

内陸地殻内地震の地震動評価における震源パラメータの設定方法に関する研究

DA16171 佐藤 右樹

1. 研究の背景と目的

1995 年の兵庫県南部地震を皮切りに、2016 年熊本地震や 2018 年大阪北部地震及び北海道胆振東部地震など、日本国内だけでも多くの活断層を震源とする地震による傾斜・変形などの建物被害や、土砂崩れや液状化などの地盤被害が相次いでいる。加えて近年では、現在設計用入力地震動として選定されている地震動のレベルを凌駕するような地震波形も数多く観測されている。このような背景を踏まえて、重要な建物(構造物)には設計用入力地震動を個別に設定することが重要であると考えられる。

これまで、久田・山本(1995)に先駆されるように、震源断層近傍での特徴的な強震動の研究が行われてきた。それらの既往研究を受けて入倉・三宅(2001)は震源断層モデルの設定方法をまとめ、強震動レシピと呼ばれる震源断層を特定した場合に、強震動を高精度で予測するための「誰がやっても同じ答えが得られる標準的な方法論」とした。強震動レシピは日本国内の地震波再現が可能である一方、海外の地震に対しては再現性に課題がある。本研究では 1994 年米国ノースリッジ地震を対象に、Hisada and Bielak (2003)による波数積分法に基づく理論的手法を用いて、強震動レシピを用いた際の過小評価の原因を、震源インバージョンモデルと比較しながら、破壊伝播とすべり速度時間関数の形状に着目して考察する。

2. 地震動評価方法(波数積分法)について

本研究では Hisada and Bielak (2003)による波数積分法に基づく理論的手法を用いる。平行成層地盤において、断層震源モデルによる変位解を表現定理を用いて周波数領域で表示すると、

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} \left\{ \mu D(e_i n_j + e_j n_i) U_{ik,j}(X, Y; \omega) e^{i\omega t_r} \right\} d\Sigma(X) \quad (k=x, y, z)$$

$$= \int_{\Sigma} \left\{ m_{ij} U_{ik,j}(X, Y; \omega) e^{i\omega t_r} \right\} d\Sigma(X)$$

(ここで、 $m_{ij} = \mu D(e_i n_j + e_j n_i)$)

ここで各項の下付きの k (または i, j) は直交座標系の x 、 y 、または z 成分を、 j は j 方向の偏微分を意味し、 i, j, k に関しては総和規約を用いる。また ω は円振動数、指数関数の i は虚数、 X 点は断層面上の点(ソース点)、 Y 点は観測点、

D は X 点における断層すべり(下盤に対する上盤のすべり)、 Δ は断層面積、 μ はせん断剛性、 m_{ij} はモーメント密度テンソル(Moment Density Tensor)と呼ばれる。つまり、計算点(観測点)における変位解は地震動の伝播特性であるグリーン関数と、震源・すべり関数の積で求められる。なお、当手法による再現の妥当性は久田(2006)や、田中・他(2018)などにより証明されている。

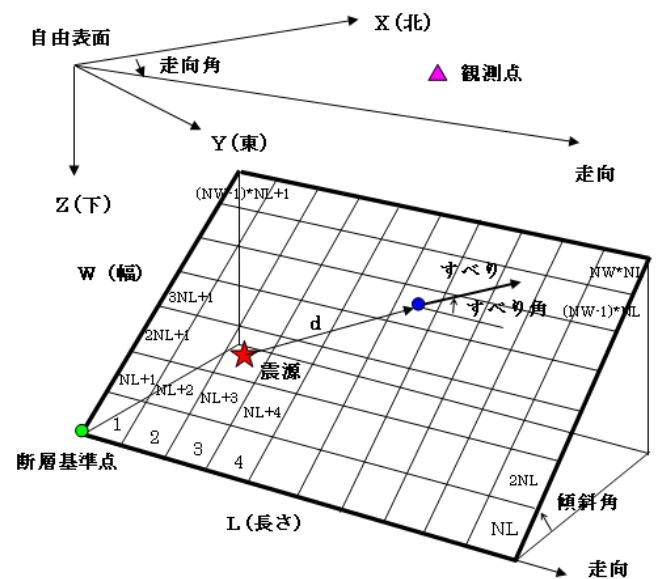


図 1 波数積分法

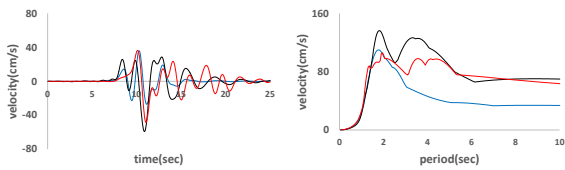
3. 1994 年ノースリッジ地震について

1994 年 1 月 17 日 4 時 31 分、米国カリフォルニア州ロサンゼルス市ノースリッジ直下深さ 18km において Mw6.8 の地震が発生した。構造物の柱のせん断破壊など構造的な被害に加え、架橋の崩落や道路の亀裂などのインフラ被害が多く見受けられた。この地震はサンアンドレアス断層と太平洋プレートの圧縮場が生み出すトランスバースレインジと呼ばれる地震多発地域で起こり、過去の地震を受け設置された密な観測網は地震動の調査・研究に大きな意味をもたらした。

