

層マトリックス法による盛土-支持地盤系の1次元震動解析法

ONE-DIMENSIONAL DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD OF EMBANKMENT-GROUND SYSTEM
BASED ON LAYER MATRIX METHOD

中村 晋*, 風間基樹**

Susumu NAKAMURA and Motoki KAZAMA

* 正会員 工博 日本大学助教授 工学部土木工学科(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

This paper presents a one-dimensional dynamic response analysis method to evaluate the dynamic response of the embankment and support ground system considering multi-reflection theory based on layer matrix method. Hence, the shape of embankment is modeled as an arbitrary trapezoid. Furthermore, by dividing the embankment into some horizontally layered thin elements, a variation of the material properties with depth is possible to take into account. It is found that the shape of embankment and the dynamic interaction with a support ground affect the vibration characteristics and that the damping characteristics of ground around the predominant frequency of embankment has the important role for the dynamic response.

key Words: Embankment, Dynamic Interaction, Layer Matrix, One dimensional Analysis

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震による各種土木構造物の被害は、その耐震設計体系に2段階設計法や、性能照査型設計法の導入など大きな変化をもたらした。しかし、土構造物をも含む各種構造物をレベル2地震動に対して損傷が生じないような設計を行うことは、不経済であるとともに現実的に困難である。このことから、許容範囲内で損傷の発生を考慮した設計を行うこと、つまり損傷の定量評価を行うことが必要となっている。盛土などの土構造物では、斜面また法面崩壊時の変形量が定量評価の指標となっている¹⁾。

その評価手法として、実地震波に対して地盤の非線形挙動を直接評価できる有限要素法²⁾、または従来の法面安定解析における滑り土塊に着目し、その滑動量を解析するNewmark法³⁾などがある。前者の手法では、盛土の構造や地盤特性の不均質性、さらに施工過程などの種々の条件下での評価が可能である。しかし、解析上の精度を規定する地盤構造・材料特性のモデル化が、情報量や技術者の能力に強く影響を受けるとともに変形量が多い場合の精度などの課題を有している。このことから、各種設計基準類¹⁾では、常時の設計に用いられる円形すべり面法の延長としてNewmark法が用いられている。従来のNewmark法では、滑り土塊に作用する加速度を地震作用としている。その加速度には、盛土地盤の応答量ではなく地表面加速度などが設計などで用いられている。最近、この考え方では盛土などの土構造物自体の震動性状が考

慮されていないことから、盛土を1質点系の振動モデルでモデル化することによりその振動性状を加味した修正Newmark法^{4),5)}や盛土および滑り土塊をそれぞれ1自由度系にモデル化した手法⁶⁾などが提案されている。これらの手法では、盛土の応答を評価する際、盛土自体を1つの質点とバネに置換することから、その形状や材料の非線形性を直接考慮することができないという課題を有している。さらに、実際の地震被害は軟弱地盤上に構築された盛土に多く生じることも指摘⁷⁾されており、盛土と支持地盤との相互作用を考慮した地震応答を評価することも必要となる。それらを直接考慮できる手法として有限要素法があるが、線状に連なる盛土構造物の応答評価をすべて有限要素法で行うのは、前述の精度に関する課題と合わせ現実的とはいえず、簡易法との併用が望まれる。

一方、1次元ではあるものの、盛土と支持地盤との相互作用を考慮した応答解析法が提案されている⁸⁾。その手法は簡易に盛土-支持地盤系の応答を評価できるものの、盛土を法面勾配が固定された1つの三角くさびとモデル化していることから、盛土の形状や盛土内の材料特性の変化を考慮できない。さらに、連立方程式を用い各層の変位を規定する2つの未定係数を求めていることなどから、周波数毎に連立方程式を解くという操作を伴い、若干ではあるが精度や時間上の課題を有している。しかし、その基本的な考え方は、盛土の地震時応答を簡易に求めることが可能であるという点で発展性を有している。

ここでは、盛土自体の形状や深度方向の材料特

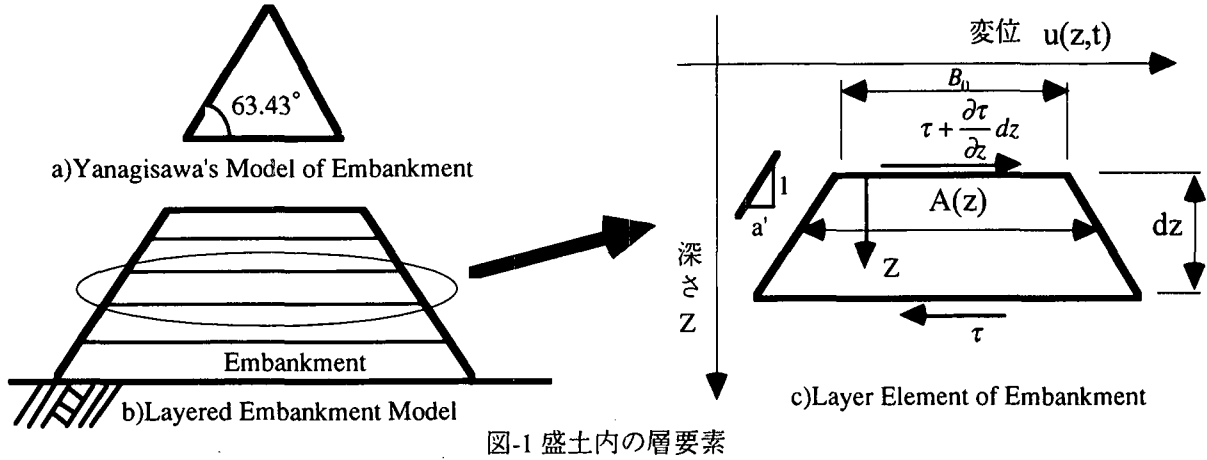


図-1 盛土内の層要素

性の変化, さらに支持地盤との相互作用がその地震応答に及ぼす影響を簡易的に評価することを目的とし, まず, 層マトリックス法に基づく重複反射法⁹⁾の考え方をういた盛土-支持地盤系の1次元地震応答解析法を提案する. 次に, その解析法を用い, 盛土の振動性状に及ぼす, その形状や支持地盤との相互作用の影響, さらに盛土-支持地盤系の地震応答に及ぼす地震動特性の影響について検討を行う.

