

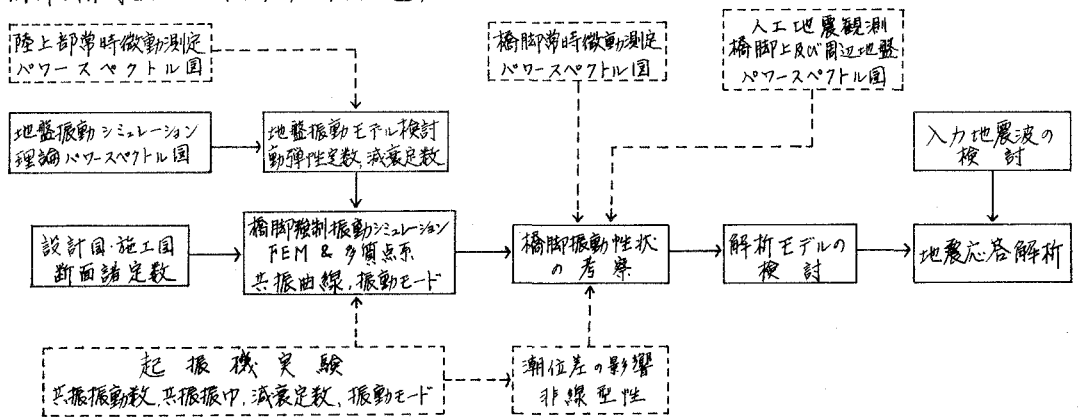
首都高速道路公団 正会員 富岡好夫
 (株)大林組 正会員 ○ 後藤洋三
 前田建設工業(株) 正会員 前田守治

§1. 序

前報(その1)で述べた首都高速道路公団東京湾環状道路荒川湾岸橋橋脚の振動実験結果について力学モデルを仮定した数値シミュレーション解析を行った。本報告はその解析方法と結果ならびに考察を述べたものである。

§2. 解析の構成

解析の構成をフロー図で示すと下図の通りとなる。



§3. 地盤振動シミュレーション

河岸陸上部の常時微動測定地盤における地盤を対象とし、単位面積の土柱を想定して各層を集中マスとせん断バネで置きかえた質点系モデルを設定する。この解析モデルに対して運動方程式を構成し、下端からホワイトノイズが作用した場合の地表面の応答のパワースペクトルを求めた。実測した常時微動のパワースペクトルと解析モデルのパワースペクトルの主要な卓越振動数が一致するまで数回の試算を行い、モデルのせん断バネを修正した。最終的なモデルの諸定数は表-1の通りである。図-1と図-2にパワースペクトルの比較を示した。

	V_s	γ_c
AP-0	120	1.8
AP-10	170	1.8
砂	100	1.5
シルト	140	1.5
シルト	160	1.5
AP-34	300	1.8
AP-44	350	1.8
砂	400	2.0
AP-58		
砂		
AP-72		

表-1

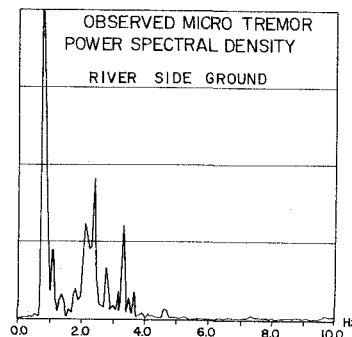


図-1

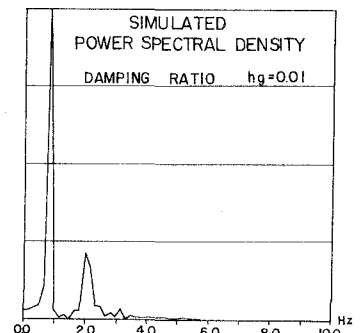


図-2

図-2の解析結果では1次の卓越振動数は0.84 Hz, 2次の卓越振動数は2.05 Hzで図-1の実測結果とほぼ一致している。ピークの鋭さを比較すると, 常時微動に対する地盤の減衰定数は1%程度と小さく, 履歴型あるいは外部減衰型に近いと推定される。

