

地盤の液状化を考慮した橋梁全体系の 地震時挙動に関するハイブリッド振動実験

谷本 俊輔¹・田村 敬一²・岡村 未対³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 振動チーム (〒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 振動チーム 上席研究員 (同上)

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 振動チーム 主任研究員 (同上)

In order to improve seismic design technology of bridges, it is necessary to evaluate the vibration characteristics of a bridge-soil system that consists of soil, foundation structure, pier and superstructure. However, there have been few experimental studies on seismic behavior of bridge-soil system. In this paper, we conducted the hybrid vibration experiment on seismic behavior of bridge-soil system, and examined the applicability of hybrid vibration experiment to study seismic response of bridge-soil system. Based on the experiment results, seismic response of bridge including liquefaction behavior of ground was quantitatively studied.

Key Words : hybrid vibration test, bridge foundation, soil-structure system, liquefaction

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の振動特性が塑性化等により変化した場合には、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ほとんどなく、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。

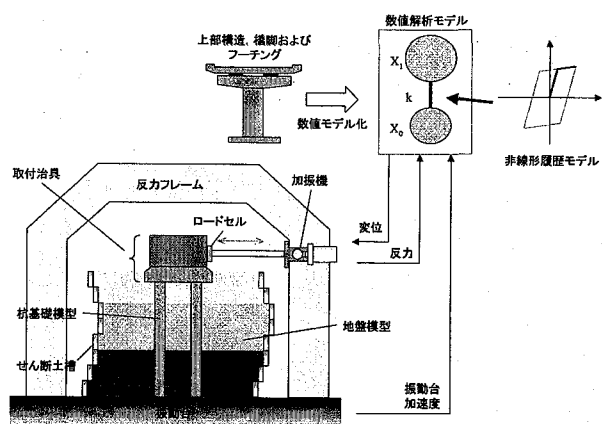


図-1 ハイブリッド振動実験概要図

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、地盤の液状化、橋脚の塑性化および橋脚の補強を考慮した場合における橋梁全体系の地震時挙動について検討した。本実験においては、図-1のように地盤および杭基礎を実験模型、フーチング、橋脚、上部構造を数値解析モデルとした。ハイブリッド振動実験で行っている数値解析手法および制御方法については参考文献1)～7)を参照されたい。

2. 実験概要

(1) 実規模橋梁の試設計

実験対象とするモデルの設定を設定するにあたり、道路橋示方書に基づいた実規模橋梁の試設計を行った。対象とした実規模橋梁は、図-2に示すような地表面からG.L.-12mまでがN値7、それ以深ではN値50

