

## 振動台加振実験に基づく曲げ耐力の推定精度

松本崇志<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 修（工） （株）建設技術研究所 大阪本社 道路交通部  
（〒541-0045 大阪市中央区道修町1-6-7）

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 土木工学専攻  
（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

### 1. はじめに

橋脚のリアルタイムな破壊特性を検討するために、振動台加振実験は有効である。振動台実験から橋脚基部に作用した曲げモーメントを求めようとすると、一般に2種類の方法が用いられる<sup>1), 2)</sup>。一つは、ロードセルを橋脚のどこかに配置して、橋脚に作用した水平力や鉛直力を直接測定し、これから橋脚に作用する曲げモーメントを求める方法（以下、手法Ⅰと呼ぶ）である。もう一つは、橋脚に生じた絶対加速度を加速度計により計測し、これに質量を乗じて橋脚に作用する慣性力を求めこれから橋脚の曲げモーメントを求める方法（以下、手法Ⅱと呼ぶ）である。

本研究は、橋脚の3次元加振実験を対象に手法Ⅰと手法Ⅱとの2つの方法で橋脚の水平力～水平変位の履歴を求め、これらがどの程度一致するか検討したものである。

### 2. ロードセル及び絶対加速度に基づく作用曲げモーメント

ロードセルを用いて図-1に示すように、フーチング下面に生じる水平力及び鉛直力を計測する状態を考える。実験では、水平2方向及び鉛直方向に地震動を作用させるが、ここでは、簡単のため、水平1方向及び鉛直方向に作用させる場合について示している。また、フーチングは4個のロードセルで支持されているが、これも簡単のため、ここでは図のように左右の2個のロードセルで支持されている場合に基づいて構成式を導くこととする。

橋脚基部に作用する曲げモーメントを $M_B$ とすると、

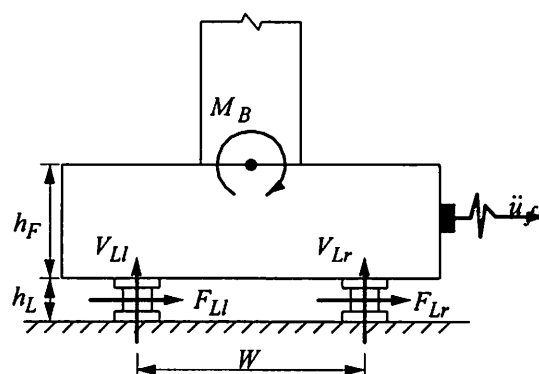


図-1 ロードセルの位置及び作用力

$M_B$ は次式で与えられる。

$$M_B = \frac{W}{2}(V_{Ll} - V_{Lr}) - \left(h_F + \frac{h_L}{2}\right)(F_{Ll} + F_{Lr}) + \ddot{u}_f m_f \frac{h_F}{2} \quad (1)$$

