

ハイブリッド振動実験による橋梁全体系の振動挙動に関する研究

小林 寛¹・田村 敬一²・谷本 俊輔³

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

橋梁の耐震設計の合理化を図るためには、橋梁全体系(地盤-基礎構造-橋脚-上部構造)の振動挙動を系統的に明らかにすることが必要である。しかし、橋梁全体系の連成による各部への影響を実験的に解明した研究はほとんどない。そこで、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を結びつけたハイブリッド振動実験を取り上げ、上部構造及び橋脚部を数値モデル、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い、橋梁全体系の振動挙動を実験的に明らかにした。

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

1. はじめに

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塑性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)の連成を考慮した振動挙動を明らかにすることは、橋梁耐震設計の合理化、経済化に繋がると考えられる。しかし、これら橋梁全体系の連成挙動を塑性域まで考慮した実験的な研究は皆無であり、橋梁全体系の連成挙動が橋梁各部へ及ぼす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を取り上げた。そこで、実験対象橋梁に対して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い、橋梁全体系の振動挙動について検討した。

2. ハイブリッド振動実験の概要

(1) 実験手法

本研究で行うハイブリッド振動実験では、図-1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、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した。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。

実験手順の概要は次のとおりである。①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

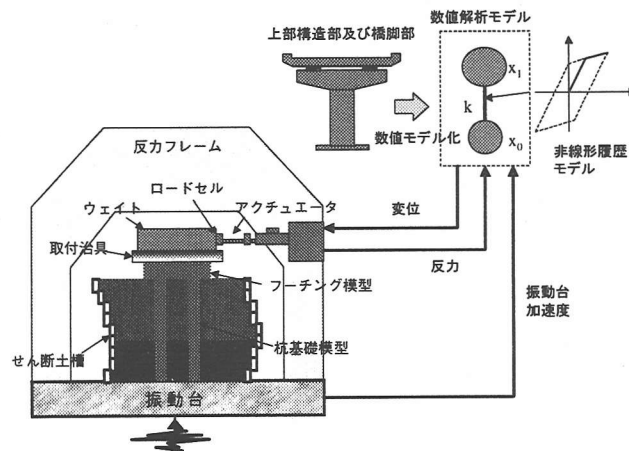


図-1 地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験の概要

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。②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。③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－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。④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、実験制御手法の詳細については文献1)~6)に示す。

(2) 実験対象とした実規模橋梁と実験対象模型

実験対象とした橋梁は、Ⅱ種地盤上の30m×3単径間橋の中間橋脚部であり、支承条件は固定・可動式とした。また、実験橋梁を2種類の設計条件に分けて設定を行った。一つは昭和46年道路橋耐震設計指針（以下、S46指針と呼ぶ）に準じて設計を行ったもの、もう一つは平成8年道路橋示方書（以下、H8道示と呼ぶ）に準じて設計を行ったものである。ここで設計条件による違いは橋脚の耐力のみとし、上部構造条件、支承条件、基礎構造条件、地盤条件は同様とした。したがって、橋脚寸法は変えずに橋脚中の鉄筋数および鉄筋径のみを調整した。

実験装置の制約を考慮し、実験対象とした模型は前

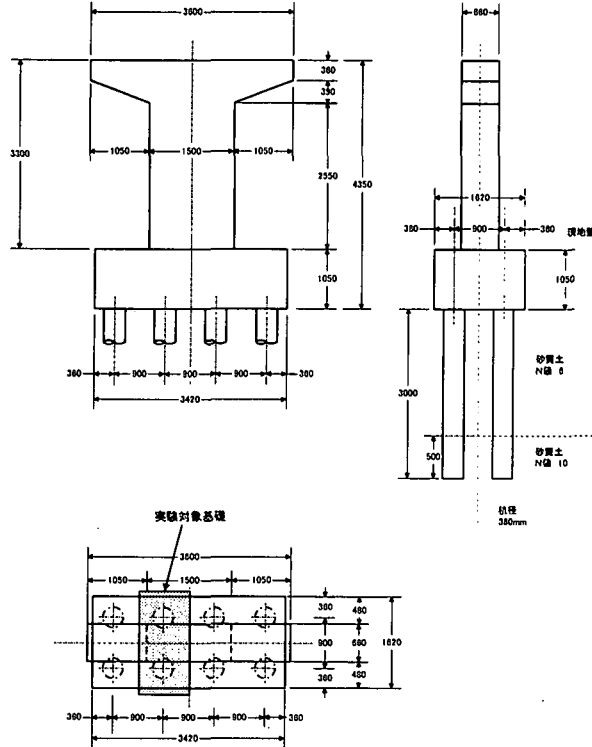


図-2 実験対象模型の概要

述した実規模橋梁を0.3倍にスケールダウンしたものとした。また、図-2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1本分を取り出し、1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1/4となる。本研究では、橋梁全体の塑性化による各部への影響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。