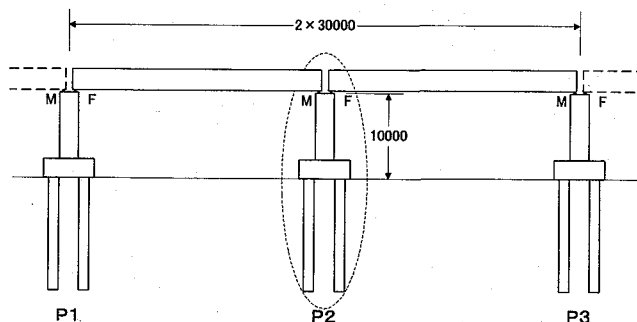


図-2 実験対象とした実規模橋梁

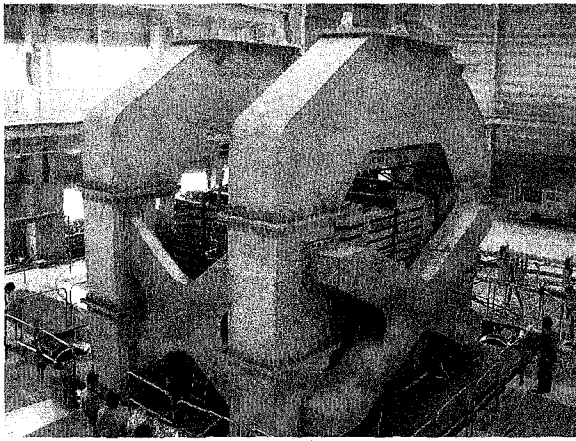


写真-1 ハイブリッド振動実験状況

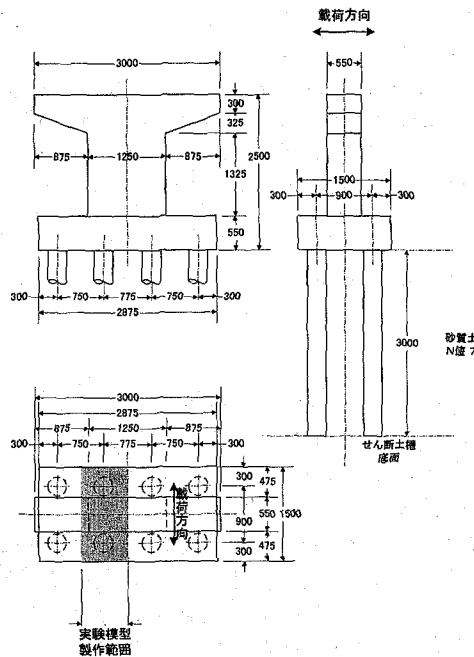


図-3 実験対象模型の概要

の地盤上に建設された支間長30mの単純桁橋であり、基礎形式はRC場所打ち杭である。

(2) 実験模型

ハイブリッド振動実験の実験状況は写真-1 に示すとおりである。本研究では、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、その中に地盤模型および RC 杭基礎模型を設置した。杭基礎模型の上部に治具を設置し、治具に加振機を結合した。その外側に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。

杭基礎模型は、(1)項で述べた実規模橋梁の寸法を 1/4 に縮小したものであり、鉄筋コンクリートにより作成した。図-3 に示すように、本実験では加振直角方向に対して 4 本配置されている杭のうち 1 本を取り出し、1 本×2 列の杭模型を作成した。そのため、フーチング底面に作用させる外力は、4 本×2 列の杭基礎に作用するフーチング底面の地震力の 1/4 となる。杭基礎模型の寸法については、鉄筋

