

(22) 同時地震観測記録に基づく地震動の伝播速度の検討

建設省土木研究所 正員 田村敬一

相沢 興

兵庫県

登日幸治

1 はしめに

応答変位法に基づく地中構造物の耐震設計では、正弦波状の波動が水平方向に伝播すると考えて地盤の変形を求めるとされているが、波動の伝播速度については実測資料が皆無であり、たゞこと等から適宜仮定した値を用いているのが現状である。そこで、本小文は、土木研究所構内で得られた三次元同時地震観測記録をもとに、地震動の伝播方向を考慮した上で、記録間の位相差より地震動の水平方向の伝播速度について予備的に検討した結果を報告するものである。

2 観測システムの概要

建設省土木研究所の構内(A地区)では、図1に示すように、一辺の長さが100mの十字形の測線に沿って、地表に3点、地表面下2mに5点および地表面下約50mに5点の計13点に換振器を配置して地震観測を行っている。観測に使用している換振器は速度帰還型加速度計であり、その固有振動数および減衰定数は、それぞれ、5Hzおよび50である。換振器からの信号は、12ビットA/D変換器により1/100秒間隔でデジタル化された後、10.24秒の遅延回路を経て、磁気ディスクに収録される。

3 解析対象記録

本検討で解析の対象とした記録は、表1に示す6地震の際に、図1に示した地表面下2mの観測点(A2N2点、A2S2点、A2E2点、A2W2点)および地表面下約50mの観測点(A50N2点、A45S2点、A47E2点、A50W2点)で得られた加速度記録である。一例として、EQ-21の際に、A2N2点、A2S2点、A50N2点およびA45S2点で得られた加速度波形を示すと、図2のようになる。図2より、A2N2点およびA2S2点、また、A50N2点およびA45S2点で得られた記録の波形上の特徴は、それぞれ、よく類似していることがわかる。また、A2N2点およびA50N2点、A2S2点およびA45S2点の加速度波形を比較すると、いずれの場合も振幅の倍率は2.5~3倍程度であり、波形の位相特性は、それぞれ、類似していることがわかる。

4 震央の方向性の検討

いま、地震動が水平方向に伝播してくるものと仮定すれば、ある観測点で得られた記録を震央方向成分と震央直交成分に分離した場合に、両成分の相関が最も低くなると考

表1 解析対象地震の諸元

NO.	発生日月日	震 域	震子 (km)	マグニチュード	震央距離 (km)
EQ-16	1981.9.2	茨城沖沖	40	5.8	102
EQ-21	1982.3.7	鹿島灘	60	5.5	64
EQ-22	1982.7.23	茨城沖沖	30	7.0	169
EQ-28	1983.2.27	茨城沖南部	72	6.0	22
EQ-34	1983.10.28	茨城沖西部	60	5.2	13
EQ-45	1984.3.6	白鳥近海	460	7.9	745

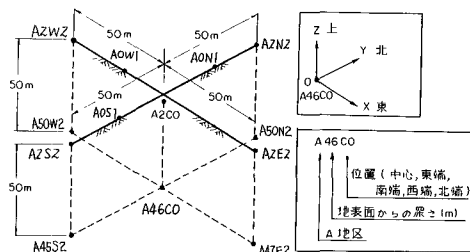
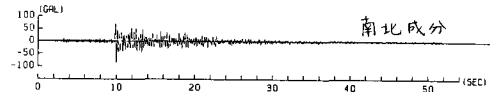
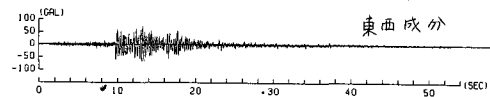
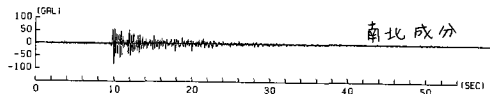
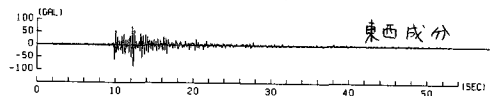


図1 三次元同時地震観測点の配置



(a) A2N2点



(b) A2S2点

図2(1) 加速度波形の例 (EQ-21)

