

アレー観測記録に基づく地震動の位相特性

豊橋技術科学大学大学院

○猪野 健吾

豊橋技術科学大学 正会員

栗林 栄一

1. はじめに ライフライン等空間的に広い領域を占める構造物は、波形の位相・変形を考慮しない場合ひずみが過小評価になる事があり、入力地震動を時空間関数として与える必要がある。豊橋市南部において表層3地点、基盤1地点の4点アレー観測を実施しており、幾つかの小規模地震の加速度が記録されている。これらの記録を用いて同地盤の地震動の時空間特性を検討した。

2. 観測地点および解析対象地震 図1に観測点の位置図、表1に解析対象地震の諸元を示す。観測地域は、低平地P1における沖積地盤から洪積地盤である南のP2,P3にかけて徐々に標高を増した台地状の不整形地盤であり、標高差はP1-P3間で33.5mある。対象とした3地震は、震央・規模は異なるが得られた加速度はいずれも最大数gal~10数galと比較的小さなものである。

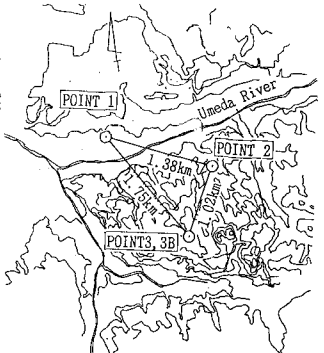


図1 観測位置

3. 相互相関解析による地震動の伝播速度 原記録を震央方向成分(X)

表1 解析対象地震諸元

と同直交方向成分(Y)に分解し、各方向の見かけ伝播速度Vを試算した結果を表2に示す。水平方向伝播速度は、数百~数千m/sとばらつきが激しいが、震央方向と観測線が比較的一致したEQ-1/P2-P3、EQ-2/P1-P3、EQ-3/P3-P1(表中*)はオーダー的に妥当と考えられる。これは、地震動の異方性を示唆しているものと考えられる。一方、基盤-表層の鉛直方向伝播速度は、一部を除き370~420m/s(位相遅れ0.14~0.16s)とばらつきが小さい。また地盤のN値より経験的に算定したせん断波速度Vs^{*}=287.0m/sとなり、20~30%小さくなった。

地震番号	EQ-1	EQ-2	EQ-3
発生日月	1991年4月25日	1991年5月11日	1991年9月3日
震域	静岡県中部	愛知県西部	東海南海沖
震源の深さ(km)	4.9	3.9	6.3
東経	138° 12'	136° 59'	138° 50'
北緯	35° 03'	35° 12'	33° 41'
深さ(km)	32	46	33

表2 見かけ伝播速度

4. 地震動の空間特性の検討

(1) コヒーレンスの検討: 記録をフーリエ解析し、2記録間の周波数領域における関連度を示すコヒーレンスを算定したところ、距離の増加に従い2記録間の相関は低下すること、高振動数域でも再び相関が高まる場合があること、パワースペクトルが類似している2記録でも観測点間地盤の不整形性その他により波形変形が著しい場合があること等がわかった。

地震番号	伝播方向	伝播距離 L(m)	成分	最大相互相関係数	遅れ t _{max} (sec)	伝播速度 v(m/sec)
EQ-1	30-3	59.0	LG	-0.0300	0.16	368.8
			TR	-0.04830	0.16	368.8
	*2-3	825.2	LG	-0.17700	0.20	4126.0
			TR	-0.20000	0.52	1586.9
	2-1	849.6	LG	-0.1180	0.30	2834.0
			TR	0.17800	0.46	1817.0
3-1	61.0	LG	0.0098	0.08	762.5	
		TR	0.06810	0.36	189.4	
EQ-2	30-3	59.0	LG	-0.06538	0.36	163.9
			TR	0.02525	0.20	872.5
	*1-3	1745.7	LG	0.06930	0.36	3117.3
			TR	-0.06780	0.46	2944.1
	1-2	1170.3	LG	-0.10200	0.36	3250.8
			TR	0.00010	0.04	1250.0
3-2	510.0	LG	0.02000	0.54	944.4	
		TR	-0.08170	0.14	421.4	
EQ-3	30-3	59.0	LG	-0.11800	0.14	421.4
			TR	0.171	0.06	4113.3
	3-2	246.8	LG	-0.313	0.62	388.1
			TR	-0.0947	0.32	5139.1
	*3-1	1644.5	LG	-0.170	1.18	1333.6
			TR	0.0945	0.78	1700.6
2-1	1326.5	LG	-0.119	0.28	4737.5	

