

振動台加震実験に基づく橋脚の曲げ耐力の 推定精度

松本 崇志¹・川島 一彦²

¹東京工業大学大学院修士課程 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)

E-mail:matsumoto.t.ac@m.titech.ac.jp

²東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

E-mail:kawashima.k.ae@m.titech.ac.jp

振動台加震実験結果から橋脚の履歴特性を評価するための手法を 2 つに整理し、これらの適用性を 3 次元加震した RC 橋脚模型の振動実験結果に基づいて検討した。本検討の結果、3 方向加震を受ける橋脚模型の履歴特性を正確に評価するためには、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計測できること、模型の変形モードに応じて模型の加速度分布を正しく評価できることが重要であり、実際に橋脚の履歴曲線を求めてみると、なかなか検討すべき事項が多く、簡単には両手法による履歴特性が一致しないことが明らかになった。

Key Words : *Shaking table test, Bridge, Seismic design, Experiment*

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、振動台加震実験は有効である。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。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。

手法Ⅰを用いて橋脚の曲げモーメントを求めるには、ロードセルの特性が重要である。ロードセルは剛性が高いため接着面との接触条件に対し非常に敏感である。また、一般に静的荷重の測定に用いられるが、動的実験に対してどれほど有効であるかは議論のある所である。特に複数台のロードセルを使用し、3次元加震下の作用力を求める際の有効性については、今後の検討が必要とされている。

一方、手法Ⅱを用いる際には、構造物の振動モー

ドを正しく再現できるように加速度計を設置する必要がある。しかし、複雑に変形する橋脚模型では、複数箇所で加速度を計測しなければならず、これらが代表する質量分布の評価とも合わせて、なかなか難しい問題である。さらに、加速度から慣性力を求めて、曲げモーメント～曲率の履歴を求めると、一般に高振動数のノイズの影響によって滑らかな履歴が得られないことが知られている¹⁾。

本研究は、橋脚の3次元加震実験を対象に手法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よう。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

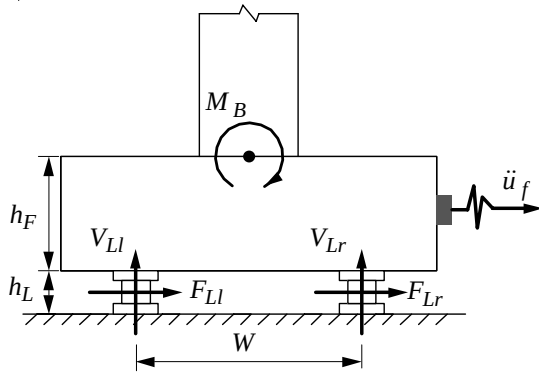


図-1 ロードセルの位置及び作用力

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、 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s

$\ddot{u}_g$: 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)の右辺第3項は、P-Δ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-Δ効果も含んだものであることから、式(1)ではP-Δ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

