

傾斜基盤を有する盛土の水平ならびに 上下方向の簡便な固有振動数算定式

秦吉弥1・加納誠二2・多賀正記3・一井康二4・土田孝5・山下典彦6

 ¹日本工営㈱中央研究所 地盤耐震グループ 研究員 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)
 E-mail:hata-ys@n-koei.jp
 ²広島大学大学院工学研究科助教 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
 E-mail:skano@hiroshima-u.ac.jp
 ³広島大学大学院工学研究科博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
 E-mail: m054646@hiroshima-u.ac.jp
 ⁴広島大学大学院工学研究科准教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
 E-mail:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp
 ⁵広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
 E-mail:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp
 ⁶神戸市立工業高等専門学校都市工学科助教授 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)
 E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp

2004年新潟県中越地震では,水平加速度と同等,あるいはそれ以上の鉛直加速度が観測されており, 傾斜基盤上に築造された高速道路盛土の被災が報告されている.しかし,こういった傾斜基盤上の盛土 の振動性状,特に上下動が盛土の破壊に及ぼす影響に関する検討はあまり行われていない. そこで本稿では,傾斜基盤上に築造された盛土の形状を考慮した簡便な盛土の固有振動数算定式を水 平方向ならびに上下方向それぞれについて提案した.そして本提案式の妥当性を検証するため,振動台 模型実験結果およびFEM解析結果との比較検討を行った.

Key Words : Embankment, earthquake, tilted bedrock, natural frequency, shaking table test

1.はじめに

地震時における傾斜基盤上の盛土の被害は,1978 年宮城県沖地震において注目されるようになり¹¹, その後の大地震(たとえば1993年釧路沖地震,1993 年北海道南西沖地震,1995年兵庫県南部地震)など でも宅地造成盛土や道路盛土などで被害が報告され ている^{2),3),4)}.那須⁵¹は,地震時におけるすべりや亀 裂を伴うような比較的規模の大きい盛土構造物被害 は,傾斜基盤上で多発していることを報告している. さらに2004年に発生した新潟県中越地震では,水平 加速度と同等,あるいはそれ以上の鉛直加速度が観 測されており,傾斜基盤上に築造された高速道路盛 土の被災が報告されている⁶.

盛土が自重による摩擦によって斜面安定性を保つ ことを考慮すれば,被災事例において上下動の影響 は無視できない可能性があると考えられるが,傾斜 基盤上の盛土の振動性状や上下動応答が盛土の破壊 に及ぼす影響に関する検討はあまり行われていない のが現状である⁷⁾.

また道路盛土など延長の長い線状の土構造物にお いて固有周波数などの震動性状を予め簡易的に把握 することができれば,盛土を1質点系の振動モデル でモデル化し,その震動性状を考慮した修正 Newmark法⁸⁾を利用することで実用的な盛土の地震 被害予測に役立てることも可能である.著者らは, 水平基盤上の盛土の固有周波数算定式を提案⁹⁾し, 兵庫県南部地震で被災した鉄道盛土に対して修正 Newmark法を適用⁸⁾することで,その適用性を検討 しているが,傾斜基盤上の盛土に対しては検討はな されていない.

そこで本稿では、傾斜基盤上に築造された盛土の 震動性状を把握することを目的として、盛土高、天 端幅、法面勾配、傾斜基盤勾配をそれぞれ考慮した 簡便な傾斜基盤上の盛土の固有振動数算定式を水平 方向および上下方向それぞれについて提案する.そ して本提案式の妥当性を検証するため、振動台模型 実験結果およびFEM解析結果との比較検討を行った. 2. 傾斜基盤上の盛土の固有振動数算定式

(1) 対象とする盛土の形状

図-1は2004年新潟県中越地震において特に被災の 多かった関越自動車道の小出~越後川口における代 表的な崩壊前の傾斜基盤上盛土の横断面概略図であ る.本研究では以下に示す3つの理由を勘案して, 図-2に示す図-1を簡略化した盛土形状を対象とした. 1)同時に検討を行っている傾斜基盤を有する盛土 の動的遠心模型実験¹⁰⁾ならびに弾塑性FEM解析¹¹⁾に おける傾斜基盤上の盛土の形状との整合性を考慮 2)図-1の山側における法勾配Lを考慮した場合,簡 便な盛土の固有振動数算定式の導出において二重積 分の実施が困難になり,算定式が非常に複雑化

ここに図-2において斜面右上側(山側)の法勾配形 状は考慮しておらず,法勾配角度90度の簡略化され た形状のモデルとなっている.