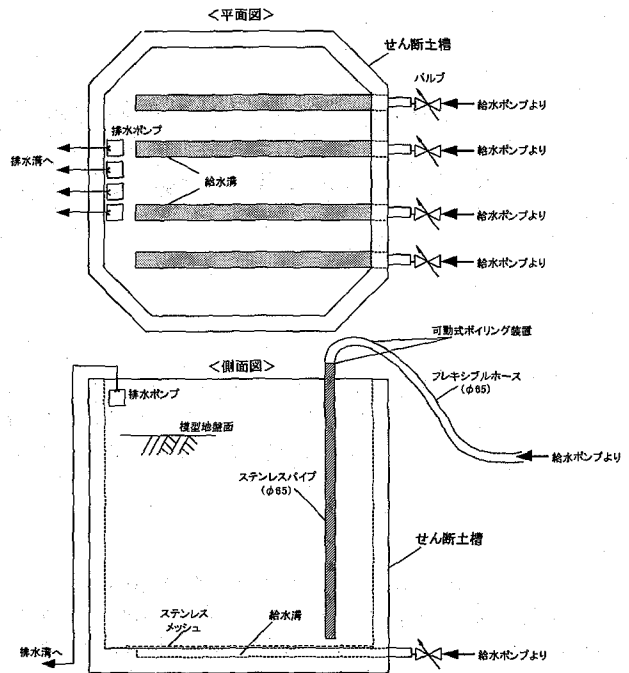


図-4 本実験で用いたボイリングシステム

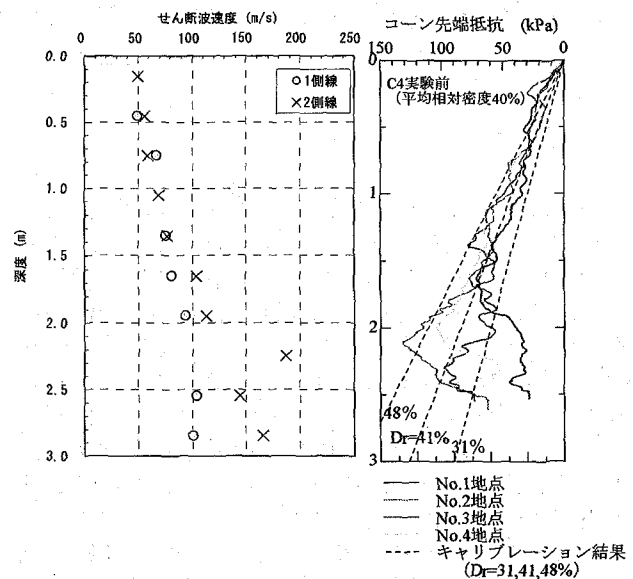


図-5 せん断波速度計測およびコーン貫入試験結果

の断面積比が実規模橋梁の杭基礎と杭基礎模型で同じとなるように径および本数を決めた結果、杭径が 30cm、主鉄筋が D6 で 14 本、帯鉄筋が $\phi 4$ で 4cm 間隔となった。

(3) 地盤模型

地盤模型に用いた材料は東北硅砂6号であり、地表面からせん断土槽底面までを緩いケースとして $Dr=40\%$ 、密なケースとして $Dr=88\%$ の飽和地盤とした。 $Dr=40\%$ の地盤は、実験後に容易に地盤密度を調節することができるボイリング法により作成した。

図-4に用いたボイリングシステムの概念図を示す。せん断土槽底面の給水溝のみからの給水によるボイ

表-1 数値解析モデルのパラメータ

実験対象物		パラメータ
質量(kg)	フーチング m_0	1481
	橋脚と上部構造 m_1	2224
バネ剛性(N/m)	橋脚(無補強) K	4.1195×10^7
	橋脚(補強) K	4.9434×10^7

表-2 実験対象模型体の固有振動数

			1次固有振動数(Hz)		2次固有振動数(Hz)	
			橋脚無補強	橋脚補強	橋脚無補強	橋脚補強
Dr(%)	40	初期状態	2.51	2.53	11.88	12.93
		液状化時	1.19	1.19	11.52	12.60
	88		3.33	3.38	12.31	13.32

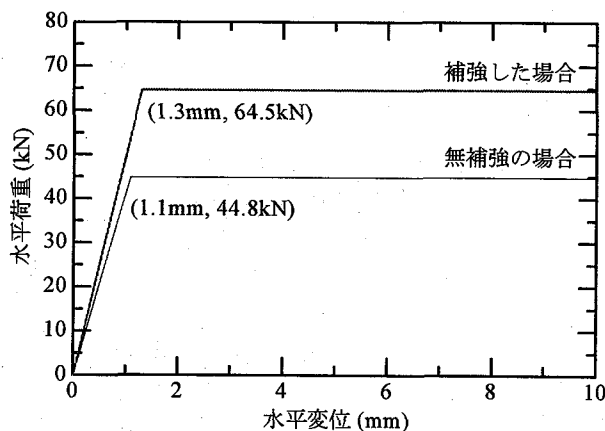


図-6 橋脚の非線形特性

リングでは不十分であったため、長さ3mの給水管から水を供給しながら底面付近まで貫入するボーリング装置を併用した。また、土槽上部に排水ポンプを設け、給水溝およびボーリング装置からの給水と同時に上部から排水させることにより、ボーリングの継続時間を長くすることができるようにした。Dr=88%の地盤は、前述の方法により緩い地盤を作成した後に、正弦波10Hz程度の加振を繰り返し行うことにより作成した。なお、これらの相対密度は、土槽に投入した砂の重量と地盤高さから求めた平均的な相対密度である。

ボーリング法で作成した地盤の特性を把握するため、ベンダーエレメントによるせん断弾性波速度Vsの計測およびコーン貫入試験を行った。それらの計測結果を図-5に示す。いずれの計測結果も、2m以浅では測定位置による違いが小さいことから地盤の均一性が確認できるが、2m以深ではいずれもばらつきが大きくなっている。これは、土槽深部を均一にボーリングさせることが困難であったためと考えられる。

