

不整形地盤を伝播する 2 次元SH波に関する Normalized Energy Densityの特徴

河村 雄一¹・後藤 浩之²・澤田 純男³

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

²京都大学防災研究所助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

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

本研究では、従来 1 次元水平多層構造で議論されていた Normalized Energy Density について、不整形な基盤面を有する媒質を伝播する場合にどのような性質を持つか調べる。AL法を用いた数値解析により、いくつかのケースについては 1 次元の場合と同様に表層と基盤の NED が一致することが示唆される結果となった。

Key Words : Normalized Energy Density, irregular layered medium, AL method

1. はじめに

全無限均質媒質を伝播する弾性波のエネルギーは、弾性波を放射するソースを取り囲むようにして設定した表面に関する面積分として定義することができ、面の取り方に依存せずに常に等しい値をもつ。また、波線 (ray) に着目すると、波線の束がなす ray tube に沿ってどの断面においてもエネルギーは等しい値をもつ。ところが、ray tube は媒質境界を跨いで存在出来ないため、媒質境界を跨いで弾性波のエネルギーは保存されない。このことは水平多層構造でモデル化されるような表層地盤においてエネルギーによる議論が難しいことを示唆している。

後藤ら¹⁾²⁾は Normalized Energy Density (NED) という新しい物理量を定義し、これが水平多層構造において保存されることを示した。従来の定義による弾性波エネルギーとは異なる物理量であるため、エネルギーが保存出来ない水平多層構造についても NED に基づいて保存性を利用した議論ができるという特徴を持つ。例えば、減衰の程度に依存して NED の保存性が失われるため、これを利用して水平多層地盤における内部減衰を直接推定する方法を開発することができる³⁾。

一方、水平多層構造のように 1 次元的に弾性波が伝播

する場合について従来検討が進められていたが、不整形地盤のように 2 次元の波動場を考えなければいけない場合について詳細な検討は進められていなかった。本研究は、1 次元波動場で定義され検討されていた NED の特徴を、同様に 2 次元不整形地盤の場合について数値解析を使って検討することを目的としている。

2. Normalized Energy Density

図-1 に示すような n 層の表層と基盤からなる水平多層地盤を考える。ここで、第 k 層の地盤の密度を ρ_k 、S 波速度を β_k 、層厚を h_k 、基盤の密度を ρ_0 、S 波速度を β_0 とする。このとき、表層第 1 層目における Normalized Energy Density (NED) は次のように定義される。

$$NED = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} \rho_1 \beta_1 \left| \frac{A_1(\omega)}{A_0(\omega)} \right|^2 d\omega \quad (1)$$

ここに、 A_1 、 A_0 はそれぞれ表層第 1 層目を伝播する上昇波の振幅、基盤から表層に入射する入射波の振幅を表す。また、基盤入射波に対する地表面での応答の比として地盤伝達関数 H を定義すると、NED は地盤伝達関数によって表現することもできる。

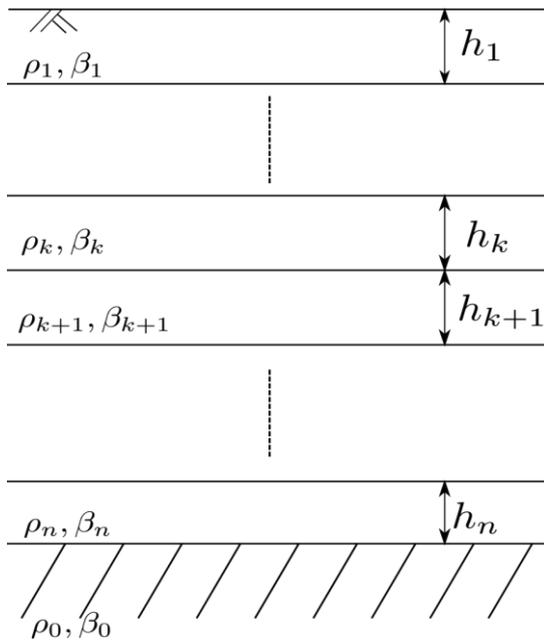


図-1 水平多層地盤モデル.

$$\text{NED} = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} \frac{\rho_1 \beta_1}{4} |H(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