えられる。そこで、ここでは、各観測点で得られた記録の東西成分および南北成分をもとに、任意の方向の直交座標軸に沿う2成分を求め、2成分の相互相関係数が0になる方向と震央の方向との関係について検討する。すなわち、いま、各観測点において得られた加速度記録の東西(x)成分および南北(y)成分を、それぞれ、 a_x および a_y とすれば、図3に示すように、座標軸を反時計回りに角度 θ だけ回転させたX軸およびY軸に沿う成分 a_x および a_y は、それぞれ、次のように表される。

$$a_x = a_z \cos \theta + a_y \sin \theta \quad (1)$$

$$a_y = -a_z \sin \theta + a_y \cos \theta \quad (2)$$

また、 a_x と a_y の相互相関係数Rは次のように求められる。

$$R = \frac{\int_0^T a_x(t) a_y(t) dt}{\sqrt{\int_0^T a_x^2(t) dt \cdot \int_0^T a_y^2(t) dt}} \quad (3)$$

ここで、Tは記録の継続時間である。座標軸の回転角と相互相関係数の関係の一例として、EQ-21およびEQ-34のそれぞれの際に地表面下2mおよび地表面下約50mの観測点で得られた記録より、 θ を10°刻みで0°から180°まで変化させ、式(3)によりRを求めた結果を示すと、図4のようになる。ここで、図中には、震央の方向角 θ_{EP} も合わせて示している。図4より、EQ-21およびEQ-34については、いずれの観測点の記録の場合にも、多少のばらつきは見られるが、相互相関係数Rが0になる角度 θ と θ_{EP} が比較的良好一致し、震央方向とそれに直交する方向に座標軸をとる場合に加速度記録の2成分の相関が最も低くなることわかる。同様の傾向は、地表面下2mの観測点の記録の場合にはEQ-16、EQ-22およびEQ-45について、また、地表面下約50mの観測点の場合にはEQ-22についても認められたが、それ以外の場合には認められなかった。

5. 地震動の伝播速度の試算

5.1 原記録による試算

4.の検討結果に基づき、卓越方向が識別できた地震に際して、水平面内の2観

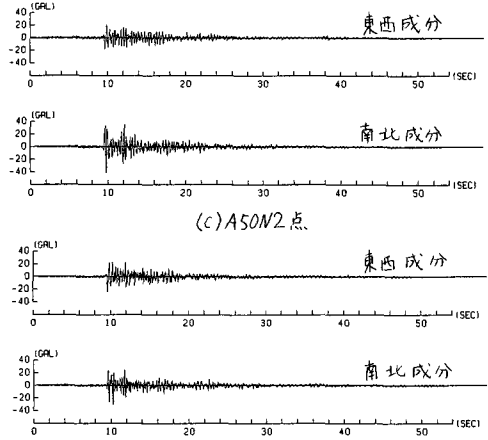


図2(2) 加速度波形の例 (EQ-21)

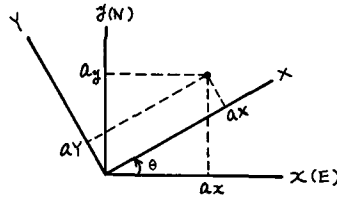


図3 座標軸の回転

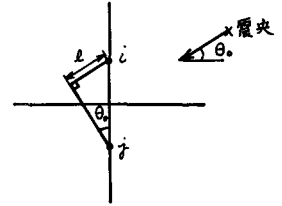
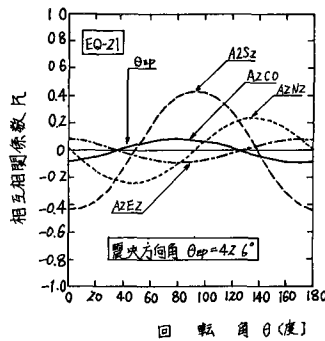
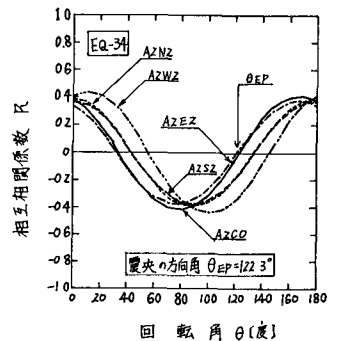