2. 盛土-地盤系の震動解析法

地震時における盛土およびその支持地盤の震動は, 地盤の1次元震動解析で用いられている以下の仮定に従うものとする.

- i) 盛土地盤は水平方向にのみ震動する
- ii) 地震動は鉛直下方より上方に伝播する.

まず, 弾性地盤上の盛土の震動解析手法を示す. 盛土は, 図-1に示す様に柳沢⁸⁾による勾配63.43°の三角形くさびではなく, 任意勾配を有する台形形状を有するとした. その盛土を水平に層分割し, 得られた厚さdz, 水平面内の断面積A(z)の1要素に着目する. ここでは, その要素を層要素と呼び, 断面積A(z)は深さzの関数とする. すると, その層要素上・下面に作用するせん断応力と要素内に発生する慣性力の釣り合いより式(1)に示す運動方程式を得ることができる. ここで, Gはせん断剛性, γ は単位体積重量を表す. 任意深さzにおける単位奥行きあたりの断面積A(z)は図-1(c)に示す法面の勾配a'に基づき式(2)の様に表わし, 式(1)に代入することにより式(3)が得られる.

$$\frac{\gamma \cdot A(z)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} (G \cdot A(z) \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (1)$$

$$A(z) = B(z) \cdot 1 = 2a' \cdot z + B_0 = a \cdot z + B_0 \quad (2)$$

$$\frac{\gamma \cdot (a \cdot z + B_0)}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial z} (G \cdot (a \cdot z + B_0) \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (3)$$

ここで, 単位奥行きあたりの断面積を式(4)の様に変数Zに置き換えると, 式(3)の運動方程式は式(5)の様に表わされる. 式(5)中の V_s は層要素のせん断波速度($=\sqrt{G/\rho} = \sqrt{G/\rho}$, ρ : 質量密度)を表す.

$$Z = a \cdot z + B_0 \quad (4)$$

$$Z \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 V_s^2 (Z \frac{\partial^2 u}{\partial Z^2} + \frac{\partial u}{\partial Z}) \quad (5)$$

式(5)中における水平変位uの調和振動解を式(6)のように空間と時間の関数で表すと, 式(5)は式(7)の様に表され, 変数変換を式(8)の様にすることにより, 運動方程式(1)は式(9)の様に空間関数 $\phi(x)$ に関するベッセル方程式となる.

$$u = \phi(z) e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \phi(z)}{dz^2} + \frac{1}{Z} \frac{d\phi(z)}{dz} + \frac{\omega^2}{a^2 V_s^2} \phi(z) = 0 \quad (7)$$

$$x = \frac{\omega}{a \cdot V_s} Z \quad (8)$$

$$\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\phi(x)}{dx} + \phi(x) = 0 \quad (9)$$

得られたベッセル方程式の解は, 変数xを深さzの関数で表すと式(10)のように2つの未定係数C, Dおよび0次のベッセル関数 J_0 と0次のノイマン関数 Y_0 を用いて表すことができる. すると, 層要素内任意深さz, 円振動数 ω に対する変位 $u(z, \omega)$ とせん断応力 $\tau(z, \omega)$ は式(11)の様に表すことができる. ここで, kは波数($=\omega/V_s$)を表す.

$$\phi(z) = C \cdot J_0 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} + D \cdot Y_0 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} u(z, \omega) &= \left[C \cdot J_0 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + D \cdot Y_0 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} \right] \exp(i\omega t) \\ \tau(z, \omega) &= G \frac{\partial u(z, \omega)}{\partial z} = -Gk \left[C \cdot J_1 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + D \cdot Y_1 \left\{ k \left(z + \frac{B_0}{a} \right) \right\} \right] \exp(i\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

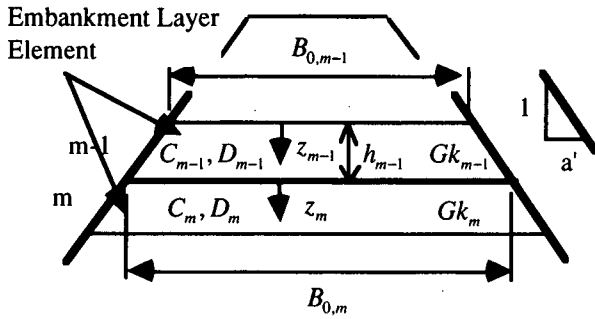


図-2 盛土内の隣接する層要素(m-1層, m層)の関係

次に、盛土を水平にn層に分割し、図-2に示す様に隣接する2つの要素m-1層とm層に着目する。層マトリックス法による重複反射法⁹⁾にならい、式(12)に示す両層境界における変位、せん断応力の境界条件より、2つの層の未定係数 C_{m-1} , D_{m-1} と C_m , D_m を関係づけることができる。まず、m-1層下端の変位、せん断応力はその層の未定係数より式(13)の様に表される。ここで、式(13)の未定係数に乘じるマトリックス各成分は、式(14)の様なベッセル、ノイマン関数の省略表現を用いて表現している。

