

(59) 不整形な地層を有する地盤の振動特性に関する検討

佐藤工業株式会社中央技術研究所 正会員 秋山伸一

1. はじめに

地震による構造物の被害は、地形や地盤内部の地層形状が幾何学的に不規則な「不整形地盤」で生じ易いと指摘されている。従って、構造物の耐震性を評価する上で、地震時の不整形地盤の挙動を把握することは重要であると考えられる。

不整形地盤の解析では、地盤の不整形性と入射波動を正確に評価することが必要となり、一般に解析的方法で行うことは困難であるため、数値解析手法を用いて行うことが多い。数値解析手法としては、現在、有限要素法が主に用いられているが、最近注目されている境界要素法は、波動の逸散減衰を適切に評価でき、しかも、様々な入射波動を容易に設定できる事などから、地盤の動的解析には有効であると考えられる。

以上のことから、本報告では、まず地盤内部の地層の不整形性に着目し、任意の波動が入射した際の地盤の挙動を境界要素法を用いて解析し、次に、この結果から地盤の不整形性がその振動特性にどのような影響を与えるかについて検討した。

なお、ここでは、問題を簡単にするために、半無限均質な岩盤上に沖積層が盆地状に堆積する地盤を解析の対象とした。また、解析は2次元定常状態を仮定し、面外波動と面内波動の実体波入射問題について行った。

2. 解析条件と解析手法

解析モデルを図1に示す。図1で、 D_e は半無限に広がる岩盤、 D_i は沖積層を示し、各々の領域で媒質を等方均質弾性体と仮定する。また、 X_3 方向の変化はないものとする、地盤内の波動伝播を面外波動と面内波動に分けて解析することができる。

面外波動場と面内波動場の運動方程式は各々 Helmholtz方程式と Navier方程式である。すなわち、

$$\mu \nabla^2 U_3 + \rho \omega^2 U_3 = 0 \quad \text{----- (1)}$$

$$\mu \nabla^2 \bar{U} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \bar{U} + \rho \omega^2 \bar{U} = 0 \quad \bar{U} \equiv (U_1, U_2) \quad \text{----- (2)}$$

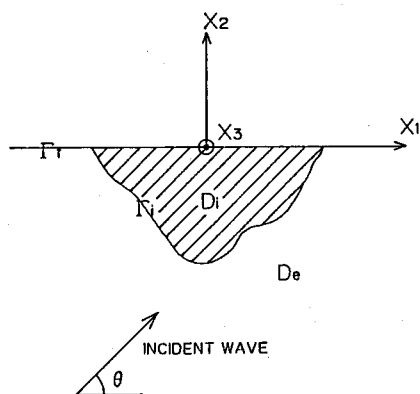


図1 解析モデル

ただし、 λ 、 μ はラメ定数、 ρ は地盤の密度、 ω は周波数である。

境界条件は、地表面 Γ_f 上で応力零、地層境界 Γ_i で応力の適合条件と変位の連続条件が成立すると仮定する。

以上の条件から、境界要素法による定式化を行うと、面外波動と面内波動は共に以下の表示式になる。

$$[G] \cdot \{q\} - [H] \cdot \{u\} = \begin{cases} \{0\} & (D_i \text{ 領域}) \\ \{U\} & (D_e \text{ 領域}) \end{cases} \quad \text{--- (3)}$$

上式で、 $\{U_i\}$ は入射波によって規定されるベクトルである。なお、面外波動問題では、鏡像の原理によるGreen関数を用いており、地表面での境界条件を満足するため、この部分で境界要素分割の必要がない。しかし、面内波動問題では地表面で境界条件を満足するGreen関数を用いると長時間の計算が必要となるため、本解析では無限弾性体の基本解を用いた。従って、本来ならば、地表面上で境界要素を無限遠まで分割しなければならない

が、解析では不整形な地層から発生した散乱波の影響がほとんどなくなる地点で要素の分割を打ち切った。

数値解析手法の妥当性を検証する目的で、 D_1 及び D_2 の物性値が同一である半無限均質地盤に任意の角度から入射波が伝播してきた時の地表面の変位応答値を、弾性波動論による解と比較したが、数値解は良好な精度を持つことが確認された。

3. 数値解析

図2に示す2種類の地盤モデルを用いて解析を行った。表1には、解析に用いた地盤の物性値を示す。なお、物性値は Model 1、2 共に共通とし、 D_2 領域の値を基準にして無次元化した。

