

(9) 地震動の同時多観測記録の解析

○建設省土木研究所 正員 川島一彦
 ” ” 相沢 興

1. まえがき

従来、地震動の特性は加速度を中心として、その特性および強度の変化が研究されてきており、地盤条件および地形条件が異なる場合の地震動の増幅作用が主要な検討項目となっている。一方、箇所別に地震動が異なることにより地盤中には複雑なひびきが生じる。設計震度に基づく力のつり合いを中心とした震度法による設計では、加速度の特性が重要となるが、地下埋設物、沈埋トンネル等の地中構造物に対する応答変位法による設計では、地震時に地盤に生じるひびきが重要となる。本小文は、以上の観点から、土木研究所構内における地震動の同時多観測結果をもとに、地震時の地盤ひびきについて解析した結果を報告するものである。

2. 観測地点および観測システムの概要

土木研究所(筑波研究学園都市内)周辺の地盤構成は水平方向に比較的一様であり、地表面から5m程度までが関東ローム、それ以下は砂、シルト、礫の互層となっている。せん断波速度 V_s は、地下50m程度まではおおむね250 m/sec、それ以下少なくとも100m程度までは400 m/sec程度である。

観測システムは図1に示す通りであり、土木研究所構内のA、B両地区にLocal Laboratory Arrayが設置されている。A地区は一辺の長さが100mのクロスタイプの測線に沿って、地表に7点、地表面下2mに1点、地表面下50mに5点の合計8点、B地区では長辺が100m、短辺が50mのL字型の測線に沿って、地表面下2mに1点、地表面下66mに4点、地表面下96mに1点の合計6点に、それぞれ換振器が設置されている。測線および換振器の向きは、南北および東西とし、1点につき水平2成分、上下1成分の計3成分を観測している。A、B両地区間の距離は約500mである。

A地区における地表の換振器7台(2成分)を除く、A、B両地区36成分の信号は、16ビットのAD変換器により1/100秒間隔に数値化された後、10.24秒の遅延回路を経て、収録用ミニコンピュータの磁気ディスクに収録される。また、上記36成分の信号のうち32成分については、デジタル収録とは別にアナログテープにも収録され、デジタルシステムのバックアップができるようになっている。なお、A地区における地表の換振器7台(2成分)の信号は、直接AD変換したのち、磁気ディスクに収録される。したがって、これら2成分の信号に対しては、遅延は行われず、上記36成分の信号との時間の同期は確保することができる。

3. 観測記録

上記観測システムのうち、32成分のアナログテープを用いた観測は昭和54年7月から、また、デジタル収録装置を用いた57成分全体の観測は昭和55年12月から、それぞれ開始されており、昭和56年1月末現在までに表1に示す12地震による記録が得られている。これらは、いずれもマグニチュードが3.0~6.7の小規模な地震である。マグニチュードが6以上あり、たのほ、EQ-10、11、12の3地震であ

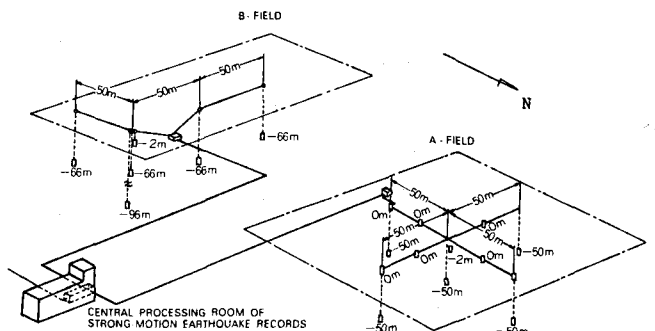


図1. 土木研究所構内の地震観測システム

る。一例として、EQ-10 (1980年伊豆川奈崎沖地震) によるA地区の加速度記録、および、これを周波数領域で2回積分して求めた変位波形をそれぞれ図2、3に示す。

4. 地震動の伝播時間

鉛直面内および水平面内の地震動の伝播速度を求めるために、上下方向に相隣る1-2点間 (図7参照) および3-5点間、4-6点間の相互相関係数 R_{12} 、 R_{35} 、 R_{46} を求めた。一例として、EQ-10に対するNS成分どうれの R_{12} および R_{35} を示すと図4のようになる。

これによれば、 R_{12} は、 $T=0.2$ 秒付近で比較的高い値を示し、最大値をとる。いま、これを波動の伝播に伴う時間の

表1 観測記録の一覧

地震No.	発生日月	震源地	震央距離 (km)	M	深さ (km)
EQ-1	1979.10.9	茨城沖	27	4.1	50
EQ-2	1979.11.25	茨城沖	122	5.4	90
EQ-3	1979.12.14	茨城県南西部	156	3.9	40
EQ-4	1979.12.16	栃木県東部	142	3.0	20
EQ-5	1980.2.1	—	—	—	—
EQ-6	1980.4.21	茨城沖	198	4.0	60
EQ-7	1980.5.6	—	—	—	—
EQ-8	1980.5.11	—	—	—	—
EQ-9	1980.6.18	千葉県中部	55	4.6	80
EQ-10	1980.6.29	伊豆半島東方沖	163	6.7	10
EQ-11	1980.9.24	東京都北部	42	6.0	60
EQ-12	1980.9.25	千葉県中部	71	6.1	70

