

III-210 有限変位ひずみ軟化挙動を考慮した岩盤支持力解析

清水建設(株) 土木本部技術第一部 正会員 ○ 川崎 廣貴
清水建設(株) 技術研究所 正会員 渡辺 浩平
清水建設(株) 技術研究所 正会員 傳田 篤
清水建設(株) 土木本部設計部 正会員 中沢 亨

1. はじめに

近年、構造物の大型化に伴い構造物基礎を岩盤上に設置し、その支持力を検討するケースが増えつつある。このような場合、支持力公式や弾塑性有限要素解析等を利用して支持力を求めることになるが、一般に岩石材料はひずみ軟化特性を示すため、この特性を適切に評価しなければ支持力を過大評価してしまう場合が存在する。また、有限要素解析で支持力を求める場合、最大荷重付近では大変形挙動となるため、微小変位仮定の有限要素解析ではその支持力値の妥当性が薄れる可能性も否定できない。したがって、岩盤支持力の検討を行う場合、ひずみ軟化特性と大変形挙動の両者を考慮した解析を行い、その影響の度合いを把握することが重要な問題と考えられる。

本論文は既に提案しているひずみ軟化解析法¹⁾に有限変位理論を組合せ、有限要素法により支持力問題の解析を行ったので、その結果について報告するものである。

2. ひずみ軟化解析法の概要

本ひずみ軟化解析法は一般にアークレングス法と呼ばれている手法であり、変位と荷重間の釣り合い条件にさらに制約条件を付加して荷重レベルを自動的に制御しようとする手法であり、構造安定問題の飛び移り現象・弾完全塑性挙動およびひずみ軟化挙動等の荷重臨界点付近を乗り越えるための解析に利用されている²⁾。

この制約条件には式(1)に示すように増分変位 $\{dU_i^n\}$ と増分荷重 $\{dF_i^n\}$ で表すspherical pathが使用される。なお、図-1にはアークレングス法の概念図を示す。

$$\alpha \{dU_i^n\}^T \{dU_i^n\} + \{df_i^n\}^T \{dF_i^n\} = (l^n)^2 \quad (1)$$

ここに、 α : 変位正規化パラメーター、 $\{dU_i^n\}$: 増分変位 ($=\{U_i^n\} - \{U_0^n\}$)、 $\{dF_i^n\}$: 増分荷重 ($=\lambda_i \{dF^n\} = (\lambda_{i-1} + \delta\lambda_i) \{dF^n\} = \{F_i^n\} - \{F_0^n\}$)、 λ_i : 荷重ファクター、 l^n : 指定弧長半径である。なお、スーパースクリプト n は増分過程のステップ番号、サブスクリプト i は反復過程のステップ番号を表すものとする。アークレングス法を使用した場合の増分変位 $\{\delta U_i^n\}$ は式(2)により計算される。

$$\{\delta U_i^n\} = [\hat{K}_i^n]^{-1} \{\Psi_i^n\} + \delta\lambda_i \cdot \{\bar{U}_i^n\} \quad (2)$$

ここに、 $\{\hat{K}_i^n\} = [K_i^n]^{-1} \{\Psi_i^n\}$ 、 $\{\bar{U}_i^n\} = [K_i^n]^{-1} \{dF^n\}$ である。

さらに、式(2)中の荷重ファクター $\delta\lambda_i$ は式(3)で計算される。

$$\delta\lambda_{i1} = \frac{1}{2z_1} \left\{ -z_2 + (z_2^2 - 4z_1z_3)^{1/2} \right\} \quad (3a) \quad , \quad \delta\lambda_{i2} = \frac{1}{2z_1} \left\{ -z_2 - (z_2^2 - 4z_1z_3)^{1/2} \right\} \quad (3b)$$

