

大規模群杭基礎橋脚の加振実験と相互作用に関する解析

菊地 敏男 後藤 洋三

Vibration Test of Bridge Pier with Large-scale Group-pile Foundation and Analysis Focused on Interaction

Toshio Kikuchi Yozo Goto

Abstract

The purpose of this study is to verify the adequacy of an FEM model taking into account soil-structure interaction applied to earthquake response analysis of a bridge pier with a large-scale group-pile foundation. Principally, this paper describes the results of dynamic FEM analyses compared with those of in-situ vibration tests using an exciter.

It was found from the experiments and analyses that ① coupling resonant phenomena between the ground and the pier are conspicuously observed at the first and second natural frequencies, ② dynamic axial strain which occurs at the tops of the piles is transmitted to the ends of the piles, and ③ the experimental results can be simulated by the two-dimensional analysis model, FLUSH.

概要

大規模群杭基礎橋脚について、地盤との相互作用を考慮した地震応答解析に用いる計算モデルの妥当性を検証する目的で、起振機実験を用いた振動実験と FEM によるシミュレーション解析を実施する機会を得た。橋脚の基礎は $\phi 1,500$ mm、長さ 50 m の鋼管杭を 56 本使用した群杭であり、フーチングおよび脚柱はプレハブの鋼殻と場所打ちコンクリートの複合構造である。

この実験および解析の結果から、① 地盤との連成は 1 次と 2 次の共振点で顕著に現れること、② 杭に作用する動的な軸ひずみは深部まで伝達されること、③ 実験結果は底面および側面の境界処理を適切に行なった 2 次元モデルを使用することにより、特に入力定数を操作することなくシミュレートできること、などが明らかになった。

1. まえがき

杭基礎は軟弱地盤地域における橋脚や地上タンクなどの大型構造物の基礎として用いられることが多い。杭基礎の耐震設計は大別して静的な震度法と動的な応答解析に基づく設計に分けられる。後者の動的な解析法の一つとして、FEM が用いられる場合が多くなってきた。FEM は、弾性波動理論解を用いる方法や集中質点系のいわゆる Penzien 法に比較し、複雑な形状を容易にモデル化できるという利点がある。

一方、杭基礎と地盤との相互作用に関する基本的な性質については、その群杭効果をも含めて、実験と理論による検証が十分になされているとは言えない。

そこで、本研究は大規模群杭基礎の橋脚について、杭と地盤との相互作用による挙動を把握すること、地震応答解析に用いる計算モデルの妥当性を検証すること、などを目的として、起振機を用いた振動実験と FEM によるシミュレーション解析を実施した。

2. 地盤と橋脚・基礎の概要

試験の対象となった橋脚付近の地盤状況は図-1 に示す

ように、最上層に軟弱な沖積粘土層、次に段丘堆積層の砂礫層、さらに、その下に洪積粘土層を主体とした薄い砂層との互層がそれぞれ堆積している。杭先端は深さ 55 m 付近の洪積粘土層中に根入れしている。橋脚は図-2 からわかるように、門型ラーメン構造であり、脚柱部の断面は 5×5 m、高さが 34.4 m である。フーチングの寸法は 32.5×27.5 m で、 $\phi 1,500$ mm の鋼管杭が 56 本打設されている。この鋼製橋脚は工場にて一括製作し、輸送、設置される。その後、橋脚内をコンクリートで充填し、合成構造としている。コンクリートの打設部分は橋脚天端より 15 m から下の部分である。

3. 実験方法

加振源としては 20 t 起振機を使用し、橋脚上部の横梁に設置した。加振モーメントは、2.8 Hz 以降 15 Hz まで起振力が 20 t 近くになるように設定した。振動数の設定は平均 0.2 Hz ピッチで行ない、共振点付近はさらに細分した。加振方向は橋軸方向である。センサーは、図-1 と図-2 に示すようにサーボ型加速度計、ひずみ計および鉄筋計である。加速度計は脚柱部に 9 台 (10 成分)、フーチングに 6 台 (7 成分)、A5 杭に 6 台 (11 成分)、G5 杭に 1 台 (1 成

分)、地盤上に3台(6成分)の計25台である。地盤上の測点は加振方向にフーチングから10m, 20m, 30m, の地点(深さ2~3m)である。ひずみ計は脚柱部の鋼殻に12台(12成分), A4杭に18台(18成分), G4杭に18台(18成分)それぞれ設置し, この他, 脚柱部のコンクリート内に鉄筋計を8台(8成分)設置した。測定機器, 起振機操作盤および解析機器は台船上の計測小屋内に設置した。台船は毎朝, 実験開始時に最寄りの港より曳航し, 実験終了後に戻した。