§4. 多質点系モデルによる橋脚加振実験解析

(1) 多質点系モデルとシミュレーション法

シミュレーションに用いたP-205のモデルを図-3に示している。群杭基礎と周辺地盤の動的相互作用を考慮するため, 橋脚近傍地盤に仮定の質点柱を設けた。杭と近傍地盤の相互作用バネ K_s および近傍地盤と遠方地盤の相互作用バネ K_e はPenzien等が群杭基礎の地震応答解析法で提案したMindlinの弾性解を利用する方法に準じて計算した。近傍地盤質量 m_s に対する剪断バネ K_s は相当する土柱の面積と地盤の動剪断弾性係数 G から計算する。これ等の計算の基礎資料となる河床地盤の動弾性係数については実測が困難である。そのため, §3の地盤振動シミュレーションによって得られた V_s から G を逆算し, 下記に述べる試算の初期仮定値とした。

近傍地盤質量 m_s は至分布の収束を考慮して半径15mの範囲の地盤に相当する値と仮定した。また, フーチング直下で杭にトリ込まれる地盤は杭と一体に動く付加質量 m_o として評価する。水の影響は脚柱部に作用する付加質量として考慮するものとし, 桜井氏の提案式にしたがって計算した。橋脚各部の剛性と質量は設計計算書と施工図を参考にして算出した。

図-3のモデルに対して橋脚頂部に起振器に相当する正弦波外力が作用した場合の定常応答解を求め, 理論共振曲線を作成して実験曲線と比較した。理論曲線が実験曲線に近似するためには試行錯誤的な計算モデルの修正を必要とした。修正パラメーターの主たるものは, 地盤の動弾性係数, 減衰定数, 鉄骨とコンクリートのヤング係数比, および杭頭の剛結度である。

(2) 解析結果

図-4は最終的に得られた共振曲線を示したものである。修正後の地盤の動弾性係数は図-3に示した値となった。減衰定数は各部減衰を考慮して各モード別に異なった値とし, フーチングの並進モード(1次)に対しては15%, ロッキングモード(3次)に対しては18%, 脚柱部の片持梁振動(8次)に対しては4%とした。脚柱部鋼管と内部コンクリートの合成率は低く, ヤング係数比は15が適当であった。フーチングについても鉄骨プレバッドコンクリート合成板としての剛性評価が必要であった。

図-4と前報図-9を比較すると, 橋脚頂部ならびにフーチング部の共振曲線は近似されているが地盤については差異が大きいことが示される。しかも, 解析モデルでは1次共振点が1.46 Hzであるため, 常時微動あるいは人工地震測定で見出された1.0 Hz近辺の卓越振動を説明することができない。これ等の点から半径15mとした近傍地盤質点柱の仮定による連成振動の評価は不充分であることが示されており, 今後の検討課題として残される。

