

対数らせり線を用いた斜面上基礎の支持力解析

成田国朝・山口柏樹*

Bearing Capacity Analysis of Foundations on Slopes by use of Log-Spiral Sliding Surfaces

Kunitomo NARITA and Hakuju YAMAGUCHI*

This paper focuses on an extension of the log-spiral analysis of bearing capacity that has been presented in the authors' previous work for strip foundations on the level ground, to those on the top of slopes. Comparisons are made with other analytical and experimental results to examine applicability of the method to practical problems. It is revealed that the log-spiral analysis somewhat overestimates bearing capacity values as compared to other solutions, the errors involved being around 20 percent at maximum and varying sensitively to the angle of internal friction and slope inclination. Also noticed is a relatively good correspondence with experimental results, especially with model tests on clay ($\phi = 0$), on both the ultimate bearing capacity and the shape of sliding surfaces.

1. はじめに

筆者らは前報¹⁾で、すべり線を1本の対数らせり線で表現したときの水平地盤に対する支持力解析法を示し、荷重が偏心・傾斜する場合および根入れ部のせん断抵抗が無視できない深い基礎の場合を含め、支持力解の特性や実際問題への適用性について言及した。これによると、対数らせり線解は従来用いられている理論解や実用公式と全般的にかなり良く対応するとともに、支持力計算における対応定理や重ね合わせ性、更に偏心荷重時のマイヤホフの有効幅の考え方などの有効性を良く説明することが知れた。本研究は、この対数らせり線解析法を斜面上の直接基礎の支持力問題に拡張し、上界値計算や実験値との対応性を吟味しながら、その適用性を議論するものである。

斜面上基礎の支持力問題については、剛塑性論に基づくMeyerhof²⁾、Sokolovski³⁾、更にChen⁴⁾などの理論解析が代表的であるが、解析条件に種々の制約があるため実際問題への適用が必ずしも有効でない。この難点を克服するため、日下部ら⁵⁾はすべり線を2つの直線と対数らせり線で表現する簡明な上界値計算手法を提案し、円弧すべり解やKötter解、更に

実験値との比較を行ってその有用性を確認すると同時に、斜面形状や物性定数を種々変化させて数値計算を実施し、その結果を設計図表の形でまとめている。日下部は後に⁶⁾この上界値計算を、斜面高が小さく底部破壊が想定される場合や非排水強度が深さとともに増加する正規圧密粘土地盤の場合に拡張し、それぞれに対する設計図表を作成している。

斜面上基礎の支持力に関する実験的検討は、後藤ら⁷⁾、内田ら⁸⁾、赤井ら⁹⁾、Shieldsら¹⁰⁾、日下部ら⁵⁾の重力場での室内実験や、遠心載荷装置を用いた齊藤ら¹¹⁾や寺師ら¹²⁾の研究に見られ、それぞれの観点から剛塑性理論解や上界値、あるいは円弧すべり解との対応性を論じている。また最近、山岳地の斜面に施工される段切り基礎の支持力問題が実際的な話題として取り上げられ¹³⁾¹⁴⁾、室内模型実験や現場の大型載荷実験と各種解析値との比較を通じて、この種の基礎の実用的な支持力評価法について検討が進められている。

本研究では、日下部ら⁵⁾が提案した上界値計算との対比を行いながら対数らせり線解の特性を調べ、合わせて各種実験値との比較を通じて実際問題への適用性を言及する。

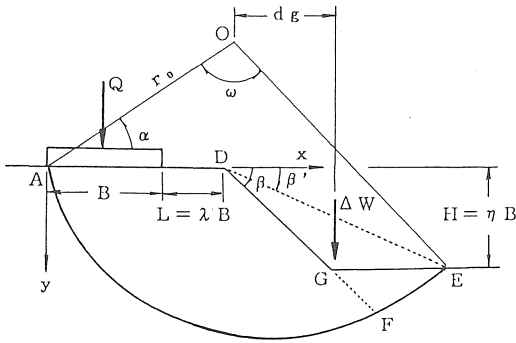


図-2 底部破壊の解析

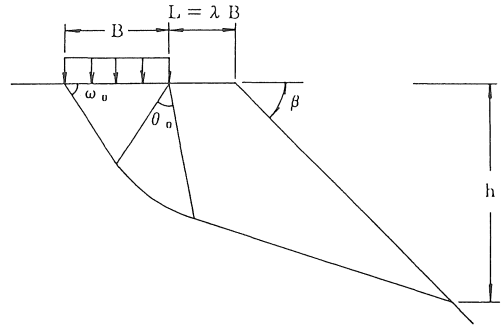


図-3 上界値計算(日下部ら⁵⁾)

