

◆ 地盤・岩盤特集 ◆

地盤-基礎系模型を用いた橋梁全体系に関するハイブリッド振動実験

小林 寛* 田村敬一** 谷本俊輔***

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。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、その影響が変化することが考えられる。したがって、橋梁全体系(地盤-基礎-橋脚-橋桁)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、橋梁全体系の各部の地震時挙動が互いに及ぼしあう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。実験対象橋梁に対してフーチング、橋脚および橋桁を数値解析モデルに置き換え、振動挙動が複雑な地盤および杭基礎を実験模型として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。

2. ハイブリッド振動実験の概要

2.1 実験手法

本研究で検討を行うハイブリッド振動実験では、図-1に示すように地盤および杭基礎を実験模型、フーチング、橋脚、橋桁を数値解析モデルとした。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。

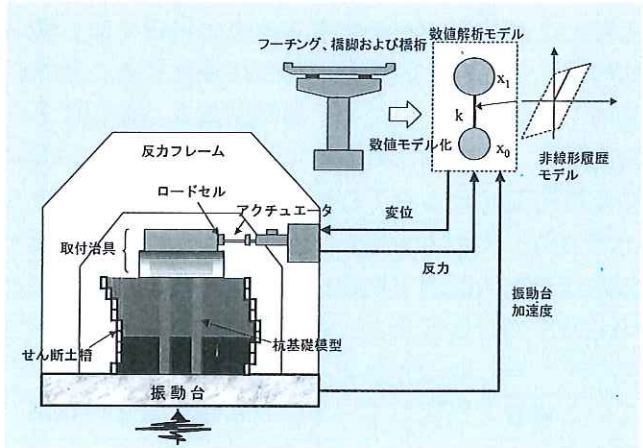


図-1 地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験の概要

実験手順の概要は次のとおりである。①杭基礎模型の上に取付治具を設置し、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。②鉛直方向には、橋桁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取付治具で調整し、杭基礎模型に死荷重として常に与える。③加振時には、取付治具側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杭基礎上端の反力を測定し、フーチング-橋脚-橋桁で数値解析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)を参照されたい。

2.2 実験対象とする実規模橋梁

実験対象とした実規模橋梁は、図-2に示すようなⅡ種地盤上の支間30mの単純桁橋である。また、橋脚の耐力の違いが基礎構造の地震時挙動に与える影響について検証するために、実規模橋梁の設計条件は次の2種類とした。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

