

地盤構造物の破壊後終局変形に関する研究

佐賀大学 学生員 ○森 省吾
 佐賀大学 正 員 荒牧 軍治
 佐賀大学 正 員 古賀 浩二
 佐賀大学 学生員 今村 敬

1. はじめに

阪神・淡路大震災においては橋梁、ビル等の構造物ばかりでなく、岸壁、盛土、堰堤等の地盤一構造物系にも大きな被害が発生した。橋梁及び建築構造物においては終局強度ばかりでなく、破壊後の変形量も塑性率の考え方をを用いて設計に取り入れているが、地盤構造物は破壊後の変形まで考慮した設計は行われていない。しかし、阪神淡路大震災における岸壁、堰堤等の破壊が上部構造物における崩壊に近いものであったことから、土構造物の破壊後における終局変形に関する研究の重要性が認識されるようになってきた。土構造物の崩壊後の最終変形は弾塑性有限要素法に有限変形理論を導入することにより求めることができる。

本研究は、斜面、盛土等の地盤構造物の破壊後における終局変形を求める第1歩として、通常の弾塑性有限要素法に佐賀大学後藤教授が提案し構造物の有限変形計算に大きな成果を挙げている接線剛性法を導入して、塑性変形後の安定形状を求めようとするものである。

2. 接線剛性法

後藤が提案した接線剛性法は右図のように説明されている。すなわち、全ての力学問題は、図-1に示す4象限における節点変位-要素変形（2次元棒の場合は部材の伸び、以下同様）関係、3象限は要素変形-要素力（軸力）関係、2象限の要素力-節点力関係をすべてみだす解を求めることである。材料及び幾何学的線形問題を取り扱う場合は1象限の節点力-節点変位関係式（剛性方程式）を陽に書くことができるが、いずれかの関係が非線形であると仮定すると、一般的には剛性方程式を陽に示すことはできない。後藤は接線剛性方程式と厳密な3関係式を用い不釣り合い力を載荷することにより厳密な有限変形を求める方法を提案した。本研究においては有限変形理論として接線剛性法を用いることとする。

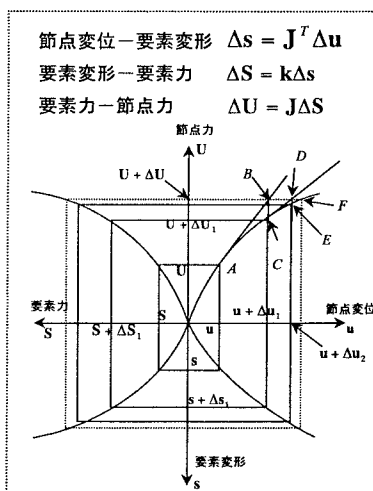


図-1 接線剛性法概念

3. 有限要素

後藤は連続2次元問題用いる線形3角要素の要素力として図-2に示す辺長力を用いることを推奨している。辺長力増分と辺長の増分との関係（要素力-要素変形関係式）は次式で与えられる。

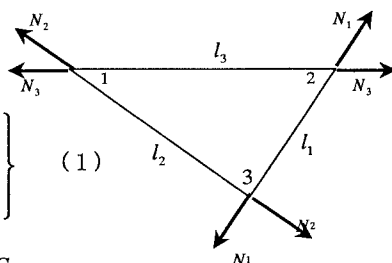


図-2 有限要素の要素力

$$\begin{aligned} \text{ここに} \quad \begin{Bmatrix} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta N_3 \end{Bmatrix} &= \frac{1}{4A} \left\{ \mu \begin{bmatrix} l_1^2 & -l_1 l_2 & -l_1 l_3 \\ -l_1 l_2 & l_2^2 & -l_2 l_3 \\ -l_1 l_3 & -l_2 l_3 & l_3^2 \end{bmatrix} + \kappa \begin{bmatrix} S_1^2 & S_1 S_2 & S_3 S_1 \\ S_1 S_2 & S_2^2 & S_2 S_3 \\ S_3 S_1 & S_2 S_3 & S_3^2 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{Bmatrix} \\ S_i &= \frac{a_i^2 - c_i d_i}{a_i} \quad \lambda = K_{vol} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \\ \kappa &= \lambda + 2\mu \end{aligned}$$

