

軟弱地盤における地盤とタンクの地震観測

横田 治彦
市之瀬 紘一
塩谷 清人

§ 1. はじめに

軟弱地盤に建設される構造物の動的解析を行なう際には、基礎を含めた構造物をモデル化するとともに、構造物の影響を受けない地盤をモデル化し、2つの振動系を地盤のばねで結ぶことによって連成したモデルがしばしば用いられる。このように単純化したモデルを用いた解析は近似解法ではあるが、構造物全体の振動性状を把握するには十分有効である。しかし、実際の計算に当て地盤の定数の決定、入力地震波の考え方、減衰の考え方、地盤と構造物の相互作用の評価、モデル化の適否等多数の問題点がある。そこで、これらの問題を実験的に究明するために、軟弱地盤と地上タンクの地震観測を行なった。

地震観測に先立って、周辺地盤の土質調査、P S速度検層、常時微動観測を行ない、これらの結果と地震観測の結果を比較検討した。

§ 2. 観測地盤およびタンクの概要

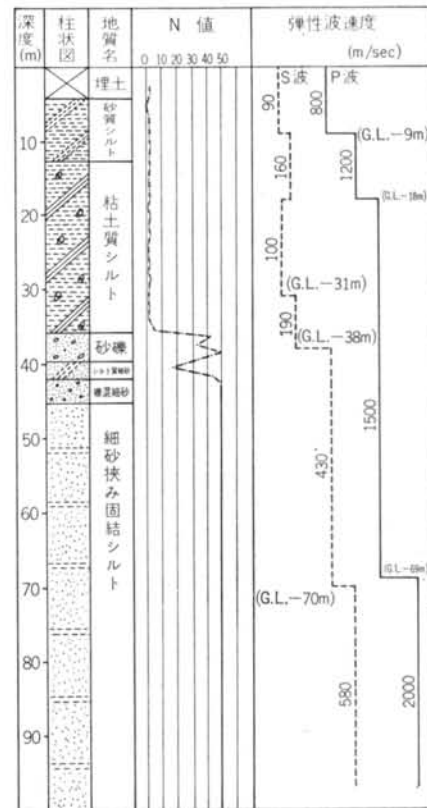
地震観測を行なった敷地は、東京都江東区深川豊洲の埋立地に位置している。土質柱状図および弾性波速度の測定結果を図一1に示す。豊洲の地盤は表層が層厚約35mの砂質シルトおよび粘土質シルトから成る軟弱な沖積層で、N値は0から4である。G.L.-35mから-45mに東京礫層と呼ばれる砂礫層が存在し、N値は50以上である。さらに、G.L.-45m以深は三浦層と呼ばれる比較的均一な固結シルトの層が続いている。P S速度検層の結果も、土質柱状図と良い対応を示しており、表層の平均S波速度は118m/secと遅く、砂礫層からはG.L.-70mまでが430m/sec、それ以深が580m/secとなっている。

観測の対象となる地上タンクは、外径約32m、高さ約25mの円筒形タンクで、長さ約40mの鋼管ぐいを砂礫層

まで打設した杭基礎構造である。

§ 3. 常時微動測定

地盤および構造物は、地震以外にも交通機関、工場の機械振動、風等の外乱によってわずかに振動している。これらの外乱は、比較的幅の広い周波数成分を有しており、それが地盤や構造物等の振動系に入射することによって、その振動系に固有の周波数成分が増幅される。し



図一1 土質柱状図と弾性波速度

たがって、地盤および構造物の常時微動を観測し、その波形を周波数分析することによって振動性状の一部を知ることができる。

豊洲の地盤およびタンクの常時微動を測定するにあたり、タンクの固有周期は内容液の液位によって変化すると考えられるため、液位約3mと約12mの2つの場合について測定した。測定点は図-2に示すように、タンクから約30m離れた地面上とタンクの頂部と基礎床版上の3点とし、水平2方向と上下方向の3成分について測定した。

観測波形はコンピュータによって波形処理される。周波数分析の方法としてパワースペクトル解析およびフーリエスペクトル解析を行なった。本報告書ではパワースペクトル密度によって表示している。

図-3に解析結果の一例として地表と液位12m時におけるタンク頂部の水平成分のパワースペクトルを示す。



図-2 常時微動の測定位置

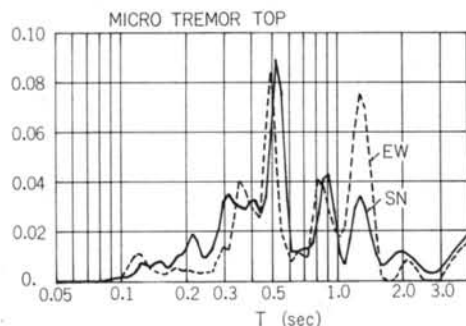
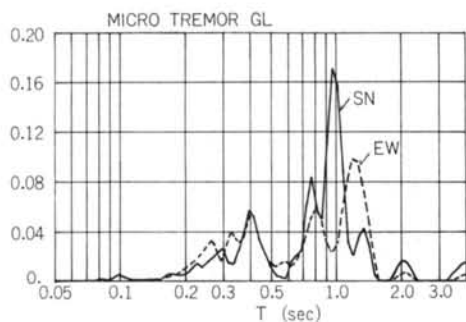


図-3 地表とタンク頂部（液位12m）の常時微動のパワースペクトル

地表のスペクトルは比較的単純な形をしており、卓越周期は1.0から1.2秒付近と、0.8秒、0.4秒にある。1.0秒から1.2秒が地盤系の1次固有周期と考えられる。液位12mのタンクのパワースペクトルには、0.5秒に顕著なピークがあり、これがタンクの固有周期と考えられる。その他のピークは地盤の卓越周期に一致している。液位3mのタンクの固有周期は約0.4秒にあることがわかった。