$$\begin{cases} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{cases} = \begin{cases} u_{m-1}(h_m) \\ \tau_{m-1}(h_m) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_{m-1}(h_{m-1}) \\ \tau_{m-1}(z_{m-1}) \end{cases} = \begin{bmatrix} J_0^{m-1} & Y_0^{m-1} \\ -(Gk)_{m-1} J_1^{m-1} & -(Gk)_{m-1} Y_1^{m-1} \end{bmatrix} \begin{cases} C_{m-1} \\ D_{m-1} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} J_0^{m-1} = J_0 \left\{ k_{m-1} \left(h_{m-1} + \frac{B_{0,m-1}}{a} \right) \right\} \\ Y_0^{m-1} = Y_0 \left\{ k_{m-1} \left(h_{m-1} + \frac{B_{0,m-1}}{a} \right) \right\} \\ J_1^{m-1} = J_1 \left\{ k_{m-1} \left(h_{m-1} + \frac{B_{0,m-1}}{a} \right) \right\} \\ Y_1^{m-1} = Y_1 \left\{ k_{m-1} \left(h_{m-1} + \frac{B_{0,m-1}}{a} \right) \right\} \end{cases} \quad (14)$$

また、m層上端における変位とせん断応力は、式(16)に示すベッセル、ノイマン関数の省略表現を用いることにより式(15)の様に表される。

$$\begin{cases} u_m(0) \\ \tau_m(0) \end{cases} = \begin{bmatrix} J_0^m & Y_0^m \\ -(G \cdot k)_m J_1^m & -(G \cdot k)_m Y_1^m \end{bmatrix} \begin{cases} C_m \\ D_m \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} J_0^m = J_0 \left(k_m \frac{B_{0,m}}{a} \right), Y_0^m = Y_0 \left(k_m \frac{B_{0,m}}{a} \right) \\ J_1^m = J_1 \left(k_m \frac{B_{0,m}}{a} \right), Y_1^m = Y_1 \left(k_m \frac{B_{0,m}}{a} \right) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、式(13), (15)を式(12)に代入することにより、式(17)に示す両層の未定係数を関連づける層マトリックス $[E]_{m-1}$ を得ることができる。その層マトリックスの各成分は式(18), (19)に示すとおりで

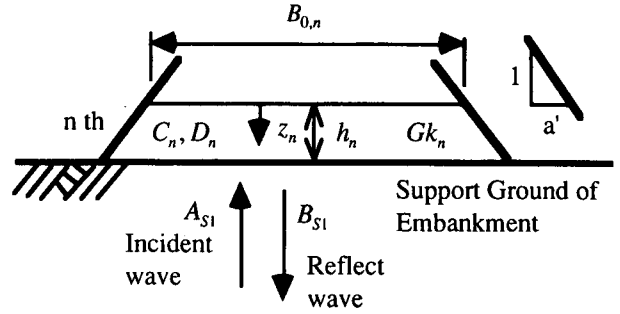


図-3 盛土下端要素とその支持地盤の関係

ある。また、ここでもベッセル、ノイマン関数については式(14), (16)の省略表現を用いている。

$$\begin{cases} C_m \\ D_m \end{cases} = [E]_{m-1} \begin{cases} C_{m-1} \\ D_{m-1} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} E(1,1)_{m-1} = \frac{1}{\text{Det}} (-Y_1^m J_0^{m-1} + \alpha Y_0^m J_1^{m-1}) \\ E(1,2)_{m-1} = \frac{1}{\text{Det}} (-Y_1^m Y_0^{m-1} + \alpha Y_0^m Y_1^{m-1}) \\ E(2,1)_{m-1} = \frac{1}{\text{Det}} (J_1^m J_0^{m-1} - \alpha J_0^m J_1^{m-1}) \\ E(2,2)_{m-1} = \frac{1}{\text{Det}} (J_1^m Y_0^{m-1} - \alpha J_0^m Y_1^{m-1}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{Det} = Y_0^m J_1^m - Y_1^m J_0^m, \alpha = \frac{(Gk)_{m-1}}{(Gk)_m} \quad (19)$$

次に、図-3に示す盛土下端要素とその支持地盤との境界に着目する。その境界においても式(12)と同様の式(20)に示す変位とせん断応力に関する境界条件が成り立つ。ここで、盛土下端の変位およびせん断応力と未定係数の関係は式(21), 弾性地盤の上端における変位およびせん断応力は1次元波動方程式の解に基づき入射波と反射波の振幅 A_{S1} , B_{S1} を未定係数とし、式(22)の様に表される。すると、弾性地盤から盛土への入射波、反射波振幅と盛土下端層における未定係数は式(23)の様に層マトリックス $[E]_{SB}$ を介して関連づけることができる。

$$\begin{cases} u_{S1}(0) \\ \tau_{S1}(0) \end{cases} = \begin{cases} u_n(h_n) \\ \tau_n(h_n) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_n(h_n) \\ \tau_n(h_n) \end{cases} = \begin{bmatrix} J_0^n & Y_0^n \\ -(Gk)_n J_1^n & -(Gk)_n Y_1^n \end{bmatrix} \begin{cases} C_n \\ D_n \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} u_{S1}(0) \\ \tau_{S1}(0) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i(Gk)_{S1} & -i(Gk)_{S1} \end{bmatrix} \begin{cases} A_{S1} \\ B_{S1} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} A_{S1} \\ B_{S1} \end{cases} = [E]_{SB} \begin{cases} C_n \\ D_n \end{cases} \quad (23)$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_0^n + i\alpha J_1^n & Y_0^n + i\alpha Y_1^n \\ J_0^n - i\alpha J_1^n & Y_0^n - i\alpha Y_1^n \end{bmatrix} \begin{cases} C_n \\ D_n \end{cases}$$

