

地震断層を考慮した強震動加速度波形の作成

大角恒雄¹・原田 隆典²・奥倉英世³

¹正会員 日本工営株式会社 情報システム部 (T300-12 茨城県稲敷郡茎崎町高崎 5-4)

²正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科 (T889-21 宮崎市学園木花台西 1-1)

³正会員 工修 日本シビックコンサルタント株式会社 (元宮崎大学大学院学生) (T305 東京都荒川区西日暮里 2-26-2 日暮里 UC ビル 6F)

1995年兵庫県南部地震(M7.2)による1G近くの大加速度を持つ長周期(1-2秒)パルスの揺れに多くの技術者が驚かされたように、このような揺れに関する概略的知識はこれまでの耐震工学の分野では乏しかった。本研究では、周期約1秒までの長周期地震波を運動学的断層モデルから作成し、短周期地震波は断層特性を考慮した確率論的方法から作成することとし、これによって長周期から短周期領域をカバーした強震動加速度波形を作成する。本方法の特長を例示するために、1966年パークフィールド地震(M5.5)による断層近傍での加速度記録を再現した。

Key Words: synthesis, strong ground motions, kinematic source model, stochastic simulation method, frequency wavenumber spectrum, wave propagation in stratified media

1. まえがき

観測記録の豊富な遠距離地震による強震動予測に比べ、記録の希薄な断層近傍における強震動予測では、経験的方法のみでは誤りや見逃しをする確率が大いと考えられる。また、観測記録が豊富であるといっても観測記録の歴史は65年程度しかなく、大被害地震による加速度波形の記録は極めて少ないのである。したがって、経験的方法のみに頼るのは危険である。このため理論的方法を援用して、どのような揺れが起こりえるのかをシミュレーションによって確認しながら、抜かりなく揺れの特徴を把握しておかなければならない。

記録が希薄といえども、横ずれ断層による強震動記録は蓄積されてきている。これらの記録から、断層直交方向の揺れに大きな長周期パルス(約1秒以上)が、特に断層破壊伝播方向の断層近傍において発達することがわかってきている。1995年兵庫県南部地震による揺れの特徴も同じであり、また理論的検討結果と合わせて考えると、このような揺れは横ずれ断層による揺れの普遍的特徴であるといえるのかもしれない。

したがって、観測記録が希薄であっても、理論的方法の援用で実務設計における入力地震動特性の把握が可能であると思われる。ある活断層が動いたときの揺れを前もって完全に予測することは不可能で

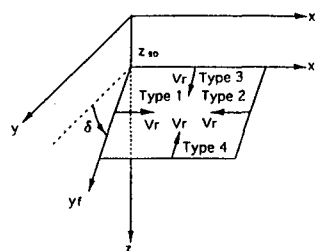


Fig.1 座標軸と断層破壊伝播方向の4タイプ

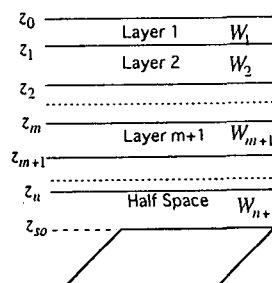


Fig.2 断層を含む半無限地盤上の水平成層地盤

あるが、揺れの特徴等の概略的把握は可能であろう。揺れの概略的把握であっても設計地震荷重の評価には十分に有用である。なぜならば、1995年兵庫県南部地震による1G近くの大加速度を持つ長周期(1-2秒)パルスの揺れに耐震工学を専門とする多くの技術者が驚かされたことから推察されるように、このような揺れの概略的把握はこれまでの耐震工学の分野ではなされていなかったからである。理論的方法には難解な数式が現れ、それらには多くのモデルパラメータが介在するため、実務では最終的に求めら

