

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第9回) 地震動の地盤増幅特性の面的な推定

松岡昌志 (東京工業大学 環境・社会理工学院)*

1. はじめに

任意の地点の地震動強さを評価するためには地震の震源特性、伝播特性、地盤特性の3つを把握する必要がある。その内、地盤特性が地震動特性に大きな影響を与える場合が多く、地震被害想定の基本情報となるサイスミックマイクロゾーニングでは、地盤特性(とくに増幅特性)の面的分布の把握に重点が置かれる。本報では、Technical Committee for Geotechnical Engineering (1993) や文部科学省地震調査研究推進本部(2017)の資料を参考に地盤モデルの作成手法を概観すると共に、地盤の平均S波速度を用いた地盤増幅特性の面的推定を既往の関連研究を紹介しながら説明する。

2. 地盤増幅特性の評価手法

過去の地震被害の多くは地震動の主要動部分を構成するS波により説明できることから、対象地点での地盤のS波速度や層厚が既知の場合には、下方から鉛直入射するS波の重複反射により、設定した基盤に対する地盤の増幅特性を解析的に計算することができる。しかし、対象地域が広く、地盤情報が豊富でない場合には簡略的な評価に頼らざるを得ない。Technical Committee for Geotechnical Engineering (1993) では、得られる地盤調査データの量や質によって評価手法を3つのGradeに分けて手法や事例を示している。Grade-1は地質図等の地盤分類から、Grade-2は表層の平均S波速度から、Grade-3はボーリングデータ等に基づき作成した速度構造モデルから評価している。地震調査研究推進本部(2017)の地下構造モデル作成の考え方では、地盤構造を深部と浅部に分け、さらに後者についてはTechnical Committee for Geotechnical Engineering (1993)と同様に、地盤調査データの有無によって増幅特性の評価手法が分かれている。対象地域をメッシュに分割して、地形区分から表層の平均S波速度を介して増幅率を与える方法(上述のGrade-2相当)、ボーリングデータや地質情報から各メッシュの代表柱状図と速度構造モデルを作成して、解析的に増幅率を求める方法(上述のGrade-3相当)を紹介している。なお、ボーリングデータからのS波速度推定には経験式が用いられることが多い。地盤調査データが無いメッシュに対しては、表層の平均S波速度を常時微動のアレイ観測から求めることもある(紺

野・片岡, 2000)。

3. 地盤の平均S波速度を用いた増幅特性の広域推定

2章で説明したように、地盤増幅の評価手法は対象地域の大きさや得られる地盤情報に依存する。南海トラフ巨大地震を想定した広域的な震度分布の計算や地盤情報が少ない開発途上国でのゾーニングにおける評価の際は、面的に拡張していくことを想定した簡便な指標を用いることが一般的である。ここでは、詳細なS波速度構造が得られない場合における上述のGrade-2相当の手法について簡単に紹介する。

3.1 地盤の平均S波速度と増幅特性の関係

地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度(V_{s30})が地震の震度分布や地盤増幅率と相関があることがBorcherdt et al. (1979)により見いだされた。その後、地盤のPS検層データに基づく重複反射の数値計算(翠川, 1980)や強震記録の解析(例えば、Midorikawa et al., 1994)など多くの検討がなされ、 V_{s30} は米国や欧州の耐震基準で用いられる地盤分類として採用されている。最近では多数の強震記録による解析により、地盤の非線形性を考慮した増幅率の推定式も提案されている。なお、0.5秒以下の比較的短周期における地震動の増幅率については、深さ10mまでの地盤の平均S波速度(V_{s10})で十分説明できるとの指摘もある(川瀬・松尾, 2004)。

日本全国から収集したPS検層データに基づき、重複反射による地盤の増幅率と平均S波速度の関係を簡単に試算してみた。ここでは、基盤に入射するS波の地表での増幅率(露頭基盤に対する増幅率)を求め、そのうち、地震動の最大速度と相関が高い周期0.1秒から2.5秒の積分値を地盤の増幅率とした。基盤を600m/sの層とした場合の地盤の増幅率と平均S波速度(V_{s30} と V_{s10})の関係を図1に示す。平均S波速度の値が大きくなると増幅率は小さくなり、両者の相関は高い。また、 V_{s30} における傾きはMidorikawa et al. (1994)とほぼ一致する。表1には基盤を400m/sあるいは3,000m/sの層に変えて計算した場合の増幅率と平均S波速度の相関係数も示している。基盤を400m/sにした際には、 V_{s10} と V_{s30} では相関係数がほぼ同じになる。