そして本研究では図-2に示すような盛土形状,す なわち盛土高さH,天端幅W,法面勾配S,傾斜基盤 勾配Kを考慮し,水平ならびに上下方向についての 簡便な盛土の固有振動数算定式をレイリーの方法 ^{12),13)}を用いた近似解により定式化をする.



(2) 水平方向における盛土の固有振動数算定式

- はじめに固有周波数算定の流れを以下に示す.
- 1) レイリーの式をたわみを変数とする式に置換
- 2) 盛土の自重に伴う作用力の定式化
- 3) 盛土の変形係数の定式化
- 4) 静的荷重による盛土のたわみの近似式の定式化

5) 4)で導出した近似式を1)で置換した式に代入

6) 二重積分を実施することで,算定式を定式化

ここに,導出した算定式はあくまでも近似式であることや盛土を弾性体と仮定していることに留意しなければならない.

まず,境界条件を満足する振動系のたわみ曲線を たとえば $u(x,t) = U(x) \cdot \cos \omega t$ と仮定し,運動エネルギ ーの最大値 Q_{max} とひずみエネルギーの最大値 L_{max} が 等値であるという条件を加えれば,振動系の固有円 振動数 ω の算定式,いわゆるレイリーの式が次式で 与えられる¹⁴⁾.

$$\omega = \sqrt{\int_0^z EI\left(\frac{d^2U(x)}{dx^2}\right)^2 dx} / \int_0^z \rho AU(x)^2 dx$$
(1)

ここに, Eはヤング係数, Iは断面2次モーメント, ρ は密度,Aは断面積,0~Zは盛土の水平もしくは 上下方向の任意の積分区間である.なお,図-2に示 す盛土形状においては断面積Aは一定値にはならな いが,(1)式の中では便宜上,断面積Aを一定値と仮 定する.本研究の方法では,断面積Aをxの関数とし た場合,最終的に導出する固有振動数算定式が非常 に複雑になるだけでなく,断面積Aを一定値とした 場合との誤差は,山側における勾配Lを無視するこ とによる誤差を合わせても約1割程度であることを 確認している.また盛土など複雑な形状を有する構 造物では,たわみ曲線を仮定することが一般に困難 であるので,便宜上,静荷重(谷側への自重に比例 した静荷重(震度法の想定に相当))による構造物の たわみ曲線と振動系のたわみ曲線が等しいと仮定す れば, 盛土の自重に伴う静荷重分布q(x)によるたわ みを $\overline{U}(x)$ とすると,ひずみエネルギーの最大値 L_{max} は静荷重が成した仕事量に等しく次式が成立する.

$$L_{\max} = \frac{1}{2} \int_0^z q(x) \cdot U(x) dx \tag{2}$$

よって,(1)式は次のようになる.

$$\omega = \sqrt{\int_0^z q(x)\overline{U}(x)dx} / \int_0^z \rho A \overline{U}(x)^2 dx$$
 (3)

ここに,上述した理由により(1)式および(3)式中 における断面積Aを一定値と仮定しているため,静 荷重分布q(x)はq(x)=pgA=const.(ここにgは重力加速 度)と与えられ,(3)式は次のように置き換えるこ とができる.

$$\omega = \sqrt{\int_0^Z g \cdot \overline{U}(x) dx / \int_0^Z \overline{U}(x)^2 dx}$$
(4)

ここでは強固な傾斜基礎地盤上に築造された盛土 を対象とするため,盛土-傾斜基礎地盤間の相互作 用を考慮しないこととし,盛土と傾斜した基礎地盤 との境界はすべて固定とした.図-3に示すとおり任 意位置xにおける盛土の自重に伴う作用力(盛土の 自重に起因する水平方向のせん断力)p_H(x)は,次 のように表される(図-3は図-2を90度左回転した状 態を記述していることに留意されたい).

$$p_{H}(x) = \int_{\alpha}^{x} \{ (Sx+W) - (Kx + (S-K)H + W) \} \rho \cdot g \cdot dx$$

= $\int_{\alpha}^{x} \{ (S-K)x + (K-S)H \} \rho \cdot g \cdot dx$ (5)

