

(10) 地盤材料の非線形性および非定常スペクトル特性を考慮した強震動の表面波波形分離に関する提案

佐藤工業(株) 中村 晋, 吉田 望

1. はじめに

強震波動は、主に実体波と表面波に分けられる。このうち表面波は実体波に比べ周期が長く、平面的に伝播し、地表層近くで高応力が生じるといった特性を有しているため、大規模構造物、地中構造物や土構造物の応答に影響を及ぼす可能性がある。しかし、これまで、これら構造物の耐震性の評価は、強震記録また設計用模擬地震動を実体波として扱い行われてきた。これは、表面波に関する資料が非常に少ないことに起因していると考えられる。観測された地震波形を表面波と実体波に分離すること、表面波による地盤の非線形応答を求める事が困難であったことも原因であろう。筆者の一人は、後者に関し等価線形法による解析手法を提案<sup>1)</sup>しているが、本報では前者に関し、地盤の非線形性を考慮した分離手法を示す。

強震動の観測記録から実体波と表面波を分離する試みは、近年、行われるようになってきたが(例えば文献 2参照)、これらは強震動特性に地盤の地震時挙動が含まれるものとして波動成分の分離を行っている。しかし、表面波の伝播に関しては、地盤の力学特性および地盤構造が支配的な影響をもっていることは明らかである。また、強震時において地盤は非線形挙動を示すため、実体波と表面波の分離を行う際にも、地盤の非線形性の影響を考える必要がある。神山<sup>2)</sup>は、地震波動に含まれる波動伝播特性の経時変化を非定常スペクトルにより求め、その規則性が表面波によるものであることを指摘し、その性質を利用した表面波成分の波形分離手法を示している。

本報告ではこの考えを基に、地盤の非線形挙動も考慮した分離手法を提案するとともに、その適用例を示すものである。

2. 解析手法

強震記録より円振動数 $\omega_1 \sim \omega_n$  ( $n$  は、工学的に対象となる低周波成分の円振動数)に関する瞬間スペクトル $F(\omega_i, t)$ を非定常スペクトル解析手法<sup>3)</sup>を用い算出する。得られた瞬間スペクトルの極大値は表面波の到達時間と関連していることが神山<sup>2)</sup>により示されている。そこで、この性質を用い瞬間スペクトルの極大値分布と対応するような表面波発生位置を決める。発生位置が決まれば、表面波の到達時間は次式のように求められる。

$$T_{Se} = X/U_0(\omega) \quad \dots\dots\dots(1) \quad T_{Sp} = X/U_P(\omega) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで  $T_{Se}(\omega)$  : 地盤を弾性体とした場合における表面波の到達時間曲線

$T_{Sp}(\omega)$  : 地盤の非線形性を考慮した場合における表面波の到達時間曲線

$X(m)$  : 表面波発生位置から地震観測位置までの震源距離

$U_0(\omega)$  : 地盤を弾性体とし算出した群速度特性

$U_P(\omega)$  : 強震記録を実体波入力地震動と扱い等価線形化法により、地盤材料の非線形性を考慮した地震応答解析で得られた地盤の力学特性により算出された群速度特性

さらに、得られた  $T_{Se}(\omega)$ 、 $T_{Sp}(\omega)$  および瞬間スペクトルに現われた塑性化の影響と考えられる周波数特性の経時変化とを考慮し図-1に示すような修正到達時間曲線  $T_{Sm}(\omega)$  を決定する。

表面波の再現波形  $f_s(t)$  は、表面波の修正到達時間曲線  $T_{Sm}(\omega_i)$  の近傍における一定時間帯域  $T_{sb}$  を表面波の出現帯域とみなした(3)式に示す表面波の瞬間スペクトル  $F_s(\omega_i, t)$  を用いれば、(4)式のように算出することができる。