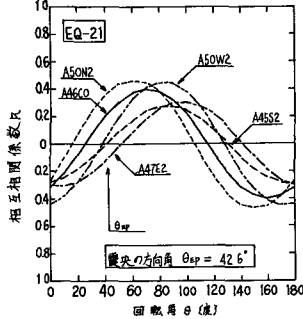
図5 伝播距離の定義



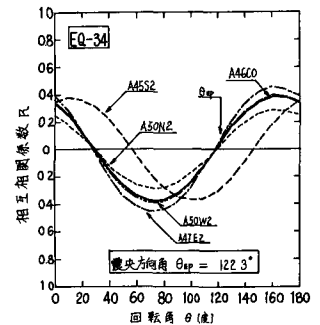
(a)EQ-21, 地表面下2m



(b)EQ-34, 地表面下2m



(c)EQ-21, 地表面下50m



(d)EQ-34, 地表面下50m

図4 座標軸の回転角と相互相関係数の関係

測点で得られた記録の震央方向成分および震央直交成分のそれぞれについて、相互相関係数が最大になる位相遅れを伝播に要する時間とみなし、地震動の水平方向の伝播速度の試算を行う。すなわち、いま、2点*i*, *j*のそれぞれにおいて得られた記録について、座標軸を角度*θ*だけ回転させた*X*軸に沿う成分(震央方向成分)を、それぞれ、*a_{i,x}*および*a_{j,x}*とすれば、その相互相関係数*R_{ij}(τ)*は次式により求められる。

$$R_{ij}(\tau) = \frac{\int_0^T a_{i,x}(t) a_{j,x}(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_0^T a_{i,x}^2(t) dt \cdot \int_0^T a_{j,x}^2(t) dt}} \quad (4)$$

ここで、*τ*は位相遅れである。また、(*i*, *j*)の組合せとしては、(A2N2点, A2S2点), (A2E2点, A2W2点), (A50N2点, A4S2点) および (A47E2点, A50W2点) の計4組の組合せを考慮することにする。*R_{ij}(τ)*が最大値をとる位相遅れを*τ_{max}*とし、2点間の震央方向への投影距離を*l* (図5参照)とすれば、伝播速度*v*は次のように求められる。

$$v = l / \tau_{max} \quad (5)$$

また、*Y*軸成分(震央直交方向成分)についても同様に伝播速度が求められる。このようにして求めた伝播速度の一覧を示すと、表2のようになる。ここで、負の伝播速度は伝播方向が見かけ上と反対であることを示している。当該地点のせん断波速度が、地表面下50m付近までは250m/sec程度、それ以下では400m/sec程度であるのに対して、式(5)により求めた伝播速度は極めて大きいことがわかる。

5.2 振動数帯域に分離した記録による試算

原記録に振動数領域でバンドパスフィルターをかけ、各振動数帯域ごとに、5.1と同様の手法により地震動の伝播速度の試算を行う。ここで、バンドパスフィルターの帯域は表3に示すとおりである。振動数帯域ごとに求めた相互相関係数の一例として、EQ-21の際にA2N2点およびA2S2点で得られた記録の震央方向成分から求めた相互相関係数を示すと、図6のようになる。次に、振動数帯域ごとに、相互相関係数が最大値をとる位相遅れを*τ_{max}*より式(5)を用いて伝播速度を求めた一例として、EQ-21およびEQ-34の際にA2N2点およびA2S2点、また、A50N2点およびA4S2点で得られた記録から求めた伝播速度を示すと、図7のようになる。ここで、負の伝播速度は、表2の場合と同様に、伝播方向が見かけ上と反対であることを示している。図7より以下の事項が指摘される。