ここに,傾斜基盤勾配*K* > 盛土法勾配*S*である. また任意位置*x*における変形定数*k_H(x)*は,盛土を線 形弾性体とした場合,図-3に示すとおり任意位置*x* における単位奥行き当りの断面積となる(*S*-*K*)*x*+(*K* -*S*)*H*に比例することから,微小長さ*dx*で除するこ とによって次のように表される.

$$k_{H}(x) = \frac{(S-K)x + (K-S)H}{dx} \cdot \rho \cdot V_{s}^{2}$$
(6)

ここに、 V_s はせん断波速度である.なお、この変形定数 $k_H(x)$ は、図-3に示すように盛土底面固定状態における鉛直方向に作用する盛土そのものの自重に起因する静的な変形を対象として決定している.よって、任意位置xにおける変位を、図-3に示すように $\alpha \sim x$ 間に作用する自重が任意位置xにおいて集中荷重 $p_H(x)$ として作用し、その荷重によって $x \sim H$ 間が(6)式で求められた変形定数 $k_H(x)$ によって変形するとすれば、水平方向における静荷重によるたわみの近似解 $\overline{U}_H(x)$ は(5)式と(6)式の関係から次のように表わされる.

$$\overline{U}_{H}(x) = \frac{g}{V_{s}^{2}} \cdot \int_{x}^{H} \left| \frac{\int_{a}^{x} \{(S-K)x + (K-S)H\} dx}{\{(S-K)x + (K-S)H\}} \right| dx$$
(7)

(7)式を(4)式に代入し整理すると次のようになる.



(a) 止規模方区間0~x~H 図-3 盛土の自重によるせん断力(水平方向)



(b) 等価積分区間α~x~H図-3 盛土の自重によるせん断力(水平方向)

上式の積分を行えば,傾斜基盤上における水平方向の盛土の固有振動数formの算定式は次のように表される.

$$f_{0H} = \frac{\sqrt{5}}{2\pi} \cdot \frac{V_s}{H - \alpha} \tag{9}$$

ここに,αは図-3に示すとおりArea1(図-3(a))と Area2(図-3(b))の面積が等しくなるような位置を示 しており,Area1を含む0~Hの積分とArea2を含むα ~Hの積分はそれぞれ等価の関係にあり次式で与え られる.

$$\alpha = \frac{\sqrt{K} \{H(K-S) - 2W\} - \sqrt{\beta}}{\sqrt{K}(K+S)}$$
(10)

ここに,上式における β は次式で与えられる. $\beta = -H^2 K^2 S + 2H^2 K S^2 - H^2 S^3 - 2HWK^2$

$$+ 4HWKS - 2HS^2W + 3KW^2 - SW^2 \quad (11)$$

(3) 上下方向における盛土の固有振動数算定式
 ここでは,水平方向と同様に,弾性波(P波)速度
 V_E,盛土高*H*,天端幅*W*,法面勾配*S*,傾斜基盤勾配
 *K*をそれぞれ変数とした上下方向の盛土の固有振動
 数算定式を導出する.なお,本研究における弾性波
 速度*V_E*とは粗密波の速度を意味する.また図-4に示
 す盛土形状の寸法(盛土高*H*,天端幅*W*,法面勾配*S*,傾斜基盤勾配*K*)は,図-3に示した盛土寸法と同一
 値を採るものとする.ここでは盛土-傾斜基礎地盤
 間の相互作用を考慮しないことから,盛土と傾斜し

た基礎地盤との境界はすべて固定とし,図-4に示す とおり任意位置xにおける盛土のみの自重に伴う作 用力(盛土の自重に起因する上下方向のせん断力) pv(x)は,次のように表される(図-4は図-2を上下反 転した状態を記述していることに留意されたい).

$$p_{V}(x) = \int_{0}^{x} \left(\frac{1}{S}x - \frac{1}{K}x\right) \rho \cdot g \cdot dx = \int_{0}^{x} \left(\frac{K - S}{SK}\right) x \cdot \rho \cdot g \cdot dx \quad (12)$$

また任意位置xにおける変形定数 $k_v(x)$ は,盛土を 線形弾性体とした場合,図-4に示すとおり任意位置 xにおける単位奥行き当りの断面積((K - S)/(SK)) xに 比例することから,微小長さdxで除することによっ て次のように表される.

