

(78) 軟質地盤上の基礎の動特性—(その2) 地震観測に基づく動特性の検討—

(財) 電力中央研究所 ○正員 大友敬三 正員 当麻純一

(株) 奥村組 正員 粟本雅裕 正員 原田 治 正員 有井孝典

1. まえがき

軟質地盤における基礎の動的挙動は、岩盤などの堅固な地盤に比べ、基礎周辺地盤の剛性・減衰特性、表層地盤の増幅特性などに、より大きく支配されると考えられる。しかしながら、この点について焦点を絞った実験的研究例は少ない。今後、大型化された基礎が軟質地盤上に建設される機会が多くなるにつれて、軟質地盤における基礎の動的挙動の解明は耐震工学上、ますます重要度を増してくるものと思われる。筆者らは、このような観点から洪積層に砂、粘性土が堆積する比較的、軟質な地盤において一連の起振実験・地震観測を実施してきた。¹⁾ 本報は地盤と模型基礎および実規模の振動台基礎(埋設型式)において実施された地震観測のデータに基づき、地盤の特性、地盤と基礎の相互特性について検討し、さらに、いくつかの方法の数値シミュレーションを行うことにより、基礎の埋設効果・制震効果について考察したものである。

2. 観測概要

模型基礎を対象とした観測は昭和59年2月16日から同3月29日までの間であり、観測点はGL-3mの地盤中と地表、および大きさの異なる3種類の基礎上である。計測器には動コイル型速度計を使用した。模型基礎の側面の埋戻し状況(埋戻しなし、半埋め、全埋め)に対応して解析可能な地震がそれぞれ観測されている。

一方、振動台基礎を対象とした場合の観測期間は昭和59年8月1日から同11月15日までの3か月半である。観測点は地盤中に展開された測点(最深部GL-150m)と地表、および基礎中である。計測器は、この場合にはサーボ型加速度計を用い、同時に基礎底面・側面の動土圧も収録した。起振実験時の基礎高さ7.7mに対しては5個の地震が観測された。

なお、本観測の収録はすべてバイナリゲインアンプ方式のデジタルレコーダーにより行った。レコーダーのダイナミックレンジは約110 dB、周波数範囲は0.05~50Hz(-3dB)である。

3. 模型基礎の地震観測結果および

シミュレーション結果

まず、地表の測点(SP)と基礎上の測点(A2)の最大応答値(速度波形の最大値)の相関関係を調べた。図1は「埋戻しなし」の場合であるが、基礎上面応答がすべて地表応答を上回っていることがわかる。図2は「全埋め」の場合について、図1と同様な整理をしたものである。

「埋戻しなし」の場合とは対照的に基礎上面応答は地表応答を下回っているか、またはほぼ同等である。基礎側面を埋戻すことにより、基礎は周辺地盤と一体になって

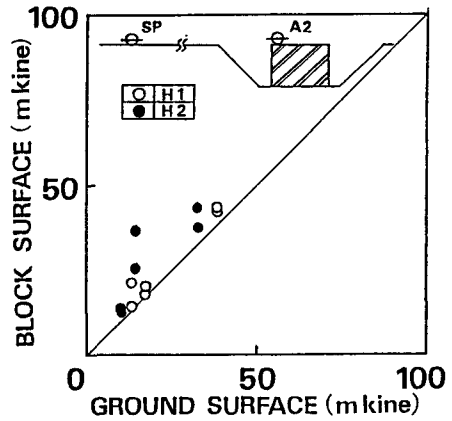


図1 最大応答値の比較(埋戻しなし)

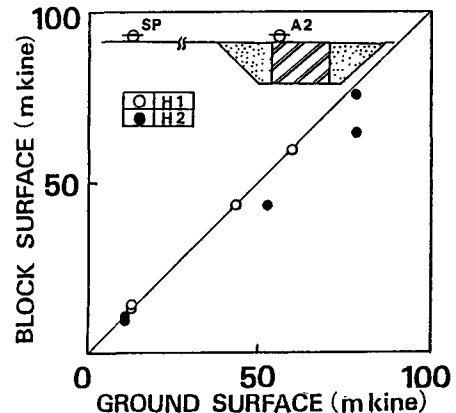


図2 最大応答値の比較(全埋め)

