

(99) 埋め込み基礎起振実験の数値解析

東京電力(株) ○ 野本健司
 東京電力(株) 大塚正博
 (財)電力中央研究所 岩橋敏広
 (株)奥村組 高橋直樹

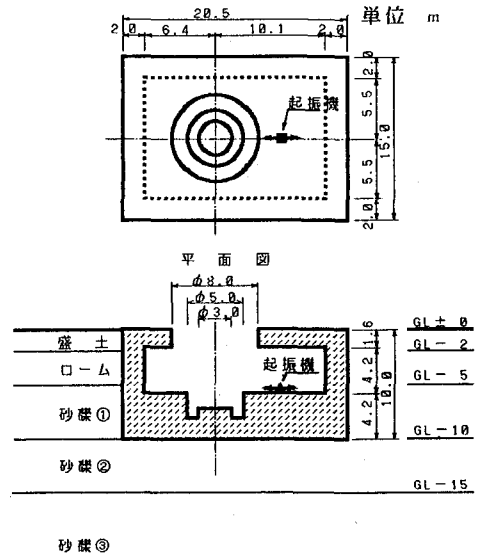
1. まえがき

埋め込み基礎の地震時挙動は、周辺地盤の動きに大きく支配されることが知られており、これを表現する基礎側面の地盤剛性・減衰特性に対する研究も種々報告されている¹⁾。

本報告は、埋め込み基礎の起振実験結果²⁾について、軸対称FEMおよびスウェー・ロッキング2自由度の剛体モデルを用いたシミュレーション結果を示すとともに、軸対称FEMを用いた基礎加振に対する埋め込み効果の検討結果を示すものである。

2. 解析対象基礎と地盤物性値

解析対象とした基礎は、図-1に示すように、横20.5m×奥行き15.0m、高さ10.0m、重量5700tfの規模であり、その全高が地中に埋め込まれている。基礎築造時の土止めには親杭横矢板工法が採用され、基礎本体コンクリートは土止めまで打設し、親杭と横矢板は存置されている。地盤は表層より厚さ2mのローム主体の盛土層、厚さ3mのローム層、さらに下層に厚い扇状地性の砂礫層が続き、ほぼ水平成層を呈している。表-1に地盤物性値を示す。せん断波速度(V_s)はPS検層結果に基づくものであるが、盛土層については、起振実験の地表面応答結果から求めた波動の位相速度をもとに $V_s=160\text{m/s}$ とした。図-2に起振実験の地表面応答結果から求めた波動の位相速度およびラブ波分散曲線の解析値を示す。分散曲線の高振動数側の位相速度は表層のせん断波速度(V_s)を反映するものであり、起振実験結果と解析値は良く対応している。また、図-3に常時微動測定と重複反射理論による解析結果を示す。両結果の卓越振動数には若干の相違はあるもののほぼ対応することが判る。



断面図
 図-1 基礎構造・地盤構成

表-1 地盤物性値

深度 m	土質名	γ_t tf/m ³	V_s m/s	ν	h %
2.0	盛土	1.4	160	0.3	5.0
5.0	ローム	1.4	160	0.3	5.0
10.0	砂礫①	2.1	400	0.4	2.0
15.0	砂礫②	2.1	600	0.4	2.0
以深	砂礫③	2.1	700	0.4	2.0

