

地盤-基礎系模型を用いた橋梁のハイブリッド 振動実験に関する研究

小林 寛¹・田村 敬²

¹正会員 工修 国土交通省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室
(〒305-0802 茨城県つくば市大字旭1)

²正会員 工博 国土交通省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室長 (同上)

In this paper, we examine the applicability of hybrid vibration experiment to study seismic response of bridge-soil system that consists of superstructure, pier, foundation and surrounding soils. The hybrid vibration experiment combines shaking table test and numerical response analysis, and the advantage of this experiment is that only a part of structure whose seismic behavior is unknown or complicated is necessary to be actually modeled and the rest of structure is numerically modeled. In the present study, we demonstrate results of the hybrid vibration experiment, and discuss the problems to be solved for the real-time experiments.

Key Words : hybrid vibration experiment, shaking table test, bridge foundation, soil-structure system, numerical analysis, real-time experiment

1. はじめに

道路橋示方書を始め、橋梁の耐震設計は一般に上部構造（橋脚-上部構造）と基礎構造（地盤-基礎構造）を切り離して行われている。これは上部構造と基礎構造を切り離して考えることで地震時の挙動が把握しやすく、物理的にも理解しやすいためである。しかし、地震時に上部構造が基礎構造に及ぼす影響、また基礎構造が上部構造に及ぼす影響が互いに存在するのは明らかであり、特に両者もしくは一方が損傷領域に入った場合には、その影響が顕著になると考えられる。したがって、橋梁全体系（地盤-基礎構造-橋脚-上部構造）の連成を考慮した耐震設計法を構築することは、橋梁設計の合理化、経済化に繋がると考えられる。また、既設橋梁の補強に関しても、橋梁全体系の連成を考慮することで合理的な補強方法を提案することができる。しかし、これら橋梁全体系の連成の影響を破壊過程まで考慮した実験的な研究は皆無であり、橋梁全体系の連成の影響は十分には解明されていないのが現状である。

このような背景を踏まえ、本研究では、橋梁全体系の振動挙動を解明する実験手法として、振動実験と振動応答数値解析とを結びつけたハイブリッド振動実験について検討を行った。ハイブリッド振動実験の特長は、振動挙動を明らかにする必要がある部分のみをモデル化すればよいため、大縮尺で精度の良い模型を作成することが可能になる。本研究では、

上部構造及び橋脚部を数値モデルに置き換え、振動挙動が複雑な地盤-基礎構造物系を実験模型として実験を行った。また、数値モデル部の応答を再現する油圧加振機は、油圧の性質上、高振動数の応答領域において時間遅れが発生するなどハイブリッド振動実験では、振動実験と数値解析を実時間で結びつけることが大きな課題となるが、ここでは、実時間化への検討課題を示すとともに、実験結果のまとめについて示す。

2. 実験の概要

(1) 実験対象とした実規模橋梁

実験対象とした橋梁は、30m×3 径間連続橋中間部の橋脚であり、橋梁の設計条件は平成8年道路橋示方書に準じた。橋脚-基礎の形状と地盤条件、橋梁の主要緒元等、詳細な情報は文献1に示す。

(2) 実験対象模型

実験では実規模の橋梁を用いて行うことができないため、スケールダウンした実験模型の選定を行った。そこで、図-1に示すように実験装置規模の制約から決定される最大の縮尺を考慮し、実験対象模型の幾何学的縮尺を1/4とした。また、図-1に示すようにハイブリッド振動実験では、加振直角方向に対して配置される杭4本の内2本分を取り出し、2列×2本の地盤-杭基礎系の部分模型を対象とした。そのため、フーチング底面へ作用させる外力は、