$$\text{ここに、} z_1 = \alpha \{\delta \bar{U}_i^n\}^T \{\delta \bar{U}_i^n\} + \{dF^n\}^T \{dF^n\}, \quad z_2 = 2 \left\{ \alpha \left\{ dU_{i-1}^n \right\} + \{\delta \hat{U}_i^n\} \right\}^T \{\delta \bar{U}_i^n\} + \lambda_{i-1} \{dF^n\}^T \{dF^n\} \right\}$$

$$z_3 = \alpha \left\{ dU_{i-1}^n \right\} + \{\delta \hat{U}_i^n\} \right\}^T \left\{ dU_{i-1}^n \right\} + \{\delta \hat{U}_i^n\} \right\} + \lambda_{i-1}^2 \{dF^n\}^T \{dF^n\} - (l^n)^2 \text{ である。}$$

式(3)が実根を持たない場合は釣り合い経路の変化に対して、荷重増分が大き過ぎるか α 値が適切でないことによっている。荷重増分を小さくするかまたは α を大きく調整して荷重増分開始点からリスタートする必要がある。また、実根を持つ場合の $\delta\lambda_i$ の選択は次のようにする。

反復開始時($i=1$)の場合、 $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_{i1}$ ($\{dF^n\}^T \{\delta \hat{U}_1^n\} \geq 0$ の時)、 $\delta\lambda_1 = \delta\lambda_{i2}$ ($\{dF^n\}^T \{\delta \hat{U}_1^n\} < 0$ の時)である。

反復過程($i \geq 2$)の場合、式(3)の各 $\delta\lambda_i$ に対して内積 $y = \{dU_{i-1}^n\}^T \{dU_i^n\}$ を計算しその大きい方の $\delta\lambda_i$ を選択する。

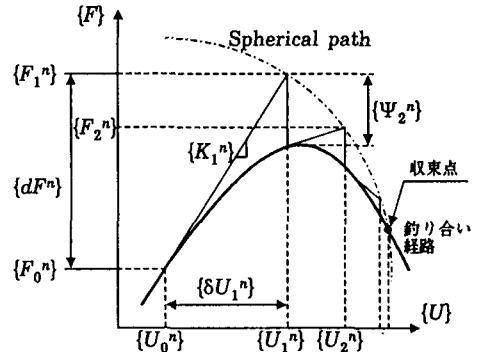


図-1 アークレングス法の概念

3. 解析結果

剛な円板基礎を仮定し図-2に示すように軸対称問題として有限要素分割し、載荷面半径は $r=15\text{m}$ の条件で解析を行った。支持岩盤の弾性定数は $E=2,000\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.3$ とした。降伏条件式は、Drucker-Prager則を仮定し次のように表す。

$$f = \frac{\sqrt{3}}{1 - \sqrt{3}\alpha} (\alpha I_1 + \sqrt{J_2}) = k \quad (4)$$

ここに、 I_1 は応力の第1不変量、 J_2 は偏差応力の第2不変量、

$$\alpha = \frac{\sin\phi}{(9 + 3\sin^2\phi)^{1/2}}, \quad k = \frac{3c\cos\phi}{(9 + 3\sin^2\phi)^{1/2}} + H' \cdot \bar{\epsilon}^p \text{である。}$$

ただし、ひずみ軟化後 $k < 0$ となった場合は $k=0$ とし、粘着力 c は 5kgf/cm^2 、内部摩擦角 ϕ は 20° を使用した。

解析ケースは有限変位モデルと微小変位モデルおよび H' と塑性ポテンシャルに用いるダイレイタンス角 ψ の組合せで表-1に示す6ケースとした。なお、有限変位理論は Total Lagrangian 型で定式化を行った。

解析結果の荷重 p ～沈下 δ 関係を図-3に示す。また、図中にはTerzaghiの支持力公式(局部せん断破壊)から求められる極限支持力($q_u=51.4\text{kgf/cm}^2$)も示した。図-3より、有限変位の影響を受けるのは沈下 $\delta > 0.5\text{m}$ ($\delta/B > 1.7\%$)の状態となった場合であり、有限変位を考慮したケース2はTerzaghiの極限支持力とほぼ一致している。ひずみ軟化を考慮したケース3,6の限界荷重は各々26.5、21.0 kgf/cm^2 となり、Terzaghiの極限支持力の52%、41%となった。したがって、岩盤の支持力を評価する場合はひずみ軟化特性を考慮することが極めて重要なポイントになると考えられる。