$$k_V(x) = \frac{(K-S)x}{S \cdot K \cdot dx} \cdot \rho \cdot V_E^2$$
(13)

この変形定数 $k_v(x)$ は,図-4に示すように盛土底面 固定状態における鉛直方向に作用する盛土そのもの の自重に起因する静的な変形を対象として決定して いる.よって,任意位置xにおける変位を図-4に示 すように0~x間に作用する自重が任意位置xにおい て集中荷重 $p_v(x)$ として作用し,その荷重によってx~ δ 間が(13)式で求められた変形定数 $k_v(x)$ によって変 形するとすれば,上下方向における静荷重によるた わみ $\overline{U}_v(x)$ (近似解)は(12)式と(13)式の関係から次 のように表わされる.



図-4 盛土の自重によるせん断力(上下方向)

$$\overline{U}_{V}(x) = \frac{g}{V_{E}^{2}} \int_{x}^{\delta} \frac{\left\{ \left(\frac{K-S}{SK}\right) x \right\} dx}{\left\{ \left(\frac{K-S}{SK}\right) x \right\}} dx$$
(14)

(14)式を(4)式に代入し整理すると次のようになる.



上式の積分を行えば,傾斜基盤上における上下方向の盛土の固有振動数fovの算定式は次のように表される.

$$f_{0V} = \frac{\sqrt{3}V_E}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\left(1 - \delta^2 + 2\delta^2 \ln|\delta|\right)}{(\delta - 1)^3(3\delta + 1)}}$$
(16)

ここに, δ は図-4に示すとおりArea1(図-4(a))と Area2(図-4(b))の面積が等しくなる位置を示してお り,Area1を含む0~W+HSの積分とArea2を含む0~ δ の積分はそれぞれ等価の関係にあり次式で与えられ る.

$$\delta = H \cdot S \cdot \sqrt{1 + K \cdot \left(\frac{K - S}{S \cdot K}\right)} \tag{17}$$

3.提案式の検証

(1) FEM解析の概要

ここでは傾斜基盤上の盛土を2次元FEM振動モデ ルに置き換え,動的解析を行った.図-5に示すメッ シュ構成は同時に検討を行っている弾塑性FEM解析 ¹¹⁾と同様である.入力波は水平または鉛直方向につ いて最大振幅0.1m/sec²の正弦波とし,加振周波数を 10Hzから150Hzまで1Hz刻みで変化させて計算した.



図-5 傾斜基盤上盛土FEMモデルの一例

法勾配 解析ケース せん断波速度 弹性波速度 盛土高 天端幅 傾斜基盤勾配 備考 水平加振 V_{s} (m/s) V_E (m/s) 上下加振 H(m)W(m) $1 \cdot S$ 1:*K* (deg.) Cal. 1H Cal. 1V 100 200 10 10 1:2.0 1:5.67 (10°) 基本ケース せん断波速度 Cal. 2H Cal. 2V 50 100 Cal. 3H Cal. 3V 150 300 10 10 1:2.0 $1: 5.67 (10^{\circ})$ 弾性波速度 Cal. 4H Cal. 4V 200 400 変化 Cal. 5H Cal. 5V 4 Cal. 6H Cal. 6V 8 100 200 10 1:2.0 $1: 5.67 (10^{\circ})$ 盛土高変化 Cal. 7V Cal. 7H 12 Cal. 8H Cal. 8V 16 Cal. 9H Cal. 9V 4 Cal. 10H Cal. 10V 8 100 200 1:2.0 1:5.67 (10°) 天端幅変化 10 Cal. 11H Cal. 11V 12 Cal. 12H Cal. 12V 16 Cal. 13H Cal. 13V 1:1.5 10 Cal. 14H Cal. 14V 100 200 10 $1: 5.67 (10^\circ)$ 法勾配变化 1:2.5Cal. 15H Cal. 15V 1:3.0 Cal. 16H Cal. 16V 1:11.43 (5°) 傾斜基盤 Cal. 17H Cal. 17V 100 200 10 10 1:2.0 1:3.73 (15°) 勾配変化 Cal. 18H Cal. 18V 1:2.75 (20°)

表-1 FEM 解析パラメーター覧

図-5に示す天端中央における応答加速度と入力正弦 波の加速度振幅の比率で表される水平または上下方 向の加速度応答倍率から盛土の水平ならびに上下方 向の固有振動数をそれぞれ推定した.物性値につい ては弾性材料でモデル化を行い,ポアソン比 =1/3(すなわち線形弾性体の場合V_E=2V_S)を仮定した.