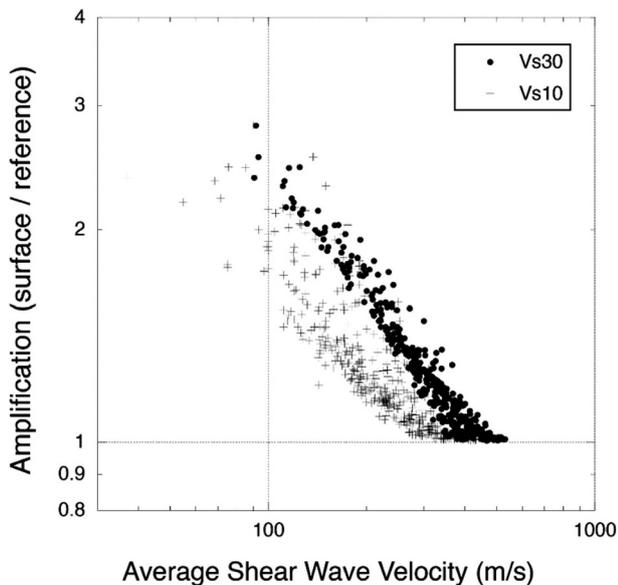


図 1 地盤の平均 S 波速度と基盤を 600m/s にした時の増幅度との関係

表 1 地盤の平均 S 波速度と増幅度の相関係数

基盤の S 波速度 (m/s)	データ数	相関係数	
		Vs10	Vs30
400	484	0.87	0.87
600	389	0.86	0.97
3,000	170	0.70	0.89

3.2 地盤の平均 S 波速度の面的な推定

平均 S 波速度が地盤増幅と相関があることがわかったので、次に、この指標を面的に拡張する。広域的に入手できる地盤情報である地形図や地質図を用いて、地盤の傾斜度から（例えば、Wald and Allen, 2007）、地質区分から（例えば、翠川, 1987）、傾斜度と地質区分の両方から（Thompson et al., 2014）、Vs30 の分布を推定する経験式が提案されている。しかし、地質区分が完新統の地盤であっても、河成と海成、また、粘性土系と砂質土系とは異なる地盤特性を示すことから、Matsuoka et al. (2006) では、地盤情報として地形区分に着目して Vs30 の分布を推定している。しかし、地形分類図の作成は、航空写真や衛星画像の目視判読や現地調査などの労力を伴うことから、対象地域において必ず得られるというものではない。そこで、標高データから計算される地表面の特徴量を用いて機械的に地形区分を類推する手法が提案され（Iwahashi and Pike, 2007）、この地形区分から Vs30 を推定する試みも行われている（Yong et al., 2012）。Ahdı et al. (2017) は

Vs30 データセットの構築方法と各種地盤情報から Vs30 を面的に推定する方法について、既往研究のレビューと共に整理しているので参照されたい。

4. まとめ

本報では、地震動の地盤増幅特性の面的な評価に必要な地盤モデルの作成に関して、一般的な手順・手法を概観し、とくに、地盤調査データが限られている地域での増幅特性の評価に指標として用いられている地盤の平均 S 波速度とその面的な推定方法を紹介した。

参考文献

- Ahdı, S.K., Stewart, J.P., Ancheta, T.D., Kwak, D.Y. and Mitra, D., 2017, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **107** (3), 21pp.
- Borcherdt, R.D., Gibbs, J.F. and Fumal, T.E., 1979, U.S. Geological Survey Circular **807**, 13-25.
- Iwahashi, J. and Pike, R.J., 2007, *Geomorphology* **86** (3/4), 409-440.
- 地震調査研究推進本部, 2017, 地下構造モデル作成の考え方 (平成 29 年 4 月 27 日公表), http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/underground_model/
- 川瀬 博, 松尾秀典, 2004, *日本地震工学会論文集*, **4** (4), 126-145.
- 紺野克昭, 片岡俊一, 2000, *土木学会論文集*, (647), 1-51, 415-423.
- Matsuoka, M., Wakamatsu, K., Fujimoto, K. and Midorikawa, S., 2006, *Struc. Eng. Earthq. Eng.*, **23** (1), 57s-68s.
- 翠川三郎, 1980, 第 8 回地盤震動シンポジウム資料集, 59-64.
- 翠川三郎, 1987, *構造工学論文集*, **33B**, 43-48.
- Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K., 1994, *Proc. 9th Japan Earthq. Eng. Symp.*, **3**, 85-90.
- Technical Committee for Geotechnical Earthquake Engineering TC4, 1993, *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 149pp.
- Thompson, E.M., Wald, D.J. and Worden, C.B., 2014, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **104** (5), 2313-2321.
- Wald, D.J. and Allen, T.I., 2007, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97** (5), 1379-1395.
- Yong, A., Hough, S.E., Iwahashi, J. and Braverman, A., 2012, *Bull. Seism. Soc. Am.* **102** (1), 114-128.

