

不均質・異方性斜面における地震時安定について

— 対数螺旋すべり崩壊 —

澤田知之*・松岡健一**・能町純雄***

On Seismic Stability of Log-spiral Failure Mechanism in
Nonhomogeneous, Anisotropic Slope

Tomoyuki SAWADA, Kenich G. MATSUOKA and Sumio G. NOMACHI

要 旨

本報告は、層分割された不均質異方性斜面の地震時崩壊が、非円すべり面であるところの対数螺旋すべり崩壊機構を持つとしてその安定解析を行ったもので、比較的簡便な手法でかつ工学的情報量も濃い形の解析が進め得ることを示したものである。

Abstract

An attempt is made to evaluate the seismic safety factor, the lateral yield acceleration factor K_c , and the corresponding log-spiral failure mechanism in Earthquake-induced slope divided some layers by the upperbound techniques of pseudo-static limit analysis in addition to previous paper.

1. ま え が き

対数螺旋形すべり面は1935年に Rendlic により提案されたものであるが、内部摩擦角 ϕ が小さい場合には、実質的に円弧すべり面とほとんど差がなくなるが、実際の崩壊面は非円であると言われている。本報告では、対数螺旋すべり面とする軟弱層を含む層分けされる斜面の地震時安定解析を行った結果を示すものである。

尚、土は完全塑性体であり等方・等質の場合及び不均質・異方性の場合を取り上げている。又、Coulomb の破壊規準に従うものと仮定する。解析プログラムにおいて、限界水平地震加速係数 K_c は極限解析の上界法を用いた最小の上限界値として求められるもので、最適化法は SUMT 変換を行った後 B. F. G. S 手法により解析を行っている。探索方法としては、囲い込み法を用い、3次近似を用いている。

2. 解 析 理 論

2-1: 地震時斜面の安定解析については、すでに著者等はすべり土塊の仕事率、載荷重の仕事率およびすべり面が対数螺旋となる場合のすべり面に沿って生ずる粘着抵抗即ち、内部消散(逸散)エネルギーについての式を公表している¹⁾²⁾。

本報告では層分割され軟弱層を含む斜面、すなわち不均質・異方性斜面について着目して述べることにし、式の重複を避ける。基本的には、すべり土塊の回転中心 O に対する仕事率(モーメントによる回転エネルギー)の式は、仕事 $W = M \cdot \theta$ で表わされ、土塊の回転運動の時間 t でこれを微分することにより仕事率 $\dot{W}$ は、次のように示すことができる。

$$\begin{aligned}\dot{W} &= \frac{\partial M}{\partial t} \theta + M \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ &= M \Omega = \gamma \cdot A \cdot X \cdot \Omega = \gamma \cdot \Omega \cdot G_x \quad (1)\end{aligned}$$

ここで、 γ は土の単位体積重量、 Ω は回転中心廻りのすべりの回転角速度、 G_x は断面1次モーメントであり A は、すべり土塊の面積となり、各々次のように表わされる。

* 土木工学科 助教授

** 室蘭工業大学 土木工学科 教授

*** 日本大学 生産工学部 土木工学科 教授

$$G_x = \int_0^r \int_{\theta_0}^{\theta_h} (r \cos \theta) (r \cdot d\theta) dr$$

$$= \frac{r_0^3}{3} \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{3(\theta - \theta_0) \tan \phi} \cdot \cos \theta d\theta \quad (2)$$

$$A = \int_0^r \int_{\theta_0}^{\theta_h} (r d\theta) dr$$

$$= \frac{r_0^2}{2} \int_{\theta_0}^{\theta_h} e^{2(\theta - \theta_0) \tan \phi} \cdot d\theta \quad (3)$$

$$X = G_x / A \quad (4)$$

上記(1)~(4)の基本的な考え方で、すべり土塊の仕事率と粘着抵抗が等しいという式より限界水平地震加速度は結論的に斜面先崩壊形式と底部崩壊形式の各場合について次のような多変数関数解の最小値として得られる。

$$\text{斜面先崩壊: } K_c = \min \cdot F(\theta_0, \theta_h) \quad (5)$$

$$\text{底部崩壊: } K_c = \min \cdot J(\theta_0, \theta_h, \beta') \quad (6)$$

ここで θ_0, θ_h は図-2 に示すような斜面の形状を決める媒介変数としての角度であり β' は底部崩壊の際の崩壊先から斜面頂部への見通し角である。(参考文献1) 2) 参照)

