

地下タンクの常時微動測定による入力損失効果の検討

FILTERING EFFECT THROUGH RIGID FOUNDATION BASED ON
MICROTREMOR RECORDS OF INGROUND TANKS

石 井 清*・小 山 和 夫**

By Kiyoshi ISHII and Kazuo KOYAMA

1. はしがき

構造物の基礎上の地震観測波形は地表の波形と比べ短周期成分が少ないことはよく知られている。この現象には上部構造の質量効果と入力損失の効果が関係する^{1),2)}。すなわち上部構造の質量効果により基礎固定としたときの構造物の固有振動数成分は基礎上の波形では少なくなる³⁾。また入力損失の効果は異なる2地点間の地動の位相ずれ、振幅差を比較的剛な基礎版が拘束する効果であり、基礎は地動に対してローパスフィルターとして作用する。Kauselは前者を Dynamic Interaction、後者を Dynamic Interaction と区別している⁴⁾。またサブストラクチャー法では基礎入力地動 (Foundation Input Motion) の評価が後者になる⁵⁾。

著者らは大型地下タンクをはじめとする構造物の実測資料から入力損失の効果について検討を進めている^{3),6)~9)}。これらの検討結果から基礎の埋込み深さが入力損失の効果と関係が深いことを示したが基礎幅の影響は未検討である。

本研究では実測例を増やすこと、また要因分析をより条件の整った実測資料より行うことを目的として LNG 地下タンクの常時微動測定を行い、入力損失の効果を検討した^{10),11)}。

本研究の構成を以下に示す。予備検討とし次節では地下タンクの質量効果が小さいことを確認し、3. では地震観測システムを用いた常時微動測定から地震時の現象である入力損失の効果が検討できることを示す。以下4. では常時微動測定の結果および統計解析結果を示し、5. では統計解析から得られた特性を SV 波入射と仮定して解析的に検討する。

2. 地下タンクの質量効果

対象構造物として地下タンクを選定した理由は地下タンクの動きには質量効果が小さいためである。すなわち地下タンクは上部構造をもたず、みかけの単位体積重量も約 0.85 t/m^3 と小さい。一方本地下タンクの場合には側壁、底版などが比較的剛につくられており巨視的には重さのない剛構造物 (Massless Rigid Structure) とみなせる^{6),12)}。

図-1 は地震観測を実施している地下タンクの外形寸法と加速度計の配置図である。図-2 には土質柱状図を示す。また地表の地動に対するタンクの動きを GL-1 m (Y) の地動とタンク底版 T-6 (Y) の水平動との伝達関数により 図-3 に示す。図中の実線は 13 の地震記録の伝達関数の平均値、破線はタンクのコンクリートの