1) 地表面下2mの観測点の記録による場合は、どの周期

表2 伝播速度の一覧

記録No.	伝播方向	成分 ¹⁾	R _{max}	τ _{max} (sec)	速度(m/sec)
EQ-16	A2N2→A2S2	X	0.758	0.010	3420.2
		Y	0.801	0.020	1710.1
EQ-21	A2N2→A2S2	X	0.577	0.010	6430.0
		Y	0.613	0.0	∞
	A50N2→A4S2	X	0.374	-0.050	-1286.0 ²⁾
		Y	0.536	-0.050	-1286.0
EQ-22	A47E2→A50W2	X	0.497	0.010	7660.4
		Y	0.453	0.0	∞
EQ-34	A2N2→A2S2	X	0.796	0.0	∞
		Y	0.834	0.0	∞
	A2W2→A2E2	X	0.391	-0.010	-8660.0
		Y	0.657	-0.020	-4330.0
EQ-45	A2N2→A2S2	X	0.209	0.050	1000.0
		Y	0.528	0.035	1428.6
	A50N2→A4S2	X	0.261	0.520	166.5
		Y	0.506	0.010	8660.0
A50W2→A47E2	X	0.496	0.020	2500.0	
	Y	0.622	0.020	2500.0	
EQ-45	A2N2→A2S2	X	0.850	0.0	∞
		Y	0.877	0.0	∞

- 1) X:震央方向 Y:震央直交方向
2) 負の伝播速度は伝播の方向が見かけ上と反対であることを示す。

表3 バンドパスフィルターの帯域

中心周期(sec)	評価する周期帯域(sec)	評価する周期帯域(Hz)
0.25	0.05 ~ 0.375	2.667 ~ 20.0
0.5	0.375 ~ 0.625	1.6 ~ 2.667
0.75	0.625 ~ 0.875	1.143 ~ 1.6
1.0	0.875 ~ 1.25	0.8 ~ 1.143
1.5	1.25 ~ 1.75	0.571 ~ 0.8
2.0	1.75 ~ 2.25	0.444 ~ 0.571
2.5	2.25 ~ 2.75	0.364 ~ 0.444
3.0	2.75 ~ 5.0	0.2 ~ 0.364

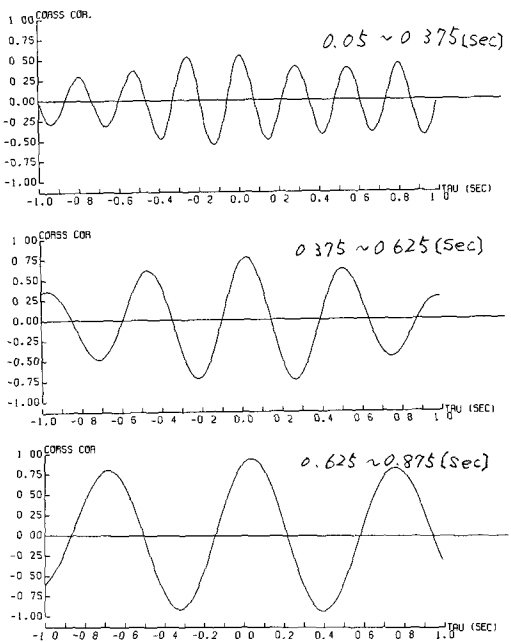


図6 相互相関係数の例 (EQ-21, A2N2点→A2S2点)

帯域においても、一般に、地震動の水平方向の見かけ上の伝播速度は、当該地点のせん断波速度に比較して大きい。また、地表面下約50mの観測点の記録による場合も、長周期帯域を除いて同様の傾向が認められる。

