

地震波の性状に関する研究 — 地震動の軌跡と方向性について —

北海道大学 正員 金子 孝吉

1 まえがき

近年わが国において災害科学の研究にたずさわる多くの学者ならびに研究機関の総合的な活躍は地上および地中で起る各種の地殻変動の観測の積み重ねにより地震予知という大目的を可能にしつつある。なかでも自然地震波のもつ情報は無限に存在する。直接触れることのできない地球内部の情報を全てについて解明してゆくことは不可能であるが、経験的に得た膨大な観測記録からの知識をもとに、地震学者は一步一步その目的を達成してきた。しかし、地震学において徐々にではあるが解明された情報を工学的に見地でもみた場合、まだまだ利用されていない点が多いのが現状である。

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(剪断波)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S波の後にやって来るその複雑な実体波や表面波が実はきわめて重要な影響を与えるものであると思われる。

そこで耐震的な構造設計を進める上で入力波となる自然地震波において、その波形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。著者は次の2つの観点

- 1) 全ての地震波には地震が発生するときの発震機構の情報、つまり岩石の破壊の規模、方向そして領域といったものの情報が消失しないで見残している。
- 2) ある都市ある地域において記録された地震波にはそこにおける何か固有の性質が含まれている。

があるのではないかとということから出発して、自然地震波の波形分析を行ってきた。

まず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。そしてさらに検討が加えられたこのPatternを如何に耐震工学の分野で利用してゆかが重要な課題となってくる。

ここでははじめに各種地震波動による地盤の変位特性について述べ、次に実際の自然地震波から得た地動軌跡のPatternについて論じて行く。

2 各種波動による地盤の振動特性

弾性の性質が一定な地盤において図-1に示すような x, y, z 座標系をもうけ、その方向の変位をそれぞれ U, V, W とする。地盤の弾性定数は ρ =単位重量密度; λ, μ =ラムの定数; ν =ポアソン比; v_p, v_s, v_L, v_R =P波, S波, Love波そしてRayleigh波の速度; L_p, L_s, L_L, L_R =それぞれの波の波長; T =波動の周期; H =表層地盤の厚さとし、下に第2層目の地盤を考えるとそれぞれにダッシュを付けて表わす。

各種波動の運動方程式は単弦振動の外力においてそれぞれ解析されているがここでは一般に進行方向を x 軸方向にとった場合のランダムな波動に対してフーリエ級数解として求めた。

1) P波

$$U_p = \sum_{p=1}^{\infty} D_{pm} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{pm}} \right) \quad (1)$$

2) SH波

$$V_h = \sum_{h=1}^{\infty} D_{hm} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{hm}} \right) \quad (2)$$

3) SV波

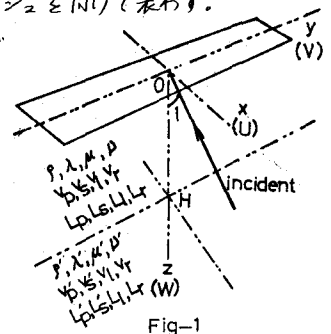


Fig-1

$$W_v = \sum_{n=1}^{\infty} D_{vn} \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{vn}} \right) \text{----- (4)}$$

4) Love 波

$$V_L = \sum_{n=1}^{\infty} D_{vn} \cos \delta_n \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{Ln}} \right) \text{----- (5)}$$

$$V_L' = \sum_{n=1}^{\infty} D_{vn} \frac{\cos \delta_n H}{e^{-\delta_n H}} \cos \delta_n \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{Ln}} \right) \text{----- (6)}$$

ただし, $S_n^2 = f_n^2 - k_n^2$, $S_n^2 = f_n^2 - k_n^2$, $k_n = 2n\pi / \nu_{hn} T_n$

$k_n = 2n\pi / \nu_{hn} T_n$, $k_n \nu_{hn} = k_n' \nu_{hn}'$, $\nu_{hn} < \nu_{Ln} < \nu_{hn}'$ で f_n

は Love 波の特性方程式より根として

$$f_n = S_n \left\{ \frac{\nu_{hn}^2}{\nu_{hn}^2 - \nu_{Ln}^2} + \frac{\mu_n^2}{\mu_n^2} \frac{\nu_{hn}^2}{\nu_{hn}^2 - \nu_{Ln}^2} \tan^2 \delta_n H \right\}^{\frac{1}{2}} \text{----- (7)}$$

