

新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析 (その1)

— 引っ張りに抵抗しない材料の解析 —

Limit Analysis of Soil and Rock Foundation by Means of New Discrete Models
(1st Report) — An Analysis of a No-Tension Material —

竹内 則雄*・川井 忠彦*

Norio TAKEUCHI and Tadahiko KAWAI

1. はじめに

一般に土や岩盤等は引張りに弱く亀裂が入り易い。従って引張応力が生じた部分では、いわゆる“ゆるみ”のような現象が生じていると考えられる。有限要素法でもこの様な点に着目して多くの解析法が試みられてきた。中でも、O. C. Zienkiewicz¹⁾らによって開発された stress-transfer 法と呼ばれる方法は収束性も良く、また始めに作成した剛性行列に基づく計算法であるため計算時間も早い。しかし、この方法はあくまでも土や岩盤を連続体として取り扱う方法であり、細い亀裂等の不連続性は考えておらず、実際の土や岩盤の挙動を適確に表し得るとは言い切れぬうらみがある。

本研究は、川井^{2),3)}によって考えられた新離散化モデル(RBSM)を用いて引張りに抵抗しない材料の解析に対する一つの解析法を提案する。この方法によれば、始めに設定した自由度を変えずに引張クラックの導入が可能となる。

2. No-Tension 法

従来有限要素法に用いられてきた stress-transfer 法を RBSM モデルに適用する場合から始める。図2・1に解析の流れを簡単に示す。有限要素法と同様に以下の3つの段階からなっている。

(第1ステップ)

与えられた構造を弾性体とみなし応力を求める。このとき初期応力が存在すれば計算された応力を加え合わせてこの段階の応力とする。

(第2ステップ)

前回の応力の中で許容値以上の引張応力が生じた場合、構造が変化しないようにして応力を除去する。この段階でつり合いを保つために拘束が加えられる。

(第3ステップ)

このような拘束力は実際に存在しないので、これと

等大異符号の節点力を構造に加える。ただし、拘束を除く力を作用させるときは構造は弾性的に挙動するものとする。

第2ステップと第3ステップを引張応力が無視できるまで繰り返す。

この方法によれば、収束性が保証されしかも初期応力が存在しても解析可能であり、計算時間も早い。

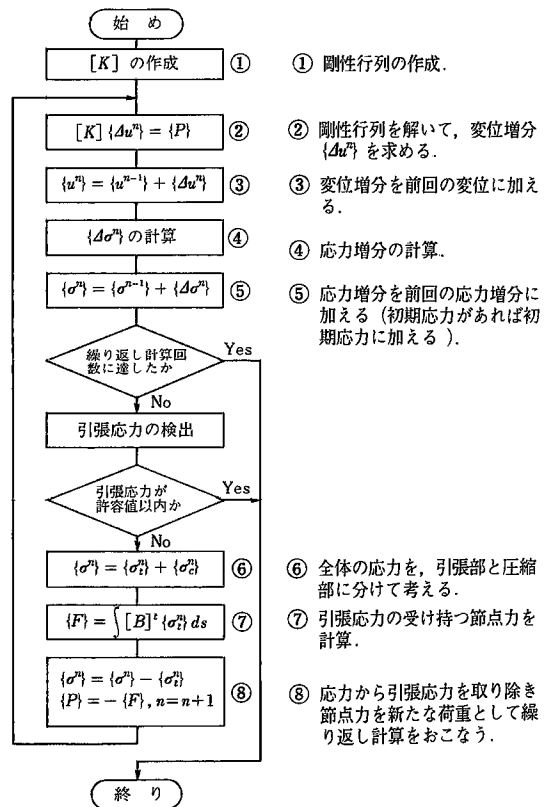


図2・1 No-Tension 解析のフローチャート

*東京大学生産技術研究所 第2部

3. Tension - Crack 法

2節で説明した No-Tension 法はクラックの発生を無視し、あくまでも連続体的な発想のもとに考えられた方法である。従って、粒状体の集合をこの方法により解析した場合、まったく異なった挙動を示す。また、接触問題への適用は困難である。