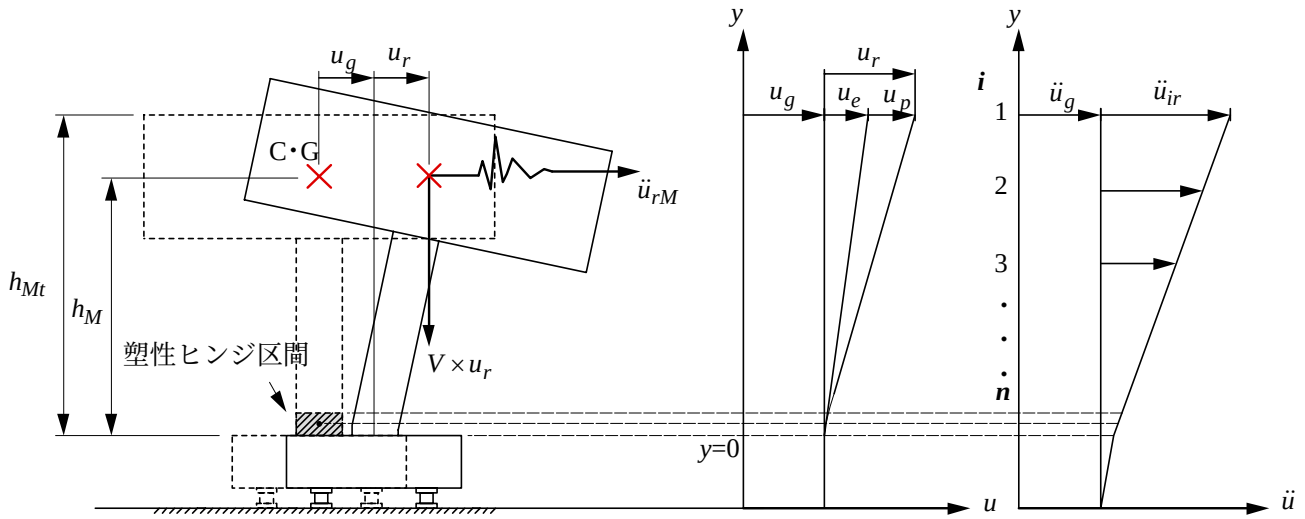


図-2 橋脚の変位分布及び加速度分布

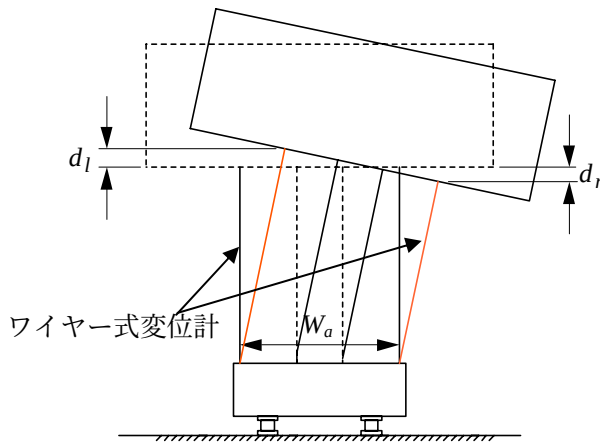


図-3 ワイヤ式変位計の位置

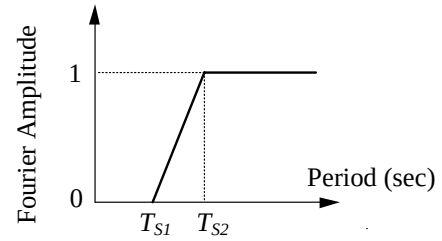


図-4 $\ddot{\theta}_{rM}$ に用いたローパスフィルター

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。

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

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、図-6に示す振動台の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)を用いる方法と式(5)

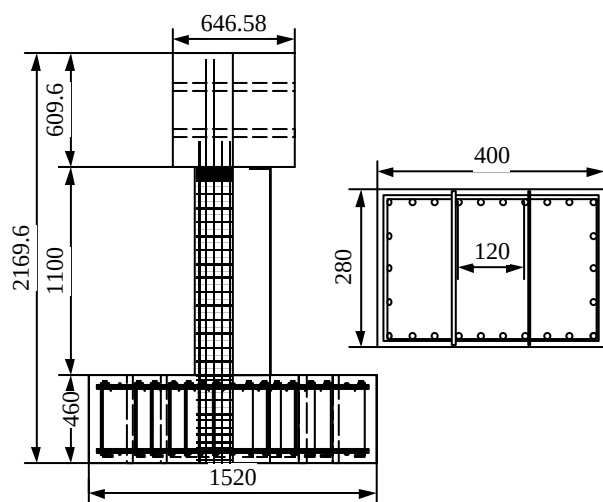
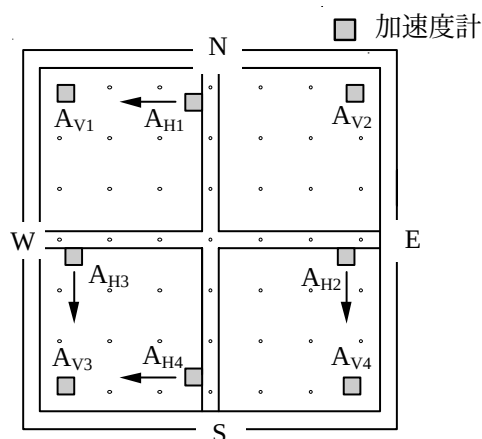


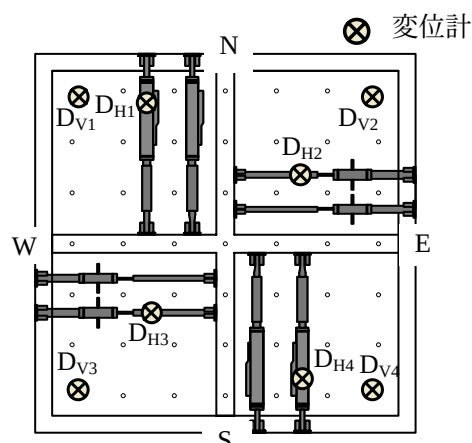
図-5 対象橋脚



写真-1 実験状況及びロードセル



(a) 加速度計



(b) 変位計

図-6 振動台の加速度計及び変位計

を用いる方法の2つの方法が利用可能である．ここでは，式(1)から求める方法を手法Ⅰ，式(5)から求める方法を手法Ⅱと呼び，それぞれ以下において適用性を検討する．

3. 検討に用いる振動台加震実験

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．

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，せん断支間比は7.8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，鉛直力としては±220 kN，水平力としては±88 kNまで測定可能である．また，前述した通り，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．入力継続時間は 16.72 秒である．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

