

地盤－基礎系模型を用いた ハイブリッド振動実験

小林 寛¹・田村 敬一²

¹正会員 工修 建設省土木研究所 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 建設省土木研究所 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 ground. The hybrid vibration experiment combines shaking table test and numerical response analysis, and the merit 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 introduce an actual specimen for soil-foundation system. The validity of hybrid vibration experiment for the whole bridge system is demonstrated.

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

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を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した。ハイブリッド振動実験の特長は、図-1に示すように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。振動実験では入力波を種々変化させて橋梁全体系を対象としたハイブリッド振動実験の適用性及び有効性を確認した。

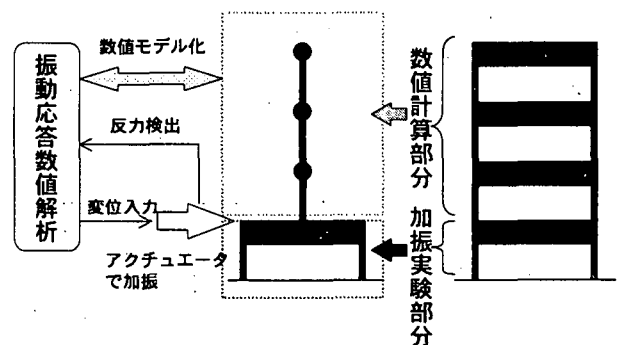


図-1 ハイブリッド実験のイメージ

2. 実時間ハイブリッド振動実験について

ハイブリッド実験とは、アクチュエータ（加振機）を用いた加振実験と振動応答数値解析を結びつけた実験であり、従来、ハイブリッド実験と呼ばれるものには振動台を用いたものは少なく、また、実験の時間軸を伸長した準動的実験が大部分であり、必ずしも実時間実験ではない。ハイブリッド実験をその制御方法の違いにより分類すると、図-2のよ

うになる。ここでは、実験の時間軸（準動的、実時間）、振動台加振の有無によって分類を行った。以下に、それぞれの実験分類別の研究を紹介する。

(1) 準動的実験（分類 A）

従来、ハイブリッド実験と呼ばれていたものはここに分類される。装置の制約（計算機的能力、アクチュエータの遅れ補償等）上、実験の時間軸を実際の時間軸よりも伸長した最も基本的なハイブリッド実験手法である。コンクリート構造物、鋼構造物等を対象とした数多くの実験事例が報告されている。例えば、建設省建築研究所で行われた実大建物の実験¹⁾は、加振機を複数台（8台）使用したハイブリッド実験である。また、多自由度の加振の例としては、鉄筋コンクリート構造物や鋼製橋脚を対象として、上部構造物の自重による軸力が作用するように制御するために、多自由度の加振を行っているハイブリッド実験がある^{2)~4)}。また、鋼製橋脚を対象として、静的繰り返し載荷実験時と同様の軸力及び端部曲げモーメントが作用するように制御するために、多自由度の加振を行っているハイブリッド実験⁵⁾がある。

(2) 実時間実験（振動台加振なし：分類 B）

伯野らにより最初の実施されたハイブリッド実験はアナログ計算機を使用したものであり⁶⁾、実時間実験に分類することができる。その他に、ダンパを供試体として実時間実験を実施した例がある⁷⁾。また、加振機の応答遅れを補償し、実時間実験に適用した一連の研究^{8)~10)}がある。

(3) 実時間実験（振動台加振あり：分類 C）

振動台そのものを加振機と考える「振動台型ハイブリッド実験」の検討を行っている例がある^{11)~13)}が、図-2に示すように供試体より上の部分を数値モデル化し、供試体を振動台で振動させ、上部に数値モデルの応答を加振するといったような実験の例はない。本研究で検討を行ったハイブリッド振動実験装置を用いて行う実験^{14), 15)}は、図-2の分類 C に属するもので実時間かつ振動台を用いた先導的なものであり、実時間ハイブリッド振動実験と呼んでいる。

実時間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。また、模型の作成に要するコストの低減を図ることが可能である。例えば、橋梁-地盤系の振動実験を行う場合には、振動挙動が複雑な基礎構造及び地盤のみをモデル化し、橋脚及び上部構造については数値解析により振動挙動を再現し、両者を結びつけることが可能になる。さらに、振動台で供試体を加振することにより、供試体の慣性力等を考慮することができるとともに、液状化の発生等、振動台を用いない従来のハイブリッド実験では考慮することができなかった現象の再現が可能である。なお、従来のハイブリッド実験よりも実験時間が短縮できるという（例えば、従来の実験では、時間軸を 50 倍に伸長する場合、30 秒加振の実験に 25 分を要する。）メリットもある。

