

マウンド基礎構造における地震時限界支持力の数値解析と模型実験

澤田知之* 能町純雄**

Numerical Analysis and Model Experiment for Seismic Bearing Capacity of a Foundation on Mound Structure

Tomoyuki SAWADA and Sumio G. NOMACHI

要 旨

本論文は、極限解析の上界法を用いて、マウンド基礎上に荷重が作用する場合の地震時加速度を考慮してその限界支持力を求めようとするもので、マウンド基礎天端上の載荷されていない部分である余裕幅も含めて解析を進める。崩壊すべり線は載荷重作用部分の終点から開始され、対数螺旋線となると仮定しており、すべり仕事とそのすべり線に沿って生じる粘着抵抗が等しいと置くことより目的関数を求め非線形最適化問題として取り扱っている。今回は理論による数値解析とこの模型実験を行った結果の比較検討を報告するものである。

Abstract

In this paper, an upperbound technique of the limit analysis is used to find bearing capacity of a mound foundation structure is discussed upon the assumptions that a logarithmic spiral rupture starts at an edge of the loaded area far from the mound slope, a sliding part of soil behaves as a rigid body and inertia force acts its center of gravity. The expression that the rate of kinematic energy of the sliding soil block together with the load should be equal to the dissipation of inertia energy rate along the sliding line, leads to the equation of ultimate load by optimizing the various parameters in it. Thus, obtained numerical results are compared with those by model experimental analysis.

1. ま え が き

地震多発地帯では、地震による土塊の滑動や斜面のすべり崩壊による震害がしばしば発生している。その為にマウンド基礎構造や斜面の構造となるものの安定問題は耐震工学上の重要な課題となっている。

いわゆる支持力理論とは基礎地盤が塑性的崩壊をきたすときの極限荷重を解析的に求める手法のことであるが、この極限支持力を理論的又は実験的に推定する問題に関しては、有限要素法および境界要素法が多用されるようになってきた²⁾³⁾。又、近年、剛体バネモデルも地盤の極限荷重の算定に

用いられつつある⁴⁾。このように、現在では相当の精度で設計上の指針となり得る系統が整えられつつあるといえるが、解析に際しては、かなり煩雑な計算を用い、演算量も大きなものとなると考えられ、その解析法がどのような場合に実施するのか、また各手法での安全率をどのように決定するかについては、結論を得るには至っていないと考えられる。

本論文では、崩壊すべり面を対数螺旋線⁵⁾⁶⁾であると仮定することにより安全率を最少とするようなすべり面を求めようとするもので、従来の微小部分における釣り合い方程式や土の構成方程式を用いずに、解析対称であるマウンド基礎構造のすべり部分の土塊の仕事率と粘着抵抗が等しいとおき、この釣り合い式より目的関数を定める。これを、非線形最適化法により上界を基礎天端の余裕幅を

* 助教授 土木工学科

** 教授 日本大学生産工学部土木工学科

$$\begin{aligned} r &= r_0 e^{(\theta - \theta_0) \tan \phi} \\ r^2 &= r_0^2 e^{2(\theta - \theta_0) \tan \phi} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \therefore A &= \frac{1}{2} r_0^2 \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{2(\theta - \theta_0) \tan \phi} d\theta \\ &= \frac{r_0^2}{4 \tan \phi} \left\{ e^{2(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

(B) 垂直方向(Y軸廻り)の断面1次モーメント

図-4より $r \cos \theta$ をO点から領域OACの重心までの水平距離と置くと以下のようにY軸廻りの断面1次モーメント(G_Y)を知り得る。

$$\begin{aligned} G_Y &= \int_0^r \left(\int_{\theta_0}^{\theta_h} r \cos \theta r d\theta \right) dr \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_h} \frac{1}{3} r^3 \cos \theta d\theta \\ &= \frac{r_0^3}{3} \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{3(\theta - \theta_0) \tan \phi} \cdot \cos \theta d\theta \end{aligned}$$

I_1 を部分積分により求めると、

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3 \tan \phi} \left\{ \cos \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \cos \theta_0 \right\} \\ &+ \frac{1}{9 \tan \phi} \left\{ \sin \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0 \right\} \\ &- \int_{\theta_0}^{\theta_h} \cos \theta \cdot e^{3(\theta - \theta_0) \tan \phi} d\theta \end{aligned} \quad \leftarrow I_1$$

$$\begin{aligned} \text{故に } I_1 &= \frac{9 \tan^2 \phi}{(1 + 9 \tan^2 \phi)} \times \frac{1}{9 \tan^2 \phi} \left\{ 3 \tan \phi \right. \\ &\quad \left\{ \cos \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \cos \theta_0 \right\} \\ &\quad \left. + \left\{ \sin \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0 \right\} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore G_Y &= \frac{r_0^3}{3} \left[\frac{1}{(1 + 9 \tan^2 \phi)} \times \left\{ 3 \tan \phi \right. \right. \\ &\quad \left\{ \cos \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \cos \theta_0 \right\} \\ &\quad \left. \left. + \left\{ \sin \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0 \right\} \right\} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

(C) 水平方向(X軸廻り)の断面1次モーメント

図-5より $r \sin \theta$ をO点から領域OACの重心までの垂直距離と置くと以下の如くX軸廻りの断面1次モーメント(G_X)が得られる。

$$\begin{aligned} G_X &= \int_0^r \left(\int_{\theta_0}^{\theta_h} r \sin \theta \cdot r d\theta \right) dr \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_h} \frac{1}{3} r^3 \sin \theta d\theta \\ &= \frac{r_0^3}{3} \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{3(\theta - \theta_0) \tan \phi} \cdot \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad \leftarrow I_2$$

