

等価震源距離に基づくディレクティビティ効果を考慮した距離減衰式

王寺秀介¹・澤田純男²・岩田知孝³・神原隆則⁴

¹中央開発株式会社 技術センター (〒169-8612 東京都新宿区西早稲田3-13-5)

E-mail:oji@ckcnet.co.jp

²京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴中央開発株式会社 ソリューション本部 (〒332-0035 埼玉県川口市西青木3-4-2)

E-mail: kambara@ckcnet.co.jp

等価震源距離に基づくディレクティビティ効果を考慮した距離減衰式を作成した。この距離減衰式は、従来のモーメントマグニチュードと震源距離の他に、地震断層の震源特性であるすべり量や破壊開始点破壊進行方向を指定できるものである。また、本研究で得られた距離減衰式を用いて、実在する地震断層を対象に地震動予測解析を実施した。この中で、この距離減衰式とハイブリット法でそれぞれ地震動解析を実施し、両者を比較することでこの距離減衰式の妥当性を検証した。

Key Words : attention relationship, directivity, equivalent hypocentral distance

1. はじめに

近年、国や都道府県、市町村の地震防災においては、地震被害想定調査を目的に特定の震源断層を強震動予測の必要性が高くなってきている。地震動を精度よく予測するための理論が確立するとともに計算機が高性能になったため、サイトの地震波形を求める詳細な地震動予測計算を行うことが多くなってきた。ただし、この手法は地震基盤から表層までの地震波（特にS波）速度構造が推定できるような地下構造調査が必要であり、都道府県や市町村で実施するには膨大な費用と時間が必要となる。

距離減衰式は、（モーメント）マグニチュードと震源距離、地盤増幅率等をパラメータとして最大値を予測する手法であり、比較的少ないパラメータで安定した結果が得られることが特徴である。ただし、詳細な地震動予測計算手法と異なり、複雑な震源過程や複雑な地盤構造の影響を考慮することはできないという問題を抱えている。

既往の研究成果では、地震断層の震源効果（ディレクティビティ効果）が、地震動強さに大きく影響することが確認されており、地震動を予測する際もその必要性が指摘されている。また、同じ地震断層

でもその破壊シナリオ（アスペリティや破壊開始点の位置）の違いによって、被害の様相は大きく異なり、特に今後の防災計画の基礎資料となる地震被害想定調査では、様々な破壊シナリオで検討し、最悪の想定を把握しておくことが重要である。

このような背景の中、著者らは等価震源距離を用いた距離減衰式に、地震断層のディレクティビティを考慮した係数（以下、ディレクティビティ係数）を導入することで、地震断層の震源特性を評価した距離減衰式を作成した。

この式の有効性を確かめるため、実在する断層を対象にハイブリット法を用いた地震シミュレーションを実施し、その解析結果を比較することで、この距離減衰式の妥当性を検討した。

2. 距離減衰式

距離減衰式は、既往の研究成果である以下の式を用いた。（司・翠川(1999)）¹⁾

$$\log A = b - \log X_{eq} - kX_{eq} \quad (1)$$

$$b = aMw + hH + d + e + \varepsilon \quad (2)$$

ここに、(1)式の A は地震動の最大振幅、 X_{eq} は等価震源距離を示す。(2)式の H は震源深さ、 d は断層タイプの定数、 e は定数項、 ε は標準偏差を示す。 a, h は回帰係数である。

表-1 距離減衰式(等価震源距離,PGV)の係数¹⁾

a	h	d (Crustal)	e
0.58	0.031	0.00	-1.25

(1)式の右辺第一項の b は距離減衰特性を示す項で、第二項は幾何減衰を表す項、第三項は粘性減衰を表す項である。司・翠川(1999)では、 k の値を最大加速度では0.003、最大速度では0.002としており、本研究でもそのまま使用することとした。

また、等価震源距離 X_{eq} は震源近傍での距離減衰式の適用を高めるために断層の広がりを考慮した手法として提案されたものであり、非一様なエネルギーの震源断層面に対して等価なエネルギーを受けられるようにサイトの震源との距離を重み平均した震源距離である。²⁾

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum e_m X_m^{-2}}{\sum e_m} \quad (3)$$

ここに、 X_m は観測点から断層面の各微小領域 m への距離 (km)、 e_m は断層面上の各微小領域 m からの地震波エネルギーの相対放出分布を示す。

3. ディレクティビティ係数

ディレクティビティ効果とは、断層破壊伝播に起因する一種のドップラー効果であり、強震動予測を行う際に考慮すべき重要な性質の一つである。

ディレクティビティ効果については、Boatwright and Boore,1982 の 1980 年 Livemore Vally地震のディレクティビティに関する研究³⁾をはじめとした幾つかの既往の研究成果が報告されており、この中でディレクティビティ効果が地震動強さに与える影響が大きいことが確認されている。