盛土上端では、式(24)に示す様にせん断応力がゼロとなる境界条件が成り立つことから、盛土上端

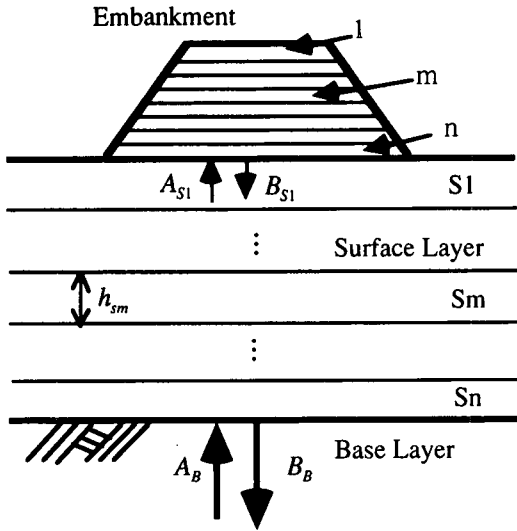


図-4 盛土-地盤系の震動モデル

における未定係数 C_1 と D_1 が、式(25)の様に層マトリックス $[E]_i$ を介して1つの未定係数 C_1 により表すことができる。

$$\tau_1(0) = C_1 J_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a}) + D_1 Y_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a}) = 0 \quad (24)$$

$$\begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = [E]_i \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\frac{J_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a})}{Y_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a})} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

これまで得られた盛土内各位置での層要素を用い、弾性地盤上で入射波 A_{s1} が与えられた際の盛土の震動を求める。まず、盛土上端層の未定係数に関する式(25)に式(17)より得られるその下層との関係を順次代入し、最後に盛土下端層における関係式(23)を代入する。すると、式(26)に示す弾性地盤から盛土への入射波、反射波振幅との関係式を求めることができる。ここで、 $[R_e]$ は盛土各層の層マトリックス同様2行2列の行列となる。この式より、盛土上端層の未定係数 C_1 が入射波に対する応答として得られ、もう一つの未定係数 D_1 も式(28)の様に得られる。それらを盛土上端の変位解に代入することにより、式(29)に示す変位応答を得ることができる。また、この応答のうち、単位入射振幅に対する応答は周波数応答関数に相当する。

$$\begin{Bmatrix} A_{s1} \\ B_{s1} \end{Bmatrix} = [E]_{sb} [E]_{n-1} \cdots [E]_m \cdots [E]_1 [E]_i \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} = [R_e] \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} \quad (26)$$

$$C_1 = \frac{A_{s1}}{R(1,1)_n + R(1,2)_n} \quad (27)$$

$$D_1 = C_1 \frac{J_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a})}{Y_1(k_1 \frac{B_{0,1}}{a})} \quad (28)$$

$$U_1(0, \omega) = C_1 J_0(k_1 \frac{B_{0,1}}{a}) + D_1 Y_0(k_1 \frac{B_{0,1}}{a}) \quad (29)$$

盛土内各層の応答は、式(17)を用い得られた盛土上層の未定係数より順次、各層の未定係数を求め、変位、せん断応力の解に代入することにより求めることができる。

地中内の基盤層などで入射波が与えられた際の盛土の応答は、式(26)に示した盛土下端への入射波と反射波を盛土支持地盤最表層の未定係数とし、式(30)に示す2行2列の水平成層地盤における隣接する2層間の未定係数に関する層マトリックスを順次、代入することにより、式(31)に示す基盤層への入射波、反射波振幅と盛土上端層の未定係数との関係が得られる。これより、盛土上端層の未定係数 C_1 が式(32)の様に得られる。盛土および支持地盤の震動、さらに基盤位置に対する盛土上端の周波数応答関数は、先に示した弾性地盤上の盛土と同様の過程により得ることができる。

$$\begin{Bmatrix} T(1,1)_m \\ T(1,2)_m \\ T(2,1)_m \\ T(2,2)_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5(1 + \alpha_m) \exp(ik_m H_m) \\ 0.5(1 - \alpha_m) \exp(ik_m H_m) \\ 0.5(1 - \alpha_m) \exp(ik_m H_m) \\ 0.5(1 + \alpha_m) \exp(ik_m H_m) \end{Bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{Bmatrix} A_b \\ B_b \end{Bmatrix} = [T]_{sn} \cdots [T]_{sm} \cdots [T]_{s1} \times [E]_{sb} [E]_{n-1} \cdots [E]_m \cdots [E]_1 [E]_i \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} = [QR] \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} \quad (31)$$

$$C_1 = \frac{A_{s1}}{QR(1,1) + QR(1,2)} \quad (32)$$

3. 盛土-支持地盤系の振動特性

3.1 弾性地盤上の盛土の振動性状

盛土の形状、盛土と弾性地盤の波動インピーダンス比が盛土自体の振動性状におよぼす影響を把握する。ここで、弾性地盤上の盛土モデルは、図-5に示した柳沢⁸⁾が解析手法の検討に用いたモデル（以後、三角形モデルと呼ぶ）を基本とし、盛土上端の幅、盛土法面勾配および弾性地盤のせん断波速度 V_s を検討パラメータをとした。また、地盤媒質の減衰特性は、せん断剛性を複素剛性 $\{ = G(1 + i/Q) \}$ として表し、 Q 値により考慮した。ここで Q 値は、周波数に依存しない一定値であるとした。盛土のせん断波速度 V_e 、質量密度 ρ および減