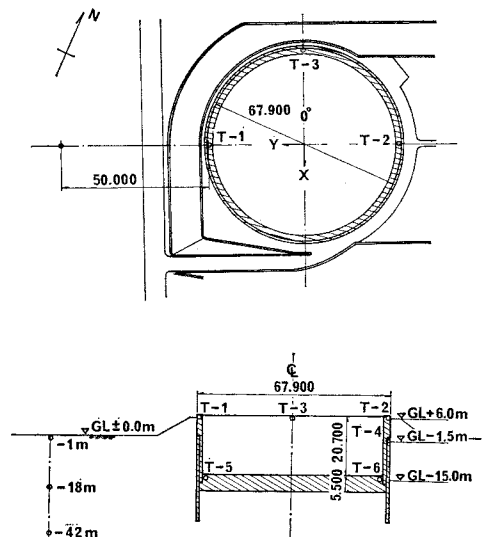


図-1 地下タンクの外形寸法と加速度の配置図

* 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室研究員

** 正会員 東京ガス(株)工務部

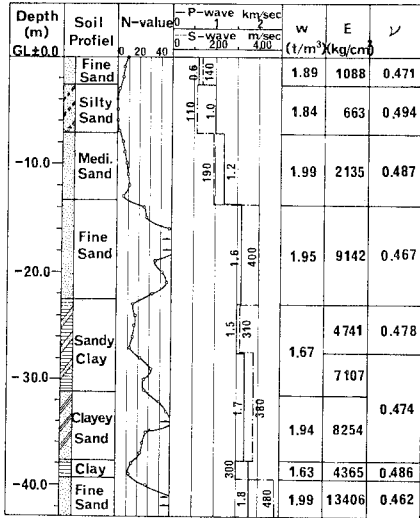


図-2 地盤柱状図

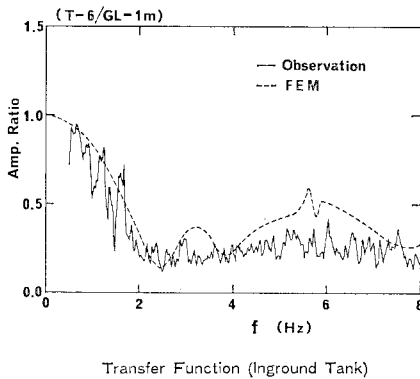


図-3 基礎版 (T-6, 水平動) と地盤 (GL-1 m, 水平動) との仮伝達関数 (地震観測結果と FEM 解析結果との比較)

単位体積重量を通常の 10 分の 1 とタンクの質量効果を小さくし軸対称 FEM 解析から求めた基礎/地盤の伝達関数である (タンクの質量をゼロとすることはプログラムの制約上できなかった)⁹⁾。図からは 0~2.5 Hz において実測解と解析解はよく一致しており、この振動数領域ではタンクの質量効果は小さい。

図-4 には平面ひずみ FEM (FLUSH)¹³⁾ による 1 層地盤中の埋設基礎の質量効果の解析結果を示す。結果は基礎/地盤の伝達関数で示され、基礎の単位体積重量は実線が 1.0 t/m³、破線が 0.0 t/m³ である。ここで地盤のせん断波速度は 500 m/s、単位体積重量は 1.7 t/m³、ポアソン比 0.42、減衰定数 $h=0.03$ とした。なおモデルでは 15 Hz の波動が考慮できるように地盤のメッシュ分割を行った¹⁴⁾。また、解析モデルの固定基礎位置は基礎幅の 2 倍、GL-80 m とする。伝達関数の精度は高振動数領域で幾分悪くなるが経験的には 5~10% 以下

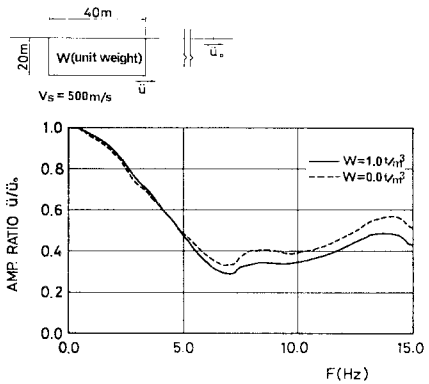


図-4 基礎と地盤 (地表) との伝達関数 (平面ひずみ FEM による基礎の質量効果の検討)

である。また本研究の目的は地震時の入力損失の検討であるので 5. では地動の主要動に着目し SV 波の鉛直入射を基本的に想定する。

図-4 では図-3 と同様に伝達関数における基礎の質量効果の影響は 5 Hz までは小さい。

3. 地震観測結果と常時微動観測結果との比較

入力損失の効果は地震時に観測される現象である。この現象を常時微動観測から検討できるであろうか？ この点を事前検討として図-1 の地下タンクにおいて地震観測装置を用いて常時微動波形を測定し地震観測結果と比較検討した。

地震観測装置により測定された常時微動波形を図-5 に示す。図からはタンクが地盤と比べてほとんど動いていないことがわかる。この波形に対してローパスフィルターを作用させたものが図-6 である。ローパスフィルターの遮断振動数を小さくするとタンクの動きは地盤の動きに近づく。

