地盤振動実験と有限要素解析の比較

(Ground Vibration Tests and Comparison with Results
of Finite Element Analyses)

岡 本 隆ⁱ⁾ (Takashi Okamoto)
鈴 木 操ⁱⁱ⁾ (Misao Suzuki)
榊 信 昭ⁱ⁾ (Nobuaki Sakaki)
長 岡 弘 明ⁱⁱⁱ⁾ (Hiroaki Nagaoka)

キーワード：機械基礎／杭／振動／電算機の応用／
動的／波動／べた基礎／有限要素法 (IGC : E8)

1. ま え が き

交通、機械等による地盤振動の評価・推定は、次の方法で行われている。

- ① 測定値に基づいた経験的方法¹⁾
- ② 一様な半無限弾性地盤上の直接基礎の弾性振動解を利用する方法²⁾
- ③ 有限要素法、境界要素法等の数値解析による方法³⁾

測定値に基づく経験的方法は、データ蓄積の比較的多いものである。しかし、振動評価を行うケースごとに、地盤状態が大きく変化するのが一般的であり、経験的方法では、これらの状態の変化を考慮に入れるまでには至っておらず、評価と実際の値の間には、大きな差のある場合がしばしば生じる。

一様な半無限弾性地盤の振動解を利用する方法は、閉じた形の理論解を利用するものであり、用意された図表等を用い比較的簡単に手計算できるものである。しかし、一様な地盤に対する解を用いるため、複雑な地層構成の地盤に適用する場合、複雑さに応じて大きな誤差が生じることになる。

数値解析による方法は、電算機の幾何級数的な発達に伴い、現在多用されようとしている。地盤振動に関連した数値解析は、主として構造物—基礎—地盤の連成地震応答を求めるために使用されている。地震観測や振動実験結果との比較によるシミュレーション精度の検討も、構造物や基礎の応答について行われたものが多いが⁴⁾、

これに付随して、周辺地盤の応答についても検討を行った研究として、次のものがあげられる。

直接基礎を扱ったものとして、比較的締った地盤や岩盤を対象にした文献^{5)~15)}をあげることができ、杭基礎を扱ったものとして、文献^{16),17),18)}をあげることができる。いずれの基礎の場合においても、地震観測結果を用いた検討においては^{5)~10),16)}、地盤と基礎・構造物間の伝達関数や地盤最大加速度が比較されており、比較的良い一致が見られている。しかし、地震時の振動は地盤下方から伝達しており、図-1に示すような地表面上に振動源のある場合の振動解析に対しては、間接的なシミュレーション精度検討となっている。一方、基礎や構造物を直接加振した、振動実験の結果を用いた検討においては、直接基礎の場合、基礎や構造物の共振時における地盤変位振幅を比較した研究^{11),12),13)}、振動数を変化させた時の地盤の振動数応答曲線を比較した研究^{14),15)}がある。前者においては比較的良い一致が見られているが、単一の振動数における比較であること、後者においては、定性的な傾向は一致しているものの、定量的な一致は見られていないことの問題点を持っている。また、両者共に、地表面上の測定点数が少なく、地表面上の振動分布についての検討としては不十分なものとなっている。杭基礎の場合^{17),18)}単杭を対象とし、地盤の振動数応答曲線の比較が行われているが、定性的な傾向は一致しているものの、定量的な一致は見られていない。

地盤振動分布の把握を主目的として、地表面の振動

図-1 振動源の状態

i) 日本鋼管(株)鉄鋼研究所構造研究部土木研究室 主任部員(川崎市川崎区南渡田 1-1)
ii) 日本鋼管(株)鉄鋼研究所構造研究部土木研究室 部員
iii) 日本鋼管(株)鉄鋼研究所構造研究部土木研究室 室長
(1988. 3. 22 原稿受付・討議期限 1989. 7. 1, 要請があれば1か月の期限延長可能)

を、振動源から地表面遠方に向かって密な間隔で測定する実験を行い、この実験結果との比較により、数値解析のシミュレーション精度を検討した研究として、谷口等の研究¹⁹⁾がある。ここでは、地表面上に直接置かれた起振機による3次元振動状態の実験を行い、次いで平面ひずみの2次元有限要素法で解析し、解析結果に3次元効果を取り入れて補正を行い、振動実験結果と比較している。地表面上の振動が振動源からの距離に応じて減衰する減衰傾向については、良い精度で評価しているが、各点の振動の大きさそのものを解析で評価するまでには至っていない。