3. 実時間ハイブリッド振動実験の制御

実時間ハイブリッド振動実験では、図-1に示すように、構造物全体のうち、実験により振動挙動を明らかにしたい部分のみを供試体として振動台上にセットし、それ以外の部分は振動応答数値解析モデルとして設定する。振動応答数値解析モデルは、構造条件（質量、減衰、剛性マトリックス）、振動台からの外力（振動台の加速度から算出）及び供試体の反力より構成され、振動実験における振動台からの外力及びロードセルにより計測された供試体の反力を取り込み、次ステップの供試体の変位を計算する。具体的には、振動台を加振することにより、振動台の加速度及び数値モデル化を行った構造物の構造条件（質量、減衰、剛性マトリックス）から供試体に与える変位を計算する。次に、計算された変位をアクチュエータにより供試体に作用させる。この処理を繰り返し行うことによって、地震時の構造物の応答を正確に再現することができる。

振動応答数値解析に用いる数値モデルの質量、減衰、剛性マトリックスを M 、 C 、 K 、相対変位ベクトルを x 、外力ベクトルを p 、数値モデルと実構造モデルの境界に発生する反力のベクトルを q とすると、数値モデルで用いる運動方程式は次式のように表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = p + q \quad (1)$$

振動応答数値解析では式(1)に基づいて、計測された反力ベクトル q と、与えられた外力ベクトル p から微小時間 Δt 後の振動応答（変位ベクトル x ）を計算する。

具体的には、中央差分法を用いて、微小時間内に次ステップの変位を計算するが、その概要を以下に示す。運動方程式 式(1)は、時刻 t_i においては式(2)を満たしている。ここで、添字 i は時刻 t_i の値であることを示す。

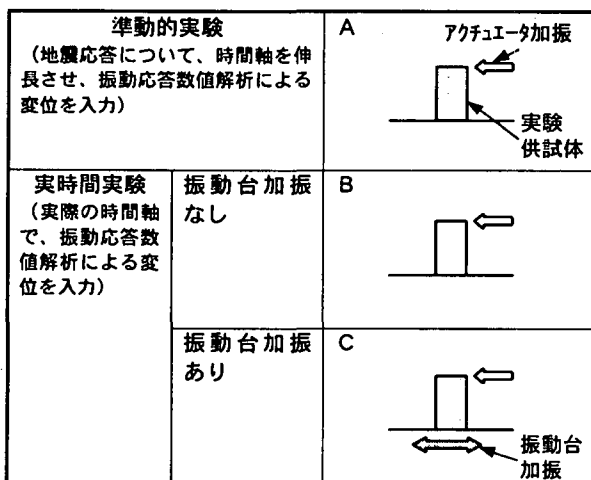


図-2 準動的ハイブリッド実験(A)と実時間ハイブリッド振動実験(C)の比較

$$M_n \ddot{x}_{ni} + C_{ni} \dot{x}_{ni} + K_{ni} x_{ni} = p_i + q_i \quad (2)$$

中央差分法では、微小時間 Δt における運動状態の変化が小さいと考え、時刻 $t_{i-1} = t_i - \Delta t$ から時刻 $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ までの加速度が一定であると仮定する。その結果、加速度 \ddot{x}_{ni} 及び、速度 \dot{x}_{ni} は式(3)、(4)のように表される。

$$\ddot{x}_{ni} = \frac{x_{n_{i+1}} - 2x_{n_i} + x_{n_{i-1}}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

$$\dot{x}_{ni} = \frac{x_{n_{i+1}} - x_{n_{i-1}}}{2\Delta t} \quad (4)$$

これらを式(2)に代入し $x_{n_{i+1}}$ について解くと、次式が得られる。

$$x_{n_{i+1}} = (M_n + \frac{\Delta t}{2} C_n)^{-1} \left\{ M_n (2x_{n_i} - x_{n_{i-1}}) + \frac{\Delta t}{2} C_n x_{n_{i-1}} + \Delta t^2 (p_i + q_i - K_n x_{n_i}) \right\} \quad (5)$$

