

断層近傍地震動の解析解を用いた 離散化波数法の検証

野津 厚¹

¹ 正会員 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: nozu@p.mpat.go.jp

離散化波数法は永久変位成分を含む断層近傍地震動の計算に適用できる手法の一つであるが、永久変位に至る過程を含む変位波形について解析解との比較による verification を行った事例は著者の知る限り存在しない。これは、永久変位に至る変位波形に関する解析解が得られている場合が少ないためと考えられる。ここでは、そのような数少ない解析解の一つである増田・引間による解析解を用い、断層近傍地震動の計算手法としての離散化波数法の verification を行った。その結果、波数に関する和を計算する際の打ち切り波数と小断層サイズに関して知見を得ることができた。

Key Words: *fault, fling step, permanent displacement, discrete wavenumber method, verification*

1. はじめに

規模の大きい内陸地殻内地震において、地表面付近まで大きなすべりが生じる場合や、地表地震断層が現れる場合は、その近傍において永久変位成分を含む地震動が生じる。このような永久変位成分を含む地震動はフリングステップと呼ばれることが多い¹⁾。1995年兵庫県南部地震の際には、神戸側の断層は淡路側の断層ほど浅部のすべりは大きくなかったため^{例え²⁾}、神戸市内で観測された地震動には顕著なフリングステップは含まれていなかったが、2016年熊本地震本震の際には、地表まで破壊が進展したことに伴い^{例え³⁾}、断層近傍の西原村小森などでは顕著なフリングステップが観測された。フリングステップは、その立ち上がり時間が十分に大きければ、断層近傍に立地する構造物への影響は（断層をまたぐ構造物の場合を除けば）小さいと考えられる。しかしながら、2016年熊本地震本震の際に観測されたフリングステップは立ち上がり時間が2s程度と短く、構造物に対して顕著な応答をもたらしうるものであった。こうしたことから、フリングステップの重要性が再認識されている。

フリングステップを含む地震動を計算する際、上盤側と下盤側での永久変位の違いなどを正確に考慮するためには、自由表面における境界条件を厳密に扱うことのできる手法を用いる必要がある。そのような手法の一つとして離散化波数法⁴⁾がある。この手法は、半無限媒質または水平成層構造に対して厳密に地震動を計算できる手

法である。

フリングステップを含む断層近傍地震動への離散化波数法の適用性に関する検証 (verification) の事例としては、2通りの異なる定式化（デカルト座標系と円筒座標系）に基づく離散化波数法による結果を比較した事例⁵⁾や、永久変位に関する（静的な）解析解⁶⁾との比較を行った事例⁷⁾などがあるが、永久変位に至る過程を含む変位波形について解析解との比較による verification を行った事例は著者の知る限り存在しない。これは、永久変位に至る過程を含む変位波形についての解析解が得られている場合が少ないためと考えられる。なお、ここでは、断層面上での面積分を解析的に実施したものを解析解と定義している。離散化波数法を適用するにあたり、断層面の分割の細かさ等について検討するためには、このような意味での解析解との比較が必要である。

本研究では、そのような意味での数少ない解析解の一つである増田・引間による解析解⁸⁾を用い、断層近傍地震動の計算手法としての離散化波数法の verification を行い、波数に関する和を計算する際の打ち切り波数や小断層サイズに関する知見を得ることを目的とした。

2. 解析解

永久変位に至る過程を含む変位波形を対象とし、断層面上での面積分を解析的に実行している数少ない解析解

として、限られた条件に対するものではあるが、増田・引間による解析解⁸⁹⁾がある。これは、円形断層(図-1)で同時にすべりが生じたときの全無限弾性体における地震動に関する解析解であり、円の中心軸に沿った観測点での地震動のすべり方向成分を与えるものである。解析解は次式で与えられる。

$$u(r_0, t) = \beta^2 \begin{bmatrix} -\frac{3a^2 r_0}{2R^5} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau D(t-\tau) d\tau \\ -\frac{1a^2 r_0}{2R^3} \frac{1}{\alpha^2} D(t-R/\alpha) \\ +\frac{1a^2 r_0}{2R^3} \frac{1}{\beta^2} D(t-R/\beta) \\ +\frac{1}{2} \frac{1}{\beta^2} D(t-r_0/\beta) \\ -\frac{1r_0}{2R} \frac{1}{\beta^2} D(t-R/\beta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに r_0 は観測点のz座標、 a はP波速度、 β はS波速度、 $D(t)$ はすべりの時間関数、 R は円形断層の縁から観測点までの距離である。

