

自然地震波の性状に関する研究 — 地動軌跡の離心率による表面波の検出について —

北海道大学 正員 金子孝吉

1. まえがき

土木・建築における耐震設計はおおよそ次のような過程で行なわれる。1 設計入力波の選定, 2 構造物—地盤系の力学的モデル化, 3 諸定数・諸係数の決定, 4 地震応答解析, 5 耐力および安全性の検討, 6 細部設計である。

近年, 解析手法の向上と電子計算機の利用とともにかなり精度よく取り扱われるようになってきたが, 最も重要な過程である1および5, 6に関してはいまだ十分には検討されていないのが現状である。そこで現在までは1と5, 6の関係をあまり考慮しないまま, 設計入力波として, Elcentro 地震波あるいは代表的な自然地震波の記録をそのまま使用している場合が多い。しかるに本来設計入力地震波をどのように決めるかという問題は2以下の過程と密接に関係するもので十分考慮した上で決定されるべきものである。特に地中埋設構造物の場合は加速度地震波による設計震度よりも変位設計震度を採用しなくてはならなくなってきた。

つまり従来の設計震度法は種々の点で改良され, 5, 6を含めて多くの角度から深く考察した新しい耐震設計法を確立する時期に来ていると思われる。そのために設計入力波となる自然地震波および地震動の性質をより細部にわたって把握してゆくことが要求される。

著者は一昨年から地震動の軌跡図を作成し, それを利用することによって設計入力波となるべき自然地震波の性状について検討してきた^{(1),(2)}。地震動の軌跡図から三次元的に色々な特性を見出すことができる。それには地震動の1 方向性, 2 周期性, 3 振幅特性, 4 軌跡の形状が挙げられ, これまで何度が検討されてきた^{(1),(2),(3),(4)}。

今回ここで取り上げたものはいままで考慮されていない, 地震動の5 軌跡の離心率, 6 面積特性, 7 表面波の検出についての問題である。こうした特性を検討することによって自然地震波の中に含まれている基本的なP波, S波および表面波を検出することも容易になった。

2. 地震動の軌跡の離心率

気象庁各気象台はじめ各研究機関の観測所で記録される自然地震波の数は膨大な量になる。その中から北海道とその周辺に震源を有する地震波の記録を数十個選んで, NS, EW およびUDの3成分について一定の時間間隔でデジタル量に読みとり NS-EW, UD-EW それで UD-NS の座標に X-Y Plotter を使って描かせ地震動の軌跡を

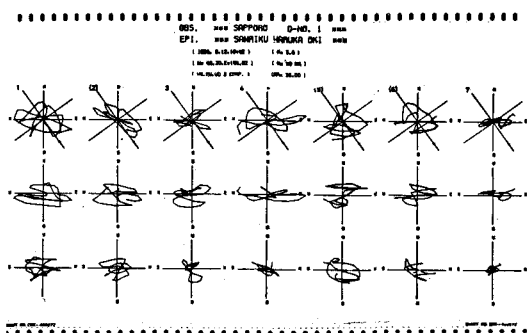


Fig-1 Particle Orbits of Sanriku Haruka Oki Earthquake

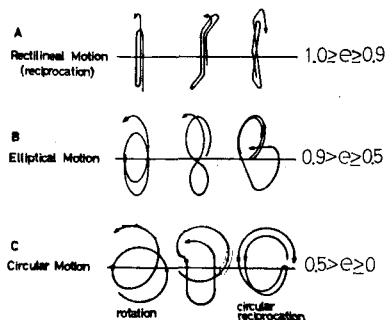


Fig 2 Pattern of Orbits

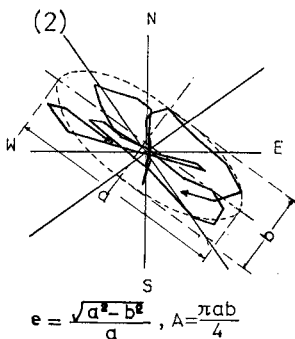


Fig 3 Eccentricity of Ellipse

求めた。図-1はその一例で、三陸はるか沖に起った地震で札幌管区気象台における変位記録のS波および表面波の部分で、0.3秒間のデジタル量を40個、つまり12秒間づつを1つの座標に描かせた84秒間の軌跡である。こうした軌跡の図から種々の地動特性を判定し、論ずることができる。たとえば図-2に示すような3種類のタイプの軌跡のPatternに別けることができるということを提案してきた。すなわちA：直線運動、往復運動，B：楕円運動，C：定常円運動であった。しかし、このA，BおよびCの判定はどうすればよいかという問題が残っていた。そこでそれぞれの軌跡を包含する楕円を考え、その離心率 e とその面積 A を計算してみることにした。