ここで、

$V_{Ll}$ ,  $V_{Lr}$  : それぞれ左側及び右側のロードセルによって測定される上下方向力（上向きを正とする）

$F_{Ll}$ ,  $F_{Lr}$  : それぞれ、左側及び右側のロードセルによって測定される水平力（右向きを正とする）

$W$  : 左右のロードセル間の距離

$h_F$  : フーチング高さ

$h_L$  : ロードセルの高さ

$\ddot{u}_f$  : フーチング重心位置における絶対加速度

$m_f$  : フーチングの質量

一方、上部ブロック重心位置を含めて、橋脚基部から上部ブロック上端までに作用する加速度（絶対

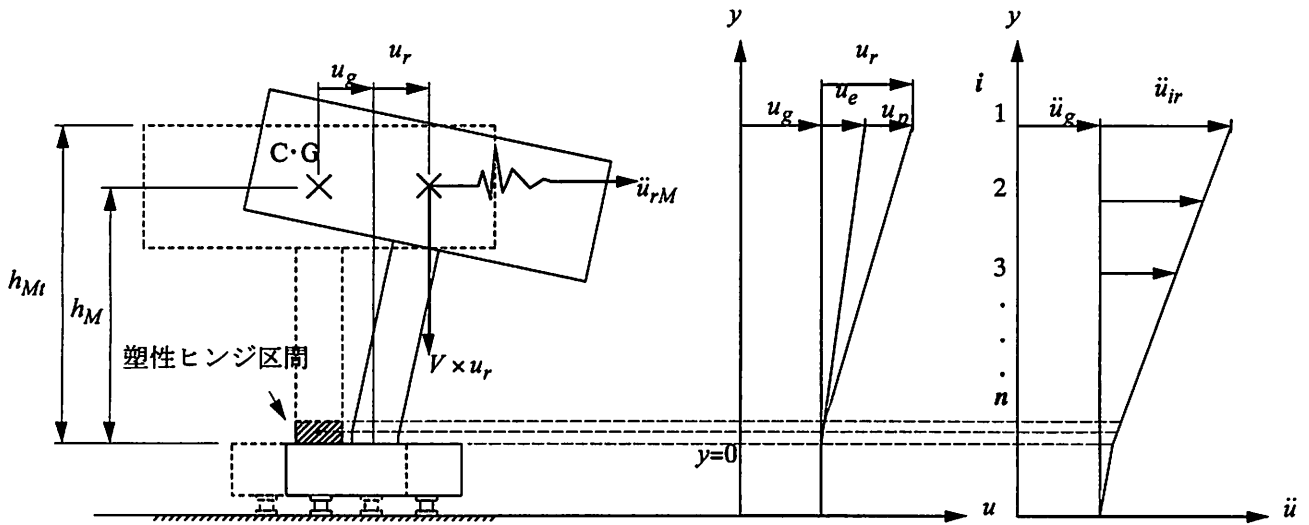


図-2 橋脚の変位分布及び加速度分布

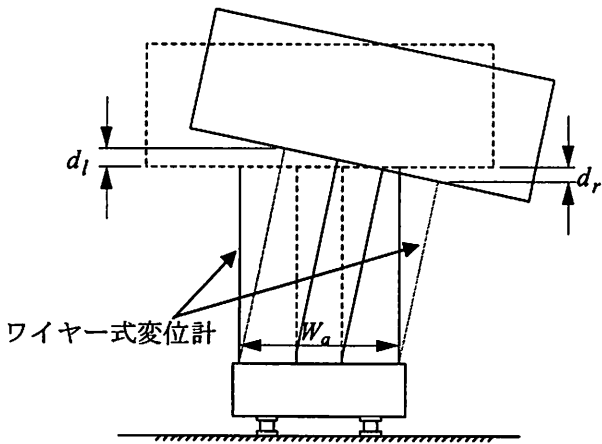


図-3 ワイヤー式変位計の位置

加速度) が全て測定されていれば、橋脚基部に作用する曲げモーメント $M_B$ は、図-2のように $y$ 軸を橋脚基部から上方に取ることにより次式で与えられる。

$$M_B = \int_0^{h_{Mt}} m(y) (\ddot{u}_r(y) + \ddot{u}_g) y dy + \int_0^{h_{Mt}} J(y) (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_g) dy + V u_r \quad (2)$$

ここで、

- $m(y)$  : 橋脚基部から高さ $y$ における橋脚もしくは上部ブロックの質量
- $\ddot{u}_r(y)$  : 橋脚基部から高さ $y$ における橋脚もしくは上部ブロックの振動台に対する相対加速度
- $\ddot{u}_g$  : 振動台の水平方向絶対加速度
- $h_{Mt}$  : 橋脚基部から上部ブロック上端までの距離
- $J(y)$  : 橋脚基部から高さ $y$ における橋脚もしくは上部ブロックの回転慣性質量
- $\ddot{\theta}_r$  : 振動台に対する橋脚もしくは上部ブロッ

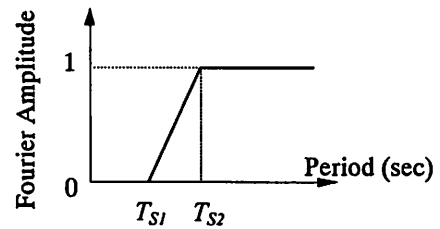


図-4  $\ddot{\theta}_{rM}$  に用いたローパスフィルター

- クの相対回転角加速度
  - $\ddot{\theta}_g$  : 振動台の絶対回転角加速度
  - $u_r$  : 橋脚基部と上部ブロック重心位置の相対変位 ( $= u_r(h_M)$ )
  - $h_M$  : 橋脚基部と上部ブロック重心位置の距離
  - $V$  : 上部ブロック質量に伴い橋脚に作用する鉛直力で、次式で与えられる。
- $$V = m_M \{ g - (\ddot{v}_{rM} + \ddot{v}_g) \} \quad (3)$$
- $m_M$  : 上部ブロックの質量
  - $g$  : 重力加速度
  - $\ddot{v}_{rM}$  : 振動台に対する上部ブロック重心位置の上下方向の相対加速度
  - $\ddot{v}_g$  : 振動台の上下方向絶対加速度

式(2)の右边第3項は、P- $\Delta$ 効果を表すものである。なお、ロードセルで計測される鉛直力は橋脚のP- $\Delta$ 効果も含んだものであることから、式(1)ではP- $\Delta$ 効果も見込んだ上で橋脚基部に作用する曲げモーメント $M_B$ が求められることになる。

いま、上部ブロックを剛体と見なすと同時に、橋脚躯体の回転質量の影響は小さいため、これを無視し、上部ブロック及び橋脚躯体を $n$ 個の離散型モデルで表すとすれば、式(2)の曲げモーメント $M_B$ は次

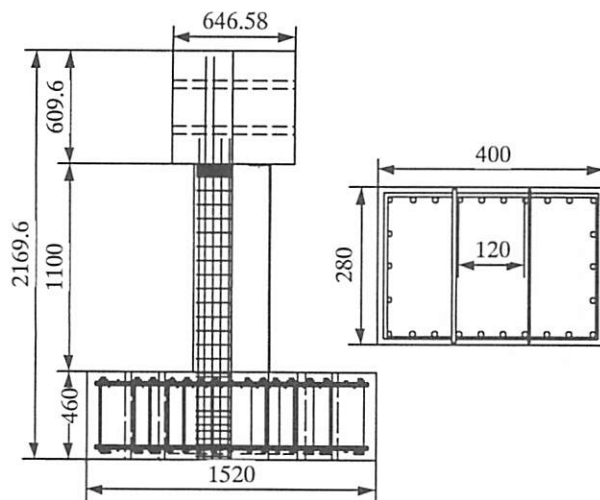


図-5 対象橋脚

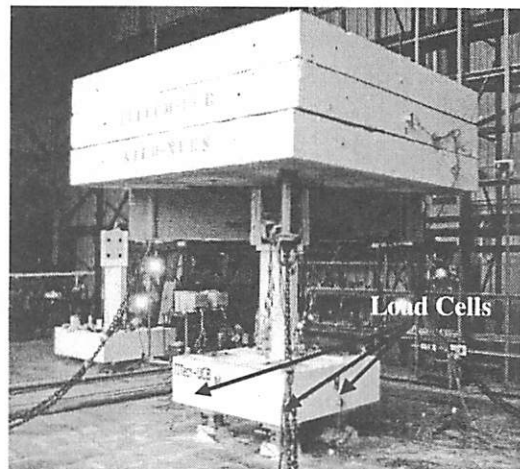


写真-1 実験状況及びロードセル

式となる。

$$M_B = \sum_{i=1}^{n-1} m_i (\ddot{u}_{ri} + \ddot{u}_g) y_i + J_M (\ddot{\theta}_{rM} + \ddot{\theta}_g) + V u_r \quad (4)$$