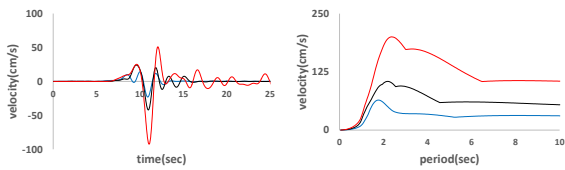
4. 震源断層モデルの設定方法

震源断層モデルの設定方法については、強震動レシピに基づき震源断層モデルを設定する。強震動レシピには表 1 に示すように地震動を評価するために必要な構成要素となる震源特性、地下構造モデル、強震動計算、予測結果の検証など様々なパラメータの設定方法がまと

不足していることが分かる。一方観測点 U56 に関して、位相は概ね再現できてはいるものの、速度波形と速度応答スペクトルでの周期 1 秒以上の長周期帯における振幅が大きく過小評価しており、再現性に課題が残った。この原因としては、アスペリティ位置や破壊開始点の追加、すべり速度時間関数の形状変更など諸検討の結果から、強震動レシビに基づき設定した断層モデルにおける各アスペリティからのパルスの重ね合わせ (=破壊伝播) と、断層面上におけるすべり速度の時刻歴変化を表すすべり速度時間関数の形状が計算波形に大きく影響すると考察した。



観測点 NHL NS 方向 青:解析 黒:Wald et al. (1996) 赤:観測



観測点 U56 NS 方向 青:解析 黒:Wald et al. (1996) 赤:観測

図 5 地震動評価結果

6. すべり速度時間関数の形状に関する考察

前項を受けて破壊伝播とすべり速度時間関数の形状を試行錯誤的に検討した結果、すべり速度時間関数の形状が最も計算波形に影響すると考察した。

この結果を受けて、Wald et al. (1996) による震源インバージョンでの関数と、強震動レシビにおける中村・宮武(2000)による関数を比較し、過小評価となる原因を考察する。Wald et al. (1996) では、図 3 に示すように幅 0.8 秒の 3 つの三角形を 0.4 秒間隔で重ね合わせているのに対して、中村・宮武(2000)は立ち上がりの強い数値解の近似式を用いており、形状が全く異なる。

形状の異なる関数を比較するために、断層面上での地震モーメントの時刻歴変化を表す震源時間関数を以下の式の通りに導出する。

$$\omega(t) = \sum \mu_i \cdot v(t)_i \cdot S_i$$

ここで、i は小断層番号、 μ は地殻の剛性率、 $v(t)$ は

すべり速度時間関数、 S は小断層面積を表す。

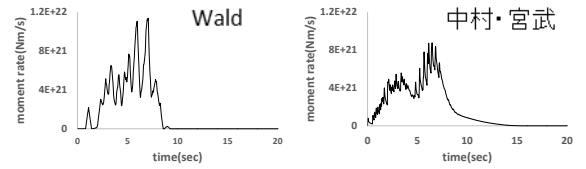


図 6 震源時間関数(左:震源インバージョン 右:強震動レシビ(中村・宮武(2000)))

また、震源時間関数をフーリエ変換により周波数領域とし、積分したものを震源スペクトルと呼ぶ。震源スペクトルを用いた周波数領域における各すべり速度時間関数同士の比較には、 ω^2 モデル(オメガスクエアモデル)と呼ばれる統計的震源モデルを用いる。Boore(1983)によれば、以下の式より求められる。

$$M(f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_c)^2} \times P(f, f_{max})$$

ここで M_0 は地震モーメント、 f_c はコーナー周波数、 $P(f, f_{max})$ は高振動数をカットするためのフィルターである。

このオメガスクエアモデルは、各すべり速度時間関数がオメガスクエアモデルの振幅の理論値に対して、十分な周波数成分を持っているかの指標にする。以下図 7, 8 に各すべり速度時間関数から求めた震源スペクトルとオメガスクエアモデルとの比較を示す。

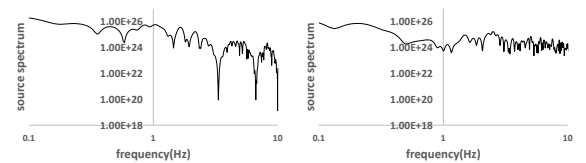


図 7 震源スペクトル(左:震源インバージョン 右:強震動レシビ(中村・宮武(2000)) (周波数で表示))

