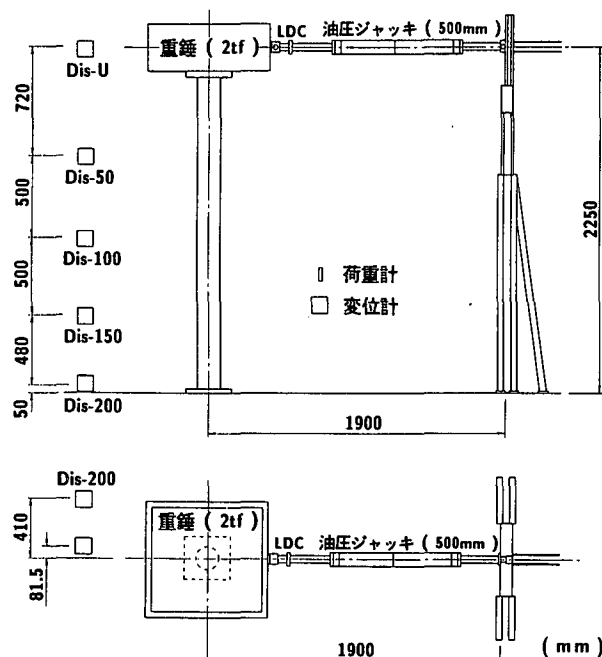


図-1 水平交番載荷実験装置の概要

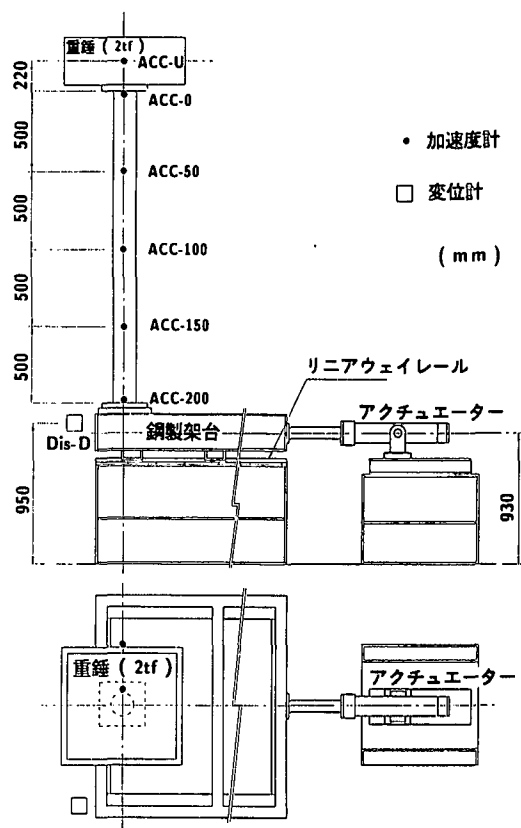


図-2 加振実験の概要

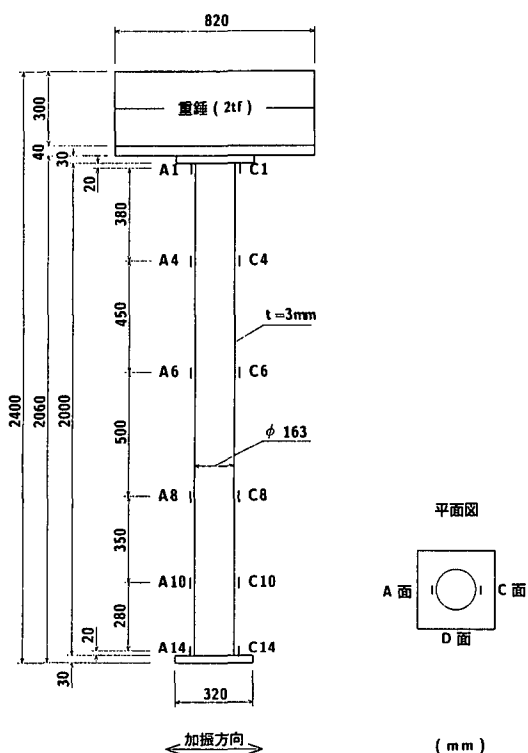


図-3 歪ゲージ貼付位置および測点名

まで行うこととした。本実験の計測項目は、荷重載荷点の変位と荷重、供試体各位置での変位および歪等である。

#### (2) 加振実験の概要

図-2に本実験装置の概要を示す。本実験では鋼管橋脚模型の重量が鉛塊を含め2tf以上であることより、リ

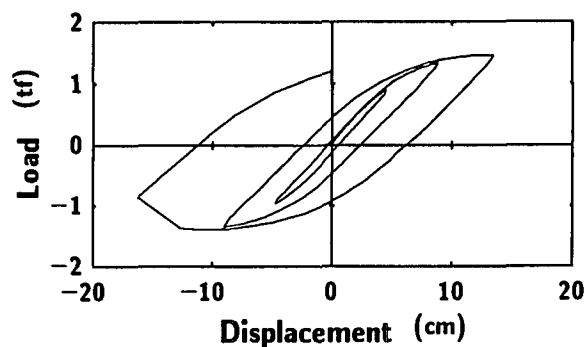


図-4 載荷点における荷重-変位曲線

ニアウェイレールを介した簡易振動テーブルを容量5tfの油圧サーボ型アクチュエーターによって加振することとした。実験は、加振振幅を10mmもしくは20mmとして加振周波数を0.1Hzから0.1Hzきざみに1.7Hzまで増加させた。また、橋脚模型が塑性化した場合でも加振可能な場合には実験を続行した。なお、各周波数に対する加振は、パーソナルコンピュータでモニタリングすることにより定常振動状態であることを確認の後、終了している。本実験の測定項目は、各点の加速度および鋼管各点の歪分布である。なお、加速度は容量2Gの歪ゲージ加速度計を用いて測定を行っている。しかしながら、図-1におけるACC-100、150点の値は設置治具の不備のため測定不可能となっていることより、ここでは重錘(ACC-u)および底部(ACC-200)の値の