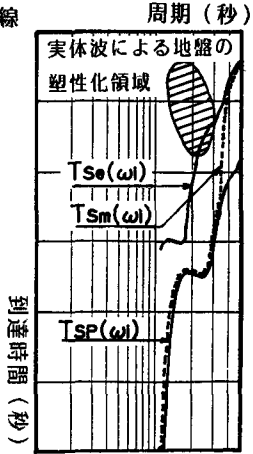


図-1 修正到達時間曲線の評価

$$F_s(\omega, t) = \begin{cases} 0 & (t < t_s(\omega) - t_{sb}) \\ F_s(\omega, t) & (t_s(\omega) - t_{sb} < t < t_s(\omega) + t_{sb}) \\ 0 & (t > t_s(\omega) + t_{sb}) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

$$f_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int \left( \sum \left( \frac{1}{2\pi} \int F_s(\omega, t) * \text{EXP}(-\omega t) d\omega \right) * \frac{1}{H(\omega)} \right) d\omega \dots\dots\dots (4)$$

ここで  $H(\omega)$  : フィルター関数

$$H(\omega) = \begin{cases} \text{EXP}(-\alpha \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)) & (1 - \beta)\omega_0 < \omega < (1 + \beta)\omega_0 \\ 0 & \omega < (1 - \beta)\omega_0 \text{ or } \omega > (1 + \beta)\omega_0 \end{cases}$$

3. 解析例

1) 解析地盤モデルおよび強震記録

強震動の例として、1983年 5月26日の日本海中部地震により八郎潟正面堤防で観測された強震記録を、その水平成分に関するオービットより震源軸方向成分（以後、軸成分とよぶ）および震源軸直交方向成分（以後、直交成分と呼ぶ）に分離し用いた。

解析地盤は、強震記録の得られた位置で実施されたボーリング調査および弾性波探査結果<sup>4)</sup>に基づき図-2に示す地盤構造および弾性波速度構造を有しているとした。

2) 解析結果

図-2で示した地盤モデルにおいて先に著者らが示した手法<sup>1)</sup>を用い算出した地盤を弾性体とした場合、および地盤の非線形性を考慮した場合のLove波、Rayleigh波の基本モードに関する群速度特性を示す。

強震動の各成分に関する非定常スペクトルマップを図-5、6に示す。図には、Rayleigh波、Love波に関し前章で示した各到達時間曲線も示している。非定常スペクトルマップから到達時間10~20秒、周期 1~2.5秒周辺に地盤の塑性化の影響と考えられる周波数特性の変化が生じているのが見られ、修正到達時間曲線はその瞬間スペクトル、特に軸成分に関する極大値とよく対応していることが分る。ここで、Love波、Rayleigh波に関する震源距離は、軸成分に対し  $X=5600\text{m}$ 、直交成分に対し  $X=2700\text{m}$  とした。これは、現位置で考えると、南部排水機場および表層地盤構造が変化しているFD5に対応している。

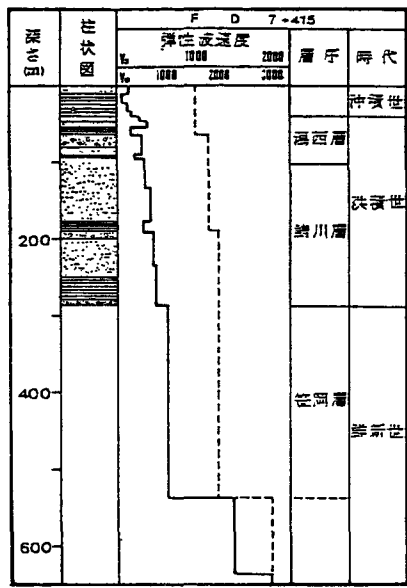


図-2 地盤構造モデル

修正到達時間曲線はその瞬間スペクトル、特に軸成分に関する極大値とよく対応していることが分る。ここで、Love波、Rayleigh波に関する震源距離は、軸成分に対し  $X=5600\text{m}$ 、直交成分に対し  $X=2700\text{m}$  とした。これは、現位置で考えると、南部排水機場および表層地盤構造が変化しているFD5に対応している。

