

非線形破壊線を考慮した浅い基礎のすべり線解析と限界状態設計法への展開

九州大学大学院 正会員 小林 泰三 フェロー 落合 英俊  
 正会員 安福 規之 正会員 大嶺 聖  
 岡山県庁 正会員 狩屋 敏行

1. はじめに

現在、基礎の支持力を予測するにあたっては、地盤の粒子破碎や寸法効果、ひずみの局所化などが支持力に著しい影響を及ぼすことが知られており、これらの影響を合理的かつ実用的に考慮する方法が求められている。また、一方で、設計法に関する議論が盛んに行われており、基礎構造物についても性能設計法あるいは限界状態設計法の導入が求められるようになった。本文では、粒子破碎の影響が破壊線の非線形性として現れることに着目し、塑性論の立場からその影響を考慮できる解析法を提案する。また、この方法で得られた極限支持力をもとに、荷重 - 沈下関係を予測する簡便な方法を提示し、日下部<sup>1)</sup>の指摘する「多段極限状態設計法」への展開を図る。

2. 非線形破壊線を考慮したすべり線解析

すべり線解析は、Kötter 式と呼ばれる微分方程式を解くことによって、応力の釣り合い条件と破壊条件を満足する応力場を求めるものである。従来の方法では、計算に入力する強度定数  $c, \phi$  は変形領域で変化せず一様に分布すると仮定しているが、本文では、三軸試験データから得られる破壊線を計算プログラムに組み込み、その非線形性を直接考慮しうる解析手法を提案する。これにより、発揮される強度定数を場所ごとの応力レベルに応じて変化させることができるようになる。

図-1のプロットは、破碎性を有する砂質土の三軸試験結果の一例であり、破壊時の  $s-q$  関係が上に凸な曲線を描くことが分かる。ここに、 $s = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 、 $q = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$  である。また、図中の実線は、これらのプロットに対して次式を用いて近似した曲線（非線形破壊線）である。

$$s_f = \alpha \cdot p_a \left( \frac{p_f}{p_a} + \beta \right)^n \tag{1}$$

ここに、 $\alpha, \beta, n$ : 材料固有の値であり、破壊線の形状を決定するパラメータ、 $p_a$ : 大気圧 (= 101.3kPa) である。