前述と同様に部分で I_2 を求めると、

$$I_2 = \frac{1}{(1 + 9 \tan^2 \phi)}$$

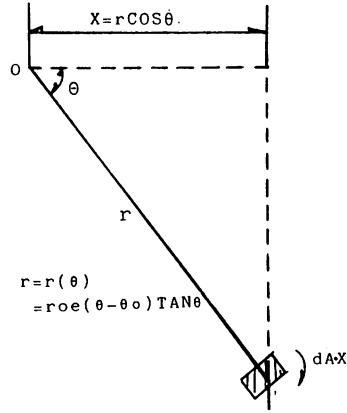


図 4

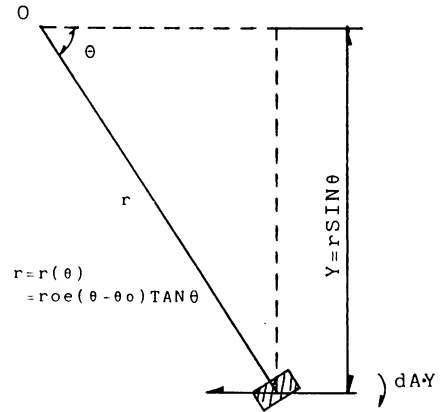


図 5

$$\begin{aligned} &\times \left\{ 3 \tan \phi \left\{ \sin \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0 \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \cos \theta_h \cdot e^{3(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} - \cos \theta_0 \right\} \right\} \end{aligned}$$

$$\therefore G_X = \frac{r_0^3}{3} \times I_2$$

(D) OAC 領域の重心位置

よって、重心位置は、各々の断面1次モーメントを(3)式で求めた全体面積で除して求め得る。

$$X = \frac{G_Y}{A} \quad (6) \quad Y = \frac{G_X}{A} \quad (7)$$

これより、OAC 領域の土塊の自重によるすべり仕事率を以下の手順で求めることができる。

2-2 OAB 領域と OBC 領域における重心位置

図-6より, 領域 OAB と領域 OBC について図-7(a)(b)より重心 G_1, G_2 の (x_1, y_1) (x_2, y_2) の座標を求めることができる。

領域 OAB の AB の中点を M として, ベクトルで考えると

$$OM = \frac{OA + OB}{2} \quad (8)$$

重心 G_1 は中線 OM を 2:1 に内分するから(8)式より

$$OG_1 = \frac{OA + OB}{2} \times \frac{2}{3} = \frac{OA + OB}{3} \quad (9-a)$$

同様に, 領域 OBC の重心 G_2 も同様の式が成り立つ。

$$OG_2 = \frac{OB + OC}{3} \quad (9-b)$$

よって, 領域 OAB と, 領域 OBC のそれぞれの点の座標は以下の如く示される。

$$A = (r_h \cos \theta_h, r_h \sin \theta_h)$$

$$B = (r_0 \cos \theta_0 - L, r_0 \sin \theta_0)$$

$$C = (r_0 \cos \theta_0, r_0 \sin \theta_0)$$

領域 OAB の重心 G_1 の (x_1, y_1) 座標は, 次のように表わし得る。

$$x_1 = \frac{r_h \cos \theta_h + r_0 \cos \theta_0 - L}{3} \quad (10)$$

$$y_1 = \frac{r_h \sin \theta_h + r_0 \sin \theta_0}{3} \quad (11)$$

また, 領域 OBC の重心 G_2 の (x_2, y_2) 座標は次のように示される。

$$x_2 = \frac{2r_0 \cos \theta_0 - L}{3} \quad (12)$$

$$y_2 = \frac{2r_0 \sin \theta_0}{3} \quad (13)$$

2-3 外力による仕事率の計算

外力による仕事率には, 次の3つが考えられる。

- 1) 鉛直方向に働く仕事率
- 2) 水平方向に働く仕事率
- 3) 載荷荷重と慣性力による仕事率

以上の仕事率の総和をすべり仕事率とする。図-8のような斜面において領域 ABC の外力に仕事率を求めると次式で示される。

$$W = \gamma \cdot \Omega \cdot A \cdot x = \gamma \cdot \Omega \cdot G \quad (14)$$

ここで γ : 土の密度 (t/m^3) A : 面積 (m^2)

Ω : 角速度 (rad/s) X : 重心までの距離 (m)

G : ($= A \cdot X$) 断面一次モーメント (m_3)