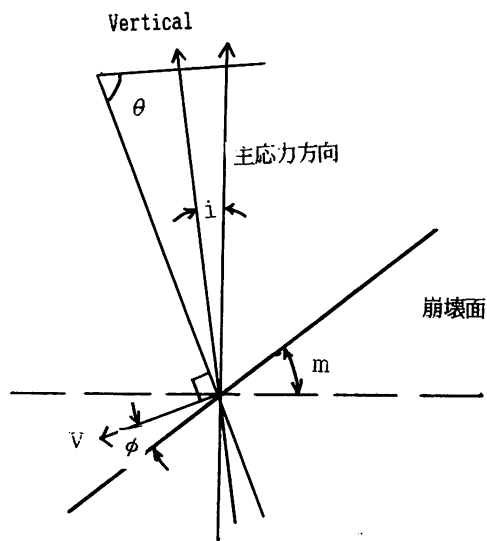


図-1

2-2: 次に不均質異方性の斜面崩壊について述べる。対数螺旋すべり面を仮定した斜面崩壊において層により土の単位体積重量と粘着抵抗が異なる場合次の定義を行なう。

均質土塊: 深さによらず粘着抵抗は一定

不均質土塊: 深さに伴ない粘着抵抗は直線

的に変化する。

等方性土塊: 粘着抵抗の鉛直成分と水平成分の比, つまり粘着抵抗が一定である。 $\kappa = c_h / c_v = 1.0$

異方性土塊: 粘着抵抗の鉛直成分と水平成分が異なる土塊をいう。 $\kappa \neq 1.0$

又, すべての土塊において対数螺旋を用いる場合, 内部摩擦角 ϕ を一定として取り扱うことにしている。

異方性土塊における粘着抵抗には, L_0 の仮定式を用いており, これは鉛直方向から角度 i だけ傾いた主応力方向 (図-2) の粘着抵抗を c_i とおくと鉛直成分・水平成分の粘着抵抗は c_v, c_h であるから次の式のように表わされる。

$$c_i = c_h + (c_v - c_h) \cdot \cos^2 i \quad (7)$$

ここで角度 i は主応力の回転角には関係しないことが L_0 の実験により示されている。さらに角度 i の関係式は鉛直方向から角度 i だけ振った主応力方向に対して垂直に取った面と崩壊面との角度を m と置くことにより, 次の式で設定されている。

$$i = \theta - \frac{\pi}{2} - \phi + m \quad (8)$$

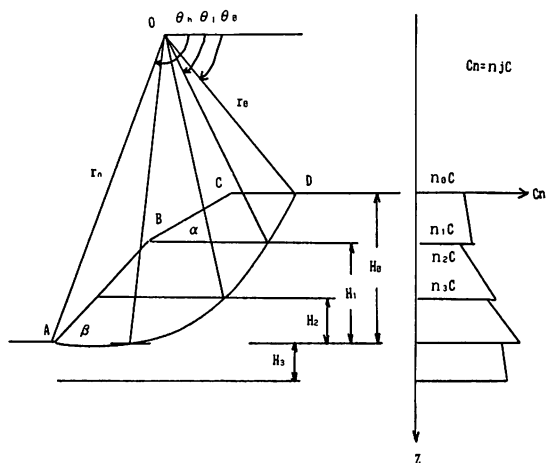


図-2 不均質・異方性斜面モデル
(粘着抵抗が異なる場合)

2-3: 図-1 に示すような層によって粘着抵抗が異なる場合 L_0 の仮定式より次のように示される。

$$c_i = c_h + (c_v - c_h) \cdot \cos^2 i$$

$$= c_h \left\{ 1 + \frac{c_v - c_h}{c_h} \cdot \cos^2 \left(\theta - \frac{\pi}{2} - \phi + m \right) \right\}$$

$$= c_h \left\{ 1 + \frac{1 - c_h/c_v}{c_h/c_v} \cdot \cos^2 \left\{ \theta - \left(\frac{\pi}{2} + \phi - m \right) \right\} \right\}$$

$$= c_h \left\{ 1 + \frac{1 - \kappa}{\kappa} \cdot \cos^2 (\theta + \Phi) \right\} \quad (9)$$