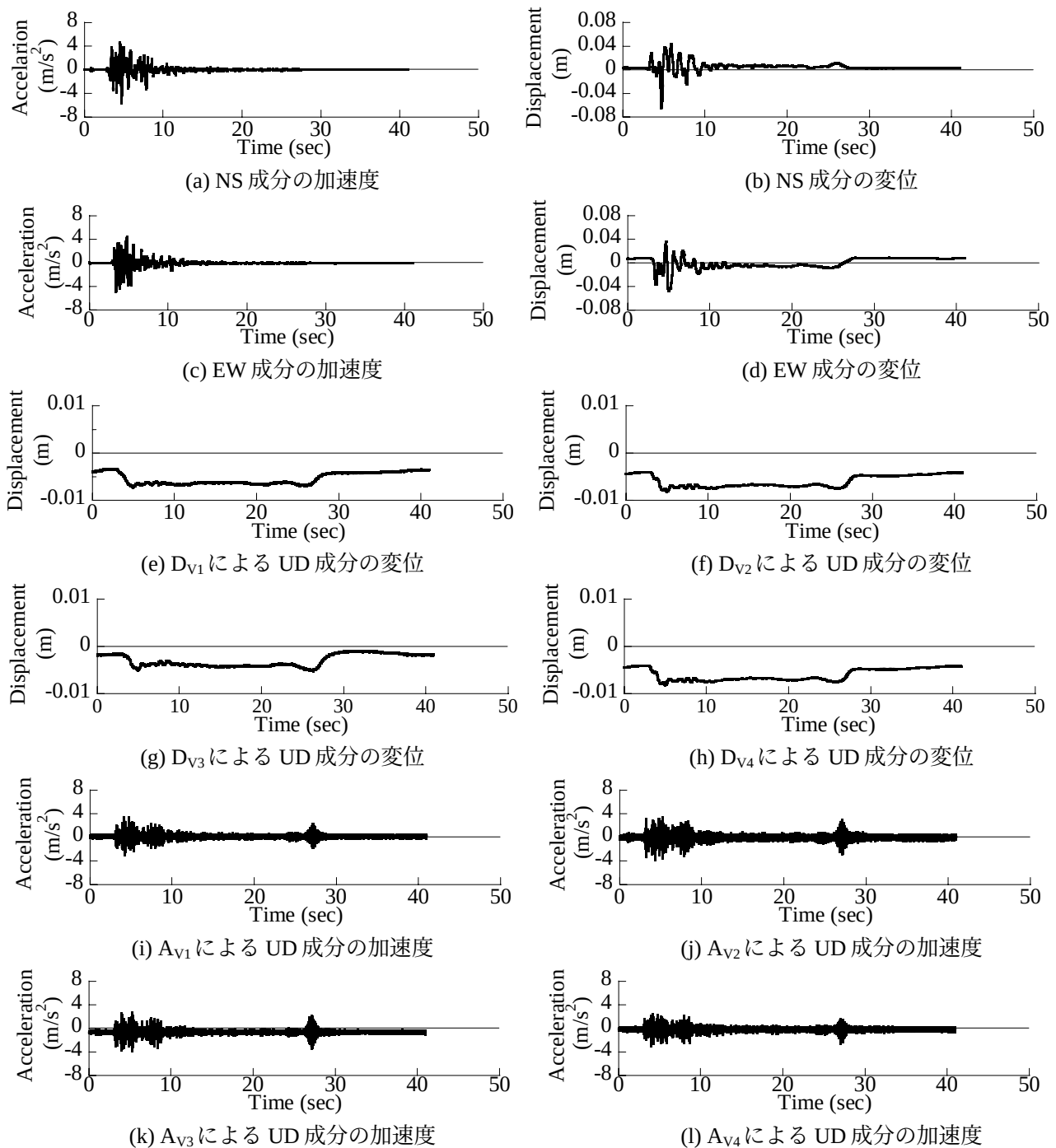


図-7 振動台の加速度及び変位

力した。図-6 に示すように、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-7 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 による橋脚の履歴の推定