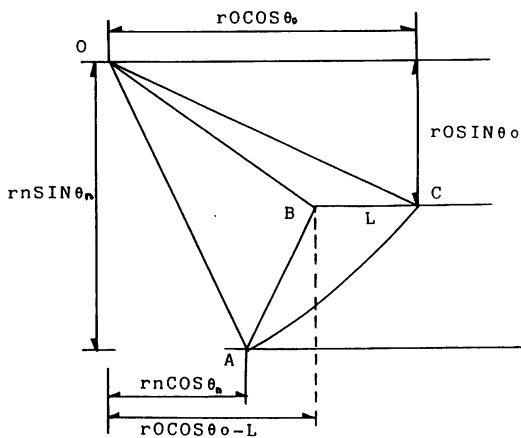


図 6

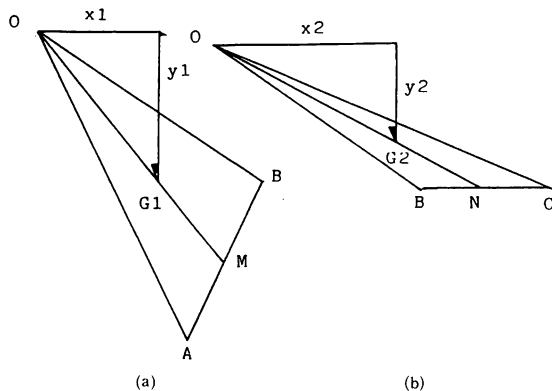


図 7

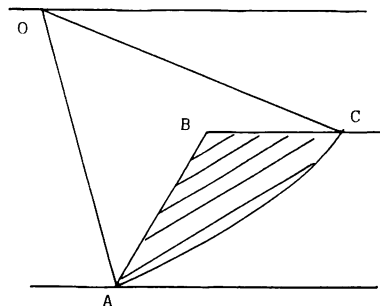


図 8

領域 ABC の面積および重心位置は, 各々領域 OAC から, 領域 OAB と領域 OBC の差として得られる。

a) 鉛直方向のすべり仕事率

(a)-1 領域 OAC の鉛直方向仕事率 ($\dot{W}_1$) 図-9を参照して $\triangle OAC$ の面積 A_1 は(3)式より, また仕事の arm は鉛直方向断面 1 次モーメント式(4)から

$$\dot{W}_1 = \frac{\gamma \Omega \gamma_0^3}{3(1+9\tan^2\phi)}$$

$$\left\{ 3\tan\phi \left\{ \cos\theta_h \cdot e^{3(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} - \cos\theta_0 \right\} \right.$$

$$\left. + \left\{ \sin\theta_h \cdot e^{3(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} - \sin\theta_0 \right\} \right\}$$

$$= \gamma \cdot \Omega \cdot \gamma_0^3 \cdot f_1 \quad (15) \quad \text{と書ける。}$$

(a)ー2 領域 OBC の鉛直方向仕事率 ($\dot{W}_2$)

△ OBC の面積は図-10より $A_2 = \frac{1}{2} L r_0 \sin\theta_0$ また、重心 G_2 の x 座標は(12)式より求められている。よって(14)式から $\dot{W}_2$ は次のように示すことができる。

$$\dot{W}_2 = \gamma \cdot \Omega \cdot A_2 \cdot X_2$$

$$= \gamma \cdot \Omega \cdot \frac{r_0^3}{6} \sin\theta_0 \frac{L}{r_0} \left\{ 2\cos\theta_0 - \frac{L}{r_0} \right\}$$

$$= \gamma \cdot \Omega \cdot r_0^3 \cdot f_2 \quad (16)$$

(a)ー3 領域 OAB の鉛 OAB の鉛直方向仕事率 ($\dot{W}_3$)

△ OAB の面積は領域 OA'A'E から、△ OA'A および △ AA'B と △ OBE を差し引いたものとして得られる。よって面積 A_3 は

$$A_3 = r_h \sin\theta_h (r_0 \cos\theta_0 - L) - \left\{ \frac{1}{2} r_h \cos\theta_h \cdot r_h \cdot \sin\theta_h \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} r_0 \sin\theta_0 (r_0 \cos\theta_0 - L) + \frac{1}{2} (r_h \sin\theta_h - r_0 \sin\theta_0) \cdot H \right\}$$

ここで $H = r_0 \cos\theta_0 - L - r_h \cos\theta_h$

また、重心の x 座標は(10)式より求められているので、 $r_h = r_0 e^{(\theta_h-\theta_0)\tan\phi}$ を考慮してすべり仕事率 $\dot{W}_3$ は次の如く示される。

$$\dot{W}_3 = \gamma \cdot \Omega \cdot A_3 \cdot X_3$$

$$= \gamma \cdot \Omega \cdot \frac{r_0^3}{6} e^{(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} \left\{ \sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{L}{r_0} \sin\theta_h \right\}$$

$$\cdot \left\{ \cos\theta_h e^{(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} + \left(\cos\theta_0 - \frac{L}{r_0} \right) \right\}$$

$$= \gamma \cdot \Omega \cdot \gamma_0^3 \cdot f_3 \quad (17)$$

(b) 水平方向のすべり仕事率

(b)ー1 領域 OAC の水平方向仕事率 ($\dot{W}_4$)

図-12から領域 OAC の面積は、前途と同様に(3)式より求められており、(4)式と合わせて仕事の arm Y_1 を求め得る。また、地震時慣性力は水平慣性力として(14)式に K_c を乗じたもので表めされる。よって $\dot{W}_4$ は

$$\dot{W}_4 = \frac{K_c \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot \gamma_0^3}{3(1+9\tan^2\phi)}$$

$$\left\{ 3\tan\phi \left\{ \sin\theta_h e^{3(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} - \sin\theta_0 \right\} \right.$$

$$\left. - \left\{ \cos\theta_h e^{3(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} - \cos\theta_0 \right\} \right\}$$

$$= K_c \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot \gamma_0^3 f_4 \quad (18) \quad \text{となる。}$$