ここで粘着抵抗比 κ より $\kappa = c_h / c_v$

$$\Phi = -\left(\frac{\pi}{2} + \phi - m\right) \text{ とおく。}$$

粘着抵抗は深さにより直線の変化をするとして、角度 $\theta_0 \rightarrow \theta_1$ において、 c_h は $n_0 c \rightarrow n$ 、 c へと変化することになる。ここで n_j は等方土塊における粘着抵抗 c に対する c_h の比である。

$$c_h = n_0 c + \frac{n_1 c - n_0 c}{H_0 - H_1} \cdot (r \sin \theta - r_0 \sin \theta_0)$$

$$= c \left\{ n_0 + \frac{n_1 - n_0}{H_0 - H_1} r_0 (\sin \theta \cdot e^{(\theta - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0) \right\}$$

$$\therefore (c_i)_I = \left\{ 1 + \left(\frac{1 - \kappa}{\kappa} \right) \cos^2 (\theta + \Phi) \right\} \cdot c$$

$$\times \left\{ n_0 + \frac{r_0 (n_1 - n_0)}{H_0 - H_1} (\sin \theta \cdot e^{(\theta - \theta_0) \tan \phi} - \sin \theta_0) \right\}$$

上式は深さに伴う粘着折抗の変化を示す式である。本研究では斜面を数層に分割するため、粘着抵抗の式を次式のように一般化した。

$$\therefore (c_i)_I = \left\{ 1 + \left(\frac{1 - \kappa}{\kappa} \right) \cdot \cos^2 (\theta + \Phi) \right\} \cdot c$$

$$\times \left\{ n_{(2I-2)} + \frac{r_0 \{ n_{(2I-1)} - n_{(2I-2)} \}}{H_{(2I-2)} - H_{(2I-1)}} \times \left\{ \sin \theta_I \cdot e^{(\theta_I - \theta_0) \tan \phi} \right. \right.$$

$$\left. \left. - \sin \theta_{I-1} \cdot e^{(\theta_{I-1} - \theta_0) \tan \phi} \right\} \right\} \quad (10)$$

これにより層ごとに $(c_i)_I$ を用いた消散（逸散）エネルギー量が計算でき、その総和を対数螺旋すべり面の失うエネルギー（消散エネルギー）としている。

2-4: 次に土の単位体積重量が変化する場合 γ は土塊の O 点に関する仕事率に影響を与えることになる。 γ が一定の場合、仕事率の総和に γ を乗するだけであったが層ごとに変化することになるので断面一次モーメントとして計算する時点で γ_i を乗しなければならない。

解析モデルの条件として γ の変化ごとに斜面を数層に分割するわけであるが、図-3 に示すように分割は上部斜面とそれより上の仮空領域の γ は等しいものとして考える。以上により各層ごとに求めた仕事率の和をもって土塊重量の回転中心 O に関する仕事率とする。

斜面を層に分割するに当たり、対数螺旋式を用いた解析式は、一般式として以下のように求め得る。

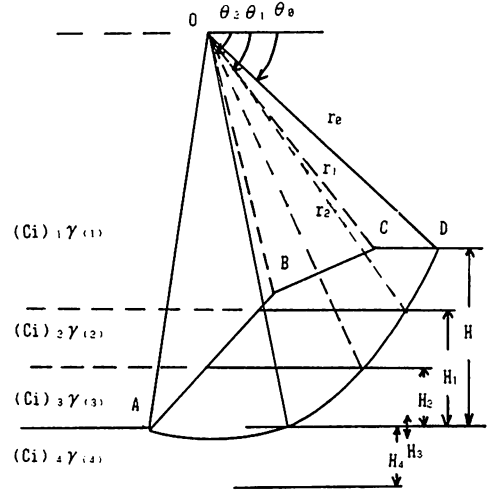


図-3 不均質・異方性斜面モデル
(単位体積重量が変化する場合)

$$r_0 \sin \theta_0 + H - H_{(1)} = r_I \sin \theta_I$$

$$= r_0 e^{(\theta_I - \theta_0) \tan \phi} \cdot \sin \theta_I$$

$$\therefore e^{(\theta_I \tan \phi)} \cdot \sin \theta_I = e^{(\theta_0 \tan \phi)} \left\{ \sin \theta_0 + \frac{H - H_{(1)}}{r_0} \right\} \quad (11)$$