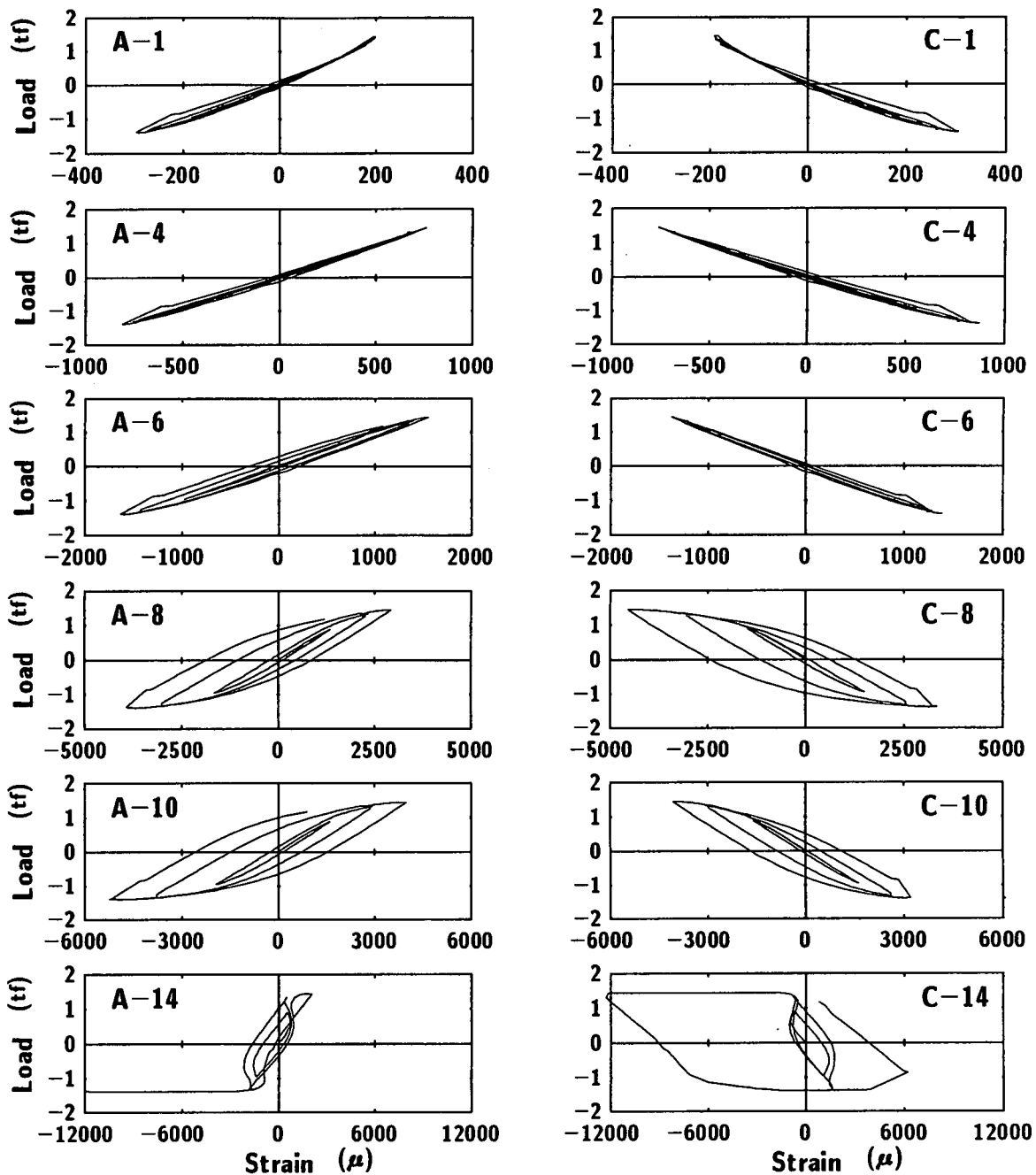


図-5 荷重一軸歪曲線

みを用いることとした。図-3には水平交番載荷および加振実験における歪ゲージ貼付位置および測点名を示している。また各点の変位成分は変位計を用いた測定が困難であることや系が定常振動状態であることより、加速度振幅を換算することにより評価することとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 水平交番載荷実験

図-4に載荷点部における荷重一変位曲線を示している。概算による模型基部外縁降伏時の荷重  $P_y$  および載荷点変位  $\delta_y$  はそれぞれ 1.1 tf, 3.4 cm であるが、実験結果は  $P_y = 0.88$  tf,  $\delta_y = 4.5$  cm となっている。また、