て式(4)から $Q\gamma$ を計算すると、これは点Eを通る勾配 β' の無限斜面の支持力計算と等価であるから、 ΔDGE 部分の自重 ΔW に相当する分だけ $Q\gamma$ の過不足を調整する必要がある。この調整支持力 $\Delta Q\gamma$ は右回りのモーメントに対して負の値になり、次式で与えられる。

$$\Delta Q\gamma \times d = -\Delta W \times dg \quad (7)$$

3. 数値計算結果と考察

日下部ら⁵⁾は斜面上基礎の支持力問題に対して図-3に示すような主動クサビと対数ら線域、並びにこれと滑らかに接続する直線塑性域から成る破壊メカニズムを想定した上界値計算を提案し、粘土斜面の支持力実験と比較してその有効性を確かめている。

以下では、この上界値計算との対比を行いながら、対数ら線解の特性や実際問題への適用性を論じることとする。

3.1 他の数値解との比較

表-1は斜面の土質(c, ϕ)と基礎の条件(β, λ)を種々変化させ、基準化した支持力値： $q/\gamma B$ について対数ら線解と他の数値解を比較したものであり、ここでは上の上界値計算と斜面安定解析における簡易Bishop法を用いた解を示した。すなわち、I・II欄では $\beta=30^\circ, \lambda=0$ の場合について $c/\gamma B$ と ϕ による変化を調べ、III・IV欄では $c/\gamma B=1, \phi=30^\circ$ の場合について β と λ による変化を調べている。3つの支持力解を比較すると、ほとんどのケースにおいて対数ら線解が最も大きく、Bishop解がそれに次いで中間的な値を示している。()内に示した上

表-1 上界値及び円弧すべり解との比較

	$c/\gamma B$	ϕ	β	λ	$q/\gamma B$		
					対数ら線	Bishop	上界値
I	25	0	30°	0	107.0 (1.05)	104.4 (1.02)	102.0
	5				21.1 (1.04)	20.8 (1.03)	20.2
	1				3.94 (1.03)	4.03 (1.05)	3.84
	0.5				-	1.92 (1.08)	1.78
II	25	30°	30°	0	449.9 (1.14)	424.7 (1.08)	395.0
	5				92.3 (1.14)	86.3 (1.07)	81.0
	1				20.7 (1.13)	18.6 (1.02)	18.3
	0.5				11.7 (1.14)	10.2 (0.99)	10.3
III	1	30°	15°	0	35.2 (1.22)	29.0 (1.00)	28.9
			30°		20.7 (1.13)	18.6 (1.02)	18.3
			45°		12.1 (1.06)	12.0 (1.05)	11.4
			60°		7.11 (1.01)	8.10 (1.15)	7.06
IV	1	30°	30°	0.5	24.5 (1.15)	21.4 (1.00)	21.3
				1	28.6 (1.17)	24.8 (1.02)	24.4
				2	35.5 (1.18)	31.7 (1.06)	30.0
				4	49.6 (1.19)	48.1 (1.15)	41.7

()内は上界値との比率

界値からの誤差に着目すると、対数ら線解の誤差変動に大きく影響する条件因子は摩擦角 ϕ と斜面勾配 β であり、粘着力 $c/\gamma B$ や斜面肩幅 λ の影響はかなり小さい。

$\phi=0$ の場合は対数ら線が円弧になるから、対数ら線解はBishop解にほぼ一致し、上界値より3~5%大きい程度である。ちなみに、 $\beta=0$ の水平地盤における Nc の比率は $5.52/5.14=1.07$ であり、これが $\phi=0$ の場合の最大誤差になる。一方、 $\phi=30^\circ$ の場合は $c/\gamma B$ 値によらず対数ら線解が上界値より15%程度大きな値を示し、かつ λ 値の増加によって差が若干拡大する傾向が見られる。このとき、 β の増加は支持力値の低下とともに、上界値からの誤差の大幅な縮小をもたらしていることが知れる。