Boore and Joyner(1989)が提案したディレクティビティ係数の式を以下に示す。³⁾

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c) \hat{i}_{rup} \cdot \hat{i}_{ray}}} \quad (4)$$

ここに v は破壊伝播速度、 c は地震基盤のS波速度を示す。 $\hat{i}_{rup}, \hat{i}_{ray}$ はそれぞれ、破壊方向の単位ベ

クトル、観測点と震源を結ぶ方向の単位ベクトルである。また、上式は両者の内積であるから、単位ベクトルがなす角を θ として $\cos \theta$ に置き換えることができる。

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c) \cos \theta}} \quad (5)$$

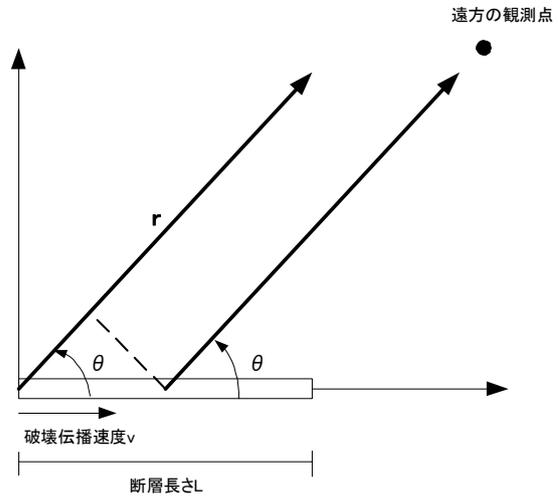


図-1 ユニラテラル震源と観測点

ここで、断層幅 W が断層長さ L に比べて十分小さな有限震源におけるユニラテラル (一方向伝播) な破壊伝播を考える。(図-1) 断層長さ L に対して十分遠い観測点でのS波項による変位波形は、

$$u(x,t) = \frac{M_0 R}{4\pi\rho c^3} \frac{1}{r} \frac{1}{\tau_L} \left[f^s \left(t - \frac{r}{c} \right) - f^s \left(t - \frac{r}{c} - \tau_L \right) \right] \quad (6)$$

となる。⁴⁾ここで、 ρ は質量密度、 M_0 は地震モーメント、 R はラディエーションパターン係数、 r は観測点までの距離、 τ_L は観測点における見かけ上の破壊継続時間、 f^s は震源時間関数を示す。

震源時間関数 f^s を

$$f^s = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \frac{1}{\tau_r} & (0 \leq t \leq \tau_r) \\ 1 & (\tau_r < t) \end{cases} \quad (7)$$

とすると、変位波形は図-2のような台形上のパルスとなる。なお、観測点における見かけ上の破壊継続時間 τ_L は以下の式で定義される。⁴⁾

$$\tau_L = \frac{L}{v} \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right) \quad (8)$$

また、上記式にディレクティビティ係数 D を導入すると、以下の式となる。

$$\tau_L = \frac{L}{v} \cdot \frac{1}{D} \quad (9)$$

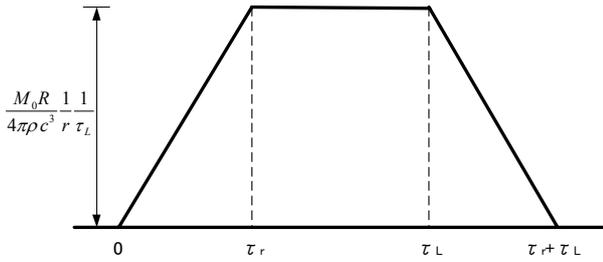


図-2 観測点での変位波形

通常、破壊伝播速度 v は、地震基盤のS波速度 c の7~8割程度と言われている。よって、観測点が破壊進行方向にある場合は、ディレクティビティ係数 D の値は大きくなり、変位波形の幅が小さく振幅（パルス）が大きくなる。一方、観測点が破壊進行方向と逆の場合、変位波形の幅が大きく振幅（パルス）が小さくなる。

変位波形のパルスの高さは以下の式で表すことができる。

$$\frac{M_0 R^{FS}}{4\pi \rho c^3 r} \cdot \frac{1}{\tau_L} = \frac{M_0 R^{FS}}{4\pi \rho c^3 r} \cdot \frac{v}{L} \cdot \frac{D}{1} \quad (10)$$