ここで、

- $m_i$  : 橋脚基部から*i*番目の集中質量
- $\ddot{u}_{ri}$  : 橋脚基部から*i*番目の振動台に対する相対加速度
- $J_M$  : 上部ブロックの回転慣性質量
- $\ddot{\theta}_{rM}$  : 上部ブロックの振動台に他する相対回転角加速度

さらに、橋脚駆体の質量は上部ブロックの質量と比較して小さいため、これを無視すると、式(4)の曲げモーメント  $M_B$  は次式となる。

$$M_B = m_M (\ddot{u}_{rM} + \ddot{u}_g) h_M + J_M (\ddot{\theta}_{rM} + \ddot{\theta}_g) + V u_r \quad (5)$$

ここで、 $\ddot{u}_{rM}$  は上部ブロック重心位置における振動台に対する相対加速度である。

式(5)を用いて曲げモーメント  $M_B$  を求めるが、ここで上部ブロックの振動台に対する相対回転角加速度  $\ddot{\theta}_{rM}$  は図-3に示すワイヤー式変位計によって測定した、フーチングに対する上部ブロックの上下方向相対変位、 $d_l$  及び  $d_r$  から次式によって求めた。

$$\ddot{\theta}_{rM} = \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{d_l - d_r}{W_d} \right) \quad (6)$$

ここで、ワイヤー式変位計はフーチングの4隅に設置されているが、ここでは簡単のため、図-3の左側及び右側に存在する各2個ずつのワイヤー式変位計の測定値を平均した値をそれぞれ、 $d_l$  及び  $d_r$  と表している。また、 $W_d$  は左右のワイヤー式変位計設置位置間の距離 (=1.42 m) である。なお、式(6)で上下方向相対変

位を2階微分して上部ブロックの回転角加速度  $\ddot{\theta}_{rM}$  を求める際には、高振動のノイズが混入するため、図-4に示すローパスフィルターを用いて補正している。ここでは、 $T_{S1}=0.067$ 秒、 $T_{S2}=0.05$ 秒としている。

また、式(5)の振動台の絶対回転角加速度  $\ddot{\theta}_g$  は、振動台の4隅で計測された上下方向加速度  $A_{Vi}$  ( $i=1\sim 4$ ) を用いて、次式で求めた。

$$\ddot{\theta}_g = \frac{(A_{V1} + A_{V2})/2 - (A_{V3} + A_{V4})/2}{W_a} \quad (7)$$

ここで、 $W_a$  は振動台の4隅に取り付けられた加速度計間の距離 (=5.18 m) である。

以上のように、橋脚基部に作用する曲げモーメント  $M_B$  を求めるためには、式(1)を用いる方法 (手法I) と式(5)を用いる方法 (手法II) の2つの方法がある。以下においてそれぞれの適用性を検討する。

### 3. 検討に用いる振動台加振実験

ここでは、2006年にNEES / E-Defenseに基づく橋梁の耐震性に関する日米共同研究の一貫として、東京工業大学とカリフォルニア大学バークレイ校 (以下、UCB校) の共同研究としてUCB校の振動台を用いて行なわれた、中間帯鉄筋を有する矩形断面橋脚の実験結果を対象に曲げ耐力の推定精度を検討する。

解析対象とする供試体は図-5に示すように、断面寸法が400 mm×280 mmの矩形断面橋脚である。供試体柱部の高さは1,100 mmで、慣性力の作用位置は柱基部から2,193 mmである。また、供試体が支持する上部ブロックの質量は23.1 tとしている。実験では、写真-1に示すように、フーチング下面に鉛直力