3.2 粘土の実験結果との比較

表-2は日下部ら⁵⁾の実験値と上界値との比較表に対数ら線解を付け加えたものである。実験は練返し後、圧密・成形した関東ロームの傾斜地盤上にジャッキ载荷する形で行われており、载荷速度が大きく非排水破壊が想定されることから、比較計算は採取試料の一軸圧縮強度に基づく $\phi=0$ 解析で進められている。したがって、本解の計算もすべて円弧すべりを対象とすることになるが、前述したように上界値との差は5%を越えることなく、極めて良い対応を示している。これらの計算値に比べて実験値は大略30%程度過大であるが、この理由として日下部らは非排水強度に与える応力状態の相違や実験時の容器と試料間の摩擦の影響が大きいとしている。

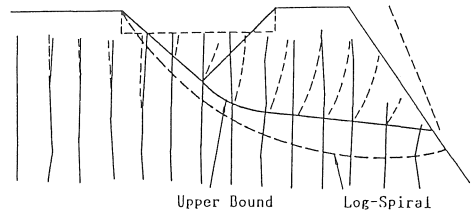
すべり線形状については図-4に代表的な2つのケースについて、実験時の変形パターンと上界値計算のすべり線および本解の円弧すべり線を重ねて示した。上界値計算すべり線の基礎端部から過渡域までは本解のすべり円弧が近接して沿うが、斜面に向かうに従って両者の離れが大きくなる傾向が見られている。

表-2 粘土の実験結果との比較

β	λ	支持力 q : kN/m^2		
		実験値	上界値	対数ら線解
30°	0	28.5	21.5	22.5 (1.05)
	0.5	44.4	40.7	42.9 (1.05)
	1.0	34.4	35.3	37.2 (1.05)
45°	0	32.2	20.7	21.4 (1.03)
	0.5	30.8	27.2	28.2 (1.04)
	1.0	38.3	26.5	27.4 (1.03)
60°	0	34.6	27.5	28.0 (1.02)
	0.5	44.8	33.4	34.0 (1.02)
	1.0	30.3	25.3	25.5 (1.01)

()内は上界値との比

(a) $\beta=60^\circ$, $\lambda=0.5$



(b) $\beta=30^\circ$, $\lambda=0.5$

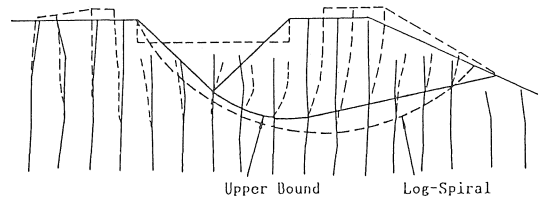


図-4 すべり面の比較 ($\phi=0$)

3.3 砂の実験結果との比較

斉藤ら¹¹⁾は遠心载荷装置を用いて豊浦標準砂の傾斜地盤に対する支持力実験($\beta=25^\circ \sim 35^\circ$)を行い、Shieldsら¹⁰⁾の密な砂斜面($\beta=26.6^\circ$)の実験結果と比較して、対応が非常に良いことを確認している。図-5はこれらの実験値と上界値および対数ら線解との比較を行ったものである。計算は斉藤らの実験との対応を考慮して $\beta=25^\circ$ 、 $c/\gamma B=0$ 、 $\phi=40^\circ, 45^\circ$ の2条件とし、斜面高については $\eta=H/B=2$ を設定して底部破壊を含むものとした。標準砂の摩擦角 ϕ については、斉藤らの実験では模型斜面と同じ間隙比の供試体に対して平面ひずみ試験より $\phi_{\max}=50^\circ$ を得ているが、地盤の平均的な ϕ を考慮する場合は進行性破壊の影響を考慮して若干低減した方がよいという指摘¹⁵⁾があり、その10, 20%減を採用したものである。図によると、両計算値とも斜面肩幅比 λ の増加に伴って $N\gamma$ が急激に増加し、実験値の傾向とずれてくるが、 λ 小なる範囲では定性的にも定量的にも概略良い対応を示していると言ってよい。なお、対数ら線解が $\lambda \cong 1$ を境として折れ曲がりを見せているのは、この付近で破壊パターンの移り変わりが生じているためである。