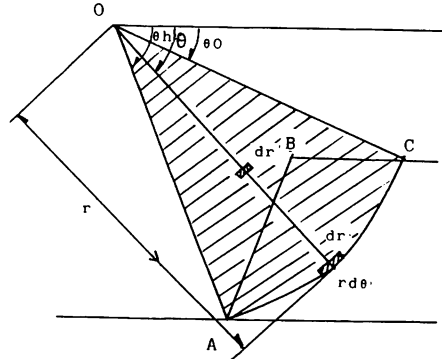


図9

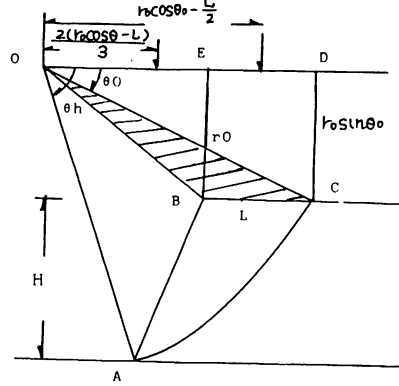


図10

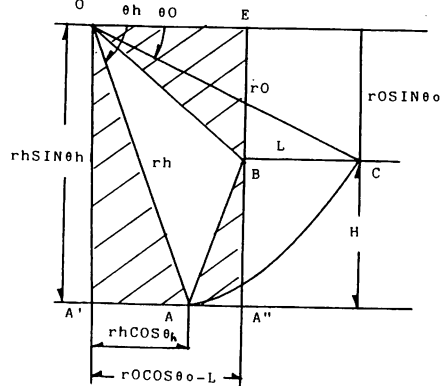


図11

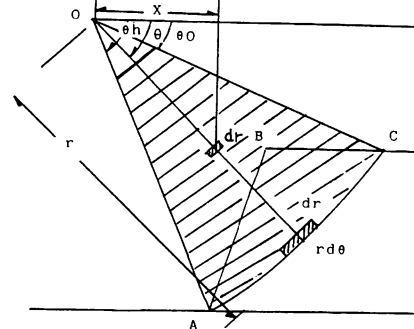


図12

(b)-2 領域 OBC の水平方向仕事率 ($\dot{W}_5$)

領域 OBC の面積 A_2 は図-13 より

$$A_2 = \{\triangle OBE + \square EBCD - \triangle OCD\}$$

$$= \frac{1}{2} r_0 \sin \theta_0$$

また, 重心 G_2 の y_2 の座標は(13)式より求められているから, 地震時慣性力は, (14)式に Kc を乗じて水平慣性力を考慮したものとして次のように表わされる。

$$\dot{W}_5 = Kc \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot A_2 \cdot y_2$$

$$Kc \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot r_0^3 \cdot \frac{L}{6r_0} \cdot 2\sin^2 \theta_0$$

$$= Kc \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot r_{03} f_5 \quad (19)$$

(b)-3 領域 OAB の水平方向仕事率 ($\dot{W}_6$)

領域 OAB の面積 A_3 も a)-3 で求めたものと同じものであり, 重心の y_3 座標は(11)式で求めている。故に水平慣性力として Kc を考慮した地震時慣性力による仕事率 $\dot{W}_6$ は以下のように示される。

$$\dot{W}_6 = Kc \gamma \Omega A_3 y_3$$

$$= Kc \gamma \Omega r_0^3 \frac{1}{6} e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} \cdot \left\{ \sin(\theta_h - \theta_0) + \frac{L}{r_0} \sin \theta_h \right\}$$

$$\cdot \left\{ \sin \theta_h \cdot e^{(\theta_h - \theta_0) \tan \phi} + \sin \theta_0 \right\}$$

$$= Kc \cdot \gamma \cdot \Omega \cdot r_0^3 f_6 \quad (20)$$

2-4 すべり面に沿った内部逸散エネルギー (E_i) の計算

すべり面 AC に沿った粘着内部抵抗として内部逸散エネルギー (E_i) を以下のように計算する。図-15(a)に崩壊形式を対数螺旋とした場合の一般図を示してあり, (b)にその微小部分を示してある。

ここで, 内部エネルギー率 ($\triangle E_i$) は微小部分 ds で $C \cdot V \cos \psi ds$ であり全体の $S(AC)$ に関する E_i は積分することにより次の如く得られる。

$$E_i = \int_s (c \cdot V_s) ds \quad (21)$$

C : 粘着力 (Kg/cm^2)