ところで、RBSM では重心の剛体変位 (u, v, θ) をパラメーターとしているため、有限要素法のように節点が連続でなければならないという強い条件が付いていない。従って、許容値以上の引張応力が作用した場合にその辺を通して力の伝達が無い (圧縮力は伝達する) という操作をほどこすのは簡単である。著者らはこの利点を生かして図3・1に示す流れの解析法⁴⁾を提案した。この方法は大きくは次の4ステップからなる。

(第1ステップ)

与えられた構造を弾性体とみなし応力を求める。こ

のとき、初期応力が存在すれば計算された応力を加え合わせてこの段階の応力とする。

(第2ステップ)

前回の応力の中で許容値以上の引張応力が生じた場合、そのうちの最大のものを取り出し、解放力を与えバネを切断する。

(第3ステップ)

第2ステップで与えられた解放力を基に弾性計算を行い、再接触のチェックを行う。もし再接触が無ければ第1ステップへもどる。再接触がある場合には第4ステップへ行く。

(第4ステップ)

第3ステップで再接触するバネの相対変位が零となるような倍率 r_{min} を $(n-1)$ ステップ目の相対変位と $(n+1)$ ステップ目の相対変位を用いて求め、得られた応力の r_{min} 倍の応力を今回の応力とする。その後、そのバネを復活させ、 $(1-r_{min})$ 倍の解放力を用

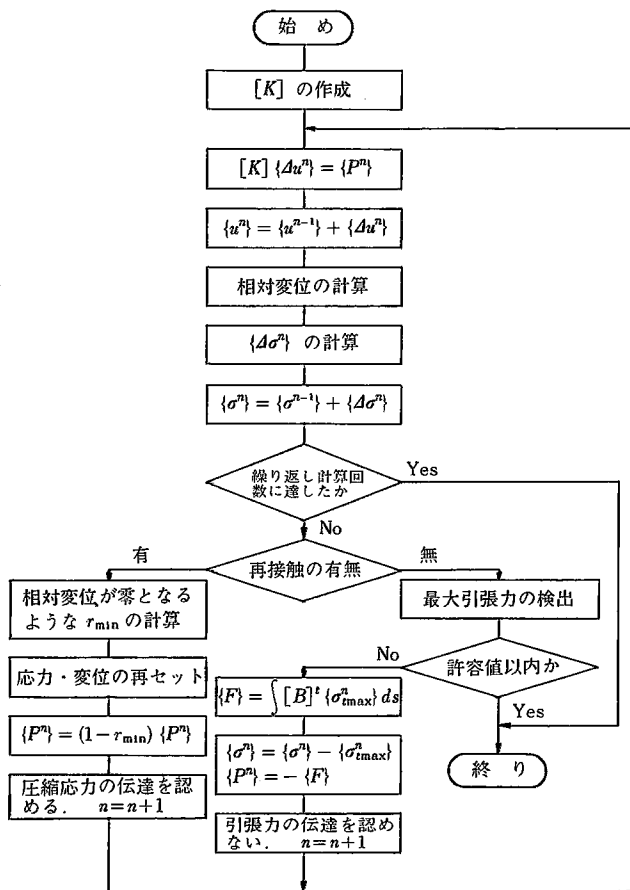


図3・1 Tension-Crack 解析のフローチャート

いて弾性計算を行う。再接触が無くなるまでこのステップを繰り返し、第2ステップへもどる。

以上示した様に、この方法は解放力を与えて増分計算を行ってゆく方法であるが、解放中に再接触をゆるしているため、アルゴリズムが多少複雑になっている。また計算時間も種々の判定のため多少かかるが、引張クラックの導入、再接触への応用、初期応力の存在、塑性解析への応用といった利点も多く、欠点を十分におぎなうことができるアルゴリズムと考える。

4. 数値計算例

簡単な解析例として、覆土したトンネルと斜面上の深礎杭の模型実験⁵⁾に対する解析結果を示す。

図4・1は覆土したトンネルをモデル化した図である。解析例ではトンネル周辺のコンクリートに対する引張強度を無限大にとり、軟岩相当の地盤について無引張解析を行った。荷重については自重のみを考えた。境界条件については図に示す通りである。