本論文では、地盤振動の数値解析法として有限要素法を取り上げ、比較的軸対称モデルに近い基礎が鉛直方向に加振される場合を対象として、地盤振動のシミュレーション精度を検討する。基礎は直接基礎と杭基礎の2種類であり、杭基礎は4本の群杭からなっている。各基礎の実験では、地表面上で振動分布の把握ができるよう、計測点を1~2m間隔とし、基礎より約60mの遠方まで計測している。直接基礎については、軸対称モデルを用いた場合のシミュレーション精度の検討、および参考として文献¹⁹⁾と同様の平面ひずみモデルを用いた検討を行う。次いで、軸対称モデルを杭基礎に適用し、そのシミュレーション精度を、直接基礎と同様に検討する。

2. 地盤振動実験の概要

地盤振動実験では実地盤に基礎を作成し、基礎中心に設置した起振機により鉛直方向加振力を作用させ、地盤

図-2 土質柱状図

図-3 実験用基礎

を振動させた。基礎は直接基礎および杭基礎である。

地盤は図-2の土質柱状図に示すように、深さ約10mまでが埋立砂層、30mまでが軟弱な沖積粘性土、それ以深は粘性土、砂質土が互層を成しており、約38m以深が洪積砂層またはシルト層となっている。同図にN値、沖積粘性土の単位体積重量 γ_t およびPS検層によるP波、S波速度を示す。PS検層は2か所で行っており、1か所では約10m深さまで行っている。また、沖積粘性土の単位体積重量は標準貫入試験用サンプラーで採取した試料より測定した値である。

直接基礎は図-3(a)に示すように、長さ2.2m、幅2.2m、厚さ0.7mの鉄筋コンクリート製であり、これを埋立砂地盤を掘削して設置し、まわりをランマーで締め固めながら埋め戻した。杭基礎には、直径40cm、厚さ6mm鋼管杭4本を用い、杭間隔は1.4mである。杭を地表より42mまで打ち込み、38m以深の砂質土を支持層とする。杭打設後、深さ0.7mまで砂層を掘削し、直接基礎と同じ形状のフーチングを杭上に作成後、直接基礎の場合と同様ランマーで締め固めながら、砂を埋め戻した。杭頭部とフーチングの接合は杭頭部に溶接したひげ鉄筋による方法とした。杭基礎は直接基礎より、10m離れた位置に設置している。地盤への加振はフーチング上に据え付けた起振機(VE-10-70, (株)早坂機械製作所製)により行い、鉛直方向に振動数5~15Hzで加振した。加振力はほぼ一定となるように起振機を調節し、5~15Hzにおいて37.5~42.1kN(3.5~4.3tf)とした。起振機とフーチングの全重量は101.9kN(10.4tf)である。地盤の加速度を地表面上に設置した加速度計により測定した。図-4(a)に示すように、加速度計の設置のため、30cm×30cm×6cmのコンクリートブロックを上表面が地表面と等しくなるよう地中に埋め込み、ブロックのまわりをモルタルで固めた。加速度計はブロックに接着剤で固定する。測定位置は同図(b)に

(a) 加速度計の設置

●：加速度測定位置

(b) 加速度測定位置

図-4 加速度測定

表-1 解析用地盤定数
(a) 予備解析用定数

深度 (m)	P波 速度 (m/s)	S波 速度 (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	せん断 係数 (kN/m ²)	ポアソン 比
1.5	300	180	17.6 [1.8]*	58300 [5950]**	0.219
10.0	1400	145	17.6 [1.8]	37800 [3860]	0.495
	1400	140	15.7 [1.6]	31400 [3200]	0.495
29.0	1400	240	16.7 [1.7]	97900 [9990]	0.485
38.0	1400	460	19.6 [2.0]	423000 [43200]	0.439

* [] は単位：tf/m³

** [] は単位：tf/m²

(b) 最終解析用定数

深度 (m)	P波 速度 (m/s)	S波 速度 (m/s)	単位体積 重量 (kN/m ³)	せん断 係数 (kN/m ²)	ポアソン 比
1.5	348	209	17.6 [1.8]*	78600 [8000]**	0.219
10.0	1624	168	17.6 [1.8]	50800 [5180]	0.495
	1624	162	15.7 [1.6]	42000 [4290]	0.495
29.0	1624	279	16.7 [1.7]	132000 [13500]	0.485
38.0	1624	533	19.6 [2.0]	568000 [58000]	0.439

* [] は単位：tf/m³

** [] は単位：tf/m²

示すように、フーチング外縁から 32.1m までは 1m 間隔、32.1m から 64.1m では 2m 間隔とした。加速度計は合計 16 台を使用し、測定は測定位置をずらしながら数回に分けて行った。この時加速度計の移動前後で基礎での応答および地表面上の共通位置の応答が等しいことを確かめている。