(4) 数値解析モデル

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2質点系モデルである。数値モデルの各パラメータは表-1に示すとおりである。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-6に示すようなバイリニア型モデルにより表現した。また、橋脚を補強した

表-3 実験ケース

実験ケース	入力波		橋脚		Dr(%)
	振幅(gal)	振動数(Hz)	補強	非線形特性	
C3	600	12.0	なし	弾性	88
C4	600	12.0	なし	弾性	40
C5	600	12.0	なし	バイリニア	88
C6	600	12.0	なし	バイリニア	40
C8	600	13.0	あり	バイリニア	40
C9	0~500 (漸増)	1.0	なし	バイリニア	40

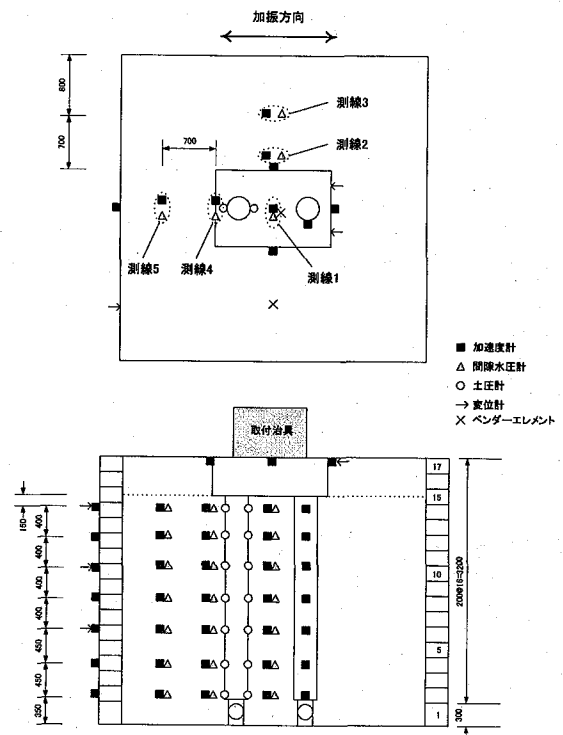


図-7 計測器配置図

状態を想定したケースとして、橋脚の剛性および降伏変位をそれぞれ1.2倍したものについても同図に示している。

(5) 実験模型の固有振動特性

実験模型の振動特性を把握するため、実験に先立って実験対象橋梁を対象とした固有振動解析を行った。固有振動解析のモデルは、上部構造およびフーチングを質点とし、橋脚および地盤-基礎系を水平バネに置き換えた2自由度系モデルである。なお、地盤-基礎系のバネについては、実験に先立って行った微小加振試験で得られた値を用いた。解析結果を表-2に示す。

橋梁全体系を2自由度系のモデルに置き換えて考えると、地盤が液状化する場合には、橋脚のバネに比べて地盤-基礎系のバネが非常に小さくなるため、1次の振動モードでは上部構造およびフーチングが剛体的に運動し、橋脚に変形が生じにくくなる。このため、橋脚を大きく応答させて塑性化させる場合には、2次固有振動数に相当する周波数の正弦波を入力することとした。

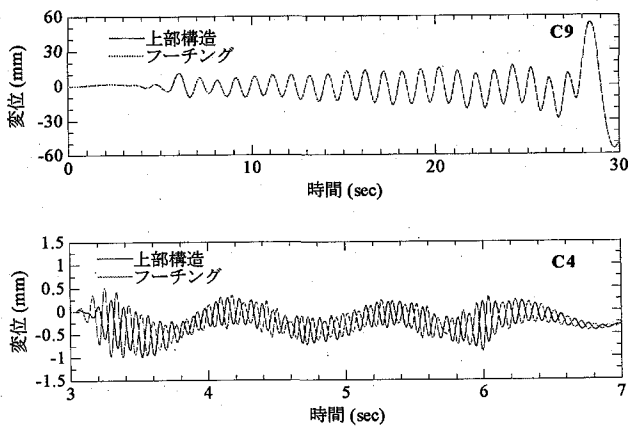


図-8 各質点の変位時刻歴

(6) 実験ケース

実験ケースは表-3 のとおりであり、6 回の実験を行った。入力波形は、実験模型の 1 次の固有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である。また、各ケースにおける計測器配置は図-7 のとおりである。