(3) 数値解析モデル

数値解析モデルではフーチング部と橋脚・支承・桁を合わせた上部構造部からなる2質点系のモデルとした。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-3に示すよう非線形バイリニア型で数値モデル化を行った。

表-1 数値解析モデルのパラメータ

質点の質量(kg)	フーチング m_0	3638.37
	橋脚、上部構造 m_1	4052.35
バネ剛性(N/m)	橋脚 k	1.7625×10^7

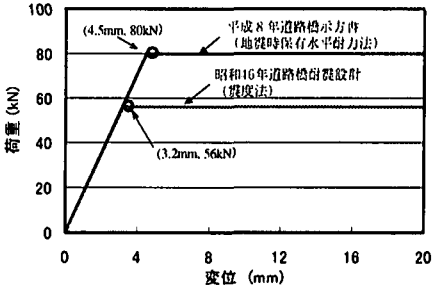


図-3 橋脚の非線形特性

(4) 地盤の作成

地盤模型には乾燥珪砂7号を使用し、表層の2.5mを目標N値6、それ以深を目標N値10の2層構成とした。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、フーチング底面から2.5mまでの表層を第1層、それ以深の地表面下2.5mからせん断土槽底面までを第2層としているが、第2層は重さ5kgの15cm角材を使用し、0.25mごとに3回締固めを行った。第1層については、上載圧を考慮し、足踏み3~5回の締固めを行った。また、作成した模型地盤の特性値を計測するため、スウェーデン式サウンディング試験およびベンダーエレメントによる地盤のせん断弾性波速度の計測を行った。計測結果を図-4に示す。計測は、実験段階に応じ

て行ったが、実験を重ねるにしたがい、模型地盤が締固まっているのが分かる。

(5) 取付治具の慣性力補正

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_{xx} 、治具に取り付けた加速度計で計測される加速度を A_{xx} 、治具の質量を m とすると、補正した荷重 f'_{xx} は $f'_{xx} = f_{xx} - m \times A_{xx}$ 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。

(6) 実験模型に関する地震応答解析

実験模型の特性を把握するため、実験地盤と実験橋梁全体をモデル化した FEM 固有振動解析を行った。モデル化に関しては、地盤および杭基礎を FEM 要素で、またフーチング部および上部構造部を線形梁要素でモデル化を行った。解析結果を図-5 に示す。1 次の固有振動数 (5.47Hz) ではフーチング部と上部構造部が同位相、2 次の固有振動数 (14.83Hz) では逆位相に振動することが分かる。

(7) 実験ケース

実験対象模型の 1 次の固有振動数に相当する正弦波と 2 次の固有振動数に相当する正弦波を入力したケースと、JMA 基盤地震動 (神戸海洋気象台で観測された地表面記録を解放基盤面位置に引き戻した波形を他の兵庫県南部地震の強震記録と合致するように振幅調整したもの) の最大加速度を 60% に振幅調整した地震波を入力したケースを行った。なお、地震波入力の場合では、実規模橋梁の固有振動数 (1 次モード: 1.36Hz) との比をとり、時間軸を $1.36/5.47=0.25$ 倍したものを入力した。さらに、ハイブリッド振動実

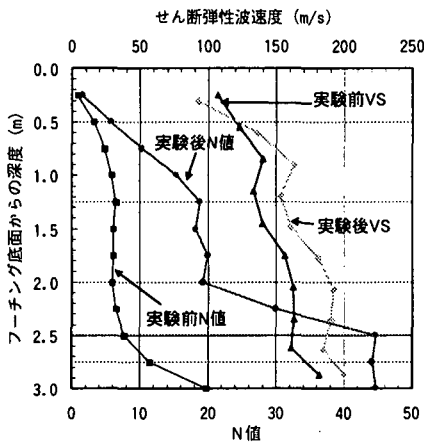
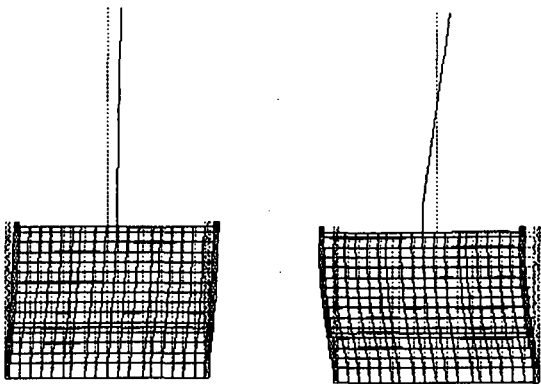