図4・2は、このモデルに対して No-Tension 解析を行った結果を表した図である。繰り返し計算とともに引張領域が減少する様子が表れている。

図4・3は同じモデルで Tension-Crack 解析を行った結果である。トンネル底部に縦に走る引張クラックが入っており、実際に生ずる現象が良く表れている。右肩に入った2本の引張クラックは、境界条件による影響も含まれているものと考えられる。なお、Tension-Crack 解析の例では15ステップ目でほぼ収束しており、右肩に残っている引張領域は最大で100 lb/SQ. FT 程度の引張力しか生じていない。前者の解析方法で10ステップの演算時間が39秒、後者の方法で15ステップの演算時間が75秒(10ステップで52秒)であった。使用計算機は東大大型センターの HITAC 8800/8700 であった。

次に、斜面上の杭の模型実験に対するシミュレーションを行った結果を示す。図4・4にモデル図を示す。実験では基礎地盤として、セッコウとケイソウ土を混ぜたものを用いており、杭としてはφ34の鉄筋を用いている。また、実際の地山を想定して模型が浮き上がらないように左上部に浮き上がり防止を行っている。以上のモデル化のため、鉛直変位固定という条件を付けた。解析例は平面歪状態を仮定しているため実験とはくいちがう点多くありうるものと思われる。

図4・5はこのモデルについて No-Tension 解析を行った結果で、引張領域が杭の前面に広がっていく様子が伺える。この例では収束はせずに20ステップ以降の答は意味のわからないものであった。

図4・6は同じモデルで Tension-Crack 解析を行った結果である。除々に引張クラックが杭前面に伸びていく様子が表れている。最終的に14ステップ目で連立方程式が特異になり解が得られなくなった。この状態でクラックは表面に表れ、メカニズムになったものと考えられる。なお、引張強度は零としてあるので、まったく引張りに抵抗しない材料であると考えたことになる。ちなみに計算時間を示すと前者で29秒(10ステップ)後者で36秒(10ステップ)であった。

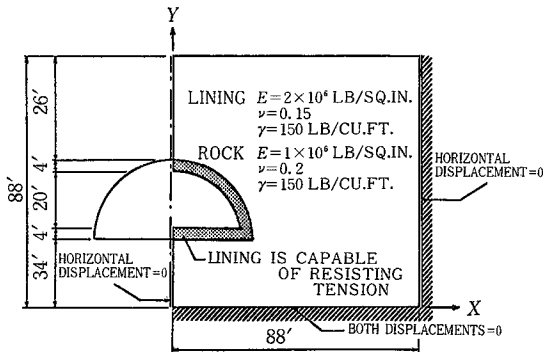
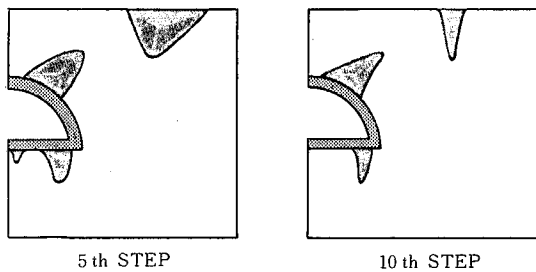


図4・1 地表面近くの覆工トンネル (O. C. Zienkiewicz et al.¹⁾)