実験は  $3\delta_y$  における負載荷状態で基部から 20 mm 上近傍に局部座屈が発生し、倒壊に至っている。 $3\delta_y$  における正載荷時の最大荷重、最大変位はそれぞれ  $P_{\max} = 1.44$  tf,  $\delta_{\max} = 13.3$  cm であった。なお、終局状態における局部座屈発生近傍部の変形状態は、負載荷状態における圧縮側（図-3，A断面）において最大 4.5 mm 程度外側に变形し、象足状の局部座屈が発生している。一方、引張側（C断面）ではA断面とは逆に鋼管の内側に 1.5 mm 程度変形した状態となり、全体的に非対称なものとなっている。図-5には模型各点の荷重一軸歪曲線を示している。図より、天端からA-6点（基部より 113 cm）近傍までは終局までほぼ弾性状態であることがわかる。

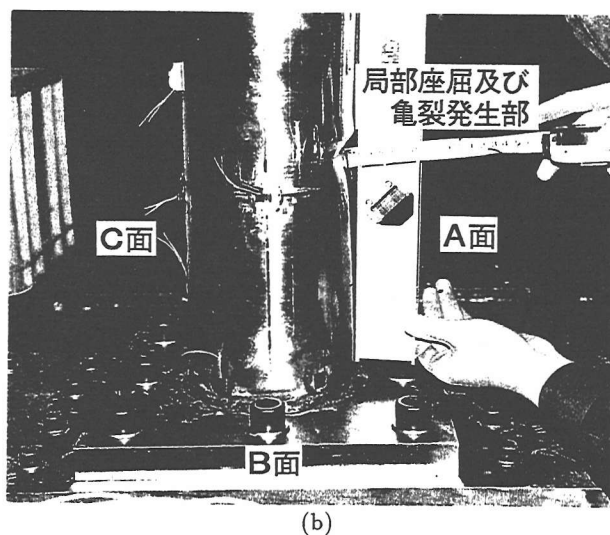
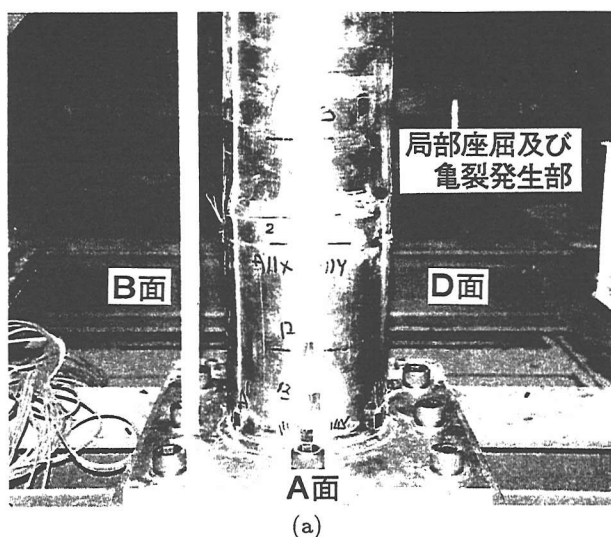