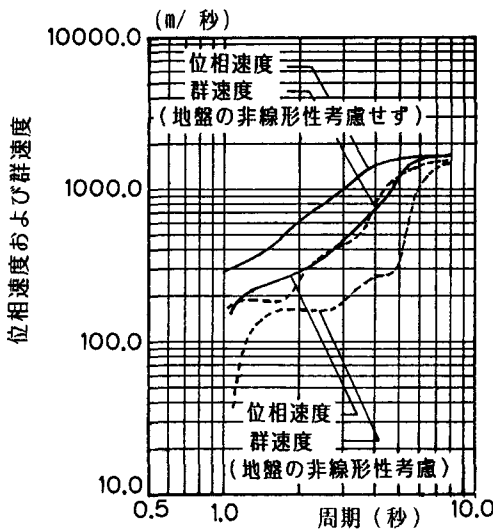


図-3 Rayleigh波の分散特性

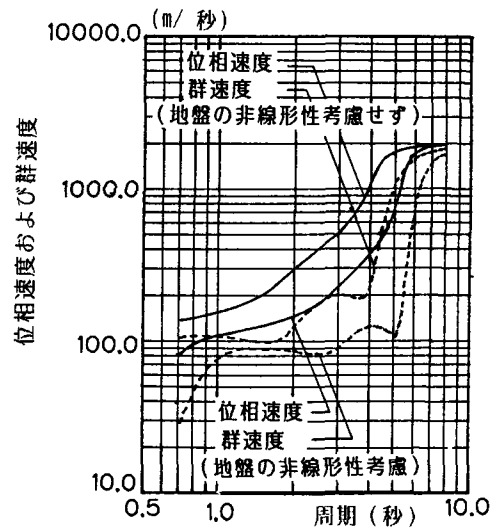


図-4 Love波の分散特性

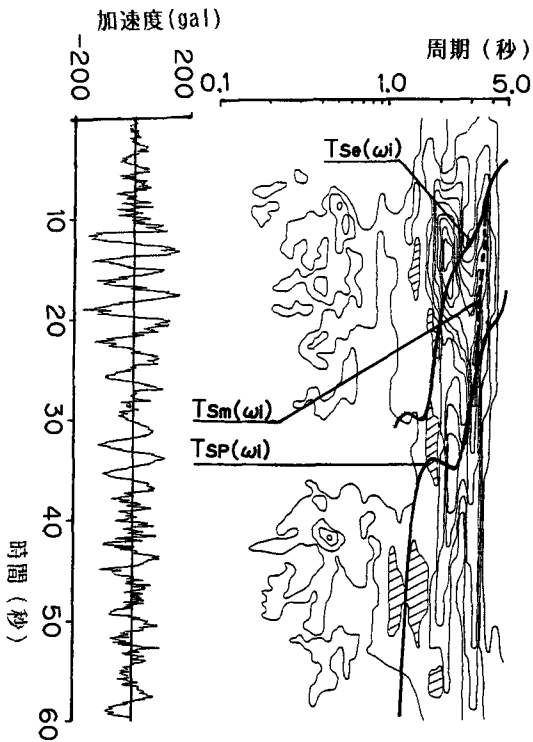


図-5 非定常スペクトルマップ  
およびRayleigh波到達時間曲線  
(震源軸方向成分)