$$\text{また } V_s = V \cos \phi \quad (22)$$

$$d\theta = \frac{ds \cdot \cos \theta}{r}$$

$$\therefore ds = \frac{r}{\cos \phi} d\theta \quad (23)$$

一方, 図-16に示す CD が対数螺旋と仮定すると

$$r = Ae^a \quad (24)$$

$\theta = \theta_0$ で $r = r_0$ の初期条件と(24)式より

$$A = r_0 e^{-a} \quad (25)$$

ここで, 内部摩擦角を ϕ とすると

$$a = \tan \phi \quad (26)$$

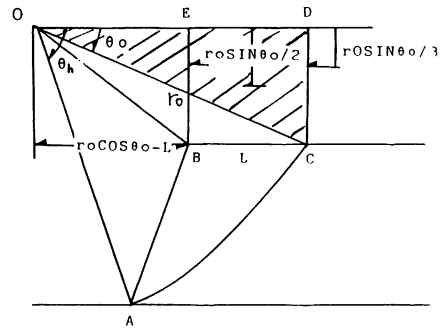


図13

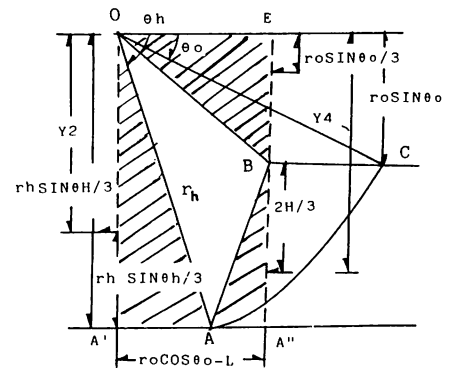


図14

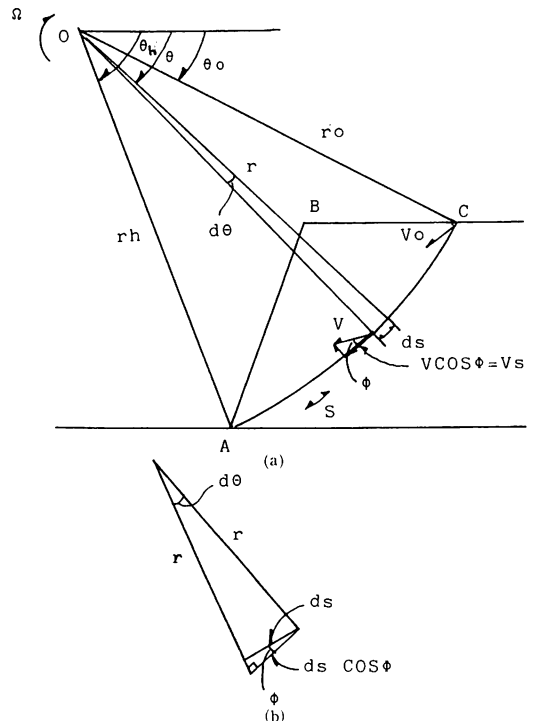


図15

(24)(25)および(26)式より $r_0 e^{(\theta-\theta_0)\tan\phi}$

$$r = r_0 e^{(\theta-\theta_0)\tan\phi} \quad (27) \quad \text{となり,}$$

図-15に於いて AC 面が対数螺旋と仮定すると (27)式のように定義できる。

次にすべり面 AC に沿ったすべり速度 V もまた 図-17(a)(c)より

$$V = V_0 e_a \quad (28)$$

また図-17(a)の 6 つの三角形はお互いに等しい 角度 $\Delta\theta$ で分けられているから、図-17(b)より

$$V_2 = V_1 (1 + \Delta\theta \tan\phi) \quad (29)$$

また、 δu は、小さなすべり速度 δu を用いて $\delta v = \delta u \tan\phi$ で表わされる。

$$(30)$$

よって、整理して示すと、すべり速度 V は図-17(b)(d)より、 $\triangle AOB$ と $\triangle BOC$ の V_1 と V_2 は、等速を意味し、これらを十分に小さい中心角度 $\Delta\theta$ を用いると次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0 (1 + \Delta\theta \tan\phi) \\ V_2 &= V_1 (1 + \Delta\theta \tan\phi) \\ V_n &= V_{n-1} (1 + \Delta\theta \tan\phi) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

よって、12個の三角形 OEF において、速度 V の関係式は次のように表わされる。

$$V_n = V_0 (1 + \Delta\theta \tan\phi)^n \quad (32)$$

V_0 : 初速度

(32)式において $n \rightarrow \infty$ とすると

$$V_0 (1 + \Delta\theta \tan\phi)^n = V_0 \left(1 + \frac{\theta \tan\phi}{n} \right)^n \rightarrow V_0 e^{\theta \tan\phi}$$

$$\therefore V = V_0 e^{\theta \tan\phi} \quad (33)$$

よって、(27)および(33)式を用いて ΔEi を積分して 内部逸散エネルギー (Ei) が次式の如く求められる。

$$\begin{aligned} Ei &= \int_s (c \cdot V_s) ds = \int_{\theta_0}^{\theta_h} (c \cdot V \cos\phi) \cdot \frac{r}{\cos\phi} d\theta \\ &= c \cdot \int_{\theta_0}^{\theta_h} \left\{ \left(V_0 e^{(\theta-\theta_0)\tan\phi} \cdot \cos\phi \right) \cdot \left(\frac{1}{\cos\phi} r_0 e^{(\theta-\theta_0)\tan\phi} \right) \right\} d\theta \\ &= \frac{c r_0 \cdot V_0}{2 \tan\phi} \left\{ e^{2(\theta_h-\theta_0)\tan\phi} - 1 \right\} \\ &= c \cdot r_0^2 \cdot \Omega \cdot f_c \end{aligned} \quad (34)$$

2-5 載荷重およびその慣性力による外部仕事率

ここでは、マウンド基礎上に載荷重を仮定し、その荷重による仕事率およびその荷重による慣性力の仕事率を図-18より求め、載荷による外部仕事率を導く。

(a) 載荷重による仕事率 ($\dot{W}_p$)

$$\dot{W}_p = p \cdot r_{02} \cdot \frac{L}{r} (\cos\theta_0 - \frac{L}{2r_0} \Omega$$

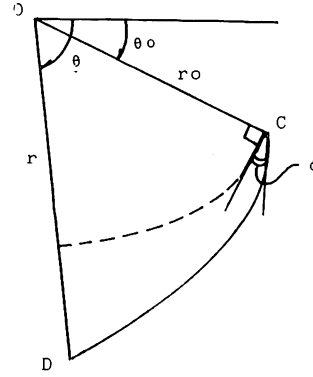
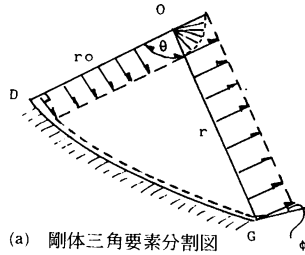
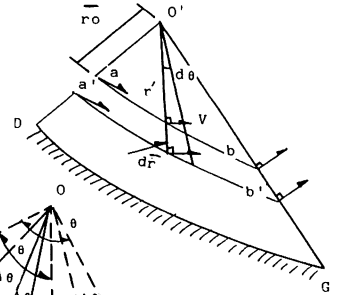


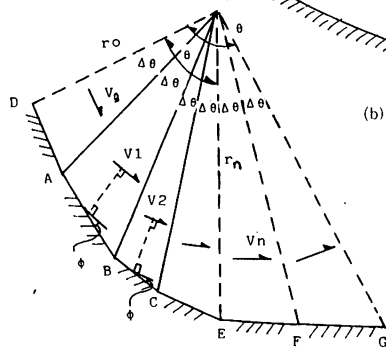
図16



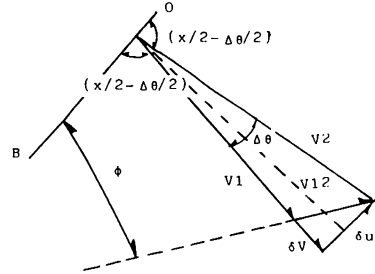
(a) 剛体三角要素分割図



(b) 速度の彼係



(c) モデル図



(d) 微小部分

図17

表 2 数値解析結果— 2

$C=0.05 \text{ kg/cm}^2$ $AL=0.0^\circ$ $H=20.0 \text{ cm}$
 $GAM=0.0026 \text{ g/cm}^3$ $BL=45.0^\circ$ $PH=45.0^\circ$