Hybrid Vibration Experiments with a Bridge Foundation-soil System Model

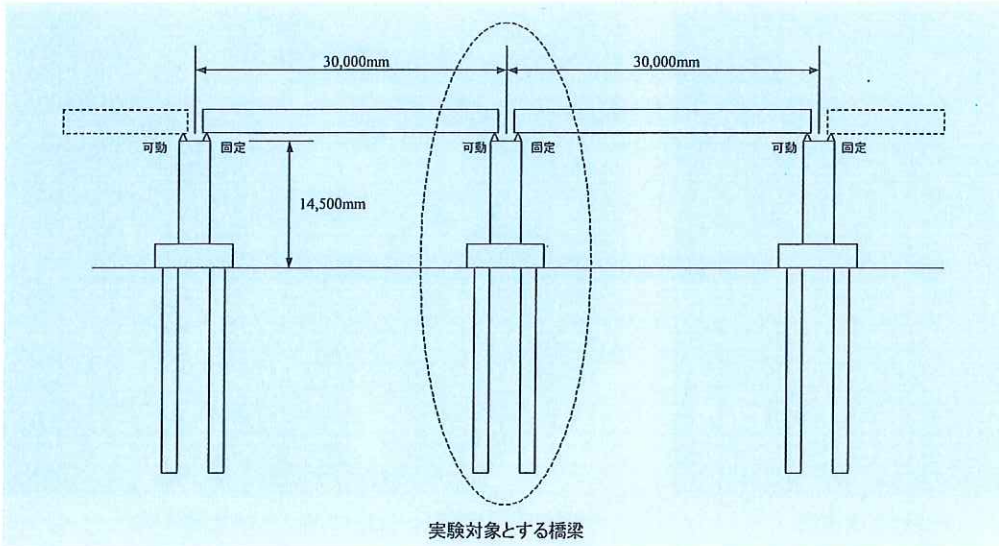
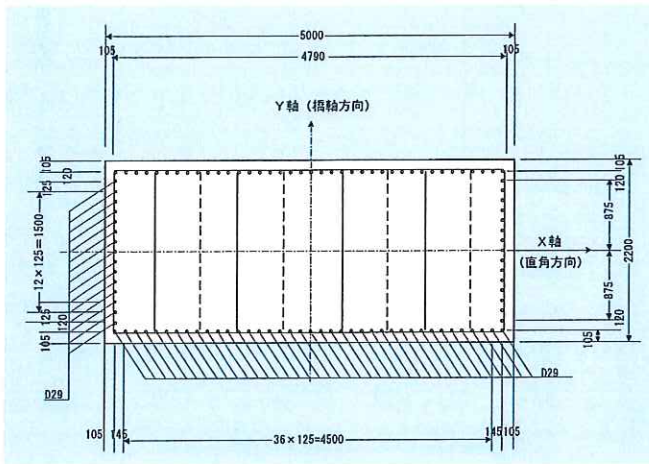
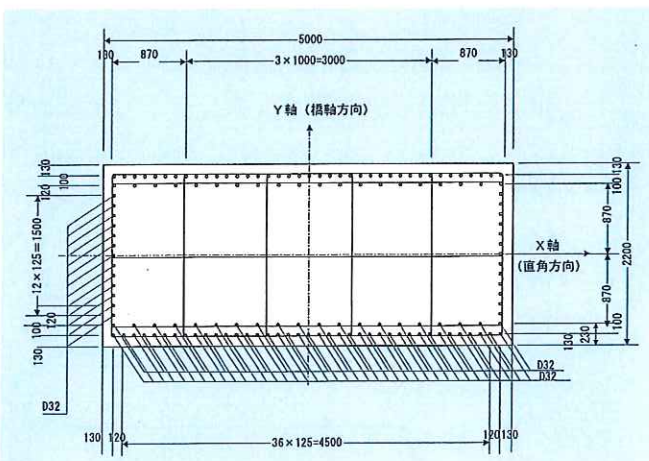


図-2 対象橋梁全体図

礎、地盤条件は同一とした。図-3に設計基準の違いによる橋脚断面の違いについて示すが、S46 指針では D29 の 1 段配筋が、H8 道示では D32 の 1.5 段配筋になっていることが分かる。このように、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変化させた。



昭和 46 年道路橋耐震設計指針による橋脚断面



平成 8 年道路橋示方書 (地震時保有水平耐力法) による橋脚断面
図-3 橋脚断面

準じて設計を行ったもの (以下、モデル 1 と呼ぶ)、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 (以下、モデル 2 と呼ぶ) 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、橋桁、支承、基

2.3 実験対象模型

写真-1 に本研究で検討を行ったハイブリッド振動実験の概観を示す。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 のせん断土槽を取付け、その外側にハイブリッド実験用アクチュエータの反力を確保するための反力フレームを設置している。ここで、実験対象とした模型は前述した実規模橋梁を 0.3 倍に縮小したものとした。また、図-4 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。

写真-2 に実験で用いた杭基礎模型を示す。本研究では、塑性化を考慮した橋梁全体系の振動挙動の検証を実験目的の一つとするため、杭基礎模型は、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。杭基礎模型の鉄筋については、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。

2.4 数値解析モデル

本実験で設定した数値解析モデルはフーチング、橋脚および橋桁を 2 質点系にモデル化したものであり、その数値解析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-5 に示すよう非線形バイリニア型の非線形性を考慮した。