3. 解析用地盤定数

図-2 に PS 検層で測定された弾性波速度が示されているが、約 10m 以浅では 2 測定値の平均値を解析に用いる。また、地層の境界深さは、0 または 0.5m に丸めた値とする。

埋立砂の単位体積重量は次の値を用いた。実験位置近くの別工事で砂の最大および最小乾燥単位体積重量が測定されている。 N 値が 10~20 であり、有効上載圧を大略 0~10 tf/m² (0~98 kN/m²) とし、藤田のまとめた相対密度と N 値の関係を示した図²⁰⁾より、相対密度を大略 60% と推定する。最大・最小単位体積重量および相対密度の値から、飽和状態の湿潤単位体積重量を求め 17.6 kN/m³ (1.8 tf/m³) とした。地下水位は地表面より約 1.3m 下であるが、ここでは地下水位より上の単位体積重量も同じ値とした。また、29~38m、38m 以深の土の単位体積重量は概略の推定値として、16.7 kN/m³ (1.7 tf/m³)、19.6 kN/m³ (2.0 tf/m³) とした。

以上の解析に用いる土の単位体積重量および P 波、S 波速度およびこれらより求めたせん断係数、ポアソン比を表-1 (a) に示す。結果的には、同表のせん断係数を修正した表-1 (b) の値を最終解析では用いているが、これについては後述する。

4. 直接基礎の場合の実験結果と解析結果

4.1 軸対称および平面ひずみ有限要素モデル

有限要素解析に用いるモデルは軸対称および平面ひずみモデルとする。後述のように、平面ひずみモデルを用いる場合には、3次元効果を取入れた補正が必要であり、軸対称モデルを用いる方法が直接的であるが、所有プログラムの点から平面ひずみモデルを使用せざるをえない場合もあり、参考としてそのシミュレーション精度を検討する。直方体の基礎は、図-5に示すように、軸対称モデルの場合は、高さと同体積となる円筒形に置き換え、平面ひずみモデルの場合には、直方体の幅 $B=2.2\text{m}$ と同じ連続基礎とする。有限要素は4節点のアイソパラメトリック要素とし、リング要素および平面ひずみ要素を用いた。

軸対称モデルにおける有限要素分割を図-6(a)、(b)に示す。地盤は最大深さ 25m、最大半径 66m とし、25m 以深はシルト質粘土が無限に続くものとし、66m 以遠は砂層とシルト質粘土層の層状地盤が無限に水平方向に続いているものとする。地盤の下方および半径方向の遠方境界 AB、BC では、文献²¹⁾で示される粘性境界条件を用い、遠方境界での振動の反射を低減するようにした。

地盤の有限要素分割は次のように行った。文献²²⁾にお

図-5 直接基礎のモデル化

いて、波動の伝播問題を扱う場合、波動の進行方向の有限要素長さは波長の $1/6$ 以下であることが望ましく、 $1/12$ 以下であれば誤差は 1% 以下であることが示されている。ここでは最初の解析であることから、 $1/12$ より更に小さい $1/18$ を用いた。なお、次章の杭基礎の解析では、計算時間の経済性の点から、 $1/6$ も用いているが、これについては後述する。P波速度はS波速度より大きいことから、有限要素長をS波速度に基づいて定める。表-1(a)よりS波速度は沖積シルト質粘土で最小であり、 140m/s である。解析する最大振動数を 15Hz とすると、最小のS波波長は約 9m であり、最大有限要素長はS波波長の $1/18$ とすると、有限要素長は 50cm 以下となる。ここでは振動源近傍ではこれより小さな有限要素長を用い、半径方向には $0\sim 10\text{m}$ までは 25cm 長さ、 10m 以遠は 50cm 長さとした。また、深さ方向に

(a)軸対称モデルの全体分割図

図-6 直接基礎の場合の有限要素分割

は、基本的には地表面から深さ 2m までを 25cm 長さ、2m 以深で 50cm 長さとしたが、基礎下端深さの上下の要素長は、(b) 図のように長さを若干変更している。

平面ひずみモデルにおける有限要素分割は軸対称モデルのそれとほとんど同じであるが、基礎幅 B が 2.2m であることから基礎中心からの距離が 1.25m 以内では、図-6(c) に示すように軸対称モデルと異なる分割を行った。

解析に用いる基礎への作用荷重は、軸対称モデルにおいては起振機による荷重 P (kN) を基礎中心に作用する集中荷重とした。平面ひずみモデルにおける線荷重 p (kN/m) の大きさについては後述する。

