

(83) 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

関西国際空港(株) 本山 薮 丸山忠明
 (株)大林組技術研究所 ○菊地敏男 後藤洋三

1. まえがき

この橋脚の基礎構造は摩擦杭として設計された鋼管群杭基礎であり、フーチング及び脚柱部はプレハブ工法による鋼格子桁とコンクリートの複合構造となっている。橋脚も含めた耐震設計に際しては橋脚と地盤の動的相互作用を考慮したFEM解析を行ない、フーチング天端における時刻歴波形から求められる応答スペクトルを用いている。この実験及び解析の目的は脚柱部と基礎部の動的応答特性を明らかにすること、地震応答計算に用いる動的解析モデルの設定法の検討等である。

2. 地盤と橋脚・基礎の概要

橋脚付近の地盤状況を図-1に示した。図より、最上層に軟弱な沖積粘土層、砂礫層、その下には洪積層を主体として薄い砂層との互層が厚く堆積している。杭先端は深さ55m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5×5m、高さが34.4mである。フーチングの寸法は32.7×27.5mで、Φ1500mmの鋼管杭が56本打設されている。また橋脚天端より15m下からはコンクリートが打設されており、合成構造となっている。

3. 実験方法

加振源としては建設省土木研究所所有の20ton 起振機 (EX-6300型) を使用し、橋脚上部の横梁に設置した。加振モーメントは 2.8Hz以降、起振力が 20ton近くになるように設定した。振動数の設定は平均 0.2Hz ピッチで行ない、共振点付近はさらに細分した。計測点は図-1と図-2に示すように、橋脚、杭、周辺地盤であり、センサーはサーボ型加速度計、ひずみ計等を用いた。計測小屋を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。記録はデジタルデータレコーダで行ない、計算機により解析を行ない振動数・振幅・位相の読取りを行なった。

4. 実験結果

代表的な測点における共振・位相曲線を図-3と図-4に示した。共振曲線は応答変位を起振力1ton 当

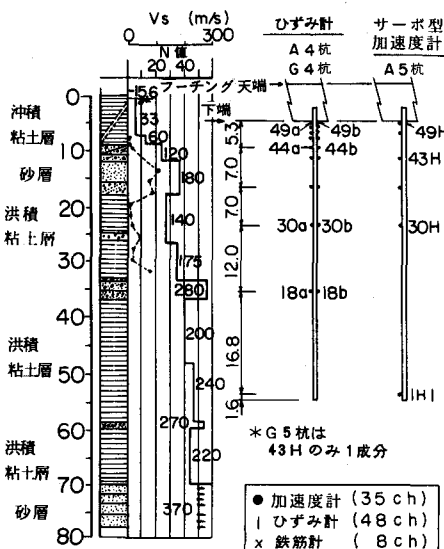


図-1 地盤状況と計測点(杭)