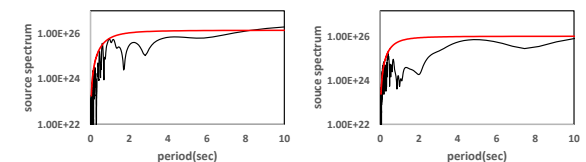


図 8 オメガスクエアモデル(赤線)と各震源スペクトル(黒線)の比較(左:震源インバージョン 右:強震動レシビ(中村・宮武(2000)) (周期で表示))

以上の結果より、周波数 1Hz 以下(周期 1 秒以上)において、Wald et al.(1996)による震源インバージョンにおける震源スペクトルはオメガスクエアモデルの理論値

を満たしているが、中村・宮武(2000)の震源スペクトルはオメガスクエアモデルに対して大きく過小評価している。この不足している周期 1 秒以上は、図 2 の観測点 U56 における速度応答スペクトルでの観測波形に対して振幅不足が見られる周期と一致しており、すべり速度時間関数の形状の違いが、1994 年ノースリッジ地震について言えば、強震動レシピに基づき設定した震源断層モデルを用いた地震動評価における観測波形の過小評価の原因の 1 つであると考察した。

7. 考察・まとめ

強震動レシピに基づき震源断層モデルを作成し、波数積分法に基づく理論的手法を用いて、1994 年ノースリッジ地震(米)の再現解析を行った。その結果、断層破壊進行側の観測点において、観測点 NHL では概ね再現ができたものの観測点 U56 では速度波形の最大振幅が観測波形と比較して大きく過小評価しており、破壊伝播による影響とすべり速度時間関数の形状の違いによる影響を考察した。その結果、すべり速度時間関数から求められる震源スペクトルについて、理論値である統計的震源モデルの ω^2 モデル(オメガスクエアモデル)と比較することで、観測点 U56 における観測波形に対して過小評価している周期成分が、オメガスクエアモデルに対する過小評価成分と一致していることから、強震動レシピに基づき設定した震源断層モデルを用いた 1994 年ノースリッジ地震に対する地震動評価においては、すべり速度時間関数の形状が観測波形に対する過小評価と関係していると考察した。今後の課題として、オメガスクエアモデルに適合しているすべり速度時間関数を用いた地震動評価と、海外における地震動評価手法 SCEC による地震動評価、加えて強震動レシピで再現可能な国内の内陸地殻内地震における震源パラメータの設定方法と比較することによる、過小評価となる原因の解明を挙げる。

8. 謝辞

本研究で使用した震源情報は Prof. Paul Martin Mai による SRCMOD、及び、観測記録は PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center) と CDMG(California Division of Mines and Geology)によるものです。三宅弘恵氏(東京大学大学院情報学環 附属総合防災情報研究センター)には強震動レシピと SCEC Broadband Platform を用いた地震動評価に関して資料

をご提供していただきました。また、論文作成に当たっては田中信也氏(東電設計・工学院大学大学院博士課程)に多大なご助力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法，日本建築学会構造系論文集 第 501 号，P49-56，1997 年 11 月
- 2) 久田嘉章：震源近傍の強震動 -改正基準法の設計用入力地震動は妥当か?-, 第 29 回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp99-110，2001
- 3) Hisada, Y, and J. Bielak: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, pp.1154-1168, 2003
- 4) 久田嘉章：震源アスペリティーと震源近傍の強震動特性，第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.186-189，2006 年 11 月
- 5) 久田嘉章：内陸地殻内地震の相互比較 -類似点と相違点-, 第 53 回地盤震動シンポジウム，pp87-98，2007
- 6) Wald, D et al. :The Slip History of the 1994 Northridge, California, Earthquake Determined from Strong-Motion, Teleseismic, GPS, and Leveling Data, Bull. Seism. Soc. Am., V.86, pp49-70, 1996
- 7) 入倉幸次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測，地学雑誌 Journal of Geography, 110 (6) 849-875, 2001
- 8) 地震調査推進本部 地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)，2016
- 9) 壇一男：内陸地震の強震動予測のための断層モデルの設定方法 -活断層情報の捕らえ方アスペリティモデルの力学特性-, 株式会社 大崎総合研究所, ORI 研究報告 08-01, 2008 年 6 月
- 10) 中村洋光・宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式，地震 第 2 輯 第 53 巻, 1-9 項, 2000
- 11) 三宅弘恵・他：SCEC Broadband Platform における強震動レシピ，日本地震学会，日本地震学会 2019 年度秋季大会資料，2019
- 12) Boore D. M. : Strong-Motion Seismology, REVIEWS OF GEOPHYSICS AND SPACE PHYSICS, VOL. 21, NO. 6, PAGES 1308-1318, JULY 1983