写真-1 加振振幅 20 mm の場合における加振終了後の局部座屈発生部の状況

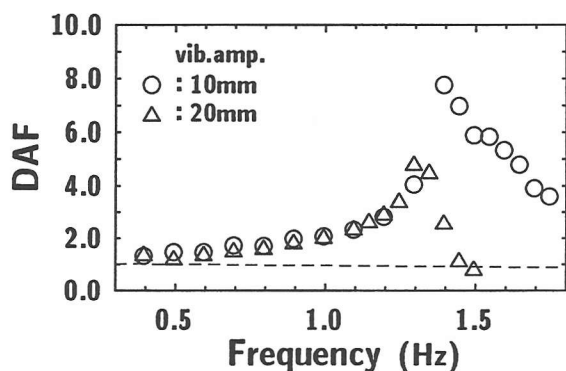


図-6 鉛塊部加速度の周波数応答関数

また A, C-8, 10 点では変位の増大とともに塑性化が進行している状態が示されている。また、基部 (A, C-14) は初期段階より非線形な歪分布を示しており、これらの性状には、溶接等模型作製、設置時の不整も影響しているものと推察される。

### 3.2 加振実験結果

各加振振幅に対する鋼管橋脚模型の応答性状を概説すると、加振振幅が 10 mm の場合には、1.4 Hz 前後で A-8 点において約  $-2200 \mu$  歪を示していることより、A-8 点から基部にいたる領域で弾塑性状態となっている。しかしながら崩壊に至らず 1.75 Hz までの加振実験を行い終了している。