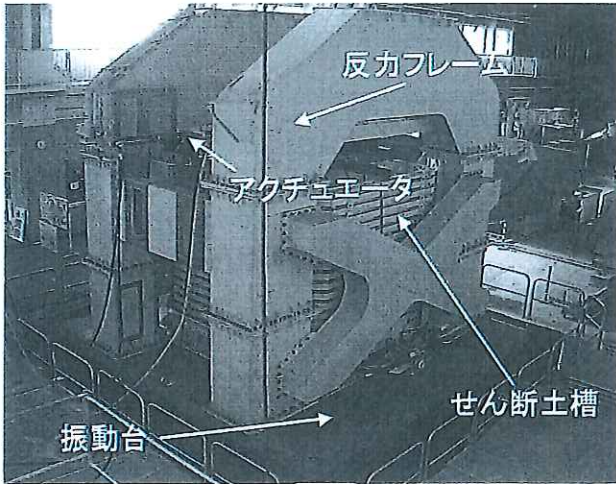


写真-1 ハイブリッド振動実験概観

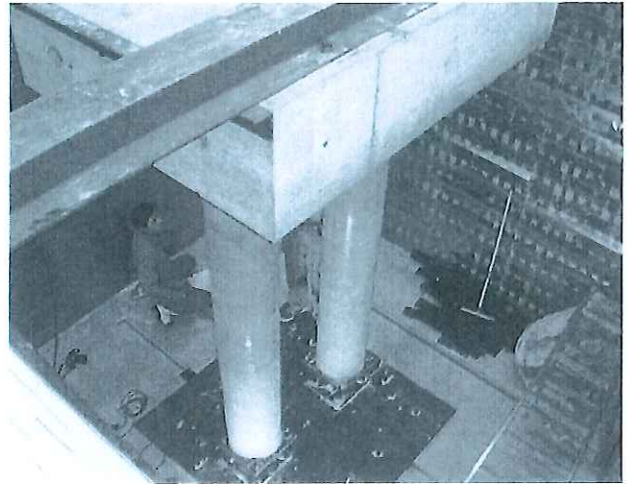


写真-2 実験に用いた杭基礎模型

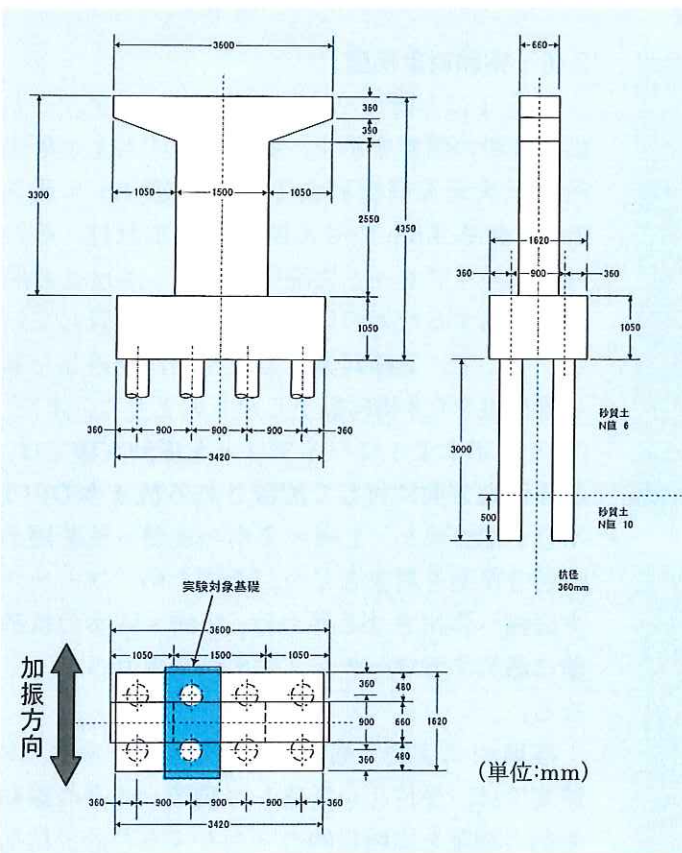


図-4 実験対象模型の概要

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
	橋脚および橋桁 m_1	4052.35
質点間のバネ剛性 (N/m)	橋脚 k	1.7625×10^7