表 1a 厳密解との比較のための断層パラメータ

Seismic Moment	$M_0 = 2.0 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$ ($2.0 \times 10^{27} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$)
Rise Time of the Ramp Function	$\tau = 0.2 \text{ sec}$
Length of Fault	$L = 52000 \text{ m}$
Width of Fault	$W = 0.5 \cdot L \text{ m}$
Velocity of Rupture	$v_r = 0.9 \cdot C_s \text{ m/sec}$
Depth of Upper Edge of Fault	$z_{10} = 6000 \text{ m}$
Strike Angle	$\phi = 0^\circ$
Dip Angle	$\delta = 0^\circ$
Slip Angle	$\lambda = 0^\circ$
Slip Type	Type 1

表 1b 厳密解との比較のための離散化パラメータ

Cutoff frequency $\omega_{\max}(\text{rad/sec})$	6.0
Cutoff x-wavenumber $\kappa_{x\max}(\text{rad/m})$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
Cutoff y-wavenumber $\kappa_{y\max}(\text{rad/m})$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
N_ω	256
N_κ	256
$\Delta t \text{ (sec)}$	0.524
$\Delta x \text{ (m)}$	785
$\Delta y \text{ (m)}$	785

れる地震動波形の信頼性が問題にされがちであるが、これを解決するには理論的方法を利用して、方法の特性を理解するしかない。解析事例の蓄積によってモデルパラメータの推定も容易になる。

理論的方法の利点を示すため、ここでは、周期 1 秒までの長周期地震動を運動学的断層モデルから作成し、周期 0.1 秒から 1 秒までの短周期地震動を半経験的な確率論的モデルから作り、これらをたし合わせて 1966 年パークフィールド地震 (約 M5.5) による断層近傍の地震動記録を再現した例を示す。

本研究では、運動学的断層モデルから放出される地震波動場および水平成層地盤内の地震波動場に対する解析解を導き、数値計算上の解の安定性とプログラミングの単純化を実現した。

2. 運動学的断層モデルによる地震波動場の定式化と検証の概要

本研究では、図 1 に示すように断層長さ方向に x 軸を取った直交座標系での地震波動場の解析解を求めた。断層上端の深さを z_{10} 、断層面の深さ方向への傾き角 (dip angle) を δ とし、図 1 に Type1、Type2 と示すように断層長さ方向に一樣な破壊速度 v_r で破壊する 2 つの断層破壊伝播のタイプと、Type3、Type4 と示す断層幅方向に一樣な破壊伝播をするタイプの合計 4 つの断層破壊伝播形式を想定した。断層面のすべり方向は、図 1 の手前側の断層面が断層長さ軸から半時計回りに取った方向 λ (slip directional angle) に $D/2$ すべり、奥側の断層面が λ と逆向きに $D/2$ すべるものとした。ここに、 D は断層面の両側でのすべり量 (不連続変位量) である。本研究では、断層のすべり時間関数は、立ち上がり時間 (rise time) τ を持つ傾斜関数を用いた。

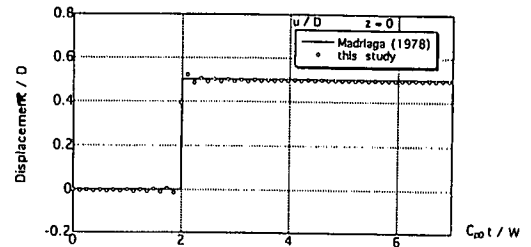


Fig.3a Madariaga(1978) の厳密解との比較 (断層面上の中央点の x 軸方向変位)

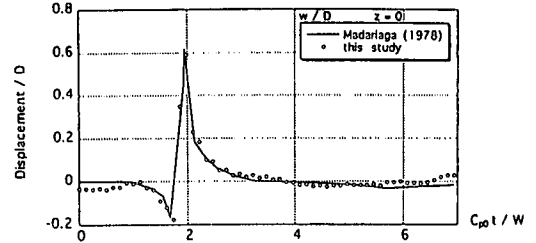


Fig.3b Madariaga(1978) の厳密解との比較 (断層面上の中央点の z 軸方向変位)

