

## (24) 千葉実験所における地震動観測

### — その5 自由地盤の伝達特性について —

東京大学大学院 鹿 林  
東京大学生産技術研究所 山崎 文雄  
東京大学生産技術研究所 片山 恒雄

#### 1. はじめに

本報では、東京大学生産技術研究所千葉実験所において観測された地中加速度記録に基づいて、同地点における地盤の地震波動伝達特性を検討する。観測地区の地盤は、既応のボーリング資料<sup>1)</sup>よりほぼ成層均質であることが判っているので、ここではまず基本的な鉛直方向へのせん断波の伝達特性に着目することにする。観測記録としては、これまでに得られたものの中では最大の千葉県東方沖地震(1987年12月17日)の本震と、同日の3時間後に発生した余震のものを用いる。まず記録に基づいて、地表近くの観測点と地中の観測点との伝達関数を計算する。次に地盤の非線形モデルを設定し、等価線形化法および履歴形非線形モデルによる応答解析を行い、この解析結果と記録による伝達特性とを比較検討する。

#### 2. 観測記録に基づく伝達特性

千葉県東方沖地震の本震時に、高密度アレーの中心にある観測孔C0において得られたNS成分の加速度波形を図-1に、また同様に余震時に得られたものを図-2に示す。なおこれらの波形は、前報(その4)による加速度計の方位補正を行った後のものである。これらの記録波形を用いて、計算した伝達関数(システム関数)を図-3、4に示す。ここでは入力過程 $x(t)$ と出力過程 $y(t)$ の伝達関数 $H(\omega)$ は、 $\overline{S_{xx}}$ を平滑化したパワースペクトル、 $\overline{S_{xy}}$ を平滑化したクロススペクトルとして、 $H(\omega) = \overline{S_{xy}(\omega)} / \overline{S_{xx}(\omega)}$ によって定義し、平滑化にはバンド幅0.4HzのParzenウィンドーを用いた。なお図中には、C0から118m離れたP5地点での記録による伝達関数も示した。C0とP5における伝達関数には、かなり差異が見受けられるが、大まかな固有振動数や応答倍率はほぼ一致しているといえよう。また本震と余震による結果を比較すると、本震の固有振動数の方が多少小さくなっており、わずかではあるが強震時の地盤の非線形化の様子が読み取れよう。なお当地区では、この他にも数多くの記録が得られているので、ここで示したような平滑化による伝達関数とともに、アンサンブル平均による伝達関数の推定<sup>2)</sup>も今後実施する予定である。

#### 3. 地盤のモデル化と応答解析

千葉県東方沖地震のC0、P5、P6の3地点におけるGL-1mの記録を用いて、Tripartite法により水平方向の波動伝達方向と見かけの伝播速度を求めた結果、ほぼ震源方向から到来する波がほぼ鉛直下方から入射していることが確認された。そこでGL-40mでの記録を入力動とした1次元地震応答解析を実施することにした。設定した解析モデルと土の非線形特性を表-1および図-5に示す。ここで当地区の地盤データとしては、全15本の標準貫入試験結果とC0孔でのPS検層結果が得られている。これらにより地層区分と弾性定数は定まるが、その他の土質定数については実測値が無いため、ここでは一般的な値を仮定することにした。土のひずみ依存非線形特性としては修正Ramberg-Osgood(RO)<sup>3)</sup>モデルを用い、減衰定数 $h$ は $h = h_{max}(1 - G/G_0) + h_0$ で表わされるものとした。解析手法としては、一次元波動論(プログラムSHAKE)による等価線形解析と、質点系ROモデルによる時刻歴非線形解析の2法を用いた。なお非線形解析においては、初期減衰 $h_0$ をRayleigh減衰として考慮し、 $f_1 = 2.3\text{Hz}$ および $f_2 = 5.7\text{Hz}$ においてこの付加減衰定数が2%となるように係数を定めた。

解析結果の最大応答値を図-6に示すが、最大加速度は実測値と非常に良い一致を示している。またここには示していないが、波形も実測と解析で良い一致を示している。解析結果の最大せん断ひずみは、2手法とも0.1%以下と小さく、従って剛性低下率 $G/G_0$ も70%程度以下にはなっていない。なおここで非線形解