図-8及び図-9に、4個の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。

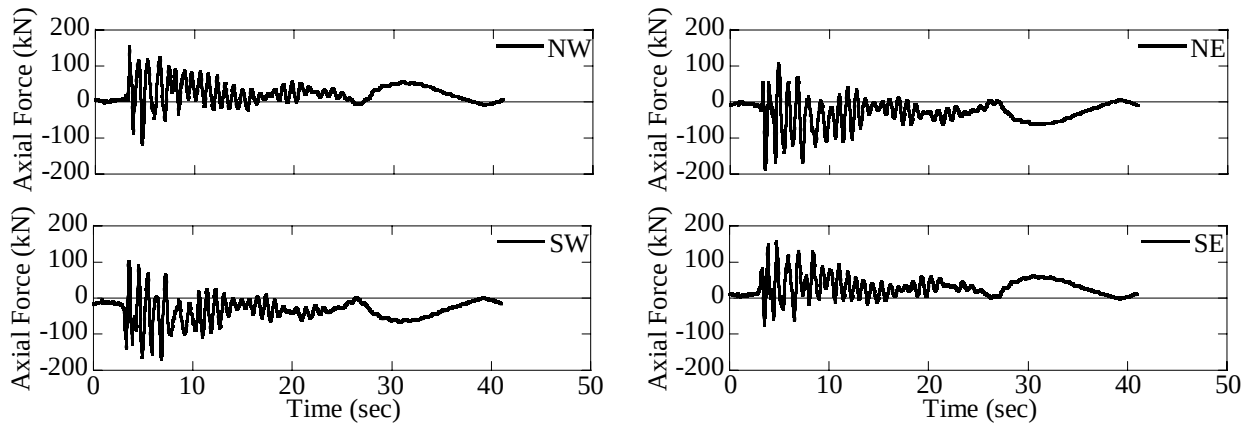


図-8 4つのロードセルによって計測された鉛直力（フィルターをかけない場合）

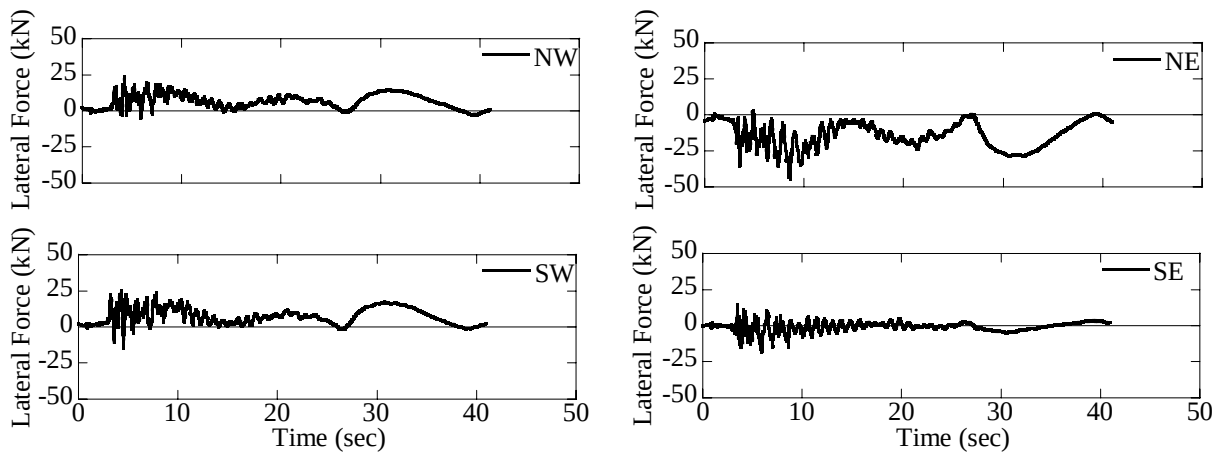
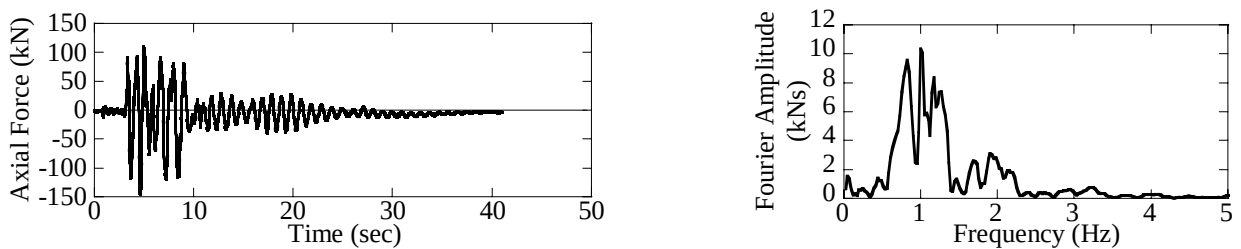
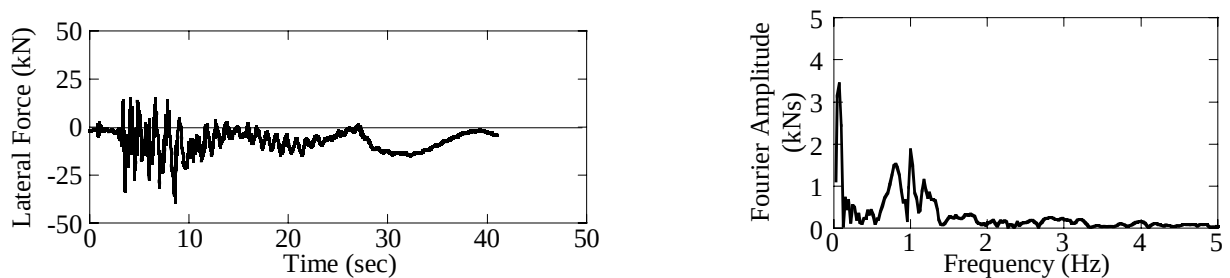