4. 接線剛性方程式

後藤が提案した接線剛性方程式は次式のように材料剛性と幾何剛性が分離されている。

$$\Delta U_1 = \{K_0 + K_G(S)\} \Delta u_1 \quad (2)$$

K_0 は材料剛性 $K_G(S)$ は幾何剛性

接線剛性の具体的表現については参考文献を参照して欲しい。

5. 材料非線形モデル

地盤の材料非線形を示すモデルは数多く提案され、圧密解析、地盤構造物系の解析等に大きな成果を挙げている。本研究は、地震時及び液状化後の最終変形形状を求めることを目的としているので、道路橋仕方書が地盤解析のモデルとして考えているいくつかのモデルの中で図-3に示すバイリニアモデルを採用した。地盤要素は降伏せん断ひずみ γ_y までは弾性を示し、その点を超えるとせん断弾性定数のみが低減し、体積弾性係数は変化しないものとした。

6. 解析手順

有限変形を考慮した弾塑性解析の流れを図-4に示す。接線幾何剛性を含む剛性方程式を作成し（図内：1象限の解析）、節点変位が求まると要素変形（4象限の解析）は幾何学より正確に求まる。要素力の算出計算において材料非線形モデルを用い（3象限の解析）、全体座標系における節点力（2象限の解析）より不釣り合い力を求めて、再度接線剛性方程式を解く。この有限変形のプロセスを不釣り合い力が許容範囲内になるまで継続する。解析プログラムにおいては載荷荷重を分割し、荷重載荷過程の変形及び応力が求まるようにしている。

7. 解析例

解析例として遠心力試験に用いた斜面モデルについて解析を行った。実験に用いた材料は有明粘土であり、内部摩擦角はゼロと仮定できる。重力加速度を次第に増加することにより、遠心力加力実験を再現した。図-5は塑性状態になる要素が連続し、不安定になる直前の変形と塑性状態になった要素（○印）を示したものである。法先が局所的に盛り上がり、円弧すべり的な変形を起こしていることが観察できる。この変形図は倍率の増加を行わず座標値の変化を示したものであるので、大きな変形状態にあることが理解できる。ただし、計算はこの直後に不安定となり、当初の目的である崩壊後の最終形状は現時点では得られていない。現在、終局変形を安定的に求める手法を検討中である。

8. 参考文献

後藤茂男他：

要素分離の手法による構造物の幾何学的非線形解析

構造工学論文集 Vol.37A, pp.315-328, 1991

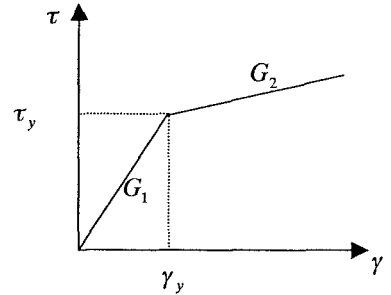


図-3 バイリニアモデル

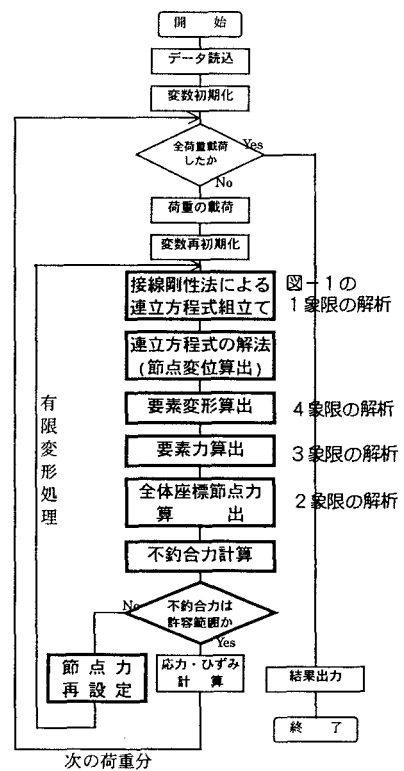


図-4 解析流れ図

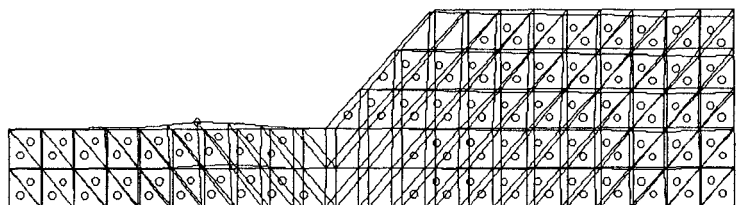


図-5 解析例（斜面すべり問題）