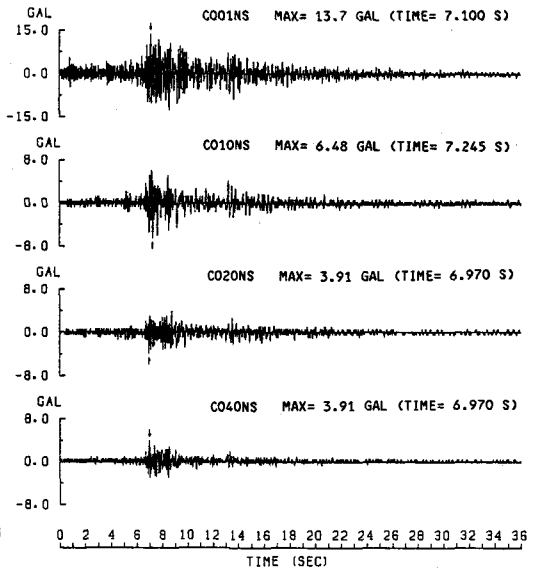
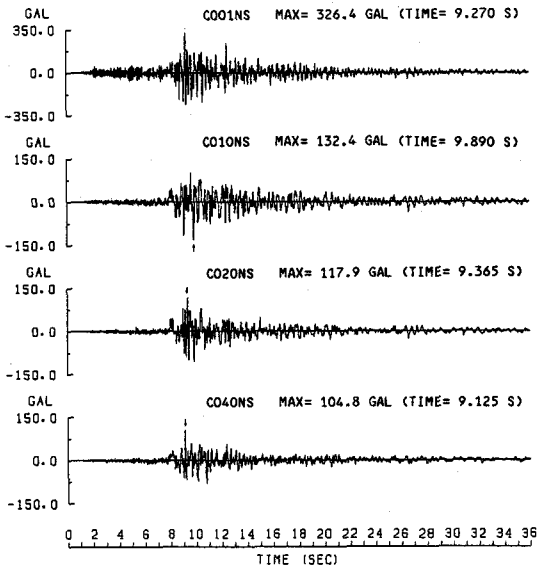


図-1 地中加速度記録 (本震NS、C0地点) 図-2 地中加速度記録 (余震NS、C0地点)

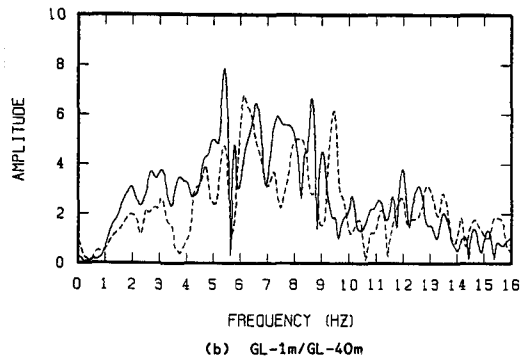
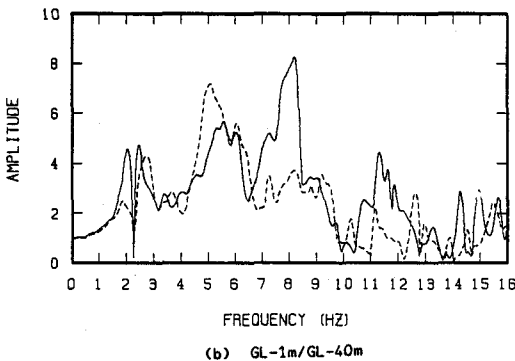
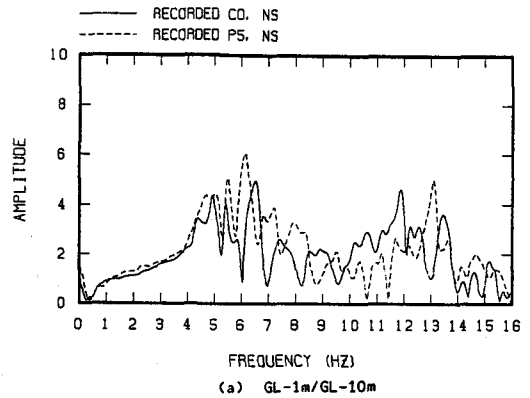
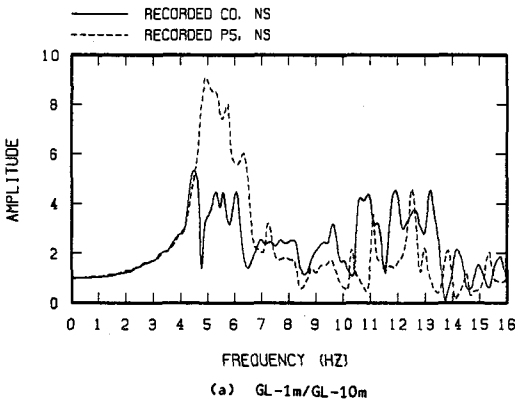