図-9 4つのロードセルによって計測された水平力（フィルターをかけない場合）



(a) 鉛直力 V_{Li} 及びそのフーリエスペクトル



(b) 水平力 F_{Li} 及びそのフーリエスペクトル

図-10 フィルターをかける前の鉛直力 (V_{Li}) 及び水平力 (F_{Li}) の時刻歴及びフーリエスペクトル

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-10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-9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

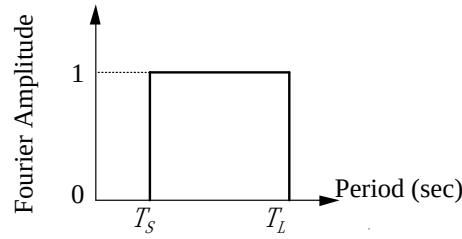
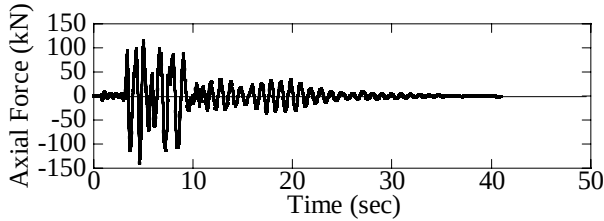
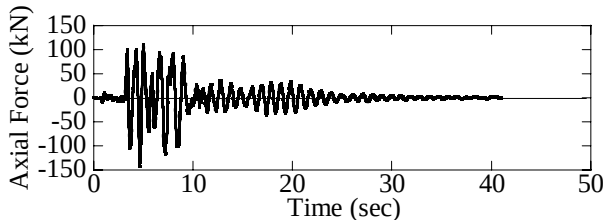


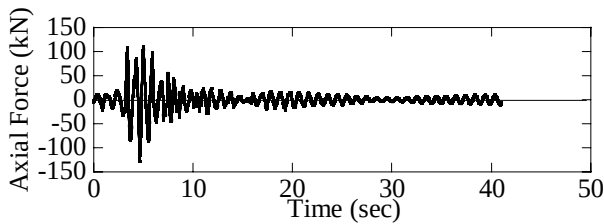
図-11 手法 I に用いたバンドパスの形状



(a) $T_L = 10.0$ sec



(b) $T_L = 2.0$ sec



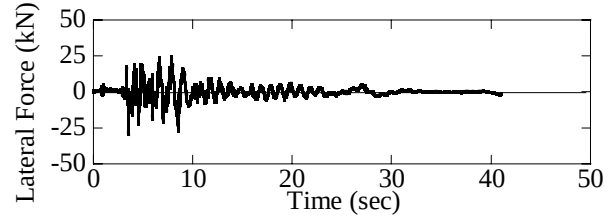
(c) $T_L = 1.0$ sec

図-12 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

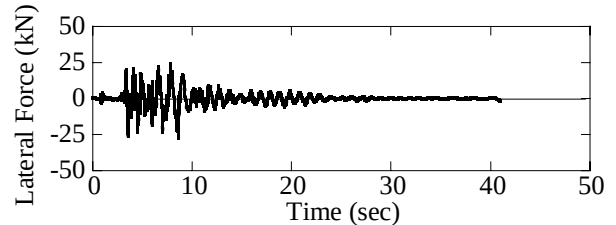
め、紙前の都合ここには示していない。

この長周期成分のドリフトを図-11 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。供試体の加震前及び加震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。