基礎 (T-6, Y) と地盤 (GL-1 m) との伝達関数の比較結果を図-7 に示す。ここで地震記録には 1980 年 9

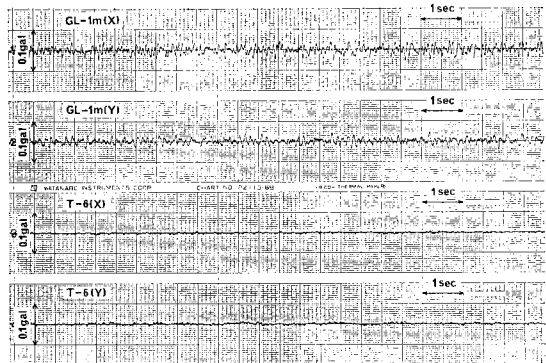
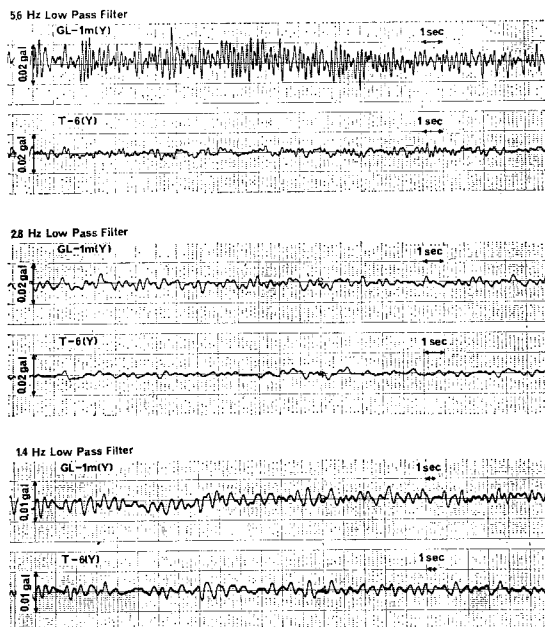
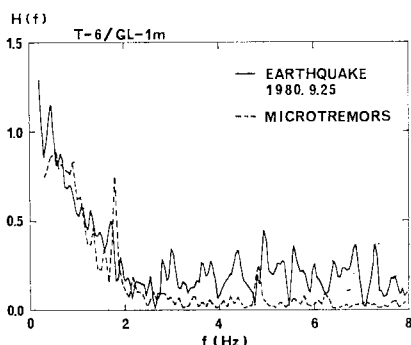


図-5 常時微動測定波形



図—6 ローパスフィルターの出力波形



図—7 地下タンクの基礎/地盤 (GL-1 m) の伝達関数 (地震観測結果と常時微動測定結果との比較)

月 25 日の千葉県中部地震の波形を用いた⁷⁾。最大加速度の比において地震記録は常時微動波形の約 8000 倍である。しかし常時微動の結果でも振動数 0 Hz で振幅比 1.0 から始まり振動数の増加に伴い振幅比が小さくなる。また両者は 2.5 Hz までよく一致している。3 Hz 以上で常時微動結果が地震観測結果よりも振幅比が小さいのは波動のパワーが小さいことによる影響¹⁵⁾および高振動数領域では常時微動の成分である表面波(たとえば Love 波)の高次モードが複雑に励起されるため¹⁶⁾と考えられる。

しかし地震記録による基礎/地盤の伝達関数のうち 2.5 Hz までは (S 波入射を仮定する) FEM 解析により十分シミュレートされること、さらに地震記録と常時微動の結果の差が小さいことからこの領域では常時微動の

波動特性は S 波に近いと考えられる。

4. 常時微動測定結果とその統計解析

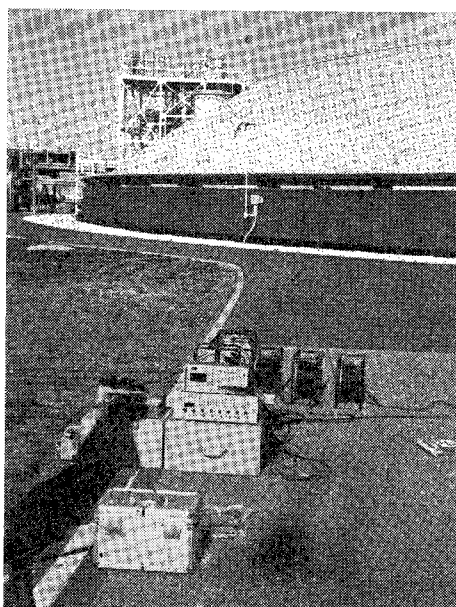
常時微動測定はタンクの側壁上部と周辺地盤の 2 点においてタンク r, θ, z の 3 成分計 6 点の同時観測を行った (以下の検討では θ 方向の結果のみ報告する)。またタンク側壁天端の波形にはタンクの回転動およびねじれ動が含まれるが 2.5 Hz 以下ではこれらの影響は小さいので無視する^{6), 17)}。