表-1はFEM解析ケース一覧である.ここでは,盛 土形状および盛土の剛性をそれぞれ変化させ,水平 もしくは上下方向に加振した計36ケースについて解 析を行った.図-4にFEMメッシュ図の一例を示す. 境界条件としては,底面は水平および上下方向とも に剛基盤として固定,側方については水平方向は固 定,鉛直方向は自由とした.

(2) 振動台模型実験の概要

写真-1に示すような水平方向加振および上下方向 加振の電磁式の小型振動台をそれぞれ用い、振動台 上に傾斜基盤(アクリル板)を有する模型盛土(シリ コンゴム)を直接設置して盛土横断面方向および鉛 直方向についてそれぞれ一方向加振を行った.法肩 中央に10mm毎に測点を設け,加振中に盛土天端の 挙動を側方または上方より高速CCDカメラを用いて 撮影し,画像解析¹⁵⁾により測点の変位量を求めた. 用いた高速CCDカメラの性能を考慮して盛土延長中 央付近における3測点の平均変位を当該盛土の応答 変位量 X_A とした.ここで,加速度一定条件で加振す ると高周波数領域において振幅が小さくなり,本シ ステムでは変位が測定できなくなるため,加振両振 幅一定条件(水平方向:0.1mm,上下方向:0.6mm) のもとで加振周波数faを変化させながら実験を行い, 実験後に模型材料の線形性を仮定して水平方向につ いては30Hz (=f₃₀)および上下方向については50Hz (=f₅₀)の加速度を基準加速度とした(18),(19)式のよう に正規化を施した.そして加振周波数f_Aと水平また は上下方向の盛土の応答変位量X_H, X_Vの関係から模 型盛土の水平および上下方向の1次固有振動数four

*f*_{0V}を推定した¹⁶⁾.

$$X_{H} = X_{A} \cdot \left(\frac{f_{30}}{f_{A}}\right)^{2}$$
(18)
$$\left(f_{42}\right)^{2}$$
(19)

$$X_{V} = X_{A} \cdot \left(\frac{f_{50}}{f_{A}}\right)^{2}$$
(19)



(a) 水平方向加振(Exp.1H)



(b) 上下方向加振(Exp.1V) 写真-1 振動台模型実験模型盛土設置状況

| 実験ケース | | 盛土高 | 天端幅 | 法勾配 | 傾斜基盤勾配 | せん断波速度 | 弾性波速度 | 借老 |
|----------|----------|--------|--------|--------------|------------------|------------|---------------|--------|
| 水平加振 | 上下加振 | H (mm) | W (mm) | 1 : <i>S</i> | 1:K (deg.) | Vs (m/sec) | V_E (m/sec) | 75 |
| Exp. 1H | Exp. 1V | 80.5 | 80.1 | 1:2.01 | 1 : 5.67 (10 °) | 14.8 | 55.4 | 基本ケース |
| Exp. 2H | Exp. 2V | 80.4 | 80.3 | 1:2.00 | 1:5.67 (10°) | 6.1 | 22.8 | - 剛性変化 |
| Exp. 3H | Exp. 3V | 80.1 | 80.5 | 1:2.03 | 1:5.67 (10°) | 18.0 | 67.4 | |
| Exp. 4H | Exp. 4V | 40.2 | 80.1 | 1:2.01 | 1:5.67 (10°) | 14.8 | 55.4 | 盛土高変化 |
| Exp. 5H | Exp. 5V | 120.1 | 80.2 | 1:2.01 | 1:5.67 (10°) | 14.8 | 55.4 | |
| Exp. 6H | Exp. 6V | 80.0 | 40.0 | 1:2.02 | 1 : 5.67 (10 °) | 14.8 | 55.4 | 天端幅变化 |
| Exp. 7H | Exp. 7V | 80.5 | 120.4 | 1:2.05 | 1:5.67 (10°) | 14.8 | 55.4 | |
| Exp. 8H | Exp. 8V | 80.3 | 80.1 | 1:1.01 | 1:5.67 (10°) | 14.8 | 55.4 | 法勾配变化 |
| Exp. 9H | Exp. 9V | 80.8 | 80.3 | 1:3.03 | 1:5.67 (10°) | 14.8 | 55.4 | |
| Exp. 10H | Exp. 10V | 80.2 | 80.5 | 1:2.02 | 1:11.4 (15°) | 14.8 | 55.4 | 基盤傾斜 |
| Exp. 11H | Exp. 11V | 80.1 | 80.5 | 1:2.03 | 1:3.73 (5°) | 14.8 | 55.4 | 勾配変化 |