また、式(1)の  $s-q$  関係から、応力レベルに応じた強度定数  $c, \phi$  を次のように定式化することができる。

$$\phi = \sin^{-1} m \tag{2}$$

$$c = \frac{f}{\sqrt{1-m^2}} \tag{3}$$

ここに  $m$  は任意の応力点  $p_f$  における破壊線の接線勾配、

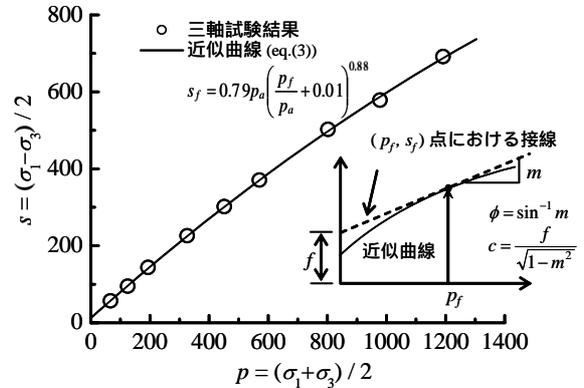


図-1 非線形破壊線と強度定数の決定法

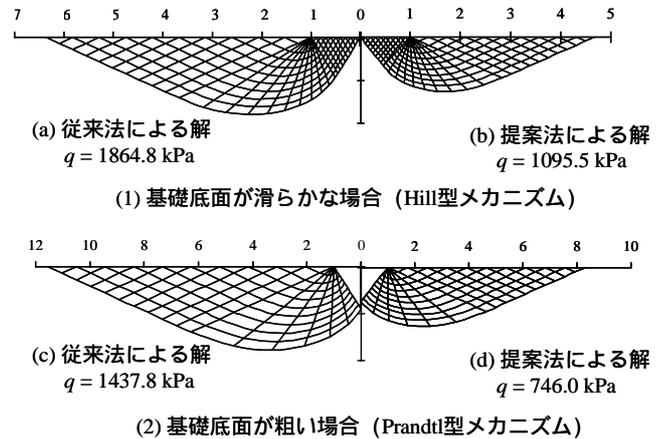


図-2 すべり線網の比較

$f$  はその接線と  $s$  軸の切片であり、両者は次式で表される。

$$m = \alpha \cdot n \left( \frac{p_f}{p_a} + \beta \right)^{n-1} \tag{4}$$

$$f = \alpha \left( \frac{p_f}{p_a} + \beta \right)^{n-1} \left\{ p_a \left( \frac{p_f}{p_a} + \beta \right) - n \cdot p_f \right\} \tag{5}$$

式(1)を近似するプログラムおよび式(2)~(5)を計算するプログラムをすべり線解析に導入することによって、三軸試験結果のデータ群( $q_f, s_f$ )を入力するだけで一連の計算が自動的に行えるようになる。

3. 解析結果と考察

図-2は、図-1で示した三軸試験結果を入力して得られたすべり線網の一例である。これらの図から、提案法は、従来法に比べて小さな破壊領域を与えることが分かる。圧縮性を有する地盤においては、局所的なせん断破壊が

キーワード 非線形、すべり線解析、支持力、限界状態設計法

連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 Tel: 092-642-3285

表-1 極限支持力の計算結果

相対 密度	計算入力パラメータ					上載圧 (kPa)	支持力値(計算値)		
	提案法	従来法					提案法	従来法	
$D_r$ (%)	$\alpha$	$\beta$	$n$	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
豊浦砂	75	0.63	0.08	1.00	0.9	31.5	0	171.9	68.0
	80	0.75	0.27	1.00	21.3	37.9	0	828.0	1063.0
破碎性砂	90	0.79	0.01	0.88	42.0	34.3	0	746.0	1437.8
	95	1.20	0.01	0.75	50.6	33.8	0	1061.9	1635.7
							100	2951.8	3794.2

生じるため破壊領域が小さくなることが知られているが、提案法は、その挙動を合理的に表現しうるものとして期待できる。表-1は、豊浦砂と破碎性砂において、底面の粗い基礎を想定した場合の支持力の計算結果である。この結果から、提案法は、従来法と比べて小さな支持力を与えることが分かる。一般に、通常のすべり線解析は、特に圧縮性を有する材料に対して支持力値を過大評価する傾向にあることが指摘されているが、提案法は、より整合性の高い解を与えるものとして期待できる。

#### 4. 支持力と沈下量と関係

冒頭に述べた多段階限界状態設計法を確立するためには、沈下量に応じた支持力値を予測する必要がある。本文では、基礎の荷重 - 沈下量関係がしばしば双曲線関数で近似されることに着目し、解析値をその関数の収束値として見なすことによって支持力と沈下量を関連づける。本文で用いた双曲線関数は Kondner の双曲線と呼ばれる関数であり、次式で表される。

$$q = \frac{S/B}{a + b(S/B)} \quad (6)$$

ここに、 $q$ ：沈下量に対応した支持力、 $S/B$ ：正規化沈下量（ $S$ ：沈下量、 $B$ ：基礎幅）、 $a$ 、 $b$ ：荷重 - 沈下量関係を決定するパラメータである。なお、 $a$  は次式で与えられる。

$$a = (S/B)_{ref} / q_{ult} \quad (7)$$

ここに、 $q_{ult}$ ：極限支持力（計算値）、 $(S/B)_{ref}$ ：Hirayama<sup>2)</sup>が提案した規準沈下量（ $q_{ult}/2$ を發揮するときの正規化沈下量）である。また、 $b$  は、 $q_{ult}$ の逆数で与えられる。