*強震動委員会から：著者の松岡氏は強震動委員会の委員ではないが、特別に執筆をお願いしたものである

(第10回) 地盤の非線形応答：等価線形解析法とその改良法

強震動委員会 大堀道広 (福井大学附属国際原子力工学研究所)

1. はじめに

地震学で取り扱っている方程式は、応力-ひずみ関係(構成則)が線形関係であると仮定して用いられるが、本来の関係式は多項式であり、応力やひずみが大きくなると線形関係ではなくなる。強震動予測や被害想定に影響を与える表層地盤の増幅特性の評価においては、地盤の非線形性をどのように扱うかがとても重要であり、地盤内に発生するひずみの度合いが支配的なパラメータとなる。本稿では、地盤の非線形応答に関する重要な成果の一つとして位置づけられる等価線形解析法に焦点をあて、その有用性について触れた後に、いくつかの改良法も含めた特長を述べる。なお、強震動地震学講座の前シリーズでは飯田(1997)による解説があるのでそちらも参照されたい。また、表層地盤の非線形性に関する研究の全体像に関しては翠川(1993)の総合報告や、さらに地震応答解析の詳細に関しては吉田(2010)の成書を参照されたい。

2. 地盤の剛性・減衰定数のひずみ依存性と地震応答解析法

地震動は工学的基盤から表層地盤に入射すると増幅する。この時、各地層に生じるひずみが小さなうちは線形領域にとどまり、弾性的な性質を示し、剛性や減衰性の変化は見られない。その目安となるひずみは 10^{-4} 以下とされる。いきなり 10^{-4} と言っても想像しにくいであろうが、地盤のひずみは地表の地震動の最大速度 V_{max} を表層地盤の平均的なS波速度 V_s で除した V_{max}/V_s で概算され、ひずみが 10^{-4} となるのは V_{max} が15cm/s、 V_s が150m/sの時に相当する。[なお、翠川(1993)は地震記録の分析結果より $0.4 \times V_{max}/V_s$ を有効ひずみと定義し、 3×10^{-4} 前後(V_{max} が15cm/s、 V_s が200m/sに相当する)を境に地盤の非線形性を概略判断できそうであると述べている。]地震動の振幅が大きくなるにつれてひずみも大きくなり、 10^{-4} を超えると非線形性が現れ、剛性が低下し、減衰性が増大する。これは、地震動のスペクトル振幅では、ピーク周波数の低減やピーク値の低下として観察される。さらに地震動の振幅が大きくなり、ひずみが 10^{-2} を大きく超えると、非線形性が明瞭となり、遂にはすべり、沈下、液化化など地盤の破壊現象に至る。このように、地盤に生じるひずみの度合いによって、地震時の地盤の挙動は線形から非線形へと劇的に変化する。従って、地震応答解析法もひずみの度合いに応じて適切な方法を選択する必要がある。

ひずみが 10^{-4} 程度までなら線形解析、それを超えて 10^{-3} 程度までなら各層の有効ひずみに応じた剛性の低下と減衰定数の増加を考慮した等価線形解析法(Schnabel et al., 1972)、ひずみが 10^{-2} を超えた程度なら後述するように等価線形解析法の問題点の改良を試みた周波数依存型等価線形解析法[吉田・末富(1996)、Kausel & Assimaki(2002)、山本・笹谷(2007)など]が提案されている。以上の解法はいずれも線形解析法が必要となるが、そこではHaskell(1960)のマトリックス法などの周波数領域での地震応答解析法が用いられ、地盤の剛性や減衰定数のひずみ依存性が考慮されている。