図-3は図-1中の軌跡No.2を取り出したもので軌跡を包含した楕円が点線で示される。離心率および楕円の面積は長径 a と短径 b とを使って $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$ ， $A = \pi ab/4$ で計算できよう。各地震波の軌跡図から離心率を計算した結果、図-2における軌跡のPatternはA： $1 \geq e \geq 0.9$ ，B： $0.9 > e \geq 0.5$ ，C： $0.5 > e \geq 0$ の範囲とするのが妥当であることが判った。

さて図-4は1968年十勝沖地震で青森県津軽大橋架設地点における変位記録の軌跡図である。0.05秒間隔のデジタル量30個、1.5秒間が1つの座標で初動より15秒経過したNo.11から60秒(No.40)までの45秒間の軌跡を示している。この軌跡図から離心率および面積量をそれぞれについて計算

し、グラフに表わしたものが図-5である。横軸には初動P波(No.1)から90秒(No.60)までの時間を取り、縦軸には離心率と面積量(斜線をほどこした図)を取っている。

図-4，図-5から次のようなことが言える。まず図-4の水平動NS-EWで判るようにちょうど東(E)方向より地震波が進行して来るが、No.25以後のS波部分は大体NS成分が卓越していることが判る。しかもUD-EW，UD-NSの軌跡では水平動が上下動よりも極端に卓越している。それは図-5の離心率の図でみるとS波から表面波にいたる部分ではほとんど e が0.9を越していることでも言える。P波部分に関しては離心率も $1.0 > e > 0.5$ と範囲が大きい。表面波部分になるともう1つ興味ある現象がみられる。それはある時間一様な形状が続き、離心率が一定値をとる場合がよくみられることである。

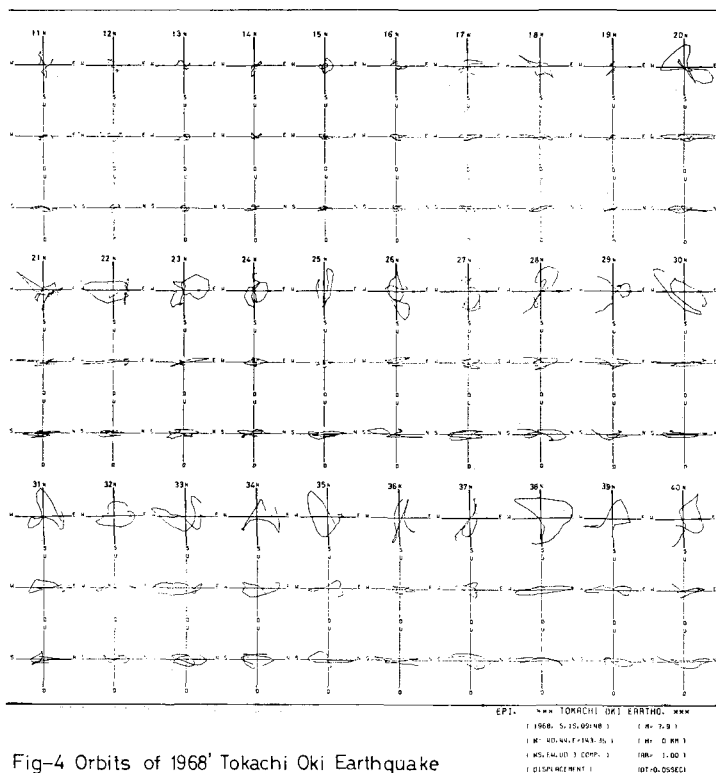


Fig-4 Orbits of 1968 Tokachi Oki Earthquake

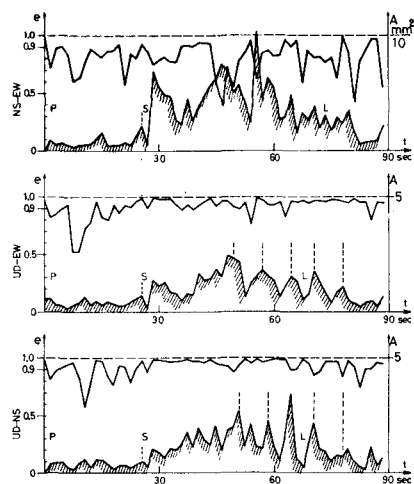


Fig-5 Eccentricity and Area

これは一様な波群が幾度もあとからあとから進行して来るものと解釈できるが、それは面積量の図をみると明白である。表面波部分ではほぼ一定の同期で波動のエネルギーが押し寄せて来る現象を示している。この離心率と面積量とは必ずしも相関があるわけではない。

