

剛性マトリックスに基づく地震動の波形合成法と震源断層近傍地震動の渦現象

宮崎大学大学院 学生員 山下 肇 山上武志 宮崎大学工学部 正 員 原田隆典

1. まえがき 運動学的断層モデルから放射される地震波が水平成層地盤中を伝播して地表面に到達するという物理過程を剛性マトリックス法によって定式化した。これによって広い領域の地震動が効率的に合成できる。例題として、横ずれ断層近傍の地震動速度波形の時空間分布特性を示し、地震波の渦と呼ぶのが適当であろう現象をここに報告する。

2. 定式化の概要 導出の過程を省略するが、図－1に示すような震源断層を含む水平成層地盤のいわゆる要素（第2層）剛性方程式は次式のように与えられる。

$$\begin{pmatrix} q(z_1) + q_s(z_1) \\ q(z_2) + q_s(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11}^{(2)} & K_{12}^{(2)} \\ K_{21}^{(2)} & K_{22}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(z_1) \\ u(z_2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{pmatrix} q_s(z_1) \\ q_s(z_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11}^{(2)} & K_{12}^{(2)} \\ K_{21}^{(2)} & K_{22}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_s(z_1) \\ u_s(z_2) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -t_s(z_1) \\ t_s(z_2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

上式において、 $q(z_1) = -\tau(z_1)$ 、 $q(z_2) = \tau(z_2)$ 。 $u(z_j)$ と $\tau(z_j)$ は深さ z_j における振動数一波数領域での変位と応力ベクトルを表す。また、 $K_{ij}^{(2)}$ は第2層の振動数一波数領域における剛性マトリックスである（原田ら、1999）。さらに、 $u_s(z_j)$ と $\tau_s(z_j)$ は無限地盤中の運動学的断層モデルから放射される地震波による z_j 点での変位と応力を表す。

震源断層が半無限地盤中に存在する場合には、上式は、次式のような要素剛性方程式で表される。

$$q(z_2) + q_s(z_2) = K_{\text{half}} u(z_2) \quad q_s(z_2) = K_{\text{half}} u_{\text{free}} \quad (3)$$

ここに、 K_{half} は半無限地盤の剛性マトリックス、 $u_{\text{free}}(z_2)$ は半無限地盤地表面の地震動変位ベクトルを表す。要素剛性マトリックス K_{ij} 、 K_{half} 、 $u_{\text{free}}(z_2)$ 、 $u_s(z_j)$ 、 $\tau(z_j)$ に関する解析解は原田ら(1999)の論文に譲る。

上式で与えられる要素剛性方程式から直接重ね合わせの方法を用いて、例えば図－1のような震源断層－地盤系モデルに対する全体剛性方程式を組み立てることができ、これを解いて地表面の変位ベクトル $u(kx, ky, w)$ を得ることができる。これは振動数一波数領域の解であるが、フーリエ逆変換によって、時空間領域の変位 $u(x, y, t)$ が求められる。

3. 横ずれ断層近傍の地震動速度波形の渦現象 本方法の検証例は、原田らの論文(1999)に既に発表しているので省略するが、ここでは、図－2に示すように垂直横ずれ断層が半無限地盤中に存在し、厚さ1.5Kmの表層地盤がその上にある震源断層－地盤系を想定している。このモデルは1966年パークフィールド地震のモデルとしてBouchon(1979)が検討したもので、断層近傍のいわゆるステーション2での観測波形と理論的計算波形のよい一致が得られており、またその再検討結果が原田ら(1999)の論文に記載されている。

ここでは、図－2の震源断層－地盤系における断層近傍(15Km x 15Km)の地表面の水平速度波形の時間的一空間的变化をベクトル表示するものとする。図－3は、約1秒毎の地表面水平速度の空間分布を示す。矢印の長さは、断層の平均すべり量1m当たりの水平速度の大きさを示し、水平速度の方向は矢印の方向によって表されている。各図の左中央から右方向へ延びる黒い帯は震源断層の破壊領域の地表面への投影長さを表す。断層長さ8.5Km、断層破壊速度2.2Km/sより約3.9秒で破壊が終了する。

図－3によると、断層破壊先端付近の地表面に半時計回りの渦が現れ、この渦の後に接するように同じく反時計回りの少し半径の大きい渦が断層破壊方向に伝播している。このような現象は断層破壊終了時刻（3.9秒）程度まで続く。それ以後、2つの渦のうち前方の渦の振幅は勢力を弱め、6.02秒にはこれまでとは逆の時計回りの渦が現れている。後方の渦の方向は変わらず反時計回りのままである。

震源断層、地震動、理論、地震波、地盤震動、渦

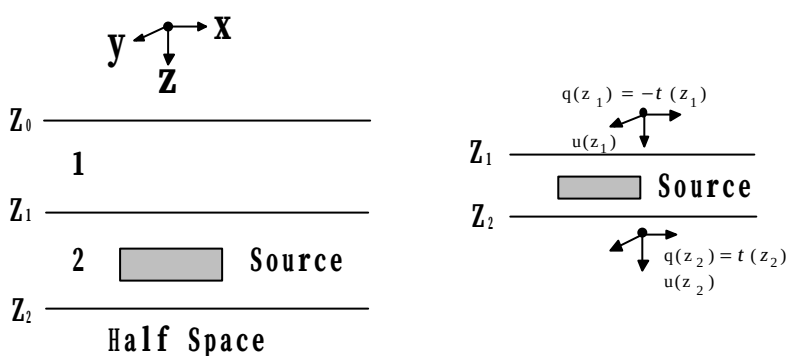
原田隆典（〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1, Tel 0985-58-7325, Fax.0985-58-7344）