ひずみが 10^{-2} を大きく超える場合には、Hardin-Drnevichモデル(HDモデル)やRamberg-Osgoodモデル(ROモデル)などの履歴特性モデルを用いて運動方程式を時間領域で直接逐次積分して解く方法が用いられる。地震時に地盤に生じるひずみは時間とともに変化し、これに合わせて剛性や減衰定数も時々刻々と変化する。この変化を考慮できるのが時間領域の解法であり、周波数領域の解法よりも精度が高いと思われるが、原位置での動的変形特性試験結果がなければむしろ精度が低くなる場合も見受けられる(山本・笹谷, 2007)。また、履歴特性モデルでは動的変形特性試験結果の近似精度に関する問題も指摘されている。ひずみが大きくなるとHDモデルでは剛性が低めに、ROモデルでは剛性が高めになる傾向が認められることを踏まえ、両者を結合して近似精度を高めた方法も提案されている(中川ほか, 2011)。

一般に地震応答解析を行う際には、必要となる地盤情報は不足しがちであり、専門的知識や判断によって補われる場合が多い。等価線形解析法は地盤資料がたいへん少ない場合にも既往の地盤情報の整理結果などを参考にして動的変形特性を簡単に設定できること、線形解析を基本としているため解析結果の解釈がしやすいこと、定式化が明快で上昇波と下降波を分離して基盤への入射波の算定も容易なことなどの特長がある。従って、等価線形解析法は地盤の非線形性を考慮した地震応答解析法の第一近似として有用であり、引き続き高度な解析法を用いるかどうかの判断材料を与えてくれる。

3. 等価線形解析法とその改良法

Schnabel et al. (1972)が提案した等価線形解析法では、まず線形地盤に対する地震応答解析を一通り済ませた後に、各層の中央深さ位置でのひずみを評価し、そのひずみ

レベルに応じて剛性を低減させ、減衰定数を増加させる。そして改めて線形解析を行い、ひずみの度合いを評価して、剛性と減衰定数を再決定する。この計算を繰り返し、各層のひずみの収束状況を判定して計算を終了させる。同じ地層であってもひずみの度合いは深さ位置によって異なるので、解析の際には、最小波長の1/6程度以下となるように層厚を細分割する。各層の剛性と減衰定数を決めるひずみには、瞬間的に発生する最大ひずみではなく、これに換算係数として0.65倍を乗じた有効ひずみを用いられる。等価線形解析法では地震動の最初から終わりまでの波形全体に対して同じ剛性と減衰定数を与えるため、振幅が大きい主要動部分の再現性が比較的良好であっても、それ以外の波形区間の再現性が低い場合も散見される。なお、彼らは開発した解析プログラムをSHAKEと名付けて公開しており、世界中の研究者・技術者に利用されている。以降、本稿では等価線形解析をSHAKEと略称する。

SHAKEによる地震応答解析では、最大加速度が大きく評価される傾向と、高周波数成分において振幅が大きく低下する傾向が指摘されている。前者の原因は、有効ひずみを評価する際に最大ひずみに乗ずる換算係数0.65に問題があるとされる(吉田, 2010)。この値を用いると最大ひずみの発生時の応力が約1.5倍大きくなり、最大加速度も同様に増大するためである。後者の原因は、ひずみの周波数依存性が考慮されていないことによる。これは、高周波数成分ではひずみは大きくなりにも拘わらず、最大ひずみに基づく有効ひずみを用いて周波数によらずに一定の剛性や減衰定数を決めていることによる。高周波数成分の振幅が低下する現象は、地表観測記録から地中の入力地震動を算定する際に高周波数成分の振幅を大きく回復させることにつながるため、深さとともに地震動が大きくなる結果を与える場合がある。SHAKEの適用範囲はひずみが 10^{-3} より少し大ききめまでとされる。

杉戸ほか(1994)は、最大値で基準化したひずみ波形のスペクトル振幅を用いて、周波数ごとに異なる有効ひずみを用いて、周波数ごとに異なる剛性と減衰定数を与える方法を提案している。彼らはこの方法を周波数依存型等価線形解析(Frequency dependent equi-linearized technique)と名付けており、以降、FDELと略称する。FDELは低周波数成分ではSHAKEと同様の結果を与えるが、高周波数成分の振幅低下が改善されるため、結果的にSHAKEよりも最大加速度が大きくなる傾向がある。なお、杉戸ほか(1994)は有効ひずみへの換算係数にはパラメータスタディの結果を踏まえ0.65を推奨しているが、1.0とした方が良いという意見もある(吉田, 2010)。ところで、FDELでは各層の剛性と減衰定数が周波数ごとに異なることになり、この点は理解するのが難しい。これは杉戸ほか(1994)