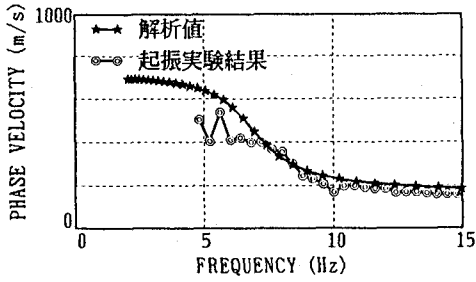


図-2 分散曲線

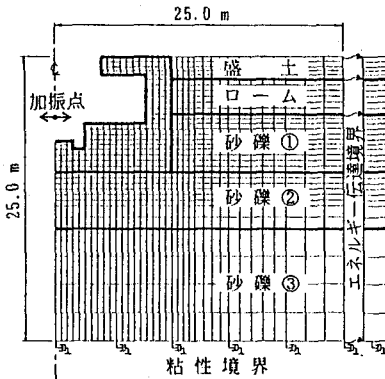


図-5 軸対称FEMモデル

3. 軸対称FEMモデルによる解析

解析モデルは、地盤が水平成層を呈していることから、簡便さを考慮して、図-5に示すように、軸対称FEMとし、基礎は底面積の等価な円形基礎に置き換えた。また、地盤の境界条件は地盤の半無限性を表現するため、側方をエネルギー伝達境界、底面を粘性境界とした。なお、基礎側面近傍地盤は、掘削時の土止め工法による地盤状況を考慮するために側面近傍 0.5m、深さ10.0mについてVsを変化させた計算を行い、Vsを0.2倍として評価した。

FEM計算結果と起振実験結果を、基礎天端および地盤の共振曲線で比較したものを図-6、7に示す。これによれば、FEM計算結果は基礎および地盤とも起振実験の共振曲線を比較的良く再現していることが判る。

表-2 基礎の物性値

材料名	γ tf/m ³	E tf/m ²	ν	h %
鉄筋コンクリート	2.4	2.5E6	0.2	2.0

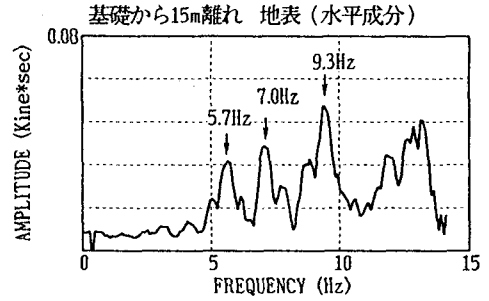


図-3 常時微動測定結果 (Fourier Spectrum)

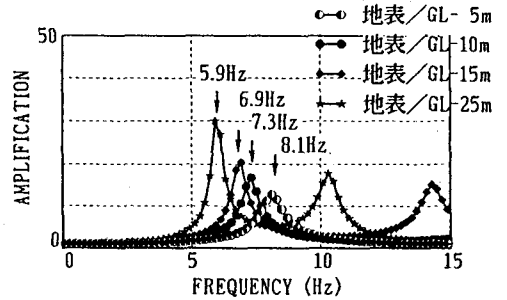


図-4 重複反射理論による伝達関数

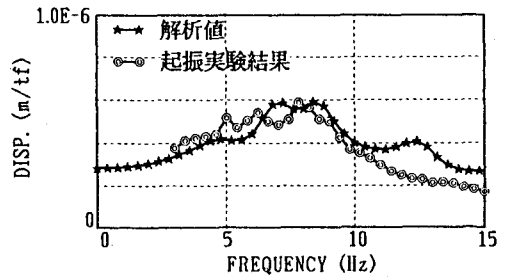


図-6 共振曲線 基礎天端、水平変位(FEM)

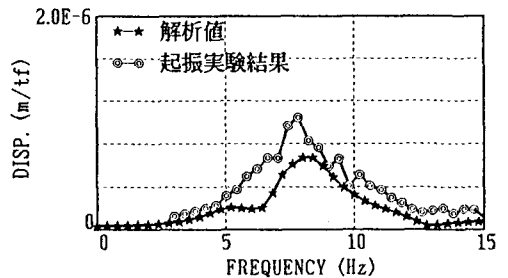


図-7 共振曲線 地盤、水平変位(FEM)

4. スウェー・ロッキング2自由度の剛体モデルによる解析

基礎と地盤の動的相互作用を評価できる地盤の複素ばねの理論解には、弾性波動論に基づいた、田治見の提案を基本としたもの³⁾およびNovak⁴⁾、原田⁵⁾等が提案しているものがある。ここでは、基礎をスウェー・ロッキングの2自由度の剛体と仮定し、これらの提案に基づく地盤の複素ばねを用いたSRモデルにより計算を行った。地盤物性値は基礎側面地盤3層のせん断波速度(V_s)を層厚で加重平均し、表-3に示すものとした。また、掘削時の土止め工法による地盤状況を考慮するため、軸対称FEM解析と同様にトライアル計算を行い、基礎側面の複素ばねを0.5倍で評価した。SRモデル計算結果と起振実験結果を、基礎天端の共振曲線で比較したものを図-8~10に示す。これによれば、取扱いの容易なSRモデルでも、ほぼ基礎の挙動を表現できていることが判る。

