

(81) 杭を有する大型ケーソンの幾何的相互作用

飛島建設(株)○正会員 森 伸一郎 正会員 三輪 滋
飛島建設(株) 正会員 武藤 正人 正会員 谷 浩一郎

1. はじめに

深い基礎を有する構造物や地中構造物の耐震安全性を評価する際、構造物と地盤の動的相互作用の問題は重要な検討課題である。構造物の動的相互作用には、地盤-基礎-構造物の質量が連成系を形成する効果と構造物が地盤を拘束し空間的に分布する地震動を総合して受ける効果(幾何的相互作用)とがある。構造物基礎や地中構造物の地震波には、地表の地震波に比べて高周波数成分が少ないという現象がすでに多く報告されている。^{1)~7)} この現象は、主に後者の幾何的相互作用の立場から、入力損失^{1),4)} や有効入力⁵⁾ として研究されている。筆者らは主に後者の観点から、軟弱地盤中の大規模ケーソンを対象に常時微動測定と地震観測により杭を有する大型ケーソンの幾何的相互作用について研究している。^{8)~12)} ケーソンの拘束効果のおよばない地表^{10),11)}、地中およびケーソンの3点で地震観測を行ってきた。本論文では、地震観測結果に見られる高周波数成分低減効果を報告し、観測記録に対しケーソンの幾何的相互作用について考察した。

2. 地震観測の概要

地震観測は、伊勢湾北部臨海地帯の埋立地の杭を有する大型ケーソンで実施している。図-1に構造物と地震計の配置を示す。ケーソンは30.4m×47.5m×30.0mの直方体で、

図-2 地盤柱状図

直径2.0m全長14.6mのベント杭77本(群杭)に支持されている。ケーソンの見かけの密度は約 1.05t/m^3 である。図-2に地盤柱状図を示す。観測地の地盤はほぼ成層で、上位から緩い埋立砂質土~粘土土層、その下に厚いN値1程度の軟弱シルト層が続き、GL-40m付近に支持層である洪積砂質土層が現われる。表-1に地盤物性を示す。地震計は3成分の速度帰還サーボ型加速度計を備えた16ビットデジタル強震計で、0.1~30Hzで平坦な周波数特性を有する。

3. 地震観測結果

観測を開始した1985.11.から1987.4.までに3点共記録できた地震は16である。本報告で用いた記録は4つの地震の記録であり震央分布を図-3に、地震の諸元¹⁹⁾ 及び水平成分の最大加速度とその比を表-2に示す。周波数伝達関数(地表/地中)より求めた表層地盤50mの1次、2次の固有周波数は1.0, 3.2Hzである。

一方、表-1に基づく重複反射理論(SHAKE¹³⁾)の計算値は、各々1.0, 3.0Hzであり観測結果とよく一致する。

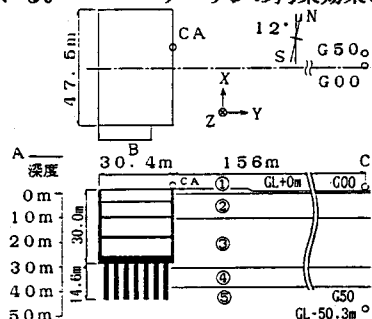


図-1 構造物と地震計の配置

表-1 地盤物性値

No	土質	H(m)	(tf/m^2)	(m/sec)	(m/sec)
1	埋立砂質土	2	1.7	120	330
2	埋立中砂	10	1.7	190	1500
3	シルト	20	1.6	160	1500
4	砂質土	8	1.9	240	1500
5	砂レキ	10	2.1	330	1500