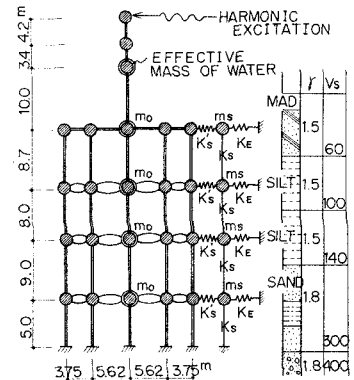


図-3

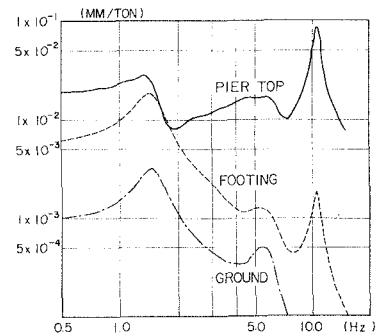


図-4

§5. FEMモデルによる橋脚加振実験解析

(1) FEMモデルとシミュレーション法

橋脚と周辺地盤の動的相互作用をより厳密に考慮するため、周辺地盤を有限要素でモデル化し橋脚を多質点系でモデル化して結合させた地盤-橋脚連成系モデルを設定する。地盤を3次元でモデル化しながら計算量の増大をさけるため、地盤要素としては軸対称回転体のリング要素を適用した。ただし、リング要素の変位関数は回転角を変数とする調和関数で展開されており非軸対称振動の解析が可能である。橋脚のフーチングは半径が15mと厚さが5mの剛な円板に等価し、群杭は3群にわけて半径が15mと7.5mと0mの曲げ剪断円筒に置換した。図-5はモデル化の手順を示したものである。地盤モデルの側方および下方の境界には遠散する波動エネルギーを吸収するためのダンパーを取付け、境界の影響の減少を試みた。

連成系の運動方程式は地盤モデルと橋脚モデルに関する方程式を重ね合わせることで求められる。減衰マトリックスは振動数の影響を受けないCauchy型式で構成し、各部減衰を考慮できるものとした。起振器に相当する正弦波外力が作用した場合の定常応答解を求めるため、各モード別に定常解を計算して合成する方法を取った。その際減衰分布の非一様性により生じるモード間の連成は無視している。図-6はシミュレーションに使用したモデルを示したものである。

シミュレーション計算に用いる諸定数値は多質点系モデルによる解析値を参考として仮定したが、計算上の共振曲線が実験曲線に近似的なよう試行錯誤的に修正を行った。修正パラメーターの主たるものは地盤の動弾性係数と各部の減衰ならびに境界ダンパーの定数である。

(2) 解析結果

図-7と図-8はシミュレーションによる共振曲線と位相曲線を示したものである。修正後の地盤の動弾性係数は図-6に示す値となった。減衰は橋脚構造で0.5%、地盤2%となったが、系全体の減衰には境界ダンパーの影響が大きい。ダンパー定数は1次元波動伝搬式より求める値の約1/2が適当であった。

図-7と前報図-9を比較すると全体的な傾向はよく近似されており、実験から見出された3箇の共振点はシミュレーションによっても確認される。理論曲線には多くのピークが現われているが、減衰分布の非一様性によるモード間連成を無視しているためと考えられる。

図-9から図-12に代表的な固有振動モードを示した。1次モー

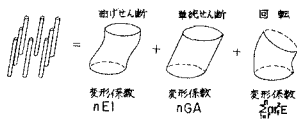
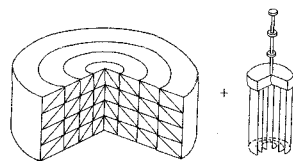