で求まる。

5) Rayleigh 波

$$U_r = \sum_{n=1}^{\infty} D_{rn} F_{1n}(z) \sin 2n\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{rn}} \right) \text{----- (8)}$$

$$W_r = \sum_{n=1}^{\infty} D_{rn} F_{2n}(z) \cos 2n\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L_{rn}} \right) \text{----- (9)}$$

ただし,

$$F_{1n}(z) = \delta_n k_n^3 \{ (2\delta_n^2 - 1) e^{-\alpha_n k_n z} - 2\alpha_n \beta_n e^{-\beta_n k_n z} \} \text{----- (10)}$$

$$F_{2n}(z) = -\alpha_n k_n^3 \{ (2\delta_n^2 - 1) e^{-\alpha_n k_n z} - 2\delta_n^2 e^{-\delta_n k_n z} \} \text{----- (11)}$$

で δ_n は Rayleigh 波の変数 δ に関する特性方程式

$$(2\delta^2 - k^2)^2 - 4\delta^2 k^2 \alpha_n \beta_n = 0 \text{----- (12)}$$

の根である。そして $\delta_n > 1$, $\alpha_n = \sqrt{\delta_n^2 - (L_{2n}/L_{1n})^2}$,

$\beta_n = \sqrt{\delta_n^2 - 1}$, $\alpha_n > \beta_n$, $k_n = 2n\pi / L_{1n} = 2n\pi / \delta_n L_{2n}$,

$\nu_{2n} = \delta_n \nu_{1n}$ である。ここに $D_{1n}, D_{2n}, D_{3n}, D_{4n}$ および D_{5n}

は定数でランダム波外力のフーリエ級数に展開した各振

幅の係数によって決まる。以後これらの波形を地震波の基本波形として扱うことにする。

さらに各変位の式を適当に操作することによって地動の速度, 加速度, 曲率, 歪, 応力およびねじれ角などを算出することができる。三次元で考えた場合の弾性波の変位の式を示したが, この各波動に関してもう少し図形をもちいて説明を加えてみよう。

P 波について言えば図-2 に示すように, 周知のごとく進行方向と同じ方向に振動する粗密波であり, 図は x 方向と z 方向に進行する場合の例である。一般には入射方向は一定ではないが, 大体は入射角が小さく鉛直下方に近い場合がよく観測される。地動の軌跡は膨脹収縮の往復運動を示すが, 実際の地震波としては支配的でない。これに対して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。それは図-3 に示すごとく SH 波から Love 波へ, SV 波から Rayleigh 波へと移行してゆくが, 実際の地震波におけるその推移の過程は充分には解明されていない。ただ理想的な均質弾性地盤を考慮した場合理論的にはエネルギー保存則に基づいて,

$$\text{入射 S 波} = \text{進行 S 波} + \text{反射 S 波} + \text{表面波} \text{----- (13)}$$

が言える。実際には吸収あるいは逸散によるエネルギー消費があり, 後からや, くる別入射 S 波と干渉し合うため計算を困難にしている。

一つの例として地中から SV 波が入射してくる図-3・b の場合についてその性状を詳しく述べとみたい。H.M.Mooney 等は SV 波がいろいろな入

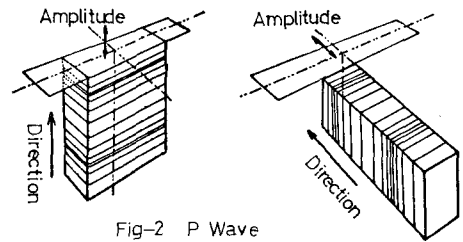


Fig-2 P Wave

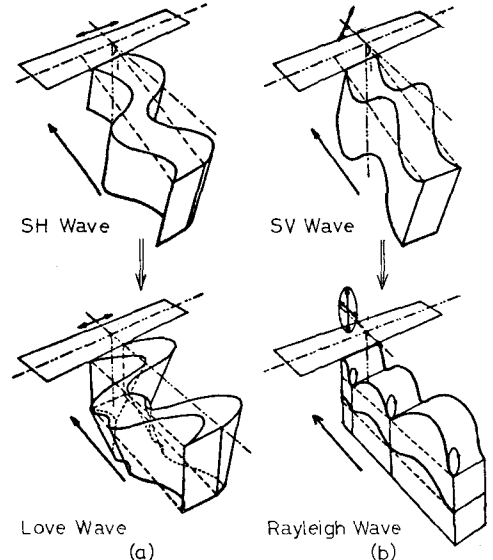


Fig-3 Change from S Wave to Surface Wave

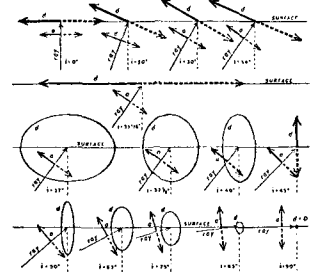


Fig-4 Displacement (Direction and Amplitude) Produced by SV Wave Incident at Angle i for $\nu=0.25$