タンクと地盤測定点との距離は周辺施設の関係から 20~30 m 程度となった。

測定機器には 1~100 Hz までが感度がフラットで 0.5 Hz で約 0.6 となるサーボ型低域振動計を用いカセットデータレコーダに記録を収めた。また常時微動測定ではノイズ成分の少ない速度記録により計測を行った。データは清水建設 (株) 移動計測室車載の米国 Gen Rad 社のデジタル信号処理モジュールにより解析が行われた。具体的なデータ処理内容は 0.017 秒間隔、データ数 $n=1024$ の FFT を 50 回繰り返しそれらの平均によりパワースペクトル、伝達関数を求めている。

常時微動測定風景を写真—1 に示す。測定を実施したタンクは 図—1 のタンクを含め 18 である (表—1)。構造形式は 図—1 のタンクとほぼ同様である。

常時微動測定の結果より得られたタンク側壁天端/地盤 (地表) の伝達関数を 図—8 および 図—9 に示す。各図には隣接する形状寸法の異なる 2 基の地下タンクの結果を示す。およその形状は 図—8 の直径 D は 68 m,

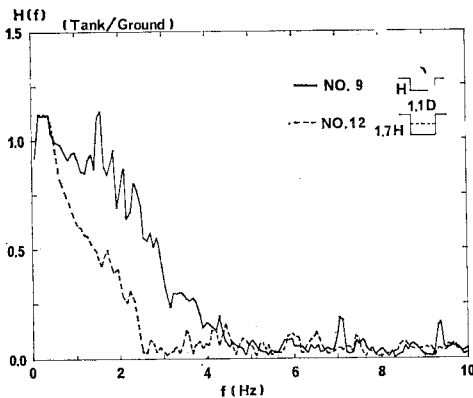


写真—1 常時微動測定風景

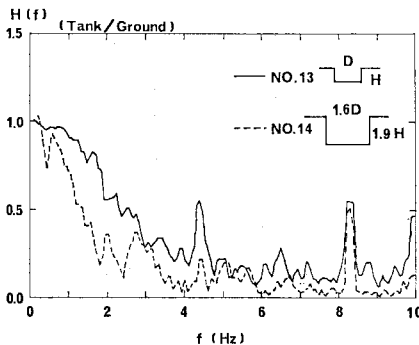
表—1 重回帰分析データ

No.	タンク外径 R (m)	埋込み深さ H (m)	側壁の地盤の せん断波速度 V_s (m/s)	底板下の地盤の せん断波速度 V_s (m/s)	$\tau_{0.5}$
1	67.9	24.5	152	251	0.333
2	67.9	24.5	154	251	0.380
3	67.9	24.5	154	251	0.310
4	67.9	24.5	154	251	0.341
5	69.3	26.0	161	251	0.370
6	69.3	26.0	160	251	0.360
7	64.0	23.3	152	251	0.317
8	64.0	23.3	155	400	0.296
9	67.9	24.5	164	400	0.338
10	68.0	25.1	158	400	0.342
11	69.3	26.0	155	400	0.404
12	73.3	42.6	206	340	0.667
13	32.3	19.8	176	660	0.435
14	52.3	36.6	163	660	0.741
15	65.6	33.3	230	660	0.392
16	65.6	33.3	230	660	0.380
17	68.8	33.8	153	660	0.588
18	68.7	33.8	201	660	0.513

* 参考値



図—8 常時微動測定によるタンク側壁天端と地表との伝達関数



図—9 常時微動測定によるタンク側壁天端と地表との伝達関数

埋込み深さ H は 24.5 m (表—1 の No. 9, No. 12), 図—9 は直径 D は 32 m, 埋込み深さ H は 20 m (表—1 の No. 13, No. 14) であり, 図—8 と 図—9 はまったく独立した地盤の結果である。さらに 図—8 の埋込

み深さの深いタンクは施工中, 底板打設前に測定を行った。

それぞれの図ではタンクの規模が大きくなるとローパスフィルターの効果が強くなる。また 図—8 は直径がほぼ同じで埋込み深さが約 2 倍違うタンクの比較であるが振幅比が 0.5 になる振動数は浅い方で 2.9 Hz, 深い方で 1.4 Hz とその減少の程度もほぼ比例している。