上式において右辺 = A, 左辺 = B と置くと $A < B$ の状態から θ_I を増加させて行って、 $A \approx B$ とした時の θ を求める。これを各層ごとに $\theta_1, \theta_2, \dots$ と求めてゆき、層分割を行った時の仕事率を求める。しかし、この計算は繰り返し計算が非常に多くなる為、プログラム実行時間に大きな影響を与える。

3. 数値解析結果および考察

図-4 に上部斜面角 α の変化による結果を示す。

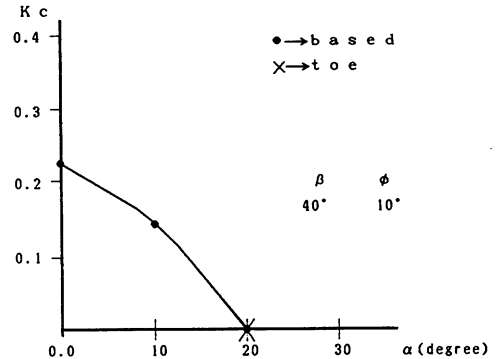


図-4 上部斜面角 (α) の影響

α の角度が大きくなるに従って斜面先崩壊から底部崩壊へと変化し K_c の値が徐々に減少し斜面は不安定へ向かう事を示している。

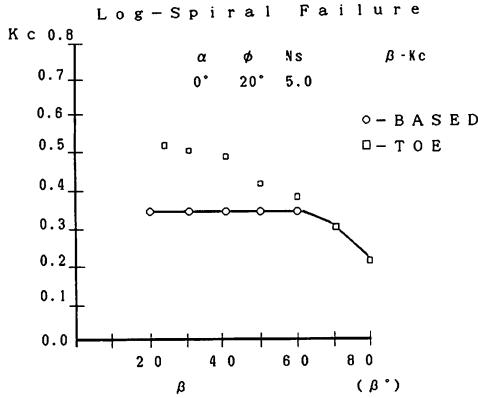


図-5 斜面角 (β) の影響

図-5は増面角 β の影響を示しており、 β が60°の付近で底部崩壊から斜面崩壊に移行しそこから K_c の値は減少しているのがわかる。静的な場合理論的には底部崩壊は斜面角 β が53°より小さい時に起こるが、動的な場合でもやはり β が50°~60°以下で底部崩壊が支配することを示す。

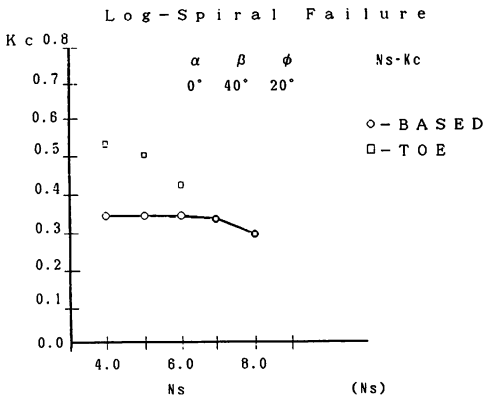


図-6 安定係数 (N_s) の影響

図-6は安定係数 $N_s (= \gamma H / c)$ の影響を示している。 N_s が大きくなるに従い K_c は小さくなる傾向を示している。

図-7は内部摩擦角 (ϕ) の影響を示しているが $\phi = 0.0^\circ$ の時は、円弧すべりとなり ϕ が大きくなるに従い K_c は直線的に増大し斜面は安定に向かう様子を呈している。