すなわち、時刻 t_i における既知のデータから時刻 t_{i+1} の変位を求めることができる。上記の手順で次ステップの変位を計算し、アクチュエータに入力することを繰り返す。なお、計測された反力の入力からアクチュエータへ次ステップの変位信号を出力するまでの時間間隔 Δt は $2.08\text{ms}^{14)}$ である。

また、本実験では、実時間実験を可能にするため、以下に示すようなアクチュエータの遅れ補償を行っている。

実時間ハイブリッド振動実験では、アクチュエータの応答遅れがあると、数値計算の中で計算誤差が発生し、実験を発散させるような悪影響を及ぼす。しかし油圧アクチュエータでは、油圧の性質上、指令値を出した時刻に対して指令された変位をアクチュエータが実現する時刻は遅れることになる。つまり、振動応答数値解析によって求めた実現すべき変位（計算変位 x ）とアクチュエータにより実現される変位（実現変位 x'' ）が一致しない。そこで、図-3に示すように、過去の計算変位からアクチュエータの遅れ時間分だけ先の変位（予測変位 x' ）を予測し、予測変位を指令値として出力する。

その予測式は図-4に示すように、応答遅れ時間 δt 刻みの過去の計算変位から時間の n 次関数を求め、外挿する式であり、 δt 間隔の $n+1$ 個の既知のデータ点を通るような n 次関数を定め、 δt 先の値を予測する。次に、実現変位 x'' と計算変位 x を比較し、随時その値が等しくなるように予測変位 x' を修正する⁸⁾。本実験では変位予測に要する計算時間と予測精度を勘案し、式(6)に示す三次関数を用いている。

$$x' = \sum_{j=0}^3 a_j x_j \quad (6)$$

ただし、係数 $a_0=4, a_1=-6, a_2=4, a_3=-1$

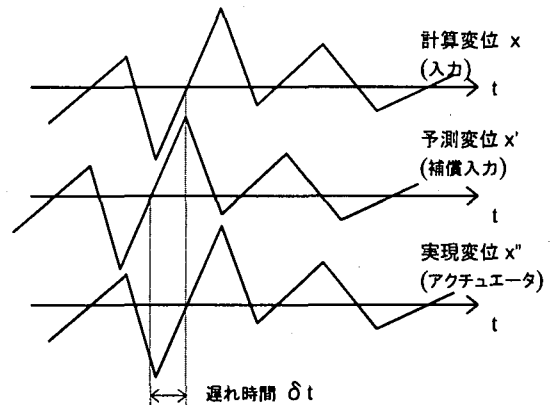


図-3 遅れ補償による変位予測

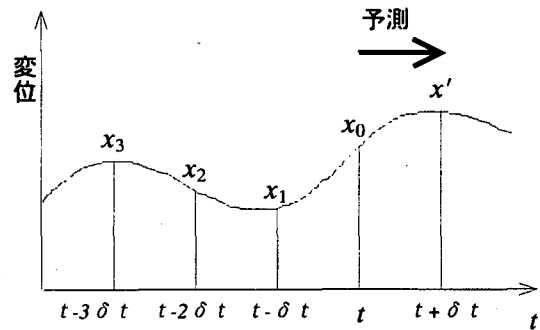


図-4 予測変位の計算方法

4. 実験対象とする実橋梁

実験対象とした橋脚は、図-5に示すような $30\text{m} \times 3$ 径間連続橋中間部の P2 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。図-6に橋脚-基礎の形状と地盤条件を示す。加振方向（橋軸方向）の杭間隔は、杭列を 2 列にした場合、作用する曲げモーメントによって引抜き力が生じやすくなるため、曲げモーメントに対する抵抗を増すために、この杭

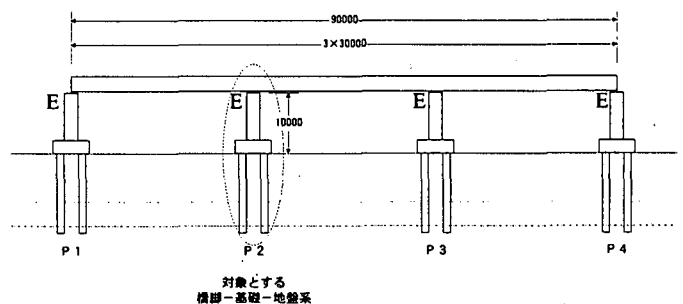


図-5 対象橋梁全体図

間隔を2.5D (D: 杭径) よりも広げた。橋梁の諸元は以下に示すとおりである。

(1) 上部構造

形式：3径間連続鋼Iげた橋
(地震時水平力分散構造)