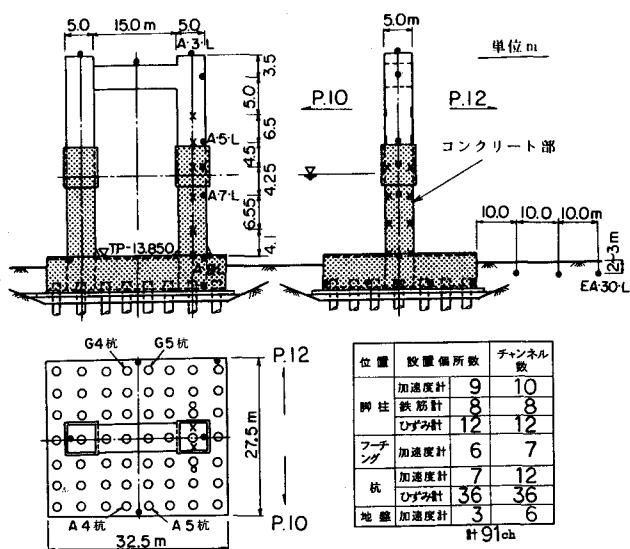


図-2 橋脚・基礎の概要と計測点

なりに規準化している。これらの図より、代表的な共振点は1.4Hz, 3.2Hz, 11.7Hzである。橋脚系では3.2Hz, 11.7Hzに現われ、杭・地盤系では1.4Hzにも現われる。各共振点での振動モードを図-5に示した。図より、1.4Hzは地盤の卓越振動によるもの、3.2Hz, 11.7Hzはそれぞれ橋脚部の1次曲げ振動、2次曲げ振動によるものと考えられる。3.2Hzにおける杭の軸ひずみ、曲げひずみを図-6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(---)は上下変位の差より求めたものである。軸ひずみは杭頭部で最大とならず、中間部付近で大きくなっている。この原因は杭頭より3m付近までは中埋めコンクリートが打設されていること、及び杭頭より13mまでは杭の肉厚が19mmであり、それ以降は16mmであること、等により、杭頭付近ほど断面剛性が大きくひずみが現われにくいためと考えられる。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。実験により得られた杭頭のせん断力、軸力をそれぞれ杭の水平、上下変位で除して求めた複素バネ定数を図-7に示した。複素バネ定数は1~4Hzにおいてほぼ一定の値を示し、虚数部は振動数と共に増加すること、等がわかった。また、想定する地盤のひずみや群杭の影響等で適用条件は異なるものであるが、道路橋示方書から求めたバネ定数とほぼ一致した。

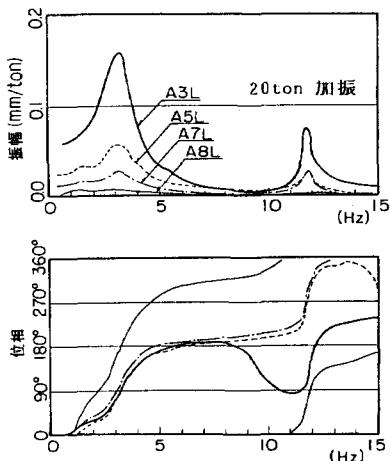


図-3 共振曲線・位相曲線(橋脚)

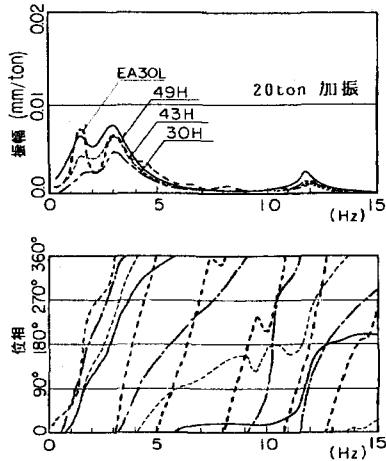


図-4 共振曲線・位相曲線(杭)(地盤)

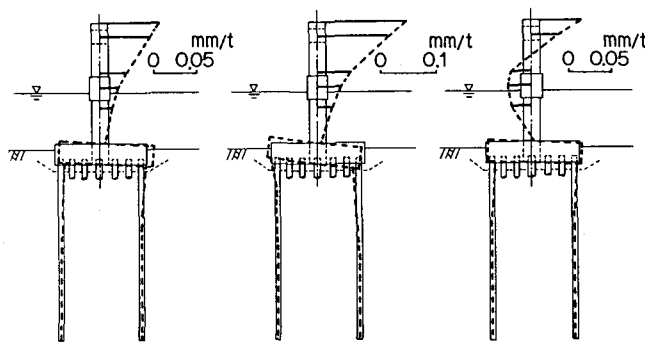


図-5 振動モード

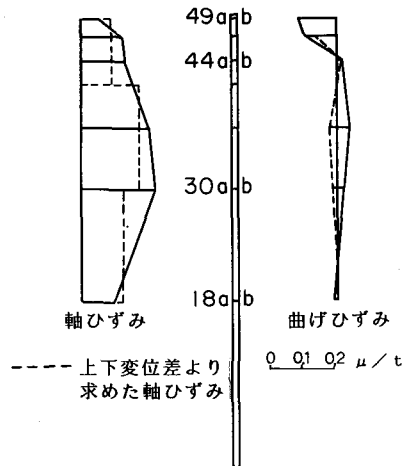


図-6 杭のひずみ(実験値)