この解析解は、観測点を断層面に近づけていったときすべり時間関数の1/2に収束し(断層面を挟んで両側が変位するので1/2が付く)、観測点が十分に遠方の時は遠地項に一致するという美しい性質を有している。すべりの時間関数としては任意のものを与えることができる。

この解析解は、(1)円形断層が同時にすべった場合に対応し破壊伝播の効果は入っていないこと、(2)すべり方向成分に関する解析解であり断層直交成分は対象外であること、などの限界はあるものの、永久変位成分まで含んだ地震動の解析解として貴重な存在である。そこで、以下においては、解析解と同様の条件での地震動を離散化波数法により計算し、その結果を解析解と比較することにより、断層近傍地震動の計算手法としての離散化波数法のverificationを行う。

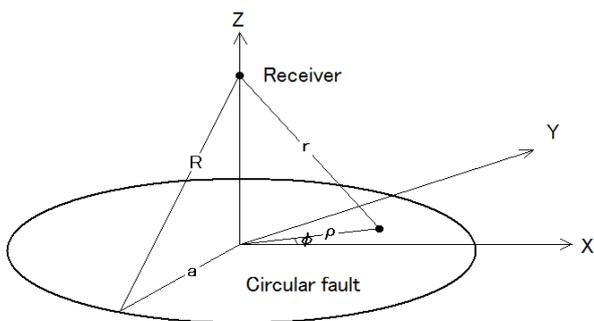


図-1 対象とする円形断層と観測点

3. 検証の条件

使用した離散化波数法は円筒座標系に基づくもの⁴⁾であり、定式化の詳細は文献¹⁰⁾¹¹⁾に示している。また、解析解は全無限弾性体に対するものであるため、離散化波数法では震源からの入射波¹⁰⁾¹¹⁾のみを考慮する。解析解の性質上、このような限られた条件でのverificationとならざるを得ないが、断層面の分割の細かさや、波数に関する和を計算する際の打ち切り波数等に関する知見を得ることができると考えられる。

断層と観測点の位置関係を図-1に示す。媒質の密度は $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、P波速度は5196m/s、S波速度は3000m/sとした。円形断層の半径は1000mとした。すべりの時間関数は次式のものを用いた。

$$D(t) = \frac{D_0}{1-e^{-1}} [1 - e^{-t/t_r}] \quad (2)$$

ここに D_0 は最終すべり量であり2mとした。 t_r はライズタイムであり1sとした。面積分を数値的に実行するための点震源の集合の例を図-2に示す。ここでは点震源の間隔が50mの場合を示している。このとき点震源の個数は1261である。その他の計算条件として、離散化波数法ではPhinneyの方法¹²⁾(周波数に虚部を導入する方法)を用い、虚部の大きさは $\lambda = 2\pi/T$ とした¹³⁾。計算結果として長さ8sの波形を得るため、離散フーリエ変換に用いるタイムウィンドウは2倍の16sとし、後半を棄却した¹³⁾。ナイキスト周波数は8Hzとした。波数に関する和を計算する際の打ち切り波数は $k_{max} = 10\pi/z_s$ とした。ここに z_s は震源と観測点のz座標の差である。