定義から明らかなように、NED はエネルギーそのものではなく、入射波に対する比を対象としてパワーをとっている。このことは、入射する地震動のエネルギーそのものを定量化した物理量ではなく、地盤の震動特性に関する系そのものが持つ物理量であることを表しており、入射する地震動に依らず一定の値を持つ。

後藤ら¹⁾²⁾は上で定義されるNEDの特徴について考察し、水平多層地盤に対してNEDが深さに依存しない、すなわち保存されることを2層系については解析的に、3層以上の多層系については数値解析によって示している。

本研究では、不整形地盤を持つ2次元問題についてNEDの特徴を調べる。従来は水平方向に波動場が一樣な1次元問題を仮定していたため、 A_1 が水平方向に一樣な場合を想定していた。不整形地盤を持つ場合、一般に A_1 は水平方向に一樣とならないため、NEDの定義を拡張し2次元問題については以下のように定義する。

$$\text{NED} = \lim_{\Omega L \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \rho_1 \beta_1 \left| \frac{A_1(x, \omega)}{A_0(\omega)} \right|^2 dx d\omega \quad (3)$$

ここに、 L は水平方向にとる区間長で、可能な限り広くとることを意味している。定義から明らかなように、 A_1 が水平方向に一樣である場合は従来のNEDの定義に帰着できるため、1次元水平多層構造の場合と矛盾しない。

3. 数値解析結果

本研究では、図-2、3に示すような形状の異なるサインカーブを用いた2層系凹型地盤3種と斜層地盤において、数値解析によって検討した。数値解析手法はAL法⁴⁾を採用している。

まず、3つの凹型地盤については表層の密度 ρ_1 、S波速度 β_1 、層厚 h 、基盤の密度 ρ_0 、S波速度 β_0 をそれぞれランダムに与えたシミュレーションモデルをそれぞれ20モデル作成する。斜層地盤については表層の密度 ρ_1 、S波速度 β_1 、基盤の密度 ρ_0 、S波速度 β_0 をランダムに与えたシミュレーションモデルを20モデル作成する。パラメータの範囲は密度は1400~2400kg/m³、表層のS波速度は55~1620m/s、基盤のS波速度は800~2400m/s、層厚は250~1000mとし、いずれも一様分布を仮定したサンプリングで得られた値に基づいてモデルを作成している。

次にNEDの導出手法について説明する。まず、AL法を用いて伝達関数を算出した後に、地表に等間隔に設置した観測点毎に振幅比のパワーの周波数方向平均 $\langle |A_1/A_0|^2 \rangle$ を計算する。ただし、今回使用する周波数帯

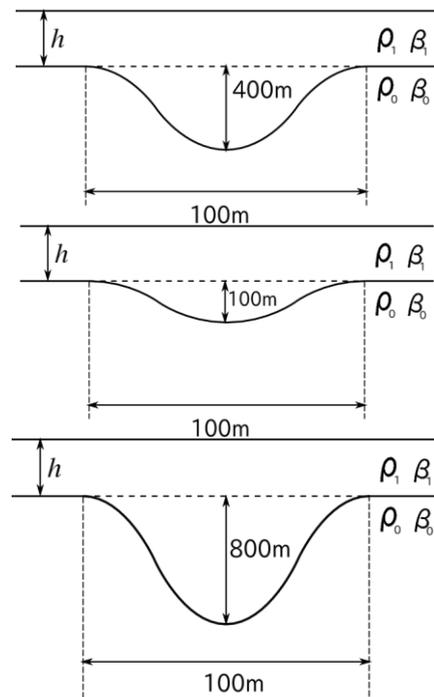


図-2 数値解析に用いた凹型地盤3種 (上: ケース1, 中: ケース2, 下: ケース3) .