表-2 振動台模型実験ケース一覧

表-2に各ケースの実験条件を示す.本実験では, 盛土延長を0.4m(-定)として盛土の剛性(せん断波 速度 V_s ・弾性波速度 V_E),盛土高H,天端幅W,法面 勾配S,傾斜基盤勾配Kをそれぞれ変化させて実験 を行った.盛土模型材料としてはシリコンゴムを使 用した.また境界条件として写真-1に示すように盛 土側方面に緩衝材としてシリコンゴム(盛土模型材 料のシリコンゴムの約2倍程度の剛性)を設置した.

振動台模型実験に先立ち模型材料の中空ねじり試 験を実施し, せん断弾性係数Gを求めた.実験で使 用したシリコンゴムの密度 ρ は1.10g/cm³およびポア ソン比vは $0.48(V_{E}=3.74V_{S})$ である.せん断波速度 V_{S} および弾性波速度 V_{E} は,模型材料のシリコンゴムを 等方弾性体と仮定して計算した.

(3) FEM解析結果との比較

図-6は盛土の剛性(せん断波速度および弾性波速度),盛土高さ,天端幅,法面勾配,傾斜基盤角度をそれぞれ変化させた場合のFEM解析結果と本研究において提案する傾斜基盤上における盛土の固有振動数算定式を比較したものである.なお,図中の括弧内の数字は誤差値((提案式/FEM解析結果)×100)を表わしている.この図よりすべての比較検討ケースにおける誤差値の最大は91%(Cal.2H)となっていることが読み取れる.よって本結果によれば,本提案式は傾斜基盤を有する盛土の水平および上下方向の固有振動数を1割以下の誤差で簡便に算定可能であるといえる.

(4) 振動台模型実験結果との比較

図-7は振動台模型実験から推定した固有振動数と 本研究で提案する固有振動数算定式((9)式および (16)式)を比較検討したものである.なお,図中の 括弧内の数字は誤差値((提案式/実験値)×100)を表 わしている.同図(a)は模型盛土の剛性を変化させ た場合の振動台実験結果と固有振動数算定式とを比 較したものである.これより水平方向については実 験値と提案式がほぼ一致しているのに対し,上下方 向では弾性波速度が最大であるExp.3Vの実験値は提

案式よりも小さくなっていることが読み取れる.同 図(b)は模型盛土の盛土高さを変化させた場合の振 動台実験結果と固有振動数算定式とを比較したもの である.これより水平方向については実験値と提案 式がほぼ一致しているのに対し,上下方向では模型 盛土高さが40mmであるExp.4Vにおいて提案式より も固有振動数が低くなっていることがわかる.同図 (c)は模型盛土の天端幅を変化させた場合の振動台 実験結果と固有振動数算定式とを比較したものであ る.これより水平ならびに上下方向ともに実験値と 提案式がほぼ一致していることがわかる.また天端 幅が水平ならびに上下方向の固有振動数に及ぼす影 響は非常に小さいことが読み取れる.同図(d)は模 型盛土の法面勾配を変化させた場合の振動台実験結 果と固有振動数算定式とを比較したものである、こ れより緩勾配になるにつれて水平ならびに上下方向 ともに盛土の固有振動数は低くなる傾向にあること がわかる.また法面勾配が1:1であるExp.8Hおよび Exp.8Vでは,水平および上下方向ともに提案式のほ うが実験値よりも固有振動数が高くなっていること が読み取れる.同図(e)は模型盛土の傾斜基盤勾配 を変化させた場合の振動台実験結果と固有振動数算 定式とを比較したものである.これより傾斜基盤勾 配が緩勾配になるにつれて固有振動数は,水平方向 では高周波側に移行する傾向にあるのに対し,上下 方向では低周波側に移行する傾向にあることがわか る.またいずれも比較的高周波域となるExp.10Hな らびにExp.11Vにおいて実験値よりも提案式による 固有振動数が高くなっていることが読み取れる.以 上の結果を総合すると,水平方向では70Hz以高, 上下方向では100Hz以高の比較的高周波域では模型 盛土の寸法効果による影響¹⁶⁾もあり実験値と提案式 との間に1割以上の誤差(最大誤差値174%) (Exp.4V))が見られるものの,固有振動数が極端に 高くなるケースを除けば、本提案式は傾斜基盤を有 する盛土の水平および上下方向の固有振動数を1割 以下の誤差で推定できていることが読み取れる.