よって、ディレクティビティ係数 D は、変位振幅と比例関係にあることが分かる。この効果は、変位振幅を地震動のエネルギー時間密度と置き換えても、同じ関係となる。

実際に各セグメントからの地震動波形が重なり合うのは有限時間内であるから、等価震源距離を求める際に、総エネルギー量で重み付けするより、エネルギー時間密度すなわち単位時間当たりのエネルギーで重み付けする方が、最大振幅をより合理的に評価できると考えられる。そこで、等価震源距離の距離減衰式にディレクティビティ効果を導入するにあたり、エネルギー e_m にディレクティビティ係数 D をかけることで単位時間あたりのエネルギー重みとする。以下にその提案式を示す。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum e_m X_m^{-2} D}{\sum e_m} \quad (11)$$

ディレクティビティ係数 D は、破壊伝播速度 v と媒

質の伝播する波 c との比が大きくなるほど、その値が大きくなる。ここでは、Geller(1976)による平均破壊伝播速度と地震基盤のS波速度の経験式を用いて以下の式を採用した。

$$\frac{v}{c} = 0.72 \quad (12)$$

ここで、ディレクティビティ係数 D による距離減衰式で算出される速度振幅への影響をみるために $D^{0.5}$ をプロットした図面を図-3に示す。 $D^{0.5}$ の値は0.8~1.9程度であり、兵庫県南部地震(1995)などの既往地震で確認されているNFRD効果と同等程度の値であることが確認できた。

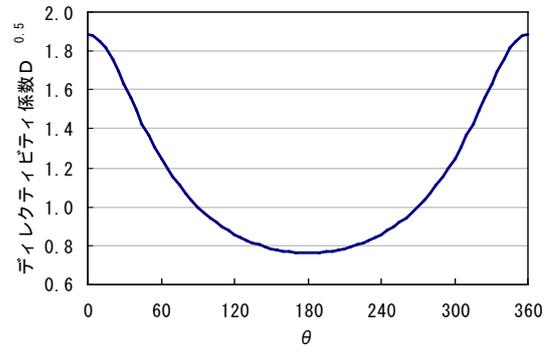


図-3 ディレクティビティ係数 D

4. ディレクティビティ係数 D による効果

本研究で得られた距離減衰によるディレクティビティ効果を確認するために仮想断層モデルを作成し、基準地盤（工学基盤）における最大速度を試算した。対象地震は、内陸の地殻内断層で $M_w=7.0$ の横ずれ断層とした。図-4に試計算で用いた断層モデルを示す。断層モデルは、長さ $L=35\text{km}$ 、幅 $B=15\text{km}$ 、上端深さ $=5\text{km}$ 、傾斜角度 90° とした。

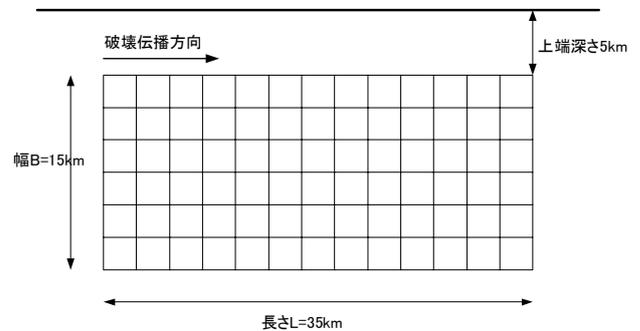


図-4 断層モデル

ディレクティビティ効果による影響を確認するためにディレクティビティを考慮しないケースと考慮するケースで等価震源距離を求め、司・翠川(1999)

の距離減衰式により基準地盤における最大速度を算出した。図-5、図-6にそれぞれの基準地盤における最大速度分布図を示す。なお、図-6における断層の破壊伝播方向は、北から南の方向である。

図-5より、断層中央を中心に楕円上に最大速度が広がっていることが分かる。これは、等価震源距離が広がりを持つ断層と同じエネルギーを放つ仮想点震源までの距離を意味する。²⁾