応答していることが推察される。図3は「埋戻しなし」の場合の地表と基礎上の速度パワースペクトルを比較したものである。地表では4Hz付近にピークが認められる。基礎でも地表のピークに一致した4Hz付近のピークがあるが、最も卓越しているのは6Hz付近のピークである。起振実験時の基礎応答（ロッキング振動）の一次のピークが5.9Hzであったことから、明らかに地震動によってこの基礎の固有振動が励起されたことがわかる。なお、地表と基礎上に共通に現れている4Hz付近のピークは表層地盤の卓越成分であると考えられる。図4は「全埋め」の場合についてパワースペクトルの比較を行ったものである。基礎上のスペクトルには、地表と共通なピークが4Hz付近にあるほかは目立ったピークは見られない。そして、基礎上のパワーが地表のパワーを大きく上回るような振動数域は存在していない。

「全埋め」の場合の基礎の周波数応答特性をより詳細に調べるために、地表と基礎間の伝達関数を求めた。この伝達関数は図5中の実線で示されているが、これは「全埋め」の状態で観測された4個の地震を算術平均し、かつ平滑化（バンド幅0.8HzのHanning Window）を施したものである。これをみると、いくつかのピークが見られるものの、振動数0Hzでは振幅比が1.0で、10Hz程度まではそれが徐々に低下してきている。この結果は地震動に対して、地表に対する基礎の応答が高振動数域にいくに従い大きく減衰する、いわゆるローパス・フィルター的な制震効果²⁾を示すものと考えられるが、この特性が模型基礎でも得られたわけである。この傾向をLuco³⁾による半無限解(H.S.)と比較し、この解を図5中に破線で示したが、0~12Hz間で観測値の傾向を良く近似することができた。

続いて、模型基礎の地震時挙動を解析的に明らかにするため、2次元動的FEM(FLUSH)によりシミュレーションを実施した。なお、模型基礎を対象とした観測では、地盤中測点を設定しなかったため地表の速度波形をGL-50mの解析上の基盤面に引き戻し、そこで加速度波形に変換したものを入力波とした。

「埋戻しなし」の場合の基礎上の速度パワースペクトルについて、観測値と解析値を比較したものが図6である。表層地盤の卓越振動数と思われる5Hzのピークは観測値と解析値は良く一致する。しかし、6Hz付近のピーク、すなわち、基礎の固有振動数に対応するピークは、ピーク的位置は一致するものの、振幅は観測値の方がはるか