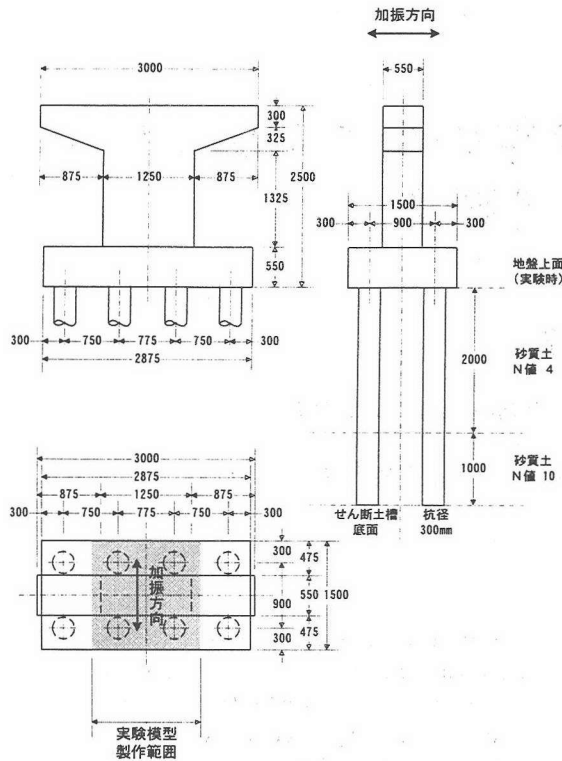


図-1 模型橋脚-基礎の形状と地盤条件

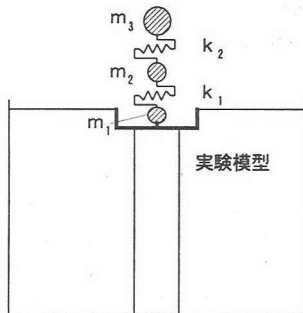


図-2 数値モデル部

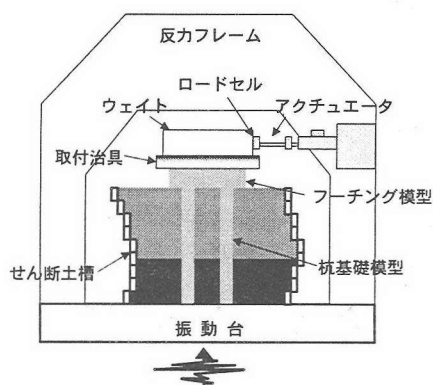


図-3 地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド実験

2列×4本の杭基礎に載荷するフーチング底面の地震力の1/2となる。また、橋梁全体の破壊過程の検証を目的の一つとするため、実験材料は、実構造物と同じ鉄筋、コンクリートを用いたRC杭構造とした。模型杭の鉄筋は、鉄筋の断面積比が実杭と模型杭で同じになるように径及び本数を決定した。

表-1 数値モデル部の各パラメータ

数値モデル部	実験対象物	
	質点の質量(kg)	フーチング m_1
	橋脚 m_2	1012
	上部構造 m_3	3682
バネ剛性 (N/m)	橋脚 k_1	8.239×10^7
	支承 k_2	4.045×10^8

(3) 実験手法

本研究で行うハイブリッド振動実験では、図-2に示すように地盤及び杭基礎を実験模型、フーチング、橋脚、支承、上部構造を数値モデルとした。具体的には図-3に示すように、振動台上にせん断土槽を据付け、地盤模型及び杭基礎模型を作成する。ここで、杭先端部とせん断土槽底面の接続部はヒンジ構造とした。

杭基礎模型の上にはフーチング模型及び取付治具、ウェイトを取付け、水平方向にハイブリッド振動実験用のアクチュエータと接続するとともに、せん断土槽を所定の入力波形で水平方向に加振する。鉛直方向には、上部構造の死荷重と橋脚及びフーチングの自重に相当する荷重をウェイト、取付治具、フーチング模型で調整し、杭基礎模型に死荷重として常時与える。加振時には、フーチング上面のアクチュエータ先端に設置されているロードセルからフーチング上面の反力を測定し、上部構造-支承-橋脚-フーチングで数値モデル化された振動応答数値解析を行う。次に、計算されたフーチングでの応答変位をアクチュエータで入力し、橋梁全体系の応答を再現する。ここで、回転成分に関しては、系に及ぼす影響が小さいものとして無視した。なお、本研究で用いた振動応答数値解析及びアクチュエータの遅れ応答手法等、実験手法の詳細については文献1)~5)に示す。