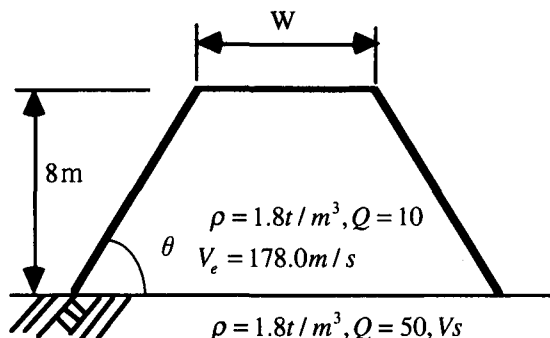


図-5 弾性地盤上の盛土モデル

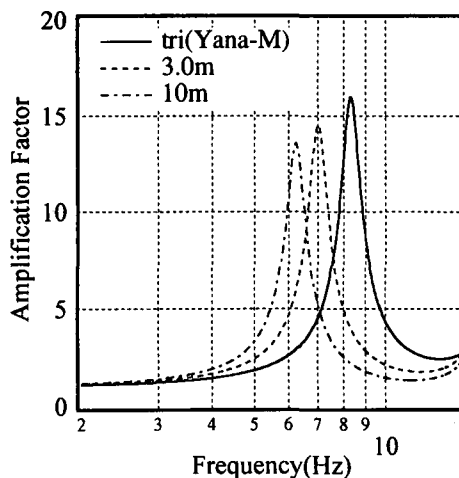


図-6 盛土上端幅に応じた伝達関数の比較

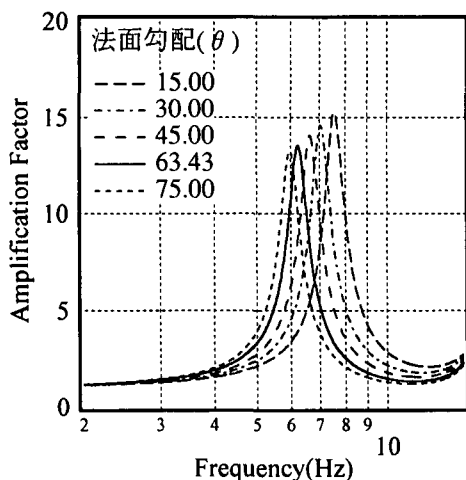
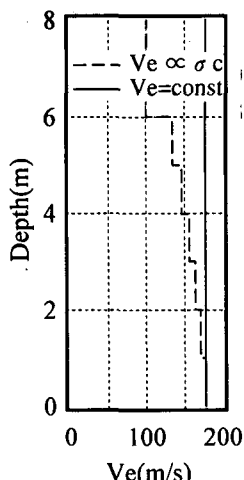
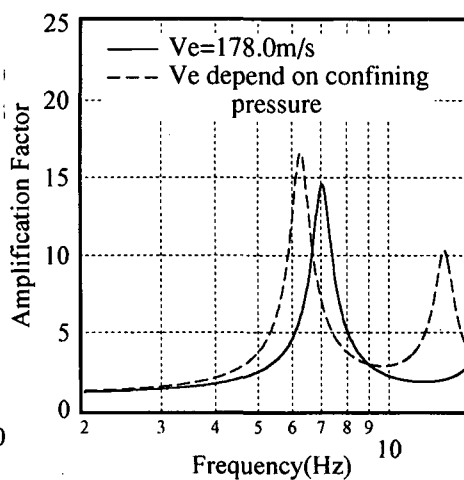


図-7 盛土法面勾配に応じた伝達関数の比較



a) Ve深度モデル



b) 伝達関数

図-8 盛土内せん断波速度分布とそれに応じた伝達関数の比較

衰特性を表すQ値は図に示すとおりである。各パラメータに対する盛土の振動性状の比較には、盛土下端における複合波振幅に対する地表面変位振幅の比として定義される伝達関数を用いる。その伝達関数は、式(27)で示した盛土下端への入射波振幅と盛土上端層の未定係数 C_1 との関係を、式(33)に示す複合波に対する関係に置き換えることにより得られる。その際、複合波の振幅は1.0とする。

$$C_1 = \frac{1.0}{R(1,1)_n + R(1,2)_n + R(2,1)_n + R(2,2)_n} \quad (33)$$

まず、盛土法面の勾配を三角形モデル (63.43°) と固定し、上端幅が0mの三角形{図中Tri(Yana-M)}と3, 10mの台形状とした伝達関数の比較を図-6に示す。ここで、盛土部分は深さ2mの4層構造に分割し、三角形モデルの伝達関数は上端幅が0.1mの小さな値として算出した。その三角形モデルの1次卓越周波数8.5Hzとその増幅率は柳沢による解析結果と同じであり、ここで示した手法の妥当性を示していると考えられる。図より、上端幅が大きくなるにつれ、1次卓越周波数が低周波数側に変化し

ていることが分かる。さらに、盛土上端幅を10mとし、盛土法面勾配を15, 30, 45および75度および三角形モデルの63.43度とした際の伝達関数の比較を図-7に示す。これより、盛土勾配が緩やかになるにつれ、1次卓越周波数が高周波数側に変化していることが分かる。一般に盛土の勾配は45度程度以下となり、上端の幅も数m以上となることから、三角形モデルは盛土の振動性状の把握のためのモデルとしては適当と言えないことは明らかである。さらに、これらの比較より、盛土の形状は盛土自体の振動に影響を及ぼすことが明らかとなった。

ここで提案した手法は盛土上端から深度方向に材料特性の拘束圧依存性の影響を考慮することが可能である。盛土のせん断波速度が図-8(a)に示す様に拘束圧 $\sigma_c (= (1 + 2K_0)\sigma_v / 3$, 単位: kN/m^2)に依存($= 178(\sigma_c / 88.2)^{0.25}$; ただし、 K_0 は0.5とした)するモデルと、盛土内のせん断波速度が一定(178m/s)とした際の伝達関数の比較を図-8(b)に示す。図に示す様にせん断波速度モデルの差異は、1次卓越周波数やその増幅率などに影響を及ぼしていることが分かる。