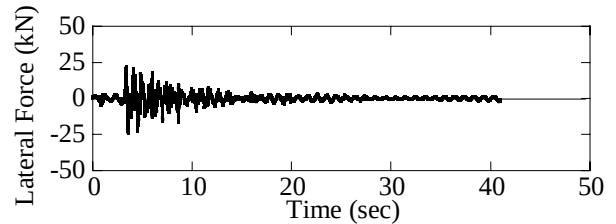
長周期側の遮断周期 T_L を 10 秒, 2 秒, 1 秒と変化させた場合の, それぞれ鉛直力 V_L 及び水平力 F_L を図-12 及び図-13 に示す。 $T_L = 10$ 秒のフィルターをかけるだけで, 鉛直力 V_L , 水平力 F_L ともに長周期のドリフトはかなり小さくなる。鉛直力 V_L の最大値は 140.0 kN とオリジナルの鉛直力に比較して



(a) $T_L = 10.0$ sec



(b) $T_L = 2.0$ sec



(c) $T_L = 1.0$ sec

図-13 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

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-14 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,

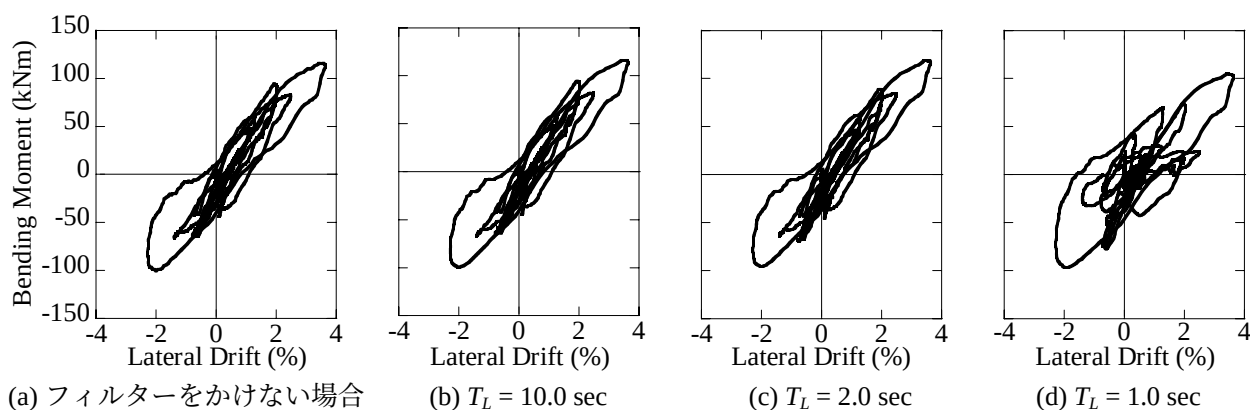


図-14 手法Iによる曲げモーメント～水平ドリフトの履歴

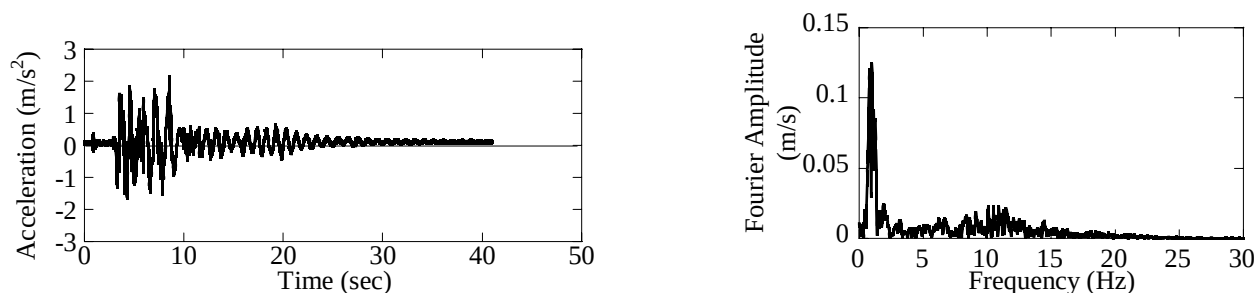


図-15 フィルターをかける前の上部ブロック重心位置における絶対加速度及びフーリエスペクトル

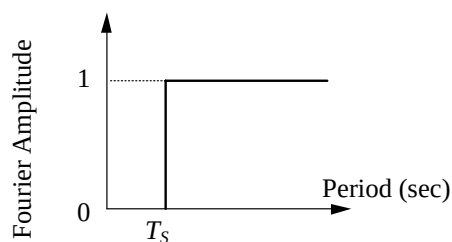


図-16 手法IIで用いたローパスフィルター

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ー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-14では $u_r = (u_g + u_r) - u_g$ として求めた相対変位を用いている。図-14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による橋脚の履歴の推定