§ 4. 地震観測

4.1 地震観測概要

地震計の設置にあたって、観測目的に応じて設置位置を決定した。第一に敷地内の構造物の影響を受けないと思われる自由地盤の地震時挙動を観測する目的で、タンクから約40m離れた地点にG. L. -71m, -38m, -18m, -2mの4点（水平2成分）の地中地震計を埋設した。第二に構造物と地盤の動的相互作用を調べる目的で、支持杭にできるだけ近づいた地点に、G. L. -39m, -18m, -2mの3点（水平2成分）の地中地震計を埋設した。第三にタンク本体の地震応答を観測する目的で頂部と基礎床版上に水平2成分の地震計と基礎床版上に4点の上下成分の地震計を設置した。

合計22成分の地震計は、すべて振子の固有振動数が5Hzのサーボ型加速度計で、0.5Hzから35Hzまでの周波数領域でフラットな特性をもっている。

図-4に地震計設置位置の平面図、図-5に断面図を示す。地中地震計の埋設位置は、おのおのS波速度が変化する深さに対応している。

図-6に地震観測に使用した測定器のブロックダイアグラムを示す。

4.2 観測結果

昭和48年8月23日から昭和49年3月末日までに観測された、東京が震度2以上の地震の一覧を表-1に示し、図-7にそれらの地震の震央分布を示す。約7カ月の期間中に震度4が1度、震度3が2度、震度2が6度記録された。記録地震波のうち、加速度が大きなもの5例について解析しその結果を述べる。以下にそれらの地震の特徴を述べる。

昭和48年8月24日、栃木県中部の地震は関東地方に起こる地震としては深さ100kmと深かったことと、震央までの距離が約100kmと比較的近かったために、直下地震のように上下動が強く感じられた地震である。地表の最

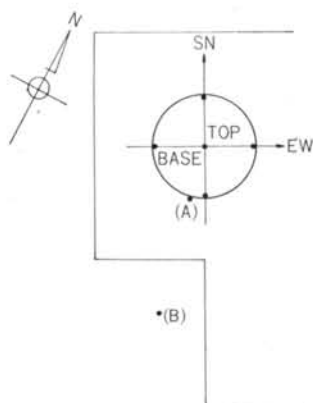


図-4 地震計設置位置平面図

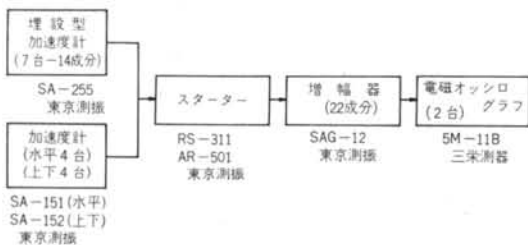


図-6 地震観測ブロックダイアグラム

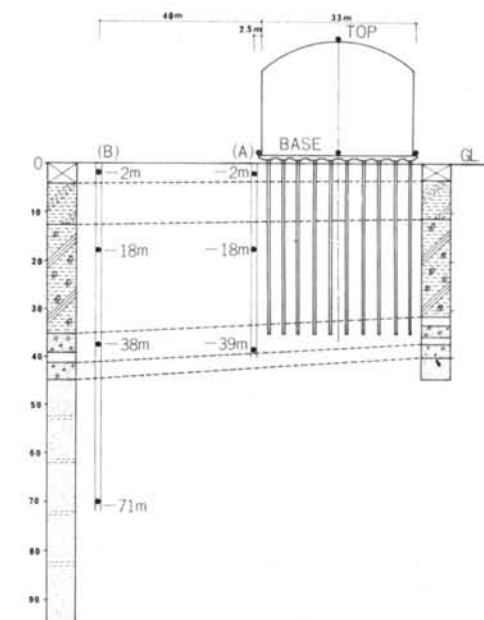


図-5 地震計設置位置断面図



図-7 観測地震の震央分布

No.	発震時	震央位置	深さ (km)	規模	東京震度	タンク液位 (m)
1	昭和48年 8月24日 (04:16)	栃木県中部 (36.5°N, 139.8°E)	110	稍顯著	II	10.484
2	昭和48年 8月24日 (08:50)	福島県沖 (37.4°N, 142.4°E)	40	顯著 (M:6.2)	II	10.484
3	昭和48年 9月29日 (09:45)	ウラジオストック 付近 (42.5°N, 131.0°E)	500	顯著	III	14.080
4	昭和48年 10月1日 (23:16)	銚子付近 (35.7°N, 140.7°E)	20	顯著	III	14.027
5	昭和48年 11月19日 (22:02)	宮城県沖 (38.8°N, 142.2°E)	20	顯著	II	12.550
6	昭和48年 12月22日 (10:20)	千葉県中部 (35.2°N, 140.1°E)	70	稍顯著	II	6.947
7	昭和48年 12月27日 (05:30)	八丈島近海 (33.8°N, 140.7°E)	40	顯著	II	12.882
8	昭和49年 2月22日 (09:37)	東海道はるか沖 (33.2°N, 136.2°E)	400	顯著	II	8.440
9	昭和49年 3月3日 (13:50)	千葉県東方沖 (35.6°N, 140.8°E)	40	顯著	IV	7.265

表-1 観測地震一覧表

(昭和49年3月末日現在, 東京震度II以上)

大加速度は 6.6 gal であった。

昭和48年9月29日、ウラジオストック付近の地震は、震源が非常に遠かったために、初期微動の継続時間が長く、主要動との区別がはっきりしない地震であった。主要動はS-N方向のみ記録されており、地表の最大加速度は 5.9 gal であった。

昭和48年10月1日、銚子付近の地震は栃木県中部の地震と震央までの距離はほぼ同じであるが、深さは20kmと浅い。比較的周期の長い震動を感じた地震で、地表の最大加速度は 9.3 gal であった。

昭和48年12月22日、千葉県中部の地震は、栃木県中部の地震と震央距離、深さ、規模等が類似した地震で、かなり衝撃的な地震であった。地表の最大加速度 12.7 gal と今回解析した地震中最も大きかった。