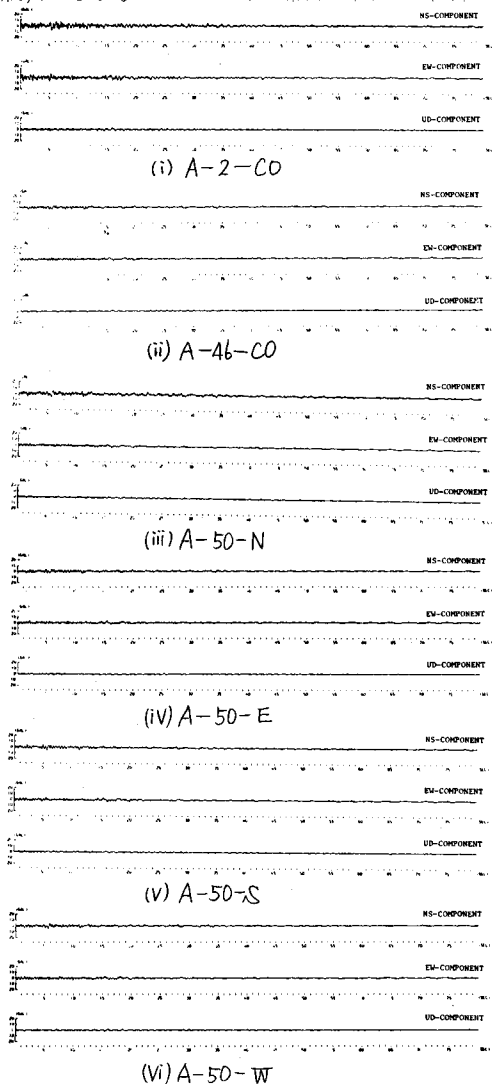


図2 A地区の加速度記録 (EQ-10)

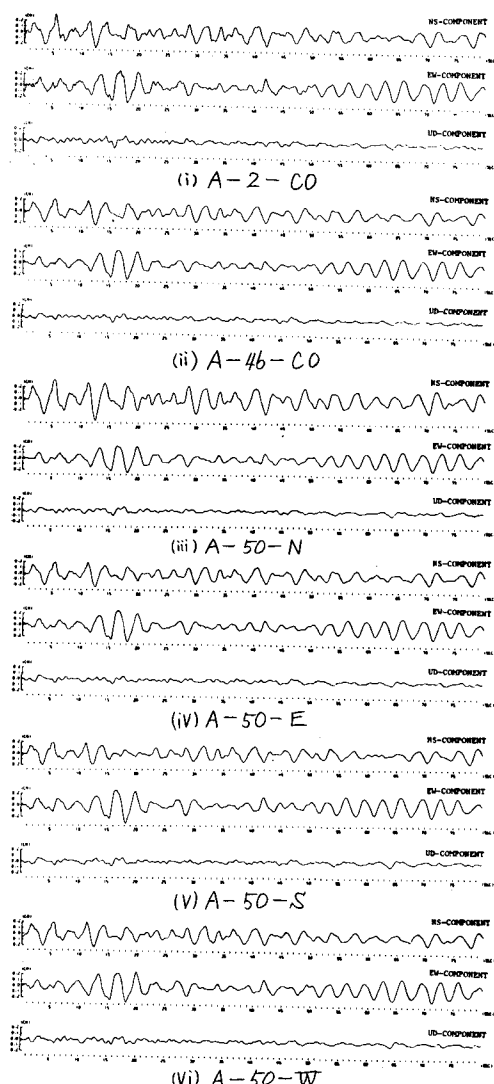


図3 図2から計算で求めた地盤の変位 (EQ-10)

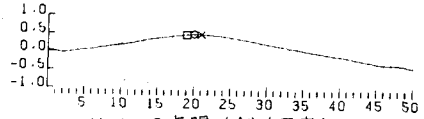
それと考えると、2点間の距離をL、時間差をTとすれば、伝播速度は次式となる。

$$V = L/T \quad (1)$$

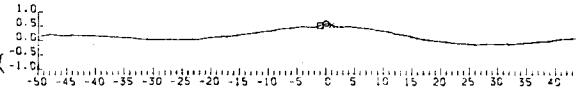
1-2点間の場合には、 $L = 44m$ 、 $T = 0.2秒$ であるから式(1)より $V = 220m/sec$ となる。この値は、A地区における突刺のせん断波速度(約250 m/sec)とよく一致する値である。