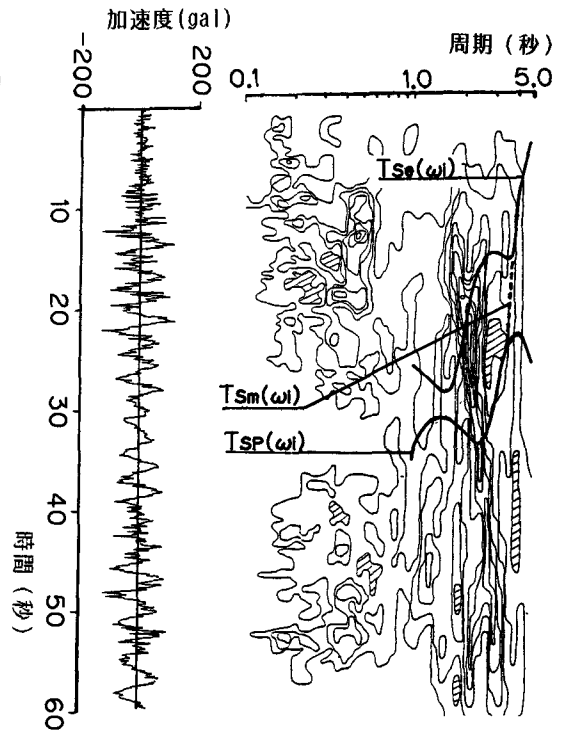


図-6 非定常スペクトルマップ  
およびLove波到達時間曲線  
(震源軸直交方向成分)

次に、図-5、6で得られたRayleigh波、Love波の到達時間曲線を用い強震動より分離した表面波および実体波の再現波形を図-7~14に示す。図-7、図-11には、軸成分および直交成分の原加速度波形、図-8、図-12には、修正到達時間 $T_{sm}(\omega)$ より分離再現されたRayleigh波およびLove波の加速度波形、図-9、図-13には、図-7、図-11に示した原加速度波形より図-8、図-12のRayleigh波およびLove波に関する加速度波形を除いた実体波の加速度波形、図-10、図-13には、図-8、図-9および図-12、図-13の加速度波形を不完全積分法<sup>5)</sup>( $\lambda=5$ )により算出した変位波形を示す。

