

Ⅲ－10

土の脆性挙動のモデル化に関する研究：数値計算例

東北学院大学工学部
東北学院大学工学部
東北学院大学工学部

学生会員 ○菅原 光哉
学生会員 宇野 喜樹
正会員 飛田 善雄

1 はじめに

近年、地震動によって、支持地盤が液状化し、堤体軸方向の亀裂を伴うように破壊される被害が多く見られている。そのため、亀裂は大規模な斜面崩壊や地すべりの前兆現象として実務では重要視されている。地盤の破壊問題では、引張り強度と脆性挙動が大切であるが、土の脆性挙動に関する研究は少ない。その理由は設計条件として引張り強度、引張り時の変形特性が全く必要なかったためである。

脆性挙動を考える場合に、土は工学的材料としてコンクリートと極めて類似した特性を持つ。土とコンクリートの類似性としては、極めて複雑な配置を持つ材料であり、圧縮強度と比較して引張り強度が極めて小さい材料である。コンクリートでは実験的研究、モデルに対する研究、数値解析手法の研究が進んでいる。その中でも実務で最も利用されているモデルとして連続体クラックモデルがある。本研究では、材料の脆性挙動を表現できる連続体クラックモデル[1]の土への適用における可能性と問題点について計算を行い、考察する。

2 連続体クラックモデルの概念

この概念では、クラックは分離しているのではなく、無限個の微小なクラックが材料内に平行に分散していると考えられる。この方向の弾性剛性を劣化させることにより材料の脆性挙動を表現することになる。クラックが形成するまでは線形等方弾性体を仮定し、クラックが形成された場合、この分散したクラックに付随して、局所座標系 n, s を形成することになる。簡単のために局所座標系と全体座標系の2次元でのイメージを図-1に示す。ここで、 x, y は全体座標系の方向を表し、 n はクラックの鉛直方向を表し、 s はクラックの接線方向を表す。 n は mode I、 s は mode II に対応する。

3 連続体クラックモデルの基本式

クラック発生後の全体座標系でひずみ増分 $\Delta \epsilon$ は、式(1)のように弾性ひずみ増分 $\Delta \epsilon^e$ とクラックひずみ増分 $\Delta \epsilon^{cr}$ に分割できる。

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^e + \Delta \epsilon^{cr} \quad (1)$$

ひずみ軟化挙動は、局所座標系で与えられ、クラック面における応力増分を Δt 、クラックひずみ増分を $\Delta \epsilon^{cr}$ と表現するとき、増分形式として式(2)で与えられる。

$$\Delta t = D^{cr} \Delta \epsilon^{cr} \quad (2)$$

ここで、 D^{cr} は mode I、mode II、及び混合 mode の特性を組み込んだマトリクスである。

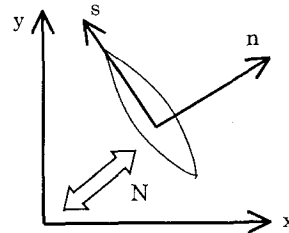


図-1 全体座標系と局所座標系の概略図

全体クラックひずみ増分と局所クラックひずみ増分の関係は、両者の座標系の方向余弦を用いた変換マトリクス N を介して式(3)のように与えられる。

$$\Delta \epsilon^{cr} = N \Delta \epsilon^e \quad (3)$$

局所表面力増分 Δt^{cr} と応力増分 $\Delta \sigma$ は式(4)によって関係付けられる。

$$\Delta t^{cr} = N^T \Delta \sigma \quad (4)$$

ここで、上付き指標 T は転置を表す。

クラックのない状態は線形等方弾性体と仮定しているため、初期の無傷の状態及びクラック間の材料の関係は、次の弾性関係式(5)を仮定する。

$$\Delta \sigma = E^e \Delta \epsilon^e \quad (5)$$

式(1)～(5)から、式(6)のクラック形成後の全体座標系での応力-ひずみ関係が得られる。

$$\Delta \sigma = [E^e - \frac{E^e N N^T E^e}{D^{cr} + N^T E^e N}] \Delta \epsilon \quad (6)$$