すべり線形状については図-6に赤井ら⁹⁾の実験結果との対比を示した。この実験は密な標準砂($e \cong 0.65$)に対して $B=9.6\text{cm}$ 、 $\lambda=0$ 、 $\beta=0 \sim 30^\circ$ の条件で4ケース行われており、このうち $\beta=20^\circ$ の

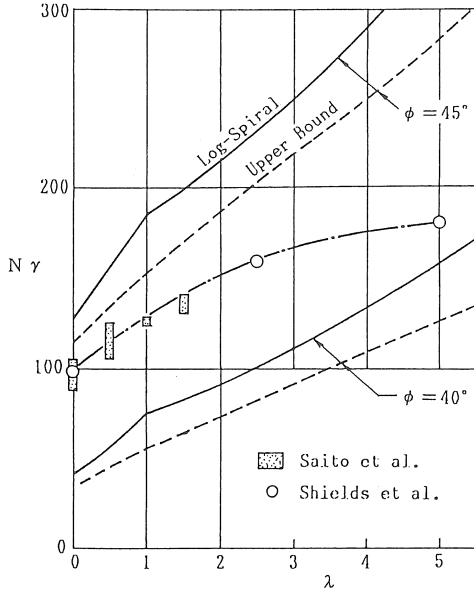


図-5 砂の実験結果との比較

実測すべり線が図中の点線の形状で得られている。赤井らはすべり線形状に関してSokolovskiの理論解との比較も試みており、 $\beta = 20^\circ$ の場合は $\phi = 40^\circ$ の解が最も良く整合し、実測すべり線と極めて近似することを確認している。そこで、 $\phi = 40^\circ$ として求めた対数らせり線解および上界値計算のすべり線を図中に実線と破線で示した。両計算すべり線とも形状的には実測すべり線に類似しているが、すべりの大きさ（深さ）は実際とかなりくい違う結果になっている。斜面表面部では拘束圧が小さいため局部的な破壊が生じ易く、実験ではこれが全体のすべりに影響してすべり線が浅く現われたものと考えられる。

3.4 底部破壊

山下ら^{15),16)}は斜面上基礎の支持力問題について剛体パネモデル (RBSM) を用いた解析を示し、前出の上界値計算や実験値との対応性を調べている。これによると、斜面内破壊に対してはRBSM解と上界値

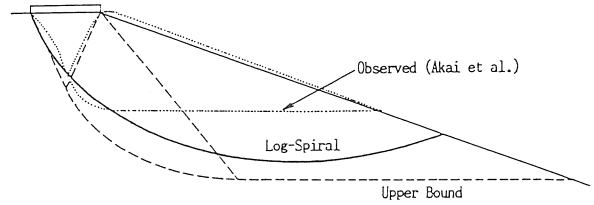


図-6 すべり面の比較 (c=0)

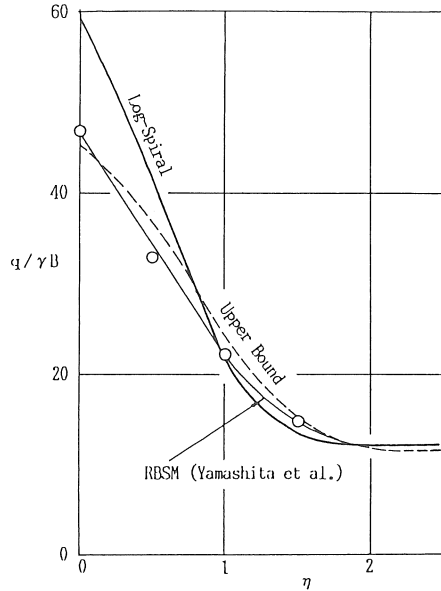


図-7 底部破壊の解

との差は高々3%程度であり、良好な一致が見られたとしている。山下らは更に、斜面高が小さく底部破壊が予想される場合についてもRBSM解析を行っており、その結果は図-7の支持力値 $q/\gamma B$ と斜面高比 $\eta = H/B$ の関係において○印のプロットで示される。図中の実線と破線は、同じ計算条件 ($c/\gamma B = 1$, $\phi = 30^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\lambda = 0$) に対して対数らせり線解と上界値計算を行い比較したものである。これによ