上記の考察は隣接し形状寸法の異なる地下タンクの比較結果であったが他のデータも含め統計解析ができないだろうか? ここでは側壁天端と地盤(地表)との伝達関数の振幅比が 0.5 となる周期 $\tau_{0.5}$ (s) を目的変数としタンクの埋込み深さ (H) および直径 (D) を基礎側面土の平均せん断波速度 (V_s) で除した値 (H/V_s) および (D/V_s) を説明変数として(重) 回帰分析を行った。ここで $\tau_{0.5}$ は入力損失の効果が強くなれば大きくなる。また (H/V_s) および (D/V_s) はそれぞれ埋込み深さおよび直径分の距離をせん断波速度 V_s の波動が伝播するのに要する時間である^{1),3)}。またパラメーターの選択理由は Kausel あるいは原田らが示す円筒形基礎に対する入力損失の効果を表わす数値フィルターのパラメーターに (H/V_s) が用いられていること^{2),4)}、また入力損失の効果と (H/V_s) が正の相関をもつことが実測資料の検討から示されている³⁾ためである。

表—1 のデータを用いた回帰分析の結果を以下に示す⁵⁻¹⁸⁾。

- ・ (H/V_s) のみを説明変数とした場合

$$\tau_{0.5} = 3.62(H/V_s) - 0.178 \dots\dots\dots (1)$$

(ここで相関係数は 0.78 である)

- ・ (H/V_s) と (D/V_s) を説明変数とした場合

$$\tau_{0.5} = 4.42(H/V_s) - 1.02(D/V_s) + 0.084 \dots (2)$$

(ここで重相関係数 0.95 である)

の回帰式が得られた。なお (D/V_s) の算定には基礎側面土の平均せん断波速度のほかに底板下の地盤のせん断波速度を用いたが重相関係数は上記の方がよい結果を与える。

式 (1) と式 (2) では入力損失の効果とタンクの埋込み深さとの間には正の相関があるがタンクの直径とは負の相関になっている。

5. 平面ひずみ FEM および境界積分法による解析

式 (2) の重回帰式における (D/V_s) の係数は負である。これは基礎の幾何学的な寸法が大きくなれば入力損失の効果も大きくなるという予測とは一致しない。この点を平面ひずみ問題として 1 層地盤中の埋設基礎のケーススタディから検討する。なお実際の 3 次元基礎を平面

ひずみモデルで取り扱うことには問題もあるが¹⁹⁾、後者の解析手法は設計解析に多く用いられ、基礎的な特性は検討できる。

検討内容は基礎の埋込み深さによる影響と基礎幅による影響の2点である。また解析手法として平面ひずみ FEM (以下、FLUSH とよぶ)¹³⁾ と境界積分方程式法 (以下、境界積分法とよぶ)^{20), 21)} を用いる。特に境界積分法では SV 波の斜め入射について検討する。

ここで解析モデルは Kausel の考え方に従い基礎を質量のない剛な基礎版としてモデル化し地盤 (地表) の動きと基礎の水平動との伝達関数により入力損失の効果を評価する。

図-10 および 図-11 は FLUSH による解析結果である¹⁴⁾。基礎幅 $d=80\text{m}$ 、埋込み深さ $H=20\text{m}$ 、地盤のせん断波速度は 500m/s (単位体積重量は 1.7t/m^3 、ポアソン比 0.42 、減衰定数 $h=0.03$) を標準モデルとし

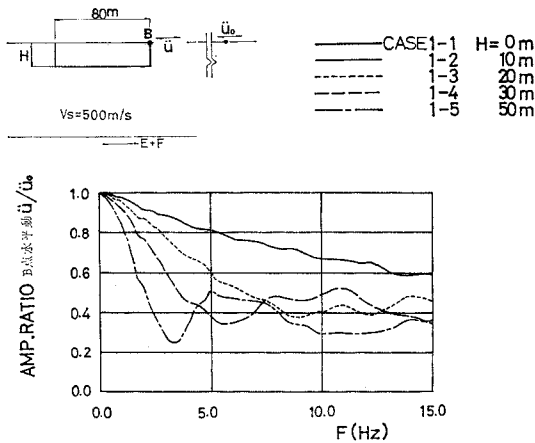


図-10 基礎と地表との伝達関数¹⁴⁾
(平面ひずみ FEM)

