

京都大学工学部 正 ○野田 茂

京都大学工学部 正 山田善一

石川島播磨重工業 正 香川尚史

1. はじめに

ライフライン解析などのために相対地盤震動を的確に把握することは耐震工学上重要なことである。現状では地盤ひずみの実測データがほとんどないことを勘案すれば、高密度アレイ観測システムはこの問題に有益かもしれない。地盤震動の評価に当っては、強震記録からの推定、理論的方法あるいは両者の折衷的な半実験的方法をも加味した形で予測するのが望ましいであろう。^{1)~3)} 本報告では、表面波による地盤ひずみなどは純理論的に扱えるという立場で、断層震源モデルと表面波励起理論より、相対地盤震動を求める。このプロセスからモード数の選択に関する照査を行い、最後に1971年 San Fernando 地震時の推定断層パラメータを用いて、Vanowen Street における表面波の再現を試み、強震記録から求められたひずみと比較検討しているのが本報告の特徴である。

2. 相対地盤震動に関する理論スペクトル

ここでは、半無限平行媒質中の点震源により励起された表面波を震源モデルと正規モード理論^{4), 5)}より取り扱う。図1は震源の模式図と座標系であり、符号は図中の規約に従う。点震源Sに働くダブルカップルにより、地表面下Zの深さにおける動径方向のRayleigh波の水平変位スペクトルは、波動の伝播過程における減衰を考慮すれば、

$$S_R(\omega, r, \theta, z) = \sum_{j=1}^{N_R(\omega)} \frac{M(\omega) V_{jR}(\omega, z) \varepsilon_j(\omega, z) \chi_{jR}(\omega, h, \theta) k_{jR}(\omega)^{-1/2}}{2 C_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega) A_{jR}(\omega) (2\pi r)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\lambda \{ k_{jR}(\omega) r + \frac{3\pi}{4} \} - \frac{\omega r}{2 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)} \right] = \sum_{j=1}^{N_R(\omega)} S_{Rj}(\omega, r, \theta, z) \quad (1)$$

となる。これを応用すれば、地点P(r, θ, z)から動径方向にΔr/2 (Δr = 相関距離) だけ相離れた2地点の相対運動に伴う、相対変位スペクトルΔU_R(Δr, ω, r, θ, z)と平均直ひずみスペクトル $\bar{\varepsilon}_r(\Delta r, \omega, r, \theta, z)$ は、各々、

$$\Delta U_R(\Delta r, \omega, r, \theta, z) = \sum_{j=1}^{N_R(\omega)} S_{Rj}(\omega, r, \theta, z) \left\{ \cos(k_{jR}(\omega) \frac{\Delta r}{2}) \left\{ (1 - \frac{\Delta r}{4r}) e^{-\frac{\omega \Delta r}{4 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)}} - (1 + \frac{\Delta r}{4r}) e^{-\frac{\omega \Delta r}{4 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)}} \right\} - \lambda \sin(k_{jR}(\omega) \frac{\Delta r}{2}) \left\{ (1 - \frac{\Delta r}{4r}) e^{-\frac{\omega \Delta r}{4 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)}} + (1 + \frac{\Delta r}{4r}) e^{-\frac{\omega \Delta r}{4 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)}} \right\} \right\} \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_r(\Delta r, \omega, r, \theta, z) = \Delta U_R(\Delta r, \omega, r, \theta, z) / \Delta r \quad (3)$$

である。一方、P'での局所ひずみスペクトルは、 $\varepsilon_r(t, r, \theta, z) = \frac{\partial u_r(t, r, \theta, z)}{\partial r}$ より、次式で示される。

$$\varepsilon_r(\omega, r, \theta, z) = \sum_{j=1}^{N_R(\omega)} S_{Rj}(\omega, r, \theta, z) \left\{ -\frac{1}{2r} - \frac{\omega}{2 Q_{jR}(\omega) U_{jR}(\omega)} - i k_{jR}(\omega) \right\} \quad (4)$$

式(1)~(4)に逆フーリエ変換を行って、時間軸上の波形が得られる。

ただし、 k_{jR} , C_{jR} , U_{jR} , $(2C_{jR}U_{jR}A_{jR})^{-1}$, Q_{jR} は、各々、波数、位相速度、群速度、Medium Response, Q値を、 V_{jR} , ε_j は深さzにおける上下方向の変位モード、水平動と上下動の振幅比である。 χ_{jR} は図1のパラメータλ, δ, φ, h, θ他で決まる方位特性関数を、 $N_R(\omega)$ は周波数ωにおいて重ね合すべきモード数である。