2.5 地盤の作成

地盤模型には乾燥珪砂7号を使用し、フーチング底面から2.5mまでを目標N値6の第1層、それ以深のせん断土槽底面までを目標N値10の第2層とする2層構成とした。地盤模型の作成に

あたっては、0.25mごとにコア採取の上、密度管理を行った。ここで、第1層については、上載圧を考慮し、足ふみ3~5回の締固めを行い、第2層については重さ5kgの15cm角材を使用し、0.25mごとに3回締固めを行った。また、作成した地盤模型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⁷⁾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-6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、地盤模型が締固まっているのが分かる。

2.6 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となる。ここで、数値解析モデルに取り込む必要がある荷重は実験模型からの荷重のみであるが、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を取り除く必要がある。

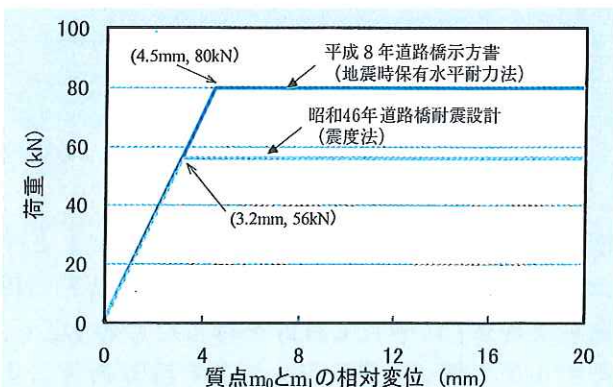


図-5 橋脚部の非線形特性

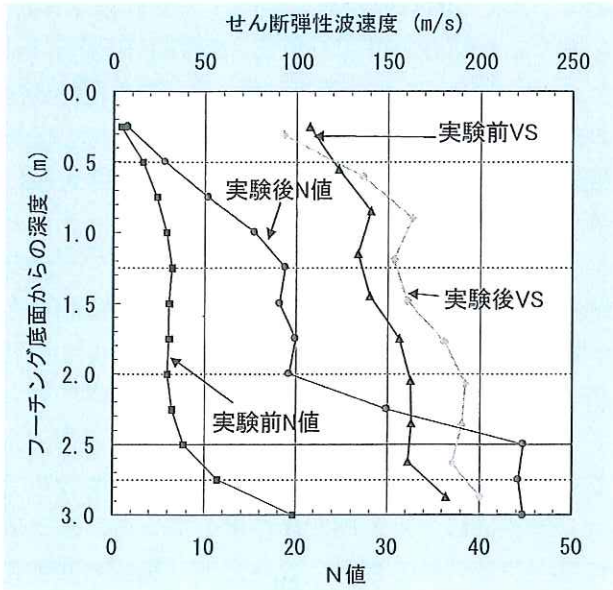


図-6 スウェーデン貫入試験の N 値換算結果及びせん断弾性波速度計測結果

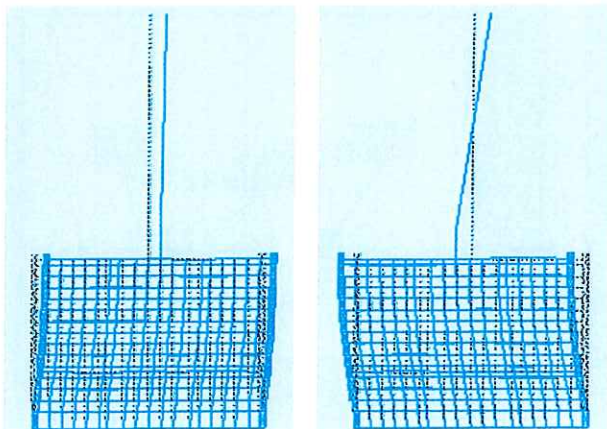
ロードセルで検出される荷重を f_{sx} 、治具に取り付けた加速度計で計測される加速度を A_{sx} 、治具の質量を m とすると、補正した荷重 f'_{sx} は $f'_{sx} = f_{sx} - m \times A_{sx}$ で求められる。