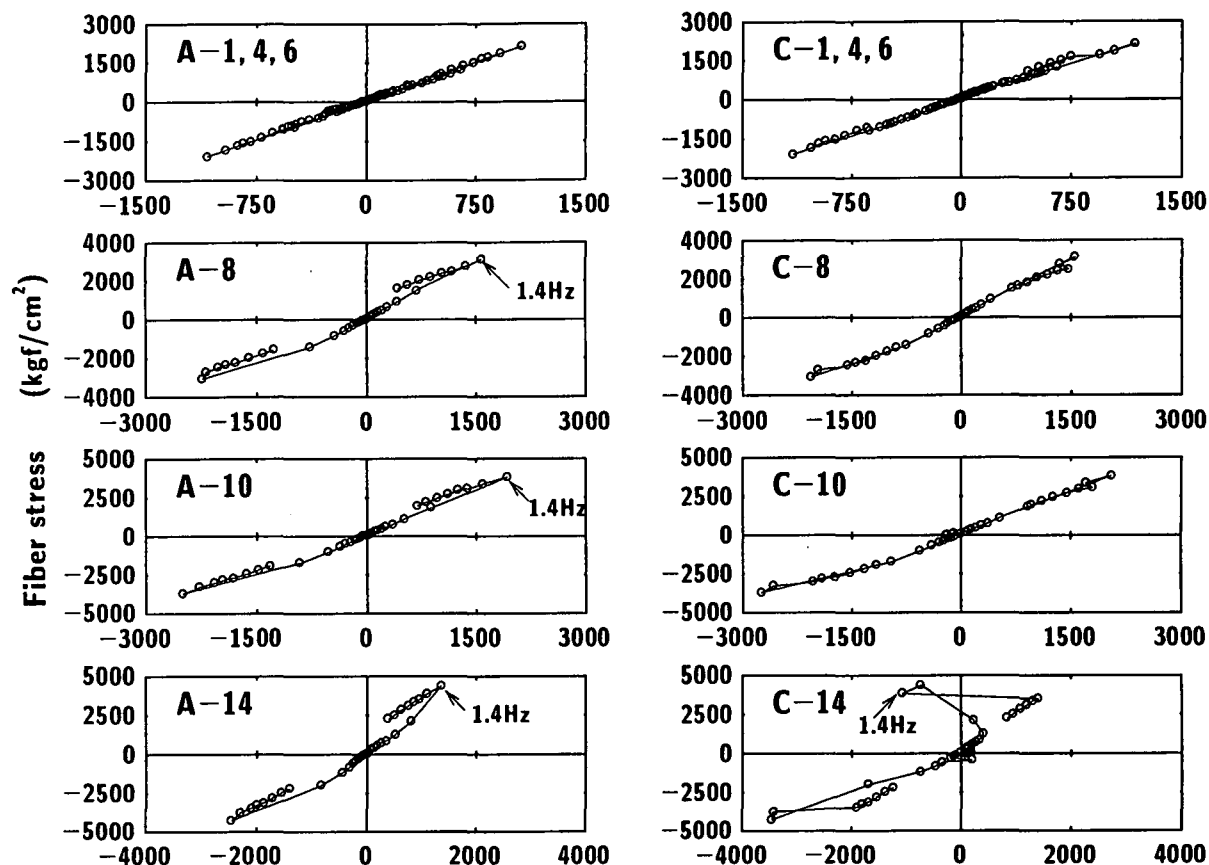
一方、加振振幅が 20 mm の場合には、加振振動数が 1.2 Hz の時点で大きい金属音が発生した。目視により基部より 22 cm の位置 (A 面部) に亀裂が発生していることを確認している。その後、1.4 Hz の時点で亀裂発生部 (A 面部) に局部座屈が発生している。1.4 Hz 以降では局部座屈の発生と鉛塊の影響により、模型上部は A 面側のみへの片振り振動状態となった。また、1.5 Hz の場合には加振方向への振動とともに加振方向と直

角方向にも振動が発生したため、この時点で実験を終了した。写真-1 に実験終了後の局部座屈発生部の状態を示す。写真より明らかなように、局部座屈発生部には水平方向に亀裂が発生している状態が示されている。