昭和49年3月3日、千葉県東方沖の地震は観測期間中唯一の震度4を記録した地震で、継続時間が長かったため、解析に当たって約75秒間の記録をデジタル化した。地表の最大加速度は 12.0 gal であった。

解析した5つの地震波のうち、ウラジオストックの地震を除いた4つの地震は、それぞれ東京から約100kmの距離に分布しているが、深さは20kmから110kmと異なっている。

観測地震波の一例として、図-8および図-9に1973年10月1日銚子付近の地震のS-N成分の記録波形を示す。また、観測地震波のパワースペクトルを図-10、図-11、図-12に示す。

これらの観測結果から観察できる事項について以下に述べる。

地盤の震動について、A B 2地点の記録を比較する。G. L. -38 m (B) と G. L. -39 m (A) の2地点の観測波形は、位相、振幅ともに地震の継続時間にわたってよく一致する。すなわち、東京礫層の深さでは、40 m 離れた2地点の震動はほぼ同一であることがわかる。G. L. -18 m (B) と G. L. -18 m (A) の波形も互いによく類似した波形であるが、主要動が過ぎて後半になると多少異なった様相を示す傾向にある。G. L. -2 m (B) と G. L. -2 m (A) の波形は位相、振幅ともに多少異なっている。とくに地震後半ではその傾向が強い。A地点の地表の記録はタンクの振動の影響を受けていると考えられ、また表層地盤の局所的な相異および表面波等の影響も考えられる。

タンクの頂部と基礎床版の水平動の観測波形を比較すると、振幅は頂部の方が約30%大きいが、波形は非常に良く類似しており、位相差もない。これは、タンクの剛性が高く、ほぼ剛体として振動していることを示してい

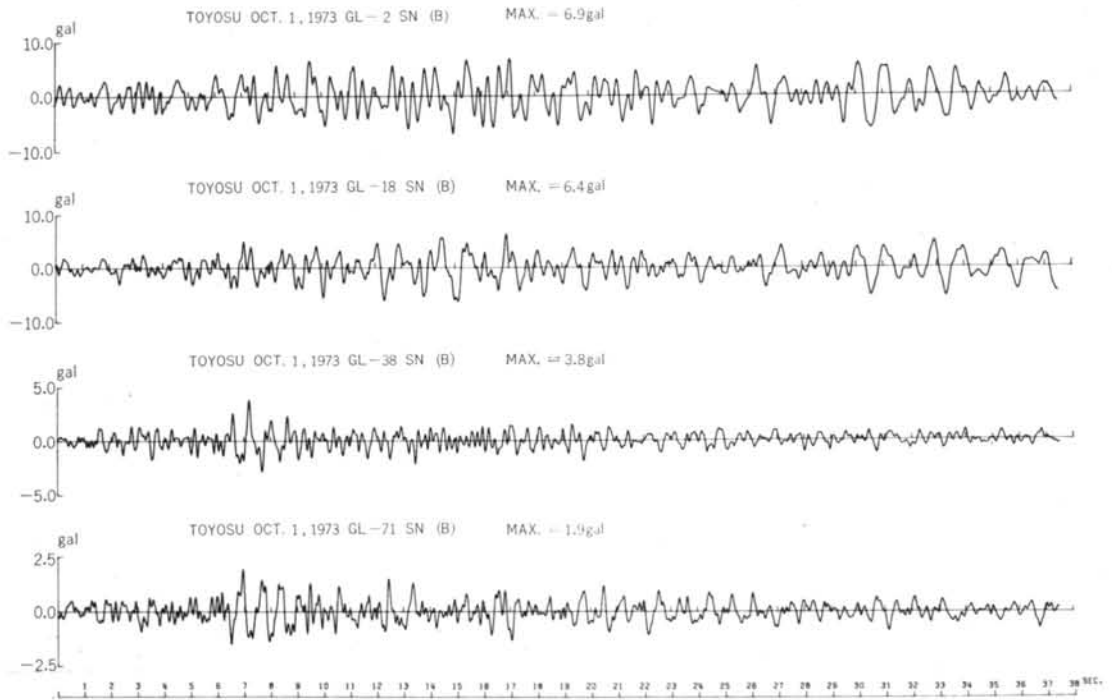


図-8 観測地震波

る。図-13に示すように、タンク基礎における両端の上下動記録を比較すると、周期0.3秒から0.5秒程度の振動に対しては、位相が逆になっていることがわかる。この時の頂部の水平動の位相と上下動の位相が一致することから、タンクがロッキング振動をしていることを示していると考えられる。

各観測地震波について、各観測点の最大加速度分布を求め図-14に示す。ここではG. L. -71mの最大加速度によって規準化し、最大加速度の比として示してある。

図中カッコ内の数字は5つの地震の平均値である。加速度の最大値は、深度が浅くなるにつれて比例的に大きくなっている。G. L. -71mからG. L. -38mに至るまでに約2倍になり、G. L. -38mから地表に至るまでに約2.4倍に増幅されている。さらに、タンクの基礎と頂部の間で約1.3倍に増幅されている。タンクの基礎と頂部の間の最大加速度比は、短周期の卓越した地震（8月24日、12月22日）ほど大きくなる傾向がある。これはタンクの1次固有周期が、0.4秒から0.5秒にあるので、タン