図3から図5には、SH波、P波、SV波が入射した時の地表面変位応答分布を示す。ここで表示する応答値は、複素振幅の絶対値を入射波の振幅で基準化したものである。また、地表面上の観測位置は地盤モデルの中心から沖積層の端までの距離を A として、位置 X を X/A として無次元化して表示した。周波数は入射波の波長 L と A の関係より $\eta = 2A/L$ として無次元化した。

1) SH波入射

SH波入射に対する地表面上の変位応答分布を図3に示す。この図から、波動が沖積層内部で反射・屈折を繰返す結果、沖積層上で応答が増幅し、周波数が高くなると応答の増幅は局所的に急激な変化を示すことがわかる。

また、 $\eta = 0.5$ では、入射角が変化しても、応答は余り変化しないが、 $\eta = 1.0$ になると、入射角によって応答はかなり変化する。しかも、その変化は、Model 1 よりも Model 2 の方が大きい。

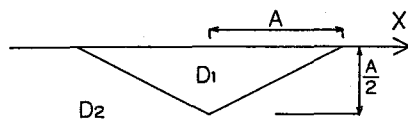
ここで、解析モデルと入射波長の関係を見ると、 $\eta = 0.5$ の場合、入射波長は Model 1 の層厚の4倍、Model 2 の層厚の2倍となり、 $\eta = 1.0$ では、Model 1 の層厚の2倍、Model 2 の層厚の1倍となる。従って、以上の結果は、沖積層の層厚と比較して入射波長が長い場合には、応答は沖積層の不整形性の影響を余り受けないが、波長が短くなると、不整形性の影響を受け易くなることを示している。

2) P波入射

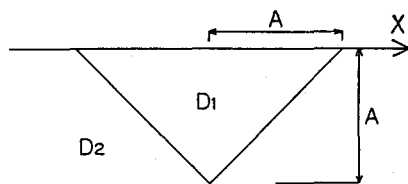
P波入射に対する地表面上の変位応答分布を図4に示す。この図から、 $\eta = 0.5$ では、応答の増幅は余り見られないが、 $\eta = 1.0$ になると、沖積層上で大きな増幅が見られる。この結果はSH波入射の場合と同様である。しかし、入射角の変化に対しては、周波数が高い場合でもSH波入射の場合と比較して、応答の変化は激しくない。これは、P波の速度がSH波の速度よりも速いため、相対的に波長が長くなり、地盤の不整形性の影響を受けにくいためであると考えられる。また、この場合は、SH波入射の場合とは異なり、地層境界面でP波の反射、屈折の他に波動の変換によるSV波も発生するため、これらの影響によって、応答は鉛直変位成分と水平変位成分の両方で増幅が見られる。従って、P波入射の場合はSH波入射の場合よりも複雑な挙動を示すことがわかる。

3) SV波入射

SV波入射に対する地表面上の変位応答分布を図5に示す。この場合も、SH波、P波入射の場合と同様に、



Model 1



Model 2

図2 地盤モデル

表1 地盤の物性値

領 域	D1	D2
せん断弾性係数 G	0.167	1.0
ポアソン比 ν	0.333	0.333
地 盤 密 度 ρ	0.667	1.0
S 波 速 度 C_2	0.5	1.0

波長が短くなると応答は局所的に増幅し、入射角の変化に対しても、波長が短い程応答の変化が激しい。また、P波入射の場合と同様に、地層境界面で波動の変換があり、沖積層上では、水平変位成分の他に、鉛直変位成分も増幅している。

しかし、SV波入射の場合には、入射角 60° が臨界角であり、この場合の応答は他の場合と比較して、変化が大きい。弾性波動論では、半無限地盤でSV波の入射角が臨界角に接近すると、地表面の応答は急激に変化することが確かめられるが、本解析では、さらに沖積層の不整形性の影響も含まれているため地表面の応答は局所的に大きく変化したものと考えられる。

4. まとめ

不整形な地層を有する地盤の動的解析を境界要素法を用いて行った。その結果を以下にまとめる。

- ① SH波、P波及びSV波が不整形な地層に入射すると、地層内部で波動が反射・屈折を繰返すため、地表面上で変位応答が局所的に増幅する。
- ② 入射波の波長が地層の層厚に比べて長い（周波数が低い）場合には、地表面上の変位応答は地層の不整形性の影響を受けにくい、波長が層厚に比べて短い（周波数が高い）場合には、不整形性の影響を受け易い。