一方、Rでは $T = 0$ で最大値をとる。したがって、図4 相隣る2点の加速度記録の相互相関係数(NS成分)式(1)による伝播速度はみかけ上非常に大きくなり、事実上、地震動の加速度は鉛直下方から垂直に伝播していると考えられることができる。

以上は、EQ-10に対する検討結果であるが、このような結果は表1に示した12回の地震記録に対しておおむね共通している。



(i) 1-2点間(鉛直面内)



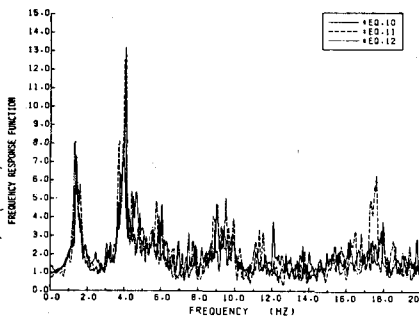
(ii) 3-5点間(水平面内)

5. 表層地盤の水平面内および鉛直面内の伝達特性

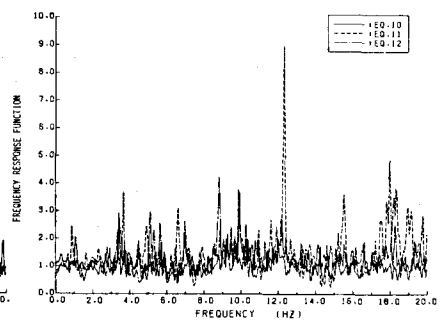
同一鉛直面内にある1-2点間の伝達関数(増幅率)をEQ-10、EQ-11、EQ-12の水平2成分ごとに求めると図5のようになる。増幅率は1.4Hzおよび4.5Hz付近に明瞭なピークを有している。A地区の平均的なせん断波速度は250 m/secであり、1.4Hzおよび4.5Hzのピークは、それぞれ表層地盤の1次および2次の固有振動数と考えることができる。これに対して、同一水平面内にある3-5点間の伝達関数(増幅率)は図6のようになる。増幅率は、図5の場合と比較すると全体として小さく、1.0程度となっている。しかしながら、振動数領域にわたって必ずしも一様という訳ではないようで、今後検討する必要がある。

6. 地盤のひびみ

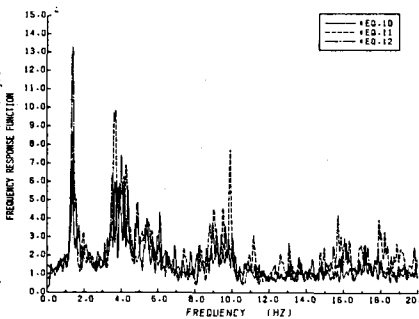
A地区の観測点を図7のように、4観測点から構成される4組の4面体(第1象限~第4象限と呼ぶ)に分割し、それぞれの4面体の内部では、地盤の変位が x 、 y 、 z の1次関数で表わされると仮定して地盤に生じる6成分のひびみ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$)を求めた。このように仮定すると、各4面体の内部ではひびみは計算上一定と求まる。一例として、EQ-10に対するひびみを図8に示す。



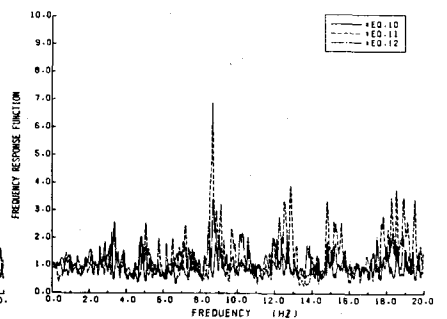
(i) NS-COMPONENT



(i) NS-COMPONENT



(ii) EW-COMPONENT



(ii) EW-COMPONENT

ひびみと地盤の応答の 図5 上下方向に相隣る1-2点間の伝達関数 図6 水平方向に相隣る4-6点間の伝達関数

関係を検討するために、いま、z軸に沿って水平方向に速度Vで伝播する波動があり、その変位振幅が調和関数で与えられる場合には、変位の時間微分と空間微分の互換性より、

$$\dot{\epsilon}_x = \partial d / \partial x = -1/V \cdot \partial d / \partial t = -V/V \quad (2)$$