5th STEP 10th STEP
■ 引張領域

図4・2 覆工トンネルの No-Tension 解析結果

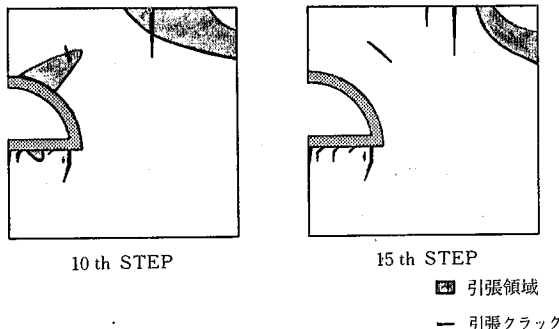


図4・3 覆工トンネルの Tension-Crack 解析結果

研究速報

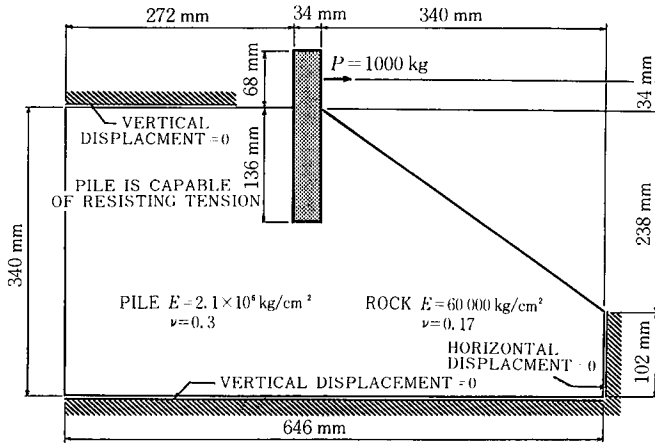


図4・4 斜面上の杭⁵⁾

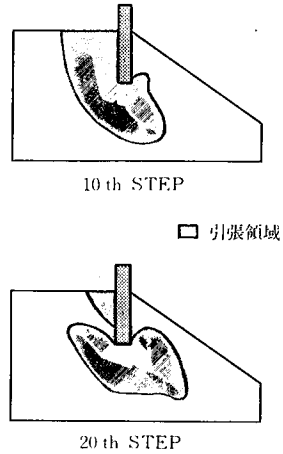


図4・5 斜面上の杭に関する No-Tension 解析結果

5. む す び

従来、有限要素法において、無引張解析に用いられてきた No-Tension 解析を、RBSM に適用し、さらに、このモデルの利点を生かして Tension-Crack 解析まで応用を広げた。このモデルはパラメーターが重心にあるため、要素間の切断が可能であり、プログラム次第で計算時間の縮小も可能である。ここで述べた数値計算例はあくまでもアルゴリズムのチェックであり現実のものとかげはなれた所があるが、ある程度予想した結果が得られたものとする。

このモデルのよい所は、形状が任意であるため、レンガ積みのようなロックフィルダム等の問題に対しても適用可能なことであり、Tension-Crack 解析法はそのような問題にも適しているものとする。さらに、Tension-Crack 解析は増分計算が可能であるので、引張破壊に対する最高荷重を求めるのにも便利に使用できるものとする。

(1980年3月24日受理)

参 考 文 献

- 1) Zienkiewicz, O. C., et al. : "Stress analysis of rock as a 'No Tension' material", *Geotechnique*, 18, 56-66, (1968)
- 2) Kawai, T. and Toi, Y. : "A new element in discrete analysis of plane strain problems", *J. of "Seisan Kenkyu"*, Institute of Industrial Science,

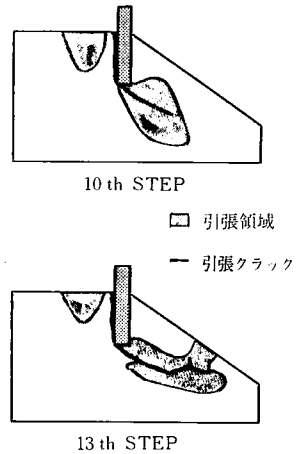


図4・6 斜面上の杭の Tension-Crack 解析結果

Univ. of Tokyo, 29, 4, 204-207 (1977)

- 3) Kawai, T. : "New discrete structural models and generalization of the method of limit analysis" *Int. Conf. on Finite Elements in Non-linear Solid and Structural Mechanics*, Geilo, Norway, 2, G04.1-G04.20 (1977)
- 4) 竹内・川井 : "土盤の変形・破壊に対する極限解析" 第29回応力連合講演論文集抄録集 (1979)
- 5) 高速道路調査会 : "基礎構造に関する調査研究・昭和48年度報告書" (1974)