

1 はじめに 最近、流埋トンネルや埋設管の地震時の安全性を検討することに関連して、地盤の層厚が変化する等、複雑な境界条件をもつ地盤の地震時の挙動を解析することが必要になっている。

地盤中に伝播する地震波動の研究は古くから数理論理学により研究されてきたが、地層構成や境界条件が複雑な場合について解析的にこれを取扱うことには困難がある。筆者はこのような地盤の地震波動の伝播の状況を観察するために、有限要素法を用いて解析することを試みた。

2 基礎方程式 振動方程式及び自由表面での境界条件は式(1)、(2)で与えられる。

$$\rho \ddot{u}_i - E_{ijkl} u_{k,jl} = 0 \quad (1) \quad \sigma_{ij} n_j = 0 \quad (2)$$

ここで、(1)式のみを満足する解を U_i^* とし、(1)、(2)式を満足する解 u_i との差 U_i^0 とすると、 U_i^0 は次式を満足しなければならない。

$$\rho \ddot{U}_i^0 - E_{ijkl} U_{k,jl}^0 = 0 \quad (3)$$

$$S_i = E_{ijkl} U_{k,jl}^0 n_j = -E_{ijkl} U_{k,jl}^* n_j \quad (4)$$

すなわち、 U_i^0 は自由表面で発生する反射波であり、(3)、(4)式は反射波の方程式になっている。問題を平面とし、 U_i^0 とし、等質地盤内を y 軸方向に進行するせん断波とすると U_i^0 は次のように表現できる。

$$U_1^0 = U^*(x, y, t) = f(y - v_s t)$$

$$U_2^0 = v(x, y, t) = 0 \quad (5)$$

この時自由表面での条件は次のようになる。

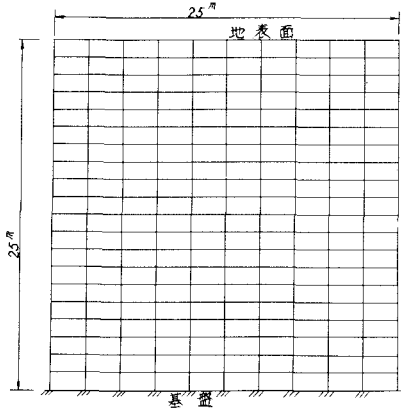
$$S_x = -G \frac{df}{dy} (y - v_s t) n_y \quad S_y = -G \frac{df}{dy} (y - v_s t) n_x \quad (6)$$

時間に関する離散化は、(6)式を使用し、荷重項の計算にはガウスの数値積分を使用した。

3 計算例 解析法の数値計算上の精度を検討するため、図-1に示したような均一な層厚 25m をもつ地盤にせん断波が入力した場合の、地表面における波動の反射状況について解析した。せん断波速度は 150 m/s とした。積分時間間隔は 0.00125 秒である。解析結果を図-2に示す。 $t = 0.07$ 秒で地表面の変位振巾は入力波の振巾の2倍となり、 $t = 0.17$ 秒では入力波とはほぼ同一型のせん断波が下降している。

次に図-3に示した地盤について解析した。図-3の地盤は層Ⅰの部分の厚さ 25m、層Ⅱは厚さ 50m であり、層厚が不連続的に変化している。せん断波速度は 150 m/s、積分時間間隔は 0.0025 秒である。

図-4(a)、(b)にせん断波の時間的推移を示した。 $t = 0.07$ 秒で入力せん断波は層Ⅰの地表面に達し、振巾は2倍となっている。これに対し層Ⅱではせん断波の波型に変化がみとめられない。層Ⅰと層Ⅱに接続部分では振巾が入力波の振巾に比し、30% 程度大きくなっている。 $t = 0.16$ 秒では接続部分において上昇波と下降波の分離がみとめられる。図-5は層Ⅰの地表面に入力せん断波が到達し、後の層Ⅰの地表面の上下方向の変形を示したものである。不連続点より上下動が発生し、振巾を徐々に増加させながら地表面上を伝播している。上下動の最大振巾は入力せん断波の 40% 程度である。図-6(a)、(b)は入力せん断波が層Ⅰの地表面に到達した時間 ($t = 0.07$ 秒)における水平方向軸歪 ε_x 、鉛直方向軸歪 ε_y の分布を示している。不連続点を中心に歪が集中している。軸方向歪の最大値は入力波によるせん断歪の 15% 程度である。



$$V_s = 150 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$$

$$\nu = 0.49$$

図-1 要素分割図(モデルI)