2.7 実験模型に関する地震応答解析

実験模型の特性を簡易に把握するため、地盤模型と数値解析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。ここで、地盤は平面ひずみ要素、杭基礎は梁要素で、また、フーチング、橋脚、橋桁はバネ要素でモデル化した。解析結果を図-7 に示す。1 次の固有振動数 (5.47Hz) ではフーチングと橋脚-橋桁が同位相、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。

2.8 実験ケース

実験ケースは、実験模型橋梁全体の 1 次の固有



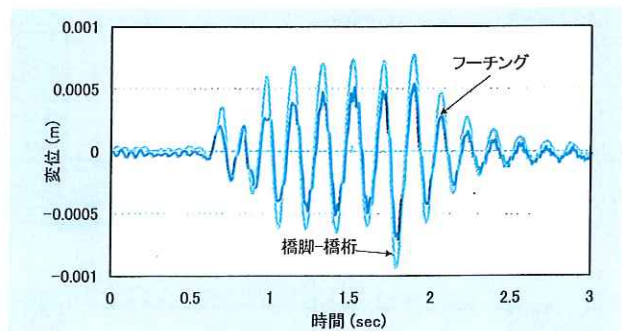
(a) 1 次モード (b) 2 次モード

図-7 FEM による固有振動解析結果

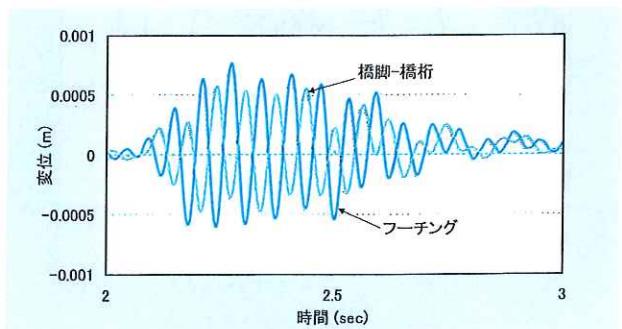
振動数に相当する正弦波および 2 次の固有振動数に相当する正弦波を入力したケースと、JMA 基盤地震動 (平成 7 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された地表面記録を解放基盤面位置に引き戻した波形に相当する地震動) の最大加速度を 60% に振幅調整した地震波を入力したケースとした。なお、正弦波入力の場合は、正弦波の前後に 1 波ずつテーパを加えた。また、地震波入力のケースでは、振動応答特性の相似則を考慮し、実規模橋梁の固有振動数 (1 次モード: 1.36Hz) と実験模型橋梁の固有振動数の比をとり、入力地震動の時間軸を $1.36/5.47=0.25$ 倍した。さらに、ハイブリッド振動実験の安定性確保³⁾ のため、実験の時間軸を 3 倍に伸長させた。

3. 実験結果

実験模型橋梁全体の 1 次および 2 次の固有振動数に相当する正弦波 5 波 50gal を入力した場合の数値解析モデルの変位応答時刻歴をそれぞれ図-8 (a) および (b) に示す。2.7 で行った実験模型橋梁に対する FEM 固有振動解析と同様に、1 次の固有振動数の正弦波入力のケースでは、フーチングと橋脚-橋桁が同位相、2 次の固有振動数の正弦波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。