$X \backslash Kc$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	0.2347	0.2130	0.1923	0.1724	0.1531	0.1344	0.1165	0.0993	0.0829	0.0673
0.4	0.2288	0.2027	0.1780	0.1546	0.1328	0.1128	0.0945	0.0781	0.0634	0.0502
0.6	0.2232	0.1925	0.1637	0.1375	0.1142	0.0940	0.0767	0.0620	0.0495	0.0387
0.8	0.2179	0.1823	0.1499	0.1217	0.0981	0.0788	0.0631	0.0503	0.0399	0.0311
1.0	0.2125	0.1721	0.1368	0.1076	0.0846	0.0667	0.0528	0.0419	0.0331	0.0258
1.2	0.2070	0.1622	0.1245	0.0953	0.0735	0.0573	0.0451	0.0356	0.0281	0.0219
1.4	0.2016	0.1526	0.1246	0.0848	0.0645	0.0499	0.0391	0.0309	0.0244	0.0190
1.6	0.1961	0.1435	0.1036	0.0759	0.0571	0.0441	0.0345	0.0273	0.0215	0.0168
1.8	0.1907	0.1348	0.0947	0.0684	0.0513	0.0395	0.0309	0.0244	0.0192	0.0150
2.0	0.1852	0.1266	0.0868	0.0621	0.0465	0.0358	0.0280	0.0220	0.0174	0.0136

表 3 数値解析結果— 3

$C=0.05 \text{ kg/cm}^2$ $AL=0.0^\circ$ $H=20.0 \text{ cm}$
 $GAM=0.0026 \text{ g/cm}^3$ $BL=40.0^\circ$ $PH=45.0^\circ$

$X \backslash Kc$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	0.2756	0.2509	0.2269	0.2035	0.1808	0.1590	0.1381	0.1181	0.0991	0.0811
0.4	0.2692	0.2386	0.2094	0.1818	0.1562	0.1328	0.1116	0.0925	0.0755	0.0602
0.6	0.2627	0.2261	0.1920	0.1611	0.1338	0.1103	0.0902	0.0732	0.0587	0.0464
0.8	0.2561	0.2136	0.1752	0.1420	0.1145	0.0921	0.0739	0.0593	0.0472	0.0371
1.0	0.2491	0.2013	0.1594	0.1251	0.0984	0.0778	0.0618	0.0482	0.0391	0.0308
1.2	0.2429	0.1893	0.1449	0.1107	0.0853	0.0666	0.0526	0.0418	0.0332	0.0261
1.4	0.2362	0.1778	0.1317	0.0983	0.0747	0.0580	0.0457	0.0363	0.0288	0.0227
1.6	0.2295	0.1668	0.1199	0.0878	0.0663	0.0513	0.0404	0.0320	0.0254	0.0200
1.8	0.2229	0.1564	0.1094	0.0790	0.0595	0.0460	0.0362	0.0286	0.0227	0.0179
2.0	0.2163	0.1466	0.1002	0.0719	0.0540	0.0417	0.0328	0.0259	0.0205	0.0162

表 4 数値解析結果— 4

$C=0.05 \text{ kg/cm}^2$ $AL=0.0^\circ$ $H=20.0 \text{ cm}$
 $GAM=0.0026 \text{ g/cm}^3$ $BL=35.0^\circ$ $PH=45.0^\circ$

$X \backslash Kc$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	0.3330	0.3031	0.2739	0.2455	0.2182	0.1919	0.1668	0.1428	0.1202	0.0987
0.4	0.3250	0.2875	0.2518	0.2183	0.1874	0.1592	0.1338	0.1110	0.0908	0.0728
0.6	0.3167	0.2717	0.2299	0.1924	0.1586	0.1314	0.1075	0.0874	0.0704	0.0559
0.8	0.3084	0.2560	0.2090	0.1689	0.1359	0.1092	0.0878	0.0706	0.0564	0.0446
1.0	0.3000	0.2406	0.1895	0.1483	0.1164	0.0920	0.0732	0.0585	0.0466	0.0369
1.2	0.2916	0.2256	0.1716	0.1306	0.1006	0.0786	0.0622	0.0496	0.0396	0.0313
1.4	0.2832	0.2113	0.1555	0.1157	0.0880	0.0685	0.0541	0.0430	0.0343	0.0270
1.6	0.2748	0.1978	0.1412	0.1031	0.0781	0.0607	0.0478	0.0380	0.0303	0.0240
1.8	0.2665	0.1850	0.1286	0.0930	0.0702	0.0544	0.0429	0.0340	0.0271	0.0214
2.0	0.2583	0.1731	0.1175	0.0846	0.0638	0.0494	0.0389	0.0308	0.0245	0.0194