支間割：30m×3径間

幅員：全幅員 12.000m

活荷重：B活荷重

支持条件：弾性支持 (橋軸、橋軸直角方向)

支承の種類：ゴム支承 (タイプB)

(2) 下部構造

橋脚：T形橋脚

基礎：場所打ち杭

使用材料：

部材	コンクリート	鉄筋
橋脚	$\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	SD295
フーチング	$\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	
杭	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	

(3) 上部構造からの鉛直荷重

下部構造	死荷重 R_D (kN)	活荷重 R_L (kN)
P1, P4	1846	1082
P2, P3	5077	1979

地震時に支持すべき上部構造重量 $W_u=4616\text{kN}$

(4) 重要度の区分及び地域区分

重要度の区分：B種の橋

地域区分：A地域

(5) 地盤条件

耐震設計上の地盤種別：II種地盤 ($T_c=0.32$ 秒)

地盤条件：

	地盤の種類	層厚 (m)	平均 N値	単位体積重量 (kN/m ³)	
				γ	γ'
第1層	砂質土	8.0	4	17	8
第2層	砂質土	4.0	10	18	9
第3層	砂質土	1.4	50	19	10

(6) 支承のバネ定数 (P2)

バネ定数： $K_p=1.294 \times 10^7$ (N/m)

($T=1.2$ 秒)

5. 実験対象模型及び数値モデル

前述した実規模橋梁をスケールダウンした実験模型の形状寸法及び地盤条件を図-7に示す。ここでは幾何学的縮尺を1/4とした。これは、実験装置の制約から決定される最大の縮尺である。また、フーチングと土槽壁間の距離をできるだけ大きくすることを目的に、加振方向 (橋軸方向) に対しては2列の配置となる杭配置を選択した。図-7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、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