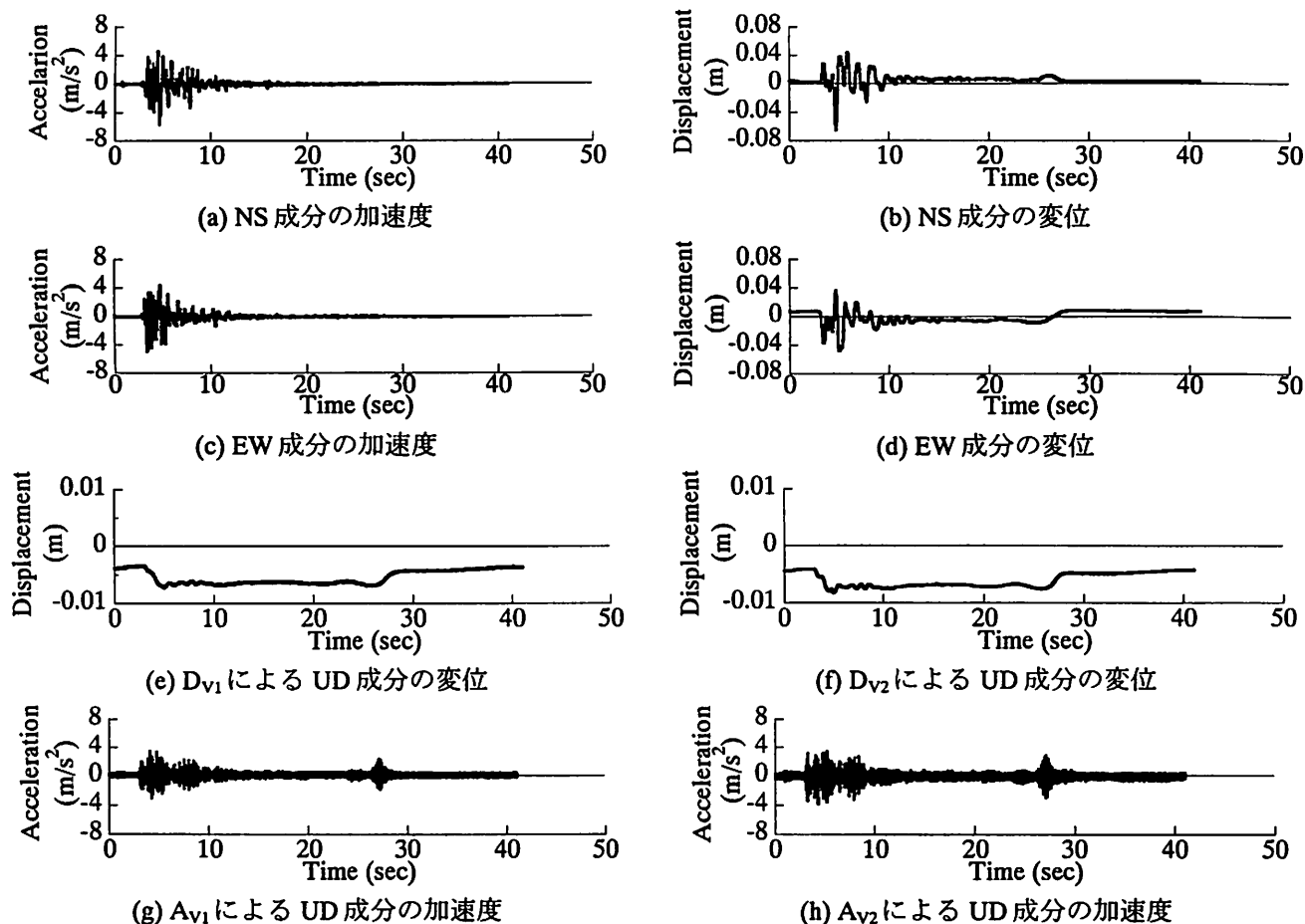


図-6 振動台の加速度及び変位

( $\pm 220$  kN) 及び水平力 ( $\pm 88$  kN) を計測できるロードセルを4個設置した。ロードセルはUCB地震工学研究センターの技術者によって設計・製作されたものである。また、フーチングの4隅において上部ブロックとフーチング間の相対変位をワイヤー式変位計により測定している。

入力地震動としては1995年兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で観測された加速度記録を、相似率 ( $=1/6$ ) に基づいて時間軸を  $1/\sqrt{6}$  に、最大加速度を実加速度の90%に縮小して用いた。なお、JR鷹取駅記録のNS成分、EW成分をそれぞれ供試体の弱軸（橋軸）及び強軸（橋軸直角）方向に、UD成分を上下方向に入力した。アクチュエータに内蔵された8個の変位計及び振動台に取り付けられた8個の加速度計によって計測された振動台の加速度及び変位を図-6に示す。これより、NS、EW、UD成分の振動台の変位には基線のドリフトが認められる。この理由ははっきりわからないが、入力が終了すると振動台はニュートラルポジションに自動的に戻るようにセットされており、この操作が関係している可能性がある。

#### 4. 手法 I による橋脚の履歴推定

図-7に、NW及びSW位置におけるロードセルで計測されたままの鉛直力及び水平力を示す。以下、橋脚の弱軸方向（NS方向）の応答に着目すると、NW及びNE位置のロードセルが図-1の左側のロードセルに、またSW及びSE位置のロードセルが図-1の右側のロードセルに対応する。ロードセルの鉛直力には周期21秒程度、また水平力には周期14秒程度のドリフトが卓越して含まれている。

ここで、NW及びNE位置のロードセルによる鉛直力どうしと水平力どうしを加え合わせ、図-1の左側のロードセルにおける鉛直力  $V_{Li}$  及び水平力  $F_{Li}$  とこれらのフーリエスペクトルを求めると、図-8のようになる。NW及びNE位置のロードセルの計測値を加え合わせることによって、鉛直力には長周期成分のドリフトが目立たなくなるが、水平力は図-7とほとんど変わらず、長周期成分のドリフトが含まれている。鉛直力  $V_{Li}$  及び水平力  $F_{Li}$  の最大値はそれぞれ、144.9 kN及び39.5 kNである。なお、図-1の右側のロードセルによる鉛直力  $V_{Lr}$ 、水平力  $F_{Lr}$  においてもこのような特性はよく似ているため、紙前の都合こ