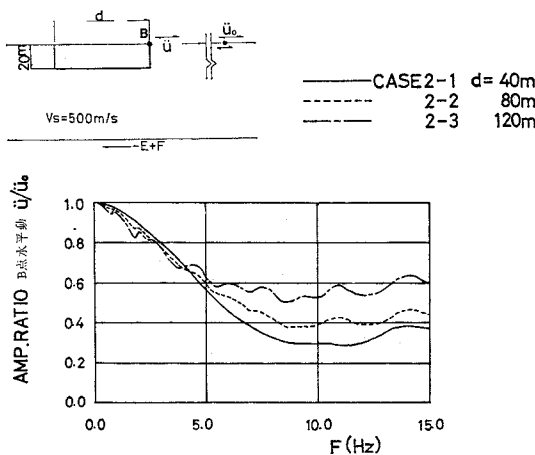
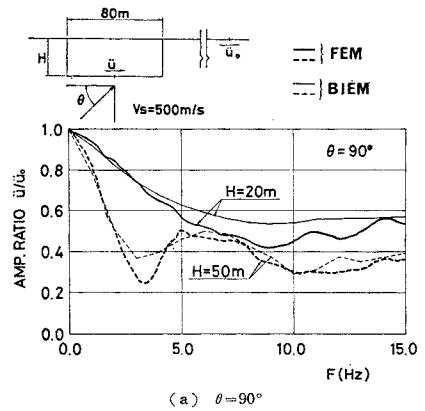


図-11 基礎と地表との伝達関数¹⁴⁾
(平面ひずみ FEM)

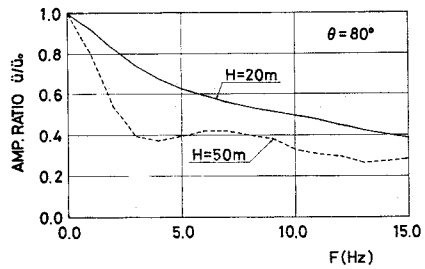
て 図-10 では埋込み深さを $0\sim 50\text{m}$ と変化させた。また 図-11 では埋込み深さを 20m に固定し基礎幅 d を 40m 、 80m 、 120m と変化させた。モデルの設定は 図-4 と同じであるが固定基盤位置は $GL-160\text{m}$ とした。

図-10 では基礎の埋込み深さに比例して入力損失の効果は大きくなる。また $H=0\text{m}$ すなわち地表面に設置された基礎は、解析上地表面が同振幅、同位相で動くため入力損失の効果はない。

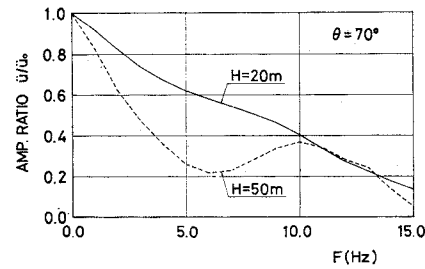
図-11 からは基礎幅が変化しても伝達関数はあまり変化しないが、振幅比が最小となる 10Hz 近辺の振幅比は $d=120\text{m}$ で約 0.5 、 80m で 0.4 、 40m で 0.3 と基礎幅に比例して小さくなる。これは基礎幅が大きくなると底面から入射する同位相、同振幅の地動成分が相対的に多くなるためである。この傾向は式 (2) の傾向と