By H.M.Mooney

射角をもって進行してくる場合の自由表面における地動の変位の方向と振幅を計算した。それは式(3), 式(8) および式(9)を用い式(13)を適用すれば算出できる。図 4はその変位の振幅と方向を示したものである。入射角 i が 0° のときは入射振幅 a が d に増幅して水平に直線的に往復運動する。入射角が増えてゆくに従って右のように方向が傾斜して振幅も増大してゆく。臨界角 i_c 36.16° のときは最大変位となり水平振動にもどってしまい、さらに i が増すと楕円軌動を描くようになり右下方に移行して変化する。いわゆるRayleigh波の発生領域になるわけだしに楕円の振幅が小さくなり 90° においてはSV波は消失している。このように単一のSV波でも入射角の相違によってこのように地表面における変位や方向が異なるわけである。このことは次の自然地震波の実際の観測地における地動軌跡を論ずる上で重要な手がかりを与えてくれた。

3 自然地震波から求めた地動軌跡とその方向性

一昨年来、北海道とその周辺に震源を有する地震波の記録を入手し、その記録の整理を行ってきた。観測地は道内の気象庁各観測所(JMAステーション)で記録はSMA C強震計や59タイプ電磁式地震計などでキャッチしたものである。今回は比較的震大距離の短いもので $M=4.5$ 以上の地震を扱うことにして、まず変位の記録を成分について一定の間隔でデジタル量に読みとりその値をNS-EW, NS-UDそしてEW-UDの座標にプロットして図-5に示すような地震動の軌跡を求めた。

その地震動の軌跡の図から興味ある現象がいくつか見いだされた。そのつは図-6に示すような種類のPatternが良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ており基本波といえばP波やS波に見られる。

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。言わばAと次のCとの中間にあたるもので判別がむずかしい。

Cは円運動である。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。

さて、札幌管区気象台における記録を例にとりて地動軌跡のPatternを調べてみよう。図-7はえりも岬沖の地震であるがS波の最大値の部分を含み

10秒間づつプロットしたものである。この40秒間の軌跡は非常に似たPatternが含まれている。そしてよくみるともう一つの重要な現象が見いだせる。それは振動の方向が右端に示した矢印の方向に卓越しているということである。これは発震時に推定される断層の移動方向とほぼ一致しているため震源の性質と考えたい。

次に1969年6月三陸はるか沖に起ったマグニチュード5.7の地震の場合を図-8に示してみた。

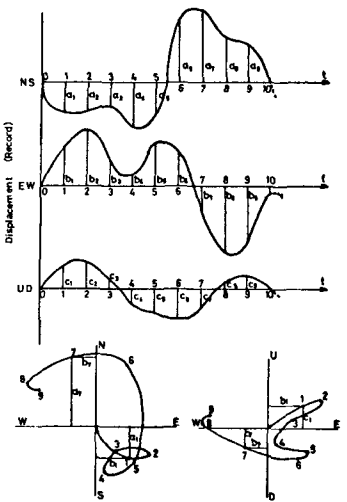


Fig-5 Orbits of Ground Motion

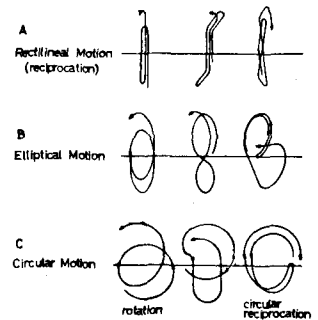


Fig-6 Pattern of Orbits

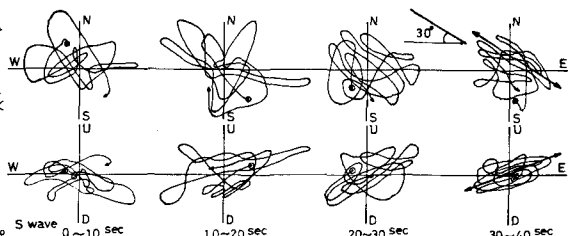


Fig-7 Erimo Misaki Oki Earthquake
(1971, 8.4.09:28, N $41^\circ 13'$, E $143^\circ 42'$, M=5.6, H=40-km)