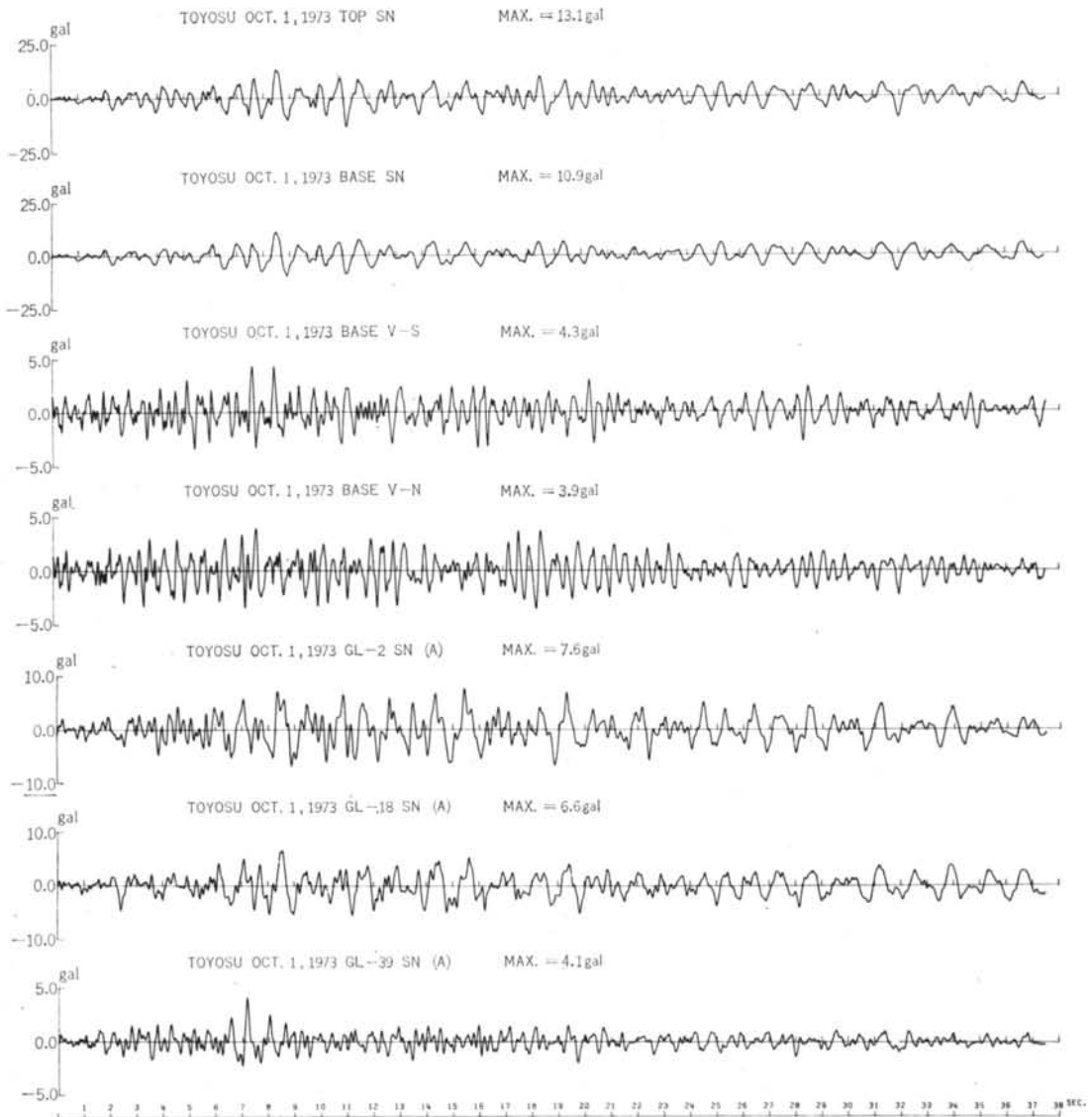
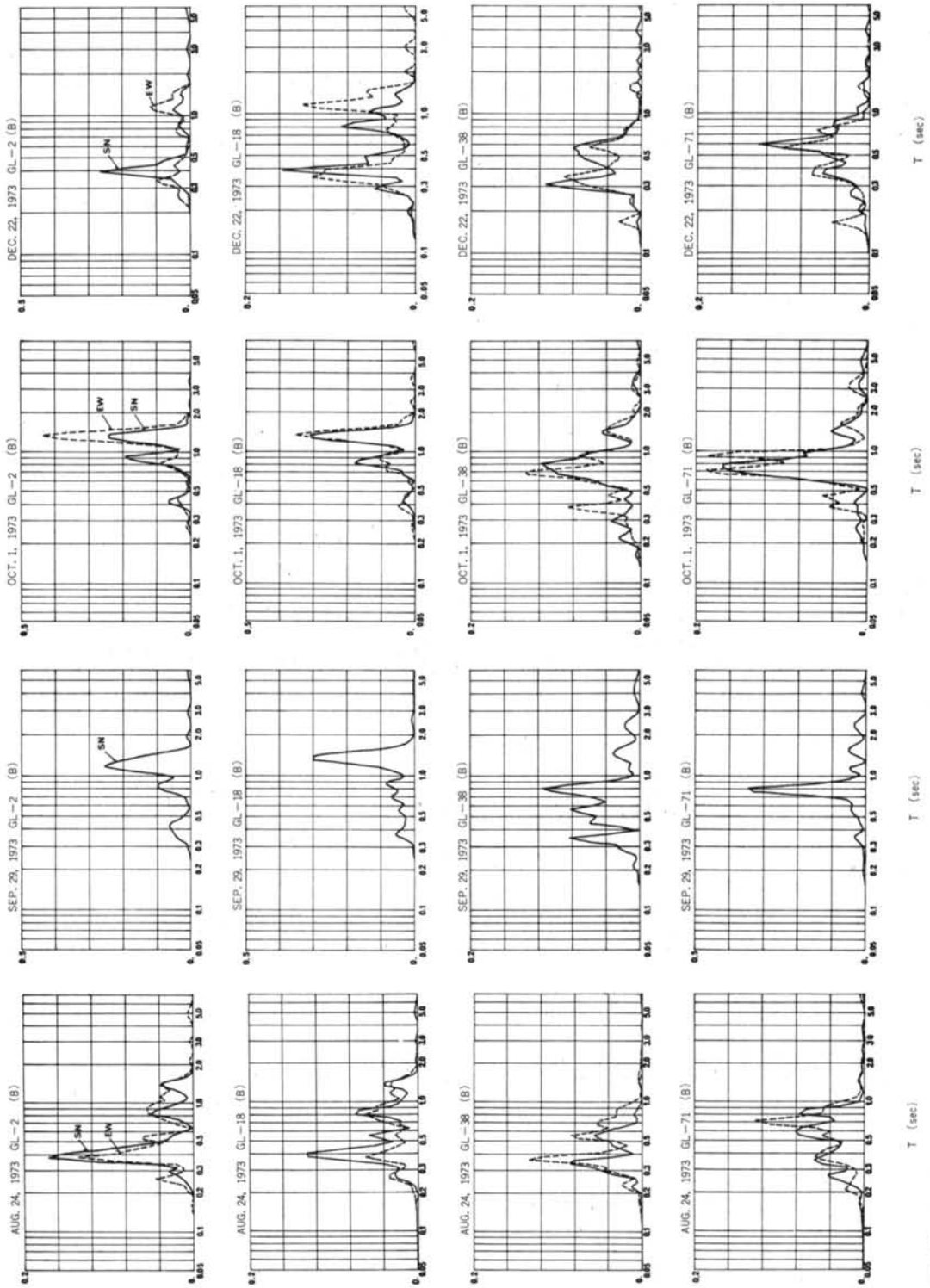