実験時における各センサーからの信号は, 各アンプで増幅したあと, 起振力と同位相の信号と共にデジタルデータレコーダに記録した。記録に当たってその採取状況アンプの倍率などを監視する目的で, ペンレコーダおよびスペクトルアナライザーをモニターとして用いた。また, 主要な計測点については, アナライザーを用いて振幅を読み取り, パソコンを使って共振曲線を作成し, その結果をもとに共振振動数を把握して加振ピッチを決定した。測定結果は, 計算機により解析を行ない, 振動数, 振幅および位相の読取りを行なった。

4. 実験結果

脚柱部, フーチングと杭および周辺地盤における代表的な測点の共振・位相曲線を図-3から図-6に示した。ここに, 変位は加速度値を2回積分して求めたものであり, 曲げひずみは同一深度における対面のひずみの差を1/2にすることにより求めたものであって, 共振曲線はこれらの値を起振力1tあたりに規準化して示している。これらの図より, 主な共振点は, 1.4 Hz, 3.2 Hz および 11.7 Hz の三つであることがわかる。図-3の脚柱部の振幅は二つの明確なピークを示しており, それらのピークでは位相差も90°を示している。図-4のフーチングおよび杭では脚柱部で現れたピークの他に, 1.4 Hz 付近にも現れている。フーチングの振幅は橋脚上部に比較し, 1/10程度である。1.4 Hz のピークは, 周辺地盤および杭の曲げひずみ(二つの軸ひずみの差の1/2)に見られ, 特にEA30L(フーチングより30m地点)において顕著になる。

この共振点におけるモードを示したものが図-7である。これらの図は橋脚天端の変位が最大となった時の変位分布である。これらの図より, 1.4 Hz のモードは, 地盤の水平振動とフーチングのスウェイ振動が連成したものであり, 3.2 Hz のモードは, 橋脚部の1次曲げ振動とフーチングのロッキング振動が連成したものであり, 11.7 Hz のモードは橋脚部の2次曲げ振動が卓越したものであると, それぞれ考えられる。モードと減衰の関係から, 周辺地盤の振動エネルギー比率が大きいモードほど, 減衰が大きくなる。

三つのピークにおける杭の軸ひずみと曲げひずみを図-8に示した。図中, 実線(—)はひずみ計より求めたものであり, 点線(……)は加速度値を2回積分して求めた上下, 水平変位の差よりそれぞれ求めたものである。これらの図より, 変位より求めた軸ひずみと曲げひずみは, ひずみ計からの値とほぼ同じ傾向を示すこと, 曲げひずみに

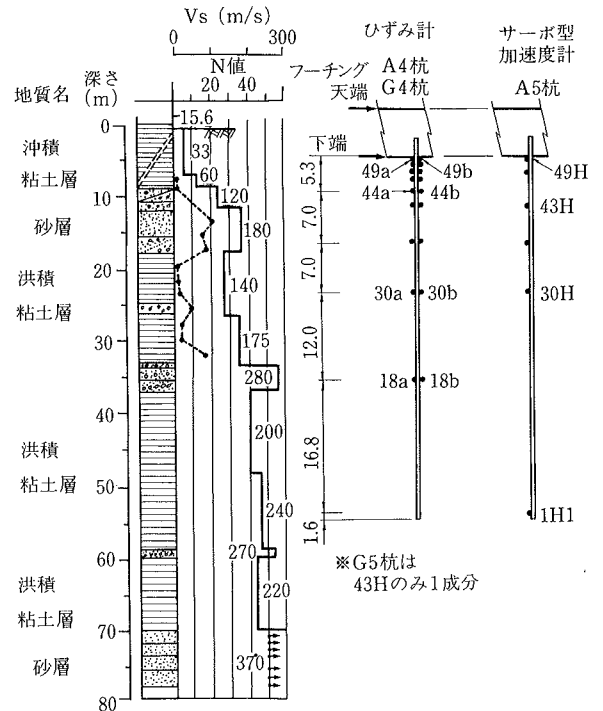
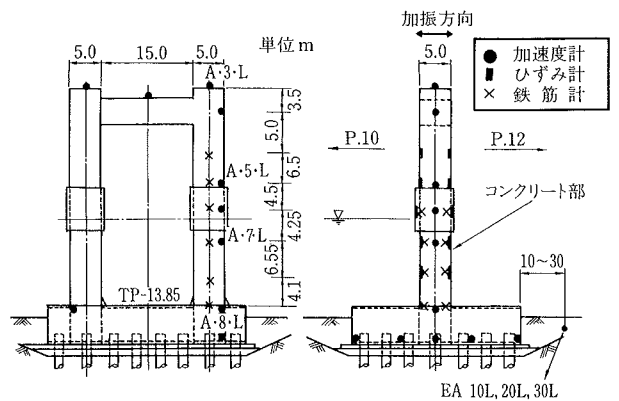