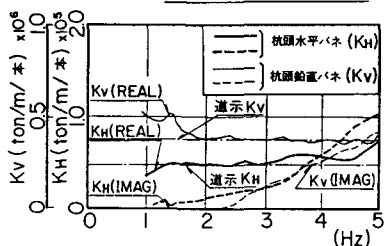


図-7 バネ定数

5. 解析方法

使用プログラムは上部加振や底面粘性境界処理を可能としたFLUSH拡張版である。図-8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、奥行はフーチングの幅32.5mと一致させた。脚柱及び杭(1列8本)は同じ奥行を有する板として梁要素でモデル化した。地盤定数にはPS検層結果などに基づくせん断剛性と密度を用いた。脚柱下部ならびにフーチングは鋼殻コンクリート構造であり、杭内はフーチング下-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。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。減衰は構造物を2%、地盤を一様に5%の履歴型とした。計算に当たり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-8の付図に示すようにモデル化した。同図のⒶは水平方向の軸力のみを伝える剛なロッド材、Ⓑ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、Ⓒは脚柱

表-1 基本モデル以外の解析ケース

Aモデル	基本モデルの坑内コンクリート充填-2mを-6mとしたモデル
Bモデル	基本モデルの底部粘性境界を取払い剛基盤としたモデル
Cモデル	基本モデルの擬似3次元粘性境界を取払い2次元平面ひずみとしたモデル

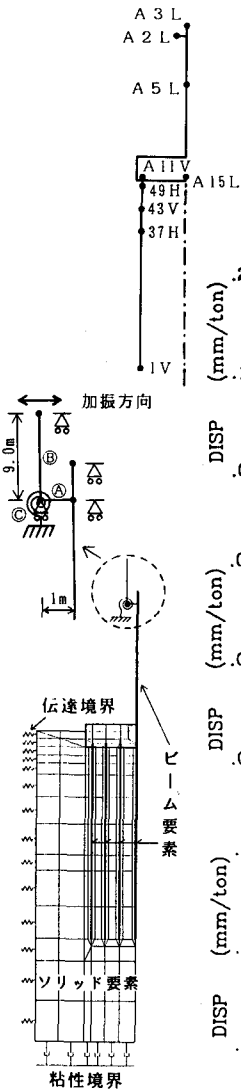


図-8 モデル図

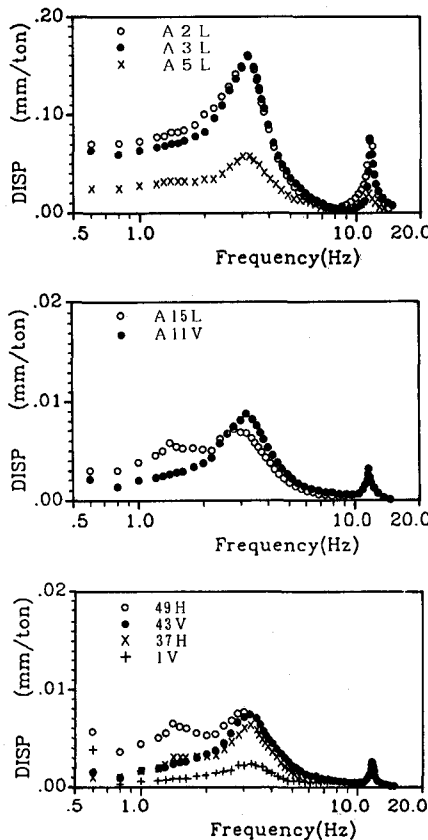


図-9 実験結果

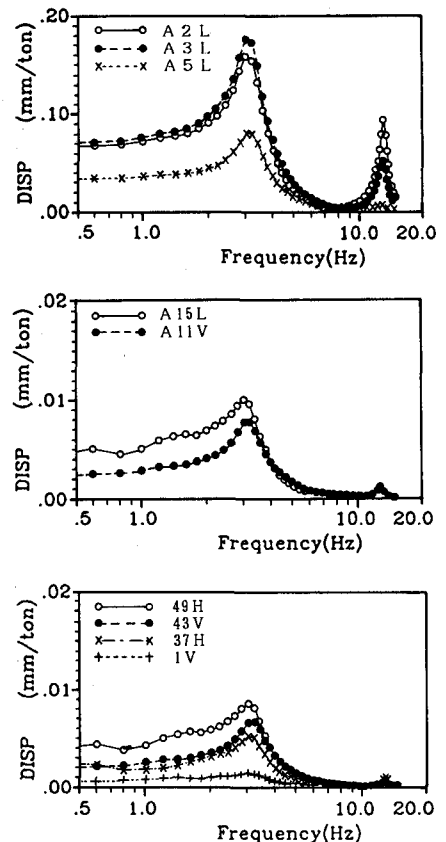


図-10 基本モデル解析結果

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③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。解析は以上に述べたモデルを基本モデルとし表-1に示すA、B、Cを加えた合計4ケースについて実施した。