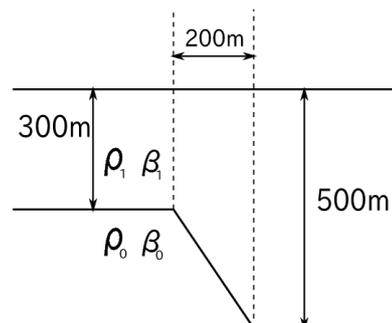


図-3 数値解析に用いた斜層地盤

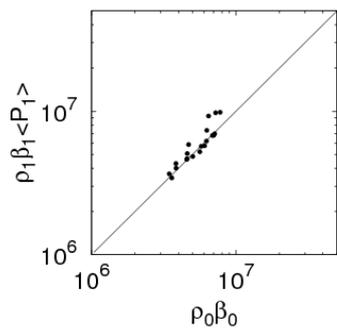
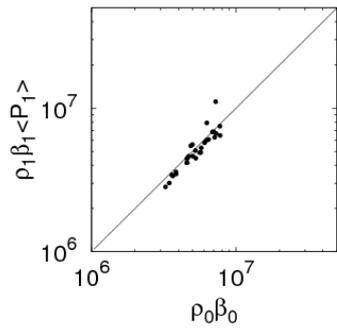
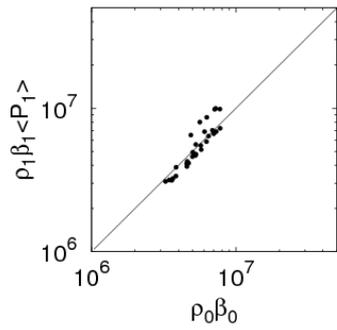


図-4 凹型地盤3種のケースにおける基盤と表層のNEDの比較
(上: ケース1, 中: ケース2, 下: ケース3)

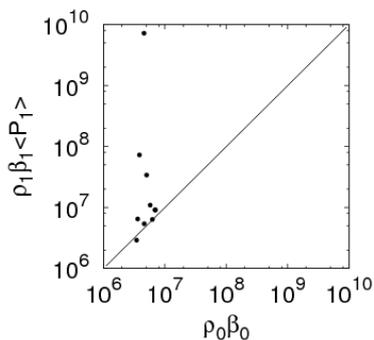


図-5 斜層地盤における表層のNEDと基盤のNEDの比較

は0.1-20Hzに限定している。これに表層のインピーダンスをかけてから地表観測点間の平均を計算してNEDとする。また、基盤におけるNEDは従来通り $\rho_0\beta_0$ と定義する。

4つのケースについて数値解析を実行し、横軸を基盤のNED、縦軸を表層のNEDとして整理してグラフ化したものが図-4, 5である。凹型地盤の場合はいずれのケース

においても $\rho_1\beta_1\langle P_1 \rangle / \rho_0\beta_0 = 1$ の直線上にサンプルが集中しており、表層のNEDと基盤のNEDの一致が示唆される。ただし、基盤のNEDが大きくなるにつれてやや一致しないものが散見される。対して斜層地盤の場合、 $\rho_1\beta_1\langle P_1 \rangle / \rho_0\beta_0 = 1$ の直線近傍に集まるものと大きく異なるものがある。この原因が本質的なものか、検討を進める必要がある。

4. まとめ

本論文では、AL法を用いた数値解析によって2次元不整形地盤におけるNEDの性質について検討した。滑らかなサインカーブでモデル化した凹型地盤では基盤と表層のNEDが一致する可能性が示唆される。一方、斜層地盤ではこのような傾向が見られないため、その原因について検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 後藤浩之, 平井俊之, 澤田純男: 水平多層地盤を鉛直に伝播する波に関する保存量, 第13回日本地震工学シンポジウム, pp.3587-3592, 2010.
- 2) Goto, H., S. Sawada and T. Hirai, Conserved quantity of elastic waves in multi-layered media: 2D SH case -Normalized Energy Density-, *Wave Motion*, 48, 602-612, 2011.
- 3) Goto, H., S. Sawada, Y. Kawamura, T. Hirai and T. Akazawa, Definition of normalized energy density and its application to direct estimation of damping property, *The 4th International IASPEI/AEE Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, 2011.
- 4) Aki, K. and Larner, K. L.: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, 75, pp.933-954, 1970
- 5) 大堀道広, 南忠夫: 2次元AL法による堆積盆地の地震動解析, 東京大学地震研究所彙報, 65, pp.809-850, 1990.

NORMALIZED ENERGY DENSITY ON AN IRREGULAR SHAPE BASEMENT

Yuichi KAWAMURA, Hiroyuki GOTO, Sumio SAWADA

In this research, we discuss a property of Normalized Energy Density on an irregular shape of basement based on numerical simulations by using Aki-Larner method.