3. 実験結果

(1) 固有振動モードの検討

ケース C4 および C9 について、数値モデルの変位応答時刻歴を図-8 に示す。1 次固有振動数に相当する正弦波を入力した C9 では、2 つの質点が同位相で振動していることから、前述の実験模型に対する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。同様に 2 次固有振動数に相当する正弦波を入力した C4 では、1 次固有振動数の周波数成分を含むが、フーチングと上部構造が逆位相で振動しており、実験結果と解析結果が整合している。

(2) 地盤の応答

本研究で行った実験ケースのうち、地盤条件および加振条件が類似しているケース、すなわち $Dr=88\%$ である C3 と C5、および $Dr=40\%$ の C4、C6、C8 では地盤の応答が明確に異なることはなかった。そこで、代表例としてケース C3、C4 および C9 の地盤の応答について以下に述べる。

ケース C3、C4、C9 において、測線 3 のフーチング

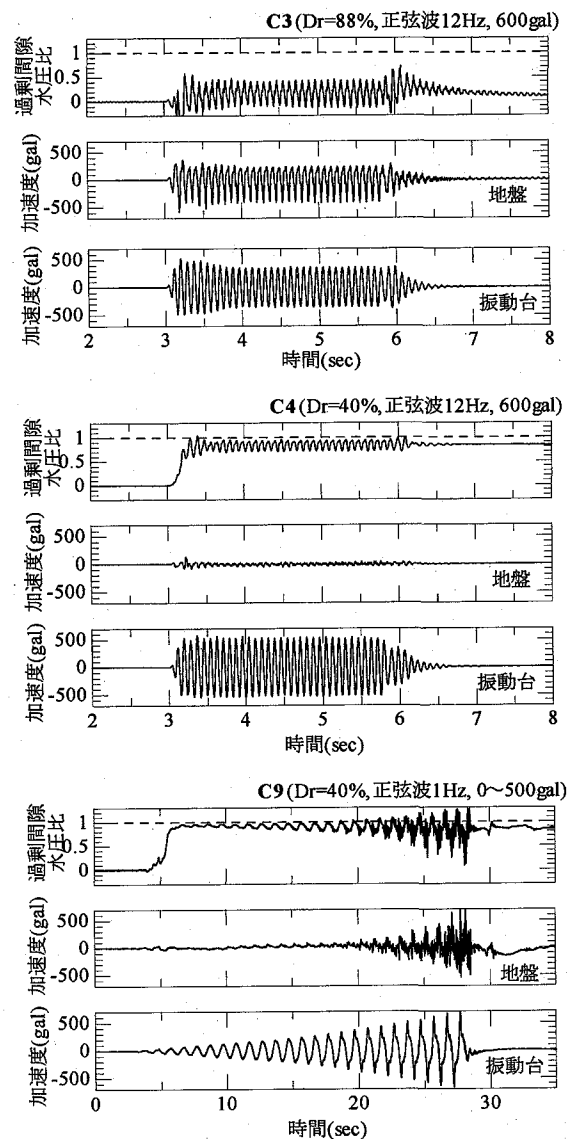


図-9 地盤の応答の例

底面から 0.95m の深度で測定した地盤の加速度および過剰間隙水圧比の時刻歴の一例を図-9 に示す。 $Dr=88\%$ のケース C3 では過剰間隙水圧比はおよそ 0.5 以下であり、液状化していない。地盤加速度の波形は、入力波形と比較して若干減衰しているが、地盤は振動台の動きに概ね追従している。 $Dr=40\%$ のケース C4 および C9 では、加振開始後の 3~4 波で過剰間隙水圧比が 1 に達して地盤が液状化し、加振終了まで液状化状態が継続している。また、いずれのケ