図-8および図-9は載荷量 (p) と水平慣性

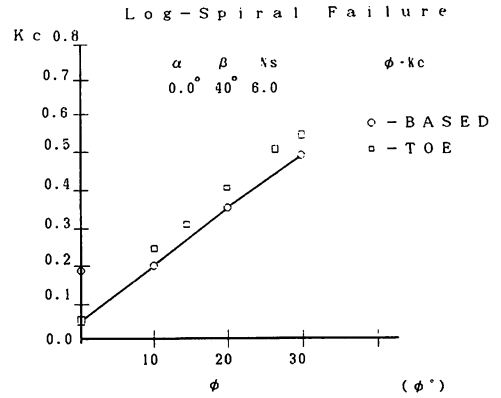


図-7 内部摩擦角 (ϕ) の影響

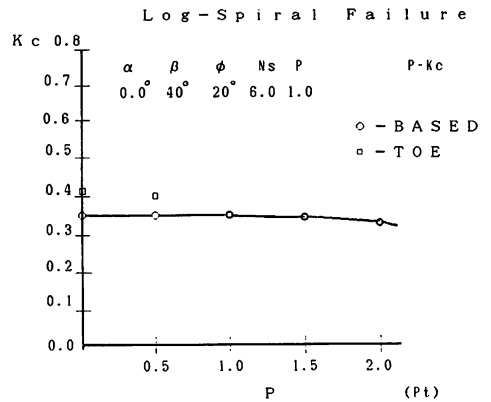


図-8 載荷重 (P) の影響

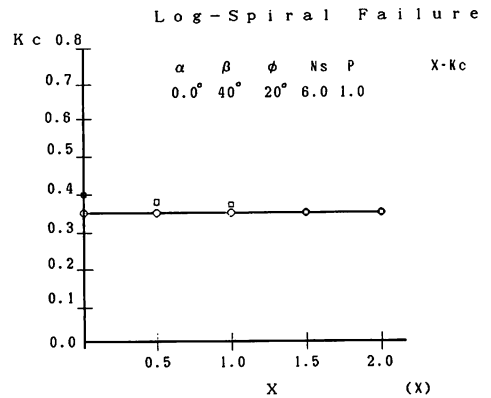


図-9 水平慣性力に関する低減係数 (X) の影響

力に関する低減係数 (x) の影響も示しているが、いずれもほとんど影響がないことを示している。これは解析モデルに加わる p の値を小さいものとして取扱っている為と考えられる。

図-10および図-11に軟弱層を含む層分割した

斜面の解析結果を示す。(a)～(f)とすべり土塊面積が大きくなるに従って限界水平地震加速度係数 K_c の値は大きくなって行く傾向が見られる。本計算例結果のみで定性的な事は述べることは出

来ないが少なくとも大きく斜面が崩壊するには大きな地震加速度が必要であろう。すべり面の深さは斜面先よりわずかに下測に出ているが粘着力 δ の変化は K_c に影響を与えていない。