単位体積重量 γ は推定値

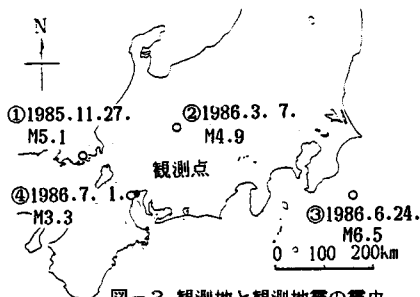


図-3 観測地と観測地震の震央

表-2 観測された地震の諸元と地表とケーソンの水平最大加速度及びその比

NO	発震月日	マグニチュード M	震央距離 Δ (km)	震源深さ D(km)	最大加速度 A_{max} (gal)				加速度比	
					地表 G00		ケーソン CA		CA/G00	
					X	Y	X	Y	X	Y
1	1985.11.27	5.1	110	6	6.96	5.41	0.93	1.07	0.13	0.20
2	1986.3.7	4.9	134	5	5.01	6.35	0.91	1.50	0.18	0.24
3	1986.6.24	6.5	368	73	1.22	1.33	0.93	0.92	0.76	0.69
4	1986.7.1	3.3	9	10	1.69	1.91	0.36	0.51	0.21	0.27

4. ケーソンのローパスフィルター効果（高周波数成分低減効果）

表-2によればケーソンの水平最大加速度は地表より小さい。主要動部の後半とそれに続く表面波の卓越した¹²⁾ 1986.6.24.の遠距離地震の記録を除けば、その割合は13~27%にすぎない。図-4に2つの地震における地表とケーソンのY成分の加速度波形を、図-5にそれらのフーリエスペクトルを示す。

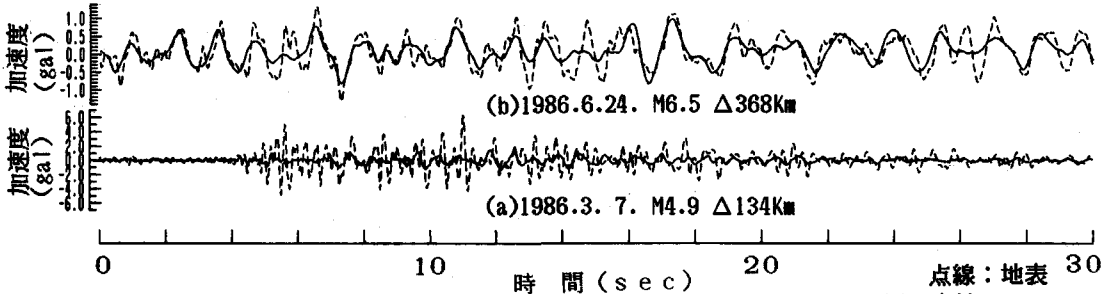
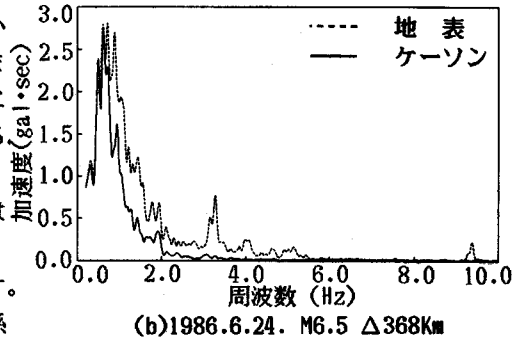


図-4 地表とケーソンの加速度波形（Y成分：短辺方向） 実線：ケーソン

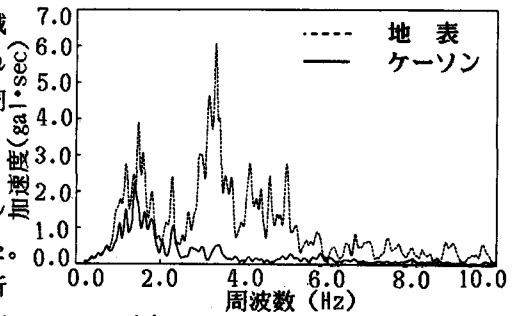
両図よりケーソンは地表に比べて高周波数成分がかなり小さいこと、最大加速度の低減の割合の違いは地震波に含まれる高周波成分の割合の違いによること、低周波数成分に対しては地盤とケーソンは一緒に動いていることが分かる。4地震の伝達関数（振幅）の形状はほぼ同じである。¹¹⁾ 但し、1986.6.24.の地震では5Hz以上の高周波数領域では有意な成分が極めて小さく振幅が異なる。¹²⁾ 図-6に、この地震を除く3地震のX, Y成分の平均伝達関数を示す。X, Y成分に差異はなくケーソンの縦横比(5/3)には関係ないと言える。この図にはケーソンの高周波数成分が低減されるローパスフィルター効果^{1)~7), 8)~12)}が明瞭に現れている。さらに谷となっている部分があり、この落込み周波数は、1.6・3.2~5.0・7.5Hzに見られる。¹¹⁾