図-3 観測記録より求めた伝達関数 (本震NS) 図-4 観測記録より求めた伝達関数 (余震NS)

表-1 応答解析に用いる地盤モデル

Layer No.	Soil Type	Depth G.L. (m)	Sub-Layer	Location of Accelerometers	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Unit Weight $T_s$ ( $t/m^3$ )	Initial Damping Ratio ( $\eta_0$ )	Maximum Damping Ratio ( $\eta_{max}$ )	Reference Strain ( $T_r$ )
1	Loam	0.0		GL-1	140	320	1.15	0.02	0.3	$3 \times 10^{-3}$
		-5.0		GL-5						
2	Sandy Clay	-10.0		GL-10	320	550	1.50	0.02	0.3	$3 \times 10^{-3}$
3	Fine Sand	-15.0			320	550	1.95	0.02	0.3	$5 \times 10^{-4}$
4				GL-20						
		-24.0								
5			-40.0							

析の場合の  $G/G_0$  としては、最大せん断ひずみに対する割線剛性低下率を示している。このように非線形性が余り大きく出ていないことが、解析結果が実測値によく近似している理由の一つとも考えられる。

次に、解析結果の波形を用いてGL-40mに対するGL-1mの伝達関数とコヒーレンスを計算し、実測によるものと比較して図-7に示す。ここでSHAKEによる伝達関数は本来、解析的に求まるものであるが、ここでは平滑化による影響を実測記録や非線形解析結果と同じレベルに合わせるために、同様に波形から計算した。この波形から求めた伝達関数は、通常、各ピーク振動数付近において、解析的に求まるものより小さくなる傾向にある。解析と実測による伝達関数を比較すると、解析によるピークの方がかなり大きくなる場合が多いが、このように解析波形を平滑化して伝達関数を求めることにより、ある程度実測との差は縮まるものと思える。

コヒーレンスについては、実測によるものも9Hz以下ではかなり1に近く、地震波の鉛直入射と系の線形性が良く確認されている。非線形解析によるコヒーレンスは、傾向も値も実測に非常に近く、今回のモデルの設定がほぼ妥当であることを表しているといえよう。またSHAKEによるコヒーレンスは、解析的に求まるものは本来常に1であるが、これも波形から求めたために、各ピーク振動数付近で低下がみられる。ただし実測のコヒーレンスが高振動数になるにつれて低下する原因としては、この他にも、色々な方向から入射する波動の影響も考えられるので、今回の結果だけから1次元非線形応答解析結果が常に実測と良い一致を得るとは保証できない。その他の地震波に対する同様の検討が、さらに必要であろう。

#### 4. まとめ

千葉実験所で観測された千葉県東方沖地震時の加速度記録を用いて、当地盤の波動伝達特性を検討した。その結果、約120m離れた2地点間では伝達関数にやや差異が見られること、および本震時には地盤の非線形化がやや生じていることが観測された。次に、地盤の応答解析モデルを構築し、等価線形化および非線形