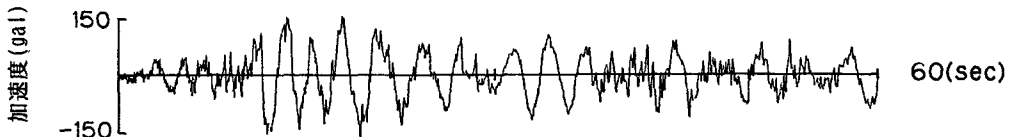


図-7 震源軸方向成分の原加速度波形

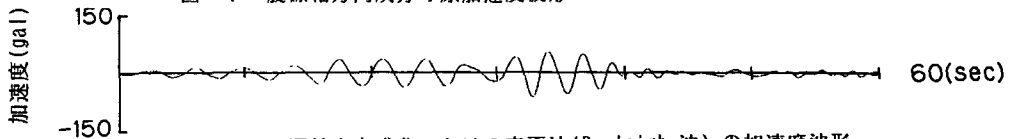


図-8 震源軸方向成分における表面波(Rayleigh波)の加速度波形

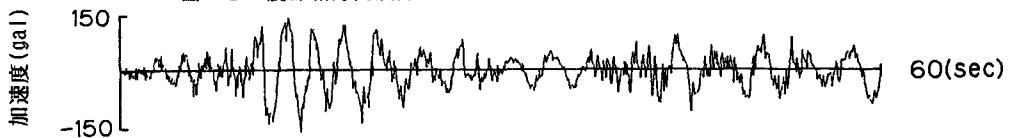
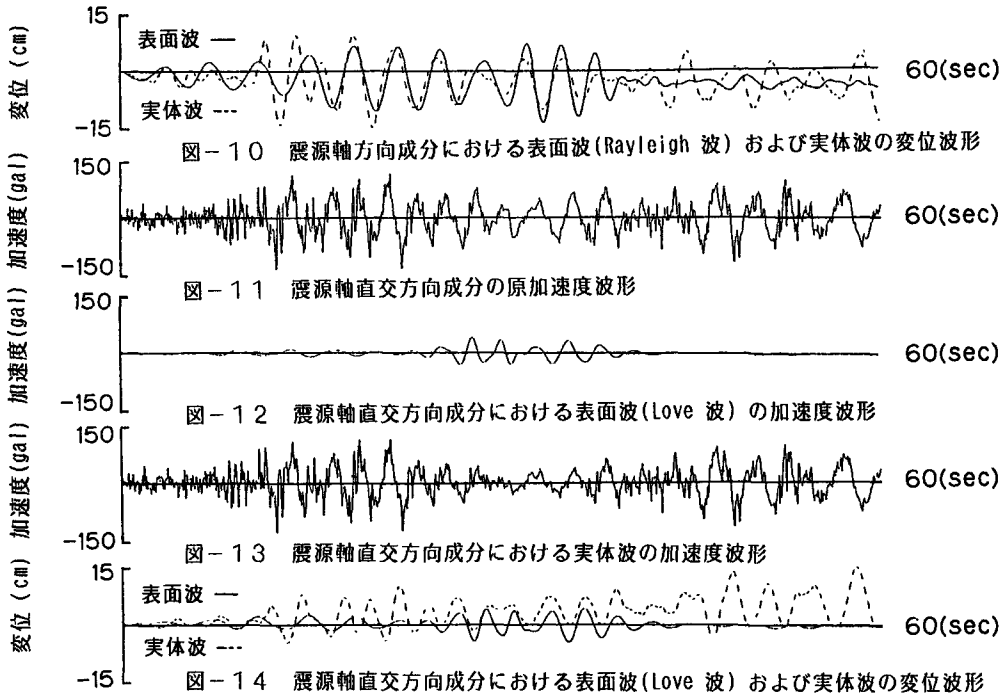


図-9 震源軸方向成分における実体波の加速度波形



加速度および変位波形の最大値について見ると、加速度は両成分とも表面波が実体波の3割程度となっているが、変位は、表面波特にRayleigh波によるものは実体波とほぼ同程度であり、最大振幅発生時刻は、表面波のほうが実体波より20秒程度遅れていることが分る。これは、実体波による地盤の塑性化に従い、表面波の群速度が低下したためと考えられる。

#### 4. あとがき

本報告で示した表面波の波形分離手法は、地盤を弾性体とした場合および地盤の非線形性を考慮した場合の双方を勘案し得られた修正到達時間曲線を用いるものである。この方法を日本海中部地震における八郎潟正面堤防の強震記録に適用したところ、強震動の非定常スペクトルの極大値分布と修正到達時間曲線がよく対応していることから、この手法が地盤の塑性化を生じた地点で観測された強震動から表面波の分離再現波形を求める有力な方法であると考えられる。

また解析の結果、ここで用いた日本海中部地震における八郎潟正面堤防の強震記録には、表面波成分、特にRayleigh波成分がかなり大きい割合で含まれることが分った。

#### 謝辞

この研究の遂行に関し有益な助言をいただいた東北工業大学・神山真助教授に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) S. Nakamura, K. Ishihara, Y. Tobita, E. Yanagisawa: Effect of surface wave on the liquefaction potential of saturated sandy deposits, 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Vol.1, pp1379~1386, 1985
- 2) 神山 真: 地盤の強震動特性とその予測に関する研究, 東北大学学位論文, 1985
- 3) Dziewonski, A., S. Bloch and M. Landisman: A technique for the analysis of transient seismic signal, Bull. Seis. Soc. AM., Vol.59, No1, pp343~356, 1971
- 4) 山本松生, 佐藤潔, 柳沢米司: 八郎潟干拓地における深層ボーリングについて, 日本応用地質学会, pp12~15, 1984, 10
- 5) 栗原千鶴子, 桜井彰雄: 地震加速度波形の積分, 電力中央研究所報告, 1969, 2, 21