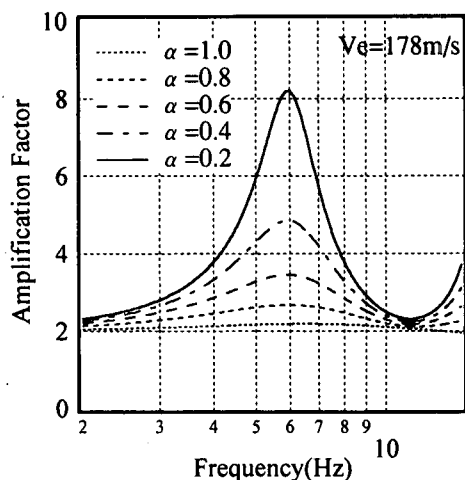


図-9 弾性地盤との波動インピーダンス比に応じた周波数応答関数の比較

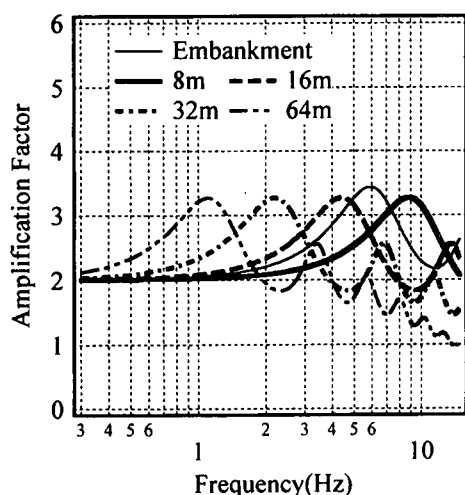


図-11 盛土および層厚に応じた支持地盤の周波数応答関数の比較

最後に、盛土と弾性地盤との波動インピーダンス比を0.2から、0.2間隔で1.0まで変化させた際の周波数応答関数の比較を図-9に示す。水平成層地盤と同様に波動インピーダンス比の低下に伴い、増幅率が増加することが分かる。

3.2 盛土-支持地盤系の振動特性

盛土の振動特性におよぼす支持地盤との相互作用の影響を把握するため、図-10に示す盛土-支持地盤モデルを対象とし、支持地盤層厚に応じた盛土の応答の比較を行う。ここで、支持地盤層の層厚は、8m、16m、32mおよび64mの4ケースとした。

まず、層厚に応じた支持地盤自体の周波数応答関数と盛土自体の周波数応答関数の比較を図-11に示す。これより、支持地盤層の層厚が8m、16mの1次卓越周波数はそれぞれ9Hz、4.5Hzとなっており、盛土自体の1次卓越周波数6Hzに比較的近く、両者の増幅率も同程度の値となっている。層厚が32m以上となると、盛土の1次卓越周波数に比べ、支持地盤の1次卓越周波数はかなり低周波数側の値となり、

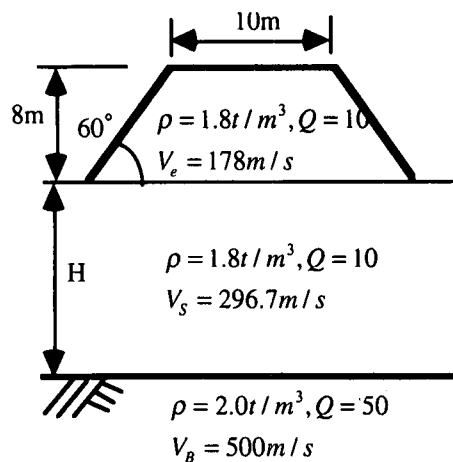


図-10 盛土-支持地盤系モデル

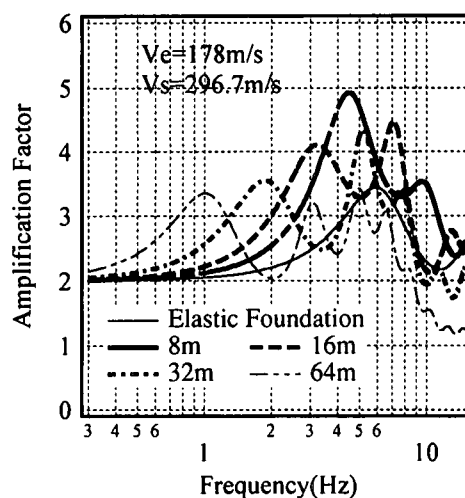


図-12 盛土-支持地盤系の周波数応答関数の比較

盛土の卓越周波数と対応がみられるのは、増幅率の小さな2次、また3次卓越周波数となっている。

次に、支持地盤の層厚に応じた盛土-支持地盤系の周波数応答関数の比較を図-12に示す。図には、盛土が図-10の支持地盤($V_s = 296.7 \text{ m/s}$)のみに支持されるとして求めた盛土自体の周波数応答関数(図中Elastic Foundation)も合わせて示す。支持地盤の1次卓越周波数が盛土自体の1次卓越周波数に近い層厚8mおよび16mにおいて、盛土の1次卓越周波数より低また高周波数側にて最も大きな増幅率を示している。ただし、その周波数は、盛土自体また支持地盤自体の卓越周波数とは異なり、両者の相互作用の影響によると考えられる。このことは、修正ニューマーク法などで用いられている様な盛土自体の震動を単純に1自由度系でモデル化することが困難であることを示している。

最後に、実地盤における震動特性の事例として、柳沢が検討に用い、日本海中部地震などで著しい液状化被害を受けた八郎潟干拓堤防を対象とし、軟弱地盤上の盛土の震動特性に及ぼす減衰特性、Q値の影響を把握する。解析モデルおよび地盤定数