本実験で設定した数値モデルの各パラメータを表-1に示す。また、橋脚に関しては、非線形バイリニア型で数値モデル化を行った。

(4) 慣性力補正

実験模型をハイブリッド実験装置に取り付ける際、模型と荷重を検出するロードセルの間に取付治具が必要になる。しかし、本実験では、ロードセルで検出した荷重を数値モデルに取り込むことより、ロードセルで検出される荷重には、治具の質量に起因する慣性力が含まれる。このため、実験対象物ではない治具の慣性力による影響を取り除く必要がある。ロードセルで検出される荷重を f_{sx} 、治具に取り付けた加速度計で計測される加速度を A_{sx} 、治具の質量を m とすると、補正した荷重 f'_{sx} は $f'_{sx} = f_{sx} - m \times A_{sx}$ で求められる。ここでは、実験の制御上、杭模型より上の部分全てに対して慣性力補正を行った。

(5) 地盤の作成

地盤模型には乾燥珪砂7号を使用し、表層の2mを目標N値4、それ以深を目標N値10の2層構成とした。実験に先立ち、珪砂の乾燥密度とN値の関

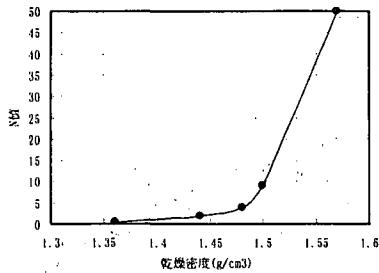


図-4 珪砂7号の密度とN値の関係

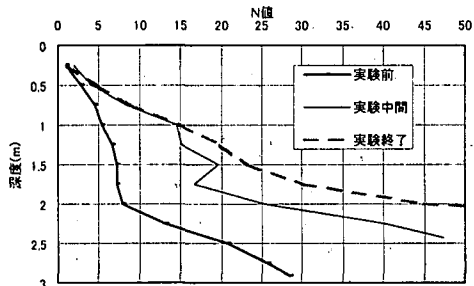


図-5 地盤特性値の計測結果

係を調べるため地盤密度検定を行った。高さ 1.8m、直径 0.5m の円柱式の容器に珪砂をつめ、規定の密度まで振動台で振動を与えることにより締固めを行い、スウェーデン式サウンディング試験で換算 N 値を求めた。その結果を図-4 に示す。密度が 1.45 から 1.55g/cm³ にかけて急激に N 値が変化している。これより、本実験で目標にしている N 値 4 から N 値 10 にかけては、密度の変化が少ないため、管理が難しいことが分かる。模型地盤の作成にあたっては、0.25m ごとにコア採取の上、密度管理を行った。模型地盤は、せん断土槽地表面、すなわち、フーチング底面から 2.0m までの表層を第 1 層、それ以深の地表面下 2.0m からせん断土槽底面までを第 2 層としているが、第 2 層は振動式の締固め機を使用し、0.25m ごとに 3 回締固めを行った。第 1 層については、足ふみ 5 回の締固めを行った。

(6) 土槽内地盤特性値の計測

作成した模型地盤に対してスウェーデン式サウンディング試験を行い、土槽内の地盤特性値を計測した。計測結果を図-5 に示す。計測は、実験前、実験中間時と実験後に行ったが、実験を行うにしたがい、模型地盤が締固まっているのが分かる。

3. 実験の安定性に関する検討

ハイブリッド振動実験を実時間で発散することなく安定に行うためには、実験模型の特性、数値モデルの特性、加振機の特性等、種々の要素を総合的に検討する必要がある。なかでも、実時間ハイブリッド振動実験の安定性は、実験に使用する加振機の動特性に依存するところが大きく、使用する加振機によって、実験を安定に行うことができる実験対象物が限られる。こうしたことを踏まえ、実験を安定に行うためには、文献 6) にあるように、剛性に関する