一方、図-6より、ディレクティブティ効果の影響により破壊伝播方向に向かって最大速度分布が大きくなりシフトし、最大速度も1.5倍程度大きくなっていることが分かる。

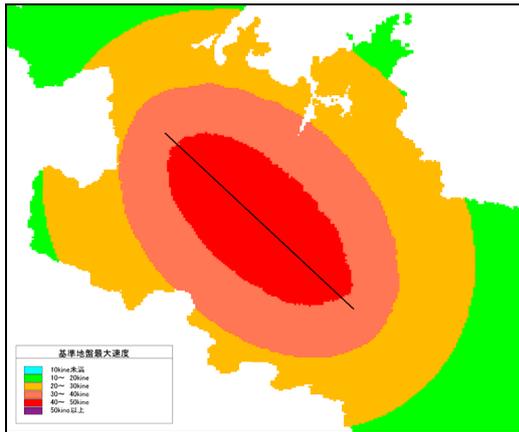


図-5 基準地盤における最大速度分布図
(ディレクティブティ考慮なし)

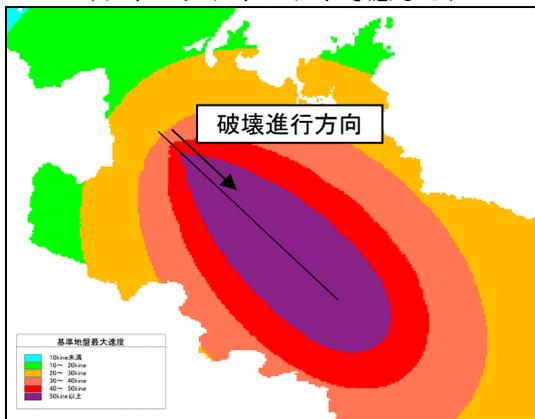


図-6 基準地盤における最大速度分布図
(ディレクティブティ考慮)

5. 地震動予測への適用

本研究で得られたディレクティブティ係数の妥当性を検証するため、実在する活断層を対象に地震動予測を実施した。今回対象とした地震断層は花折断層帯 (Mw=7.2) (京都府) である。花折断層帯は滋賀県今津町を北端として京都市左京区まで位置し、直線性の高い右横ずれ断層である。花折断層帯の位置図を図-7に示す。⁵⁾

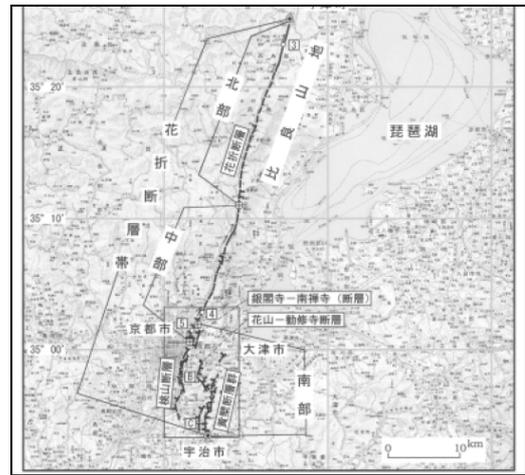


図-7 花折断層帯の位置図⁶⁾

(1) ハイブリッド法による解析

対象地区では、地震被害想定調査を目的に深部までの詳細な地盤構造が把握されており、地震動予測解析としてハイブリッド法を実施することが可能であった。

ハイブリッド法とは、統計的グリーン関数法と理論的計算法を併用する方法である。具体的には、短周期地震動を統計的グリーン関数法で、長周期地震動を理論計算法でそれぞれ計算し、それぞれに有効な周期帯でのフィルターを作用させたのち時刻歴上で足しあわせる方法である。

ハイブリッド法の概念図を以下に示す。

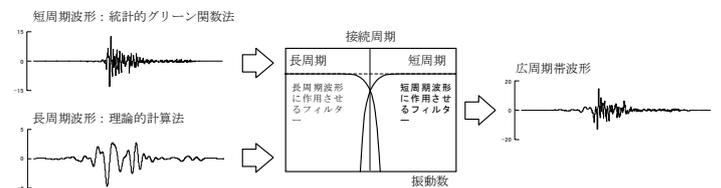


図-8 ハイブリッド法の概念図

ハイブリッド法を実施するにあたり、平成18年度京都府地震被害想定調査で設定した花折断層帯の震源モデル⁵⁾を使用した。花折断層帯の断層モデル図と断層パラメータを表-2、図-9に示す。花折断層帯は、北部と南部の2セグメント区分されている。

表層地盤については、ハイブリッド法により得られた地震波形を工学的基盤における入力波形として、表層地盤の地震応答解析 (等価線形化法) により表層地盤の非線形性の影響を考慮した。

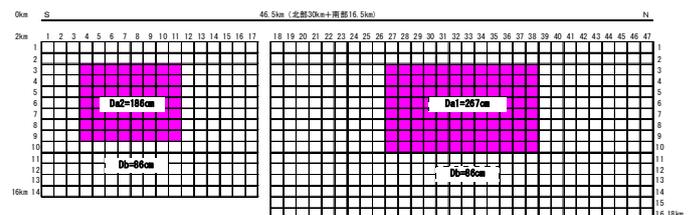


図-9 断層モデル (赤: アスペリティ)