5. FEMによる解析

ケーソン側面や杭群周面での地盤の拘束効果とケーソンの質量効果について検討するため、FEM解析を実施した。短辺方向（Y）について考え対称モデルとした。¹¹⁾ 解析は、FLUSH¹⁴⁾を基に開発したTFLUSH¹⁵⁾によった。下方、側方には波動の逸散を考慮するために各々粘性境界¹⁵⁾、伝達境界^{14), 16)}を考えた。しかし面外への波動逸散は考えない。地盤の履歴減衰は各層一律3%とした。ケーソン・杭の質量を考えたものと無質量にしたものの2ケースを検討した。図-7に自由地盤地表に対するケーソン側壁上端の伝達関数の振幅を、2ケースの解析結果と3地震のY成分平均値とを合わせて示す。2ケースともほぼ同じ形状で、ケーソンの質量の有無による差は小さいことがわかる。FEMの結果は地震観測結果に比べて振幅の大きさが異なるものの、落込み周波数は1.2・1.7・3.4・4.8・7.0Hz付近にあり前記の地震の落込み周波数と良い一致を示す。以上の考察により、図-6 周波数伝達関数（ケーソン/地表）



(b)1986.6.24. M6.5 Δ368Km



(a)1986.3.7. M4.9 Δ134Km

図-5 地表とケーソンのフーリエスペクトル Y成分

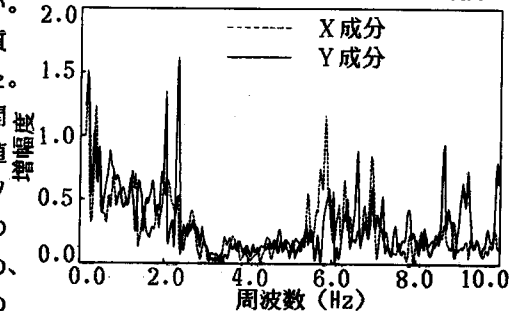


図-6 周波数伝達関数（ケーソン/地表）

ケーソンの伝達関数にみられるローパスフィルター効果は、主にケーソン一杭が周辺地盤を拘束する効果、即ち幾何的相互作用によるものであり、質量の達成効果は小さい、と考えられる。

6. 1次元モデルによる解析

前述の幾何的相互作用を、構造物と自由地盤を水平な相互作用バネで結ぶ単純な1次元モデルで検討した。¹¹⁾ いわゆるPenzienモデル¹⁷⁾の考え方をふまえ、各質点には他端から地動が作用する水平相互作用バネがついている。相互作用バネはMindlinのⅡ解を利用して得られるバネ値を用い、減衰は履歴減衰

ケース	ケーソン杭の質量	コード
①	なし	MEP-1
②	なし	TFLUSH
③	あり: M_s	MEP-1
④	あり: $M_s + M_e$	MEP-1

であり、逸散減衰を考慮し一律5%とした。計算は表-3の4ケース行った。②は解析法による違いを①③④は質量に関するモデル化の違いを検討するためである。④では自由地盤との相対加速度が作用する周辺地盤の有効質量¹⁷⁾ (M_e)

を考え、杉村¹⁸⁾の方法により求めた。図-8に計算で得られた自由地盤地表に対するケーソン上端の伝達関数を示す。0~3Hzではモデルによる差は見られない。①と②の結果は、ほぼ同じ形状である。高周波数領域の振幅が非常に小さい。③では4.0Hz以下では無質量の場合と変わらないが、8.2Hzを中心振幅が大きく、ケーソン一杭系の固有モードが励起されたと考えられる。観測結果でも8.0~9.0Hzにピークがあるが振幅は1以下である。④では、2.8Hz以上の高周波数領域では有効質量の影響が見られ、動的バネとして働いていることが分かる。4ケースの中では④が最も観測結果に似ている。つぎに、図-9に観測波形と計算波形を比較して示す。