図-9 観測地震波



図一10 観測波のパワースペクトル

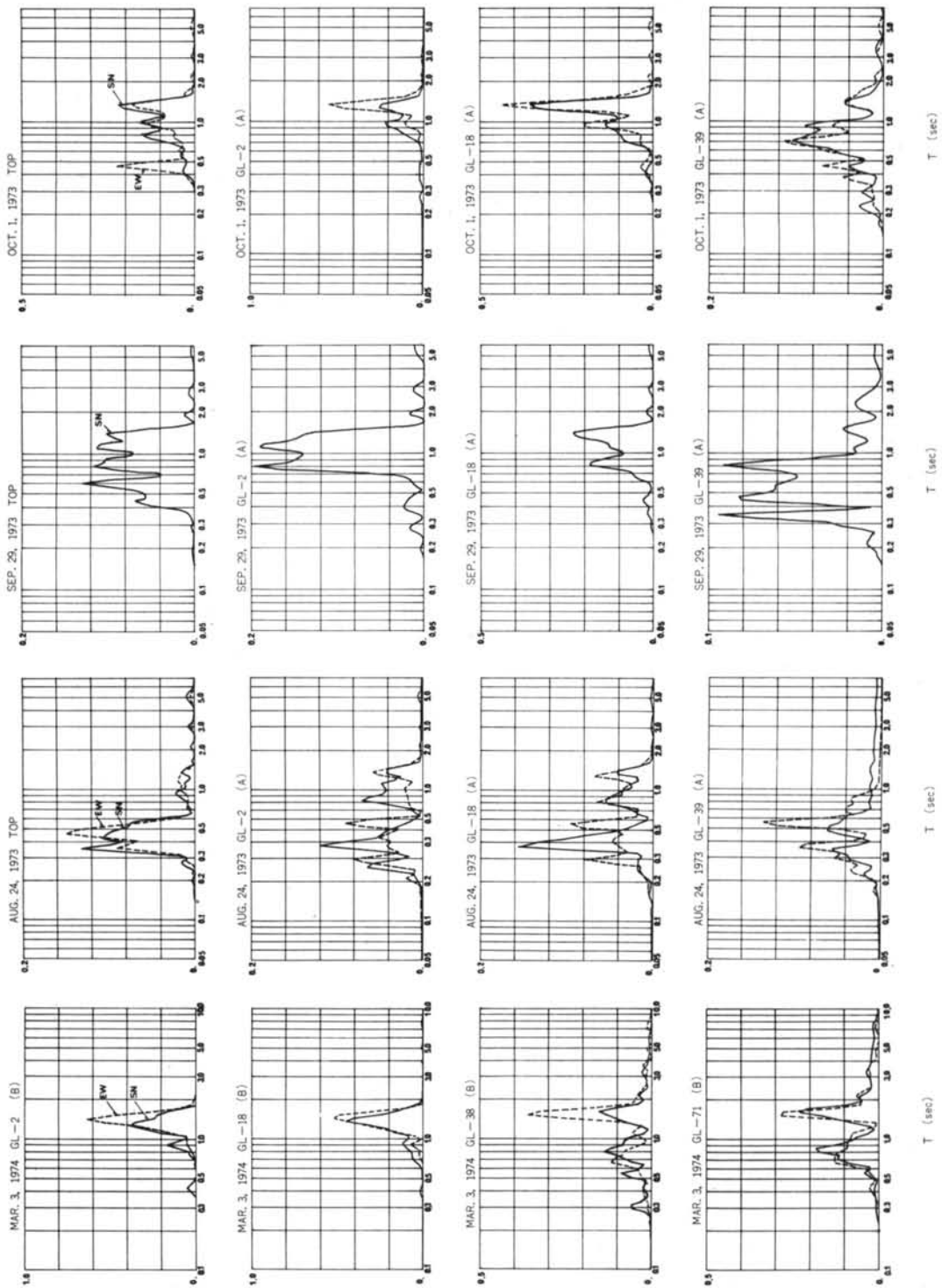


図-11 観測波のパワースペクトル

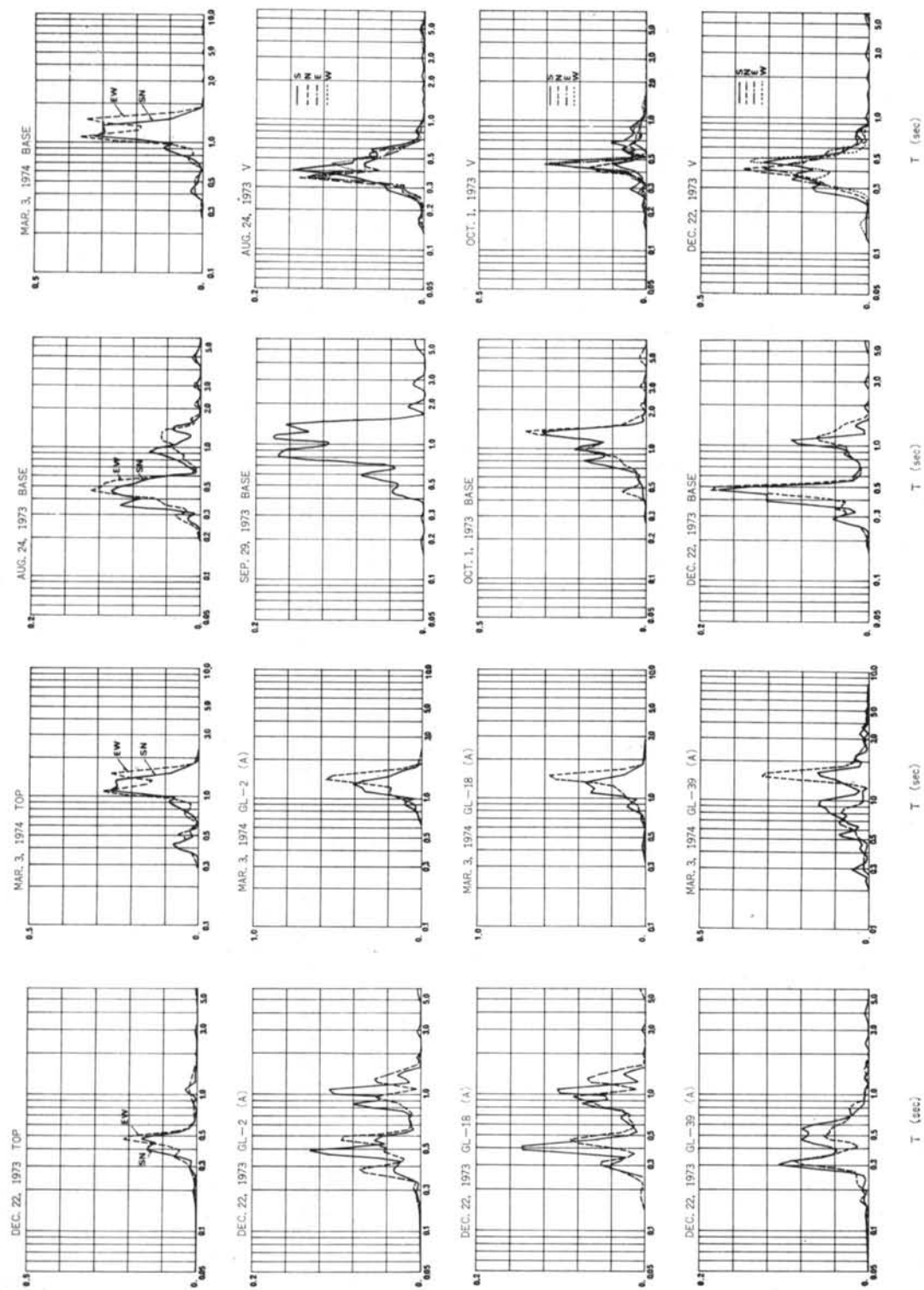


図-12 観測波のパワースペクトル

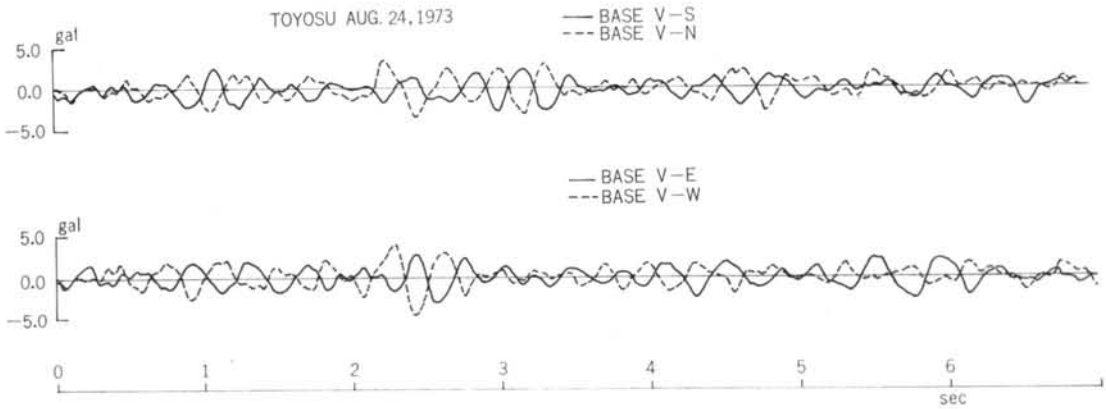


図-13 タンク両端の上下動記録の一例

クのロッキングの影響があらわれ、増幅されるためと考えられる。

パワースペクトル解析の結果について以下に述べる。各地震波の方向性を調べるために、S-N方向とE-W方向のスペクトルを重ねて示してあるが、各記録とも卓越周期のピークは比較的良好一致しており、方向性はあまりないことがわかる。

G. L. -71 mの各観測波形を比較すると、8月24日と12月22日の地震には0.5秒以下の周波数成分が含まれており比較的に広い周波数範囲にわたっているが、他の3地震は0.6秒から1秒の周期が卓越しており、さらに、3月3日の地震では1.5秒から1.6秒の成分が卓越している。これらのスペクトル特性の相違は、入力地震波の特性の相違によると考えられ、地震の震源位置、発震機構、伝播径路の違いによるものと思われる。