図-5

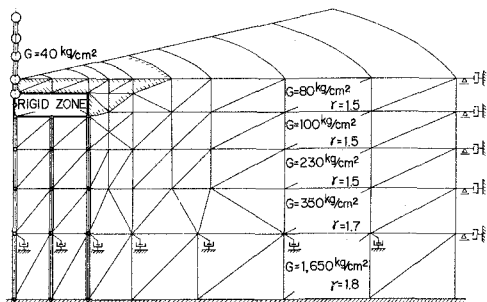


図-6

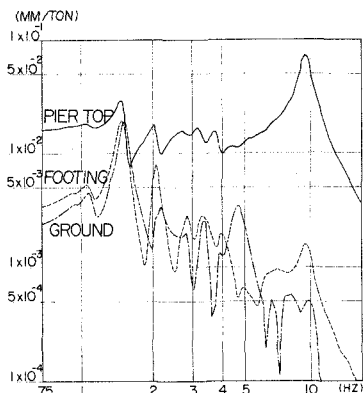


図-7

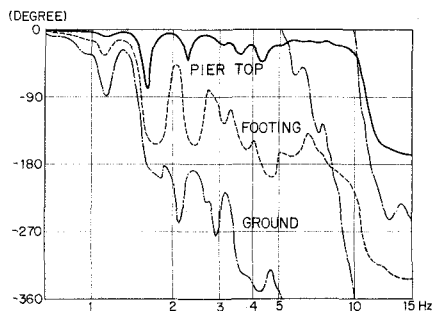


図-8

ドから4次モードまでのX-Z断面（加振軸を含む鉛直面）内モードには大きな相異がない。しかし、Y軸上のX軸方向モードは変化しており、加振実験の第1共振点は3次モードに対応する。一方、常時微動と人工地震測定でみられた0.9～1.1Hzの卓越振動には1次モードが対応し、地盤が主となった振動であることが示される。ロッキングが実測された第2共振点には14次モードが対応する。モード図ではフーティングのロッキングとともに地盤が上下に波打っていることが示されており、地盤の上下動に関する共振とみなすこともできる。

§6. 考察とまとめ

(1) 起振器による加振実験とそのシミュレーション解析から3個の主要な共振点を確認された。最も顕著な共振点は脚柱部が片持梁振動をする3番目の共振点であるが、地震応答で問題とすべきは地盤と橋脚の並進振動が主となる1番目の共振点である。常時微動と人工地震の測定結果をみると、1番目の共振点振動数は0.9～1.1Hzと1.3～1.6Hzに分散している。有限要素法による解析結果から判断すると、0.9～1.1Hzの共振点は地盤が平面的に一樣な振動をする場合であり、1.3～1.6Hzの共振点は橋脚が地盤を押して振動する場合であると考えられる。後者においては橋脚と遠方地盤は逆位相の振動となって相互作用の影響が大きい。

(2) 上部桁が上載されても1番目の卓越振動には大きな変化がなく、地盤の影響が大きく現われる。このような地盤-橋脚系の地震応答を解析するためには地盤の応答特性と相互作用を配慮した解析モデルを使用する必要がある。図-3はその一例であり、相互作用バネを求めるためにはPenzien等の考えに従ったMindlinの弾性解を利用する方法が適当であった。

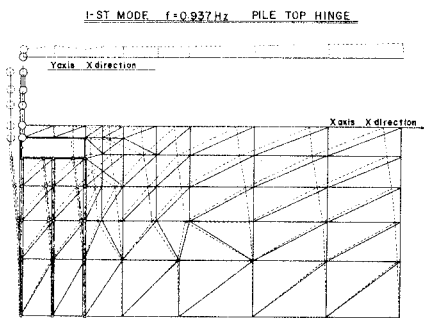


図-9

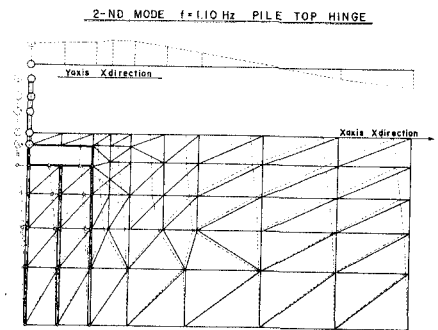


図-10

§7. 謝辞

実験の計画ならびに解析に当り、東京大学教授久保慶三郎氏から貴重な助言をいただいた。また、首都高速道路公団の関係各位から多大な協力を受けている。

解析の実務は(株)大林組技術研究所の関係スタッフと前田建設工業(株)技術研究所および土木設計部の関係スタッフによる共同作業である。関係各位に謝意を表す次第である。

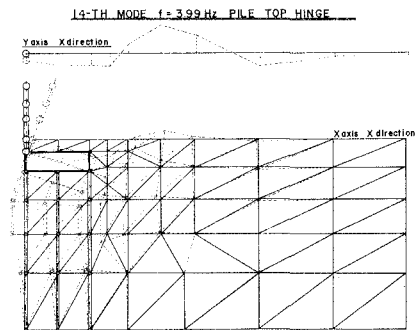


図-11

参考文献

- (1) 首都高速道路公団湾岸線建設局「荒川湾岸橋脚振動実験報告書」昭和50年6月
- (2) 正木、富岡、後藤、前田他「軟弱地盤中の杭基礎橋脚の振動特性」第4回日本地震工学シンポジウム講演概要集、昭和50年11月