図-4には、変形挙動を比較する意味でケース5,6の変形モードを示す。ひずみ軟化を考慮したケース6では基礎近傍でパンチングシアの局部破壊的な変形が発生しているのわかる。

4. あとがき

ひずみ軟化解析法と有限変位理論を組合せ、支持力問題の数値解析を行った。その結果、Terzaghiの極限支持力に比較し、有限変位ひずみ軟化を考慮した支持力値はかなり小さい値となることがわかった。今後は本解析手法を基に種々の検討を進めて行く予定である。

最後に、本研究を行うにあたっては京都大学足立紀尚教授に御指導を頂いたことを記して感謝いたします。

参考文献

(1) 川崎 廣貴・中沢 亨・傳田 篤・渡辺 浩平: 岩盤におけるひずみ軟化挙動の解析法, 第22回土質工学研究発表会, 1987-6.

(2) M.A.Crisfield, "Overcoming Limit Points with Material Softening and Strain Localization", Numerical Methods for Nonlinear Problem, Pineridge Press, Swansea, Vol.2, pp244~277, 1984.

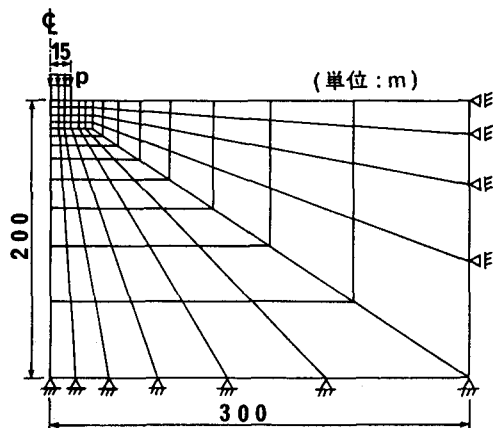


図-2 軸対称有限要素モデル

表-1 解析ケース

	微小 変位	有限 変位	$\Phi(^{\circ})$	$\Psi(^{\circ})$	H' (kgf/cm^2)
ケース1	○	—	20	20	0
ケース2	—	○	20	20	0
ケース3	—	○	20	20	-200
ケース4	○	—	20	0	0
ケース5	—	○	20	0	0
ケース6	—	○	20	0	-200

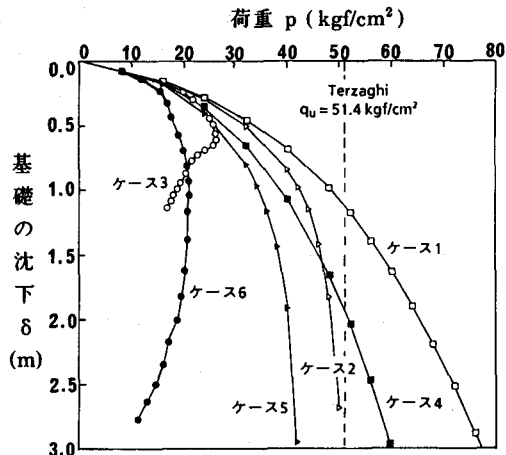
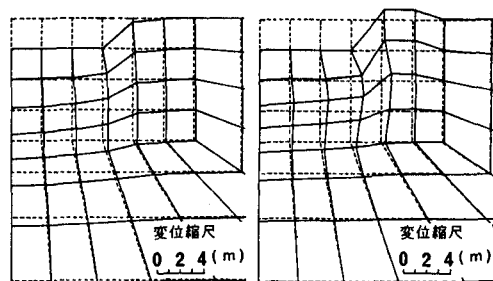


図-3 荷重・沈下曲線



(a) ケース5

(b) ケース6

図-4 変形モード