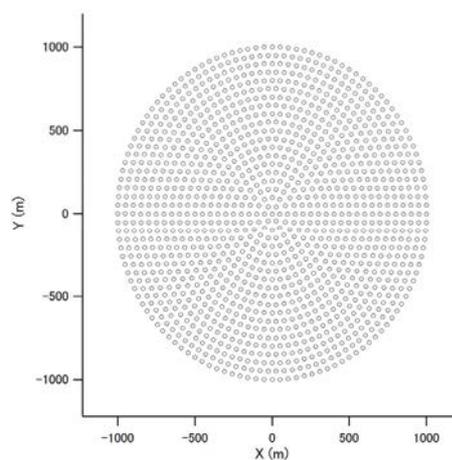


図-2 離散化波数法による計算に用いた点震源配置の例(点震源の間隔が50mの場合)

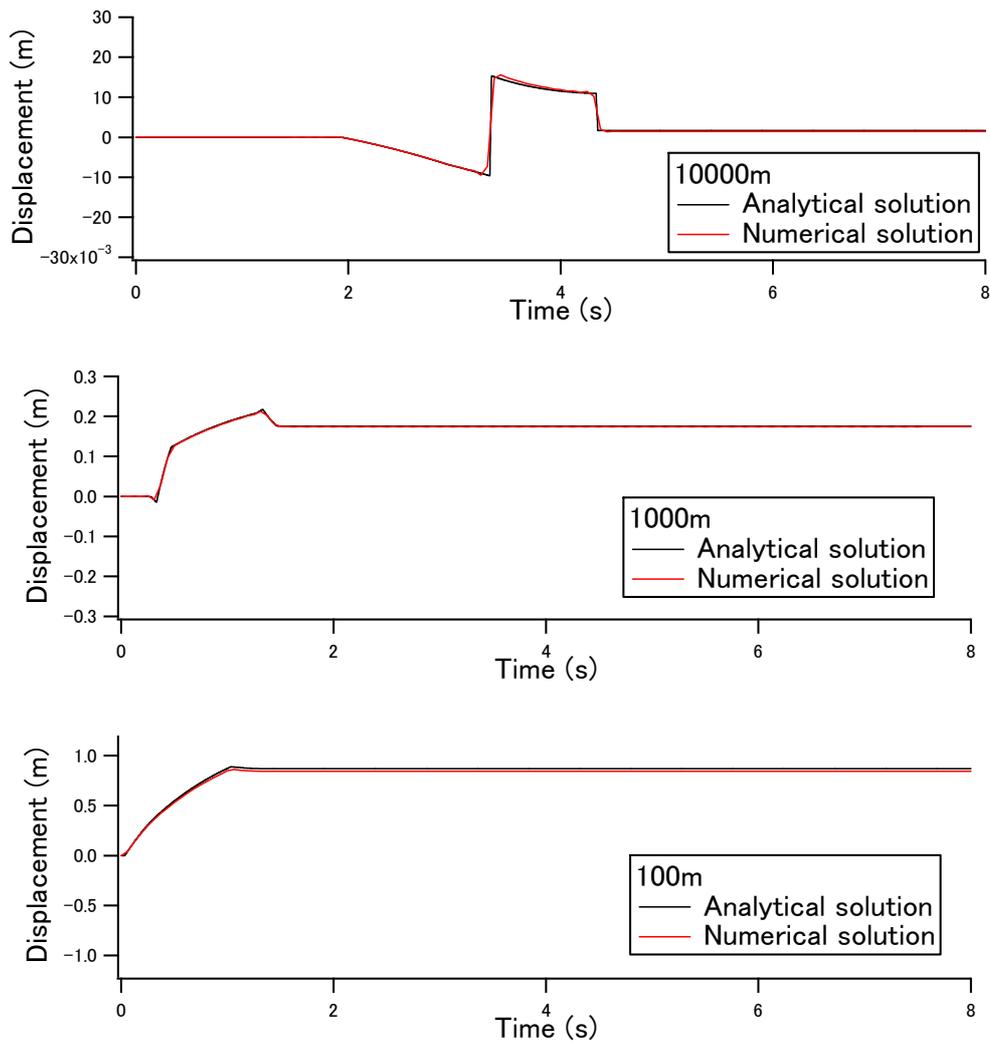


図-3 断層面距離が 10000m, 1000m, 100m の場合の変位波形のすべり方向成分の解析解と数値解の比較
 $(k_{max} = 10\pi/z_s, \text{点震源間隔は } 50\text{m})$