なお、ひずみ波形は中振動数成分が卓越するため、その推定に当っては食い違い時間関数の配慮が不可欠である。本報告では、stick-slip型の断層運動に対応して考え出された修正ランフ関数 $M(\omega)$ ⁵⁾ (M_0 = 地震モーメント, τ = ライズタイム)を採用した。

$$M(\omega) = \frac{M_0}{\omega} \frac{\sin(\frac{\omega\tau}{2})}{\frac{\omega\tau}{2}} \frac{\exp\{-\lambda(\frac{\omega\tau}{2} + \frac{\pi}{2})\}}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (5)$$

ただし、 $\omega_n = \frac{2\pi n}{\tau}$ (ここではn = 1)

Love波伝播に伴う接線方向の地動 u_θ , 相対変位 Δu_L , せん断ひずみ $\gamma_{\theta\theta}$ も同

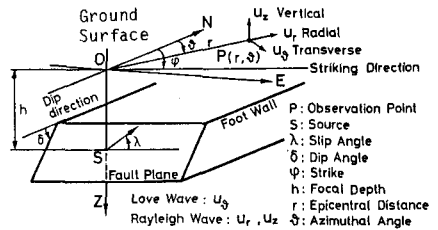


図1 断層の模式図と座標系

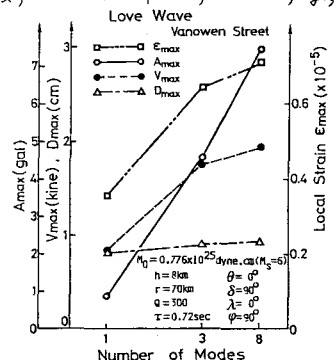


図2 モード数がLove波最大地動に与える影響(鉛直横ずれ断層)

様の手続で求められ、想定した震源と地下構造に対して、地盤内の震動振幅の鉛直方向分布が推定可能である。

3. 1971 年 San Fernando 断層に対する理論地震動

本報告は主に Vanowen Street 地点に注目し、同地点の地下構造⁶⁾を1次近似的に震源から対象地点まで平行層でモデル化している。なお、地盤震動は地表面に限定して検討した。

3. 1. モードによる影響⁸⁾ 図2は、図中のパラメーター($M_0=6$, $h=8\text{km}$, $r=70\text{km}$, $\theta=0^\circ$, $c=0.72\text{sec}$, $Q=300$)から鉛直左横ずれ断層に対して求めた、Love 波による最大地動($E_{\max}$, $D_{\max}$, $V_{\max}$, $A_{\max}$)のモード数による効果を示している。変位については基本モードである程度評価できるが、高振動数域の加速度は7次高次以上のモードを考慮する必要があるかもしれない。局部ひずみは地盤速度と同一の挙動を示している。ここで要求されるのは相対変位やひずみであり、同図から7次高次モードに対する結果を一応の目安として考えても大過ないと思われる。以後の計算では、ひずみ解析の精度を逸脱しない範囲で $\sum_{N_r/4 \leq \omega \leq 10\pi} N_r(\omega) = 8$ を用いた。

3. 2. 実地震記録との対比 断層の線状破壊過程を考慮するために、

式(1)~(4)の算定に当っては
$$\frac{\sin X_{JR}}{X_{JR}} \frac{\sin Y_{JR}}{Y_{JR}} e^{-\lambda(X_{JR}+Y_{JR})} \quad (6)$$
 各項に式(6)を掛け合せた。