3. 地震動の軌跡図による表面波の検出

一見複雑にみえるランダムな地震波を軌跡図をもとに分析してゆくと基本的な各種波動が多重に合成された波であり、なかでも優勢な波群は規則的な性質を持ち、基本波動に近いものが多いということが判ってきた。つまり従来から非常に判定しにくいとされていた表面波部分の波動についてより明確に基本的な表面波 (Rayleigh 波あるいは Love 波) を検出することができるといことである。

前記した青森県津軽大橋架設地点ではダイナマイト震源による人工地震波の測定をも行なっている⁽⁵⁾。その人工地震波記録から描いた軌跡図の一例を図-6に示す。N12°W方向から進行して来る波動は水平NS-EW座標でみると進行方向の成分が特に卓越しており、UD-NS座標でみるとSV波からRayleigh波へと楕円軌導で移行してゆく様子がはっきりと判る。そしてこの地点における地盤中に発生する理論的なRayleigh波の変位図(図-7)と比較し

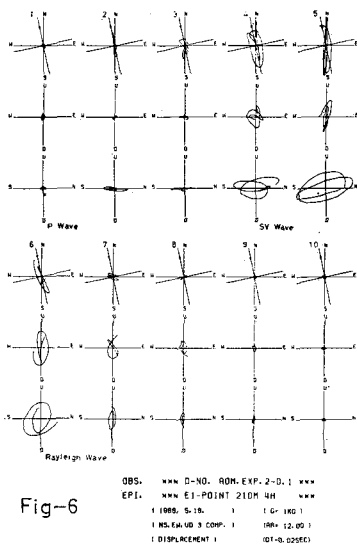


Fig-6

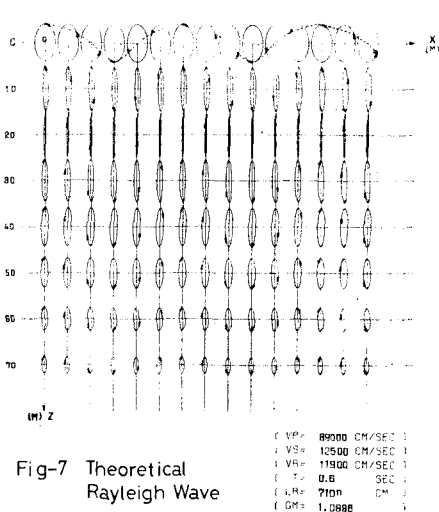


Fig-7 Theoretical Rayleigh Wave

てみると、地表面における軌跡の離心率は図-6のNo.6, 7, 8のUD-NS座標における場合を平均すれば $e=0.827$ で理論と全く一致する。このように人工地震の場合は表面波部分まで検出することができるが、それでは自然地震波の場合はどうであろうか。

図-8には三陸はるか沖に震源を有する地震で変位記録の表面波部分の軌跡図を示した。水平動NS-EWに示した地震波の進行方向の直線(矢印)とそれに直角方向の直線を基準として判断すれば、進行方向と直角方向の地震動が卓越し、No.10, 11においてはほとんど直線運動をしている。

さてもう一度図-1をふり返ってみてみると、それは全く逆に進行方向と同一方向の成分が卓越しており、特にNo.2, 5, 6においては楕円軌導がみられる。そこで図-1と図-8の軌跡の離心率を計算して図-9と図-10に示した。ただし、図-9には図-1で示した軌跡の前後の軌跡をも含めてプロットした。

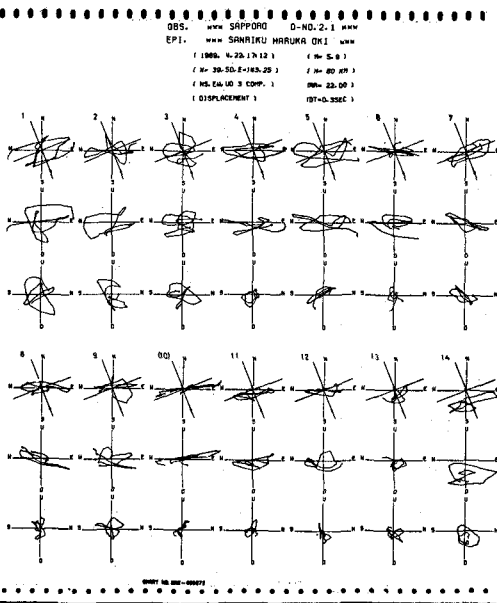


Fig-8 Orbits of Sanriku Haruka Oki Earthquake (Surface Waves)