AB両地点の、同深度の記録のスペクトルを比較すると、G. L. -38 m(B)とG. L. -39 m(A)のスペクトルは良く一致しているが、-18 m、-2 mと浅くなるにしたがってやや異なる傾向が見られる。

これは前にも述べたように、タンクの振動の影響(地盤と構造物の動的相互作用)を受けることと、表面波の影響などが原因として考えられる。しかし、各深さのAB点の卓越周期は対応しているようである。

自由地表面(G. L. -2 m(B))における各地震のパワースペクトルと地表の常時微動のスペクトルを比較しよう。各地震とも、0.37秒から0.43秒、0.81秒から0.93秒、1.32秒から1.36秒に3つの明確なピークを持っている。これらのピークは、地表の常時微動の卓越周期の約0.4秒、約0.8秒、約1.2秒と良く対応している。常時微動の1.2秒が地震時には1.35秒と多少長くなっているが、これは、地震時と常時微動の振動レベルの相違によるもので、地盤の非線型性に起因していると考えられ

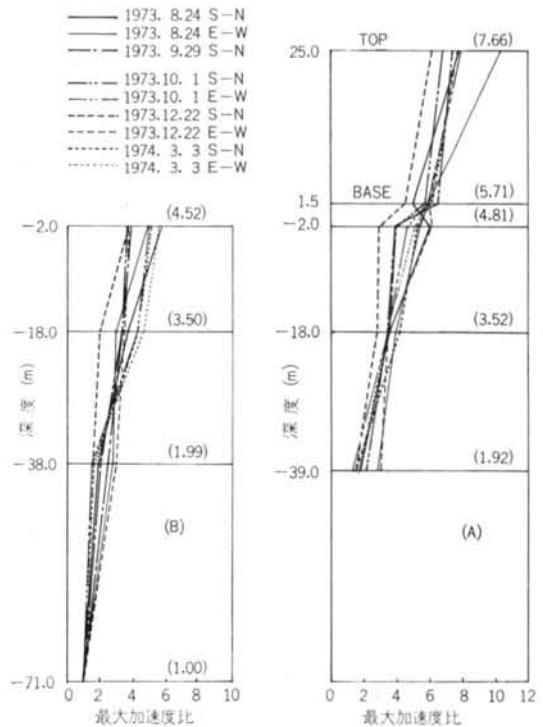


図-14 最大加速度分布(G. L. -71 mで標準化)

る。大地震時には、さらに周期がのびることが予想されるが、観測された範囲の規模の地震では明確にあらわれていない。

地表の記録のパワースペクトルを見ると、周期0.4秒付近が卓越する地震と、1.3秒付近が卓越する地震の2つの場合があることがわかる。8月24日および12月22日の地震では、G. L. -71 mの観測波の中に短周期成分が多く含まれており、それが表層の2次周期付近で大きく増幅されて地表にあらわれている。他の3地震では、入力波の中に比較的周期の長い成分が含まれていて、それ

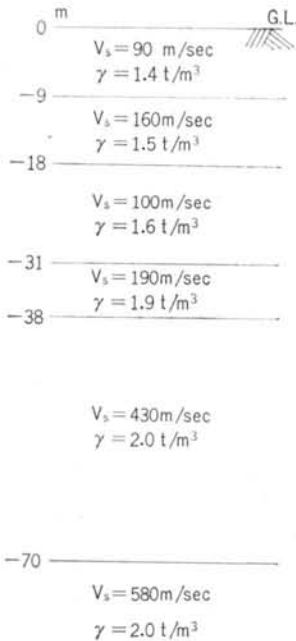
が表層の1次周期を大きく刺激して増幅されていると考えられる。

タンクの地震時挙動を知るために、頂部のパワースペクトルを調べると、8月24日および12月22日の両地震においては、0.4秒から0.5秒に卓越したピークがあるが、他の3地震については1.3秒付近に大きなピークがある。これは、タンクの固有周期が0.4秒から0.5秒にあるため、短周期の卓越する地震では、タンクの固有周期の成分が増幅されるためである。しかし、1秒以上の周期が卓越する地震では、タンクの周期と離れているために、タンクは地盤と同じような動きをしている。タンク床版端部の上下動のスペクトルを見ると、0.4秒から0.5秒に卓越周期があり、タンクの固有周期と一致している。これは、床版端部で観測される上下動には、タンクのロッキング成分が多く含まれているためと思われる。

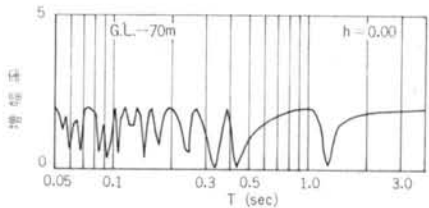
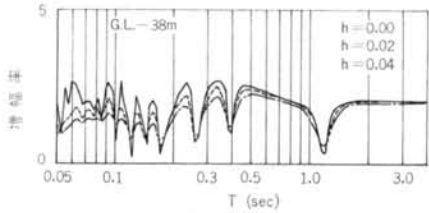
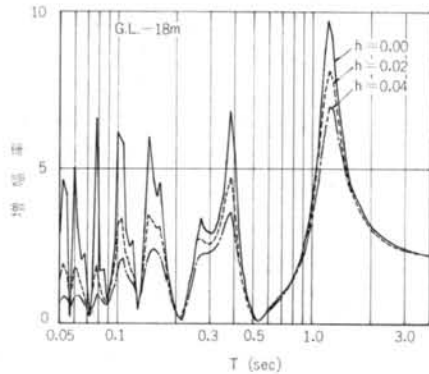
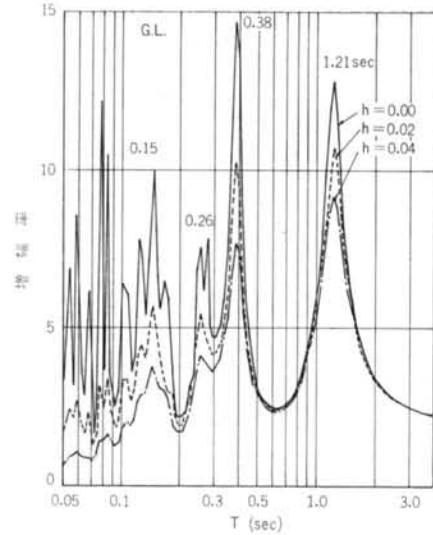
§ 5. 解析による地盤の動特性

