

東京大学大学院 学生員 川上英二
 東京大学生産技術研究所 正員 田村重四郎

1. 概説 岩地盤に構築された地上構造物あるいは地中構造物に働く地震外力を明らかにするため著者らは、岩地盤中に深さ方向に配置された加速度記録を解析し、次の結果を得ている¹⁾。

① 地震動の主要部分は主として地下から地表に向かって進み、地表で反射して再び地下へと進む波動と考える。このことは震源方向に関係しない。

② 地表からの反射波の振幅は地表への入射波の振幅の約半分である。

③ 地震波の鉛直方向の伝播速度は、 $1.5 \sim 1.9 \text{ km/sec}$ であり、ボーリング孔のコアの剪断波速と比較的よく一致している。

④ $1 \sim 25 \text{ Hz}$ で 1 Hz 毎に求めたモード図の形は、一部の地震で $1 \sim 4 \text{ Hz}$ に見られた「中ぶくれ」のモードを除けば、簡単な入射波と反射波だけで大体説明できる。

本報告は以上の結果をふまえて、更に長周期での岩地盤の振動特性と、相互相関の性質に関し若干の考察を試みたものである。

2. 観測地点の地盤状況および測定計器 東京電力 K.K. 鬼怒川自動制御所の堅坑及びそれより約 17 m 離れたボーリング孔において地震動を観測している(図-1)。

深さ 67.2 m の堅坑には約 17 m おきに固有振動数 3 Hz の動線輪型加速度計(総合特性で増幅率は 25 Hz までほぼ一定)が据えつけてある。ボーリング孔には総合特性と

して約 15 Hz まで増幅率が一定の歪計型の加速度計が8個埋設されている。測定方向はすべて東西方向である。また観測地点は山裾に位置し、最高勾配を示す NW-SE 断面図を図-2に示す。山の傾斜は $15^\circ \sim 30^\circ$ であり、南東方向は約 5° の下り勾配である。

3. 観測された地震動の見かけの周期 地表の加速度記

録の主要部分 $2 \sim 3$ 秒間を取り出し、Zero-Up-Cross の回数を数えその逆数から見掛けの卓越振動周期を算定し、地震毎に示したのが図-3である。この図は比較的短い周期の範囲の地震動の性質をあらわしているが、本観測地点では短い周期の振動が卓越している事がわかる。記録された最大の規模の地震は1968年十勝沖地震($M=7.9$)であり、震央距離は約 550 km である。

10 Hz 前後の振動数の地震についての深さ方向の性質は、単純な地下深部からの入射波とその減衰した地表からの反射波で大体説明できる事がわかってい¹⁾る。

1 秒程度の周期の地震動については比較的長周期の卓越した小笠原南方に発生した震源の深い $M=7.6$ の地震と、1968年十勝沖地震の2つの地震を分析した。前者は通常の震源の浅い地震とは異なった性質をもちている。約 20 秒の記録を 0.01 秒間隔で読み取り、最深点(-67.2 m)を基準とした各深度での振幅スペクトル比を図-4,5に示す。本測定点では約 1 Hz 以下の振動数の振動成分については、振幅スペクトル比はほぼ1であり、 1.0 Hz より振動数が増すとこの比は増加する傾向にある。この傾向は十勝沖地震の場合に著しい。

相互相関を示したのが図-6,7である。図-6の小笠原地震の場合には、地表での記録を基準にして各深度での記録は深くなるに従って僅かながら時間的に進んでいることがわかる。図-7の十勝沖地震の場合は、地表と各深度とでの記録の時間的ずれは殆んど認められない。この範囲の振動数の振動成分の深さ方向の性状については更に検討を進める必要がある。

図-1 地震計の配置図

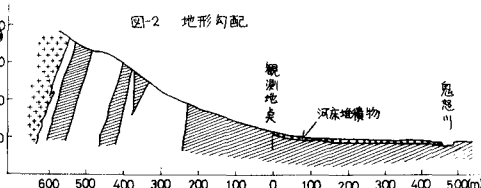
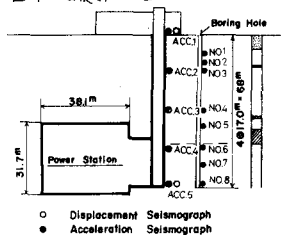
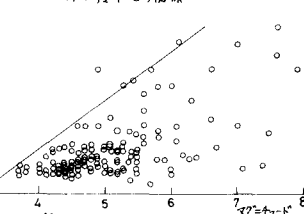


図-3 Zero-Up-Cross から求めた見かけの周期と $M=7.9$ との関係



4. 水平多層地盤における相互相関 ① S波が鉛直

に入射する。②地層は水平な成層構造の弾性地盤。③粘性によるエネルギーの損失は考えない。以上の3点を仮定して、地表と地中の記録との相互相関の形を調べる。上層から1, 2, 3, ... と番号付けると、図-8のように第n層上端の上昇波 $x_n(t)$ と下降波 $y_n(t)$ は地層のインピーダンス $V_n \rho_n$ を用いて、

$$\begin{pmatrix} x_n(t) \\ y_n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_n & 1-a_n \\ 1-a_n & a_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{n-1}(t-\tau_{n-1}) \\ y_{n-1}(t-\tau_{n-1}) \end{pmatrix}$$

$$a_n = \frac{1 + \frac{V_{n-1} \rho_{n-1}}{V_n \rho_n}}{2}$$

と表わせる。

$$\begin{pmatrix} x_{n-1}(t+\tau_{n-1}) \\ y_{n-1}(t-\tau_{n-1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{n-1} & 1-a_{n-1} \\ 1-a_{n-1} & a_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{n-2}(t+\tau_{n-1}+\tau_{n-2}) \\ y_{n-2}(t+\tau_{n-1}+\tau_{n-2}) \\ y_{n-2}(t+\tau_{n-1}-\tau_{n-2}) \\ y_{n-2}(t-\tau_{n-1}-\tau_{n-2}) \end{pmatrix}$$

