

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

上下部構造の連成を考慮した橋梁のハイブリッド振動実験

谷本俊輔* 田村敬一** 岡村未対*** 小林 寛****

1. はじめに

橋梁の耐震設計は一般に上部構造（橋脚-橋桁）と基礎構造（地盤-基礎）を切り離して行われているが、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る。特に両者もしくは一方が塑性領域に入った場合には、それらの相互作用も複雑に変化するものと考えられる。

しかし、これら橋梁全体系の連成挙動を考慮した既往の実験的な研究は皆無であり、上部構造と基礎構造間の相互作用は十分には解明されていない。このことから、橋梁全体系（地盤-基礎-橋脚-橋桁）の振動挙動を明らかにすることは、橋梁耐震設計の合理化につながると考えられる。

本研究では、上下部構造の連成を考慮したハイブリッド振動実験を行うことにより、橋梁の地震時挙動について検討した。ハイブリッド振動実験とは、対象構造物全体のうちの一部のみを実験模型として用いる振動台実験と、その他の部分の振動応答数値解析を組み合わせることで、構造物全体の地震時挙動を再現するという新しい概念の実験手法である^{1),2)}。

2. ハイブリッド振動実験手法

2.1 概要

構造物の振動現象を把握するための手法には、大別して実験的手法と解析的手法がある。前者は物理模型を用いて実際に振動系を表現する方法であり、後者は数値解析により振動系を表現する方法である。本報文中で紹介するハイブリッド振動実験とは、1つの振動系を2つに分割し、一方を振動台実験、他方を振動応答数値解析により表現し、両者を連成させることにより振動系全体の挙動を再現する手法である。

本研究では、図-1に示すように、橋梁全体系の

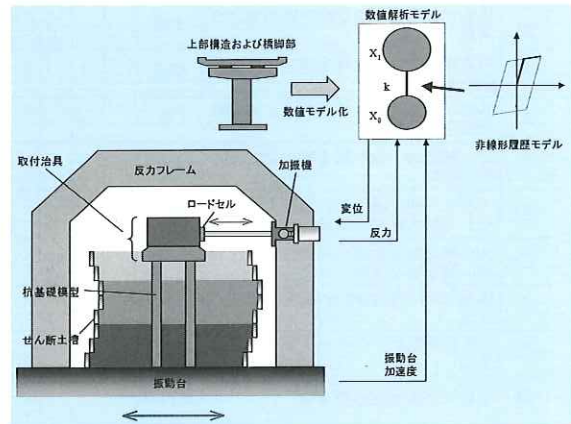


図-1 ハイブリッド振動実験概念図

うち、数値解析により比較的精度よく再現することができる上部構造、橋脚およびフーチングを数値モデルに置き換え、地震時挙動が複雑な地盤-基礎構造を実験模型として加振実験を行った。ハイブリッド振動実験では、加振機に設置したロードセルの計測値を用いて数値モデルの振動応答数値解析を行い、その結果算出された変位を、取付治具を介して杭基礎模型頭部に加振機によって与えた。

土木構造物は一般的に大規模であるため、全体を模型化して振動台実験を行う場合、実験装置の制約上模型を縮尺する必要があるが、実物の細部まで精度よく再現するのが困難である。一方、ハイブリッド振動実験の場合は、振動挙動を明らかにしたい部分のみを模型化することにより、大縮尺で精度のよい実験を行うことが可能となる。

2.2 振動応答数値解析モデル

ハイブリッド振動実験で取り扱う数値解析モデルの質量、減衰、剛性マトリックスをそれぞれ M 、 C 、 K とし、ある時刻 t_i における数値モデルの変位ベクトルを x_i 、地震による慣性力ベクトルを p_i 、数値モデルと実験模型の境界点に発生する力のベクトルを q_i とすると、数値モデルの運動方程式は式 (1) で表される。

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + Kx_i = p_i + q_i \quad (1)$$

本実験では、ある時刻 t_i における振動台加速度を各質点の質量に乗じたものを p_i 、加振機先端に設置したロードセルの計測値を q_i とし、中央差分法を用いることにより式 (1) を解く。このようにして求めた次のステップにおける変位 x_{i+1} を加振機により再現する。

ただし、式 (1) で求めた変位を指令値としてそのまま加振機に与えた場合、数値計算に要する時間、油圧式加振機の動特性等起因して、変位が遅れて再現されることになる。そこで、本実験ではこれを防ぐために加振機の遅れ補償を行っている。遅れ補償方法の詳細については文献 3) を参照されたい。