表-3 スウェー・ロッキングモデル用物性値

深度 m	層区分	γ tf/m ³	V_s m/s	ν	h %
10.0	表層	1.75	280	0.35	5.0
以深	基礎底面	2.1	600	0.4	2.0

基礎重量 : 5700 tf
 重心高さ : 4.5 m 基礎底面より
 重心回り慣性モーメント : 0.306×10^5 tf·m²

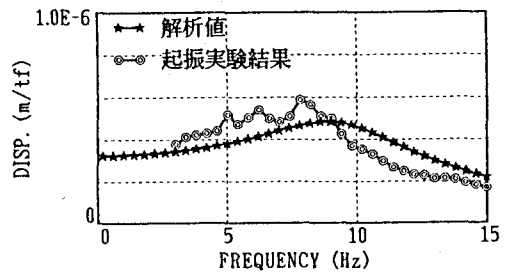


図-8 共振曲線 基礎天端、水平変位(田治見)

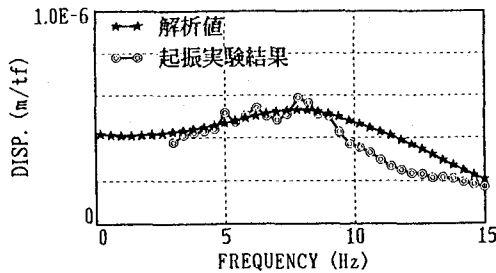


図-9 共振曲線 基礎天端、水平変位(Novak)

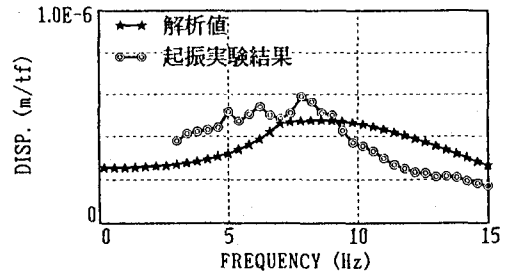


図-10 共振曲線 基礎天端、水平変位(原田)

5. 数値解析モデルを用いた基礎加振に対する基礎の埋め込み効果

基礎加振に対する基礎の埋め込み効果を把握する目的で、上記軸対称FEMモデルを用いて数値解析を行った。解析モデルは、図-11、12に示すように、GL-5.0mまでの地盤を取り除いたモデル(半埋め)およびGL-10.0mまでの地盤を取り除いたモデル(埋め戻しなし)とした。なお、基礎側面近傍地盤は、側面近傍0.5mについて V_s を0.2倍として評価した。

全埋め・半埋め・埋め戻しなしのFEM計算結果を、基礎天端の共振曲線で比較し図-13に示す。図より、基礎の最大変位振幅は、埋め戻しなしに対して半埋めが65%程度、全埋めが45%程度と小さくなり、埋め込みによ

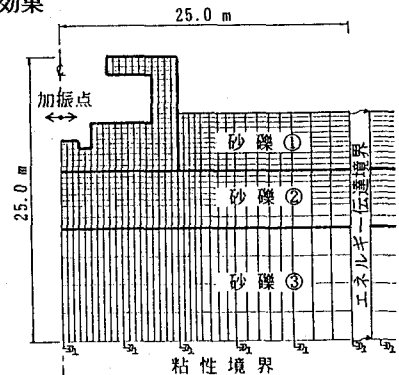


図-11 軸対称FEMモデル(半埋め)

りピークが明瞭でなくなることが判る。

次に、基礎をスウェー・ロッキングの2自由度の剛体と仮定し、数値解析により得られた基礎変位を用い、全埋め、埋め戻しなしに対して地盤の複素ばねおよび等価減衰定数を求めたものを、埋め戻しなしの共振振動数