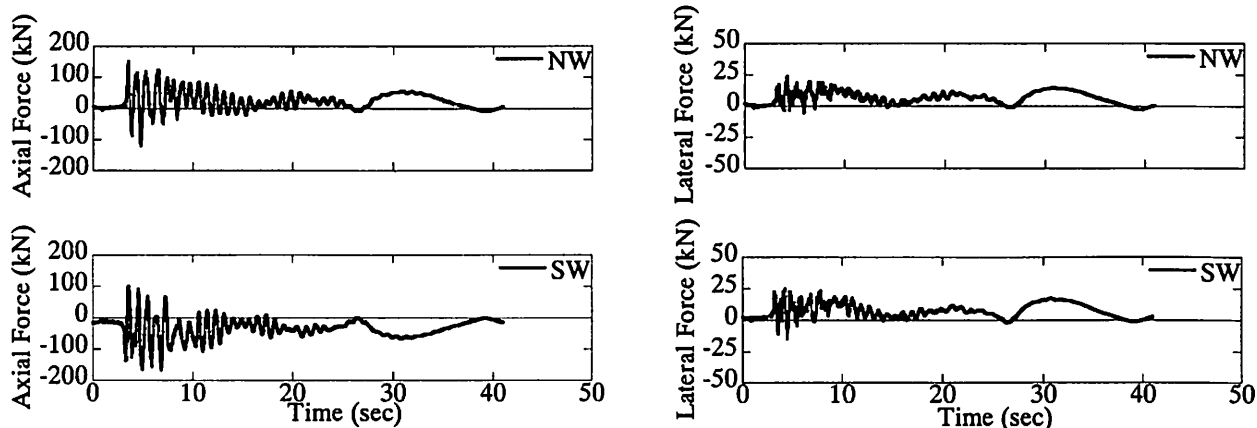


図-7 ロードセルによって計測された NW および SW 位置における鉛直力（左）及び水平力（右）（フィルター処理を行わない場合）

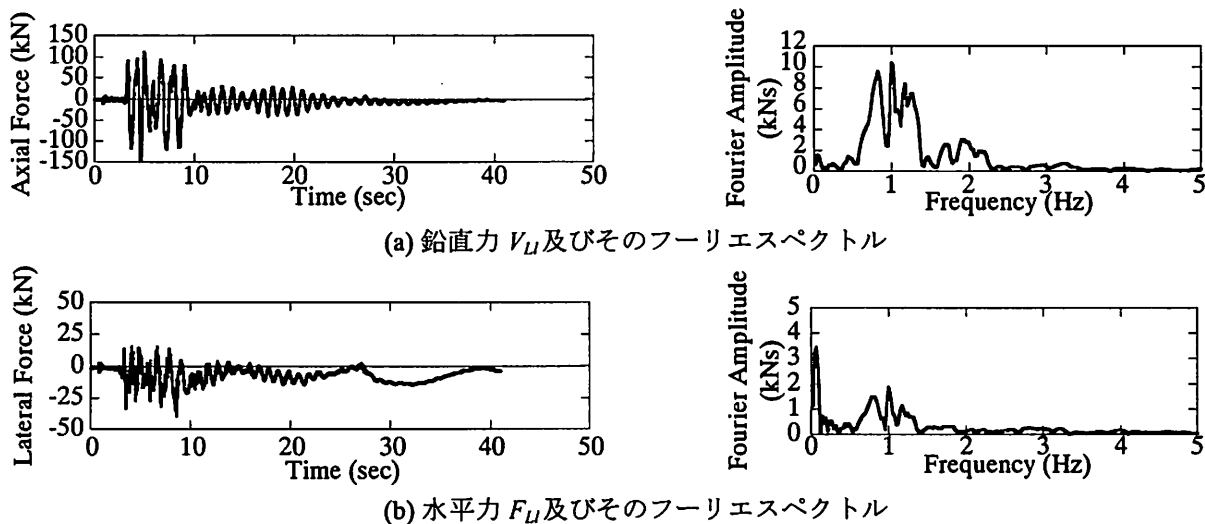


図-8 フィルターをかける前の鉛直力 ( $V_L$ ) 及び水平力 ( $F_L$ ) の時刻歴及びフーリエスペクトル

こには示していない。

この長周期成分のドリフトを図-9 に示すデジタルバンドパスフィルターによって除去することとする。供試体の加振前及び加振後の模型橋脚の固有周期は弱軸方向にはそれぞれ 0.62 秒, 0.98 秒, 強軸方向にはそれぞれ 0.47 秒, 0.81 秒であることから, 短周期側の遮断周期  $T_S$  を 0.02 秒とし, 長周期側の遮断周期  $T_L$  を 10 秒, 2 秒, 1 秒と変化させた。  $T_L = 1$  秒は橋脚の固有周期特性から見て, やや短すぎる遮断周期である。

長周期側の遮断周期  $T_L$  を 10 秒, 2 秒, 1 秒と変化させた場合の, それぞれ鉛直力  $V_L$  及び水平力  $F_L$  を図-10 及び図-11 に示す。  $T_L = 10$  秒のフィルターをかけるだけで, 鉛直力  $V_L$ , 水平力  $F_L$  ともに長周期のドリフトはかなり小さくなる。鉛直力  $V_L$  の最大値は 140.0 kN とオリジナルの鉛直力に比較して 0.97 倍に, また, 水平力  $F_L$  の最大値は 29.8 kN とオリジナルの水平力に比較して 0.75 倍になる。

同様に,  $T_L = 2$  秒及び 1 秒のフィルターをかけるこ

とにより, 最大鉛直力  $V_L$  はそれぞれ 143.4 kN 及び 129.4 kN と原応答の 0.99 倍及び 0.89 倍に, また, 水平力  $V_L$  はそれぞれ 27.4 kN 及び 24.0 kN と原応答の 0.69 倍及び 0.61 倍になる。

図-12 に, 式(1)から求まる橋脚基部の曲げモーメント  $M_b$  と, 上部ブロック重心位置の相対変位  $u_r$  を上部ブロック重心位置までの距離  $h_M$  で除して求まる水平ドリフトの履歴を示す。遮断周期  $T_L$  を 10 秒, 2 秒, 1 秒と変化させた場合の他に, バンドパスフィルターをかけないオリジナルの値を使用した場合の履歴も比較のために示している。ここで, 橋脚基部の変位  $u_g$  (実際にはフーチング重心位置の変位を測定しているが, フーチングは剛体と見なせるためフーチング重心位置の変位 = 橋脚基部の変位  $u_g$  と見なしている) 及び上部ブロック重心位置の水平変位  $u_g + u_r$  はそれぞれテストピットに固定したワイヤ一式変位計により計測されている。  $u_g$  及び  $u_g + u_r$  には顕著なノイズは含まれないため, 図-12 では  $u_r = (u_g + u_r) - u_g$  として求めた相対変位を用いて

