

1. まえがき

地震学において徐々にではあるが解明された地球内部の地震情報について工学的な見地をみた場合、まだまだ利用されていない点が多い。たとえば土木、建築における耐震工学での設計入力地震波として最も考慮しなければならないのはS波であったが、そのS波の反射や屈折をくり返して干渉し合った複雑な波や新たに発生した表面波がどれほど地盤をゆすりどれほど構造物に影響を及ぼしているかというところまでは明確につかまえていない。だがP波やS波の後にやってくるその複雑な波が突はきわめて重要であると思われる。そこで耐震的構造設計を進める上で入力波となる自然地震波の性質をより細部にわたって把握することが急務であると考えた。著者は集積した膨大な地震記録の水平2鉛直1の3成分から地震動の軌跡を求め、その軌跡から運動のPatternを提案した⁽¹⁾。こうした地動軌跡のPatternを検討するにはどうしても三次元的な波動理論を用いて基本的な波動伝播の形態を熟知しておく必要がある。

ここでははじめに地震動の軌跡とそのPatternを示し、次にその軌跡から見出される基本波動(特に表面波)について分析したものを報告する。

2. 自然地震波から求めた地動軌跡のPattern

北海道内の気象庁各観測所(J・M・A・Station)で記録された地震波から、変位の記録3成分について一定の間隔でDigital量に読みとりNS-EW, UD-NSそしてUD-EWの座標にX-Y Plotterを使って描かせ地動の軌跡を求めた。地震動の軌跡の図から興味ある現象が見出された。その一つは図-1に示すような3種類のタイプの軌跡がよく見られるということである。Aは直線運動でまっすぐ往復運動するものと、ある角度をもって折れ曲るものそして交差してよじれるものが含まれる。いわゆる伸縮運動あるいは膨脹収縮運動も含まれる。BはRayleigh波に代表される楕円運動であるが水平動にもよく現われる。Cは円運動であるが一般に運動の形態として楕円運動から円運動へと移行して定常になる現象をよく見かける。これらの運動はその向きについても、軌道上を同じ向きに回転するものとねじれて8の字に運動するものと、軌道に沿って一定時間往復運動するものとに別けられる。

このように便宜的に分類したPatternの概念で地動の軌跡をみると各地震波についてその判別が容易になるという利点がある。

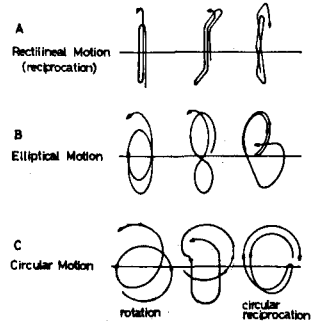


Fig-1 Pattern of Orbits

3. 基本波動

弾性波にはP波, S波の実体波とLove波Rayleigh波の表面波があり、これらをここでは基本波動として扱うことにする。自然地震波にはもちろんこれらの波が含まれているが、一目でどの波であるかの判断は下しにくい。工学的に最も重要なS波は卓越した支配的な波であり地表において表面波へと発展してゆくものがある。S波からLove波へSH波からRayleigh波へと移行してゆくが、実際の地震動におけるその推移の過程は充分には解明されていない。

自然地震波に含まれる表面波に関する変位式は図-2に示すような座標と弾性定数をもつ地盤においては次式のようになる。Love波;

$$V_L = \sum_{n=1}^{\infty} D_{Ln} \cos s_n z \cdot \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T_n} - \frac{x}{L_n} \right) \text{----- (1)}$$

$$V_L' = \sum_{n=1}^{\infty} D_{Ln} (\cos s_n H / e^{-s_n H}) \cos s_n z \cdot \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T_n} - \frac{x}{L_n} \right) \text{----- (2)}$$

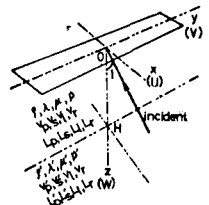


Fig-2 Coordinate of Layer

ただし、 $s_n^2 = k_n^2 - f_n^2$, $s_n'^2 = f_n^2 - k_n^2$, $k_n = 2n\pi/V_0 T_n$, $k_n' = 2n\pi/V_0' T_n$
 $k_n V_0 = k_n' V_0'$, $V_0 < V_0' < V_0'$ で f_n は Love 波の特性方程式

$$f_n = s_n \left\{ \frac{V_0^2}{V_0'^2} + \frac{\mu^2 V_0'^2}{\mu'^2 (V_0'^2 - V_0^2)} \tan^2 s_n H \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

より求まる。Rayleigh 波;

$$U_r = \sum_{n=1}^{\infty} D_{rn} F_{1n}(z) \sin 2n\pi \left(\frac{t}{T_n} - \frac{x}{L_{rn}} \right) \quad (4)$$

$$W_r = \sum_{n=1}^{\infty} D_{rn} F_{2n}(z) \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T_n} - \frac{x}{L_{rn}} \right) \quad (5)$$

ただし、

$$F_{1n}(z) = r_n k_n^2 \left\{ (2r_n^2 - 1) e^{-\alpha_n k_n z} - 2\alpha_n \beta_n e^{-\beta_n k_n z} \right\} \quad (6)$$

$$F_{2n}(z) = -\alpha_n k_n^3 \left\{ (2\beta_n^2 - 1) e^{-\alpha_n k_n z} - 2r_n^2 e^{-\beta_n k_n z} \right\} \quad (7)$$