解析を行う時、次のせん断係数の修正を行った。まず、表-1(a) に示す定数を用い、軸対称モデルにより振動数 10Hz で解析を行ったところ、地表面加速度位相差の実験値と解析値の間に、基礎からの距離が大きくなると共に徐々に差が生じる傾向を示した。図-7 に示すように、位相差の地表面分布より表面波の波長を求めることができ、波長と振動数より表面波の位相速度を求めることができる。表面波の位相速度は、S 波、P 波速度の関数である。即ち、位相差の地表面分布は S 波、P 波速度の値を反映しており、ここでは振動数 10Hz における位相差が実験値と一致するように、表-1(a) に示す S 波および P 波を地盤全体に一様に 1.161 倍した値に修正した。修正した S 波、P 波および地盤定数を表-1(b) に示す。弾性波速度の修正を必要とした原因として、PS 検層での弾性波速度の測定誤差、解析モデルでは水平層状地盤を仮定しているが、実際には水平方向の層厚の変化もあり得ること、砂地盤の土の単位体積重量の推定誤差等が考えられる。これらの誤差は、個々の層で発生するものであるが、地盤全体について一様に弾性波速度を 1.161 倍して修正した。

せん断係数および履歴減衰はせん断ひずみに依存する²³⁾。この影響を見るため、先ず表-1(b) の定数および履歴減衰 1.5% を用いて、振動数 10Hz の場合について最初の計算を行い、次いで Seed-Idriss の提案式²⁴⁾

を用いて、上記の計算より求めたせん断ひずみに適合するせん断係数・履歴減衰の値を用いた計算を行った。応答値は最初の計算に対し 5% 以下の差しかなく、以後の計算では、せん断ひずみに適合させたせん断係数・履歴減衰の修正は行わず、表-1(b) の定数および履歴減衰 1.5% を用いて解析を行った。尚、履歴減衰 1.5% の値は、PS 検層で生じるひずみの大きさを $10^{-5} \sim 10^{-6}$ と推定し²³⁾、このひずみに対応する履歴減衰として用いたものである。

4.4 軸対称モデルの解析結果と実験結果の比較

振動数 5, 10, 15 Hz の場合の解析で求めた地表面加速度を P で除した値、即ち単位加振力 1kN および 1tf 当たりの値として、図-8 に示す。各図の左に鉛直成分、右に水平成分を示し、上部にフーチングの鉛直振動に対する位相差、下部に加速度振幅を示している。

加速度振幅は局所的には解析値、実験値の間に相違が見られるが、いずれの周波数においても、全体の分布形、大きさ共に実用上十分な一致を見ているとすることができる。位相差は 5Hz の場合の 35m 以遠で解析値と実験値がややかけ離れる傾向を示しているものの、その他の部分では、両者は良好な一致をしている。なお、ここでは示さないが、6, 8, 12Hz の場合の解析結果と実験結果の比較も行っており、同様の良好な一致を確認している。

振動数 10Hz での地表面上変位の時間変化について、実験値と解析値を比較して図-9 に示す。10Hz における加振力は 39.7kN (4.05tf) である。各時間は、円振動数 ω 、時間 t に対し、 ωt が $0.1/6\pi$, $2/6\pi$, $3/6\pi$, $4/6\pi$, $5/6\pi$ に当たる時間である。各図の左に鉛直成分、右に水平成分を示している。

実験および解析より求めた地表面加速度の振動数応答曲線を、基礎中心より 5.1m および 51.1m の位置について図-10 に示す。同図の加速度は、加振力 1kN または 1tf 当たりの値である。解析値は前述の 5, 10, 15Hz の他、6, 8, 12Hz における値が追加されている。両者の良好な一致が見られる。

本論文の目的は地盤振動のシミュレーション精度の検討であるが、参考として、基礎自身の加速度振幅の解析値、実験値を比較して表-2 に示す。振動数の増加と共に加速度の値も増加している傾向は一致しているが、実験値は解析値の 1.67~2.17 倍であり、地盤加速度の場合ほどは良い一致は見られていない。この理由として、次の 2 つが推測される。

- ① 基礎近傍地盤は基礎設置時に乱され、原地盤より剛性が小さくなっていることが考えられる。解析モデルではこの影響を取り入れていない。
- ② 基礎近傍の有限要素分割に着目すると、図-6(b)

図-7 表面波速度と位相差

(a) 振動数 5Hz

(b) 振動数 10Hz

(c) 動数振 15Hz

図-8 直接基礎の場合の地表面加速度 (軸対称モデル解析との比較)