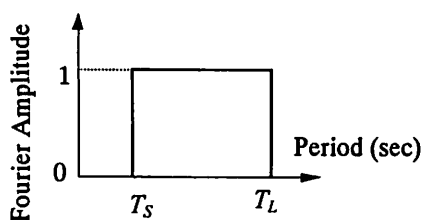


図-9 手法Ⅰに用いたバンドパスの形状

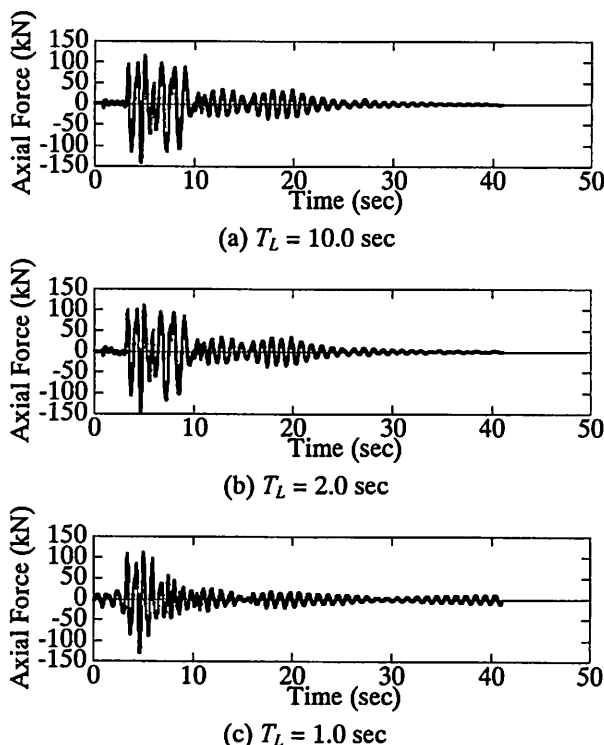


図-10 バンドパスフィルターをかけた場合の鉛直力  $V_L$  の時刻歴

いる。図-12 より  $T_L=10$  秒及び 2 秒とした場合には、フィルターをかけない場合とほぼ同じ履歴形状となるが、 $T_L=1$  秒とすると履歴がふくらみ、明らかに上記の 3 ケースとは異なってくる。

## 5. 手法Ⅱによる橋脚の履歴推定

図-13は上部ブロック重心位置で測定した絶対加速度  $\ddot{u}_r + \ddot{u}_g$  及びそのフーリエスペクトルを示したものである。絶対加速度の最大値は  $2.06 \text{ m/s}^2$  である。フーリエスペクトルからわかるように、加速度応答  $\ddot{u}_r + \ddot{u}_g$  には高い周波数成分が含まれている。このうち、どれが誤差であるかはこれだけの情報だけではわからないが、高周波数成分をフィルターで除去することによる影響を検討してみる。前述したように、供試体の基本固有周期は  $0.47 \sim 0.98$  秒であることから、図-14に示すローパスフィルターにおいて

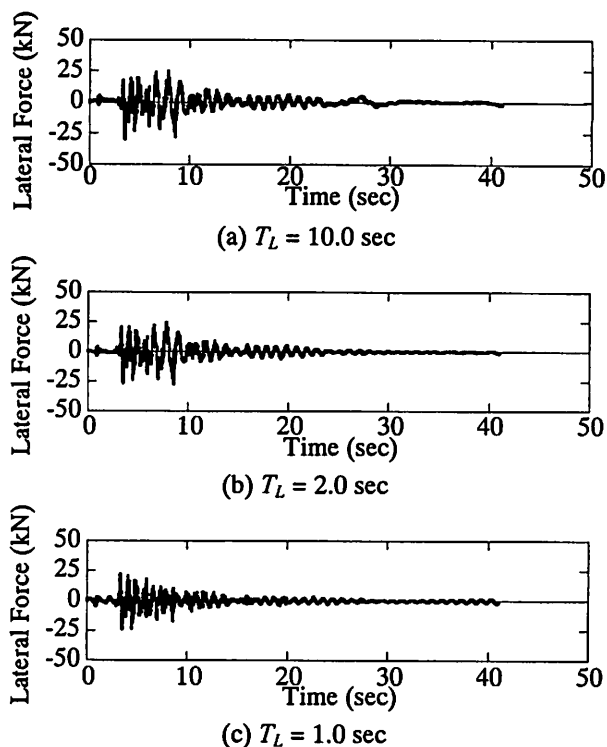


図-11 バンドパスフィルターをかけた場合の水平力  $F_L$  の時刻歴

短周期側遮断周期  $T_S$  を  $0.1$  秒、 $0.33$  秒、 $0.5$  秒に変化させることとした。ここで、 $T_S=0.5$  秒は橋脚の固有周期に近い遮断周期である。

この結果が図-15である。 $T_S=0.1$  秒のローパスフィルターをかけると、最大加速度は  $1.68 \text{ m/s}^2$  とオリジナルの最大加速度  $2.06 \text{ m/s}^2$  に比較して  $0.82$  倍になる。遮断周期を長くしていくと、加速度波形が滑らかになっていく。 $T_S=0.33$  秒、 $0.5$  秒とすると、最大加速度はそれぞれ  $1.54 \text{ m/s}^2$ 、 $1.40 \text{ m/s}^2$  となり、原加速度のそれぞれ  $0.75$  倍、 $0.68$  倍となる。

図-16に、式(5)を用いて算出される曲げモーメント  $M_B$  と水平ドリフトの履歴曲線を示す。なお、図中には手法Ⅰを用いてフィルターをかけない場合の曲げモーメント～水平ドリフトの履歴も参考のため示している。これより、フィルターをかけない場合には、両手法による履歴曲線には大きな違いが見られるが、遮断周期  $T_S$  を長くしていくと、履歴曲線が円滑になり手法Ⅱの応答に近づく。 $T_S$  を  $0.5$  秒とした場合には手法Ⅰから求まる履歴とほぼ一致する。