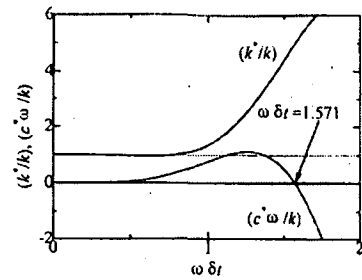


図-6 加振機遅れ手法に関する剛性と減衰の関係⁶⁾

る安定性と質量に関する安定性の 2 つの項目について考える必要がある。

剛性に関する安定性は、加振機の遅れ補償の誤差に起因して発生する負の減衰による不安定化によるもので、遅れ補償アルゴリズムと加振機の応答遅れ時間に依存する。図-6 に本研究で用いた遅れ補償方法 (3 次予測) に関する見かけ上のばね定数、減衰定数と加振機応答の円振動数 ω と加振機の応答遅れ δt の積の関係を示す。これによると、みかけ上の減衰 c^* は $\omega \delta t$ がある限界値 (=1.571) をこえると負になっており、実験が発散するため、これが加振機遅れ補償手法の適用限界の一つということになる。これより、剛性に関する限界の評価方法は、式 (1) の通りとなる。

$$\omega_{\max} < \frac{1.571}{\delta t} \quad (1)$$

ここで、 δt は加振機の応答遅れ時間、 ω_{\max} は実模型部分のばね剛性を 5 倍に置き換え、全体構造物系の固有振動解析を行い、得られた最高次の固有円振動数を示している。なお、実模型のばね剛性を 5 倍にする理由は、見かけ上の減衰 c^* が 0 となる時の見かけ上の剛性 k^* が実模型の剛性の 5 倍となっているためである。

これに対して、質量に関する安定性は、実験模型が接続される箇所の数値モデル質点の質量 M と実験模型の質量 m から決まるものである。図-7 において $k=0$ とおくと、運動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{x} = -f + q = f - m\ddot{x} \quad (2)$$

この式をラプラス変換すると、次式になる。ただし、 s はラプラス変換子、大文字は小文字のラプラス変換である。

$$MXs^2 = F - mXs^2 = F - mHXs^2 \quad (3)$$

X は数値解析で算出される変位、 X'' は加振機の遅れ補償処理をした結果、実現される変位で、加振機遅れ補償処理の伝達関数を H とすると、 $X'' = HX$ で表すことができる。以上の関係は図-8 に示すブロック線図で示すことができる。実験を安定に行うためには、この一巡伝達関数 Δ のゲインが 1 未満であることが要求される。 Δ は、