図-9 振動数 10 Hz における直接基礎の場合の地表面変位形状

図-10 直接基礎の場合の地表面加速度振動数応答曲線

に示すように、基礎近傍地盤の応力等の急変する状態を十分に表現できない、かなり粗い要素分割となっている可能性がある。

2 理由共に、基礎近傍地盤の剛性についてのものであるが、これらは基礎の応答には比較的大きな影響を与えるものの、基礎から離れた地表面ではその影響は小さい

表-2 直接基礎の加速度振幅

振動数 (Hz)	実験値 ($10^{-2}\text{m/s}^2/\text{kN}$)	解析値 ($10^{-2}\text{m/s}^2/\text{kN}$)	実験値 解析値
5	0.553	0.341	1.62
6	0.776	0.468	1.66
8	1.46	0.808	1.81
10	2.44	1.27	1.92
12	3.56	1.70	2.09
15	5.49	2.52	2.17

ものと考えられる。

4.3 平面ひずみモデルの解析結果と実験結果の比較

平面ひずみモデルで求めた地表面上の応答値に対し、3次元効果の補正を次のように行った。基礎から十分離れた地表面での地盤振動はレイリー波として伝播するとして、基礎中心からの地表面上の距離を R とする時、平面ひずみモデルによる加速度や変位振幅に対し、 $(1/R)^{1/2}$ を乗じる^{19),25)}。

上記の補正を行う時、図-11に示すように平面が正方形の直接基礎に作用する集中荷重 $P(\text{kN})$ に対し、これと等価な平面ひずみモデルの連続基礎に作用する、線荷重 $p(\text{kN/m})$ を次のように定めた。実験値と比較する振動数の範囲で、基礎から十分離れた地表面位置において、レイリー波として補正した加速度振幅が実験値とほぼ一致するよう、線荷重 p を定める。結果として、線荷重を $p=P/B$ と定めると比較的良好な一致が見られ、ここではこの値を用いた。

振動数 5, 10, 15 Hz の場合の地表面加速度について、実験値と上記の補正を行った解析値を比較して、図-12に示す。加速度振幅は、軸対称モデルの場合と同様、直接基礎への単位加振力 1 kN または 1 tf に対する値である。各図の左に鉛直成分、右に水平成分を示し、上部にフーチングの鉛直振動に対する位相差、下部に加速度振幅を示している。

実験での加速度振幅値は、基礎から十分離れた位置で補正值に比較的近くなっているが、軸対称モデルの場合と異なり、地表面全域において一様に良好なシミュレーション精度は得られていない。実験における鉛直および

図-11 平面ひずみモデルの線荷重強度

表-3 表面波として補正できる地表面距離の下限

振動数 (Hz)	表面波としての補正值 で近似できる距離の 下限 L (m)	レイリー波長 λ_R (m)	L/λ_R
5	50	36	1.4
6	40	30	1.3
8	30	23	1.3
10	25	18	1.4
12	23	15	1.5
15	18	12	1.5

水平成分が、共にレイリー波としての補正值で近似できる、基礎中心からの距離の下限を表-3に示す。図-12には示していないが振動数 6, 8, 12 Hz の場合の値も付け加えている。地表面近傍にある2層のS波速度は 209 m/s および 168 m/s、ポアソン比は 0.219 および 0.495 であり、これに対応する一様地盤としてのレイリー波速度は、各々約 192 m/s および 168 m/s である。複数層から成る本地盤のレイリー波速度はこれらの値の中間にあると考えられ、大略 180 m/s として求めた波長を表-3に示す。同表より、ここでの解析例では、レイリー波長の約 1.5 倍以上離れた地表面においては、表面波として補正を行った平面ひずみモデル解析は、実用上のシミュレーション精度を持つと言える。

位相差は、振動数 5 Hz の場合の 30 m 以遠でややかけ離れる傾向があるが、この部分を除くと、解析値と実験値は良い一致を示している。

5. 杭基礎の場合の実験結果と解析結果

5.1 有限要素モデル

解析に用いるモデルは、前章と同様に軸対称モデルとし、フーチングの円筒化、4節点アイソパラメトリックリング要素の使用も同様である。有限要素分割を図-13に示す。地盤は最大深さを 45 m とし、最大半径を 31 m とした。45 m 以深は支持層である砂層が無限に続き、31 m 以遠は砂層、シルト質粘土、砂質シルト等から成る層状地盤が無限に水平方向に続いているものとし、遠方境界 ABC で前章同様に粘性境界条件を用いる。

直接基礎の場合に最大半径を 66 m としたのに対し、ここでは最大半径を 31 m としたのは、後述の有限要素分割と共に、計算時間の経済性を目的としたものである。地盤の最大半径の値は、次のことを参考にして決めている。文献²⁶⁾において、鋼管矢板井筒振動実験の基礎の応答を有限要素解析結果と比較しているが、実験の下限振動数 3 Hz において、せん断波速度の最も小さい軟弱粘土のせん断波長の約 0.5 倍程度の半径をとると、基礎の応答実験値と解析値の一致が見られている。この値