図-7 振動台模型実験結果との比較

4.水平方向と上下方向の固有振動数の関係

図-8は盛土形状すなわち盛土高,天端幅,法面勾 配,傾斜基盤勾配が上下ならびに水平方向の盛土の 固有振動数に及ぼす影響についてそれぞれ検討を行 ったもので,同時に固有振動数の比率(上下/水 平)についても言及した.固有振動数の比率R(上 下/水平)は,盛土を弾性体と仮定すれば,(9)式, (16)式より弾性波速度V_Eとせん断波速度V_Sの関係を 考慮して次式で表わされる.

$$R = \sqrt{\frac{3}{5}} \cdot \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \cdot \left(H-\alpha\right) \cdot \sqrt{\frac{\left(1-\delta^2+2\delta^2\ln|\delta|\right)}{\left(\delta-1\right)^3\left(3\delta+1\right)}}$$
(20)

なお,図-8ではポアソン比v=0.4とした.同図(a) は盛土高さが固有振動数に及ぼす影響について検討 したものである.これより上下方向の固有振動数の ほうが水平方向の固有振動数よりも大きくなってお り,固有振動数の比率Rは盛土高さが大きくなるに つれ1.1程度の値に収束していることがわかる.同 図(b)は天端幅が及ぼす影響について検討したもの で,上下方向の固有振動数は一定値であるのに対し 天端幅が大きくなるにつれ水平方向の固有振動数は 緩やかに低くなる傾向にあり,固有振動数の比率は 緩やかに大きくなる傾向にあることがわかる.

同図(c)は法面勾配が及ぼす影響について検討したものである.これより水平方向ならびに上下方向の固有振動数は緩勾配になるに従い低周波域に移行する傾向にあり,固有振動数の比率は一定値となっていることがわかる.同図(d)は傾斜基盤勾配が及ぼす影響について検討したものである.これより基盤面の勾配が急勾配になるに伴い,水平方向の固有振動数は高周波域に移行する傾向にあるのに対し,上下方向の固有振動数は低周波域に移行する傾向にあり,両者の傾向が異なっていることが読み取れる

以上の結果を総合すると,基盤面の勾配は盛土高 天端幅,法面勾配と比較して,上下方向と水平方向 の盛土の固有振動数の比率に対して比較的大きな影 響を及ぼすものと考えられる.

5.まとめ

本研究では,傾斜した基盤面上に築造された盛土 について簡便な固有振動数算定式をレイリーの方法 を用いた近似解により水平方向ならびに上下方向に ついてそれぞれ定式化した.そして本提案式の妥当 性を検証するため,振動台模型実験結果,FEM解析 結果との比較検討を行った.得られた結論を以下に 示す.

(1)本研究の提案式と振動台模型実験結果および FEM 解析結果をそれぞれ比較した結果,水平方 向では70Hz 以高および上下方向では100Hz 以 高の固有振動数が極端に高くなる振動台模型実 験のケースを除けば,本提案式は盛土高,天端 幅,法面勾配,基盤面の勾配といった形状を考 慮した盛土の水平および上下方向の固有振動数 を1割程度の誤差で簡便に推定できることを確認した.ただし,本提案式はあくまでも近似解であること,および本提案式の導出過程において盛土を線形弾性体と仮定していることに留意しなければならない.



- (2)傾斜した基盤面上の盛土の水平方向の固有振動 数は、せん断波速度が遅いほど、盛土高が高い ほど、天端幅が広いほど、法面勾配が緩勾配に なるほど、基盤面の勾配が急勾配になるほど低 くなる。
- (3)傾斜した基盤面上の上下方向の盛土の固有振動 数は、弾性波速度が遅いほど、盛土高が高いほ ど、法面勾配および基盤面の勾配が緩勾配にな るほど低くなる.またそれは天端幅には依存し ない。
- (4)基盤面の勾配は盛土高,天端幅,法面勾配と比較して,上下方向と水平方向の盛土の固有振動数の比率に比較的大きな影響を及ぼし,場合によっては水平方向と上下方向の盛土の固有振動数が一致する可能性もある.

