

第I部門 不整形地盤の簡易震動解析法に関する研究

京都大学大学院工学研究科
京都大学工学部

正会員 清野純史
学生員 ○篠原大介

1. はじめに

地盤構造の不均質性は、地盤による地震動の増幅特性に多大な影響を与える。本研究では、Born 近似による不整形地盤の整形近似を行い、層マトリックス法による重複反射理論を拡張することにより、不均質地盤の地震応答を近似的に算出する手法を開発した。また、単なる Born 近似の導入では満足されない地表面における境界条件を考慮した定式化を行った。本研究の手法による結果を Aki-Larner 法 (以後 AL 法) と比較することにより、その近似の程度を定量的に検討した。

2. 解析理論

本研究では、等方性地盤を取り扱う。地盤内の全ての点において変位と応力は横軸 x 、深さ z の関数であるとし、時間に関する項は $\exp(i\omega t)$ に支配されているものと仮定する。このような地盤に対し、鉛直下方から SH 波が入射する場合について考える。まず、不整形な境界面を持つ地盤を、水平方向に不均質な材料物性値を持つ地盤と見なすことにより、地盤物性値を z 方向のみに依存する主要項と、 x 方向にも依存する主要項からの変動成分に分ける。次に、地盤物性値の主要項を物性値から成る成層地盤に対して、重複反射理論を適用することにより、この成層地盤における応力及び変位場が求められる。地盤内の力の釣り合い式を表す偏微分方程式は、主要項と変動成分に分けて取り扱うことにより、均質性に関する項と不均質性に関する項の和として表すことができる。この偏微分方程式を x についてフーリエ変換し、その解を求めると次式のようになる。

$$f(k, z) = P(\lambda, z, z_0)f(k, z_0) + \frac{1}{2\pi} \int_{z_0}^z P(k, z, z') dz' \int_{-\infty}^{\infty} A_1(k - \xi, z') f(\xi, z') d\xi \quad (1)$$

ここに、 k は x 方向の散乱波数、 λ は x 方向の入射波数、 z_0 は、仮定した成層地盤における基盤面の z 座標である。また $P(k, z, z')$ は深さ z から z' までの伝達マトリックス、 A_1 は不均質性を表すマトリックスである。式 (1) により、 $f(k, z)$ 、すなわち変位及び応力場を求めることができる。式 (1) において、右辺第 1 項は均質性、右辺第 2 項は不均質性に基づく波動成分を示している。

実際の解析においては、図 1 に示すように、不整形地盤の境界面を直線で近似する。さらに Born 近似を用いて、右辺における $f(k, z)$ を仮定した成層地盤における $f_0(k, z)$ で近似する。成層地盤では x 方向の入射波数以外の波数をもつ波は伝播しないため、 ξ の $-\infty$ から ∞ までの積分は ξ が入射波数 λ 以外の場合は値を持たない。これにより式 (1) は次式のようになる。

$$f(k, z) = P(\lambda, z, z_0)f_0(k, z_0) + \frac{1}{2\pi} \sum_{l=1}^L H_l P(k, z, z_l) P(k, z_l, z_{l+1}) A_1^l(k - \lambda, z_{l+1}) f_0(\lambda, z_{l+1}) \quad (2)$$