図-4 スウェーデン貫入試験及びせん断弾性波速度計測結果



(a) 1 次モード (b) 2 次モード
図-5 FEM による固有振動解析結果

験の安定性確保³⁾のため、実験の時間軸を 3 倍に伸長させて行った。従って、実際に振動台に入力する波形は加速度振幅固定で、時間軸を 3 倍に伸長させたものである。

3. 実験結果

橋梁全体系の 1 次および 2 次の固有振動数に相当する正弦波 5 波 (前後に 1 波ずつテーパーを加えたもの) 50gal を入力した場合の数値モデル部の変位応答時刻歴をそれぞれ図-6 に示す。2.(6)で行った実験対象模型に対する FEM 固有振動解析と同様に、1 次の固有振動数入力のケースでは、フーチング部と上部構造部が同位相、2 次の固有振動数入力のケースでは逆位相のモードとなっており、実験と解析が整合していることが確認された。

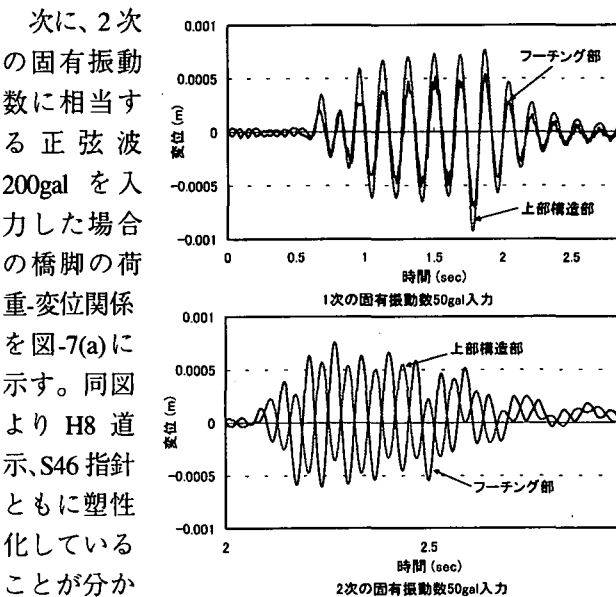


図-6 数値モデル各点の変位時刻歴

る。当然ではあるが、S46 年指針の方が塑性率は大きい。そこで、振動台との相対加速度の深度分布をみると、図-8(a)に示すように、橋脚の塑

性化程度の影響により、S46 指針のケースにおける各部の応答が H8 道示のケースと比較して若干小さくなっている。このとき、杭基礎に作用する応力として図-9(a)に最大-最小曲げモーメントの深度分布を示すが、S46 指針のケースの方が若干小さくなるものの、ほとんど変わらないことが分かる。

さらに、地震波を入力したケースにおける橋脚の荷重-変位関係を図-7(b)に示す。ここでは、橋脚の非線形特性を H8 道示、S46 指針に加えて S46 指針の降伏耐力の 1/2 としたものの（以下、S46 指針×1/2）の 3 ケース設定した。S46 指針および S46 指針×1/2 のケースでは、橋脚が塑性化していることが認められる。図-8、9(b)に示すように、塑性化の影響により、橋梁各部の加速度応答は H8 道示>S46 指針>S46 指針×1/2 の順に小さくなる傾向がみられるものの、杭基礎の曲げモーメントを比較すると橋脚の耐力の違いによる曲げモーメントの違いはほとんど見られない。したがって、地震波入力の場合は、橋脚の塑性化程度が杭基礎の応答に及ぼす影響は小さいといえる。通常、橋脚部に塑性化が生じると、上部構造部の応答が低減するとともに、杭基礎に作用する地震力も低下することが考えられるが、実験では若干その傾向は見られるものの、杭基礎に生じる応力の違いは小さい。