(a) 振動数 5Hz

(b) 振動数 10Hz

(c) 振動数 15Hz

図-12 直接基礎の場合の地表面加速度（平面ひずみモデルによる評価との比較）

図-13 杭基礎の場合の有限要素分割

を参考にして、実験の下限振動数 5Hz での 10~29m のシルト質粘土、砂質シルトのせん断波長に対し約 1 倍の半径を用い、ここでの解析では最大半径を 32m とした。結果としては後述のように解析値と実験値の良い対応が見られ、この最大半径で十分であったと考えられる。

地盤の有限要素分割は、解析地盤モデルの最大半径を小さくしたことで同様に経済性を目的として、次のように直接基礎の場合よりやや粗い要素分割とした。有限要素長は 15Hz でのせん断波長に基づき、0~10m の埋立砂層では波長の約 1/10 である 1m を基本とする。10m 以深では、せん断波長の約 1/6 とし、10~29m のシルト質粘土、砂質シルトでは 1.5m、29~38m の砂質土と粘性土の互層では 2.5m、38m 以深の支持層では 5m を基本とした。地表面および基礎近傍では、直接基礎の場合と同様にこれより小さい要素長を用いる。地盤の有限要素分割では、図-14 に示すように上部要素の節点 C が下部要素の節点と一致せず、下部要素の辺 AB 上にある場合がある。この場合には、上部要素の AC, CB 上の変位が下部要素の AB 上の変位と一致し変位の適合性が保たれるよう、上部要素節点 C の変位に拘束を加えている。

杭基礎は図-15 に示すように、軸対称円筒シェルに置換する。杭に作用する断面力は、対称性を考慮に入れると、 z 方向の軸力 N_z 、 r 方向のせん断力 Q_r 、および θ 方向まわりの曲げモーメント M_θ であり、これに対応するシェルの断面力 N'_z 、 Q'_r 、 M'_θ に対する剛性のみを考える。即ち、シェルは異方性とし、 z 方向の圧縮剛

図-14 地盤要素の変位の適合性

図-15 杭基礎のシェルへの置換

図-16 杭と地盤の変位

性、 θ 方向まわりの曲げ剛性を持つものとし、杭 1 本の z 方向圧縮剛性 EA、曲げ剛性 EI を図に示す長さ a で割った値を求め、シェルの単位幅当たりの剛性とした。シェルとしてのその他の曲げ剛性、ねじり剛性、圧縮剛性は 0 とする。現実の杭・地盤においては、図-16 に示すように同一円周上で杭と地盤の間に相対変位が生じると考えられるが、このモデルでは同一円周上で杭と地盤は同一の変位をすることとなる。このためのシミュレーション精度低下の懸念があるが、結果として解析値と実験値の間には後述のように良好な一致が見られ、これによる精度低下は小さいものと考えられる。

解析に用いた土の単位体積重量、せん断係数、ポアソン比の値は、直接基礎の場合と同じ表-1 (b) に示す値である。せん断ひずみに適合するせん断係数・履歴減衰の修正は、直接基礎の場合と同様ひずみレベルは小さいものとして行わなかった。

5.2 実験結果と解析結果の比較

振動数 5, 10, 15Hz の場合の地表面加速度応答を、単位加振力 1kN または 1tf 当たりの値として、図-17 に示す。直接基礎の場合と同様に、各図の左に鉛直成分、

図-17 杭基礎の場合の地表面加速度

図-18 振動数 10Hz における杭基礎の場合の地表面上変位形状

右に水平成分を示し、上部にフーチングの鉛直振動に対する位相差，下部に加速度振幅を示している。解析値と実験値は局部的な相違はあるものの，直接基礎の場合と同様に実用上十分な一致が見られている。振動数 15Hz の場合，基礎中心からの距離が 5m 以上の地表面において，距離の増大に対し鉛直・水平成分の解析値が振動しながら減少しているのに対し，実験値はほぼ単調に減少している。杭部分を除き，他は同一の軸対称有限要素モデルを用いて，振動数 15Hz の場合の直接基礎について解析したが，杭基礎の場合と同様に，解析値が距離の増大に対し振動しながら減少しており，第 4 章で用いた有限要素長より大きな要素長を用い，有限要素分割を粗いものとしたことが原因と考えられる。