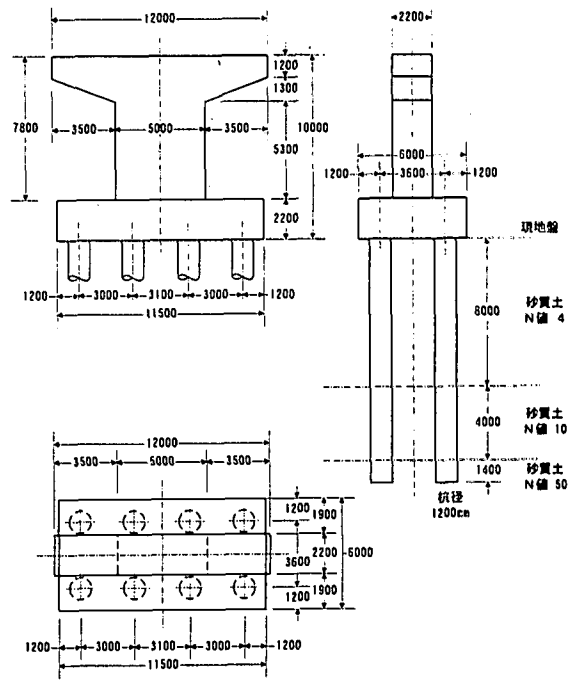


図-6 実規模橋脚-基礎の形状と地盤条件

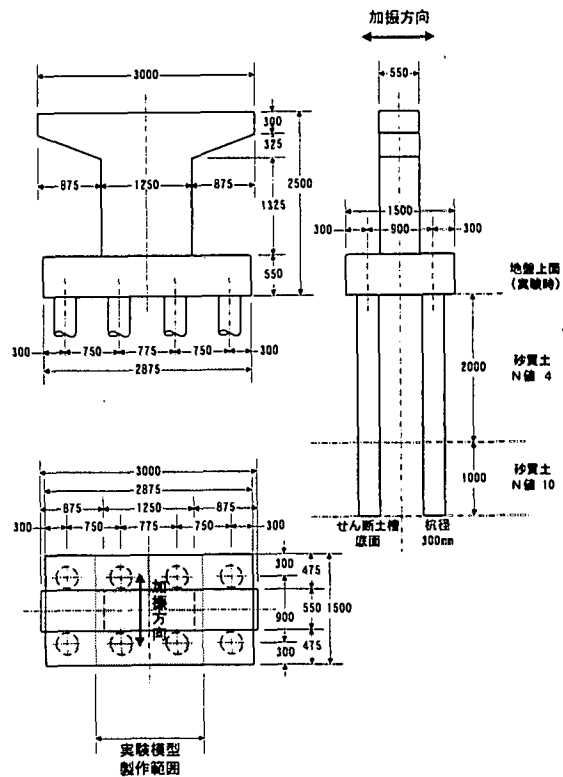


図-7 模型橋脚-基礎の形状と地盤条件

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。地盤模型には乾燥珪砂7号を使用し、表層の2mをN値4、それ以深をN値10の2層構成とした。

本研究で行うハイブリッド振動実験では、図-8に示すように地盤及び杭基礎を実験模型、フーチング、

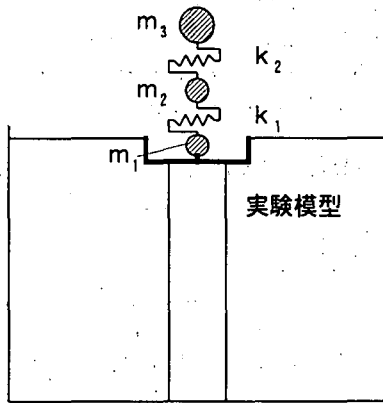


図-8 数値モデル部

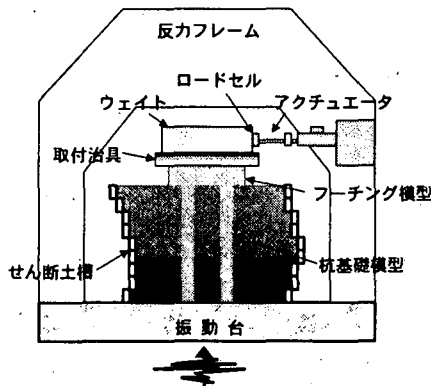


図-9 地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド実験

橋脚、支承、上部構造を数値モデルとした。具体的には図-9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。

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、図-10に示すように、非線形バイリニア型で数値モデル化を行った。

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(N)	フーチング m_1
	橋脚 m_2	9917
	上部構造 m_3	36085
バネ剛性 (N/m)	橋脚 k_1	8.239×10^7
	支承 k_2	4.045×10^5

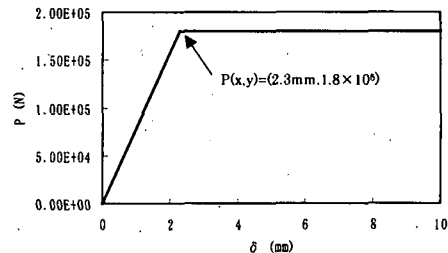


図-10 橋脚部の非線形特性

6. 実験模型特性に関する地震応答解析

実験を行う前に実験模型の特性を把握するため、地盤と橋梁全体をモデル化したFEM解析を行った。解析上、杭は実験条件と同様に、直径300mmの鉄筋コンクリート製杭とし、模型地盤は、せん断土槽地表面つまり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、第1層をN値4、第2層をN値10の砂質土として解析を行った。モデル化に関しては、杭部、橋脚部を線形梁要素、支承部を線形ばね要素でモデル化した。なお、上述の条件で地盤のみの非線形応答解析を行い、入力される地震動に対して予め想定されるひずみレベルを把握し、FEM解析には地盤の非線形化を考慮した地盤のせん断剛性係数を用いた。また、全体系の固有値解析を行った。固有値解析に用いた構造減衰は支承、橋脚、杭については2%とし、地盤については1~5%で変化させた。これは、模型地盤がせん断土槽のフレームに囲まれているため、大きな逸散減衰は発現しないことを考慮したものである。固有値解析の結果によると、1次固有振動数は1.65Hz、2次固有振動数は8.91Hzで、振動モードは図-11に示すとおりである。1次の振動モードは、弾性支承部から上の上部構造部分だけが