この両方の図をよくみると
はっきした相違がある。それは Rayleigh 波タイプと Love 波タイプに区別されるということ、点線で囲んだある時間一定な部分について、前者は NS-EW で $e \approx 0.80$ 、進行方向成分を含む UD-NS において $e \approx 0.83$ という楕円運動をしており、後者は NS-EW で $e \approx 0.95$ 、進行方向と直角な UD-EW で $e \approx 0.95$ とほとんど直線的な運動をしている

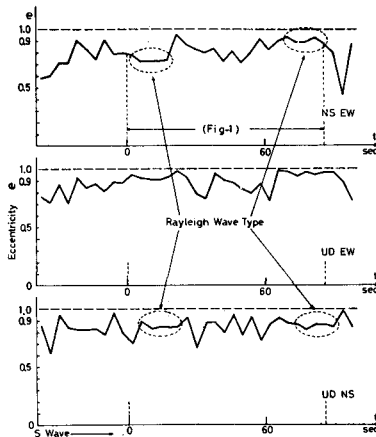


Fig-9 Eccentricity Sapporo D-No.1
Sanriku Haruka Oki

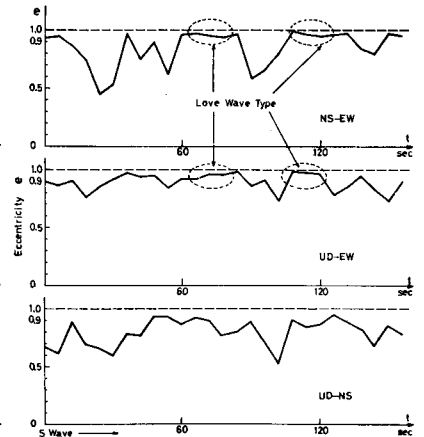


Fig-10-Eccentricity Sapporo D-No.2
Sanriku Haruka Oki

からである。ほとんど間違いなく Rayleigh 波と Love 波であるが、図-10の Love 波の場合について別の方法で確かめてみた。

北海道周辺において予想される 2 層地殻構造モデルを考え、理論的な Love 波の分散曲線を計算しておき、実際の自然地震波の位相速度を算出して適合させた。2 点以上の観測地点が震央と同一直線上にある場合（札幌、苫小牧、浦河と三陸はるか沖震央）、位相差を考慮すれば速度が計算できる。図-11は理論的な位相速度、群速度が周期と共に変化することを示している。図-8に用いた地震波の位相速度は周期 5 秒で 910 m/sec、周期 10 秒で 925 m/sec になり、ほぼ分散曲線上にのることが判った。つまり地表を伝わる表面波で Love 波であると言えるわけである。

4. あとがき

地震動の軌跡から楕円の離心率を計算し、それをもとに従来困難な問題とされていた表面波の検出を比較的容易に行なうことができた。また軌跡の面積量は地震波群のエネルギー量と関係があることが判明した。

このように自然地震波に含まれている表面波部分の波動とそのエネルギー量を検出することによって、耐震設計入力地震波をより適切に選択することが可能になる。今後は定量化された自然地震波の各種の特性を採用した耐震構造物の安全性の検討が急がれる。

本研究における計算は全て北大大型計算機センター FACOM 230-75 を使用した。

なお本研究の進行にあたり有益なるご助言を賜った北大工学部 渡辺 昇教授 に感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 金子孝吉; 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 —, 土木学会北海道支部研究発表論文集, 第 21 号, 1995. 2.
- 2) 金子孝吉; 自然地震波の性状に関する研究 (その 2) — 地震動の軌跡と基本波動 —, 土木学会第 30 回年次学術講演会講演集 I, 1995. 10.
- 3) 小林啓美他; 地震基盤における地震動の性質, Proc. of the 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1995. 11.
- 4) 小林啓美他; 地震動の水平面内における方向性について, Proc. of the 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1995. 11.
- 5) 渡辺 昇他; 自然地震波と人工地震波の性質の比較「橋梁と基礎」, 1972. 6.

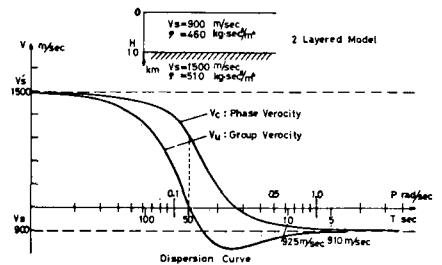


Fig-11 Dispersion Curve of Love Waves