振動数 10Hz での地表面上変位の時間変化について，実験値と解析値を比較して図-18 に示す。加振力は直接基礎の場合と同様 39.7kN (4.05tf) である。各時間 t は，円振動 ω ，時間 t に対し， ωt が $0, 1/6\pi, 2/6\pi, 3/6\pi, 4/6\pi, 5/6\pi$ に当たる時間である。各図の左に鉛直成分，右に水平成分を示している。解析結果は実験で

表-4 杭基礎の加速度振幅

振動数 (Hz)	実験値 ($10^{-2}\text{m/s}^2/\text{kN}$)	解析値 ($10^{-2}\text{m/s}^2/\text{kN}$)	実験値 解析値
5	0.213	0.203	1.05
10	0.773	0.941	0.82
15	1.36	2.12	0.64

の振動状況を良く表している様子を見ることができる。

参考として，基礎自身の加速度振幅の解析値，実験値を比較して表-4 に示す。直接基礎の場合は実験値が解析値より大きくなったが，杭基礎においては解析値が実験値とほぼ等しいか小さな値となった。良い一致が見られていないことは直接基礎の場合と同様であるが，その理由として，直接基礎の場合にあげた 2 つの他，軸対称モデルでは，図-16 に示した円周方向の杭と地盤の相対変位の表現できないことがあらげれる。直接基礎の 2 つの理由と同様に，この理由も杭近傍地盤の剛性についてのものであり，これらは杭基礎の応答には影響が大きい

が、基礎から離れた地表面ではその影響は小さいものと考えられる。

6. 結 論

直接基礎および杭基礎を鉛直加振した場合の地盤振動を対象とし、有限要素解析のシミュレーション精度の検討を、振動実験結果との比較により行った。直接基礎は平面が正方形であり、杭基礎は4本の鋼管杭と平面が正方形のフーチングからなっている。得られた結論は次のとおりである。

① 直接基礎を軸対称モデルで近似して解析を行った。地表面上の加速度が実験で測定されており、その地表面分布を解析値と比較した結果、振幅に局部的な差異は若干あるものの、全体としては振幅・位相差共に実用上良好な一致を見ており、シミュレーション精度は十分と言える。

② 参考として、直接基礎の場合を平面ひずみモデルを用いて解析し、地盤振動がレイリー表面波として伝播するとして、解析結果に対し3次元効果の補正を行った。ここで取り扱った5~15Hzの振動数範囲では、実験で求めた加速度に対し、基礎中心よりレイリー波長の約1.5倍離れた距離で、レイリー波としての補正値は比較的良好な一致を示している。

③ 杭基礎を軸対称モデルで近似して解析を行った。4本の杭は軸対称の等価なシェルに置換する。直接基礎の場合と同様局部的な差異はあるものの、全体として良好なシミュレーション精度が得られている。

以上より、直接基礎、杭基礎共に比較的軸対称モデルに近い場合は、地盤振動のシミュレーションを軸対称有限要素法を用いて、十分な精度で行うことができると言える。このシミュレーション方法を今後次の検討に使用する予定である。

① 地盤振動公害の環境アセスメントを、高い精度で行う。

② 従来、地盤振動低減対策は、主として模型実験や実大の現場実験により検討が行われてきたが、有効な対策の開発には至っていない。かなりの数の実験が行われたにもかかわらず、対策開発が不成功に終わっている理由の1つとして費用の点があり、特に実大現場実験は高価なためパラメトリックな検討が難しい。本論文でシミュレーション精度を検証した解析方法は、パラメトリックな検討を経済的に行うことが可能であり、今後有効な対策の発見および開発に結びつけたい。

参 考 文 献

- 1) 例えば、成田信之・横山功一・桂樹正隆(1977): 道路交通振動の予測手法, 「土木技術資料」, Vol.19, No.8, pp. 11~16.
- 成田信之・桂樹正隆 (1978): 道路交通振動予測式, 「土木

技術資料」, Vol.20, No.6, pp. 46~51.

吉岡 修 (1986): 新幹線列車走行による沿線の地盤振動, 「鉄道技術」, Vol.43, No.7, pp. 265~269.

長嶋文雄・古田 勝・秋好憲治・伊藤文人 (1988): 地下鉄シールドトンネルおよび周辺地盤の波動伝播特性, 「構造工学論文集」, Vol.34, (投稿中).