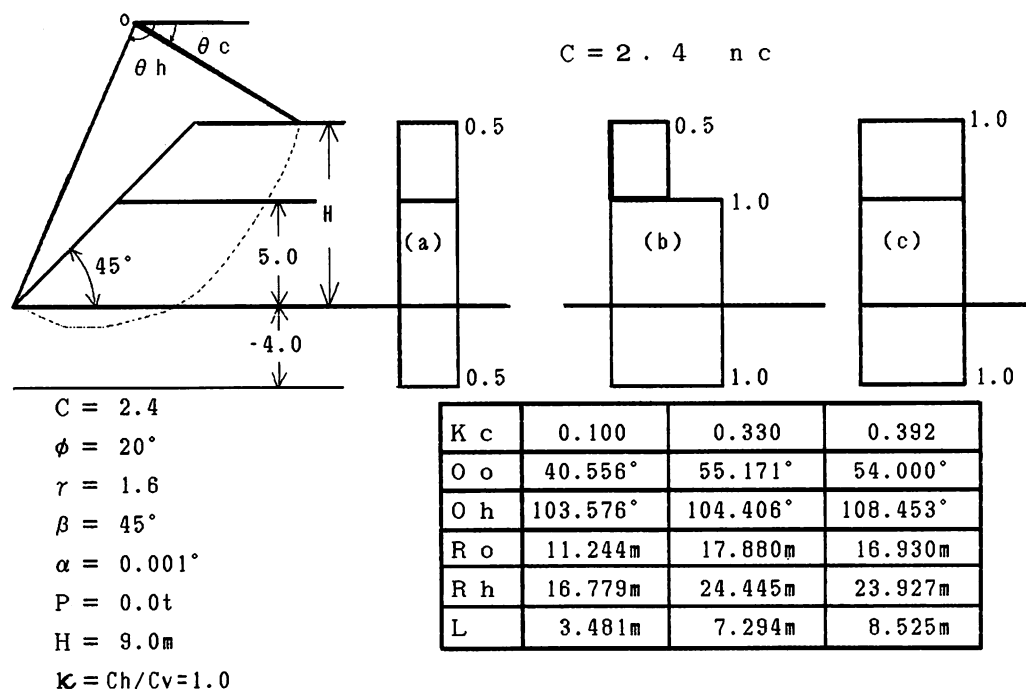


図-10 不均質土塊による影響

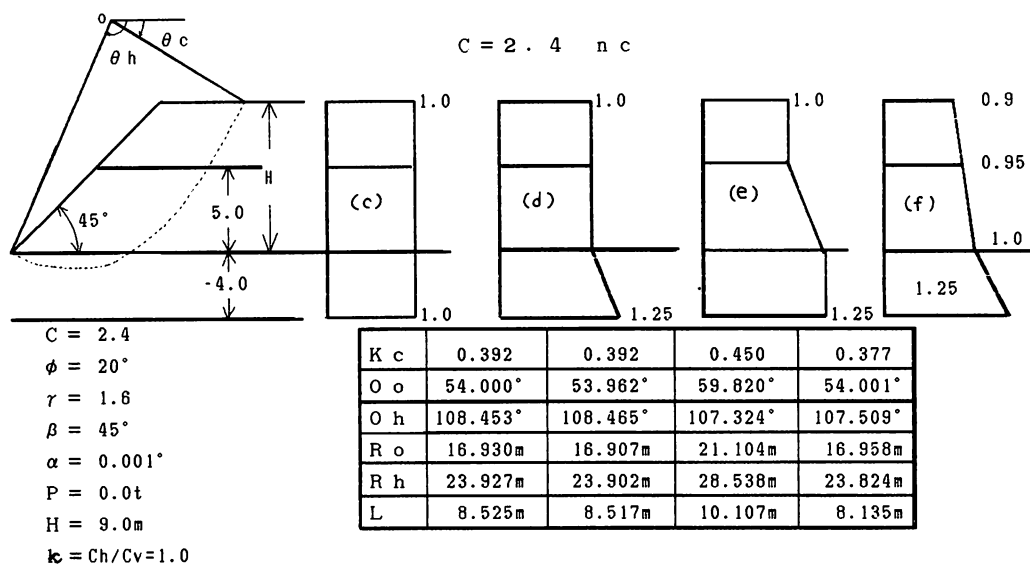


図-11 不均質土塊による影響

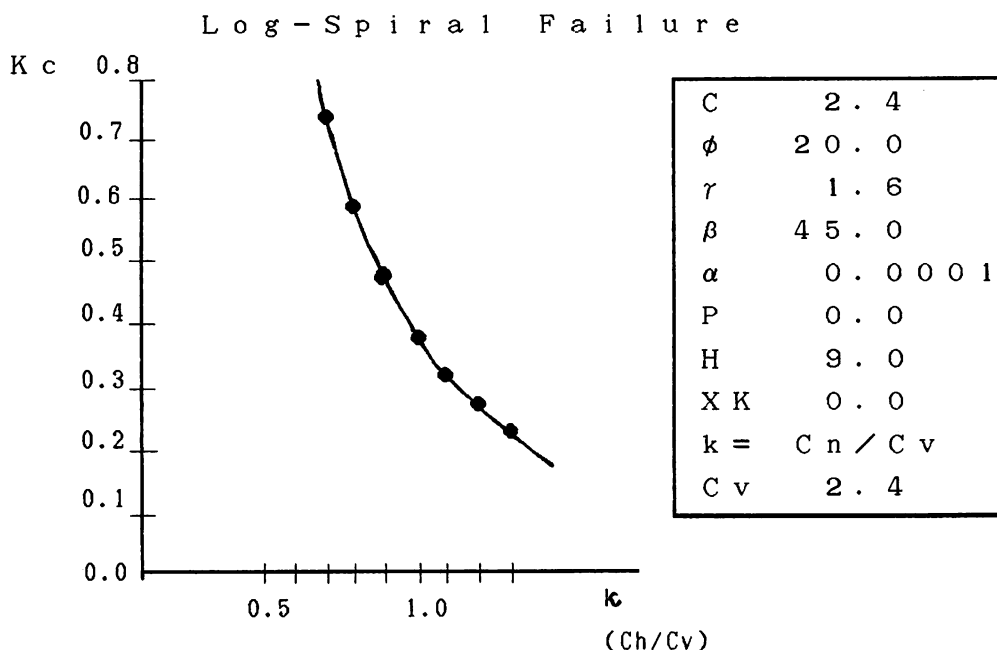
図-12 異方性係数 (κ) の影響

図-12には異方性土として c_v を固定し c_h の値を変化させた異方性係数 (κ) の影響を示したものであり、 $\kappa (= c_h / c_v)$ が大きくなり異方性が進むと K_c の値は減少し斜面は不安定に向かうことを示している。 $\kappa = 1.0$ は等方な土の場合を示す。(10)式の c_i から κ と c_i は逆比例の関係となり、 $\kappa \rightarrow$ 大ならば $c_i \rightarrow$ 小となり $c_i \rightarrow$ 小ならば $K_c \rightarrow$ 小となり図の傾向が得られる訳で粘着力 c_i は異方性係数 κ によって支配される。

4. あとがき

今回の報告は、不均質異方性土からなる斜面の地震時安定解析において対数螺旋崩壊機構の層分割の場合について行ったがプログラムが完全に出て上がっておらず、計算データが少ないため、十分な比較検討が行えなかった。層分割の最適角度の設定に要する計算時間の短縮する問題と併に今後の課題である。

おわりに、計算に協力頂いた室蘭工業大学土木工学科構造力学講座の蹴場一男君、今野敏明君 (S58年度卒) および図の作製に協力頂いた苫小牧工業高等専門学校土木工学科第17期の塩谷賢一君並びに土屋総房君に記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 澤田・能町・Chen, "Evaluation of Yield Acceleration Factor of Earth-slopes by Limit Analysis", 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第18号, 1983, pp. 83-100