図-1 地盤状況と杭の計測点



* EA 10L, 20L, 30Lはフーチングから10m, 20m, 30m地点

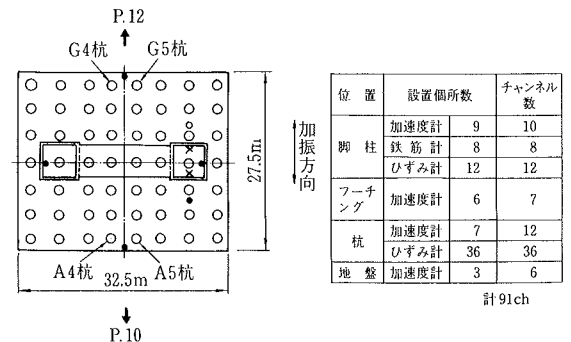


図-2 橋脚・基礎の概要と計測点

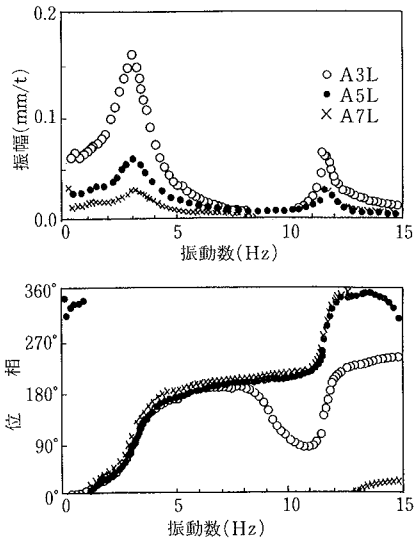


図-3 共振・位相曲線(脚柱部)

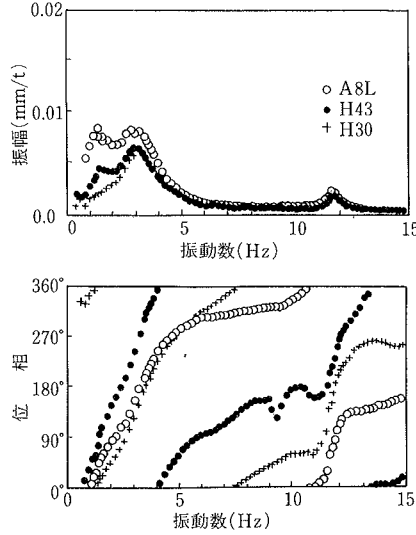


図-4 共振・位相曲線(フーチング・杭)

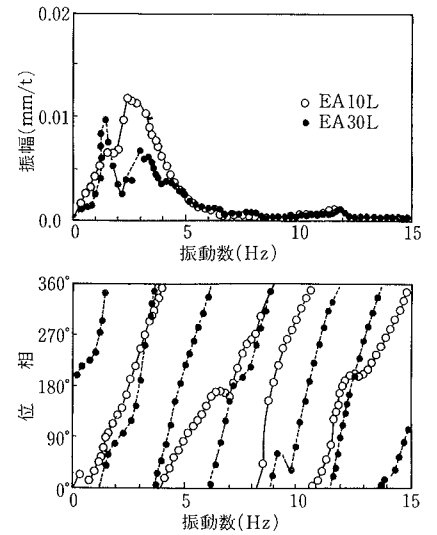


図-5 共振・位相曲線(地盤)