(a) $\theta = 90^\circ$

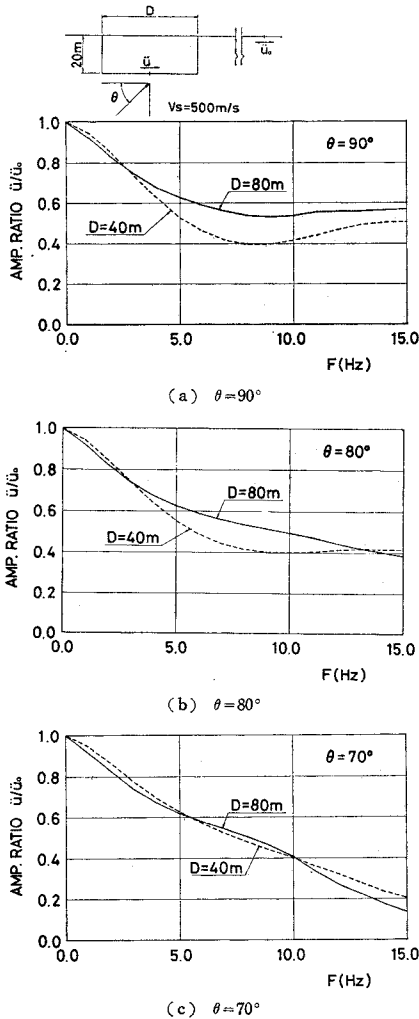


(b) $\theta = 80^\circ$



(c) $\theta = 70^\circ$

図-12 基礎と地表との伝達関数 (境界積分法による SV 波の斜め入射の検討)



図—13 基礎と地表との伝達関数 (境界積分法による SV 波の斜め入射の検討)

一致する。

さらに境界積分法を用いて SV 波の斜め入射の影響を検討する。図—12 では基礎幅 $d=80\text{m}$ 、地盤のせん断波速度 $V_s=500\text{m/s}$ (単位体積重量は 1.7t/m^3 、ポアソン比 0.42 、減衰定数 $h=0.0$) とし、埋込み深さを $H=20\text{m}$ 、 $H=50\text{m}$ とした結果を示す。ここで SV 波の水平面からの入射角は $70^\circ\sim 90^\circ$ とした²³⁾。また解析プログラムの制約上、基礎の代表点を基礎底面中央点とする。入射角 90° の場合には FLUSH 解を比較のために示す。地盤の減衰定数の違いや解析手法の違いにより両者の結果には差があるが、 20m と 50m の結果の相対的な関係に大きな差はなく、入射角を 80° 、 70° と変化させても入力損失の効果への埋込み深さの影響は小さい。

次に埋込み深さを 20m に固定し基礎幅を 40m およ

び 80m とした解析結果を図—13 に示す。地動が斜め入射する場合には水平面内にも地動が位相ずれをもつので基礎側面のほかに基礎底面でも入力損失の効果が生じる。この解析例では入射角 70° のとき基礎幅の違いによる伝達関数の差は見かけ上なくなる。

本解析では SV 波を対象としたが実際の地動の成分波は実体波、表面波が混じり複雑に反射、屈折した散乱波と考えられる。したがって上記の解析結果をそのまま実際の現象と考えることはできないが、埋込みをもつ基礎では式 (2) の傾向を示すこともあり得る。なお参考文献 (20)、(21) では入力波動として SH 波、P 波、Rayleigh 波の場合が検討されている。

6. 結 論

地下タンクの常時微動測定をもとに入力損失効果を検討した。結論は以下のようにまとめられよう。

(1) 測定対象とした地下タンクの質量効果は小さく地下タンクの動きは入力損失の効果によってほぼ決まる。

(2) 入力損失の効果は地震時に観測される現象であるが常時微動測定にも同様の現象がある。

(3) 隣接する形状寸法の異なる地下タンクのタンク側壁天端と地盤 (地表) との伝達関数には形状による明確な差が現われた。

(4) 18 の地下タンクの側壁天端/地盤 (地表) の伝達関数をデータとした重回帰分析の結果では入力損失の効果は基礎の埋込み深さと正の相関をもつが基礎幅とは負の相関をもつ。

(5) 上記の特性を平面ひずみ FEM および境界積分法を用いて検討した。結果として SV 波入射を想定したとき基礎幅が広がると基礎/地盤の伝達関数の振幅比は大きくなり実測結果と同じ傾向となる。これは基礎幅が広がると底面より入射するほぼ同位相、同振幅の地動の成分が相対的に多くなるためである。この傾向は入射角が鉛直より $5^\circ\sim 15^\circ$ になっても変わらない。

(6) なお本解析では SV 波を対象としたが実際の地動の成分波は実体波、表面波が混じり、また複雑な散乱波と考えられる。したがって入射波動を変えた場合、また解析を 3 次元モデルにした場合などについて今後検討する必要がある。