3重フーリエ変換を用いて振動数-波数領域 (ω - κ) における地震波動場の解析解を導いた。解析解は無限地盤および半無限地盤に対して求めた。表層地盤の影響は、図 2 のような水平成層地盤を仮定して、次式の剛性方程式を解いて求めた。

$$K(\kappa, \omega) u_0(\kappa, \omega) = q(\kappa, \omega) \quad (1)$$

ここに、 $\kappa = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$ である。2層の場合 ($n=2$) について剛性マトリックスを示すと以下になる。

$$K(\kappa, \omega) = \begin{bmatrix} K_{11}^1 & K_{12}^1 & & \\ K_{21}^1 & K_{22}^1 + K_{11}^2 & K_{12}^2 & \\ & K_{21}^2 & K_{22}^2 + K_{Half} & \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$u_0(\kappa, \omega) = (u(z_0), u(z_1), u(z_2))^T \quad (2b)$$

$$q(\kappa, \omega) = (0, 0, K_{Half} u_{free}(z_2))^T \quad (2c)$$

ここに、 $u_{free}(z_n)$ は、断層を含む半無限地盤の地表面変位を表す。また、 K_{Half} は半無限地盤の剛性マトリックスを、 K_{ij}^{m+1} は水平成層地盤の第 $m+1$ 層の剛性マトリックスを表す。これらの剛性マトリックスの解析解を SH 波と P-SV 波について求めた。

上式の剛性方程式を解いて得られる地表面変位 $u_0(\kappa, z_0)$ を次式に代入し、直交座標 (x, y, z) における地表面変位 $u(z_0) = u(\kappa_x, \kappa_y, z_0, \omega)$ が得られる。

$$\begin{cases} u(z_0) = \frac{\kappa_x}{\kappa} u_0(\kappa, z_0) - \frac{\kappa_y}{\kappa} v_0(\kappa, z_0) \\ v(z_0) = \frac{\kappa_y}{\kappa} u_0(\kappa, z_0) + \frac{\kappa_x}{\kappa} v_0(\kappa, z_0) \\ w(z_0) = w_0(\kappa, z_0) \end{cases} \quad (3)$$

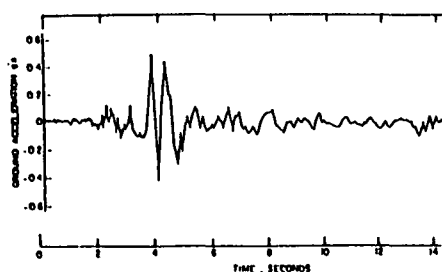


Fig.4a Parkfield 地震による断層直交方向の観測加速度波形 (Housner and Trifunac, 1967)

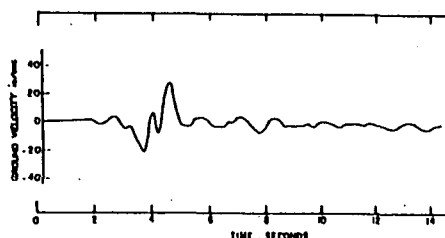


Fig.4b Parkfield 地震による断層直交方向の速度波形 (Housner and Trifunac, 1967)

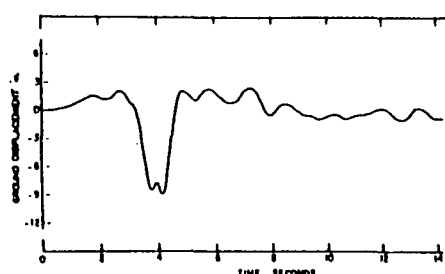


Fig.4c Parkfield 地震による断層直交方向の変位波形 (Housner and Trifunac, 1967)