で r_n は $(2r_n^2 - k_n^2)^2 - 4r_n^2 k_n^2 \alpha_n \beta_n = 0$ の根で、 $\alpha_n = \sqrt{\beta_n^2 - (L_{rn}/L_{rn})^2}$
 $\beta_n = \sqrt{\beta_n^2 - 1}$, $r_n > 1$, $\alpha_n > \beta_n$, $k_n = n\pi/L_{rn} = 2n\pi/\delta_n L_{rn}$ である。
 ここに D_{1n}, D_{2n} は定数で地震波の Fourier 級数に展開した各振幅の係数によって決まる。

4. 地動軌跡と表面波の計算

さて、図-3には三陸はるか沖に起った地震で表面波部分の軌跡を X-Y Plotter で書かせたものを示した。(a), (b)とも12秒間づつ1つの座標に書かせ、(a)は168秒間、(b)は84秒間の軌跡である。この地動軌跡の図をよくみると、(a),(b)両者にははっきりした相違があることが判る。つまり(a)の場合は地震波の進行方向と同一方向の成分が卓越しており、特に2,5および6においては楕円軌道がみられる。しかも鉛直動が水平動よりそれほど小さくないということは明らかに Rayleigh 型の波である。これに対して (b)は地震波の進行方向と直角方向の地動が卓越し、11, 12においては直線運動になっている。すなわち Love 波である。この Love 波に関する地動変位を次のような場合について計算してみた。

$$\rho = 4.6 \times 10^2 \text{ kg sec}^2 / \text{m}^4, \rho' = 5.1 \times 10^2 \text{ kg sec}^2 / \text{m}^4, v_0 = 900 \text{ m/sec}, v_0' = 1500 \text{ m/sec}, H = 10 \text{ km}$$

$$T_{11} = 5.0 \text{ sec (Spectrum 図より 求めた 卓越 周期)}$$

なるとき、式(1),(2)および(3)より

$$V_L = D_{L1} \cos s_1 z \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_1} - \frac{x}{L_{L1}} \right), V_L' = D_{L1} \left(\frac{\cos s_1 H}{e^{-s_1 H}} \right) \cos s_1 z \cos 2\pi \left(\frac{t}{T_1} - \frac{x}{L_{L1}} \right) \tau'$$

ここに、 $D_{L1} = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$ (No 11の水平振幅), $\mu = 3.72 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$, $\mu' = 11.5 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$
 $k_1 = 1.39 \times 10^3 \text{ rad/m}$, $k_1' = 0.83 \times 10^3 \text{ rad/m}$, $s_1 = 1.57 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$, $s_1' = 1.13 \times 10^{-4} \text{ rad/m}$,
 $f_1 = 1.38 \times 10^3 \text{ rad/m}$, $v_L = 910 \text{ m/sec}$, $L_{L1} = 4.55 \times 10^3 \text{ m}$

いま鉛直動を無視すれば図-4のような地動を示すことになる。卓越周期のみについてでなく一般にランダムな地震動についても計算し、また Rayleigh 波や P 波、S 波といった基本波動についても算出してあるが、それらは省略した。このように地動軌跡の Pattern を考慮し優勢な波群を基本波動に換算することにより、波動の状態が判ればより適切な耐震設計入力波を選出できるものと思われる。

1) 金子孝吉; 自然地震波の性状に関する研究 (その1), 土木学会第29回年次学術講演会講演集 I, 1974.10.

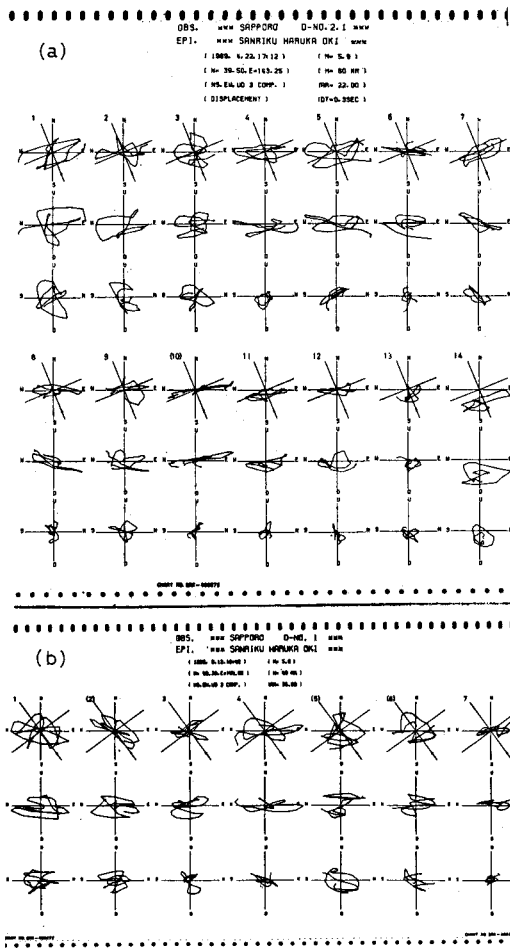


Fig-3 Orbits of Sanriku Haruka Oki Earthquake (Surface Waves)

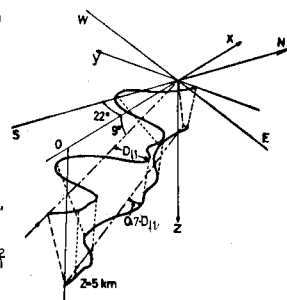


Fig-4 Love Wave (No.10)