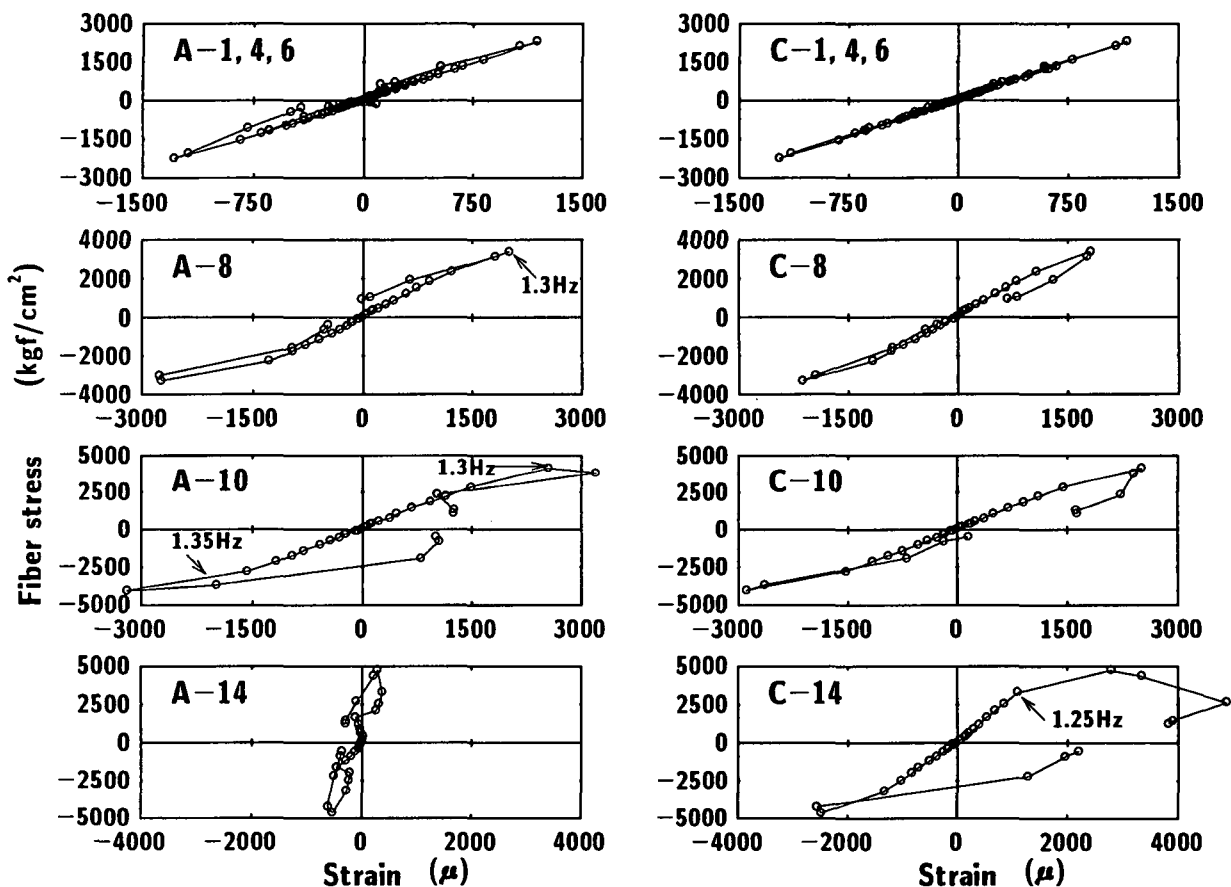
図-6 に各加振振幅に対する鉛塊中央部の加速度成分に関する周波数応答関数を示している。図より、本加振実験から求められる系の最低次固有振動数は 1.35 Hz 前後であることがわかる。なお、弾性解析による概算では 1.83 Hz として求められ、実験結果との差が 0.4 Hz 以上と比較的大きい。この原因としては、加振実験において鋼管橋脚模型が弾性状態から弾塑性状態まで含んでいることや、模型製作や設置等における不完全性が挙げられる。今後これらの差異に関し、種々詳細な検討を行う必要があるものと判断される。

図-7 には、縦軸に鉛塊部に作用する慣性力によって模型内に発生する曲げ応力 (梁理論に基づいて算定評価) を、横軸には各加振振動数に対して発生した最大、最小曲げ歪を取った応力-歪分布図を示している。(a) 図は加振振幅が 10 mm の場合である。図より A, C-6 点およびそれらの上部に関しては加振開始から終了までほぼ線形分布を示しており、弾性状態にあることがわかる。しかしながら、A, C-8 点から基部までの各測点歪は 1.3 ~ 1.4 Hz 加振時に塑性状態になっていることが推測される。特に C-14 点では 1.4 Hz 加振時に引張領域の歪が圧縮歪側に移動しており、局部的に応力状態が大きく乱れていることがわかる。

(b) 図は加振振幅が 20 mm の場合である。この場合は図-6 に示されているように 1.35 Hz から鉛塊に作用する慣性力が減少していることがわかる。(a) 図と同様、A, C-6 点より上部ではほぼ弾性的に挙動しているが、A, C-8 点から基部までの領域では 1.2 Hz の時点から軟化しており、弾塑性状態になっていることがわかる。特に A, C-10 の点は基部から 30 cm の位置であるが、1.3 Hz



(a) 加振振幅が 10 mm の場合



(b) 加振振幅が 20 mm の場合

図-7 応力-歪分布図

以降、歪が大きく乱れており、局部座屈現象と深く関連しているものと考えられる。また、A-14 点は基部近傍であるが、最大、最小歪とも C-14 点と比較して  $1/5 \sim 1/8$  程度と小さな応答性を示している。これは基部の溶接等、模型設置時の不整が影響しているものと考えられる。