3. 実験条件の設定

3.1 実験モデルの設定

実験モデルは、昭和 46 年道路橋耐震設計指針および平成 8 年道路橋示方書に準じて試設計した実規模橋梁をスケールダウンすることにより設定した。本報文では前者を用いて設定した実験モデルを用いた結果について述べる。

本実験で用いた数値モデルは上部構造およびフーチングを質点、橋脚をバネとしたものである。数値モデルの各パラメータを表-1 に示す。また、橋脚の水平荷重-水平変位関係における非線形性については図-2 に示すようなバイリニア型モデルを用いて表現した。

3.2 実験模型

本実験では、独立行政法人土木研究所の三次元大型振動台上に内寸幅 4m× 長さ 4m× 高さ 3.5m のせん断土槽を設置し、その中に地盤模型及び RC 杭基礎模型を作成した。実験模型の概要を図-3 に示す。その外側にハイブリッド実験用加振機の反力を確保するための反力フレームを設置した。ハイブリッド振動実験の実験状況は本誌グラビアの写真-1 に示すとおりである。

地盤模型には乾燥珪砂 7 号を使用し、地表面から深度 2.5m までを目標 N 値 6 の第 1 層、それ以後のせん断土槽底面までを目標 N 値 10 の第 2 層とする 2 層地盤とした。

表-1 数値モデルに用いたパラメータ

実験対象物			パラメータ
質点の重量 (N)	フーチング	m_0	14,538
	上部構造	m_1	21,819
バネ剛性 (N/m)	橋脚	K	4.1195×10^7

3.3 実験模型に関する地震応答解析

実験模型の振動特性を把握するため、実験に

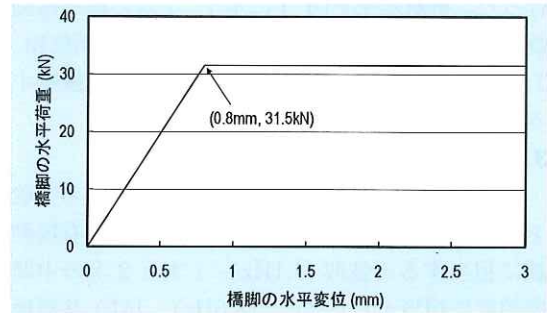


図-2 橋脚の非線形特性

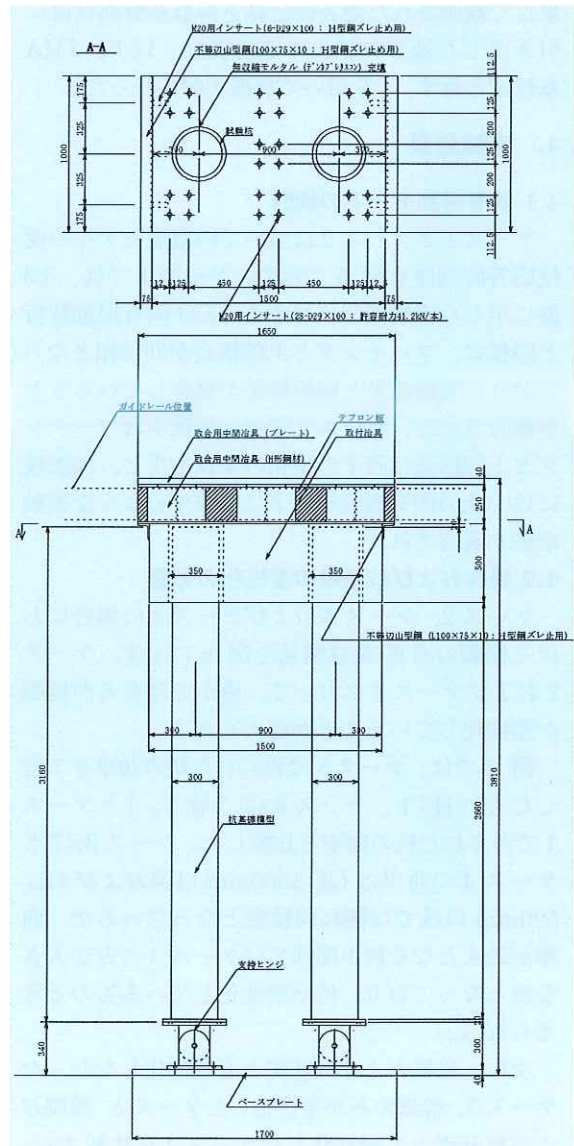


図-3 杭基礎模型

先立って実験模型と数値モデルを含む実験模型橋梁全体をモデル化した線形 FEM 固有振動解析を行った。解析結果を図-4 に示す。1 次の固有振動数 (8.02Hz) ではフーチングと上部構造が同位相、2 次の固有振動数 (27.82Hz) では逆位相に振動することが分かる。