図-15 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 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

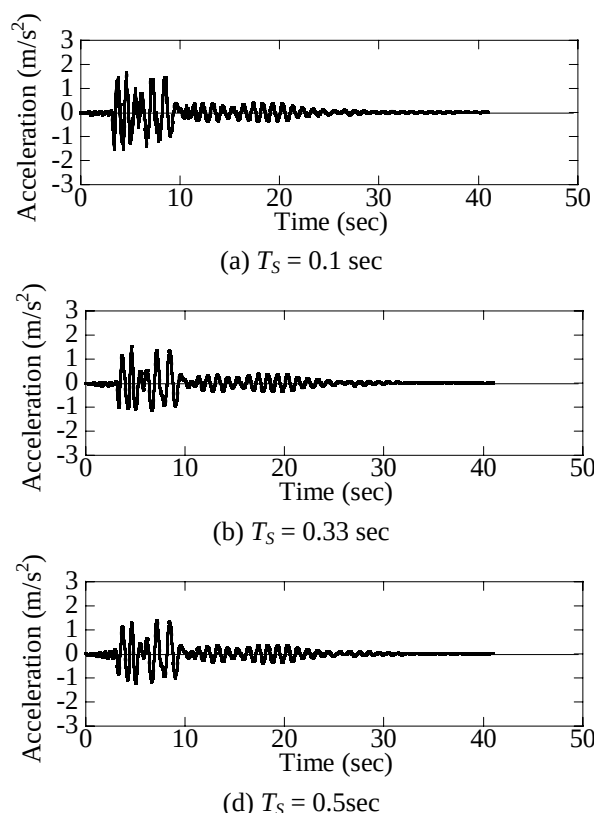


図-17 ローパスフィルターをかけた場合の上部ブロック重心位置における絶対加速度

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

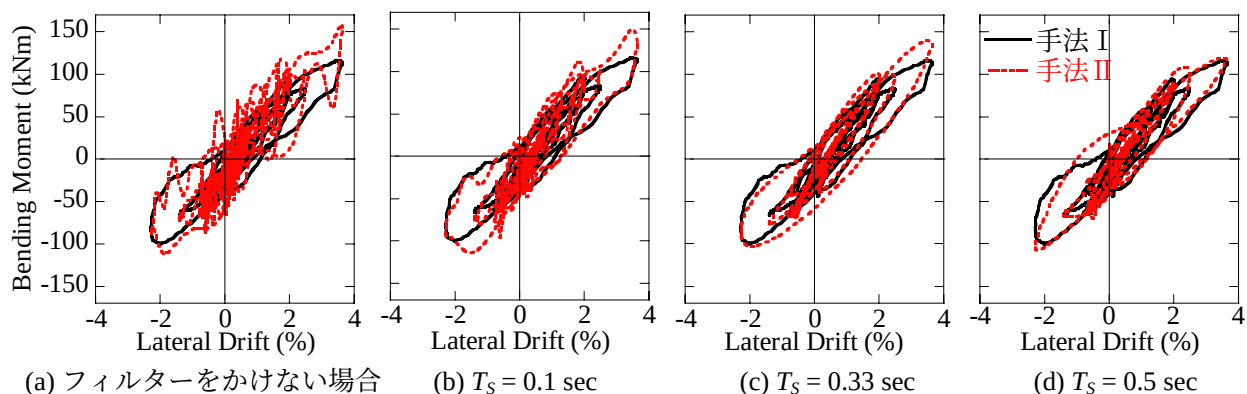


図-18 手法IIによる曲げモーメント～水平ドリフトの履歴

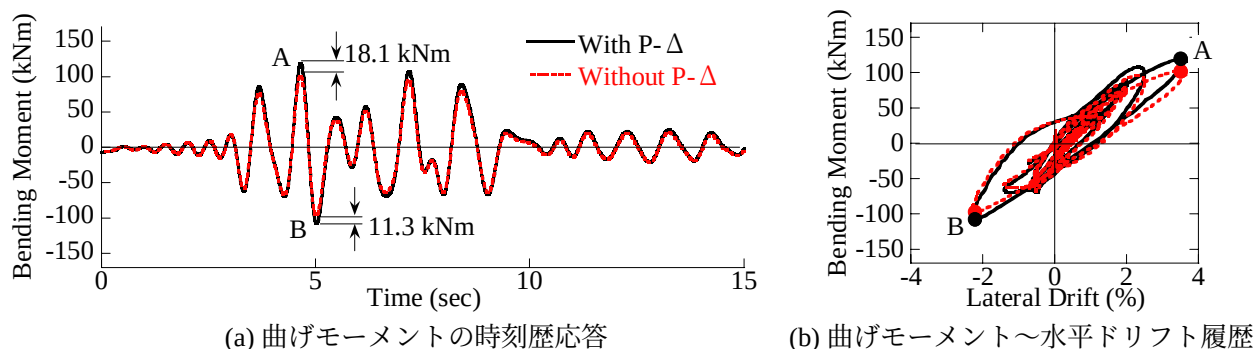


図-19 P- Δ 効果の影響 (手法II, $T_s=0.5$ sec)

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0.47～0.98秒であることから、図-16に示すローパスフィルターにおいて短周期側遮断周期 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-17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 m/s^2 とオリジナルの最大加速度 2.06 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 m/s^2 、 1.40 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-18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

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- Δ 効果を見捨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-19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- Δ 効果を見込まなくて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- Δ 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- Δ 効果を見込んだ場合の点A、Bの曲げモーメント117.0 kNm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-20である。ここでも、上記と同じく $T_s=0.5$ 秒とした場

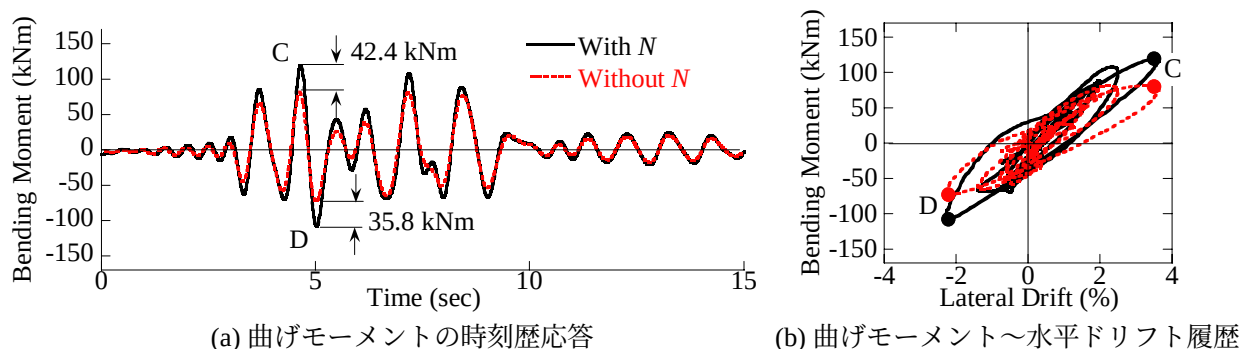


図-20 上部ブロック回転慣性モーメント N の影響 (手法Ⅱ, $T_s=0.5\text{sec}$)

合の結果を示している。図中の点C, Dは上部ブ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。

7. 結論