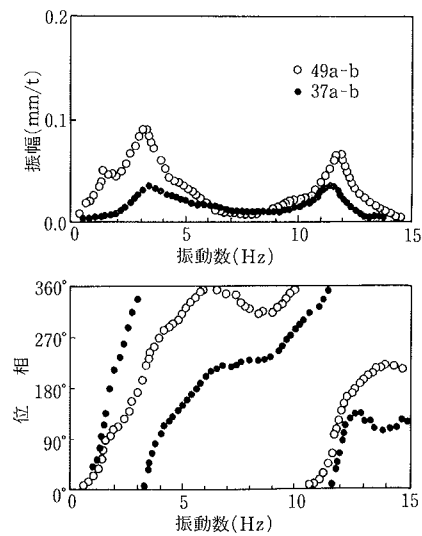


図-6 共振・位相曲線(杭の曲げひずみ)

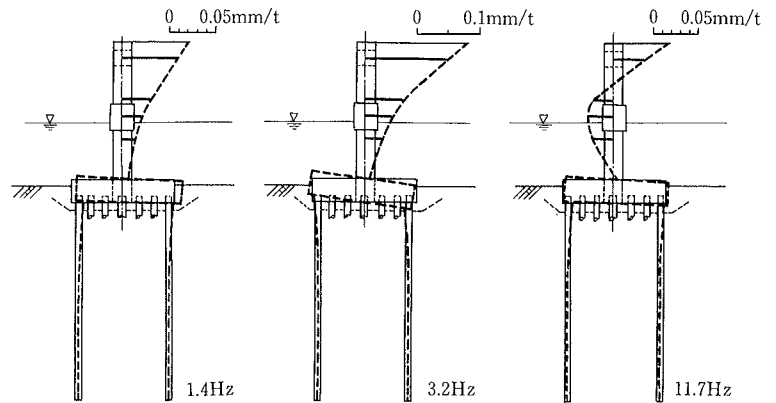


図-7 振動モード

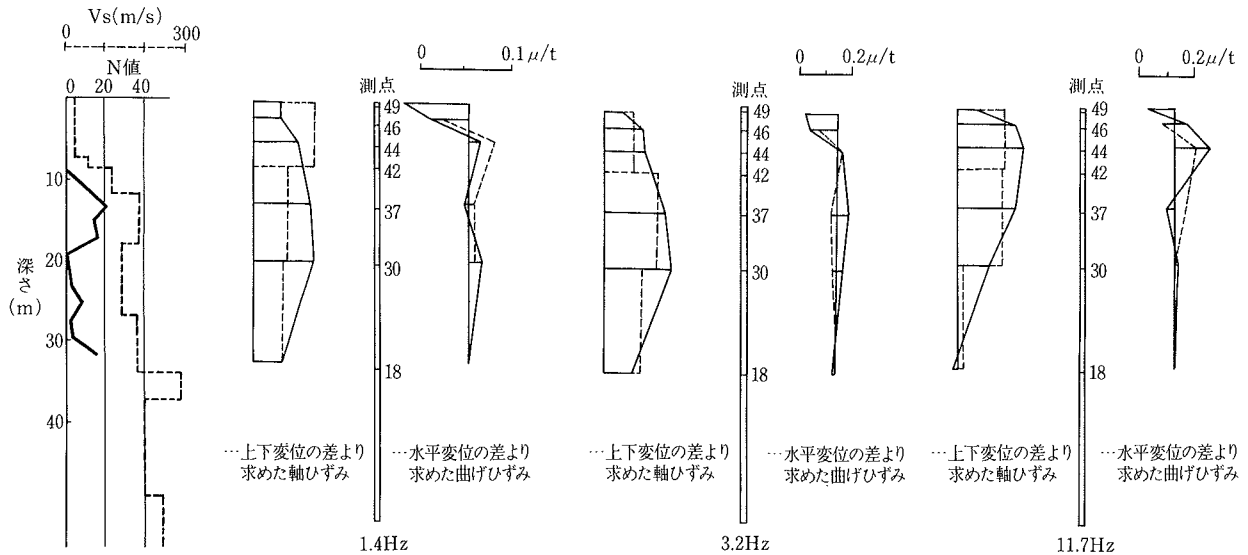


図-8 杭の軸ひずみ・曲げひずみ

ついては杭頭部で最大となっており、杭頭固定の状態に近いことがわかる。また、軸ひずみは杭頭部で最大とならず測点30付近の中間部で大きくなっていることがわかる。この原因は、杭頭より2m付近までは中埋めコンクリートが打設されていること、杭頭より13mまでは杭の肉厚が19mmであり、それ以深は16mmであること、などにより杭頭付近ほど断面剛性が大きくひずみも生じにくいと考えられる。また、深さ20m~30mの地層はその上下層より軟らかい層($V_s=140$ m/s)となっており、地盤自体も変形しやすい層となっていることも影響していると考えられる。