ここで、 L, W, V_R は断層面 $X_{JR} = L \left\{ \frac{\omega}{2V_R} - k_{JR}(\omega) \frac{\cos(\varphi-\theta)}{2} \right\}$, $Y_{JR} = \frac{W k_{JR}(\omega) \cos \delta \sin(\theta-\varphi)}{2}$ の長さ
と幅、破壊伝播速度である。断層の幾何と震源パラメーター他には、Heaton⁷⁾が推定した初期破壊点を含む Lower Segment の値を、著者らが若干修正して用いた(図4~7参照)。Dip 成分の食い違いが卓越するため、振幅方位分布から Vanowen Street の Rayleigh 波は大きく励起される。複雑な震源過程を単純にモデル化したことにも無理があるが、図3の理論波形は実地震記録に類似している。図4と5は、震央と Vanowen Street を結ぶ動径上における Rayleigh 波と Love 波の最大地動のアテニュエーション特性である。地下構造の不均一性と波動の減衰効果にもよるが、観測点($r=25\text{km}$)における Rayleigh 波による局部ひずみは土岐¹⁾が強震記録より求めた値 1.9×10^{-4} に匹敵する。同地点での Love 波によるひずみは推定値 1.3×10^{-4} と異なるが、これは地動が小さいこと、強震記録からの実体波と表面波の分離および Love 波と Rayleigh 波の識別が困難なことの他に、断層面上での破壊の不均一な成長過程が原因であろう。図6と7は、この地点で相関距離に対して求めた相対変位と平均ひずみ($\Delta r=0.1\text{km}$ における $\bar{\epsilon}_0$ と Δu で基準化)の変化を示している。

4. 参考文献

- 1) Toki: Proc. of U.S.-Japan Seminar on Earthq. Engrg. Res. with Emphasis on Lifeline Systems, pp.15-28, 1976.11.
- 2) 高田, Wright: 土木学会論文報告集, No. 299, pp.13-21, 1980.7.
- 3) Shinozuka, Kameda and Koike: ASME, 80-C2/PVP-69, 1980.
- 4) Tsai and Aki: JGR, Vol. 75, No. 29, pp.5729-5743, 1970.10.
- 5) Ben-Menahem and Singh: Springer-Verlag, 1981.
- 6) Duke, Johnson, Kharraz, Campbell and Malpiede: UCLA-ENG-7206, 1971.12.
- 7) Heaton and Helmberger: BSSA, Vol. 69, No. 5, pp.1311-1341, 1979.10.

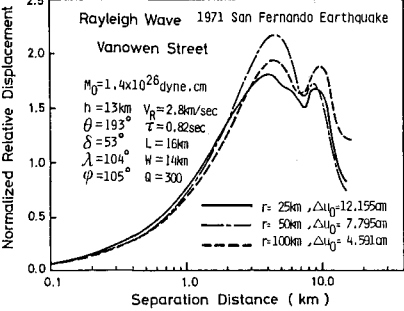


図6 相関距離と相対変位(Rayleigh波)

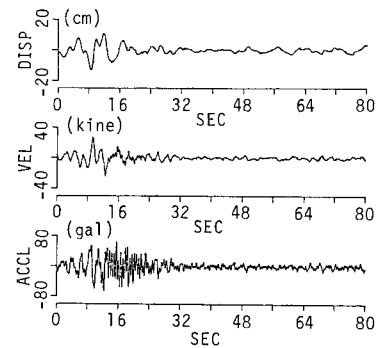


図3 Vanowen Streetでの理論Rayleigh波($r=25\text{km}$, $\theta=193^\circ$)

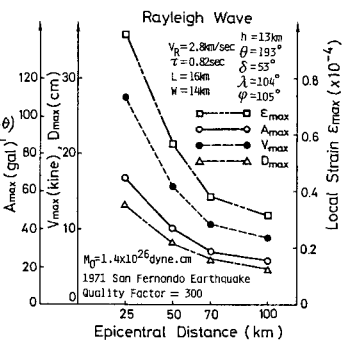


図4 Rayleigh波のアテニュエーション特性

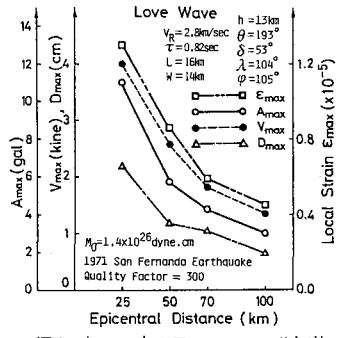


図5 Love波のアテニュエーション特性

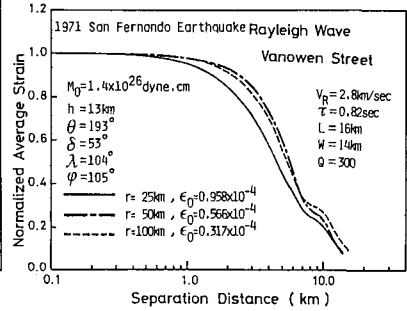


図7 相関距離と平均ひずみ(Rayleigh波)