振動台加震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整理し、これらの適用性を実振動台加震実験結果に基づいて検討した。本検討結果から得られた結論は、以下の通りである。

1. 3方向加震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では模型の変形モードに応じて模型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。
2. 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、おおむ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。

3. 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。

謝辞：本実験に用いた振動台加震実験は、東京工業大学とUCB校との共同研究に基づくものであり、UCB校のS. Mahin教授の指導で実施されたものである。また、本研究の実施に際して、(独)土木研究所の堺淳一氏から数々貴重な御助言を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

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.

(2007.4.6 受付)

ACCURACY OF EVALUATION OF COLUMN BENDING MOMENT BASED ON SHAKE TABLE TESTS

Takashi MATSUMOTO, Kazuhiko KAWASHIMA

Accuracy of bending moment of single bridge column which is evaluated by shake table test was clarified using two methods; (1) method to evaluate column bending moment based on forces measured by load cells, and (2) method to evaluate inertia force which is imposed to column. It is found from implementation of two methods to a shake table excitation test that scattering of column bending moment is extensively large between two methods. Hystereses evaluated based on measured force by load cells are smooth while the same hystereses evaluated based on measured accelerations are rough. Careful evaluation for contributing mechanisms and accuracy of measured data including phase delay is inevitable for accurate determination of column bending moment.