※LG:震央方向、TR:震央直交方向、*は震央方向と比較的一致した観測線方向

(2) 空間特性のモデル化: (1)で、特に不整形地盤では、コヒーレンスは従来仮定されているように、振動数と距離の増加により単純に低下しないことが多いことがわかった。そこで、2記録が与えられた場合の、その地点間の任意点k点のコヒーレンスの補間を試みた。i,jのコヒーレンスCoh_{ij}(ω, x_{ij})を次式で仮定する。

$$Coh_{ij}(\omega, x_{ij}) = \exp(-\alpha(\omega) \cdot \omega \cdot x_{ij} / 2\pi c) \quad (1)$$

ここで、α(ω)は各振動数に対する波形変形定数(正值)、x_{ij}はij間の相対距離、cは観測波u_i(t), u_j(t)より算定した見かけの伝播速度(実体波)とし、地震動の異方性は無視するものとする。α(ω)について解くと

$$\alpha(\omega_n) = -2\pi \log\{Coh_{ij}(\omega_n, x_{ij})\} / \omega_n T_p \quad [\omega_n = \omega_1, \dots, \omega_N] \quad \text{ただし、} T_p = x_{ij} / c \text{ (波動伝播時間)} \quad (2)$$

求めたα(ω)を用いて、ik間のコヒーレンスCoh_{ik}を次式で仮定する。

$$Coh_{ik}(\omega_n, x_{ik}) = \exp(-\alpha(\omega_n) \cdot \omega_n \cdot x_{ik} / 2\pi c) = \exp\{\log(Coh_{ij}) \cdot x_{ik} / x_{ij}\} = [Coh_{ij}(\omega_n, x_{ij})]^{(x_{ik}/x_{ij})} \quad (3)$$

5. 多地点地震動のシミュレーション 仮定したコヒーレンスモデルの妥当性を検証するため多地点地震動模擬を試みた。

(1) 従来の理論: 互いに相関を有するm個の平均値0の定常確率過程u_i(t) (i=1, ..., m)はクロススペクトルを用いることにより、従来⁽¹⁾、次式で表せることが示されている。

$$u_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{n=1}^N 2\sqrt{\Delta\omega} |H_{ip}(\omega_n)| \cos(\omega_n t + \theta_{ip}(n) + \phi_{pn}) \quad (i=1, \dots, m) \quad (4)$$

ここで、 $H_{ip}(\omega)$ はクロススペクトル行列 $S_{ip}(\omega, x)$ を三角行列の積に分解したときの (i, p) 要素、 ω_n は離散角振動数、 θ_{ip} は位相角($\theta_{ip}(n) = \tan^{-1}\{\text{Im}[H_{ip}(\omega_n)]/\text{Re}[H_{ip}(\omega_n)]\}$)、 ϕ_{pn} は $0 \sim 2\pi$ の独立一様乱数である。

(2) 観測点間の波形補間：今、波動の異方性を無視し、パワー特性が比較的類似した2点 i, j において観測値 $u_i(t), u_j(t)$ が既知の時、 ij を結ぶ直線上の任意非観測点 k の実現値を補間する問題を考える。空間定常を仮定し代表地点のパワースペクトルが与えられたとき、 ij 間のクロススペクトルが次式で表せるものと仮定する。

$$S_{ij}(\omega, x_{ij}) = S(\omega) \cdot \text{Coh}_{ij}(\omega, x_{ij}) \cdot \exp(-i\omega x_{ij}/c) \quad (5)$$

ここで、 S_{ij} は ij 間のクロススペクトル密度関数、 S は均一場の代表地点における定常地震動のパワースペクトル密度関数である。いま、 $S(\omega)$ を $S_i(\omega)$ で代表するものとすれば、 ik 間のクロススペクトルは式(3)より

$$S_{ik}(\omega, x_{ik}) = S_i(\omega) \cdot \text{Coh}_{ik}(\omega, x_{ik}) \cdot \exp(-i\omega x_{ik}/c) = S_i(\omega) \cdot [\text{Coh}_{ij}(\omega, x_{ij})]^{(x_{ik}/x_{ij})} \cdot \exp(-i\omega x_{ik}/c)$$