2) 一般に、地表面下2mの観測点の記録から求めた伝播速度は、地表面下約50mの観測点の記録から求めた伝播速度よりも大きい。

3) 周期と伝播速度の間には明確な関係は認められず、一般に、長周期領域では伝播速度が小さくなる傾向が認められる。

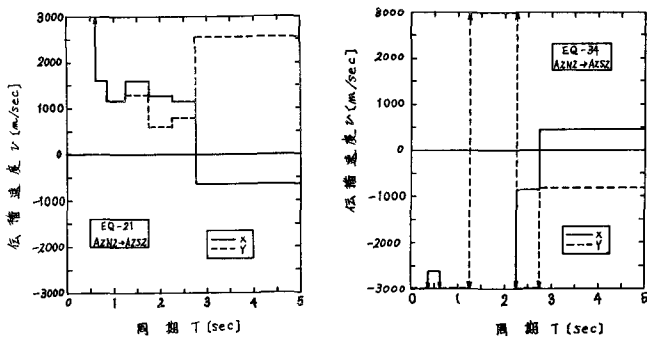
5. 鉛直面内における地震動の伝播方向の検討

3. に示した手法と同様の手法により、ある観測点で得られた記録の震央方向成分と上下成分をもとに、鉛直面内の任意の方向の座標軸に沿う2成分を求め、2成分の相互相関係数から鉛直面内における地震動の伝播方向について検討する。水平面からの回転角 φ と相互相関係数の関係の一例として、EQ-21およびEQ-34のそれぞれの際に地表面下2mおよび地表面下約50mの観測点の記録から求めた相互相関係数を示すと、図8のようになる。図8より、一般に、 $\varphi = 90^\circ$ 付近で相互相関係数は0になり、記録を水平成分と上下成分に分離した場合に2成分の相関が最も低くなることかわかる。したがって、4. の検討結果を合せて考慮すると、地震動は鉛直下方から伝播してくると考えられる。

6. まとめ

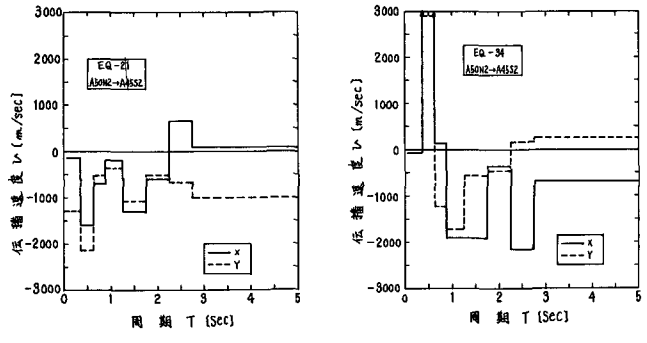
本検討より、以下の事項が明らかにされた。

- 1) 加速度記録の水平方向2成分から求めた地震動の卓越方向と震央の方向は比較的良好一致する。
- 2) 地表面付近における地震動の水平方向の見かけ上の伝播速度は非常に大きく、地震動は鉛直下方から垂直に伝播してくると考えられる。



(a) EQ-21, A2N2点 → A2S2点

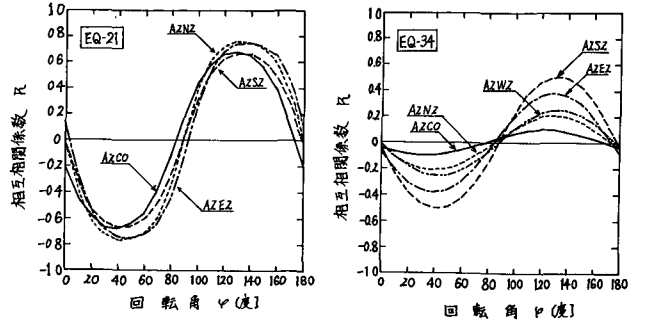
(b) EQ-34, A2N2点 → A2S2点



(c) EQ-21, A5DN2点 → A4S2点

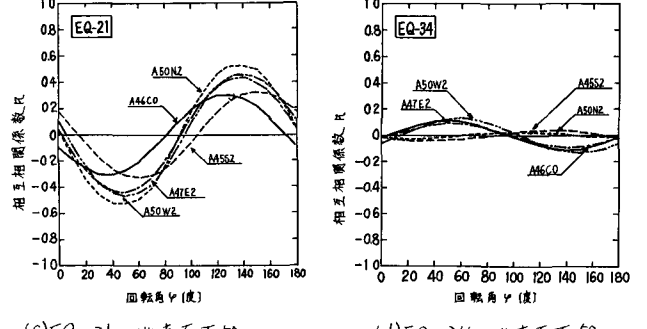
(d) EQ-34, A5DN2点 → A4S2点

図7 周期帯域ごとの伝播速度



(a) EQ-21, 地表面下2m

(b) EQ-34, 地表面下2m



(c) EQ-21, 地表面下50m

(d) EQ-34, 地表面下50m

図8 鉛直面内の回転角と相互相関係数の関係