のように順次繰り返し、境界条件より $y_1(t) = x_1(t)$ を用いると、 $x_n(t), y_n(t)$ が $x_1(t \pm \tau_{n-1} \pm \tau_{n-2} \dots \pm \tau_1)$ の級数で表わせる。地表での振動 $z_1(t) = 2x_1(t)$ と第n層上端での振動 $z_n(t) = x_n(t) + y_n(t)$ との相互相関は

$$V_{z_1 z_n}(\tau) = \sum_{i=1}^{2^{n-1}} P_i V_{z_1 z_i}(\tau \pm \tau_{n-1} \pm \tau_{n-2} \pm \dots \pm \tau_1)$$

($\pm$ はすべての組み合わせを含む)

のように地表の自己相関 $V_{z_1 z_1}$ の級数で表わせる。地表と地中の記録との相互相関は、地表の自己相関を 2^{n-2} 対だけ、それぞれ等時間正負にずらして、定数倍して重ね合わせたものとなり、 P_i の値よりそれは $\tau=0$ に関し左右対称となるはずである。このモデルで実測による相互相関のピークの

位置は大体説明できるが、反射波が入射波より小さくなる事は説明できない。

5. 入射角、地表の傾斜を考えた相互相関

地表の記録の自己相関を三角形に仮定して、水平境界をもつポアソン比 ν の半無限弾性体に、SH波、SV波がある入射角をもって入射した場合の相互相関を 図-9 に示す。入射は鉛直方向であるが地表が傾斜している場合の相互相関を 図-10 に示す。SV波では入射角のわずかな差により、反射波の大きさ、形は反射P波の影響により大きく異なり、反射波の振幅・ピークの時間差は共に小さくなる。これは実測記録より求めた相互相関の形と定性的に類似している。

6. まとめ 岩地盤での加速度記録では、地下深くからの入射波と地表からの反射波が存在すること、また反射波の減衰については地表及び地表層での減衰の他に、入射方向あるいは地形の傾斜による見かけ上の減衰をも考える必要がある事がわかった。

参考文献

- 1) 岩地盤で実測された地震波動の深さ方向の性質について，田村重四郎・川上英二，第14回地震工学研究発表講演概要，1976

最深点を基準とした各測点での振幅スペクトル比

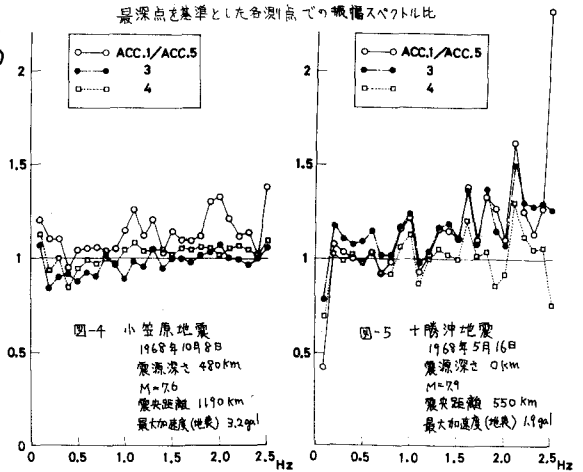


図-4 小笠原地震

1968年10月8日
震源深さ 420 km
M=7.6
震央距離 1190 km
最大加速度(地表) 3.2 gal

図-5 十勝沖地震

1968年5月16日
震源深さ 0 km
M=7.9
震央距離 550 km
最大加速度(地表) 1.9 gal

図-6 小笠原地震
相互相関

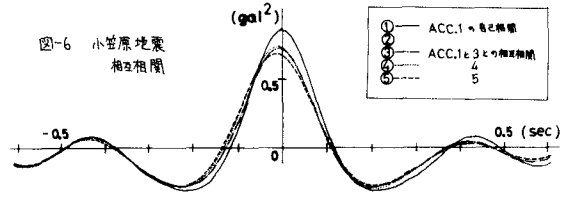


図-7 十勝沖地震
相互相関

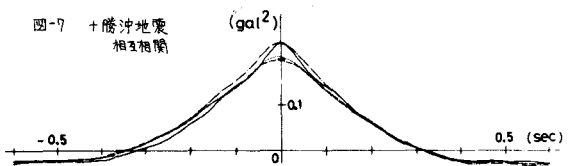


図-8

$$\begin{matrix} (n-1)\text{層} & \uparrow x_{n-1}(t+\tau_{n-1}) & \downarrow y_{n-1}(t-\tau_{n-1}) \\ & \uparrow x_n(t) & \downarrow y_n(t) \\ (n)\text{層} & \uparrow x_n(t+\tau_n) & \downarrow y_n(t-\tau_n) \\ & \uparrow x_{n+1}(t) & \downarrow y_{n+1}(t) \\ (n+1)\text{層} \end{matrix}$$

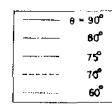


図-9
入射角と相互相関の形との関係

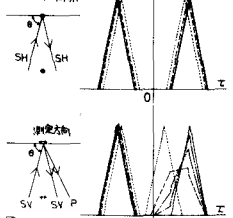


図-10
地表の傾斜と相互相関の形との関係