- 2) 澤田・能町・Chen, "On Limit Seismic Factor in Nonhomogeneous Anisotropic Slopes", 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第19号, 1984, pp. 73-84.
- 3) 澤田・能町・Chen, "斜面の安定問題における地震時すべり変位について", 土木学会論文集, 第358号, III-3, 1985, pp. 113-118.
- 4) Chen・澤田, "Earthquake-Induced Slope Failure in Nonhomogeneous, Anisotropic Soils", 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 2, 1983, pp. 125-139.
- 5) 澤田・能町, "Stability of Slopes with Anisotropic Cohesion Strength against Earthquakes", THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol. 33, 1983, pp. 417-432.
- 6) 澤田・能町・Chen・高橋, "Evaluation of Limit Seismic Factor in Anisotropic Cohesion Slopes", proceedings of EMD specialty Con-

ference, ASCE, Vol. II, 1984, August, pp. 997-1001.

7) 澤田・能町・松岡・岸, “擬静的解析による斜面上基礎の地震時支持力”, 構造工学論文集, Vol. 31 A, 1985, pp. 503-508.

8) 澤田・能町, “斜面上に置かれた基礎の安定問題—簡易支持力—”, 土質工学会北海道支部

技術報告集, 第26号, 1986, pp. 1-8.

9) 澤田・能町, “地震時を考慮した斜面上に置かれる基礎の安定,” 日本道路会議一般論文集, 第17回, 1987, pp. 100-101.

(平成元年11月30日受理)