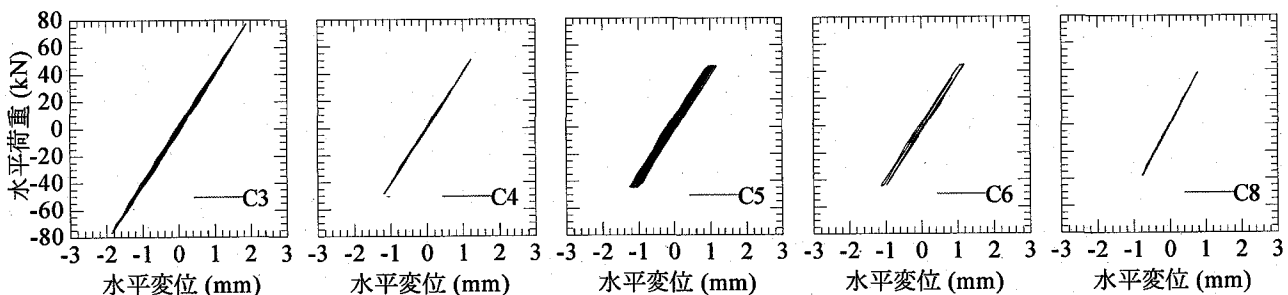


図-10 橋脚の荷重-変位関係

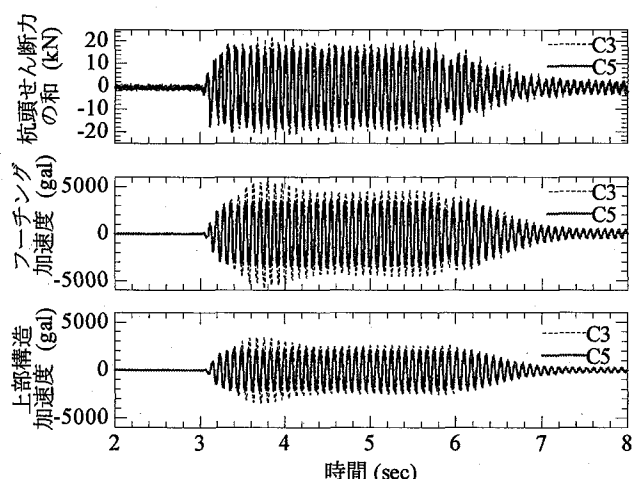


図-11 橋脚の塑性化の影響

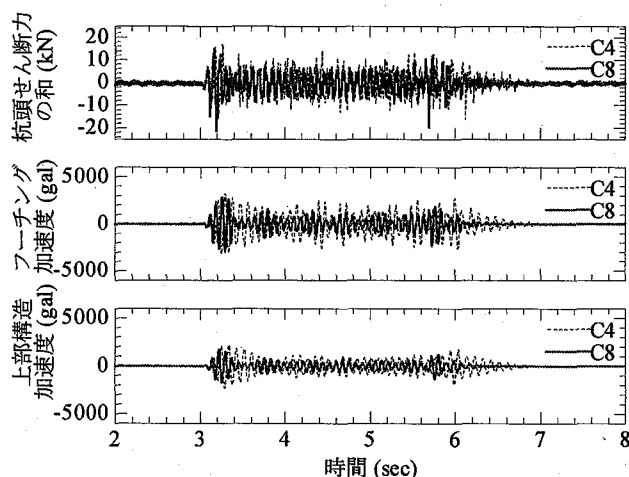


図-13 橋脚の補強の影響

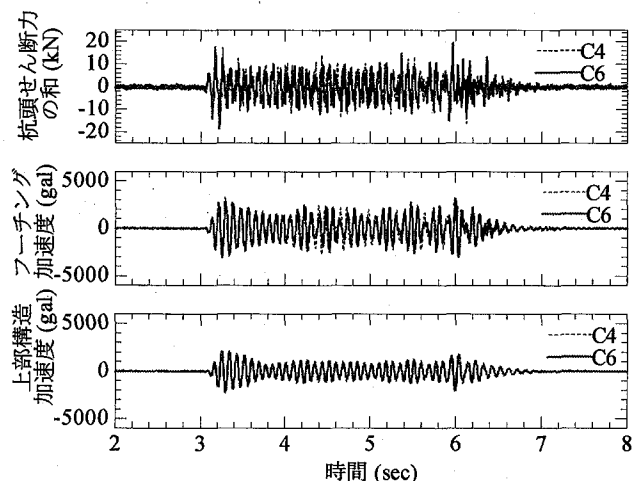


図-12 橋脚の塑性化の影響

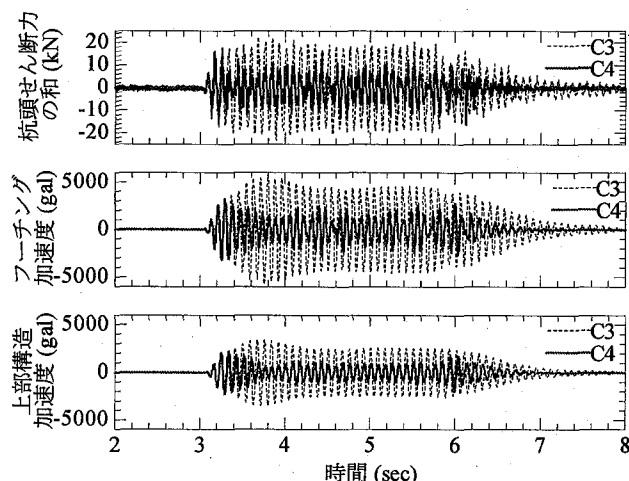


図-14 地盤の液状化の影響

ースでも地盤加速度の波形は過剰間隙水圧比が1に達した時刻とほぼ同時に急激に減衰する波形となっている。

(3) 橋脚の荷重-変位関係

各ケースにおける橋脚の荷重-変位関係を図-10に示す。橋脚の非線形性を考慮したC5およびC6では、わずかに橋脚が塑性化していることが分かる。また、橋脚を補強した状態を想定したC8においても橋脚の非線形性を考慮したが、後述のとおり上部構造の応答が小さくなり、結果的には弾性範囲にとどまった。

(4) 橋脚の塑性化の影響

まず、相対密度 $Dr=88\%$ の地盤に2次の固有振動数に相当する正弦波を入力したケースC3およびC5における構造物の応答加速度と杭頭せん断力の和を図-11に示す。杭頭せん断力の和とは、加振機の荷重から杭基礎模型上部治具の慣性力を減ずることにより求めた、杭2本の杭頭に作用するせん断力の和である。