$$\Delta = \frac{m}{M} H \quad (4)$$

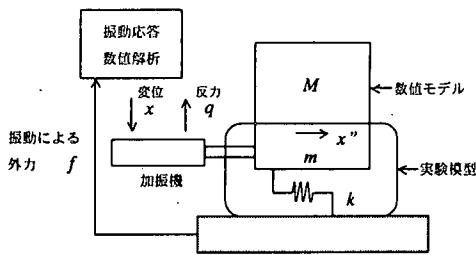


図-7 Mとmの関係

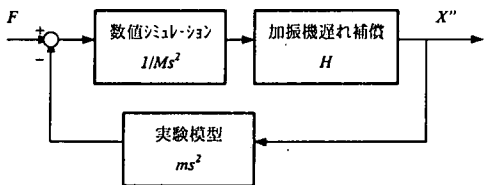


図-8 一巡伝達関数のフィードバックループ

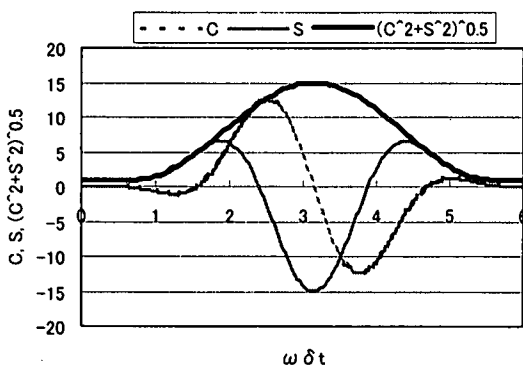


図-9 加振機の遅れ補償手法の周波数応答特性

と表されるため、

$$\frac{m}{M} < \frac{1}{|H|} \quad (5)$$

が安定性の条件となる。すなわち、 M に対する m の比がある値を超えると不安定となる。本研究で用いている加振機の応答遅れ補償手法は式(6)で表される。

$$X' = \sum_{i=0}^3 a_i X_i \quad (6)$$

ただし、係数 $a_0=4, a_1=-6, a_2=4, a_3=-1$

また、実験模型の応答を振幅1の正弦波、加振機の応答遅れを δ と考えると X_i は次式で示すことができる。

$$\begin{aligned} X_i &= \sin \omega(t - i \times \delta t) \\ &= \sin \omega t \cos(i \times \omega \delta t) - \cos \omega t \sin(i \times \omega \delta t) \end{aligned} \quad (7)$$

これを上式に代入し、整理すると

$$\begin{aligned} X' &= C \sin \omega t + S \cos \omega t \\ &= \left\{ \sum_{i=0}^3 a_i \cos(i \times \omega \delta t) \right\} \sin \omega t + \left\{ \sum_{i=0}^3 a_i \sin(i \times \omega \delta t) \right\} \cos \omega t \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $C, S, \sqrt{C^2+S^2}$ を $\omega \delta t$ の関数として図示すると、図-9のようになる。これより、本研究

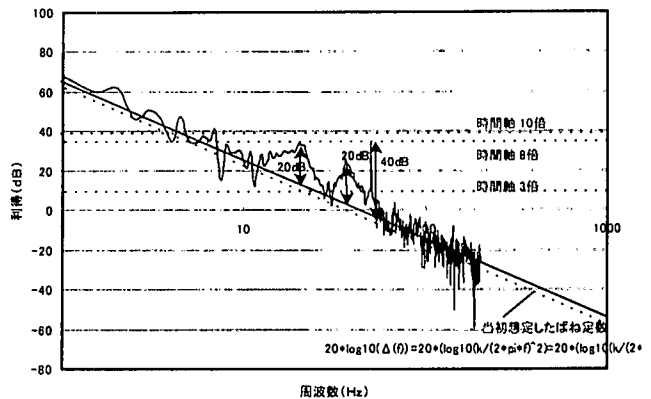


図-10 一巡伝達関数の周波数特性

で用いている遅れ補償の出力の振幅は入力最大15倍となる可能性が分かり、 H は15が最大となる。ここで本研究で用いている M は2967kg、 m は9251kgで m/M は約3となり、実験不安定領域であるが、2.で示したように、 m 全体を慣性力補正しているため、見かけ上の m は、ほぼ0となる。従って、 m/M はほぼ0となり、安定に実験が行うことができる。

さらに、本研究のような実験模型を振動台で加振させて行うハイブリッド振動実験では、上記の安定性の他に実験模型固有の振動に伴う安定性の検討を行う必要がある。具体的には、(1)振動台加振に伴い実験模型固有の振動が発生、(2)振動により荷重が発生、(3)荷重が計測され、数値モデルに振動変位が発生、(4)発生した振動変位で実験模型が加振され、実験模型の振動が増幅するといった現象である。この影響は、先に述べた一巡伝達関数の中に、指令値 X_i に対する加振機変位 X の加振機周波数応答特性 H_{act} と、加振機変位に対する実験模型反力 F の実験模型周波数応答特性 H_{model} を考慮する必要がある。そこで、本研究で用いる実験模型、加振機について上記の検討を行った。この不安定現象は比較的高い振動数領域(目安として20Hz~200Hz)で生じる現象であるため、高い振動数領域で一巡伝達関数のゲインについて次式により評価した。ここで α は実験の時間軸の伸長率である。