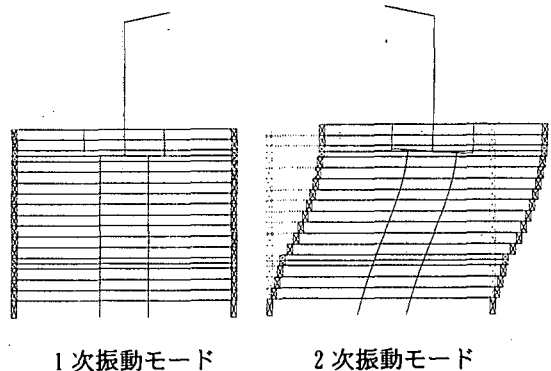


図-11 固有振動モード

振動するモードになっている。これに対して2次の振動モードは、地盤と杭基礎の振動が卓越した振動モードである。

次に、1次、2次及び1次+2次の固有振動数に相当する正弦波50galをそれぞれ入力したときの各部の最大応答値を表-2に示す。なお、ここに示す応答値は地盤の減衰を2%としたときのものである。これによると、1次入力では、振動台入力50gal、橋脚天端での応答が57galであるのに対して、上部構造部の応答が1260galと上部構造の応答が大きな値を示している。これは、固有振動モードと同様に、弾性支承部の上、つまり橋梁桁部のみが振動し、弾性支承から下の部分はほとんど振動しないモードとなっている。2次の入力では、固有振動モードを反映して橋脚部とフーチング部の応答がそれぞれ966gal、901galと大きな値を示している。さらに、1次固有振動数と2次固有振動数の正弦波を重ね合わせたものを入力した結果では、上部構造、橋脚、フーチング部の応答は、それぞれ653gal、717gal、681galと同様に大きな応答を示している。

表-2 橋梁各部の応答解析結果 (最大値)

		1次入力	2次入力	1次+2次
上部構造 慣性力作用位置	応答変位 (mm)	117.2	1.0	59.0
	応答速度 (kine)	122	2	61
	応答加速度 (gal)	1261	40	653
橋脚天端	応答変位 (mm)	2.7	3.1	3.6
	応答速度 (kine)	3	17	14
	応答加速度 (gal)	57	966	717
フーチング重心	応答変位 (mm)	2.1	2.9	3.1
	応答速度 (kine)	2	16	13
	応答加速度 (gal)	56	901	681

7. おわりに

今回の実験は一連の研究の第一ステップに相当するものであり、入力地震動のレベルは基本的には、地盤-基礎構造系が弾性範囲に留まるよう選定する。入力レベルを地盤の線形域に保つことで繰り返し実験を行い、実験手法の確認が可能になる。また、その後で地盤-基礎構造系が非線形域に入る実験も予定している。

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。また、(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班において貴重な意見を賜った。ここに、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 上之蘭隆志、岡本伸、北川良和、中田慎介、芳村学：鉄筋コンクリート造実大7層試験体の耐震性に関する研究(その1実験概要および実験結果)、第6回地震工

学シンポジウム論文集, 1982

- 2) H. Iemura: Earthquake Failure Criteria of Deteriorating Hysteretic Structures, *Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.4, pp.81-88, 1980
- 3) 池田尚治:地震動による鉄筋コンクリート柱のせん断破壊の再現実験, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.488-489, 1989
- 4) 才塚邦宏、伊藤義人、木曾英滋、宇佐見勉: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研究, 土木学会論文集No.507, pp.179-190, 1995
- 5) 中山裕章、家村浩和、今村英次:薄肉箱型断面鋼橋脚のダイヤフラムによる変形性能の向上, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.66-67, 1994
- 6) 伯野元彦、四俵正俊、原司:計算機により制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, No.171, pp.1-9, 1969.
- 7) M. Nakashima, Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp.79-92, 1992
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 井上雅彦、堀内敏彦、桃井康行, 振動台を用いた実時間ハイブリッド実験, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2195-2198, 1998.11
- 12) 小長井一男:基礎・地盤の相互作用効果を反映させる振動台の新制御手法, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.778-779, 1996
- 13) 五十嵐晃、家村浩和、阪部真悟:サブストラクチャーハイブリッド振動台システムによる振動制御デバイスの実験的検証, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.917-920, 1999.7
- 14) 小林寛、田村敬一:2層系模型を対象とした実時間ハイブリッド振動実験, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2189-2194, 1998.11
- 15) 小林寛、田村敬一:2次元3自由度系モデルを対象とした実時間ハイブリッド振動実験, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.913-916, 1999.7
- 16) 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