4. 結論

本研究では、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、基礎に作用する曲げモーメントは橋脚が塑性化した場合において、若干小さくなるものの、顕著な変化を見せないことが確認できた。今後は、動的解析等も併用しながら、橋梁全体系の振動挙動の解明を図っていく予定である。

参考文献 1) H. Kobayashi and K. Tamura: Experimental study on the validity of real-time hybrid vibration experiments with a 2-dimensional and 3-degrees-of-freedom model, 12WCEE, 2000.1

2) 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

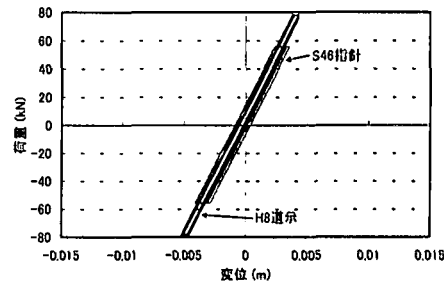
解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 2000.3

3) 小林寛、田村敬一：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, 第 2 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, 2001.3

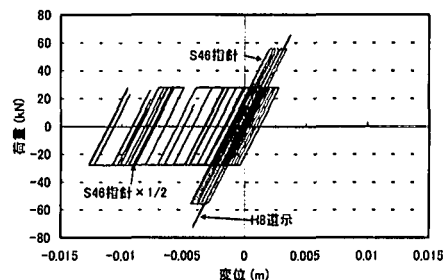
4) 堀内敏彦ほか：加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発（第 1 報、補償方法と 1 自由度系の実験への適用）, 日本機械学会論文集（C 編）61 巻 584 号, pp.64-72, 1995.4

5) 堀内敏彦ほか：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

6) 梅北和弘ほか：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, 1997

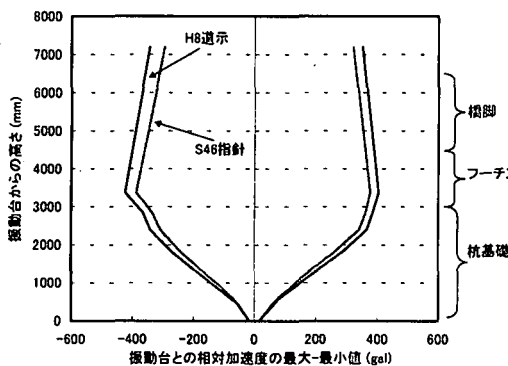


(a) 正弦波入力

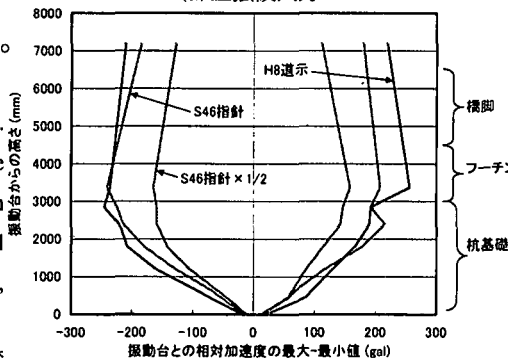


(b) 地震波入力

図-7 橋脚の履歴

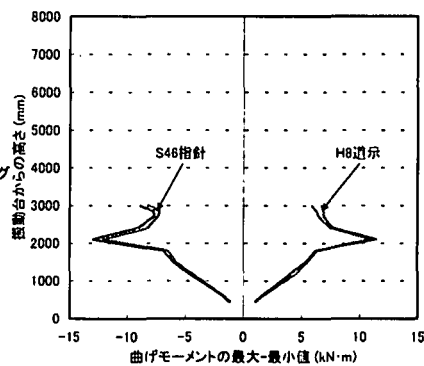


(a) 正弦波入力

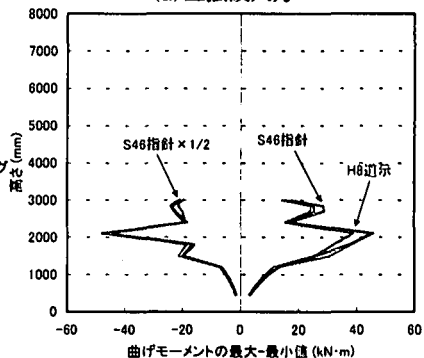


(b) 地震波入力

図-8 相対加速度最大-最小分布



(a) 正弦波入力



(b) 地震波入力

図-9 曲げモーメント最大-最小分布