観測地盤を多層の成層地盤と仮定し、S波の重複反射の理論を用いて地中各点の伝達関数を求めた。

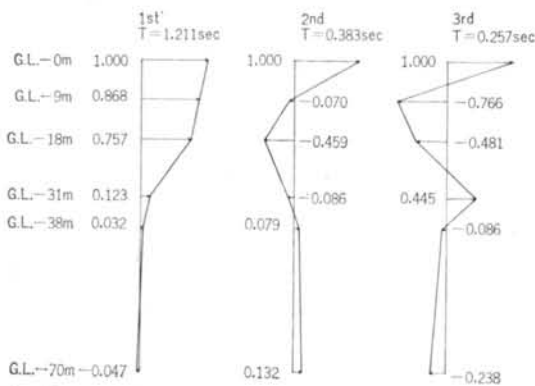
図一15に示すような多層地盤にモデル化し、各層のS波速度(V_s)および地盤の単位体積重量(γ)を実験結果より定めた。G.L. -70mの境界に下方から単位振幅をもった正弦波が、定常状態で入射する場合の各点の応



図一15 地盤の解析モデル



図一16 地中各点の増幅率



図一七 地盤の振動モード（計算結果）

答振幅を求める。重複反射を用いた計算では、最下層からさらに下方へ逸散する波動による逸散減衰が考慮されている。計算にあたって、さらに地盤の内部減衰をも考慮した場合の伝達関数も求めた。地盤の減衰定数は振動数に無関係に一定とし、2%と4%の場合について計算した。計算にあたって伝達マトリクス法を用いた。

図一六に計算結果のうち地震計設置深さに対応する地点の増幅率を示す。地表面における計算結果を見ると、内部減衰を考慮しない場合には、短周期成分の増幅率が大きくなっているが、減衰を考慮すると大幅に減少することがわかる。計算結果による地盤の固有周期は、1次1.21秒、2次0.38秒、3次0.26秒となり、常時微動観測結果および地震観測結果とよく対応している。G.L.-18mの計算結果は、地表の結果と良く似た形となっている。G.L.-38mでは、鋭いピークはなくなり、なだらかな形となるが、地表でのピークに対応する周期は谷となっている。図一七に各次の固有振動に対するモードを示す。図は地表の振幅を1として規準化している。

以上の解析結果および常時微動測定、地震観測の結果を比較し以下に述べる。

地表の増幅率の計算結果のうち、地盤の内部減衰を考慮した場合、常時微動のパワースペクトルは、卓越周期、形ともに良く似ている。これを地震観測の地表のパワースペクトルと比較すると、1.2秒から1.3秒のピークと0.4秒のピークは対応する。しかし、地震観測では0.8秒付近にもピークを持つことが多いのに比較して、計算結果ではこのピークはあらわれない。

G.L.-38mの計算結果と、地震観測結果を比較すると、どちらも0.4秒付近が谷となっている点では類似している。しかし、観測結果では0.2秒以下と2秒以上の成分はほとんどあらわれない。

表層の振動性状は、G.L.-38mより浅い部分の特性

が支配的で、地表において観測される地震動にはこの層の特性が明確にあらわれている。

§ 6. まとめ

常時微動測定、地震観測の結果および重複反射モデルを用いた地盤の動特性の検討から、厚い軟弱地盤は明確なフィルター特性、増幅特性をもっており、地表で観測される地震波は表層の特性を大きく反映している。また、今回観測された中小地震、常時微動の規模では、観測波のスペクトル特性と重複反射モデルの伝達特性は比較的良好に対応しており、このようなモデルを用いた解析が有効であることがわかる。

G.L.-70mの観測結果によれば、地震によってかなり異なった卓越周期を有しており、この深さにおいては入力地震波をWhite Noiseのような広い周波数をもった波動と考えることはできない。

層の厚い軟弱地盤に支持杭を打った構造物の動的解析をする際には、地震の入力基盤をどこに想定するかが問題となるが、解析モデルの関係から一般的には、杭の支持層を基盤に仮定することが多い。しかし、厚い軟弱地盤では、入力地震波の選び方によって、地表の応答が大幅に異なることが考えられるため慎重さが必要である。

40m離れた2点の地震記録を比較すると、G.L.-38mでは2つの波形はほとんど一致するが、地表に近づくにしたがって相違があらわれる。これはタンクの極く近傍の地盤は、構造物との動的相互作用の影響等を受けるためと思われる。タンクはほぼ剛体として振動し、タンクの固有周期付近では、ロッキングをしていることがわかった。

本報告の地震観測は、最大震度4までの中小地震であるが、さらに大きな地震の観測および解析、地盤のストレイレベルの相違の影響、地震の震源および規模と地震波の関係等、今後の課題と考えている。

謝辞

本地震観測は東京瓦斯株式会社の依頼により、当社のプロジェクトの一環として行われたものである。観測の計画および運営全般にわたり、東京瓦斯の本社工務部および豊洲工場の関係各位の積極的な協力がありました。また、当社土木技術部、土木設計部、土木部の関係者の努力がありました。ここに謹んで謝意を表す次第であります。

なお、実験の計画、解析等にあたり山原浩主任研究員

の助言と、また地震波の電算処理にあたって研究所の広瀬道孝氏、渡辺弘之氏、保田育子氏の協力に心から謝意を表します。