#### 5. 模型実験による検証

図-3は、式(6)によって描かれる荷重 - 沈下量関係（実線）と室内模型実験で得られた実験値（プロット）である。模型実験は、平面ひずみ条件下を満足するような土槽（高さ×横幅×奥行き：900×900×95 mm）において基礎幅70 mmの鋼製模型基礎を用いて行った。本実験では、豊浦砂と破碎性を有する砂質土の二種類の砂を用いた。

これらの図から、適切な規準沈下量 $(S/B)_{ref}$ を用いることによって、提案法が実際の荷重 - 沈下量関係を表現しうるものであることが伺える。このことは、所望の沈下

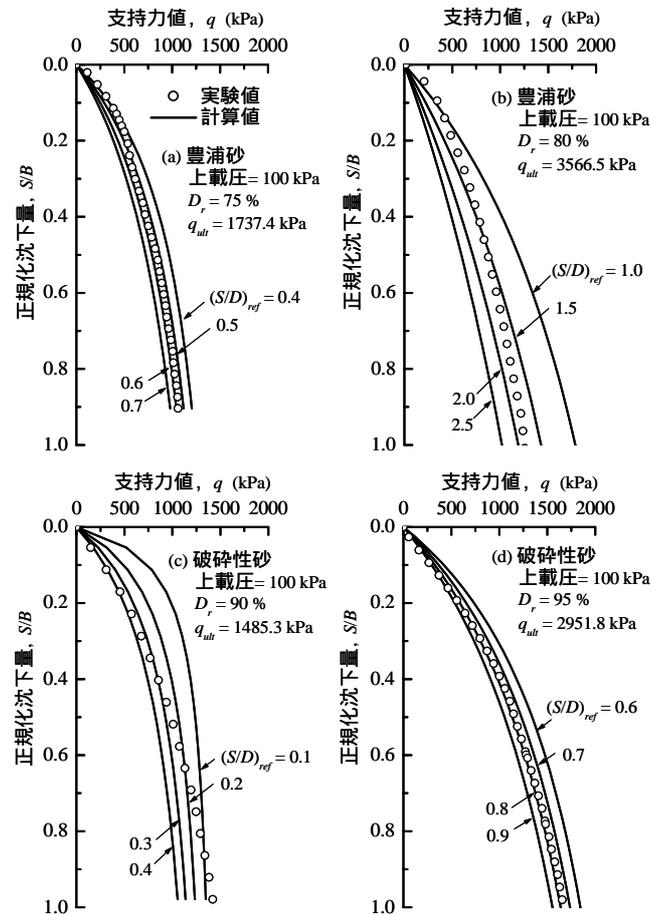


図-3 支持力と沈下量の関係

量に対応する支持力値が予測できることを意味しており、多段階限界状態設計法への展開が大いに期待できる結果といえる。しかしながら、規準沈下量 $(S/B)_{ref}$ を事前に予測する方法が見出せていないのが現状であり、この値の合理的な決定方法の確立が今後の課題として位置づけられる。Hirayamaは、 $(S/B)_{ref}$ を0.25と定めているが、図-3で良好な対応を見せるのはそれ以上の値のようである。現在、著者らは、この値が材料や応力レベルによって異なる値になると考え、三軸試験の応力ひずみ関係などから予測できないか検討中である。

#### 6. まとめ

本文では、基礎構造物の設計の合理化を目指して、すべり線解析を用いた支持力計算を行った。ここではまず、三軸試験結果のデータを入力するだけで直ちに破壊線の内非線形性を考慮した支持力が求められる計算手法を提案した。さらに、その計算結果をもとに、双曲線関数を用いて荷重 - 沈下量関係を推定する方法を提示した。これらの提案が、基礎構造物の限界状態設計法の導入への一助となれば幸いである。

参考文献 1)日下部 治：基礎構造物の変遷に思う、土と基礎、vol.48, No.9, Ser. No.512, pp.1-3, 2000., 2)H. Hirayama: Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.