8.6Hzについて表-4に示す。この際、複素ばねは基礎底面に集約されるものとした。この表から、起振実験結果²⁾同様、基礎側面地盤は、ばねとしての効果は小さいが、等価減衰定数で評価した減衰を大きくし、基礎の振動を押さえる効果のあることがうかがえる。

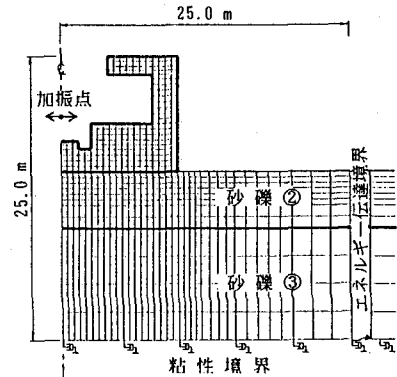


図-12 軸対称FEMモデル (埋め戻しなし)

表-4 FEM解析結果より求めた逆算ばね・等価減衰定数 (8.6Hz)

		全埋め	埋め戻しなし
水平ばね	実数部 KH (tf/m)	0.30×10^7	0.30×10^7
	虚数部 KH' (tf/m)	0.29×10^7	0.12×10^7
回転ばね	実数部 KR (tf*m/rad)	0.29×10^9	0.21×10^9
	虚数部 KR' (tf*m/rad)	0.16×10^9	0.07×10^9
等価減衰定数	水平 hH (%)	40	19
	回転 hR (%)	26	17

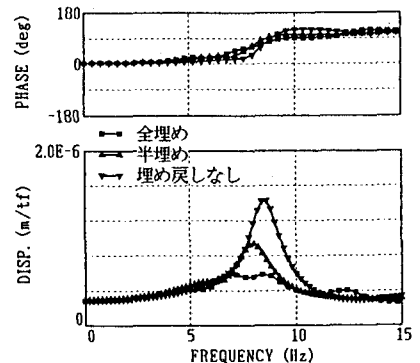


図-13 共振曲線 基礎天端、水平変位 (FEM)

6. まとめ

- ①軸対称FEMは、周辺地盤のせん断波速度 (V_s) を適切に評価し、基礎側面近傍地盤に対し掘削時の土止め工法による地盤状況を評価すれば、表層地盤の卓越振動数付近でのピークおよび周辺地盤の挙動までも、良好に表現できる有効な計算方法であることが明らかになった。
- ②基礎をスウェー・ロッキング2自由度の剛体と仮定し弾性波動論による複素ばねを用いた基礎の挙動解析は、周辺地盤のせん断波速度 (V_s) を適切に評価すれば、共振曲線をほぼ説明できる有効な計算方法であることが明らかになった。
- ③軸対称FEMによる数値実験によれば、基礎加振に対する基礎の埋め込み効果として、基礎の最大変位振幅は、埋め戻しなし、半埋め、全埋めの順で大きく低下し、ピークが明瞭でなくなることが明らかになった。また、起振実験結果同様、基礎側面地盤は、ばねとしての効果は小さいが、等価減衰定数で評価した減衰を大きくし、基礎の振動を押さえる効果のあることがうかがえた。

謝辞

解析にあたり、ご指導頂いた久保慶三郎東京大学名誉教授、渡辺啓行埼玉大学教授を始め御協力頂いた関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 3) 大友他：軟質地盤における基礎の埋設効果に関する実験的検討 (その2), 電力中央研究所報告, 1986.
- 竹内他：Experimental Study on Dynamic Behaviour of Embedded Block Foundation, 8th International Conference on S.M.I.R.T., 1985.
- 2) 佐藤他：埋め込み基礎の原位置起振実験, 第21回地震工学研究発表会, 1991
- 4) M. Novak et al: Coupled Horizontal and Rocking Vibration of Embedded Footings, Canadian Geotechnical Jour., 1972.
- 5) 原田他：地中円筒剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数, 土木学会論文報告集, 1983.