S波の立ち上がりから150秒間を6秒づつの間隔でプロットしたものである。図から次のことが言える。

- 1) ある間隔に連続して同様のPatternが見られる。つまり(2), (3), (4)あるいは(6), (7), (8), (9)そしてまた(23), (24), (25)などはそれぞれ相似かよったPatternを持つている。
- 2) それらの優勢な波が消失して新たに優勢な波が来る境目は不規則な軌跡になっている。たとえば(1), (5), (22)などがそれである。
- 3) 図6で提出したPatternでみればAとしては(3), (10), (11), (20)などがあり, Bは(2), (7), (15), (25)などで, Cには(9)や(17)が相当するようと思われる。
- 4) 時間が経つにつれて往復してくる周期が長くなる。
- 5) (1), (2)から(9)ぐらいまでは周期2秒の比較的単純なSV波にあるが, (23), (24), (25)においては周期5秒のRayleigh波形の波に発展している。

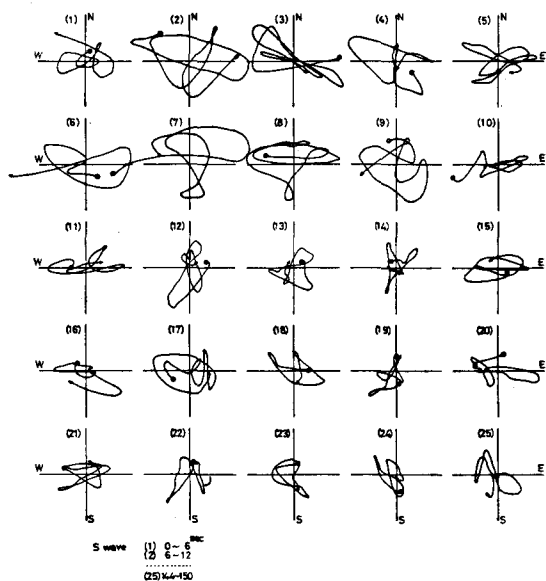


Fig-8 Sanriku Haruka Oki Earthquake
(1969, 6, 12, 16:42, N 40°20', E 144°02', M=5.7, H=40 km)

4 摘要と結論

自然地震波の記録から得られた地震動の軌跡から次に述べるような注目すべき特性があることが判った。

- 1) 地震動の軌跡は図6に表わしたような3つのPatternに分類される。それは直線的な伸縮運動あるいは往復運動と, Rayleigh波に代表される楕円運動そして定常な円運動である。
- 2) 運動の向きについて代表的な3つのタイプに分類できる。それは楕円や円の軌道上を同じ向きに回転するものと, わがれて運動するものと軌道に沿って往復運動するものがある。
- 3) 地震動に方向性がある。それは発生時の震源の至エネルギー放出の方向が現われる場合と地盤の特性が現われる場合がある。
- 4) 優勢な波は規則的な軌跡のPatternを持ち, 劣勢な波は複雑なPatternを示す。ただ優勢な波が必ずしも振幅が大きいとはかぎらない。

一見複雑にみえるランダムな地震波を分析してゆくと, 2で述べた基本的な各種波動が多重に合成された波であると解釈することができよう。なかじも優勢な波群は代表的な基本波動に近い場合が多い。図-7, 図-8の場合に拡大した地震波のなかのほんの一例を示したにすぎないが自然地震波の性状を知る貴重な手がかりを得た。さらに進め, 各都市各地域において基準となる地動Patternを考慮し, 優勢な波群と基本波動に換算することができれば, より適切な耐震設計入力波を選出することができるものと思われる。

なお本研究の進捗にあたり有益なるご助言を賜わ, た北工学部渡辺 昇教授に深謝の意を表します。

5 参考文献

- 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.
- 2) Harold M. Mooney; Seismic Shear Waves in Engineering, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974. 8.
- 3) 気象庁; 地震月報 (1969~1972)
- 4) 札幌管区気象台; 北海道地震月報 (1969~1972)
- 5) 1973年6月17日根室半島沖地震調査報告, 自然災害特別研究, 昭和48年度文部省科学研究費(1) 802029