実験により得られた加速度振幅と橋脚の質量ならびに加振力から杭頭に作用する水平外力を算出し、杭頭水平変位で除して杭頭の水平バネ定数を求めたものが図-9である。この図より、バネ定数は振動数によって複雑な変化を示すが、実数部は2~3 Hz付近で極小値を示す傾向にあり、虚数部は3 Hz付近を境として振動数と共に増加する傾向を示す。共振・位相曲線からわかるように3 Hz付近は、地盤とフーチングが連成する明確な共振点が見られることから、振動数によるバネ定数の変化はこの共振点の影響を受けたものと推定できる。また、実験から求めたバネ定数は、振動数によるバラツキも認められるが、1~4 Hzの平均値で見ると、図中の注に示した各設計指針から得られる値と概略一致している。設計指針より求めた杭の変位が振動実験時に生じた変位の約100倍であるにもかかわらず一致した理由は、以下のように推察される。すなわち、設計指針は群杭効果を見込んでいない値であって、振動実験による値は群杭効果の影響を受けた値である。したがって、振動実験から得られた値は杭の変位が小さいことによりバネ値が大きくなる影響と、群杭効果によってバネ値が小さくなる影響が相殺され、結果として設計指針の値と同じオーダーの値となったと考えるのが妥当である。

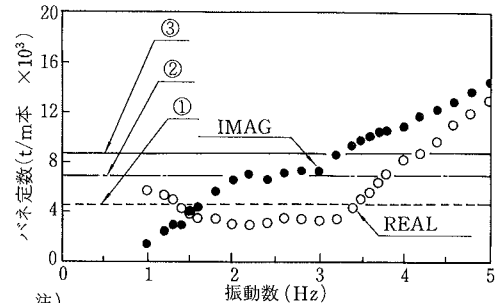
5. 解析方法

使用したプログラムは2次元FEMであって上部加振や底面粘性境界の処理機能を加えたFLUSH拡張版である。図-10に要素分割図(1/2モデル)を示す。モデルの表面と裏面には擬似3次元粘性境界を配し、側方には伝達境界を設定して境界の影響が小さくなるようにした。奥行はフーチングの幅32.5mと一致させた。脚柱部は同じ奥行を有する板として、杭は1列8本分を7列の板として梁要素でモデル化した。脚柱下部ならびにフーチングは鋼殻コンクリートであり、杭内はフーチングより-2mまでコンクリートが充填されているので、これらのコンクリート部は全断面有効として剛性評価した。地盤に関する諸定数は、弾性試験結果などに基づくせん断剛性と密度を用いた。海水の影響は海面下の脚柱部に付加質量として考慮した。

脚柱部、フーチング、杭などにおける構造物の減衰は2%に設定し、地盤では各層すべて5%の履歴型とした。この解析は微小ひずみ域であることから、地盤の非線形の影響は考慮していない。

この橋脚は2本の脚柱の上部を横梁で結合した構造とな

っており、横梁の中央に起振機が設置されて梁軸直角方向に加振されている。そこで、横梁部を図-10の付図のようにモデル化した。横梁のモデルは、下端を回転バネと回転慣性を持つ梁として3次元の構造物を2次元で表現するため、上に立ちあげた。梁の上端は回転が拘束され、水平には自由とする。長さは横梁の中央点(起振機の位置)に相当する。同図の④は水平方向の軸力のみを伝える剛なロッド材、⑤は横梁の2倍の曲げ剛性を有する上端回転拘束の片持梁、⑥は脚柱のねじり剛性を表現する回転バネでその中心には脚柱の回転慣性が付加されている。加振点は梁⑥



- 注)
 ① 連絡橋下部工設計指針 (孔内水平載荷試験結果を利用)
 ② 道路橋示方書・1990年2月(孔内水平載荷試験結果を利用)
 ③ 道路橋示方書・1990年2月(弾性波試験結果を利用)