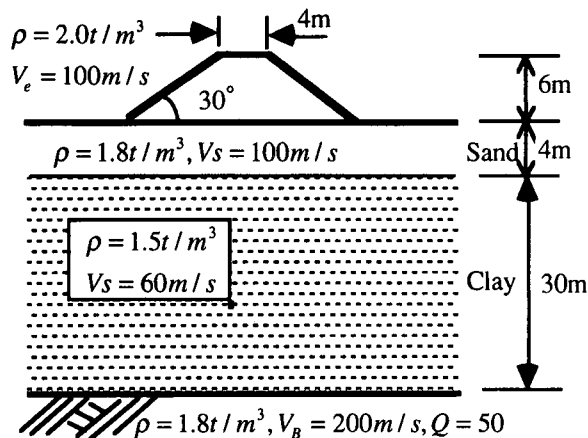


図-13 八郎潟における干拓堤防と支持地盤モデル

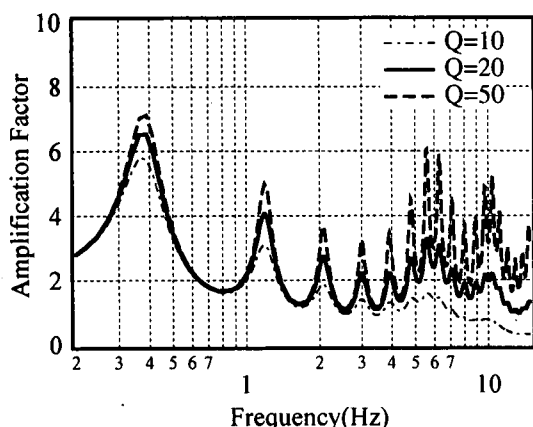


図-15 Q値に応じた盛土-支持地盤系の周波数応答関数の比較

は図-13に示す通りであり、せん断波速度60m/sの柔らかい粘土層上に4m程度の敷砂を施し、その上に盛土が構築されている。盛土形状は堤頂幅4m、法面勾配30度とモデル化し、盛土、支持地盤のQ値は10, 20, 50の3ケースとした。まず、盛土およびその支持地盤自体の伝達関数を図-14に示す。その際、各地盤のQ値は50とした。盛土の1次卓越周波数は5.5Hz、支持地盤の1次卓越周波数は0.45Hzとかなり低周波数であり、その1から5次卓越周波数まで盛土の1次卓越周波数より低周波数側の値となっている。次に、Q値に応じた盛土と支持地盤系の周波数応答関数の比較を図-15に示す。Q値の影響は盛土自体の1次卓越周波数近傍にて顕著に表れていることが分かる。このことは、強震時における盛土の応答を評価する上で、比較的高い周波数帯域における減衰モデルがその応答に影響を及ぼすことを示唆している。

3.3 盛土-支持地盤系の地震応答

図-13に示した八郎潟干拓堤防の盛土-支持地盤系のモデルを用い、周波数特性の異なる2つの地震波に対する地震応答解析を実施し、応答特性の比較を行う。ここで用いた地震波は1968年十勝沖地震および1994年三陸はるか沖地震による八戸港で観

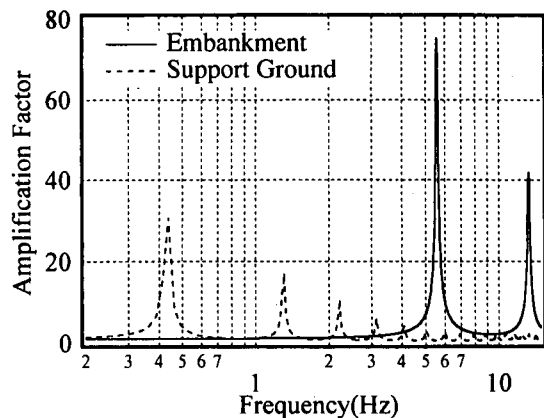
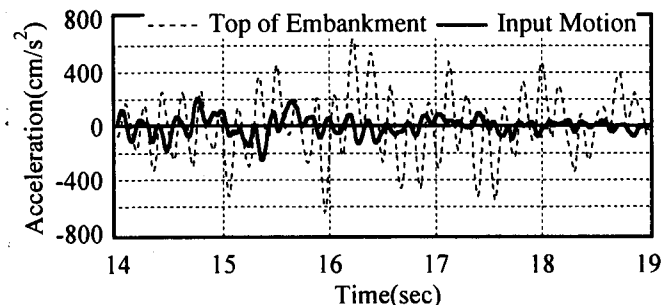
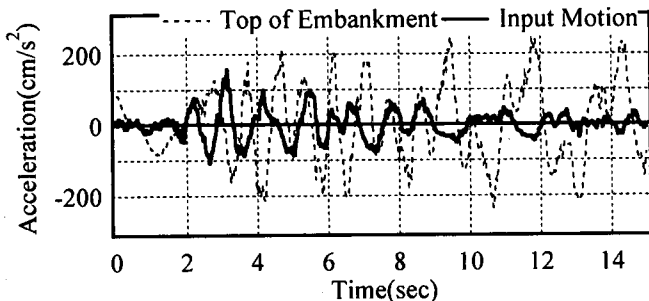


図-14 盛土および支持地盤自体の伝達関数



a)1994年三陸はるか沖地震



b)1968年十勝沖地震

図-16 入力地震波に応じた盛土頂部の応答加速度時刻歴の比較

測された記録のEW成分を逆増幅解析により得られたせん断波速度300m/s以上の層上での地震波であり、図-13のせん断波速度200m/sの層上面より複合波として入力した。その際、盛土、支持地盤のQ値は盛土の1次卓越周波数近傍にてその震動の影響が顕著に表れる50とした。