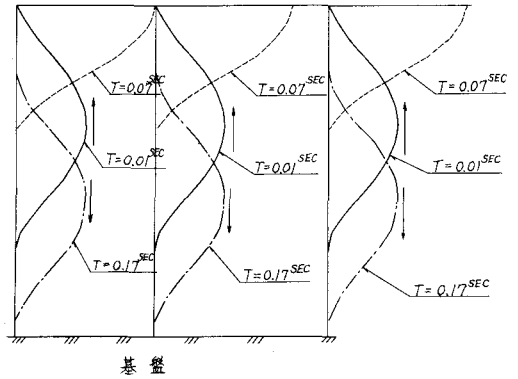
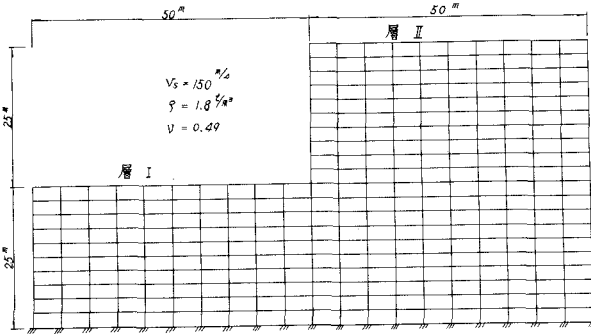


図-2 水平変位図(モデルI)



$$V_s = 150 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.8 \text{ t/m}^3$$

$$\nu = 0.49$$

図-3 要素分割図(モデルII)

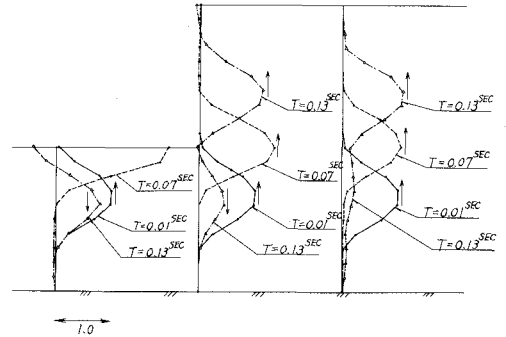


図-4 水平変位図(モデルII)

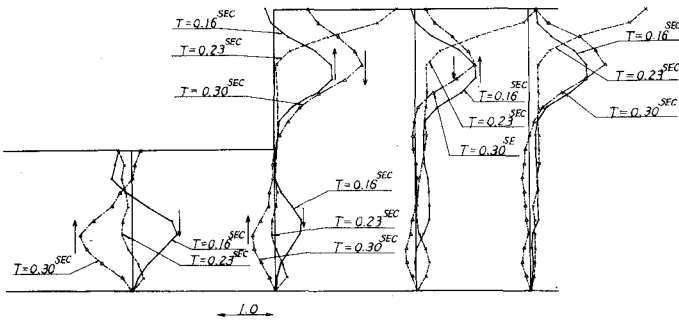


図-4(b) 水平変位図(モデルII)

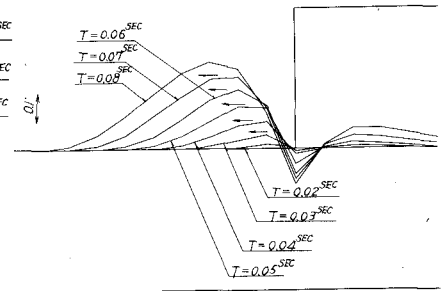


図-5 鉛直変位図(モデルII)

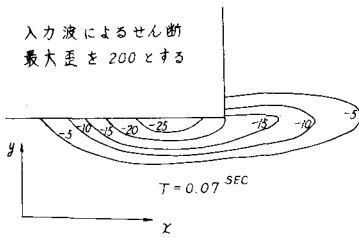


図-6(a) 水平方向軸歪(モデルII)

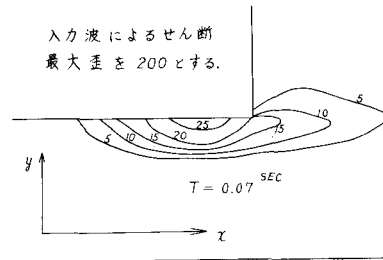


図-6(b) 鉛直方向軸歪(モデルII)