図-9 バネ定数

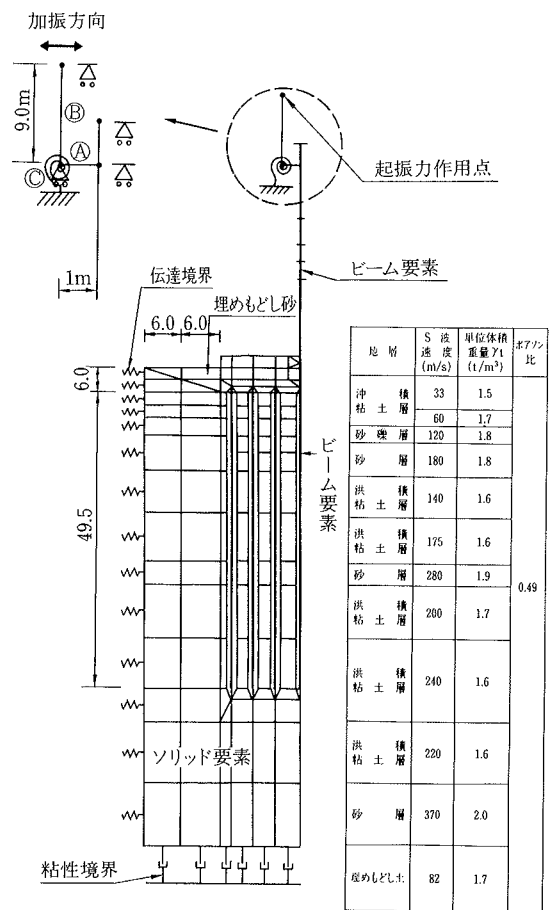


図-10 FEMモデル

の頂部で、ここに起振機の出力に相当する正弦波を入力して応答を計算した。

6. 解析結果

代表的な測点の共振曲線を実験結果と比較したものが図-11である。これらの図より、脚柱部、フーチングおよび杭、などにおける各測点の共振曲線はよく一致し、このモデルが橋脚の振動特性をよく捉えたものであることがわかる。ただし、橋脚部における12 Hz付近のピークが若干相違する。このピークでは脚柱部のねじれと横梁自身の曲げ振動が発生しているため、図-10に示すような回転バネと梁要素を立ちあげたモデル化を行なったとしても2次元の範囲では限界があるものと思われる。また、杭部におけるこのピークの振幅が実験値より小さいのは、地盤下部の要素分割が粗く高い振動数が表現できないためと考えられる。

三つの共振点における変位のモードを示したものが図-12である。モードは橋脚上部の水平変位が最大となる時のものを示した。この図より、各共振点におけるモードは図-7の実験結果と良く一致していることがわかる。

杭に生じる曲げひずみと軸ひずみの分布を、各共振点についても示したものが図-13である。図中、実線(—)は実験値であり、点線(----)は解析値である。これらの図

より、解析結果における杭のひずみ分布の特徴は実験結果とほぼ一致している。しかし、杭頭付近5~6 m(測点47, 44)における軸ひずみと曲げひずみの計算値は、実験値より1.7倍程大きい。これはひずみを測定した杭の中埋めコンクリートが予想以上に深く入り込み、解析モデルにおける杭の剛性より大きくなっていること、解析では杭が板状にモデル化されているが、実際には8本の杭が並列していること、などによるものと考えられる。

7. まとめ

実験および解析から得られた結果をまとめると、以下のようになる。

① 共振時のモードおよび解析との照合から、地盤との相互作用が大きいピークは一次と二次である。一次ピークは地盤の水平振動とフーチングの水平振動が連成したものであり、二次ピークは橋脚部の一次曲げ振動とフーチングのロッキング振動が連成したものである。また、三次ピークも現われたが、これは橋脚部の二次曲げ振動によるものである(図-7)。また、モードと減衰の関係から、周辺地盤の振動エネルギー比率が大きいモードほど、減衰が大きくなる。