- ③ 面内波動は、地層境界面で波動の変換を起こすため、面外波動と比較して、より複雑な挙動を示す。

しかし、面外波動によっても、不整形地盤の動的挙動の基本的な性質を調べることができる。

以上より、不整形地盤の振動特性は、その地盤構造に大きく依存していることがわかった。特に、局所的に応答が変化するような性質に対しては、平面的に広がる大型構造物や埋設管等の設計に際して、十分な注意が必要であると考えられる。

〈参考文献〉

- 1) 佐藤泰夫：弾性波動論、岩波書店
- 2) C.A.Brebia：境界要素法入門、培風館
- 3) S.Kobayashi：Some problems of the boundary integral equation method in elastodynamics, Boundary Elements, Proc. 5th. Int. Conf. pp. 775-784 1983
- 4) H.L.Wong, H.D.Trifunac：Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves, Bull. Seism. Soc. Am. 64, No. 5, pp. 1389-1408, 1974
- 5) H.L.Wong：Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves, Bull. Seism. Soc. Am. 72, No. 4, pp. 1167-1183, 1982
- 6) 東平、宮原：境界要素法の波動問題への応用に関する一考察、第38回土木学会年次講演会概要集、1、1983
- 7) 秋山、宮原：境界要素・有限要素の結合解法による非均質地盤の動的応答解析、第39回土木学会年次講演会概要集、1、1984

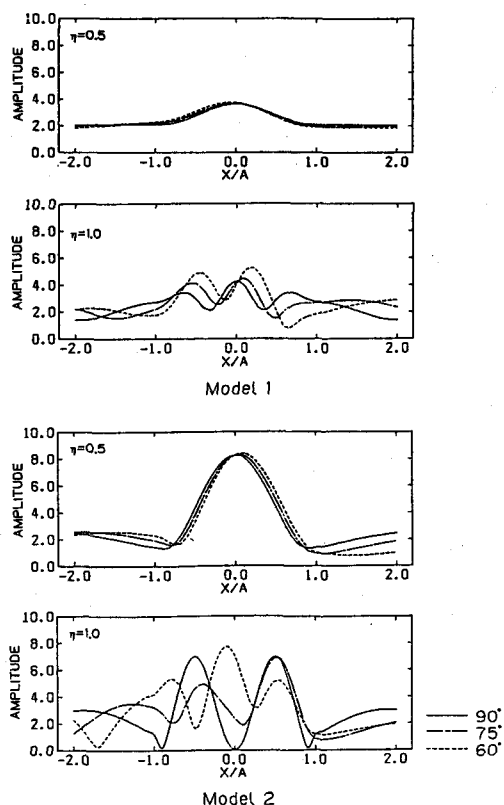


図3 地表面変位応答分布 (SH波入射)