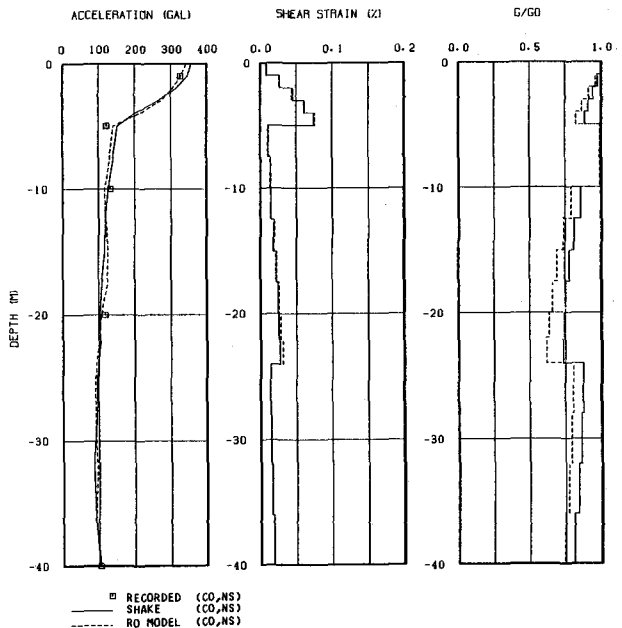
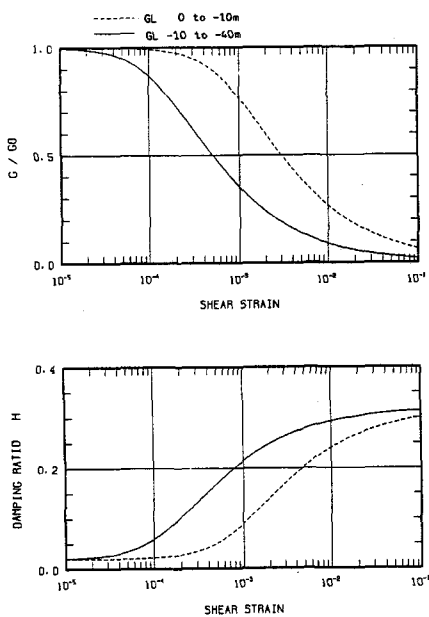


図-5 解析に用いる土の非線形特性 図-6 解析による地盤の最大応答値(本震NS、C0地点)

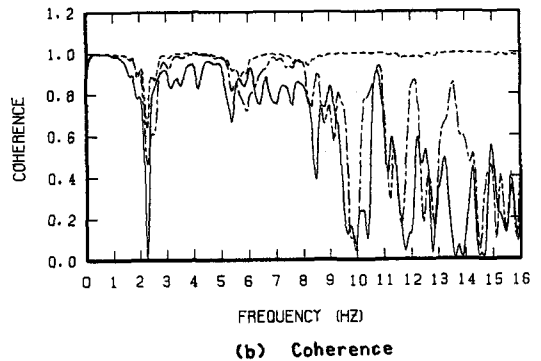
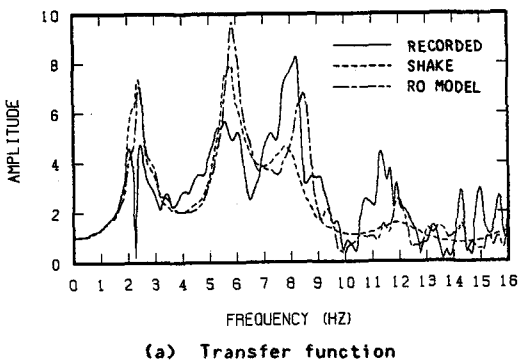


図-7 伝達関数およびコヒーレンスの比較 (本震NS、C0地点、GL-1/GL-40)

R Oモデルによる1次元地震応答解析を実施した。この2法による解析結果は、応答加速度および伝達関数ともに実測値と良い対応を示した。

謝辞 地盤定数の設定に関しては、東京大学生産技術研究所の龍岡文夫助教授の御助言を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 片山恒雄：地震動の工学的距離相関特性に関する実証研究、昭和60年度科学研究費補助金研究成果報告書、1986。
- 2) 和泉正哲・栗田哲ら：アレー地震動記録を用いた地震波の相関性と伝達特性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、第395号、1989。
- 3) 足立紀尚・龍岡文夫：土の力学(Ⅲ)－圧密・せん断・動的解析－、新体系土工学18、技報堂出版、1981。