表5 数値解析結果-5

		$C=0.05 \text{ kg/cm}^2$			$AL=0.0^\circ$			$H=20.0 \text{ cm.}$			
		$GAM=0.0026 \text{ g/cm}^3$			$BL=60.0^\circ$			$PH=40.0^\circ$			
$X \backslash Kc$		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2		0.1507	0.1354	0.1208	0.1071	0.0941	0.0817	0.0699	0.0586	0.0477	0.0374
0.4		0.1464	0.1280	0.1115	0.0966	0.0827	0.0698	0.0579	0.0472	0.0374	0.0286
0.6		0.1424	0.1215	0.1034	0.0869	0.0722	0.0593	0.0480	0.0383	0.0300	0.0277
0.8		0.1385	0.1155	0.0955	0.0780	0.0630	0.0506	0.0403	0.0317	0.0246	0.0185
1.0		0.1349	0.1098	0.0881	0.0698	0.0552	0.0435	0.0343	0.0268	0.0207	0.0156
1.2		0.1314	0.1041	0.0810	0.0626	0.0486	0.0379	0.0296	0.0231	0.0178	0.0134
1.4		0.1282	0.0986	0.0746	0.0564	0.0432	0.0334	0.0260	0.0202	0.0156	0.0118
1.6		0.1250	0.0933	0.0687	0.0511	0.0386	0.0297	0.0231	0.0180	0.0139	0.0105
1.8		0.1219	0.0835	0.0634	0.0464	0.0349	0.0267	0.0207	0.0161	0.0125	0.0094
2.0		0.1188	0.0835	0.0587	0.0424	0.0317	0.0242	0.0188	0.0140	0.0113	0.0085

表6 数値解析結果-6

C=0.05 kg/cm ²				AL=0.0 ^o		H=20.0 cm					
GAM=0.0026 g/cm ³				BL=45.0 ^o		PH=40.0 ^o					
X \ Kc											
X		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2		0.2208	0.1989	0.1783	0.1588	0.1404	0.1229	0.1062	0.0903	0.0751	0.0602
0.4		0.2143	0.1878	0.1641	0.1425	0.1224	0.1040	0.0873	0.0722	0.0586	0.0464
0.6		0.2081	0.1779	0.1513	0.1273	0.1061	0.0878	0.0720	0.0584	0.0468	0.0367
0.8		0.2023	0.1686	0.1390	0.1134	0.0920	0.0744	0.0601	0.0482	0.0383	0.0299
1.0		0.1968	0.1595	0.1273	0.1010	0.0802	0.0638	0.0510	0.0407	0.0322	0.0251
1.2		0.1916	0.1506	0.1166	0.0902	0.0704	0.0554	0.0440	0.0350	0.0277	0.0216
1.4		0.1866	0.1420	0.1068	0.0809	0.0623	0.0487	0.0385	0.0306	0.0242	0.0189
1.6		0.1817	0.1339	0.0980	0.0729	0.0556	0.0433	0.0341	0.0271	0.0215	0.0168
1.8		0.1767	0.1261	0.0901	0.0661	0.0501	0.0388	0.0306	0.0243	0.0193	0.0151
2.0		0.1718	0.1189	0.0831	0.0603	0.0454	0.0352	0.0277	0.0220	0.0175	0.0137

も粘着力が高い程大きな変化を見せている。これはマウンド基礎の斜面となる部分の粘着力が支持力に多くの影響を及ぼすということが言える。また、内部摩擦角については角度が大きくなると安定に向かう傾向を示し、その増加の割合は、ほぼ一定で直線的となった。

4. 模型実験

数値解析結果との比較を行ない、理論の検証を行う為に以下に示すような模型実験を行なった。

4-1 実験装置

図-19に示すようなアクリル板製の箱(400×800×400mm)を作製し、シルト混じりの赤土(0.084mmふるいを通過したもの)にオイルを重量比で8:2の割合で混合したものを実験試料として用いた。

加速度変換器(SHINKOH BAL-50G)をこの試料内に埋め込み起震機(ORIENTAL MOTOR-5GK-5K)上に載せ水平方向加速度を与えた。又、試料の重心と重量の関係から、より起震機と実験試体の安定を計るため、同材質のアクリル板によるアタッチメントを作製して用いた。また、動うずみ測定器(DPM-6BA)および起震機制御盤(Us540-01)と記録装置としてはラピコーダー(RMV-300A)を用いて測定した。(図-19参照)

4-2 実験供試体

前述のような混合土を実験供試体として用いたが、一面力断試験及び比重試験より粘着力： $C=0.045\text{kg/cm}^2$ 、内部摩擦角： $\phi=45^\circ$ と決定して模型実験を進めた。また、崩壊すべり面をより明瞭にする為に3cm感間隔に石灰で約1mmのラインを入れ層を作製して行った。(写真-1参照)

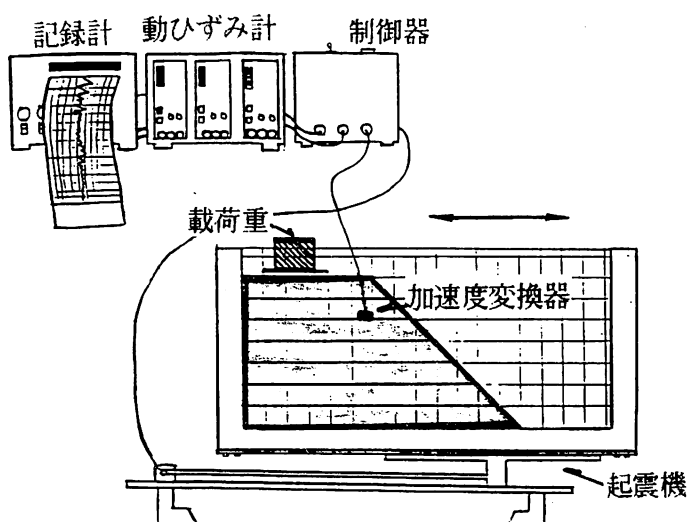


図19 実験装置モデル

供試体はマウンド高： H 、斜無角： β の大きさを各々18cm、24cmおよび30°、45°、60°と変化させて行ない。(図-20)、土の自重のみでの崩壊状態を見るため载荷重を載せない場合と载荷 P を0 kgから各2 kg、6 kg、10kg、12kgと変化させた場合の各実験を行った。(図-20)