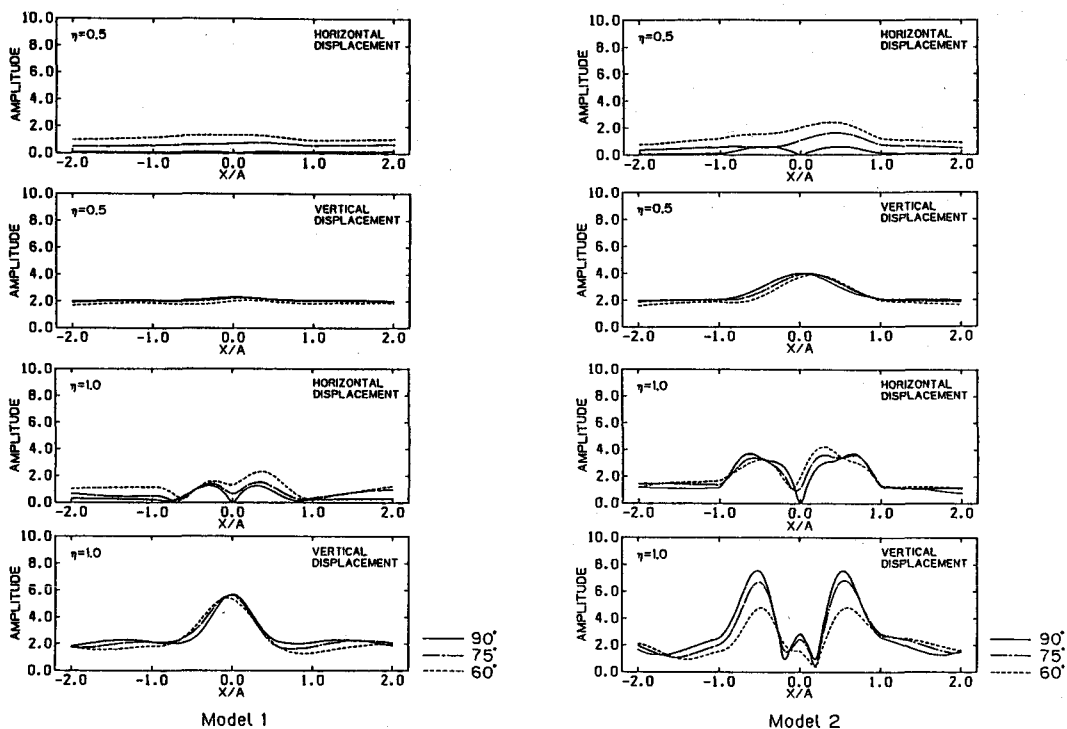


图4 地表面变位应答分布 (P波入射)

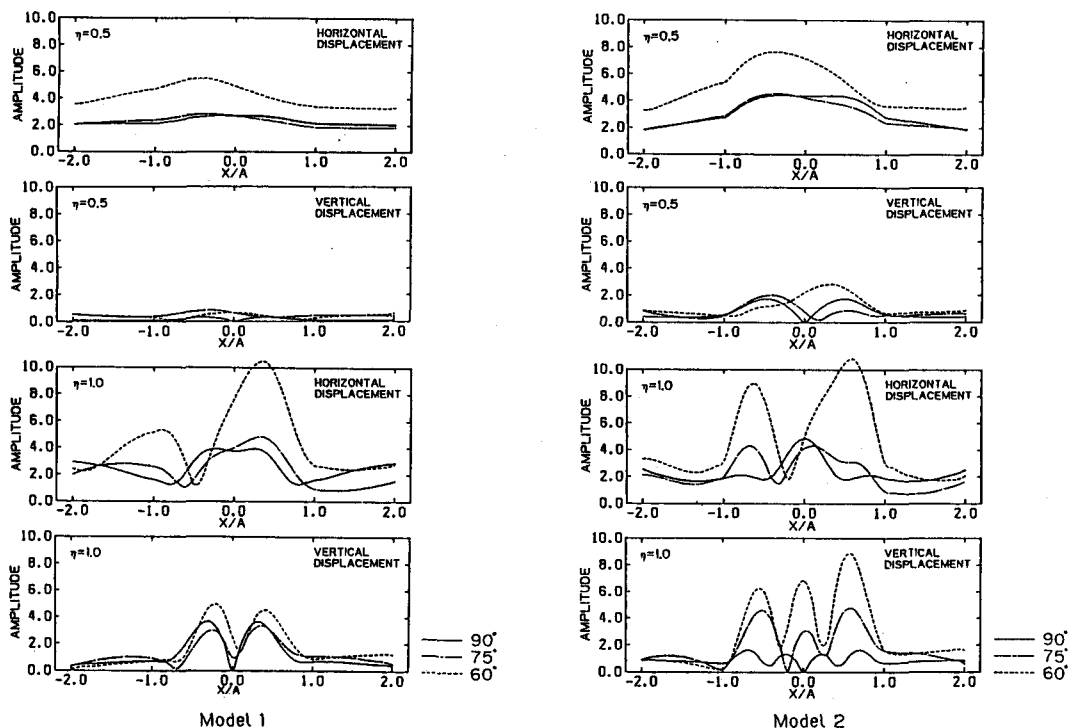


图5 地表面变位应答分布 (SV波入射)

(59) Study for dynamic behavior of layered soil with topographic irregularity

Shinichi Akiyama
Engineering Research Institute , Sato Kogyo Co.,Ltd.

It has been indicated that the damage of the structure is produced easily on the site with irregular surface topographies or subsurface inhomogeneities by the earthquakes. Therefore, it is important to examine the ground motion for the structural proof against the earthquakes. In this paper, dynamic response for alluvial valley subjected to harmonic incident waves is investigated. The valley is embedded into elastic, homogeneous and isotropic rock bed extended to semi-infinity. Incident waves are time-harmonic SH, P and SV waves. In the analysis, the boundary element method is applied. The method has the advantage of estimation of infinite domain and choice of incident wave pattern. Surface displacements are evaluated numerically for incident SH, P and SV waves with different angles and different frequencies.

The results are summarized as follows. There is a local amplification of surface displacement on the valley due to reflection and refraction of the wave propagation. At high frequency, surface response is influenced significantly by topographic irregularity, but is not influenced very much at low frequency. In-plane wave propagation is more complex than anti-plane wave propagation, because of the effect of mode conversion from P wave to SV wave, or from SV wave to P wave. But basic property of the dynamic response is presented by anti-plane wave propagation.