6. 解析結果

(1) 基本モデル：図-10は代表的な測点の共振曲線を実験結果(図-9参照)と比較して示したものである。杭部も含めた全測点について良く一致し、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、12Hz付近の共振時ピークについて杭部の振幅が実験値より小さいのは、地盤下部のメッシュが粗く高い振動数の波動伝達が表現できないためと考えられる。

(2) Aモデル：図-11は杭に生じる曲げひずみと軸ひずみの分布を、ひずみが最も卓越する3Hz付近のピークについて示したものである。同図には実験値と基本モデルによる結果も合わせて示した。軸ひずみについて実験値は基本モデルとAモデルの中間的な所にあり、フーチング下-2mから-6mはコンクリートが不完全に流入したと推定される結果となった。曲げひずみについては良い一致が見られず、モデル改良の必要がありそうである。

(3) Bモデル：図-12に結果を示す。基盤への振動エネルギー免散がなくするためフーチングにおける3Hzのピークがやや大きくなる他、1.5Hzのピークが高振動数域にシフトしており、実験値との差が大きくなる。

(4) Cモデル：図-12に結果を示す。面外方向への振動エネルギー免散がなくなるためフーチングの並進が主となる1.5Hzのピークが卓越する。回転が主となるピークは大きな影響を受けていない。

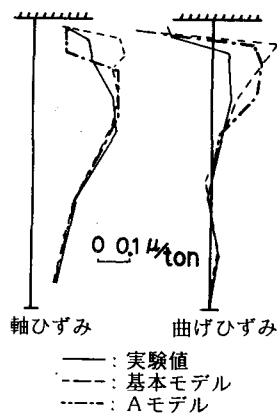


図-11 杭のひずみ

7. まとめ

(1) 実験結果から3つの共振点が得られ、モード及び解析との照合から、これらのピークはそれぞれ地盤の卓越振動によるもの、橋脚部の1次2次曲げ振動によるものであること。(2) 杭の軸ひずみ、曲げひずみが測定でき解析とほぼ一致すること。(3) 実験値から求めた杭頭の複素バネ定数は波動理論等により求められる理論的な複素バネ定数と定性的に一致すること、また、適用条件が異なっているが道路橋示方書により求められるバネ定数とほぼ一致すること。(4) 底面及び側面の境界処理を適切に行なった2次元FEMモデルによる解析は実験結果を良好にシミュレーション出来ること、等が明らかになった。

なお、地盤応答の場合はモデル底部からの加振となるため、1.5Hzあるいはそれ以下の振動数を持つ地盤の応答モードがより大きく現われることに留意して、この研究結果の適用をはかる必要がある。

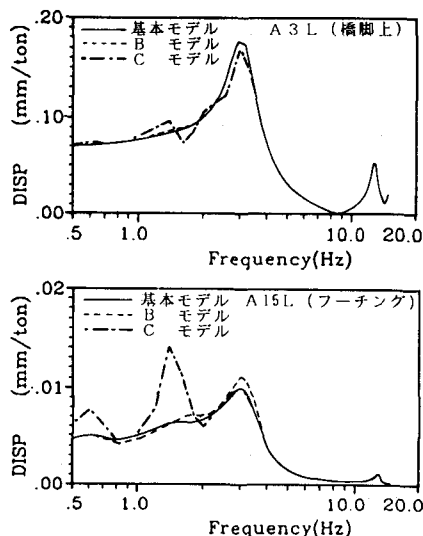


図-12 BモデルとCモデルの解析結果

〈謝辞〉実験にあたり御指導頂いた山田善一京都大学教授、建設省土木研究所川島室長ならびに御協力頂いた工事関係各位に深謝致します。

〈参考文献〉

- 太田、本山：関西国際空港連絡橋の耐震設計指針(案)について、土木学会第42回年次学術講演会(昭和62年9月)I部門
 本山、丸山：関西国際空港連絡橋P₁₁橋脚における起振機実験について、土木学会第44回年次学術講演会(平成元年10月)I部門
 本山、丸山：関西国際空港連絡橋起振機実験結果の数値シミュレーション、土木学会第44回年次学術講演会(平成元年10月)I部門