4-3 実験結果および考察

実験結果の一覧を表-7に示す、28種の実験を行なったが、限界地震家族度(K 教)が4 ケース求め得なかった。又、崩壊例を写真-2に示す。又、载荷重0 kgと2 kgの結果を表-8および表-9に示す。

上記知実験結果より同じ斜面角に於いて、マウンド高が低い程 K_c は大きくなり安定となり、载荷が増大すると不安定に向かう妥当な傾向を得た。

(表-7および表-8、9) また、マウンド高を同じにすると斜面角が小さくなる程安定に向かう傾向を得た。(表-8、9 s、まとめると、モデルマウンドの形状が各々、 H が小さくなる、 β が小さくなる。载荷重が斜面先より遠のく、 K_c が大きくなるこ雍により、限界地震支持力は大きく現われ、安定に進むことが明らかとなった。

4-4 理論値との比較

表-10に本実験結果と理論値との比較を示した。実験で得られた支持力を理論から数値解析で得た支持力との比で表わした。

表7 K_c の実験結果一覧

NO	K_c	$H(\text{cm})$	$B(^{\circ})$	$P(\text{kg})$
1	0.37	28.5	47	6
2	0.42	33.5	54	6
3	0.56	27.0	39	12
4	0.32	18.0	45	8
5	0.44	18.0	45	8
6	0.39	18.0	45	6
7	0.56	18.0	45	10
8	0.46	18.0	45	10
9		18.0	45	10
10	0.33	18.0	45	10
11	0.42	18.0	45	0
12	0.61	18.0	45	0
13	0.64	18.0	30	0
14	0.47	18.0	30	0
15	0.50	24.0	45	0
16		24.0	45	0
17	0.31	24.0	60	0
18	0.50	18.0	45	2
19		18.0	45	2
20	0.56	18.0	45	2
21	0.47	18.0	30	2
22	0.58	18.0	30	2
23	0.31	24.0	45	2
24		24.0	45	2
25	0.25	24.0	60	2
26	0.39	18.0	45	2
27	0.28	18.0	45	2
28	0.39	18.0	45	2

表 8 荷重なしの場合

荷重 P(kg)	0			
マウンド高 H(cm)	18		24	
斜面角 B(°)	30	45		24
Kc	0.64	0.61	0.50	0.31

表 9 荷重 2 kgの場合

荷重 P(kg)	2			
マウンド高 H(cm)	18		24	
斜面角 B(°)	30	45		60
Kc	0.58	0.50	0.31	0.25

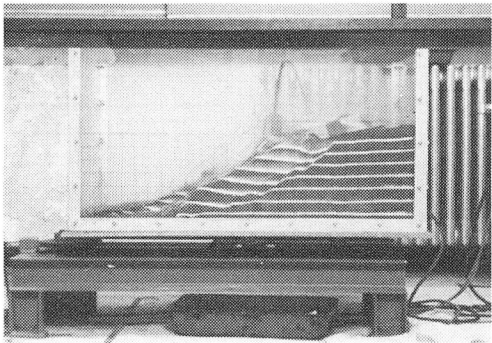
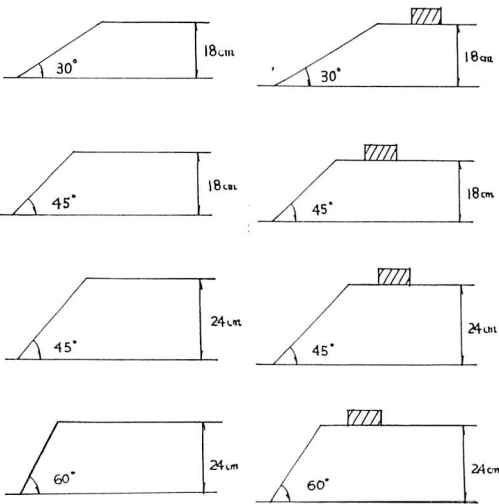
表10 実験と理論との比較

NO	実験値		理論値	(%) P1/Po
	P1(kg/cm2)	Kc	Po(kg/cm2)	
5	0.019	0.44	0.050	38
7	0.014	0.56	0.037	38
10	0.024	0.33	0.067	36
11	0.024	0.42	0.052	46
12	0.024	0.61	0.033	72
18	0.005	0.50	0.043	12
21	0.005	0.47	0.072	7
22	0.005	0.58	0.061	8
23	0.005	0.31	0.071	7
25	0.005	0.25	0.057	9
27	0.005	0.28	0.078	6



写真－1 モデル供試体

図20 供試体モデル



写真－2 崩壊例

本実験では、モルマウンドのスケールが、かなり小さい為、側壁などの摩擦抵抗の影響が大きく表われ、あまりよく一致しているとは言い難い結果となった。

実験供試体の分解能を向上させてさらに定量的結果を得られるよう実験を進める必要があるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) W.F. Chen: Limit Analysis and Soil Elasticity, Elsevier Scientific Publishing Co., 1951.
- 2) 最上武雄(): 土質力学, 技報堂, 1982.
- 3) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, 技報堂, 1982.
- 4) 川井忠彦編: 物理モデルによる連続体力学諸問題の解析 (生研セミナーテキスト), 1978, 1979.
- 5) W.F. Chen and T. Sawada: Earthquake-Induced Slope Failure in Nonhomogeneous, Anisotropic Soil, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.23, No.2, June, pp.125-139, 1983.
- 6) T. Sawada, S.G. Nomachi, W.F. Chen and Y. Takahashi: Evaluation of Limit Seismic Factor in Anisotropic cohesion Slopes, Proceedings of the fifth EMD specialty Conference, ASCE, Vol.2, August, pp.997-1001, 1984.

(昭和63年11月30日受理)