$$\Delta = 15 \frac{H_{act} \times H_{model}}{M(\alpha \omega)^2} \quad (9)$$

H_{act} と H_{model} をあわせて計測した結果を図-10に示す。同図より、一巡伝達関数 Δ は、10Hz~50Hzで凹凸があるものの、右下がりの直線となっている。すなわち、杭以下の実験模型の特性は概ねばね要素としての特性を有していると考えられる。そこで、実験模型がばね要素のみで構成されていると仮定し、そのばね定数を k とすると、加振変位と反力の関係 H_{model} は k となる。式(9)において H_{act} を理想的に1とし、 α を1とすると、式(10)で表される。

$$\Delta = 15 \frac{k}{M \omega^2} \quad (10)$$

式(10)より算出されるゲインと振動数の関係は次式

のように表すことができる。

$$20 \times \log_{10}(\Delta(f)) = 20 \times \log_{10}\left(15 \frac{k}{M(2\pi f)^2}\right)$$

$$= 20 \times \left\{ \log_{10}\left(15 \frac{k}{M(2\pi)^2}\right) - 2 \log_{10}(f) \right\} \quad (11)$$

図-10には、計測データに近似する直線を記入しているが、概ね計測値は直線にしたがっていることが分かる。式(11)から1Hzにおけるばね定数 k を求めると、約20MN/mとなる。これは、当初想定していたばね定数の約2倍となっており、地盤が想定よりも固めに作成されたことを意味している。また、約20、35、50Hzの各振動数にピークが存在し、単純なばねを想定したものよりも大きな値を示している。このような現象は、実験模型-せん断土槽そのものの動特性、実験模型-加振機連結部分の動特性等により出現したことが考えられる。したがって図-10の検討結果より、本研究で対象としたハイブリッド振動実験を安定的に行うためには、時間軸を8~10倍に伸長して実験を行う必要があることが分かる。

4. 実験結果

ここでは、3.で検討したように実験の時間軸を10倍に伸長させて行った実験結果の一例を紹介する。対象とする実験ケースは、橋脚の応答特性を4種類想定し、橋脚の応答が卓越する振動数の正弦波を入力波としたものである。本ケースでは、土槽及び地盤を含めた実験対象構造物模型のFEM解析¹⁾より算出した橋脚の応答が卓越する振動数55.3Hzを入力振動数とし、前後にテーパーを付けた正弦波

5波225galを入力した。また、橋脚の応答特性は、バイリニア型の非線形応答特性で置き換えた。非線形特性Aは、等価線形化解析による橋脚の耐力(変曲点:2.3mm、 1.847×10^5 N)に基づいてモデル化したもの、非線形特性Bは、地震時保有水平耐力法による橋脚の耐力(変曲点:1.1mm、 9.11×10^4 N)に基づいてモデル化したもの、非線形特性Cは特性Bの耐力の1/2としたもの、非線形特性Dは特性Bの耐力の1/4としたものである。なお、橋脚の初期剛性は全て同一とした。

実験から得られた橋脚の変位-荷重関係の履歴を図-11、数値モデル部の質点の応答を図-12にそれぞれ示す。なお、数値計算による変位はドリフトを起こしていたため、図-12の変位については3Hz~30Hzのバンドパスフィルタをかけたものを示している。ここで橋脚の履歴に着目すると非線形特性Aの場合を除いて、橋脚が塑性域に入っていることが分かる。当然ながら特性D>C>Bの順に応答塑性率が大きい。ここで、各質点の振幅をみると、橋脚の応答は特性A>B>C>Dの順に大きい。これは、橋脚が塑性化することにより、応答が小さくなっていることを示している。また、AとBについて最大振幅は同程度であるが、これは特性Bの応答塑性率が小さいためである。次に、フーチングの応答を見てみると、振幅がA>B>C>Dの傾向を示すものの、橋脚の振幅の大小と比較すると、ほとんど振幅の大きさに違いは見られない。このケースに限れば、橋脚の塑性化程度が基礎構造物の応答に及ぼす影響は小さいといえる。この理由としては、橋脚の卓越振動数を入力としていることにより、フーチングの応答の影響が小さいことと、次のような振動台加振による影響があることが考えられる。すなわち、本実験