## 6. 手法ⅡにおけるP-Δ効果及び上部ブロックの回転慣性モーメント $N$ の影響結論

5章の結果で、P-Δ効果及び上部ブロックの回転慣性モーメント  $N$  がどの程度橋脚基部の曲げモーメ

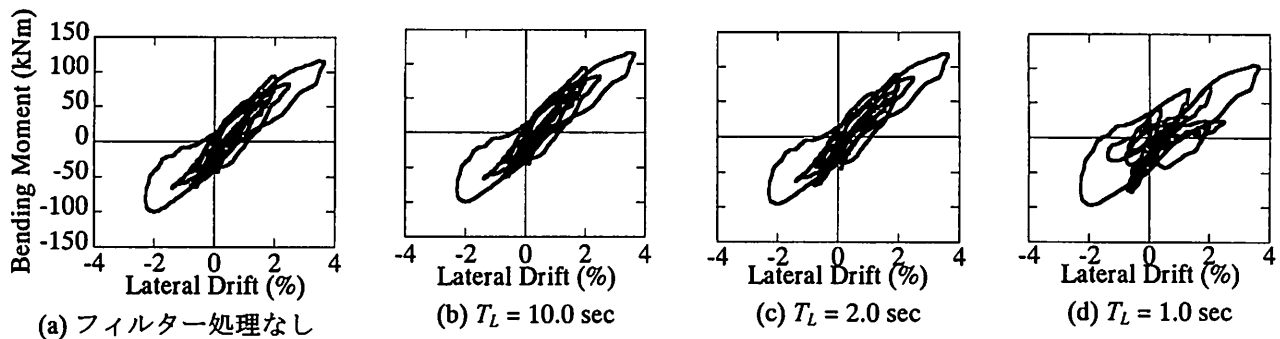


図-12 手法 I による曲げモーメント～水平ドリフトの履歴

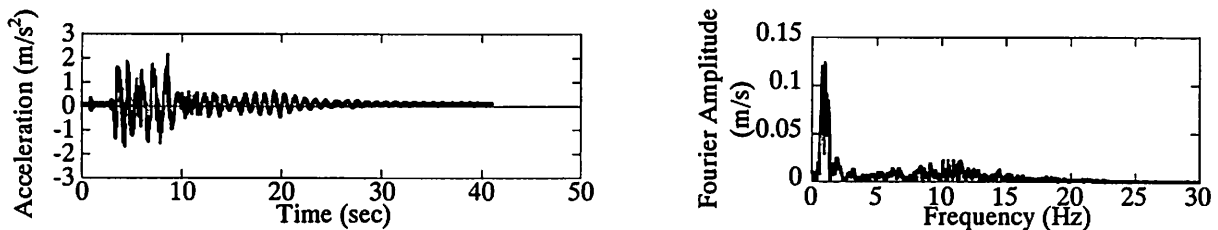


図-13 フィルターをかける前の上部ブロック重心位置における絶対加速度及びフーリエスペクトル

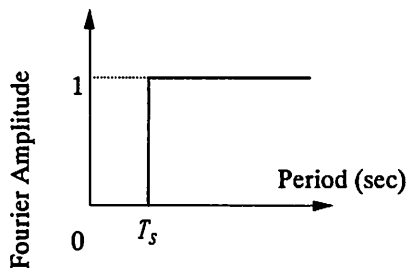


図-14 手法 II に用いたローパスフィルター形状

ント  $M_B$  に影響を与えるかを検討する。

式(5)において、右辺第3項のP- $\Delta$ 効果を無視して曲げモーメントの時刻歴応答及び曲げモーメント～水平ドリフトの履歴を求めると、図-17のようになる。ここでは、手法 I の履歴とよく一致した結果を与える遮断周期  $T_s = 0.5$  秒とした場合の結果を示している。これによれば、P- $\Delta$ 効果を見込まないでも曲げモーメントの応答波形は良く似ているが、履歴特性としては大きな違いが生じる。図中の点A、BはP- $\Delta$ 効果を見込まない場合と見込んだ場合の差が正側、負側でそれぞれ最大となる時の曲げモーメントを示している。点A、Bで曲げモーメントの誤差はそれぞれ、18.1 kNm及び11.4 kNmであり、P- $\Delta$ 効果を見込んだ場合の点A、Bの曲げモーメント117.0kNm及び98.9 kNmの11～15%に相当する。

また、式(5)の右辺第2項の上部ブロックの回転慣性モーメント  $N$  が橋脚基部に作用する曲げモーメント  $M_B$  にどの程度影響するかを示した結果が、図-18である。ここでも、上記と同じく  $T_s = 0.5$  秒とした場合の結果を示している。図中の点C、Dは上部ブ

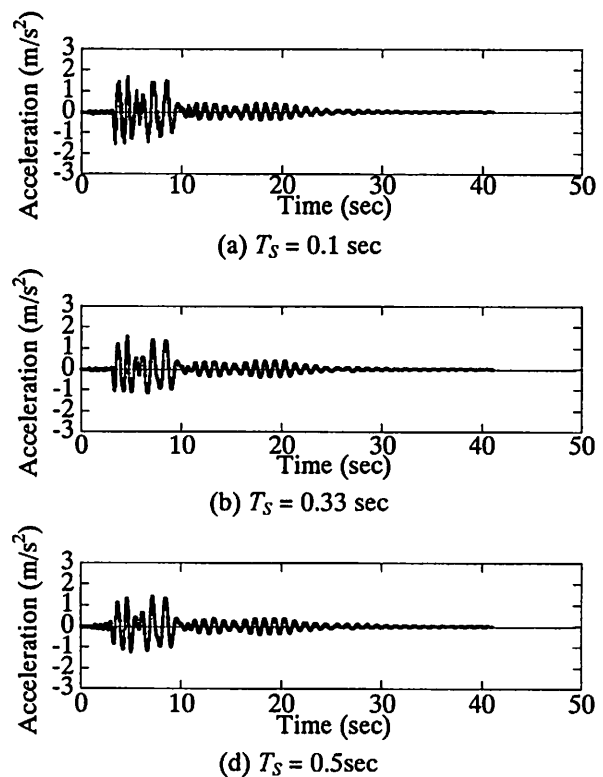


図-15 ローパスフィルターをかけた場合の上部ブロック重心位置における絶対加速度

ロック回転慣性モーメント  $N$  を考慮しない場合とする場合の差が最大となる時の曲げモーメントである。曲げモーメントの差は最大42.4 kNm及び35.8 kNmであり、上部ブロックの回転慣性モーメント  $N$  を考慮した場合に比較して、これを無視すると、曲げモーメントを33～35%過小評価することがわかる。