3.4 実験ケース

実験ケースは表-2 のとおりであり、4 回の実験を行った。すなわち、実験模型の 1 次の固有振動数に相当する正弦波 (8.1Hz)、1 次と 2 次の中間振動数に相当する正弦波 (18.0Hz)、JMA 基盤地震動 (平成 7 年兵庫県南部地震の際に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に相当する地震動。以下、JMA 基盤波と称す。) を用いて加振実験を行った。

4. 実験結果

4.1 固有振動モードの検討

ケース 1 とケース 2 についての数値モデルの変位応答時刻歴を図-5 に示す。ケース 1 では、3.3 節に示した実験模型に対する FEM 固有振動解析と同様に、フーチングと上部構造が同位相となっており、実験結果と解析結果が整合していることが確認された。ケース 2 では、加振中はフーチングと上部構造に若干の位相のずれを生じ、加振後には 1 次の固有振動モードに収束するような振動挙動が確認された。

4.2 橋脚および杭基礎の塑性化の影響

ケース 2、ケース 3 およびケース 4 の場合における橋脚の荷重-変位関係を図-6 に示す。ケース 2 およびケース 4 において、僅かではあるが橋脚が塑性化していることが認められる。

図-7 では、ケース 3 で得られた杭の曲率を 7 倍したもの (以下、ケース 3×7 と称す。) とケース 4 で得られた杭の曲率を比較した。ケース 3×7 とケース 4 の曲率は GL-1500mm 以深および GL-500mm 以浅では概ね同程度となっているが、曲率が最大となる杭中間部ではケース 4 の方が大きな値となっており、杭が塑性化しているものと考えられる。

次に、橋脚および杭基礎とも塑性化しなかったケース 3、橋脚のみが塑性化したケース 2、橋脚および杭基礎とも塑性化したケース 4 を比較する。これらのケースの最大応答加速度を入力の最大加

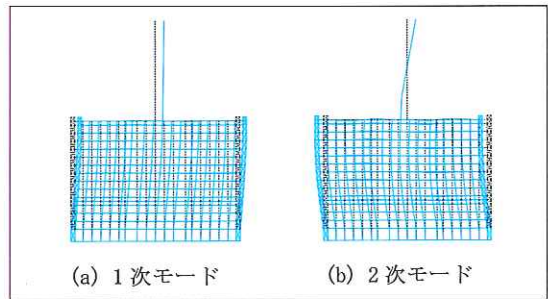
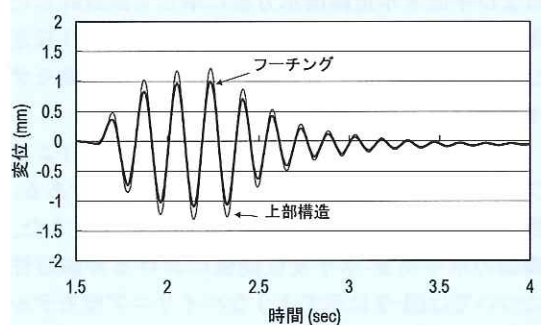


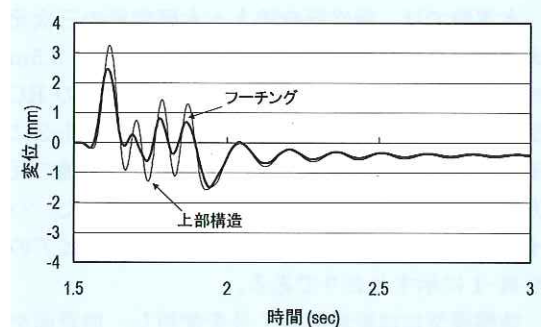
図-4 FEM 固有振動解析結果

表-2 実験ケース

ケース名	入力波形	最大振幅
ケース 1	正弦波 8.1Hz	50gal
ケース 2	正弦波 18Hz	400gal
ケース 3	JMA 基盤波	70gal
ケース 4	JMA 基盤波	490gal



(a) ケース 1 (1 次固有振動数入力)