も言及しており、観測値の再現性に主眼をおいて簡便法を提案しているが、その物理的な現象には立ち入らずに、今後の研究に解明を期していると述べている。FDELはSHAKEよりも大きな最大加速度を算出するため、適用範囲となるひずみの上限はSHAKEのそれよりも小さいとされる。

吉田・末富(1996)は、ひずみ波形からゼロクロス法により最大ひずみとそれを与える周波数を算出した後に、これらを用いてひずみの周波数依存性を与えて、周波数ごとの剛性と減衰定数を評価して地震応答解析を行うDYNEQ(Dynamic response analysis of level ground by equivalent linear method)という解析プログラムを開発しており、以降、DYNEQと略称する。DYNEQはFDELと同じく周波数依存型等価線形解析に分類されるが、FDELではひずみのスペクトル振幅を用いているのに対して、DYNEQでは観測記録より評価した最大ひずみとそれに対応する周波数を概観した上で、有効ひずみの周波数依存性がモデル化されている。最大ひずみに乗ずる有効ひずみへの換算係数は、最大ひずみを与える周波数以下の低周波数側では1.0となり、これよりも高周波数側では徐々に小さくなり、指定した周波数(例えば10Hz)以上では0.0となる。こうして、SHAKEで問題とされていた最大加速度の過大評価と高周波数成分における振幅の低減が同時に改善されている。なお、DYNEQは解析プログラムが理論解説を含む詳細な利用マニュアルとともに公開されており、さらにSHAKEとFDELの両方の解析法をオプションとして選択できるなどの特長を有する。DYNEQの適用範囲となるひずみの上限は 10^{-2} よりも高いとされる。

周波数依存型等価線形解析法には、ほかにもKausel & Assimaki(2002)、山本・笹谷(2007)の方法がある。Kausel & Assimaki(2002)の方法はFDELにも類似しているが、有効ひずみにひずみ波形のスペクトルをそのまま利用するのではなく、モデル関数で近似していることや、最大ひずみの有効ひずみへの換算係数が1.0に相当することから、DYNEQの方法に類似している。同様に、山本・笹谷(2007)の方法はDYNEQで実装されている有効ひずみのモデル関数とは異なる提案式が用いられ、有効ひずみへの換算係数も周波数の関数として明示され、観測記録の再現性も高まった印象を受ける。このほか、永坂ら(2016)は、これまでの周波数依存型等価線形解析法とは異なる等価線形解析法の改良法を提案している。彼らの方法では、入力波を多数のインパルス列とみなし、各インパルスに対する等価線形解析に基づくインパルス応答を時間領域で逐次重ね合わせることで地震応答が算出される。これまで波形全体に対して一定とされていた剛性と減衰定数に経時変化が与えられており、今後、その適用性が注目される。

4. まとめ

本稿では、地盤の非線形応答に関して、特に等価線形解析法の有用性と、改良法を含めた特徴について概観した。地盤の非線形性を伴う大振幅の地震記録の蓄積が進んでおり、本稿で紹介した等価線形解析法とその拡張法が多くの研究者により検証され、その適用性や妥当性が整理されて行くことを期待したい。最後になりますが、編集担当の干場充之氏と岩田知孝氏のご助言により、原稿を大きく改善できたことを記し、感謝申し上げます。

参考文献

Haskell, 1960, J. Geophys. Res., **65**, 4147-4150.

飯田昌弘, 1997, 強震動地震学講座, 地震学会ニューズレター. http://www.zisin.jp/publications/document02_07.

html (参照: 2017/10/10)

Kausel and Assimaki, 2002, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, **128**, 1, 34-447.

永坂・田中・張, 2016, 地震工学ジャーナル, **11**, 377-390.

翠川, 1993, 地震2, **46**, 207-216.

中川・平澤・小林・佐々木, 2011, 日本建築学会構造系論文集, **666**, 1407-1414.

Schnabel, Lysmer and Seed, 1972, EERC Report, 72-12.

杉戸・合田・益田, 1994, 土木学会論文集, **493**, 49-58.

山本・笹谷, 2007, 日本地震工学会論文集, **7**, 2, 144-159.

吉田, 2010, 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会.

吉田・末富, 1996, 佐藤工業(株) 技術研究所報, 61-70.