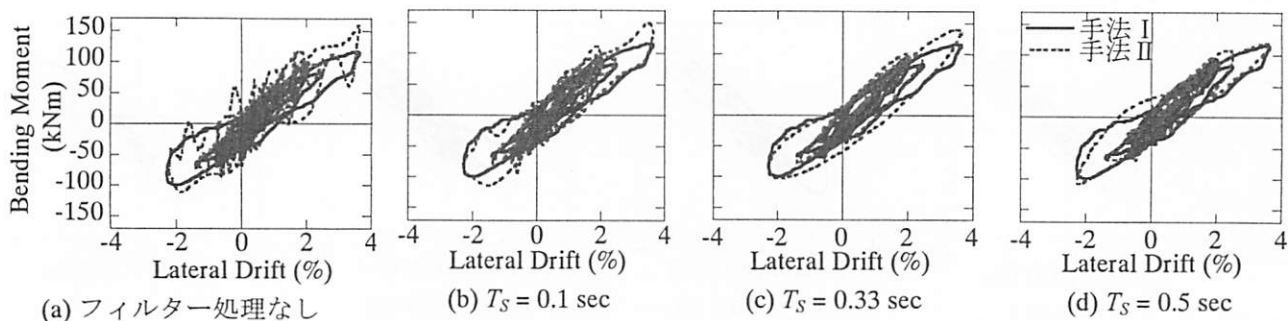
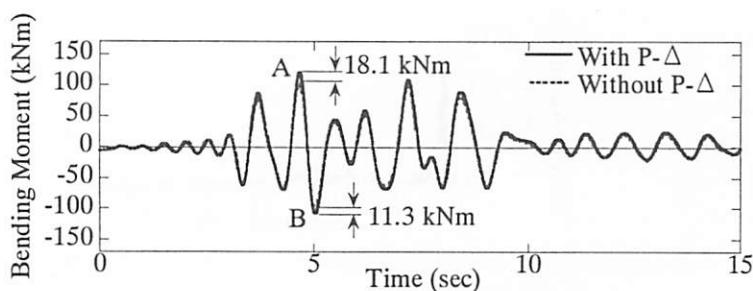
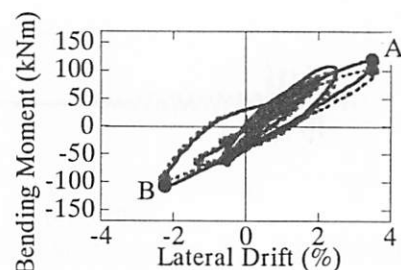


図-16 手法IIによる曲げモーメント～水平ドリフトの履歴

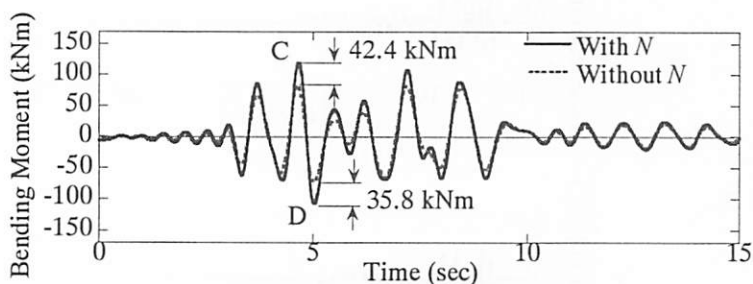


(a) 曲げモーメントの時刻歴応答

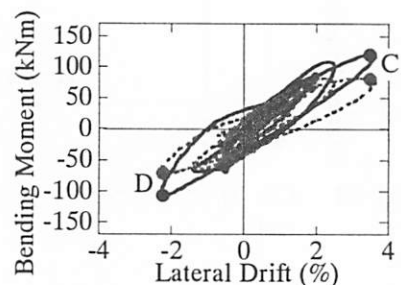


(b) 曲げモーメント～水平ドリフト履歴

図-17 P-Δ効果の影響 (手法II,  $T_s=0.5$  sec)



(a) 曲げモーメントの時刻歴応答



(b) 曲げモーメント～水平ドリフト履歴

図-18 上部ブロック回転慣性モーメント  $N$  の影響 (手法II,  $T_s=0.5$  sec)

## 7. 結論

振動台加振実験に基づいて橋脚の履歴特性を評価する際に、橋脚の曲げモーメントを推定する手法を整理し、これらの適用性を振動台加振実験に基づいて検討した。本検討から得られた結論は、以下の通りである。

- 3方向加振を受ける橋脚モデルの履歴特性を評価するためには、手法Iではロードセルにより水平2方向と同時に上下方向の作用力を正しく測定できることが、また、手法IIではモデルの変形モードに応じてモデルの加速度及び質量分布を正しく求められることが重要である。
- 橋脚に作用する曲げモーメント～水平ドリフトの履歴曲線を手法IとIIで比較すると、概ね履歴曲線は一致する。ただし、このためには上部ブロックの応答加速度やこの回転角加速度を求める際

に適切にフィルター処理する必要がある、フィルターの与え方によって大きくその一致度が異なる。

- 橋脚基部に生じる曲げモーメント  $M_B$  を橋脚に作用した加速度から求める場合、P-Δ効果や上部ブロックの回転慣性モーメント  $N$  が大きく影響する。これらを正確に評価できるように計器配置を考えておく必要がある。

## 参考文献

- 1) Sakai, J., Mahin, A. S., Espinoza, A. : Earthquake Simulation Tests on Reducing Residual Displacements of Reinforced Concrete Bridge Columns, *PEER Report*, University of California, Berkeley, 2006.
- 2) 松本崇志, 川島一彦 : 振動台加振実験に基づく橋脚の曲げ耐力の推定精度, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, CD-ROM, pp. 961-970, 2007.