② 杭に作用する動的な軸ひずみは比較的深部まで伝達

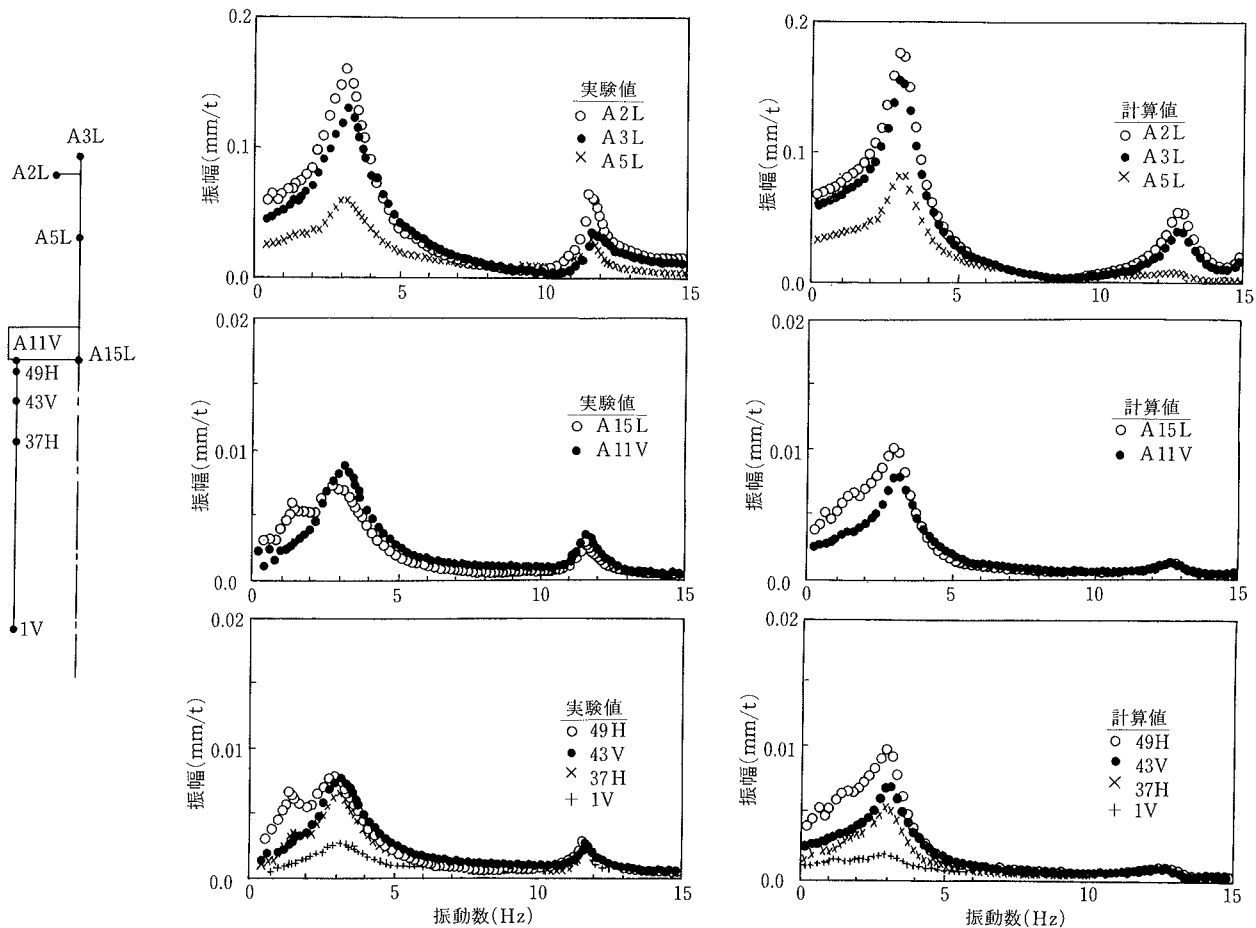


図-11 共振曲線の比較

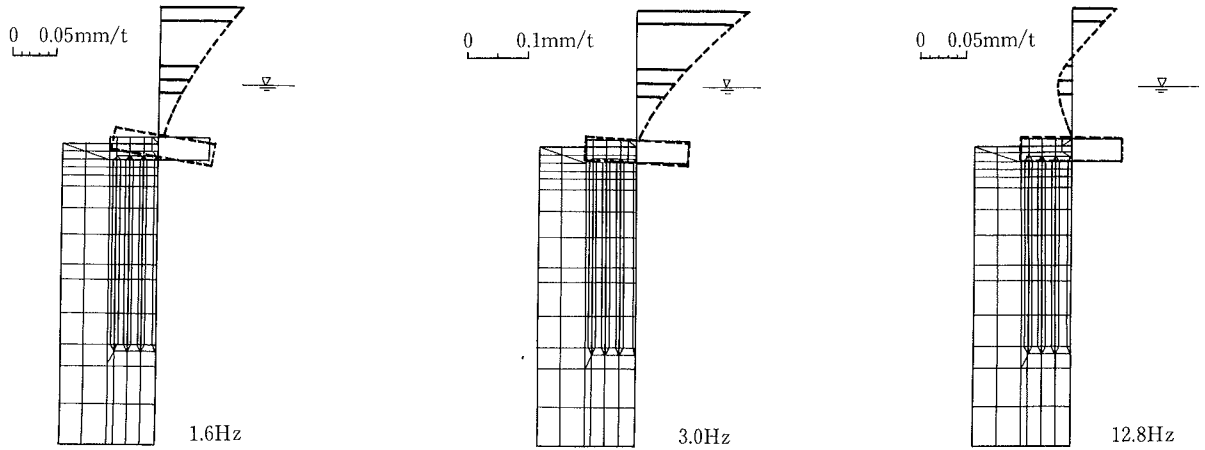


図-12 振動モード (計算値)