地表の任意地点 $x = (x, y)$ の変位時刻歴 $u(x, z_0, t)$ は、次式の 3 重フーリエ変換によって計算した。

$$u(x, z_0, t) = \frac{1}{8\pi^3} \iiint u(\kappa, z_0, \omega) e^{i[\kappa \cdot x - \omega t]} d\kappa d\omega \quad (4)$$

上式の 3 重フーリエ変換は、次式のように振動数-波数領域を離散化した離散化フーリエ変換と FFT により効率的に実行した。

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{max}}{N_\omega}, \Delta\kappa_x = \frac{\kappa_{xmax}}{N_\kappa}, \Delta\kappa_y = \frac{\kappa_{ymax}}{N_\kappa} \quad (5a)$$

時空間での離散化は次式に従った。

$$\Delta t = \frac{2\pi}{2\omega_{max}}, \Delta x = \frac{2\pi}{2\kappa_{xmax}}, \Delta y = \frac{2\pi}{2\kappa_{ymax}} \quad (5b)$$

以上の定式化と解析解および計算プログラムの検証のために、無限地盤中の長方形断層が x 軸方向に

一様な破壊をした時の断層面上の断層中央点の変位波形を計算し、Madariaga(1978) の厳密解と比較した。この場合、 y 軸方向の変位は零なので、 x 軸と z 軸方向の変位波形を図 3 に示す。よい一致が得られている。なお、表 1a, b に震源パラメータ、離散化パラメータを示す。無限地盤の物性値としては、P 波速度 $= 6.15(km/s)$ 、S 波速度 $= 3.55(km/s)$ 、密度 $= 2.8(t/m^3)$ を用いた。

半無限地盤や表層地盤の地表面変位波形についても既存の数値計算例と比較して本研究の定式化や解析解および計算プログラムの確認をした。

3. 運動学的断層モデルと確率論的モデルによる 1966 年 Parkfield 地震 (M5.5) による断層近傍加速度波形の再現

1966 年 Parkfield 地震 (M5.5) の際に、断層破壊終了付近から約 80m 地点の地表面 (Station 2) で、およそ断層直交方向の加速度記録とそれから求めた速度と変位波形が得られている (Housner and Trifunac, 1967)。図 4 はそれらの波形を示す。断層パラメータは、Bouchon(1979) の研究から引用し、表 2a に示すものを用いた。地盤構造としては、断層を含む半無限地盤上に 1 層の表層地盤を考慮した。表層の P 波速度 $= 2.8(km/s)$ 、S 波速度 $= 1.6(km/s)$ 、密度 $= 2.3(t/m^3)$ 、Q 値 $= 150$ 、半無限地盤の P 波速度 $= 6.0(km/s)$ 、S 波速度 $= 3.5(km/s)$ 、密度 $= 2.8(t/m^3)$ 、Q 値 $= 400$ を仮定した。表 2b は、離散化パラメータを示す。図 5 は、運動学的断層モデルから計算された周期 1.25 秒以下の加速度、速度、変位波形を示す。図 6 には、周期 0.1 秒から 1.25 秒までの短周期地震動を半経験的な確率論的モデル

表 2a Parkfield 地震の断層パラメータ

Seismic Moment	$M_0 = 2.230 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}$ ($2.230 \times 10^{24} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$)
Rise Time of the Ramp Function	$\tau = 0.3 \text{ sec}$
Length of Fault	$L = 8500 \text{ m}$
Width of Fault	$W = 8500 \text{ m}$
Velocity of Rupture	$v_r = 2200 \text{ m/sec}$
Depth of Upper Edge of Fault	$z_0 = 0 \text{ m}$
Strike Angle	$\phi = 0^\circ$
Dip Angle	$\delta = 90^\circ$
Slip Angle	$\lambda = 0^\circ$
Slip Type	Type 1