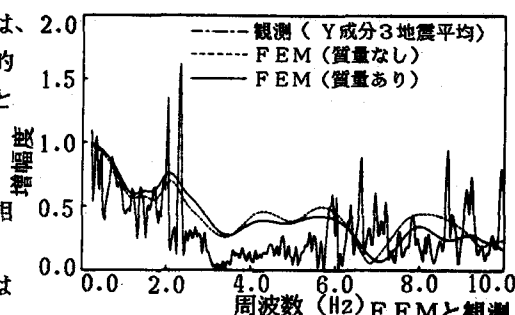


図-7 周波数伝達関数 (ケーソン/地表)

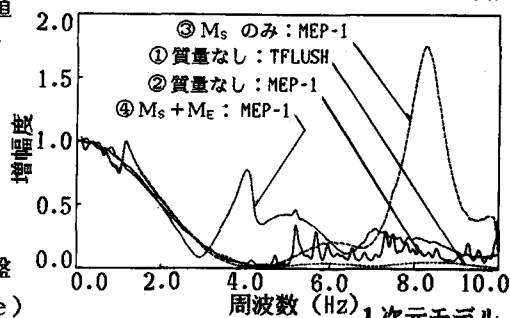


図-8 周波数伝達関数 (ケーソン/地表)

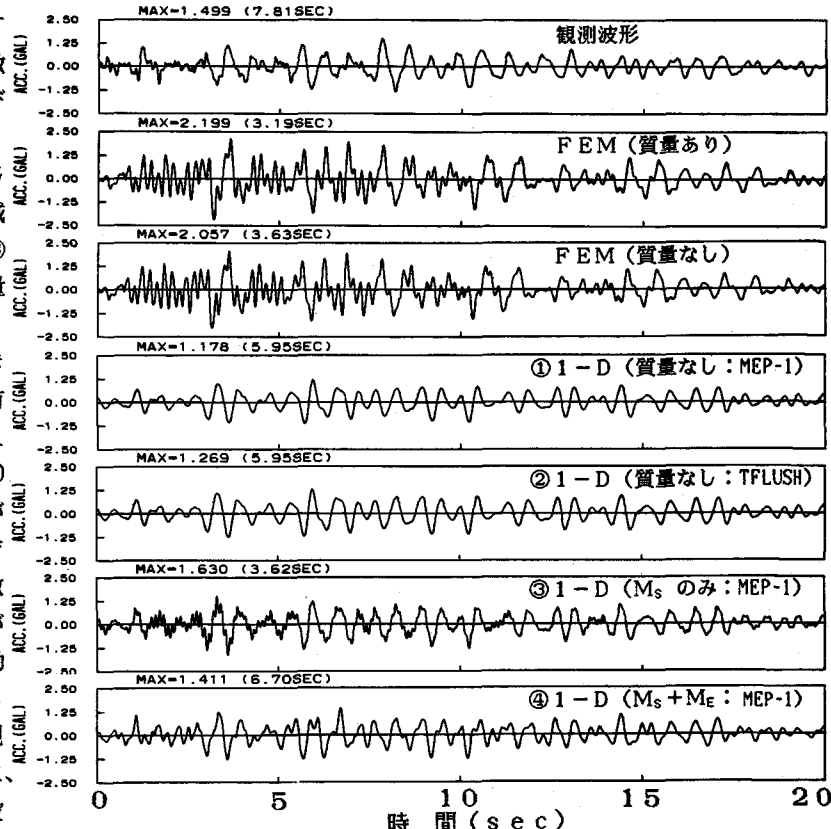


図-9 ケーソン上端の加速度波形の比較 (観測と解析): 1986.3.7. Y成分

観測記録には、始めの部分に高周波数成分があるが、後半には見られない。これに対して、計算結果は、FEMモデルでは質量の有無にかかわらず波形に大差はない。これらの波形は高周波数成分の振幅が大きいものの、その消長と全体の位相が記録と良く合っている。1次元モデルは、高周波数成分の少ない後半ではどのモデルでも観測波によく一致するが、高周波数成分の現れている前半では、①②の無質量モデルには高周波数成分は現れず最大値は小さい。また、③の構造物質量を考慮したモデルでは、より高い高周波数成分が現れる。そして、④の有効質量を考えたPenzienモデルは波形、最大値の両方で最も観測波に近い。これは、1次元モデルとはいえず相互作用バネと有効質量に3次元効果が取り入れられていることや、減衰の取り方がFEMモデルと異なることによるものと考えられる。