となる。このクロススペクトルを式(4)に与えて、シミュレートを行うと k 地点の出力が補間される。2点の観測波が得られると、波形変形・位相遅れを共に考慮した波形が合理的に算出されるものと考えられる。

(3) 数値計算例：Imperial Valley地震(1940)のEl Centro地点(NS)における加速度記録(U_i)を用い、数値計算を行った。記録にノイズと $T_p=0.5s$ の位相を与え、仮想地点の観測記録(U_j)と仮定した(図2)。 U_i-U_j 間のコヒーレンス、 $\alpha(\omega)$ を図3に示す。この $\alpha(\omega)$ を用いて、上述の方法で U_i-U_j 間の地震動をシミュレートした結果を図4に示す。 $x_{ik}/x_{ij}=1.0$ の波形が U_j とよく一致しており、補間部分についても変形・位相遅れが観測値に基づき考慮された波形が得られていることがわかる。更にEQ2/P1-P2の観測値から、入力をP1、シミュレート地点P2として計算したところP2観測値を比較的良好に再現した(図5)。

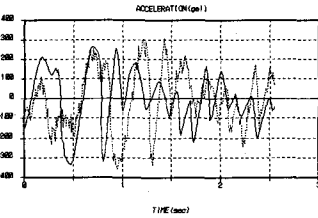


図2 観測波形

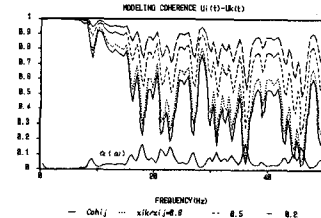


図3 モデル化した任意点コヒーレンス

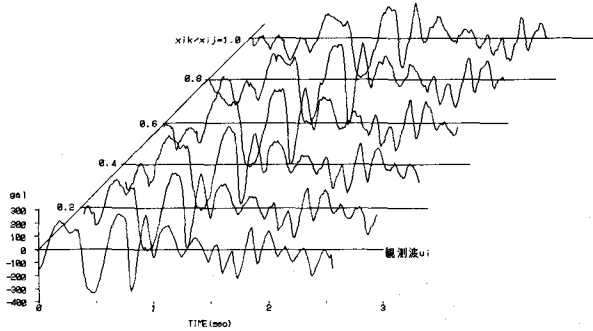


図4 シミュレートした補間波形

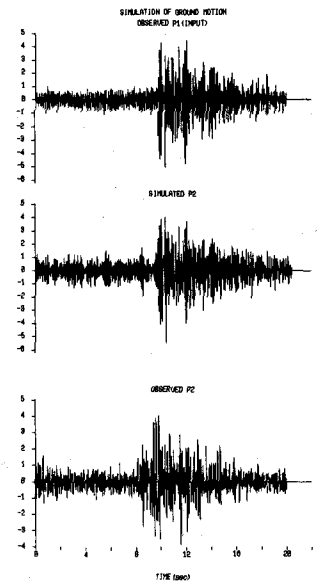


図5 アレー観測値を用いたシミュレート

6. まとめ アレー観測より得られた記録に基づき地震動の位相・空間特性について検討した。伝播速度については、水平方向に関してはばらつきが大きい観測点測線方向と震央方向が比較的一致するものについては妥当な値が得られた。空間特性としては、地盤条件および不整形性、各地震の特性、波動伝播の異方性等が波形変形に複雑な影響を及ぼすことが分かった。更に、従来コヒーレンスをモデル関数として与えている多地点地震動模擬に、2観測値のコヒーレンスを直接与えることで、当該地盤の波形変形特性を反映しつつ、簡便に補間する一手法を示した。今後は記録の蓄積を待って、過去の代表地震記録に当該地盤でモデル化した空間特性を適用しても問題がないかを検討する必要がある。

●参考文献(1)星谷：多次元非定常確率過程の相互スペクトルとシミュレーション理論,土木学会論文報告集,NO.253,1976