4. 結果と考察

断層面距離が 10000m, 1000m, 100m の場合の変位波形のすべり方向成分の解析解と数値解を比較して図-3 に示す。10000m における変位波形は永久変位成分が少なく遠地項が卓越していると考えられるのに対し、100m における変位波形は永久変位成分を顕著に含むものとなっている。遠地項が支配的な 10000m の計算結果にはナイキスト周波数が 8Hz であることに起因する誤差がやや見られるものの、いずれの地点においても変位波形の計算精度は良好であった。点震源の間隔が 50m であっても、断層面距離が 100m の場合まで変位波形をほぼ正確に計算できた。観測点がこれ以上断層面に近づくと、点震源の間隔が 50m では正しい計算ができなくなった。なお、波数に関する和を計算する際の打ち切り波数は今回用いた $k_{max} = 10\pi/z_s$ で十分であると考えられる。

5. まとめ

離散化波数法は永久変位成分を含む断層近傍地震動の計算に適用できる手法の一つであるが、永久変位に至る過程を含む変位波形について解析解との比較による verification を行った事例はこれまで著者の知る限り存在しなかった。本研究では、永久変位に至る変位波形を対象とした数少ない解析解の一つである増田・引間による解析解を用い、断層近傍地震動の計算手法としての離散化波数法の verification を行った。その結果、波数に関する和を計算する際の打ち切り波数と小断層サイズに関して知見を得ることができた。打ち切り波数に関しては $k_{max} = 10\pi/z_s$ とすることで十分な計算結果が得られた。ここに z_s は震源と観測点の z 座標の差である。小断層サイズは断層面最短距離の 1/2 以下とすることが適切と考えられる。

参考文献

- 1) Hisada, Y. and Bielak, J.: A theoretical method for computing near-fault strong motions in layered half-space considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, No.3, pp.1154-1168, 2003.
- 2) Sekiguchi, H., Irikura, K. and Iwata, T.: Fault geometry at the rupture termination of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, No.1, pp.117-133, 2000.
- 3) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, 68:191, 2016.
- 4) Bouchon, M.: A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, No.4, pp.959-971, 1981.
- 5) Bouchon, M.: A review of the discrete wavenumber method, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.160, pp. 446-465, 2003.
- 6) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 7) Honda, R. and Yomogida, K.: Static and dynamic displacement near a fault with the discrete wavenumber method, *Phys. Earth Planet Inter.*, Vol.137, pp.107-127, 2003.
- 8) 増田徹・引間和人：断層近傍における地震動，日本地震学会講演予稿集，A16，2002.
- 9) 野津厚，運動学的断層モデル（その1）（増田・引間，2002）2017，https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_003.pdf.
- 10) 野津厚，水平成層地盤のグリーン関数，2018，https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_020.pdf.
- 11) 野津厚，水平成層地盤におけるせん断食い違い型点震源による地震動，2018，https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_023.pdf.
- 12) Phinney, R.A.: Theoretical calculation of the spectrum of first arrivals in layered elastic mediums, *Journal of Geophysical Research*, Vol.70, No.20, pp.5107-5123, 1965.
- 13) 野津厚，Phinney法，2018，https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/tutorial_jpn/tutorial_014.pdf.

VERIFYING DISCRETE WAVENUMBER METHOD USING ANALYTICAL SOLUTION FOR NEAR-FAULT FLING-STEP DISPLACEMENT

Atsushi NOZU

The discrete wavenumber method, which can be potentially be used to calculate near-fault strong ground motions including permanent displacements associated with coseismic deformation of the crust, has not been fully verified against analytical solutions in terms of displacement waveforms including nonzero final values. In this study, the analytical solution for such displacement waveforms proposed by Masuda and Hikima was used to verify the discrete wavenumber method in terms of its applicability to such displacements. The results could be used to establish new criteria for the maximum horizontal wavenumber and the interval of point sources.