表 2b Parkfield 地震の離散化パラメータ

Cutoff frequency $\omega_{max}(\text{rad/sec})$	12.0
Cutoff x-wavenumber $\kappa_{xmax}(\text{rad/m})$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
Cutoff y-wavenumber $\kappa_{ymax}(\text{rad/m})$	$\pm 4.0 \times 10^{-3}$
N_ω	256
N_κ	256
$\Delta t \text{ (sec)}$	0.262
$\Delta x \text{ (m)}$	785
$\Delta y \text{ (m)}$	785

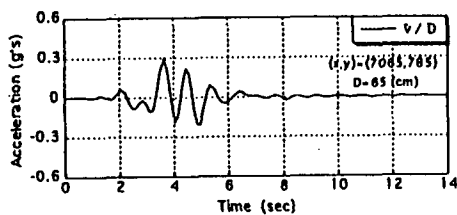


Fig.5a 断層モデルによる加速度波形 (0-1.25Hz)

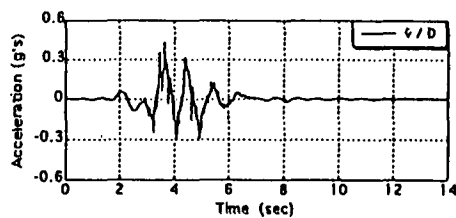


Fig.6a 断層モデルと確率論モデルの加速度 (0-10Hz)

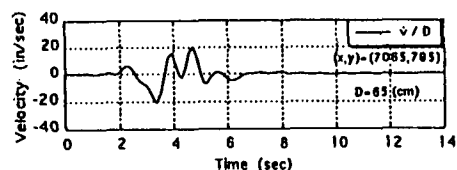


Fig.5b 断層モデルによる速度波形 (0-1.25Hz)

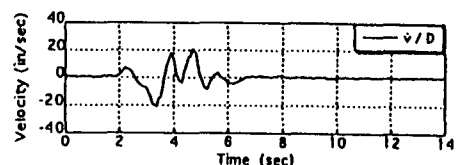


Fig.6b 断層モデルと確率論モデルの速度 (0-10Hz)

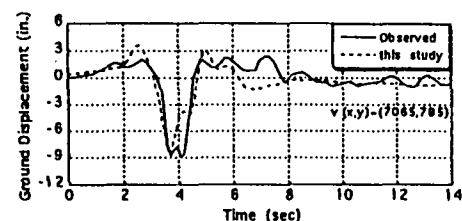


Fig.5c 断層モデルによる変位波形 (0-1.25Hz)

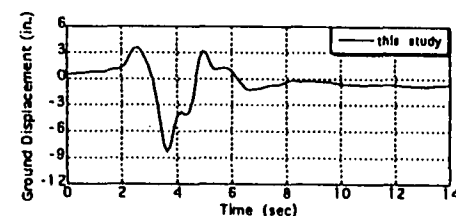


Fig.6c 断層モデルと確率論モデルの変位 (0-10Hz)

から作成し (Harada *et al.*, 1997)、これを図5の波形と足し合わせたものを示す。図4から図6を比較すると、確率論的モデルによって短周期地震波を考慮することで、加速度や速度波形は観測記録をよく再現している。変位波形には短周期の影響はほとんど見られない。しかし、観測記録の加速度、速度、変位波形の特徴は、1秒以上の長周期を対象とした運動学的断層モデルによって再現されているようである。この理由は、観測点が断層から約80mと近い位置にあるため、運動学的断層モデルで説明できたためかと思われる。

4. 参考文献

- 1) Madariaga, R. (1978), The dynamic field of Haskell's rectangular dislocation fault model, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 68, pp.869-887.
- 2) Bouchon, M. (1979), Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault: An example: The Parkfield Earthquake of 1966,

Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No.B11, pp.6149-6156.

- 3) Housner, G.W. and Trifunac, M.D. (1967), Analysis of accelerograms-Parkfield Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 57, No.6, pp.1193-1220.

- 4) Harada, T., Ohsumi, T., and Darama, H. (1997), Engineering simulation of ground motions using a seismological model, *Proc. of the 7th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kyoto, November 24-28.