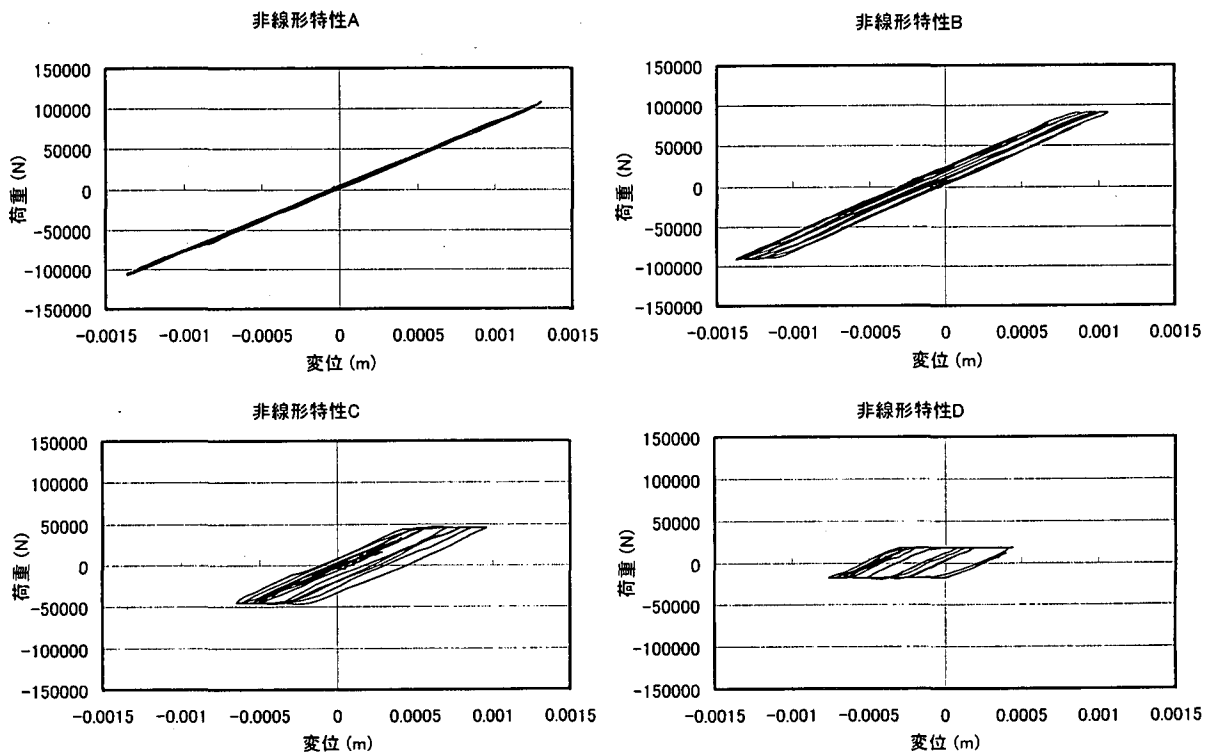


図-11 橋脚の非線形履歴特性

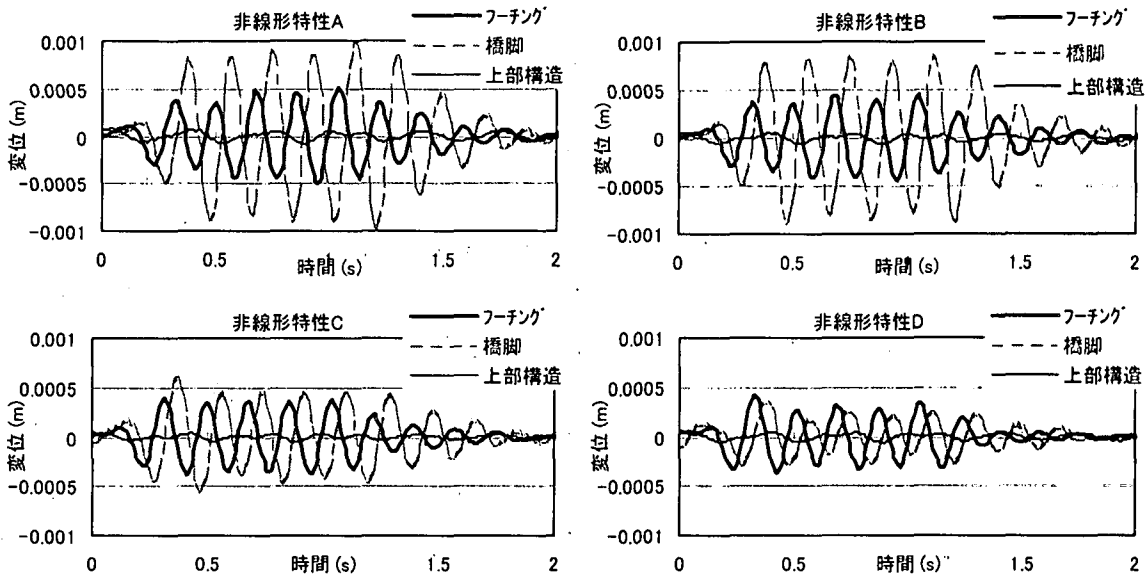


図-12 数値モデル質点の変位時刻歴

では、時間軸を10倍に伸長したため、振動台入力振動数を5.53Hzとした。ここで、せん断土槽-地盤-杭模型系の固有振動数が5~10Hzの領域にあるため、55.3Hzの入力では想定していなかったせん断土槽-地盤-杭模型系の応答が励振され、フーチングの応答に影響を及ぼしたものと考える。

5. まとめと今後の課題

本研究では、地盤-基礎系をモデル化し、橋脚-支承-上部構造系を数値モデルで置き換えたハイブリッド振動実験を行い、橋梁全体系の振動挙動について検討した。その結果、橋脚の塑性化程度にともない橋脚の振動応答は小さくなるものの、基礎構造の振動応答には、顕著な影響は及ぼさなかった。ただし、入力波が橋脚の卓越振動数であったこと、実験の時間軸を伸長していたこと、振動台を地盤-基礎系の固有振動数で加振したことなどが実験結果に影響を及ぼしたことが考えられる。

また、本研究では、地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験の実時間化への検討課題を明らかにした。今後は、実時間実験の実現に向け、本研究で得られた課題について検討していく必要がある。

謝辞：本研究は、平成11年度科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施したものである。(社)土木学会技術推進機構に設置された「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」第3分科会第3班においては貴重な意見を賜った。また、実験の安定性に関する

検討については、日立製作所機械研究所堀内主任研究員、梅北研究員、日立製作所土浦工場今野主任技師より多くの助言を頂いた。ここに、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 小林寛、田村敬一：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験，第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，2000.3
- 2) 堀内敏彦、中川正紀、菅野正治、今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発（第1報，補償方法と1自由度系の実験への適用），日本機械学会論文集（C編）61巻584号，pp.64-72，1995.4
- 3) 堀内敏彦、中川正紀、菅野正治、今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発（第2報），機械学会論文報告集，62-599，C，pp.2563-2570，1996
- 4) T. Horiuchi, M Nakagawa, M. Sugano and T. Konno: Development of Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation, *Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, No.660, 1996
- 5) 梅北和弘、亀谷雅嗣、桃井康行、堀内敏彦、井上雅彦、菅野正治、今野隆雄、多田野有司、山岸渡：平面3自由度加振型実時間ハイブリッド耐震試験装置向けスーパーリアルタイムコントローラ(SRC)用C言語ライブラリの開発，第40回自動制御連合講演会，pp.393-396，1997.11
- 6) 堀内敏彦、今野隆雄：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発（第5報 加振機遅れ補償手法の改良），機械学会論文報告集，C（投稿中）