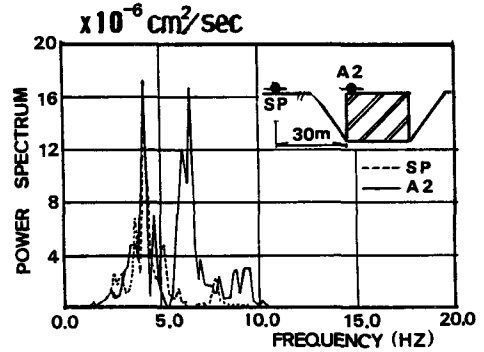


図3 パワースペクトルの比較（埋戻しなし）

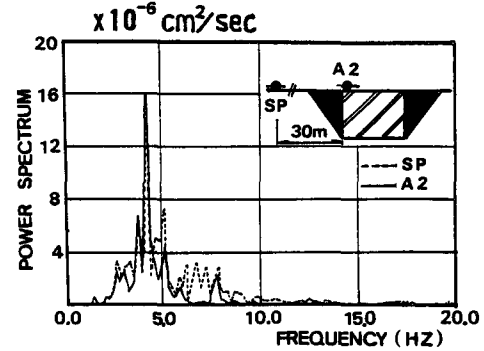


図4 パワースペクトルの比較（全埋め）

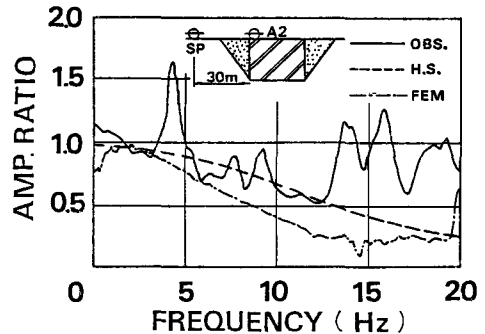


図5 地表と模型基礎間の伝達関数

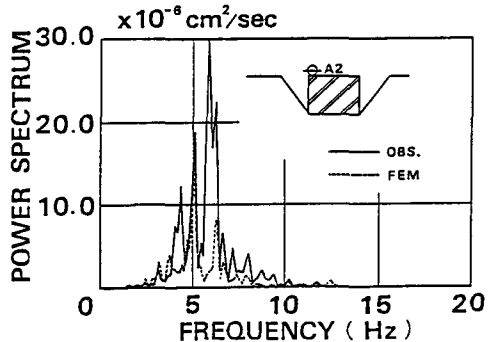


図6 模型基礎上のパワースペクトル

に大きく、FEM 解析では基礎応答は低めに評価されたようである。

「全埋め」の場合については、地表と基礎間の伝達関数により、観測値と解析値の比較を行ったが、解析値は図5中の一点鎖線で示してある。解析値は観測値、半無限解の傾向と同様に、高振動数域にいくに従い振幅比が減衰しているが、両者の振幅比を下回る傾向にある。

4. 振動台基礎の地震観測結果および

シミュレーション結果

振動台基礎を対象とした観測についてはまず、地盤の特性を検討することとした。図7は基盤(TRIG.)と地表(A9)間の伝達関数を3個の地震を算術平均して、模型基礎の場合と同様にして平滑化を施すことにより求めたものであるが、5 Hz、6 Hzに顕著なピークが大きく成長しているのが特徴的である。このような増幅特性について、一次元重複反射理論(M.R.)によるシミュレーションを試みた。地盤構造のモデルを表1に示す。このモデルは地盤調査結果に基づいているが、地表付近について、 V_s 、 Q 値(=1/2h, h;減衰定数)を適当に修正したものである。この結果を図7中に破線で示したが10Hz程度まではピークの位置、振幅もほぼ良く対応しているといえよう。

次に同様な3個の地震から地表(A9)と基礎(A4)間の伝達関数を求めたものが図8中の実線である。伝達関数の振幅比は0 Hzから5 Hzまで急激に減衰している。高振動数域にいくに従い、振幅比が低下する傾向は図5で示した模型基礎の場合と同様に制震効果の特性を示すものであるが、振動台基礎の方が振幅比の減衰の度合いが大きい。振動台基礎の埋設部をひとつの層とみなし、表2の地盤・基礎モデルを作成することにより地表と基礎間の伝達関数を一次元重複反射理論より求めた。結果は図8中に一点鎖線で示したが、振幅比の減衰する傾向は観測値と良く一致している。

ところで、図7でもみられたように、基盤から地表の間で顕著な増幅があるため、そのまま地表と基礎間の伝達関数をとることは振動台基礎の制震効果の特性を過大に評価することになる。そこで、基礎上面と同レベルにある地表面(GL-5m)と基礎間の伝達特性を把握するため、ローム層を掘削したレベルに設置された地表測点(A8)と基礎間の伝達関数を求めたものが、図9中の実線である。図8の伝達関数と同様に振幅比は高振動数域にいくに従い減衰するが、振幅比の減衰性はゆるやかである。この結果に対して表1の第3層目までを取り除いた地盤

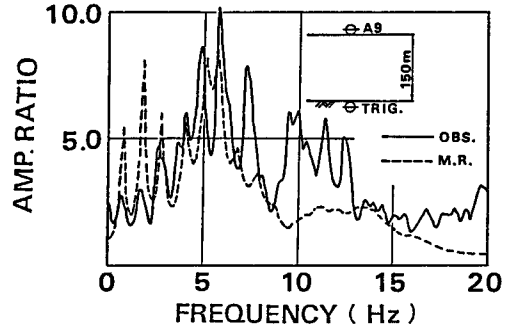


図7 基盤と地表間の伝達関数

表1 地盤モデル

H (m)	V_s (m/s)	ρ (tf/m ³)	Q
.7	30.0	1.20	50.0
1.3	50.0	1.30	50.0
2.0	120.0	1.50	30.0
16.0	170.0	1.70	10.0
16.0	300.0	1.70	10.0
14.0	430.0	1.70	10.0
100.0	430.0	1.70	10.0
100.0	430.0	1.70	10.0

表2 地盤・基礎モデル

H (m)	V_s (m/s)	ρ (tf/m ³)	Q
7.7	2000.0	2.30	50.0
7.3	170.0	1.70	10.0 </td
16.0	300.0	1.70	10.0
14.0	430.0	1.70	10.0
100.0	430.0	1.70	10.0
100.0	430.0	1.70	10.0