まず、2つの地震波に対する盛土頂部の応答と入力波の加速度時刻歴の比較を図-16に示す。これより、2つの地震波のうち盛土の卓越周波数と対応する高周波数成分を多く含む三陸はるか沖地震に対しては、高周波数成分の加速度が大きく増幅している。一方、十勝沖地震に対しては、入力波の主要動部分に盛土の1次卓越周波数に対応する高周波数成分が多く含まれていないことから、その主要動部分に対する加速度増幅が認められない。しかし、後続の低周波数成分を含む部分では、盛土-支持地盤系、特に支持地盤の振動特性との対応により加速度増幅が大きくなっていることが分かる。

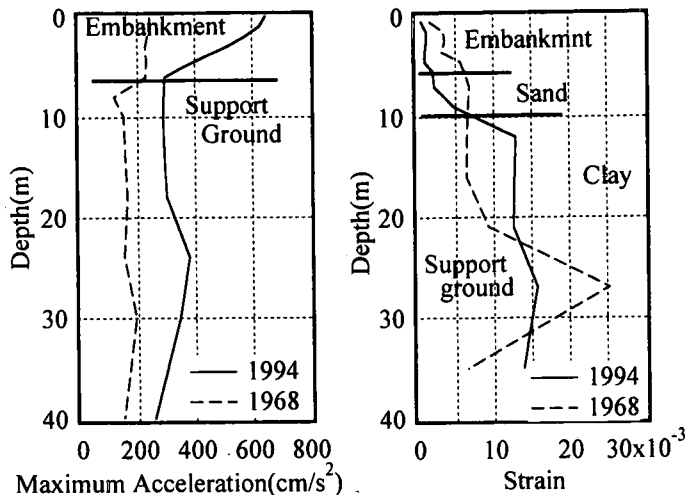


図-17 2つの地震波に対する最大応答値の深度分布の比較
a)最大加速度の深度分布 b)最大ひずみの深度分布

次に、2つの地震波に対する盛土-支持地盤内の最大応答加速度および最大応答ひずみの深度分布の比較を図-17に示す。前述の地震波の周波数特性の差異に起因し、1994年三陸はるか沖地震に対して、盛土部で加速度が大きく増幅していることが分かる。ひずみについてみると、両地震波に対する粘土層の応答はともに大きい、盛土部分では0.5%程度以下、特に三陸はるか沖地震に対しては0.1%程度と小さいことが分かる。この解析は線形応答解析であるが、盛土法面の安定を検討する際に重要な加速度応答を評価する上で、盛土-支持地盤系の相互作用、さらに地盤材料の減衰特性が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

5. あとがき

ここでは、盛土自体の形状や深度方向の材料特性の変化、さらに支持地盤との相互作用を考慮できる盛土-地盤系の1次元地震応答解析法を提案した。その手法は、台形形状とした盛土を水平分割した際に得られる要素の変位、せん断応力に関する調和振動解が有する未定係数を隣り合う2つの層間で関連づける層マトリックスを求めることにより、盛土-支持地盤系の振動解析を水平成層地盤の1次元地震応答解析に用いられている層マトリックス法による重複反射法と同じ枠組みで解析できるというものである。この様な定式化は、1次元ではあるものの支持地盤との連成を考慮した盛土内の非線形挙動を得るため、解析コード「SHAKE」¹⁰⁾などの非線形解析法の考え方を適用することを可能とした点が特徴であると考えられる。この手法を用いた種々の解析により以下のことが明らかとなった。

1) 盛土の形状を表す上端幅や法面勾配は、振動特性に影響を及ぼす。

2) 盛土の振動特性は支持地盤との相互作用により必ずしも盛土自体の振動特性とは一致しないため、1自由度系の振動でモデル化することは困難である。

3) 盛土の振動に地盤の減衰特性、特に盛土の卓越振動数となる比較的高周波数帯域での減衰特性は、その応答に強く影響を及ぼす。

最後に、ここで提案した盛土-地盤系の1次元地震応答解析法の妥当性、特に盛土部の挙動を1次元挙動と仮定したことの妥当性の検討は今後の課題としたい。研究の一部は学術フロンティア「環境・防災都市に関する研究」、「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究」の一環とし、その予算を用いて実施したものであることを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計：丸善，pp.317-330，1999
- 2) 高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する検討小委員会編：高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究報告，土木学会-地震工学委員会，pp.105-183，2000
- 3) Newmark N. : Effects of Earthquakes on Dams and Embankment, Geotechnique, London, 15(2), pp.139-160, 1965
- 4) Steven L. Kramer, Matthew W. Smith : Modified Newmark Model for Seismic Displacements of Compliant Slopes, J. Geotech Eng., ASCE, 123(7), pp.635-644, 1997
- 5) Hamid R. RAZAGHI, Eiji YANAGISAWA, Motoki KAZAMA : An Approach to seismic Permanent Displacement of Slopes, J. Geotech. Eng., JSCE, No.659/III-52, pp.1-16, 2000
- 6) 澤田純男，土岐憲三，村川史郎：片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の限界状態設計法，レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウム論文集，(社)地盤工学会，pp.341-346，2000
- 7) 佐々木康：河川堤防の地震被害，土と基礎，28-8 (271)，pp.25-30，1980
- 8) 柳沢栄司：土構造物の振動特性に及ぼす基礎地盤の影響，土木学会論文報告集，No.317，pp.101-110，1982
- 9) 土岐憲三：新体系土木工学 11 構造物の耐震解析，(社)土木学会，pp.82-90，1982
- 10) Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H. B. ; SHAKE A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley

(2002年4月19日受付)