となる。同様の関係は ϵ_y, δ_{xy} についても成立する。上述の計算結果をもとに、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \delta_{xy}$ の最大値とV(点2の速度とした)の最大値の関係を求めると図9のようなになる。ここで $V \geq 0.2 \text{ cm/sec}$ のデータから $\epsilon^{\text{MAX}} \sim V^{\text{MAX}}$ および $\delta_{xy}^{\text{MAX}} \sim V^{\text{MAX}}$ の関係を近似すると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} \epsilon^{\text{MAX}} &= (19V^{\text{MAX}} + 1) \times 10^{-6} \approx 20 \times 10^{-6} V^{\text{MAX}} \\ \delta_{xy}^{\text{MAX}} &= (21V^{\text{MAX}} + 1) \times 10^{-6} \approx 20 \times 10^{-6} V^{\text{MAX}} \end{aligned} \quad (3)$$

$\epsilon^{\text{MAX}} \sim V^{\text{MAX}}$ および $\delta_{xy}^{\text{MAX}} \sim V^{\text{MAX}}$ と式(3)に相当する係数は約 20×10^{-6} であるから、これより見かけ上の水平方向の伝播速度Vを求めると、

$$V \approx 1 / (20 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}) = 500 \text{ m/sec} \quad (4)$$

7. まとめ

(1) 水平方向に相隣る2点間の伝播速度はさめぬ大きく(検出できなかった)。今回対象としたような小規模地震では、表層地盤のせん断波速度程度で水平方向に伝播する波動は顕著ではない。

(2) 水平方向に相隣る2点間の伝播関係は全体として1.0に近く、同一平面上の地震動が相互によく一致していることを示している。しかし、詳細にみると振動数領域にわたって必ずしも一致という訳ではなく、今後の検討が必要とされる。

(3) 上記のように水平方向に伝播する波動は、はっきり検出できないが、地盤には6成分のひずみが生じる。このひずみと水平面内の粒子速度の関係を求めると式(4)のようなになる。この関係は、みかけ上500m/secの速さで波動が水平方向に伝播する際に生じるひずみに相当している。

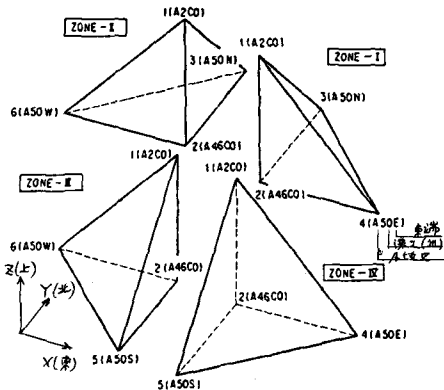


図7 ひずみの解析における座標系

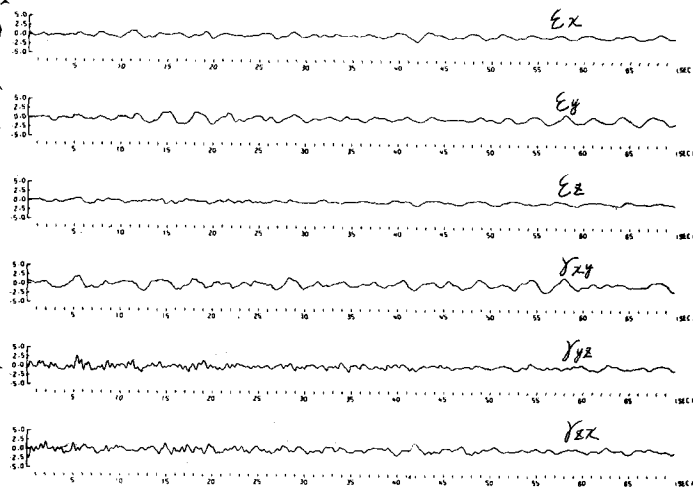


図8 EQ-10による6成分のひずみ (A地区、第IV象限)

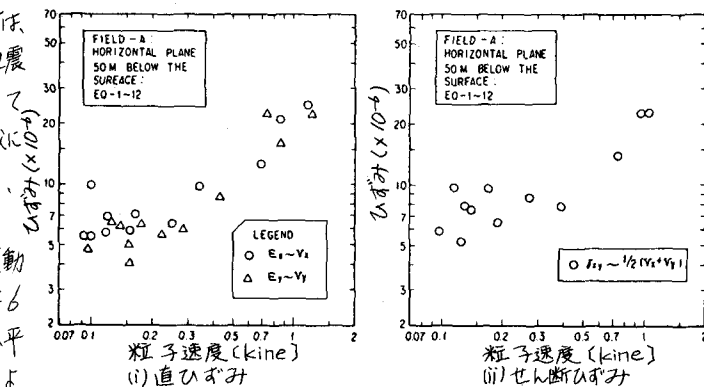


図9 ひずみと粒子速度の関係 (A地区、EQ-1~EQ-12)

参考文献 1) IAAE: Strong-Motion Earthquake Instrument Arrays, Proc. of International Workshop on Strong Motion Earthquake Instrument Arrays, Honolulu, Hawaii, 1978, 2) 大久保忠良他: 土木研究所における高密度強震観測計画および記録の解析, 第13回UJNR. 筑波, 1981.