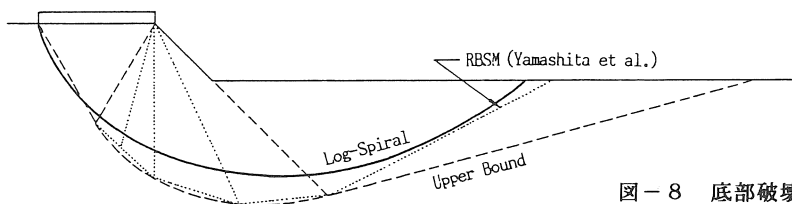


図-8 底部破壊のすべり面

ると3者の大小関係は η の値によって複雑に変化し、一定していない。例えば、対数ら線解は $\eta < 0.5$ ではかなり過大評価の傾向にあるが、 $\eta > 1.0$ では逆に他の2つの解より小さい支持力値を得ている。

図-8は $\eta = 0.5$ の場合について3つの解のすべり線形状を比較したものである。上界値計算のすべり線は過渡域までRBSM解と一致するが、受働域ではかなり遠方に発達し、他の2つの解と合わない。そしてRBSM解が対数ら線解と上界値計算の中間的なすべり形状を与えていることがうかがわれる。

3.5 根入れ効果

基礎が根入れ Df を有する場合は、図-9で根入れ部efghの土重量 ΔW_1 によるモーメントを考慮して支持力値への影響を調べることができる。すなわち、極から ΔW_1 への足の長さを d_1 、根入れに伴う支持力増加を ΔQq と置くと、式(7)と同形のモーメントつり合いより $\Delta Qq = -\Delta W_1 \times (d_1/d)$ を得、これを式(3)、式(4)の Qc 、 $Q\gamma$ に加算して根入れ効果を取り入れられる。具体的には、式(5)に加算すべき ΔQq に対応する正規化支持力として次の表示を得る。

$$\Delta q_1 / \gamma B = -\{ \lambda + (Df/B) \cot \beta / 2 \} \times (Df/B) (d_1/d) \quad (8)$$

図-9は $c/\gamma B = 1$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、 $\beta = 30^\circ$ および 45° の場合について $Df/B = 1$ としたときの根入れ効果を試算したものである。実線は同一の λ 値に対応する根入れ時の支持力 q_1 と、根入れのない場合の

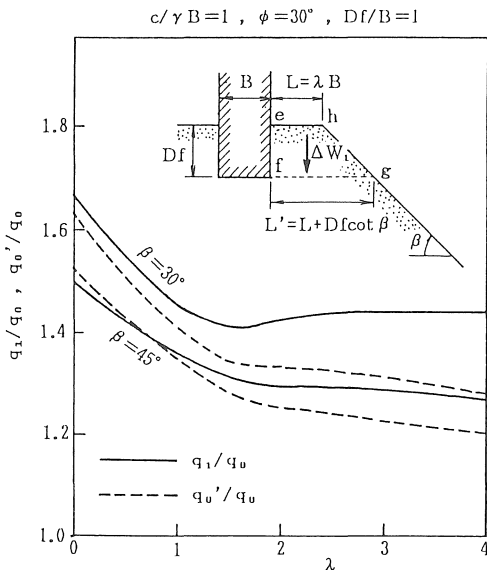


図-9 根入れの影響

支持力 q_0 の比、すなわち根入れに伴う支持力の増加率と λ の関係を表しており、 $\lambda < 約1.5$ の範囲では λ 小なるほど大きな根入れ効果が期待できることが知れる。

図中に示したように、この場合の根入れ効果は根入れ部の抑え荷重としての効果と、根入れに伴い斜面肩幅が L から L' ($=L + Df \cot \beta$)まで拡大することによる支持力増加の相乗作用と考えられる。そこで後者の影響度合いを知るために、根入れのない基礎において斜面肩幅が $L \rightarrow L'$ に変化した時の支持力増加率(q_0' / q_0)を調べたのが図の破線である。これによると、特に λ 小なる範囲で破線はほとんど実線に沿う形で変動しており、根入れ効果の大部分は見掛け上の斜面肩幅の増加に伴うものであることが分かる。なお図には示していないが、根入れの影響を基礎面fg上のサーチャージ荷重 $p_0 = \gamma Df$ に置換える通常の方法と、図-9のように根入れ部の形状を正確に取り入れる方法では、支持力値に5%程度の差しか現われず、実用的には両方法で大差ないことが確かめられている。

4. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- (1) 日下部らが提案した上界値計算や簡易Bishop法を用いた支持力計算に比べ、対数ら線解は最大20%程度大き目の支持力値を与え、その誤差は主に摩擦角 ϕ と斜面勾配 β によって変動する。
- (2) 円弧すべりを対象とする $\phi = 0$ の対数ら線解は他の計算値と極めて良く整合し、その誤差は5%以内に収まる。また粘土に対する実験結果との比較でも支持力値やすべり形状についてかなり良好な対応が見られた。
- (3) 砂斜面の実験結果との対比では、対数ら線解、上界値とも斜面肩幅比 λ が小なる範囲では実験値と概略良い対応を示したが、 λ 大なるにつれ実験値の傾向とずれを生じた。
- (4) 斜面高が小さく底部破壊が予想される場合も対数ら線解は上界値や数値解と良好な対応を示し、斜面高比 η によっては上界値計算より小さい支持力値を与えた。
- (5) 斜面上基礎の支持力における根入れの影響は、見掛け上の斜面肩幅の増加として現われ、これが支持力増加の主たる要因になる。

謝辞：本研究を進めるに当り、宇都宮大学工学部土木工学科の日下部治助教授には貴重な資料の提供を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 成田国朝・山口柏樹：対数ら線すべり線を用いた地盤の支持力解析，愛知工業大学研究報告，NO.23，pp.189-200，1988.
- 2) Meyerhof,G.G.:The Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Slopes, Proc. 4th ICSMFE, Vol.1, pp.384-386, 1957.
- 3) Sokolovski,V.V.: Statics of Soil Media, Butterworths, London, 1960.
- 4) Chen,W.F.: Soil Mechanics and Theorems of Limit Analysis, Proc. of ASCE, Vol.95, SM1, pp.493-518, 1969.
- 5) Kusakabe,O., Kimura,T. and Yamaguchi,H.: Bearing Capacity of Slopes under Strip Loads on the Top Surfaces, Soils and Foundations, Vol.21, No.4, pp.29-40, 1981.
- 6) 日下部治：斜面上直接基礎の支持力評価に関する計算，土と基礎，33-2，pp.7-12，1985.
- 7) 後藤哲雄・香川和夫：帯荷重による斜面の応力・変形とその解析，第9回土質工学研究発表会，pp.629-632，1974.
- 8) 内田一郎・平田登喜男：盛土斜面の上面端部載荷による破壊について，土木学会第30回年次学術講演会，第Ⅲ部門，pp.211-212，1975.
- 9) 赤井浩一・佐野都雄・今堀嘉一：傾斜地面上の基礎の支持力（模型実験），第15回土質工学研究発表会，pp.901-904，1980.
- 10) Shields,D.H., Scott,J.D., Bauer,G.E., and Deschênes,J.H., Barsvary,A.K.: Bearing Capacity of Foundations Near Slopes, Proc. 9th ICSMFE, Vol.1, pp.715-720, 1977.
- 11) 齊藤邦夫・新庄一優・山口柏樹・木村孟：砂斜面上の基礎の支持力に関する基礎的研究，第16回土質工学研究発表会，pp.861-864，1981.
- 12) 寺師昌明・北詰昌樹・中野健二・中村健：斜面上基礎の偏心傾斜荷重下の支持力実験，第21回土質工学研究発表会，pp.1145-1148，1986.
- 13) 齊藤修一・日下部治・萩原敏行・前田良刀・藤原博：斜面上段切り基礎の支持力実験と解析，第22回土質工学研究発表会，pp.1123-1124，1986.
- 14) 前田良刀・上原精治・三上博・日下部治：段切り基礎の大型模型載荷実験（第一報），土木学会第42回年次学術講演会，第Ⅲ部門，pp.48-49，1987.
- 15) 山下清・齊藤邦夫・木村孟：砂斜面上基礎の支持力の極限解析，第17回土質工学研究発表会，pp.693-696，1982.
- 16) 山下清・加倉井正昭・川井忠彦・竹内則雄：新離散化モデルによる斜面の支持力の解析，第16回土質工学研究発表会，pp.853-856，1981.

(受理 平成2年3月20日)