(7) また、回帰分析のデータ数は 18 と少ないことからデータ数を増やすとともに形状寸法の違うデータを集める必要がある。

謝 辞: この研究をまとめるにあたっては東京ガス (株)、清水建設 (株) 土木開発部の皆様のご協力をい

ただいた。また、常時微動測定には東京測振(株)ならびに清水建設(株)大崎研究室 赤尾嘉彦君の協力を得ている。清水建設(株)研究所 塩谷清人研究員からは常時微動測定が入力損失効果の研究に生かせるのではないかという貴重なアイデアをいただいた。また境界積分法プログラムは清水建設(株)大崎研究室 三田 彰君より提供いただき使用した。ここに記して感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失，日本建築学会論文報告集，No. 165, 1969, No. 167, 1970.
- 2) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄：地震波の有効入力の考え方と実測例による検討，土木学会第15回地震工学研究発表会講演集，1979.
- 3) 石井 清：実測資料に基づく地震波の入力損失フィルターの提案，清水建設研究所報，第33号，1980-10.
- 4) Kausel, E., R.V. Whitman, F. Elsassee and J.P. Morray: Dynamic Analysis of Embedded Structures, Proc. of 4th Structural Mechanics of Reactor Technology K 2/6, 1977.
- 5) Luco, J.E. "Seismic Safety Margins Research Program (Phase I), Linear Soil-Structure Interaction", UCRL-15272, PASA # 7249809, Lawrence Livermore Laboratory, 1980.
- 6) 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，第312号，1982-2.
- 7) 石井 清・山原 浩・小山和夫：強震記録に基づく地盤の振動特性と地動の基礎への入力特性の検討，土木学会論文報告集(ノート)，第328号，1982-12.
- 8) 星谷 勝・石井 清：RC 4階建校舎の実測データに基づく入力損失効果の検討，土木学会論文報告集，第327号，1982-11.
- 9) Hoshiya, M. and K. Ishii: Evaluation of Kinematic Interaction of Soil-Foundation Systems by a Stochastic Model, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 3, 1983.
- 10) 石井 清・小山和夫・赤尾嘉彦：常時微動測定による入力損失の効果の検討，土木学会第36回年次学術講演会概要集，I，1981-9.
- 11) 石井 清・小山和夫：地下タンクの常時微動測定による入力損失効果の検討，土木学会第9回関東支部年次研究発表会概要集，1982-1.
- 12) 竹脇尚信・倉橋君夫・中松 新・石井 清：地下タンクの地震応答解析と地震観測，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，1978-11.
- 13) Lysmer, J., T. Udaka, C-F. Tsai and H.B. Seed: FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EE-RC 75-30, Berkley, California, 1975.
- 14) 田中宏志・吉田 一・山原 浩・平島新一・石井 清：FEMを用いたパラメータスタディによる入力損失効果の定量的評価，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，1982-12.
- 15) 山原 浩：エネルギーの平衡を考えた構造物の地震応答，日本建築学会論文報告集，No. 187, 1971.
- 16) 堀家正則：微動の位相速度の測定，地震，第2輯，第34巻，1981.
- 17) 石井 清・井口道雄・広瀬利光：実測資料に基づく対称構造物の振れ振動の研究，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，1982-12.
- 18) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正：多変量解析法，II. 重回帰分析法，pp. 25~152, 日科技連，1974.
- 19) Luco, J.E. and A.H. Hadjian: Two-Dimensional Approximations to the Three-Dimensional Soil-Structure Interaction Problem, Nuclear Engineering and Design, Vol. 31, 1974.
- 20) 小堀鐸二・篠崎祐三・三田 彰：境界積分方程式法による根入れ基礎と地盤との動的相互作用の解析，昭和57年度日本建築学会関東支部研究報告集，1982.
- 21) Kobori, T., Y. Shinozaki and A. Mita: Soil-Structure Interaction Analysis of Embedded Structure by Boundary Integral Equation Method, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集，1982-12.
- 22) 金井 清・小堀鐸二・蛭田捨太郎：建築学大系，11 地震，振動学，5.2 地震波の反射，屈折，pp. 61~62, 彰国社，1963.

(1983.1.19・受付)