7. 結 論

本研究で得られた主な知見は、次の通りである。

- ①地震観測結果においては、水平最大加速度は、ケーソン上端では自由地盤の地表に比べ小さい。やや長周期の表面波の卓越する遠距離地震波では69～76%となることがあるが、他では13～27%に低減される。
- ②ケーソンにはローパスフィルター効果があり、周波数伝達関数は地震によらずほぼ同じ形状である。
- ③本ケーソンの平面寸法は縦横比が5：3であるが、長辺方向、短辺方向の伝達関数に差異は認められない。
- ④FEM解析によればケーソン一杭の質量の影響は小さく、上記の現象は主に幾何的相互作用によると思われる。また、FEM解析によるケーソンの伝達関数は、観測記録による伝達関数を良く表現する。
- ⑤1次元モデル(Penzienモデル)でも、ケーソンのローパスフィルター効果をほぼ表現できる。

本研究で得られた知見は小さい地震動のレベルにおけるものである。今後は、データの蓄積を計るとともに、特に波形の詳細な検討による現象の把握と、精度の良いモデル化手法の検討を行っていきたい。

謝辞：最後になりましたが、地震観測の実施を御許可下さいました三重県北勢沿岸流域下水道建設事務所の皆様、および観測に御協力を頂いている皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失(1)(2)、日本建築学会論文報告集、NO.165,1969.11 NO.167,1970.1.
- 2) 浜田政則：大型地下タンクの地震挙動の観測と解析、土木学会論文報告集、NO.273,1978.5. 3) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和：強震記録を用いた道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答解析, 土木学会論文報告集, NO.293, 1980.1.
- 4) 石井 清, 山原 浩：大型地下タンクの実測記録による地震波の入力損失の検討、日本建築学会論文報告集、NO.312,1982.2 5) 澤田義博, 矢島浩, 佐々木俊二, 桜井彰雄, 高橋忠：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回地震工学シンポジウム講演集、1982.12. 6) 原田隆典, 久保隆三郎, 片山恒雄：地震波の有効入力の考え方とその実測例による検討、土木学会第15回地震工学研究発表会講演集、1979. 7) H.Tajimi: Predicted and Measured Vibrational Characteristics of a Large-scale Shaking Table Foundation, 8WCEE, 1984.7. 8) 森伸一郎, 増淵孝二, 松島健一：地震観測による地中構造物の動的相互作用の検討、土木学会第41回年次学術講演会概要集、1986.11. 9) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 谷浩一郎：地中構造物の常時微動特性の時間的変動、第21回土質工学研究発表会講演概要集、1986.6. 10) 三輪滋, 森伸一郎, 滝本幸夫：常時微動測定による地中構造物の周辺地盤拘束効果の検討、土木学会第41回年次学術講演会概要集、1986.11. 11) 森伸一郎, 三輪滋, 武藤正人, 谷浩一郎：地震観測と常時微動測定に見られる地盤と地中構造物の相互作用、第7回日本地震工学シンポジウム、1987.12. 12) 森伸一郎, 谷浩一郎：杭を有する大型ケーソンの地震時挙動、第22回土質工学研究発表会講演概要集、1987.6. 13) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report NO.EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley, December 1972. 14) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H.B.: FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No.EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, November 1975. 15) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L.: Finite Dynamic Model for Infinite Media ASCE, vol.95, NO.EM4, pp.859-877, August 1969. 16) Chen, J.C., Lysmer, J. and Seed H.B.: Analysis of Local Vibrations in Free Field Seismic Ground Motion, Report NO.EERC 81-03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, January 1981. 17) Penzien, J., Scheffey, C.F., Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, ASCE vol190, NO.EM3, pp.223-254, 1964. 18) 杉村義広：軟弱地盤における長尺支持ぐい基礎の地震時振動性状に関する研究、早稲田大学博士論文、1972 19) 気象庁：地震月報