- 2) 例えば, Luco, J. E. and Westmann, R. A. (1971): "Dynamic response of circular footings," J. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol.97, No.EM 5, pp. 1381~1395.
- 3) 例えば, Haupt, W. M. (1977): "Surface-waves in non-homogeneous half space", Proc. Dynamic Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Germany, Vol.1, pp. 335~367.
- 大保直人・片山恒雄(1980): 弾性波の発生・伝播に関する計算手法の比較, 「生産研究」, Vol.32, No.12, pp. 40~43.
- 4) 日本建築学会 (1987): 「建築構造力学の最近の発展一応力解析の考え方」, 7.2 節 相互作用解析と振動実験・地震観測結果との比較, pp. 877~925.
- 5) Tajimi, H., Minowa, C. and Shinomura, Y. (1977): "Dynamic response of a large-scale shaking table foundation and its surrounding ground", Proc. 6th World Conf. Earthquake Engng. Vol.2, pp. 1516~1521.
- 6) 田中宏志他 (1978~1982): 根入れの深い剛構造物の動特性に関する実験的研究 (その1~3), 「日本建築学会大会学術講演梗概集 (1978)」, pp. 661~666, (その4~5), 「同梗概集 (1979)」, pp. 685~688, (その6), 「同梗概集 (1980)」, pp. 625~626, (その7), 「同梗概集 (1980)」, pp. 707~708, (その8), pp. 751~752.
- 7) 秋野金次他 (1984, 1986~1987): 大型模型による原子炉建屋と地盤の動的相互作用試験 (その1~6), 「日本建築学会大会学術講演梗概集 (1984)」, pp. 2301~2312, (その7~その13), 「同梗概集 (1986)」, pp. 997~1010, (その14~23), 「同梗概集 (1987)」, pp. 251~270.
- 8) Hayashi, Y., Akino, K. and Esashi, Y. (1984): "Experimental project of soil-structure interaction using the foundation of NUPEC large vibration table—using of foundation and ground, dynamic earth pressure and wave propagation—", Proc. 8th World Conf. Earthquake Engng., San Francisco, Vol.3, pp. 1089~1096.
- 9) Tajimi, H. (1984): "Predicted and measured vibrational characteristics of a large-scale shaking table foundation," Proc. 8th World Conf. Earthquake Engng., San Francisco, Vol.3, pp. 873~880.
- 10) 大友敬三・当麻純一・竹内幹雄 (1986): 軟質地盤上の基礎の埋設効果に関する実験的検討, 「第7回日本地震工学シンポジウム」, pp. 847~851.
- 11) 加藤宗明他 (1983): 起振実験による大型コンクリートブロック-岩盤系の動的相互作用に関する研究 (その1~3), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp. 1555~1560.
- 12) 大村 文他 (1984): 硬質岩盤上のコンクリートブロック振動実験とその解析 (その1~その4), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp. 727~734.
- 13) 杉山信夫他 (1984): 岩盤振動実験による動的相互作用に関する研究 (その1~その5), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp. 175~184.
- 14) 武田寿一他 (1986): 岩盤上の模型基礎の振動試験とその結果の解析 (その1~3), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp. 1011~1016.
- 15) 森 晋一他 (1986): 岩盤上の模型基礎の振動試験(その1~その6), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp. 1017

- ~1028.
- 16) Ohta, T., Uchiyama, S., Niwa, M. and Ueno, K.: "Earthquake response characteristics of structure with pile foundation on soft subsoil layer and its simulation analysis," Proc. 7th World Conf. Earthquake Engng., Istanbul, pp.403-410.
 - 17) 水畑耕治他 (1984): 杭周に境界域を有する杭-地盤系の振動特性 (その1, その2), 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp.923~926.
 - 18) 水畑耕治・日下部馨・片山和喜 (1985): 薄層要素法によるPC浮き杭の鉛直振動解析-実験結果とその比較-, 「日本建築学会大会学術講演梗概集」, pp.925~926.
 - 19) Taniguchi, E. and Okada, S. (1981): "Reduction of ground vibrations by improving soft ground," Soils and Foundations, Vol.21, No.2, pp.99-113.
 - 20) 土質工学会 (1979): 「土質調査試験結果の解釈と適用例-第1回改定版-」, 第2章 標準貫入試験 (藤田圭一執筆), pp.53~54.
 - 21) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969): "Finite dynamic model for infinite media," J. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol.95, No.EM4, pp.859-877.
 - 22) Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973): "Finite element method accuracy for wave propagation problems", J. Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, pp.421-427.
 - 23) 石原研而 (1976): 「土質動力学の基礎」, 鹿島出版会, pp.4~6, 196~202.
 - 24) Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970): "Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis", Rep. No. EERC 70-10, Earthquake Engineering and Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
 - 25) F. E. Richart, Jr., J. R. Hall and R. D. Woods (1970): Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, pp.80-88, 90-92.
 - 26) 長岡弘明・吉田 映・榑 信昭 (1976): 鋼管矢板井筒の有限要素振動解析と野外実験結果との比較, 「土木学会論文報告集」, Vol.254, pp.61~72.