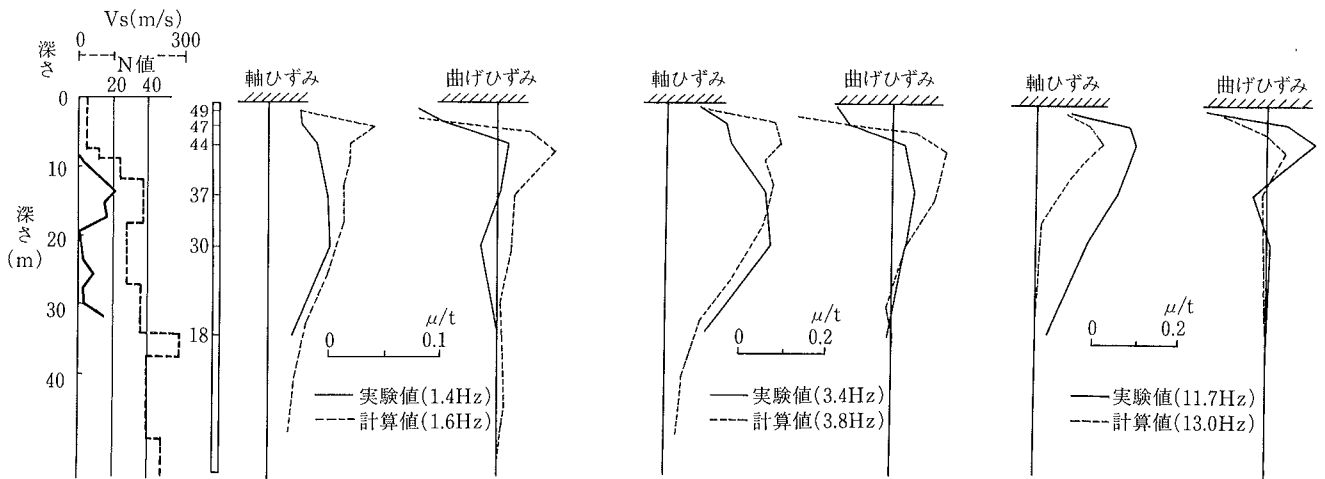


図-13 杭の軸ひずみ・曲げひずみの比較

される。曲げひずみは杭頭部で最大となり、杭頭固定に近い状態を示している (図-8)。

③ 実験から得られた杭頭のパネ定数の虚数部は、二次ピークの振動数付近を境として動的相互作用理論で示されるように振動数と共に増加する傾向を示し、実数部はこの振動数付近で極小値を示すことがわかる。1~4 Hz におけるパネ定数は見かけ上、各設計指針から得られる値と概略一致した(図-9)。これは、地盤ひずみが小さいものの群杭効果が含まれているため、これらの影響が相殺されて一致したと考えられる。

④ 底面および側面の境界処理を適切に行なった二次元 FEM モデルを使用することにより、入力定数について特別な操作を行なうことなく実験結果を良好にシミュレーションすることができた。

謝 辞

この報告のもととなった関西国際空港連絡橋 P11 橋脚振動実験工事は、関西国際空港(株)工務二部の計画と監督のもとに(株)大林組が実施したものである。実験および解析を進めるにあたり適切な助言を頂いた関西国際空港(株)の布施洋一 常務取締役、工務二部設計二課 芦原栄治係長、山田善一 京都大学教授、建設省土木研究所耐震研究室 川島室長ならびにご協力頂いた工事関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 本山, 丸山: 関西国際空港連絡橋橋脚における起振機実験とその解析, 第20回地震工学研究発表会, p.329~332, (1989)
- 2) 関西国際空港(株)編: 関西国際空港連絡橋下部工設計概要 第9章 基礎の設計法, (1987. 9)