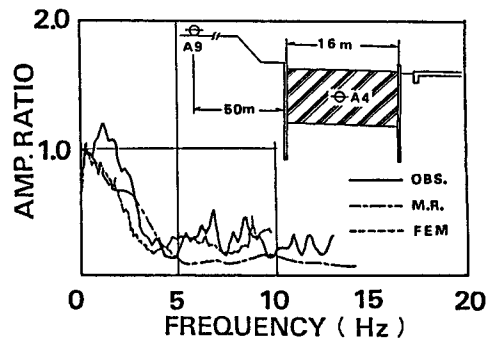


図8 地表と振動台基礎間の伝達関数

モデルと表2の地盤・基礎モデルを利用した重複反射理論によるシミュレーションを行ったが、図9中の破線のように、振幅比の減衰の様子を良くとらえることができた。

振動台基礎の地震観測結果に対しても二次元動的FEM (FLUSH)によるシミュレーションを行った。模型基礎の場合と異なり、この場合には地盤中の加速度記録が得られているためGL-50mでの加速度波形を入力波とした。解析は長周期型のもの (EQ8)、短周期型のもの (EQ12)の2波に対して行った。

図10はEQ12についての加速度応答倍率を地盤系列について、観測値と解析値を比較したものである。各深さレベルで倍率に多少の異差はあるものの、地表での倍率は良く一致している。

振動台基礎を対象とした観測では、基礎側面の動土圧を収録しているため、動土圧の波形についても、観測値と解析値を比較した。図11がそれを示しているが、解析値の方が観測値の値を全体的に下回っている。波形の位相については良い一致がみられないが、EQ8の方の10秒～20秒の間で観測波形の周期が長くなっている様子は解析値の方でもやや現れている。

最後に地表と基礎間の伝達関数 (EQ12) の解析値を図8中に破線で示したが、観測値、一次元重複反射理論、FEMの一致度は良い。図8の結果は、基礎の制震効果の特性は鉛直下方からの平面波解析で十分に説明できることを裏付けているものと考えられる。

5. あとがき

軟質地盤上の基礎の地震観測を実施することにより地盤と基礎の相互特性について検討した。その結果、以下のようなことが明らかとなった。

- 1) 模型基礎が「埋戻しなし」の場合には地震動によって起振実験時の固有振動数で励起される。
- 2) 観測を実施した当該地盤の表層の増幅は大きいものであり、地盤と基礎の相互特性を検討するにあたっては地盤の特性、すなわち表層地盤の物性値を的確に評価しておく必要がある。
- 3) 模型基礎が「全埋め」の場合と振動台基礎は地表の応答に対してローパス・フィルタ的な制震効果の特性を示し、この特性を半無限弾性解、一次元重複反射理論、FEM解析によって良好に模擬することができた。したがって、基礎の制震効果は基本的には鉛直下方からの平面波解析で説明できるものと考えられる。

〈参考文献〉

- 1) 大友他：軟質地盤上の基礎の起振実験ならびに地震観測，第39回年次学術講演会，1984。
- 2) Luco, J.E.: Dynamic Interaction of a Shear Wall with the Soil, ASCE, EM 2, 1969。
- 3) 沢田他：地震動に対する基礎の制震効果とその特性について，第6回日本地震工学シンポジウム，1982。

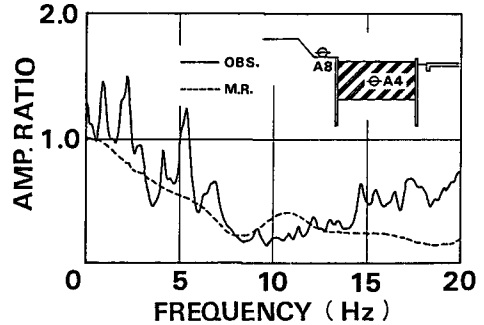


図9 地表(GL-5m)と振動台基礎間の伝達関数

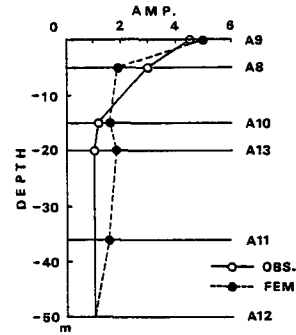


図10 地盤の加速度応答倍率 (EQ12)

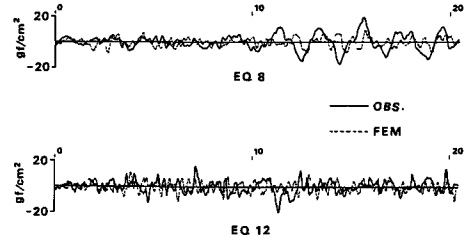


図11 振動台基礎側面の動土圧波形