

61 地震動による地すべり土層内の間隙水圧の応答特性 (Ⅲ)

— 応答波形の推定 —

農林水産省林業試験場 ・ 落合博貴・松浦純生・梁瀬秀雄

1. はじめに

筆者らは、これまで由比地すべり地において地震動と間隙水圧の観測を行なってきた。そして、間隙水圧が地震動の長周期成分に強く応答する傾向が明らかになった⁽⁴⁾。本文においては、間隙水圧の地震動に対する応答特性を明らかにするために周波数応答解析を行なった結果について報告する。

2. 解析方法

間隙水圧と地震動との関係を、あるシステムへの入力と出力と考えれば、近似としてそのシステムを線形系と見なすことにより、システムの特性的の把握が容易となる⁽²⁾。また、あるシステムの特性が既知であれば未知の入力に対する応答を予め予測することが可能となる(図-1)。一般に、あるシステムへの入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 、パワースペクトル密度関数をそれぞれ $S_{xx}(\omega)$ 、 $S_{yy}(\omega)$ とすれば、

$$S_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi X(\omega)^* X(\omega)}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi |X(\omega)|^2}{T} \quad (1)$$

$$S_{yy}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi Y(\omega)^* Y(\omega)}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi |Y(\omega)|^2}{T} \quad (2)$$

であり。入出力の関係が次式で表わされる。

$$S_{yy}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{xx}(\omega) \quad (3)$$

また、入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ の相互相関関数のフーリエ変換である

クロススペクトルを $S_{xy}(\omega)$ とすると、

$$S_{xy}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2\pi X(\omega)^* Y(\omega)}{T} \quad (4)$$

$$S_{xy}(\omega) = H(\omega) \cdot S_{xx}(\omega) \quad (5)$$

で表される。ここで $X(\omega)^*$ 、 $Y(\omega)^*$ は $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ の共役成分である。 $H(\omega)$ はシステム関数または周波数応答と呼ばれ、応答関数 $h(\eta)$ のフーリエ変換

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta) e^{-i\omega\eta} d\eta \quad (6)$$

である。一般に、二つの変動の関係を表すのにコヒーレンス、フェイズ、ゲイン等が用いられる。コヒーレンス $\text{coh}^2(\omega)$ は二つの変動のフーリエ変換の相互相関関数であり、

$$\text{coh}^2(\omega) = |S_{xy}(\omega)|^2 / (S_{xx}(\omega) \cdot S_{yy}(\omega)) \quad (7)$$

である。また、フェイズ $\theta_{xy}(\omega)$ は $S_{xx}(\omega)$ と $S_{yy}(\omega)$ の位相角であり、以下の式で与えられる。

$$\theta_{xy}(\omega) = \tan^{-1} (Q_{xy}(\omega) / K_{xy}(\omega)) \quad (8)$$

ここで、 $K_{xy}(\omega)$ は $S_{xy}(\omega)$ の実数部であり $Q_{xy}(\omega)$ は虚数部である。また、周波数応答の絶対値 $|H(\omega)|$ はゲインと呼ばれ(3)式の関係から次のようになる。

$$|H(\omega)| = \sqrt{S_{yy}(\omega) / S_{xx}(\omega)} \quad (9)$$

解析の対象とした地震は1984年9月14日8時48分の長野県西部地震の本震(EVENT 1 以下E1とする)と9月15日7時14分の最大余震(E2)および9月19日2時2分発生した房総沖地震(E3)(震央:北緯34度3分 東経141度33分 MAG.:6.6)である。また、観測した東西方向と南北方向のデータから、観測地点から震央へ向かうR(Rad

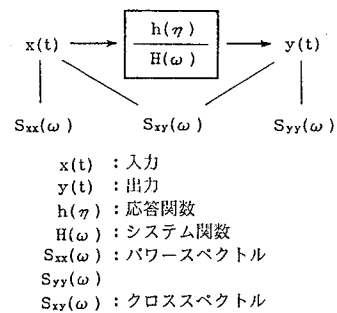


図-1 線形システムと入出力の関係

ial)方向とそれに直交するT(Transvers)方向の加速度成分を合成した。

間隙水圧と地震加速度との波形の上での比較においては、間隙水圧は垂直成分の加速度に応答することが予想された。そこで、P波とS波の各々の区間において垂直成分(V成分)と水平成分(R成分)の地震加速度と間隙水圧との間のコヒーレンス、フェイズ、ゲインを求めた。計算はTIMSAC⁽¹⁾によった。ここで、用いた時系列データのサンプリング間隔 Δt は0.025秒である。垂直成分の加速度と間隙水圧について図-2に、水平成分の加速度と間隙水圧について図-3に表した。それぞれ、上段にP波部分、下段にS波部分について表した。また、実線はE1、破線はE2、点線はE3を示している。