謝辞:振動台模型実験においては池田和浩氏(広島 大学大学院工学研究科博士課程前期)にそれぞれご 支援を仰いだ.ここに記して関係各位に深く御礼申 し上げます.なお,本研究を遂行するにあたり(社) 中国建設弘済会の研究助成を得た.記して感謝の意 を表する.

参考文献

- 1) 阿部隆,村山良之:仙台周辺の地形改変と都市問題, 地理, Vol.27, No.9, pp.44-51, 1982.
- 三浦均也,西村右敏,吉田望,鷲尾朝昭,高原利幸, 前田健一:1993年釧路沖地震における標茶地区宅地造 成盛土の崩壊,土質工学会北海道支部技術報告集,第 34号,pp.38-47,1994.
- 3) 北林勉,和田康三,黒森武,三田地利之:1993年北海 道南西沖地震における道路被害-一般国道5号知来地 区の盛土破壊の原因と対策-,土質工学会北海道支部 技術報告集,第34号,pp.130-135,1994.
- 応用地質学会阪神・淡路大震災調査委員会:兵庫県南部地震-地質・地盤と災害-報告書, pp.288-313, 1995.

- 5) 那須誠: 地震時の盛土の変形と地盤条件の関係-傾斜地 盤の影響-, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.181-188, 1989.
- 6) 國生剛治:新潟県中越地震の地盤被害と対策,土木施 工, Vol.46, No.1, pp.84-87, 2005.
- たとえば安田進,永瀬英生,松尾憲親,石川利明:の り面安定性に与える上下動の影響に関する模型実験, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, -98, pp.236-237, 1992.
- 8) たとえばY. Hata, N. Yamashita, T. Tsuchida and S. Kano: A Study on the Applicability of the Modified Newmark Method, *Proc. of International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No.1307, 2007.
- 9) 秦吉弥,加納誠二,土田孝,山下典彦:盛土形状を考慮した水平および上下方向の固有周波数算定式,第41回地盤工学研究発表会講演論文集(CD-ROM), No.1056, pp.2111-2112, 2006.
- 10)秦吉弥,一井康二,李黎明,土田孝,加納誠二:傾斜 基盤を有する盛土の地震応答特性に関する動的遠心模 型実験,土木学会地震工学論文集,Vol.29,2007.
- 11)秦吉弥,一井康二,土田孝,李黎明,加納誠二:上下 動が傾斜基盤を有する盛土の地震時応答に及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集,Vol.29,2007.
- 12)J. W. S. Rayleigh : The Theory of Sound, Macmillan, London, Vol.2, 504p, 1894.
- 13)小坪清真:土木振動学,森北出版, pp.205-214, 1979.
- 14)たとえばG. B. Warburton: Response using the Rayleigh-Ritz Method, *Earthquake Engineering and Structural* Dynamics, Vol.7, pp.327-334, 1979.
- 15)加納誠二,佐々木康:土の骨格構造の破壊過程を追跡 するための画像解析の精度検討,広島大学大学院工学 研究科研究報告,第49巻,第1号,pp.57-67,2000.
- 16)たとえば秦吉弥,加納誠二,佐々木康:地震時におけ る堤防の三次元応答に関する振動台実験,土木学会地 震工学論文集 (CD-ROM), Vol.27, No.251, 2003.

(2007.4.6 受付)

A SIMPLE CALCULATION METHOD OF THE NATURAL FREQUENCY IN THE HORIZONTAL AND VERTICAL DIRECTION FOR EMBANKMENTS ON TILTED BEDROCK

Yoshiya HATA, Seiji KANO, Masaki TAGA, Koji ICHII, Takashi TSUCHIDA and Norihiko YAMASHITA

The damage of the embankments on tilted bedrock is reported in recent earthquakes. However, there are few studies about the characteristics of seismic response of the embankments on such tilted bedrock, and the effects of a vertical seismic motion on the damage to earth structures are not investigated well.

In this fundamental study, the equations for the natural frequency in the horizontal and vertical direction considering the shape of embankments were proposed. Then, the proposed equation were examined with the results of shaking table tests and the FEM calculation result.