

ジョイント要素を併用した弾塑性有限要素解析について

○ 金沢大学工学部 正員 近田康夫
 金沢大学工学部 正員 城戸隆良
 金沢大学工学部 正員 小堀為雄

1 はじめに

土木構造物を対象とした有限要素法による構造解析において、不連続面を扱うにはジョイント要素と総称される特殊要素（接合要素）を用いる場合が多い。このジョイント要素は、基本的には Goodman らの提案したジョイント要素あるいはその改良モデルを用いている場合が多い¹⁾⁻²⁾。ジョイント要素が表現する境界面の挙動は、境界面における剝離、滑動現象であるが、数値解析的には応力分配法（応力遷移法）³⁾あるいは初期応力法⁴⁾と呼ばれる方法によって、剝離あるいは滑動の発生にともなう応力の解放を行っている。

一方、地盤の降伏や、コンクリートの破壊などを対象とした弾塑性解析では、ジョイント要素を用いずに、ソリッド要素に非線形構成則を適用することが多いが、応力開放の手法としてここでも応力分配法が適用される場合が多い。ジョイント要素を用いた有限要素解析ではジョイント要素のみが非線形挙動をし、ソリッド要素は線形挙動のみである場合も多いが、ジョイント要素はもちろん、ソリッド要素も非線形挙動を考慮する場合、どちらも応力開放に応力分配法を適用することが多いことからプログラミングを行う上でもこれらを安易に重ね合わせた形のプログラムになりがちである。しかし、応力分配法をジョイント要素、ソリッド要素の両者に同時に適用して応力開放を行うと後述するように不合理な結果を生じる可能性が高い。本報告では、このようなジョイント要素と弾塑性挙動を考慮したソリッド要素で表現される系の有限要素解析における応力分配法による応力開放のアルゴリズムに関して若干の考察を行ったものである。

2 応力解放

ジョイント要素あるいは非線形ソリッド要素を用いた有限要素解析では、応力分配法がよく用いられる。非線形関係を、

$$\epsilon = \epsilon(\sigma) \quad (1)$$

の形で与え、

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_0 \quad (2)$$

なる線形関係に置換して、不平衡力

$$\int_V \sigma_0^T dV \quad (3)$$

を Eqs.(1), (2) の比較から求められる ϵ_0 の変化が充分に小さくなるまで、補正を繰り返すことで解を得る。

3 ジョイント要素と非線形ソリッド要素の併用

ジョイント要素と非線形ソリッド要素は、それぞれ、単独で使用した場合には上で述べた応力分配法を用いて解析することが多いので、これらを併用した場合にもプログラミング上は両者を単に物性の異なる（異なる構成則に従う）材料として取り扱ってしまう場合がある。しかし、鋼材料とコンクリート材料の組み合わせ等とは異なり、ジョイント要素を単に別の構成則に従う材料として取り扱うと明らかに不合理な結果を得ることがある。以下に例を通じて説明する。

図 1 に示すように、Tension-cut を伴う Mohr - Coulomb の降伏条件に従うような引っ張り強度がほとんど無い材料のベース中に異なる材料の鉛直層があり、これらの境界面にジョイント要素が挿入されている解析モデルを考える。これは、杭-地盤系を平面問題としてモデル化した場合に相当するといえよう。

図 1(1) はジョイント要素を用いない場合、図 1(2) はジョイント要素を用いて、ソリッド要素と同時に降伏の判定をした場合、図 1(3) はソリッド要素の応力解放をまず行ってその後ソリッド要素の応力解放を行った場合の結果である。

う。もちろんジョイント要素にも引っ張りが生じているので剝離のための応力解放を行うが、ソリッド要素の方も、降伏に対応した応力を解放してしまう。こうして前節で述べた応力開放のための反復計算過程においてジョイント要素、ソリッド要素双方での応力解放が行われ、最終的な結果はジョイント要素を用いずに解析した結果とほとんど同じになってしまう(図 1(1) および (2))。しかし、この解析で想定しているのは、図 1(3) に示すようにジョイントが剝離し、先に述べた加力方向と逆側のソリッド要素にはほとんど引っ張り応力は生じず、したがって降伏もしていない状態である。

図 1(3) の結果を得るためには、ある荷重段階での反復過程において、まずジョイント要素のみに対して、剝離、滑動などの判断を行い必要な応力開放を行う、その後ソリッド要素に対する降伏の有無を判断させる。すなわち、2 段階の応力開放過程をとるのである。ソリッド要素の応力開放にともなって、新たに剝離あるいは滑動を生ずるジョイント要素もあると考えられるが、反復計算の初期段階と異なり系の変形はほぼ落ちついているので、開放すべき残差力自体が余り小さくなくその影響は小さいと考えられる。

4 結 言

応力分配法による応力解放を採用した場合のジョイント要素を併用した弾塑性有限要素解析の応力解放アルゴリズムに関して若干の考察を行った。限定した例題に対する検討ではあるが、ジョイント要素を併用した弾塑性解析において、陥りがちなプログラミング上の問題であろう。

参 考 文 献

- 1) Goodman, R.E. R.L.Taylor and T.L.Brekke : " A model for mechanics of joint rock", Proc.of ASCE, vol.94, SM3, pp.637 ~ 659, 1968.
- 2) Mahtab, M.A. and R.E.Goodman : "Three dimensional finite element analysis of jointed rock slopes", Proc.2nd Cong. ISRM, BELGRADE, Vol.3 paper 712, pp.353 ~ 360, 1970.
- 3) Zienkiewicz, O.C., S.Valliappan and I.P.King : "Stress analysis of rock as a 'no tension' material", Geotechnique, Vol.18, pp.56 ~ 66, 1968.
- 4) Zienkiewicz, O.C., Valliappan, S. and King, I.P. : "Elast-plastic solutions of engineering problems 'initial stress', finite element approach", Int.Jour. for Numerical Methods in Engineering, Vol.1 pp.75 ~ 100, 1969.

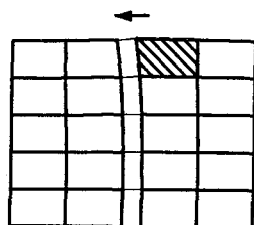


図 1(1) ジョイント要素を使用しない場合

ソリッド要素が降伏して大きく変形している(斜線部)。いわゆる、no-tension 解析結果である。

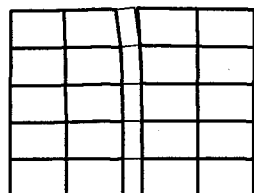


図 1(2) ジョイント要素、ソリッド要素で同時に応力解放を行った場合

応力解放の初期の段階でソリッド要素も応力解放を行ってしまうためジョイントの開きは殆どなく不自然な結果となっている。

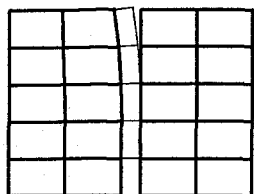


図 1(3) ジョイント要素の応力解放をはじめに行なった場合

ジョイント要素の応力解放を終了してからソリッド要素の降伏判定をするので剝離側のソリッド要素は降伏していない。