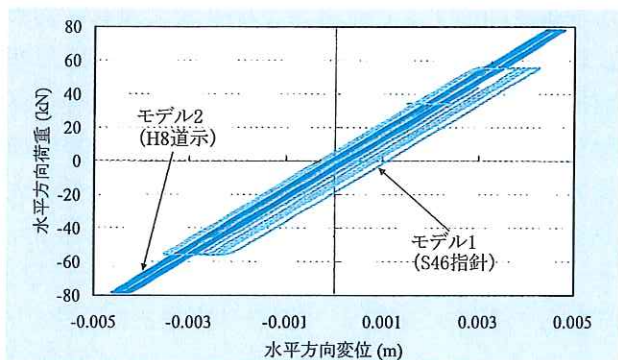


(a) 1 次の固有振動数 50gal の入力

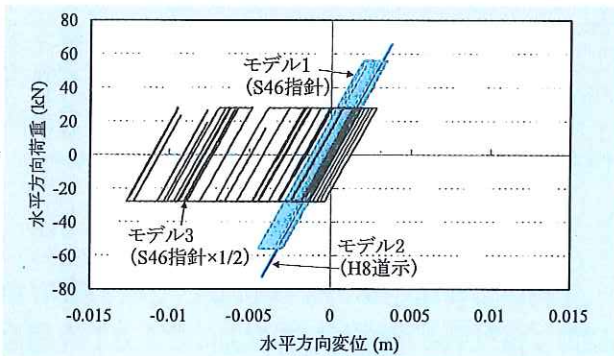


(b) 2 次の固有振動数 50gal の入力

図-8 数値解析モデル各点の変位時刻歴



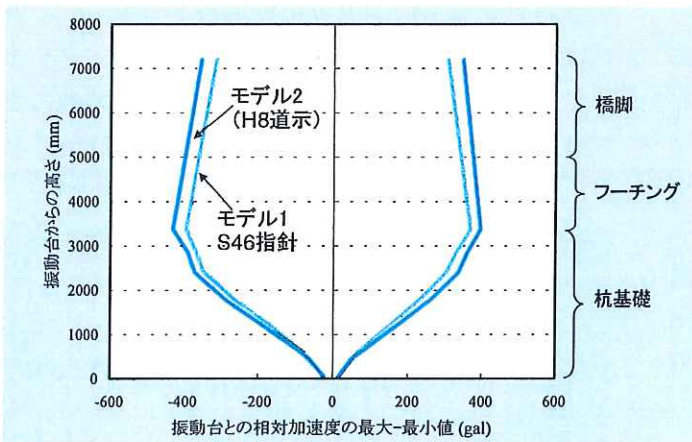
(a) 正弦波入力



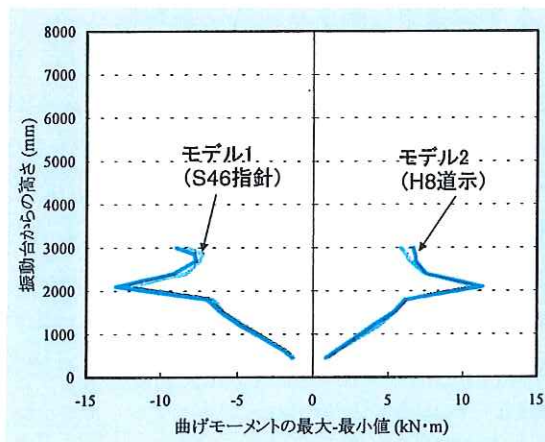
(b) 地震波入力

図-9 ハイブリッド振動実験における橋脚の荷重-変位関係

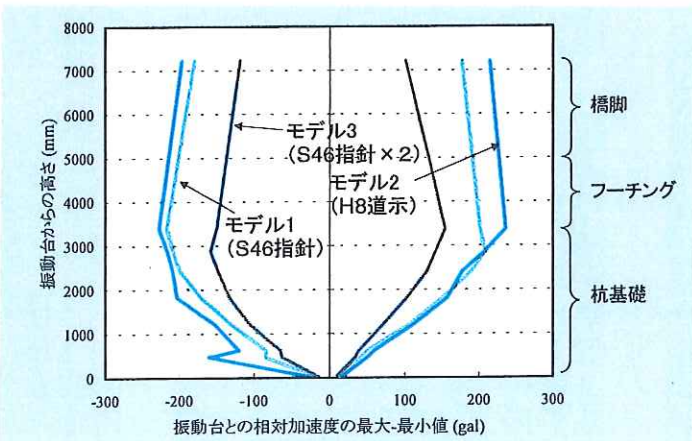
次に、2次の固有振動数に相当する正弦波 200gal を入力した場合の橋脚の荷重-変位関係 (質点 m_0 と m_1 に作用する力の差と $m_0 - m_1$ 間の相対変位の関係) を図-9 (a) に示す。同図よりモデル1 (S46 指針に準じて設計したもの)、モデル2 (H8 道示に準じて設計したもの) とともに塑性化していることが分かる。当然ではあるが、モデル1の方が応答塑性率は大きい。また、図-10 (a) に示す振動台との相対加速度の深度分布を見ると、モデル1の各部の加速度はモデル2の加速度よりも小さくなっている。しかし、図-11 (a) に示す杭基礎に作用する曲げモーメントの最大値-最小値の深度分布では、両者はほとんど同じ値を示している。加速度に違いが見られる理由については、橋脚の塑性化程度の違いが橋梁各部の応答に影響を与えているためと考えられる。すなわち、モデル1ではモデル2と比較して降伏荷重が小さいため応答が低減されている。また、通常、橋脚に塑性化が生じたことが原因で橋脚-橋桁の応答が変化すると、杭基礎に作用する地震力も変化することが考えられ