表-2 断層パラメータ⁵⁾

		南部	北部
Mw		6.9	
地震モーメント	dyne·cm	7.14×10 ²⁵	2.14×10 ²⁶
傾斜角	°	85E	85E
断層長さ	km	16.5	30.0
断層幅	km	14.1	16.1
断層面積	km ²	232.7	483.0
上端深さ	km	2.0	2.0
S波速度	km/s	3.5	
密度	t/m ³	85.0	
破壊伝播速度	km/s	2.52	

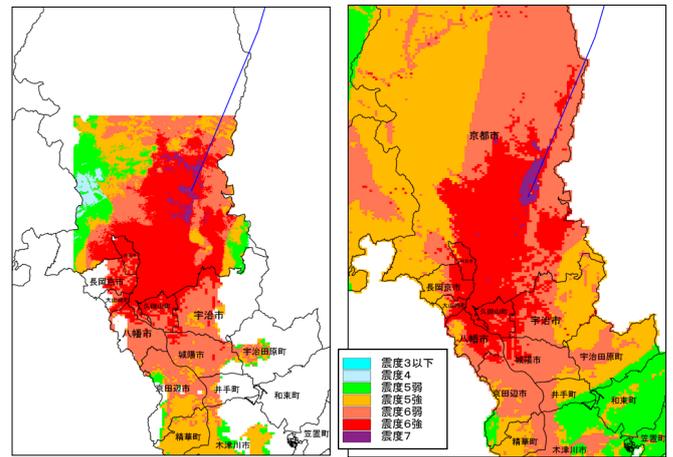
(2)解析結果の比較

本研究で得られた提案式による震度分布図とハイブリット法により得られた震度分布図との比較を行った。比較図を図-10に示す。震源断層の破壊進行方向は、北から南の方向である。それに伴い、両者とも京都市内に大きな揺れが集中する結果となっている。また、断層の近傍では、震度7及び震度6強の分布状況は非常に類似しており、提案式はハイブリット法によるディレクティビティ効果をよく反映しているものといえる。

一方、断層から離れている遠方では、ハイブリット法のもの比べて、提案式の方が大きく評価されている。これは、遠方におけるディレクティビティ効果を過大評価しているためと考えられ、今後改良の余地があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、等価震源距離を用いた距離減衰式に、地震断層のディレクティビティ係数を導入することで、地震断層の震源特性を評価した距離減衰式を作成した。これにより、地震断層の震源特性である、すべり量や破壊開始点、破壊進行方向を指定できるようになり、比較的簡易な手法で地震断層の震源特性を考慮した地震動解析が可能になる。



a)ハイブリット法 b)提案式

図-10 震度分布図の比較

ハイブリット法との比較については、震源断層の近傍ではハイブリット法によるディレクティビティ効果をよく反映できることが確認できたが、震源断層から離れている遠方では、提案式の方が大きく評価される傾向にあることが分かった。

参考文献

- 1) 司宏俊・翠川三郎(1999)：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第523号, pp.63-70
- 2) 大野晋, 高橋克也, 源栄正人(2001)：カリフォルニア強震記録に基づく水平動・上下動の距離減衰式と日本の内陸地震への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第544号, pp.39-46.
- 3) DAVID M. BOORE AND WILLIAM B. JOYNER : THE EFFECT OF DIRECTIVITY ON THE STRESS PARAMETER DETERMINED FROM GROUND MOTION OBSERVATIONS, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 79, No. 6, pp. 1984-1988, December 1989
- 4) 理論地震動研究会編著：1994, 地震動—その合成と波形処理—, 鹿島出版会.
- 5) 平成18年度京都府地震被害想定調査.
- 6) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：2003, 三方・花折断層帯の長期評価について

ATTENUATION RELATIONSHIP BY CONSIDERED THE EFFECT OF DIRECTIVITY BASED ON EQUIVALENT HYPOCENTRAL DISTANCE.

Shusuke OJI

Attenuation relationship was made by considered the effect of directivity based on equivalent hypocentral distance. The attenuation relation can be used for deciding conventional moment magnitude and seismic distance in addition to landslide amount, fracture direction and start point which showed the seismic probability of fault characteristics. In our research, Attenuation relation was used for seismic ground motion simulation and the hybrid analyzing methods. The results of two analyzing methods were carried out.