#### 4. 結論

阪神大震災における鋼構造に関する被害を教訓とし、鋼管橋脚の耐震性向上に関する基礎資料を得ることを目的として、長さ 2 m の配管用炭素鋼鋼管を用いた静的交番載荷実験および加振実験を行った。加振実験は振動数が  $1 \sim 2$  Hz 程度の単一波入力時の挙動実験のための基礎実験として行ったものである。なお、橋脚模型には実橋脚と同様最低次固有振動数を 2 Hz 程度にするために、2 tf の鉛塊を設置している。本実験の範囲で得られた結果を整理すると、

- 1) 水平交番載荷実験結果、 $3\delta_y$  の載荷状態で基部に局部座屈が発生し崩壊に至った。しかしながら、基部は圧縮側が外側に 4.5 mm 程度、引張側が逆に 1.5 mm 程度変形し、非対称な変形モード分布となった。
- 2) 基部加振実験結果、最低次固有振動数は 1.35 Hz 程度であるものと推定された。しかしながら、その値は橋脚模型を弾性体と仮定して概算した値よりも 0.4 Hz 以上も小さい。
- 3) 加振振幅 20 mm の場合には共振振動数近傍で基部より 22 cm 上の部分に水平方向に亀裂が発生した。その後、振動数の増加とともにその部分に局部座屈が発生し、片振り状態で崩壊に至った。

今後、固有振動数と鋼管の応力状態との関係について詳細に検討するとともに、本実験結果を踏まえて  $1 \sim 2$  Hz 程度の単一波入力に対する鋼管橋脚模型の応答性状について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 宇佐美勤, 才塚邦宏, 木曾英滋, 伊藤義人: ハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の強震時挙動, 土木学会論文集, No.519, I-32, pp.101-113, 1995.7
- 2) 鈴木森晶, 宇佐美勤: 繰返し荷重下における鋼製橋脚モデルの強度と変形能の推定式に関する研究, 土木学会論文集, No. 519, I - 32, pp. 115 - 125, 1995.7
- 3) 後藤芳顯, 上条 崇, 藤原英之, 小畑誠: 鋼製橋脚定着部の終局挙動とそのモデル化に関する考察, 構造工学論文集, vol. 42A, pp. 987 - 998, 1996.3
- 4) 西川和廣, 上仙 靖, 村越 潤: 道路橋鋼製橋脚の被災と耐震設計に関する検討状況, 橋梁と基礎, pp. 127 - 130, 1996.8
- 5) 西川和廣, 村越 潤, 上仙 靖: 鋼製橋脚供試体の繰返し載荷実験, 橋梁と基礎, pp. 131 - 134, 1996.8
- 6) 橋本修身, 小林洋一, 安波博道, 中川知和, 水谷慎吾: コンパクト断面橋脚の耐震性に関する検討, 橋梁と基礎, pp. 135 - 137, 1996.8
- 7) 高久達将, 山本 学, 安藤紘三, 松田 宏, 川井 豊: 地震時の鋼製橋脚の弾塑性解析とベンチマークテスト, 橋梁と基礎, pp. 138 - 141, 1996.8

(1997 年 3 月 31 日受付)

## DYNAMIC TESTS OF STEEL-PIPE PIER MODELS DUE TO SINGLE WAVE VIBRATIONS

Yoshihiro OYAMADA, Masashi SATO, Toshimitsu TANIMOTO and Norimitsu KISHI

In order to increase the understanding on improvement of anti-earthquakes resistance of steel-pipe piers, static horizontal reversal loading and vibration tests for 2 m long steel-pipe pier models were performed, in which the vibration test was taken as preliminary test for single wave vibration ones having 0.5 to 1 sec period.

A 2 tf weight lead block was set onto the top of pier model to let the fundamental frequency become about 2 Hz. The results obtained from this study were summarized as follows:

- 1) Under static horizontal reversal loading, a pier model was collapsed due to local buckling generated near the basement;
- 2) Shaking with 20 mm stroke and near resonance frequency of the pier model, a horizontal crack was formed at 22 cm up from the basement. Increasing shaking frequency gradually, local buckling was performed near the crack and the pier model was collapsed with lop-sided vibration.