3. 地震動と間隙水圧の周波数応答特性

V方向の加速度と間隙水圧についての解析結果は、コヒーレンスではP波では10Hz、S波で7Hzで応答が変化しており、また、全体的には右下がりの傾向にある、P波のフェイズはE1がプラスを示しているものの全体的な傾向は周波数の増加と共に位相差が大きくなるといえる。またS波については7Hzまでの範囲ではほぼおなじ π の位相角を示している。これは、極性を反転させたV方向の加速度と間隙水圧の波形が良く一致することを説明している。ゲインについては、S波の結果が8Hz以下で、周波数の増加と共に指数関数的に減少する傾向を示している。これは、S波部分においては加速度が長周期になるほど間隙水圧が強く応答することを示している。

R方向の加速度と間隙水圧の応答解析によれば、コヒーレンスは全体的な右下がりの傾向はV成分の結果と同様であるが、その値はやや小さい。フェイズについては一定の傾向はみられない。ゲインについては長周期程強く応答する傾向は見られるがV成分の場合ほどはっきりした傾向ではない。

以上の結果、間隙水圧は地震加速度の垂直成分とのあいだに一定の関係が認められ、特に10Hz以下の領域においては線形に近い関係が認められる。つまり、地震加速度を入力、間隙水圧を出力とすれば、少なくともシステムの線形が保証される弾性域においては間隙水圧の応答を予想することは可能である。Mavko & Harp⁽³⁾は、P波とS波のそれぞれの部分について間隙水圧と地震動のスペクトル比をもとめ、P波については負の線形関係、S波については指数関数的な右下がりの関係があるとしており、今回の解析では、ゲインの結果において同様な傾向がみられた。

4. 周波数応答関数の推定と応答波形

一般に入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ は応答関数 $h(\eta)$ により次式で示される。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\eta) h(\eta) d\eta \quad (10)$$

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (11)$$

(11)式は(10)式のフーリエ変換でありシステム関数と入力のフーリエ変換からも出力が推定できる。そこで(5)式の関係からシステム関数 $H(\omega)$ をもとめS波について図-4に示した。実線は実数部、破線は虚数部を表わしている。7Hz以上の部分についてはコヒーレンスの結果から、誤差が大きく信頼性が低い。実数部についてはいずれも同様の傾向を示すがE2の虚数部が他と異なる。また、震源の異なるE1とE3が同様なシステム関数を示すことは今後、データの蓄積により入出力関係を特定できることを示唆していると言えよう。つまり、システムが線形と見なせる範囲に於て間隙水圧の応答波形は地震加速度の波形から推定できよう。

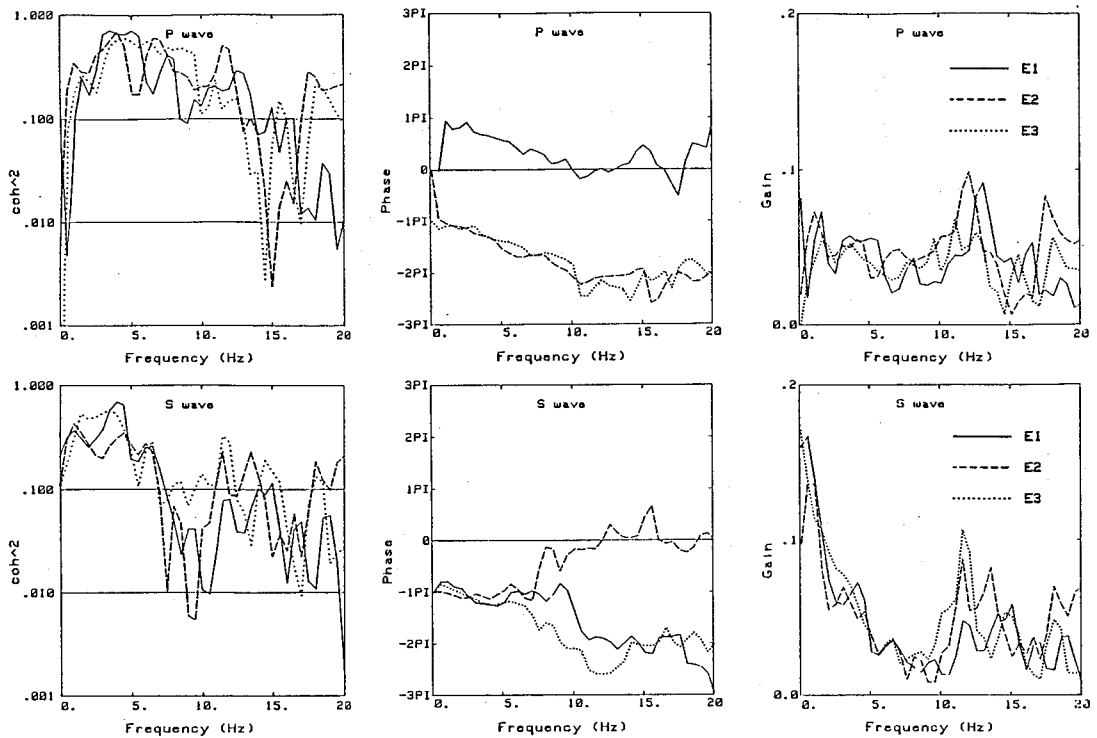


図-2 垂直方向 (V方向) の地震加速度と間隙水圧の応答特性
(実線: E1 破線: E2 点線: E3)