ここに、 H_l は、第 l 層の層厚である。

式 (2) を基に、図 2 に示すモデルについて、震動解析を行った結果を次節に示す。

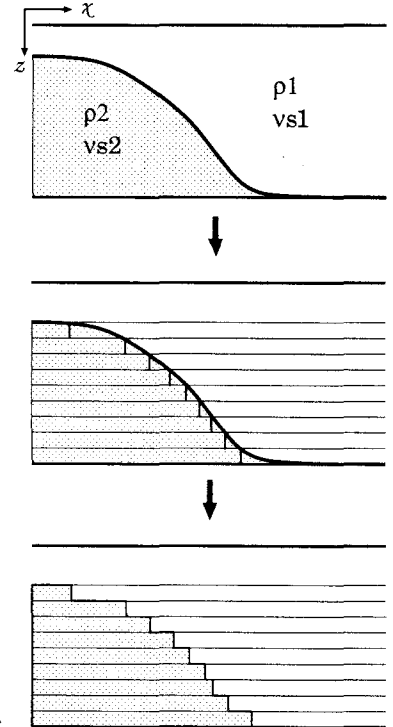


図 1: 地盤モデルの境界の直線近似

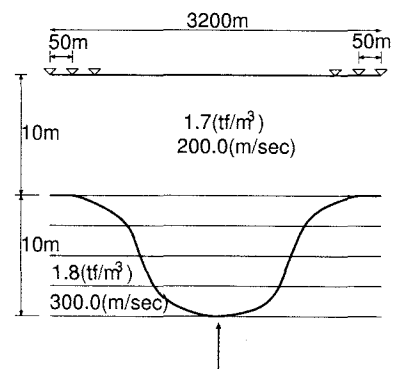


図 2: 解析地盤

3. 解析結果

図2に示す地盤モデルについて解析を行った。ここでは、図2における $x=0\text{m}$ 地点の鉛直方向の地盤物性値を式(2)の主要項として選択した。式(2)により、図3の(a)に示す地表面での波数スペクトルを得ることができる(入射振動数 7Hz)。真値として用いたAL法に比べ、本手法による解析結果では、散乱波数に対するスペクトル振幅がかなり小さいことがわかる。これは、式(2)における右辺第2項、つまり不均質性に関する項が、真値と比べて小さいことに起因する。また、この波数スペクトルをフーリエ逆変換することにより、図3の(b)に示すような地表面における応答倍率が得られる。前述したように、不均質性に関する項が小さいため、AL法と比べて地点間の応答倍率にあまり差の現われない結果となった。

地表面の $x=50\text{m}$ ならびに 1600m 地点に着目し、0から 15Hz までの入射振動数に対して周波数応答関数を求めたものが図4である。式(2)の主要項の物性値として選択した 0m 地点においてはAL法と一致しているが、 1600m 地点においては、AL法との間に大きな差が見られる。

この不均質項の真値との違いがBorn近似における境界条件に起因するものとし、地表面で応力が0となる条件を導入した定式化を行った。これに基づいて応答解析及び周波数応答関数を求めたものが図5である。しかし、結果の改善には至らなかった。

4. 結論及び今後の課題

本研究では、Born近似による不整形地盤の成層近似を行い、重複反射理論における伝達マトリックスを用いて不均質地盤の地震応答を簡便に算出するプログラムを開発した。次に単なるBorn近似の導入では満足されない地表面における境界条件を取入れた定式化を行った。そして、これらによって得られた結果をAL法の結果と比較することによって本手法の妥当性の検討を行った。しかし、本研究における手法では不整形地盤における地震応答を精度良く解析するには至らなかった。これは、式(2)の右辺第2項で表される不均質性に関する項が真値よりも小さいためであるが、この原因としては、Born近似導入の際に、式(2)の右辺第2項における変位応力ベクトル $\mathbf{f}_0(\lambda, z_{l+1})$ における応力成分が実際よりも小さいことが考えられる。

以上の問題点を踏まえ、この問題に対するBorn近似適用の妥当性も含めた、地盤内の応力及び変位についての検討を今後の課題とする。

参考文献

- 1) Aki, K. and Larner, K. I.: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH wave, J. Geophys. Res., 75, pp. 933-954, 1970.
- 2) 土岐憲三: 新体系土工学 11 構造物の耐震解析, 1981
- 3) 清野純史: 不整形地盤の解析法-A L法、ローカルサイト・エフェクト(地震動の地盤内増) シンポジウム論文集, pp. 16-22, 1998

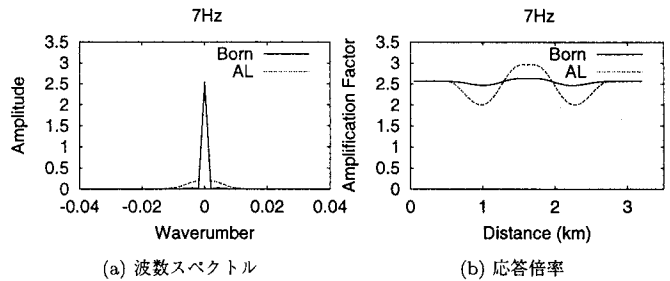


図3: 地表面での応答

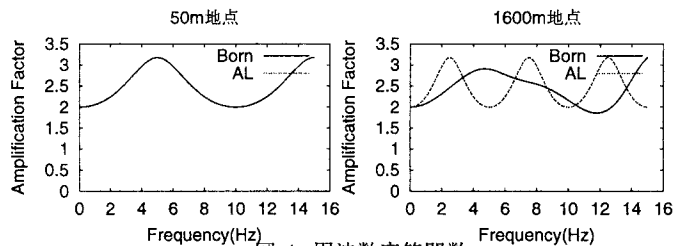


図4: 周波数応答関数

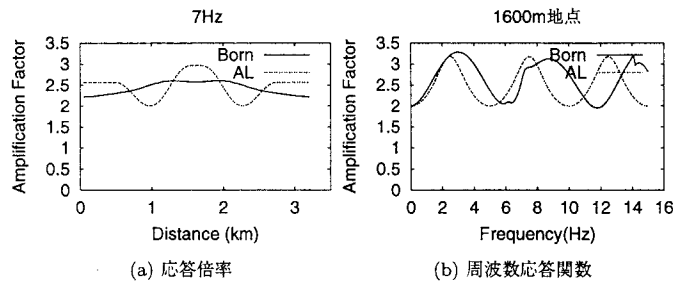


図5: 境界条件を考慮した場合の地表面応答