(a) 正弦波入力

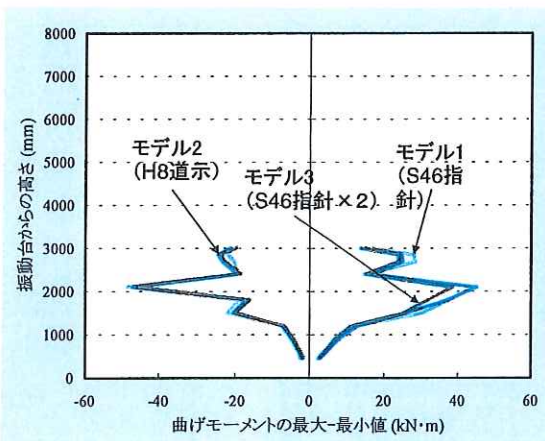


(a) 正弦波入力



(b) 地震波入力

図-10 相対加速度最大-最小分布



(b) 地震波入力

図-11 曲げモーメント最大-最小分布

るが、実験結果を見ると杭基礎に生じる曲げモーメントにはほとんど違いが見られない。このように、応答加速度に違いがあったにもかかわらず、曲げモーメントに差が見られなかった理由としては、加速度に依存する構造物の慣性力の影響が小さく、地盤振動もしくは地盤の変形が杭基礎に及ぼす影響が大きかったことが考えられる。

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-9 (b) に示す。ここでは、橋脚の塑性化程度が各部に及ぼす影響を詳しく検討するため、実規模橋梁の設計条件をモデル 1、モデル 2 に加えて、モデル 1 における橋脚の降伏耐力を 1/2 としたもの (以下、モデル 3 と呼ぶ) の 3 種類とした。モデル 1 (S46 指針) およびモデル 3 (S46 指針 × 1/2) では、橋脚が塑性化していることが認められる。図-10 (b)、11 (b) に示すように、塑性化程度の影響により、橋梁各部の加速度応答はモデル 2 (H8 道示) > モデル 1 (S46 指針) > モデル 3 (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、今回の実験の範囲では、地震波入力の場合についても、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。

4. まとめ

本研究では、地盤及び杭基礎をモデル化し、フーティング、橋脚、橋桁を数値解析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応じて加速度は変化するものの、杭基礎

に作用する曲げモーメントには顕著な差異が認められなかった。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, 12th World Conference on Earthquake Engineering, January, 2000.
- 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、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)，日本機械学会論文報告集 (C 編)，61 巻 584 号，pp.64-72，1995.4
- 5) 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)，日本機械学会論文報告集 (C 編)，62 巻 599 号，pp.2563-2570，1996.7
- 6) 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
- 7) 三上武子、中山栄樹、古田一郎、太田賢治：ベンダーエレメントを用いた S 波速度の測定とクロスコリレーション解析による伝達時間の評価，第 32 回地盤工学研究発表会講演集，pp.805-806，1997

小林 寛*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Hiroshi KOBAYASHI

田村敬一**



同 振動チーム上席研究員，工博
Dr.Keichi TAMURA

谷本俊輔***



同 振動チーム
Shunsuke TANIMOTO