加振開始後の4波までは、C5の橋脚も塑性化していないためC3とC5の応答はほぼ一致している。5波目以降でC5の橋脚が塑性化すると共に、C5の上部構造物およびフーチングの加速度がC3よりも小さくなり、杭頭のせん断力も減少した。

次に、相対密度 $Dr=40\%$ の地盤に2次の固有振動数に相当する正弦波を入力したケースC4およびC6における構造物の応答加速度と杭頭せん断力の和を図-12に示す。加振開始後の4波までは、これら2ケースとも応答の振幅はほぼ一致している。2波目以降でC6の橋脚が塑性化することにより、C6の上部構造物およびフーチングの加速度がC4よりも小さくなり、杭頭のせん断力もわずかに減少しているが、C6では前述したC5と比較して塑性化の程度が低いため、橋脚の塑性化による応答の変化も明確ではない。

(5) 橋脚の補強の影響

図-13は $Dr=40\%$ の地盤で橋脚を補強したケースC8と無補強のC4での構造物の応答加速度と杭頭せん断力合力を示したものである。C8では橋脚の剛性が高いことにより2次の固有周波数もC4より高く、従って加振周波数は両ケースで異なる。上部構造物およびフーチングの加速度および杭頭のせん断力は、全体的にC8の方が小さくなっている。これは、橋脚を補強することによって、フーチング-上部構造系と基礎-地盤系の剛性比が高くなったことにより、2次モードが卓越しにくくなったためであると考えられる。