本計算では、785m 間隔で地表面の速度波形を計算したが、図－3によると、断層破壊先端付近の地表面において 785m の間隔で逆方向に大きな速度振幅が現れるなど、2つの渦の重なり具合から地震動速度波形の複雑な空間分布特性が観られる。

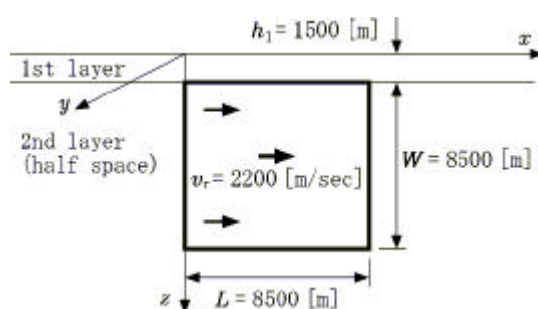
4. まとめ 理論的に震源断層近傍の地震動を合成して、鉛直横ずれ断層近傍の地震動速度波形の時間的一空間的分布特性を示した。これによると、地表面の地震動は基本的に2つの大きな渦となって断層破壊方向に伝播している現象が観られた。2つの渦の回る方向は反時計回りのものやその逆回りのものもあり、また、2つの渦の重なり具合によって地表面の地震動の時空間分布はかなり複雑であることを示した。このような地震動の渦の現象はこれまで実証されていないこと、さらに、このような地震動の時空間特性の複雑さはこれまでの構造物の耐震設計用入力地震動に考慮されていないことなどを今後どのように検討してゆけばよいのかなどを考えている。ご意見がいただければ幸いである。

参考文献

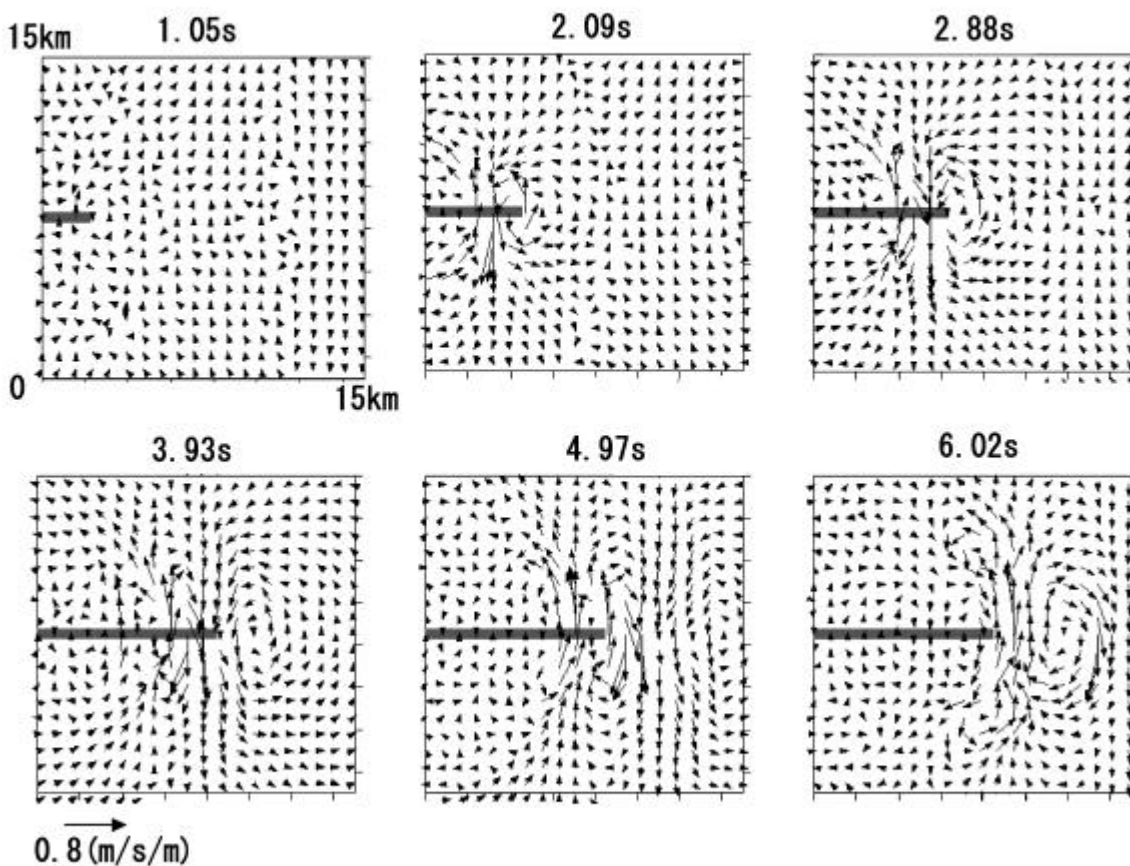
原田隆典ら(1999)：3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用、土木学会論文集 No.612/I-46,pp.99-108.



図－1 震源断層を含む成層地盤と記号



図－2 震源断層—地盤モデル



図－3 時間毎の地表面水平速度の空間分布