(b) ケース 2 (1 次と 2 次の中間振動数入力)

図-5 数値モデルの各質点の変位時刻歴

速度で無次元化したものを図-8 に示す。杭基礎の応答に関しては、橋脚だけが塑性化したケース 2 が最も大きな値を示し、一方、杭基礎が塑性化したケース 4 の場合の応答は小さい。橋脚の応答に関しては、橋脚、杭基礎がともに弾性であるケース 3 が最も大きく、橋脚のみが塑性化したケース 2

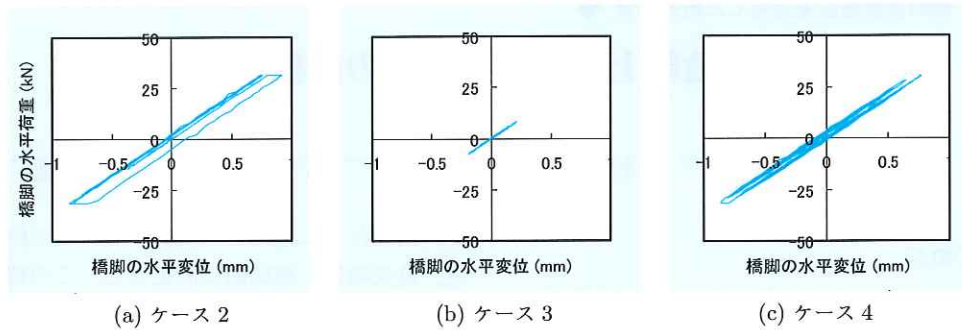


図-6 橋脚の荷重-変位履歴

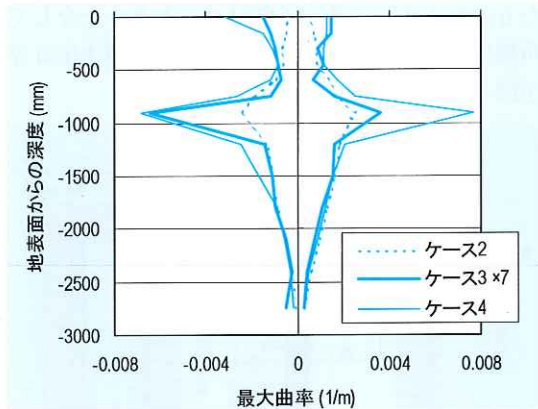


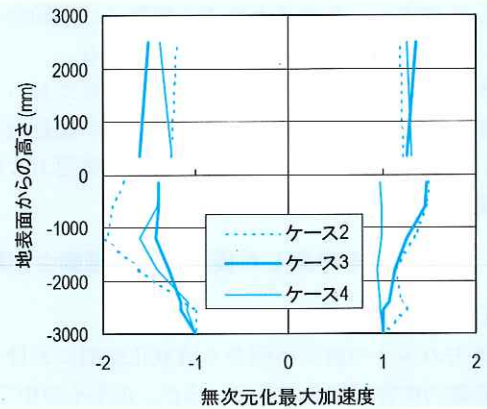
図-7 杭の最大曲率

は最も小さいが、杭基礎も塑性化したケース 4 はそれらの中間の値となっており、杭の塑性化が橋脚の応答に影響を及ぼしていると考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 実験結果と FEM 固有振動解析結果を比較し、実験対象モデル全体の固有振動モードが両者で一致していることを確認した。
- (2) 橋脚のみに塑性化が生じた場合、橋脚の応答が小さくなり、杭基礎の応答が大きくなるなど、橋脚および杭基礎の塑性化が各部の応答特

図-8 無次元化した最大応答加速度
性に与える影響について明らかにした。

参考文献

- 1) 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
- 2) 小林寛、田村敬一、谷本俊輔：ハイブリッド振動実験を用いた橋梁全体系の地震時挙動に関する実験的研究，第3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，pp.207-212，2002.2
- 3) 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），日本機械学会論文集（C編），67巻655号，pp.667-674，2001.3

谷本俊輔*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ
振動チーム
Shunsuke TANIMOTO

田村敬一**



同 振動チーム上席研究
員，工博
Dr.Keiichi TAMURA

岡村未対***



同 振動チーム主任研究
員，工博
Dr.Mitsu OKAMURA

小林 寛****



国土交通省国土技術政策
総合研究所高度情報化研
究センター高度道路交
通システム研究室研究官
Hiroshi KOBAYASHI