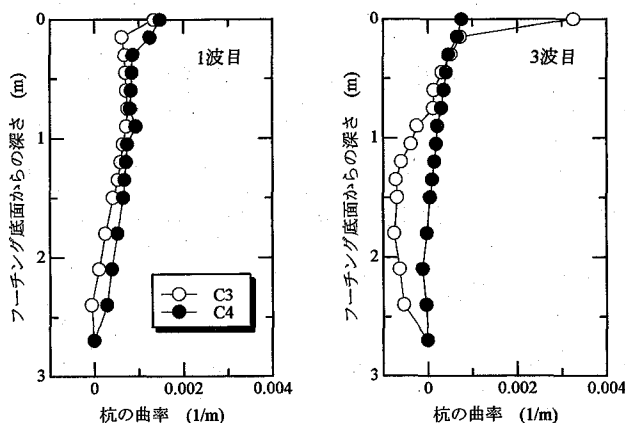


図-15 加振 1 波目および 3 波目における杭曲率の深度分布

(6) 地盤の液状化の影響

図-14 は 2 次の固有振動数に相当する正弦波を入力したケース C3 および C4 の構造物の応答加速度と杭頭せん断力の和を示したものである。

加振開始後 3 波までは、C4 でも地盤が液状化しないために両ケースの応答はほぼ一致しているが、4 波目以降では上部構造物およびフーチングの加速度および杭頭のせん断力は、全体的に C4 の方が小さくなっている。これも橋脚を補強した場合と同様に、地盤が液状化することによってフーチング-上部構造物系と基礎-地盤系の剛性比が著しく高くなることにより、2 次モードが卓越しにくくなったためであると考えられる。

図-15 は、C3 および C4 において加振開始後 1 波目と 3 波目で、杭頭部のひずみが最大となった瞬間での杭の曲率の深度分布である。両ケースとも地盤の過剰間隙水圧比が比較的低い 1 波目では、ケースによる差は小さい。しかしながら 3 波目では、C4 では杭の曲率が深さ方向に概ね直線的に小さな曲がりをもって分布しているのに対し、C3 では比較的大きな曲がりをもって分布している。杭の曲率（あるいは曲げモーメント）を杭軸方向に 2 階微分したものが土圧に対応することを考えると、C3 の 3 波目では大きな土圧が杭に作用しているが、C4 の杭に作用する土圧は非常に小さいと考えられる。図-14 で地盤が液状化することにより構造物全体の応答が小さくなっているのは、地盤変形よりも上部構造物の慣性力の影響が杭の応答に支配的に影響を及ぼしていたことも一つの原因であると考えられる。

4. 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) 橋脚が塑性化することにより、上部構造加速度、フーチング加速度、杭頭せん断力が小さくなることを確認した。
- (3) 橋脚を補強した場合、上部構造加速度、フーチング加速度、杭頭せん断力が小さくなることを確認した。
- (4) 地盤が液状化した場合、上部構造加速度、フーチング加速度、杭頭せん断力が小さくなることを確認した。

謝辞：本研究は、平成14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。ここに、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷本俊輔, 田村敬一, 岡村未対, 小林寛：上下部構造物の連成を考慮した橋梁のハイブリッド振動実験, 土木技術資料, 平成15年1月号, pp22-25, 2003.1
- 2) 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, pp913-916, 1999.7
- 3) 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, pp207-212, 2002.2
- 4) 小林寛, 田村敬一, 東拓生：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回日本地震高価シンポジウム論文集, pp2189-2194, 1998.11
- 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1報), 日本機械学会論文集 (C編), 61巻584号, pp1328-1336, 1995.4
- 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), 日本機械学会論文集 (C編), 67巻655号, pp667-674, 2001.3
- 7) 谷本俊輔, 田村敬一, 小林寛：基礎構造物の塑性化を考慮した橋梁全体系の地震時挙動に関するハイブリッド振動実験, 第4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, pp221-226, 2003.3