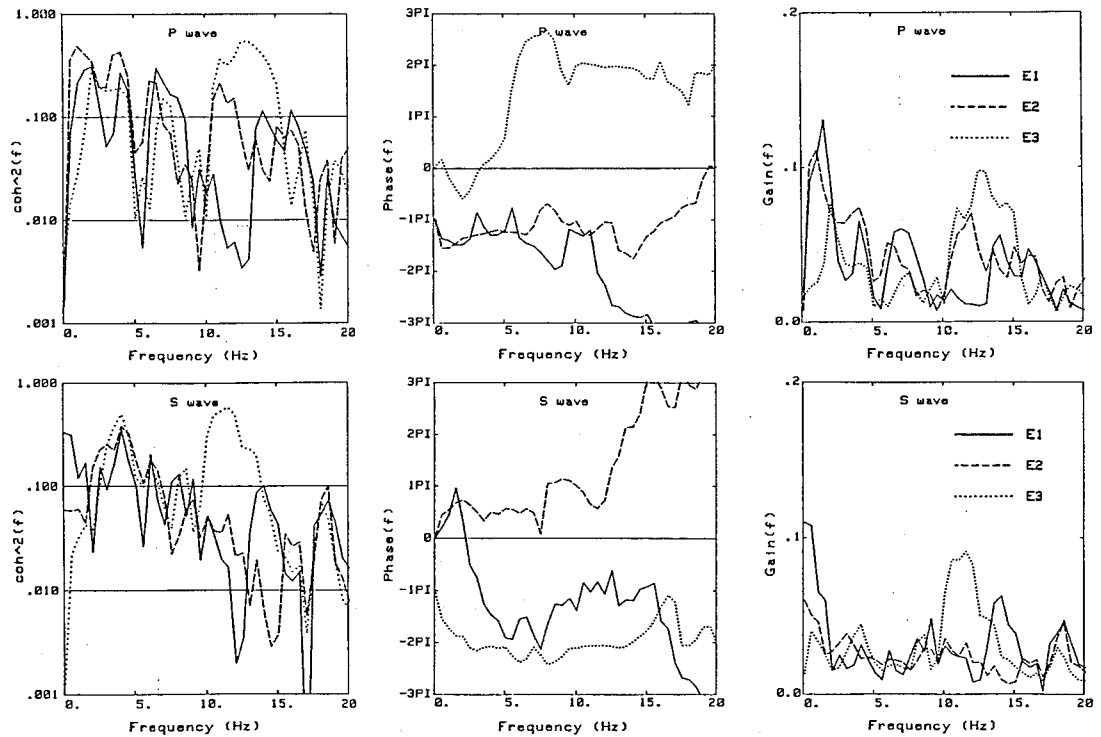


図-3 水平方向 (R方向) の地震加速度と間隙水圧の応答特性
(実線: E1 破線: E2 点線: E3)

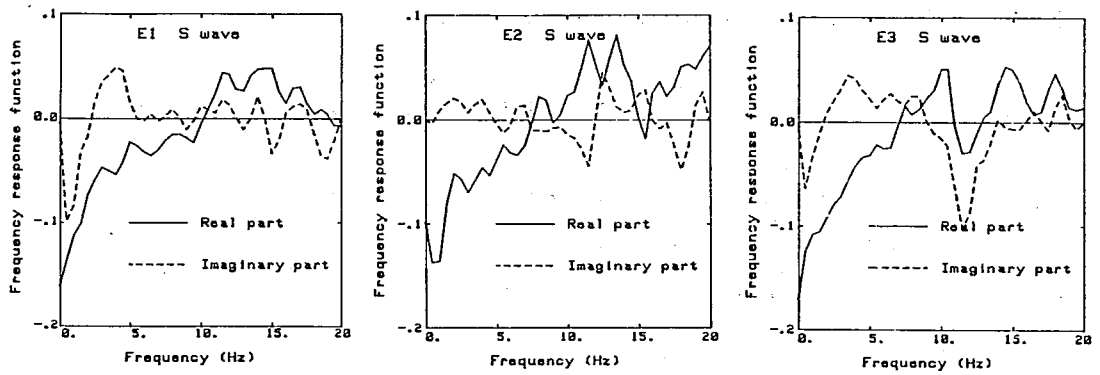


図-4 S波部分のシステム関数（実線：実数部 破線：虚数部）

参考文献

- (1) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，189pp，サイエンス社，東京，1972.
- (2) 日野幹雄：スペクトル解析，300pp，朝倉書店，東京，1977.
- (3) Mavko, G. M. and E. L. Harp : Analysys of wave-induced pore pressure changes, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 74, 1395-1407, 1984.
- (4) 地震動による地すべり土層内の間隙水圧の応答特性，昭和61年度砂防学会研究発表会概要集，238-241, 1986.