4 連続体クラックモデルの分類

連続体クラックモデルは一方固定モデル、多方向固定モデル、回転モデルの3つに分類できる。

一方固定モデルはクラックがある方向に固定できるとした場合のモデルである。具体的には、式(6)において、局所座標系と全体座標系の関係が固定されることを意味する。つまり、変換マトリクス N が計算中、どのような応力状態に対しても常に一定なモデルである。

多方向固定モデルは主応力軸の回転などが生じる場合には、様々な方向にクラックが発生することになる。応力の状態が変化することにより、クラックの発生する方向が異なり、場合によっては、複数の方向のクラックが弾性劣化に関係するようになる。

回転モデルでクラックの進展は、引張り応力が作用する面に沿って進展すると仮定する。活性なクラックが、主応力軸の回転に付随して、あたかも回転しているように見えるという意味での回転クラックモデルという名称である。

5 数値計算結果

連続体クラックモデルの性能を検証するために、コンクリート力学分野での研究の成果との比較を想定した計算を行った。材料定数としてはヤング係数 $E=10000$ (MPa), ポアソン比 $\nu=0.2$, 引張り強度 $f_{ct}=1.0$ (MPa) である。また、ひずみ軟化挙動を表現するために、ひずみ制御で計算を行った。

本研究では、最も簡単な一軸引張りと地震時を想定し、主応力軸の回転が起こるような条件(引張りせん断), 除荷再載荷の繰り返しの計算を行なった。

一軸引張りでは一方向固定モデルで2次元平面応力状態について計算を行った。図-2に全体座標系における引張り方向の応力-ひずみ関係を示す。この計算では、引張り軟化式のパラメータとして線形軟化パラメータのほかに、二つの非線形(指数則, expの関数形)の引張り軟化パラメータを使用して、計算を行った。

引張りせん断はクラック発生後にせん断力を加えて、一方向固定モデルと回転モデルの計算を行った。主応力軸の回転はクラック発生後に起こることとした。図-3に主応力-主ひずみ関係を示す。

除荷再載荷は簡単化のために、一方向固定モデルを用い、一軸引張りで除荷再載荷の計算を繰り返した。一軸引張りでの除荷再載荷の繰り返しの計算結果を図-4に示す。また、一軸引張りでの除荷再載荷の繰り返しの実験データ[2]を図-5に示す。

6 考察

- 一軸引張りの軟化挙動の数値計算を行い、線形軟化パラメータと指数則の関数パラメータ, expの関数パラメータを用いた挙動を表現した。使用するパラメータによって、引張り軟化時に非線形挙動を示す実験データに近づけることができると考えられる。
- 引張りせん断で、一方向固定モデルの主応力-主ひずみ関係の計算結果は一度軟化挙動を示す。しかし、その後の挙動は、主応力が引張り強度を越えても増加する挙動を示した。これは、クラックの進展方向に影響があると考えられる。
- 除荷時は計算結果で線形弾性体と仮定しているが、実験データはひずみ軟化時に除荷すると原点に向かうような非線形挙動を示す。

7 まとめ

脆性挙動を表現できる連続体クラックモデルの数値計算を行なった。計算結果を土の脆性挙動の表現に適用する時の可能性と問題点について以下に示す。

- 回転モデルを用いることにより、主応力軸の回転を含む問題(地震中の地盤挙動の解析など)にも対応できると考えられる。
- 除荷時の挙動で計算結果は線形弾性体と仮定しているが、実験データでは非線形の挙動であるので大きく異なる。今後検討する必要がある。

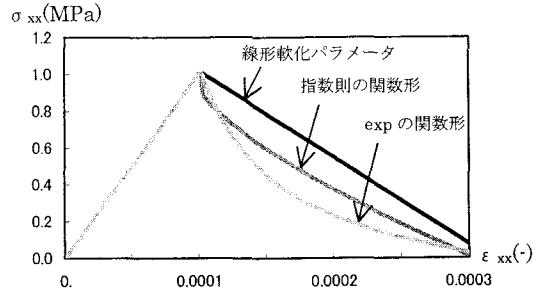


図-2 一軸引張りの応力-ひずみ関係

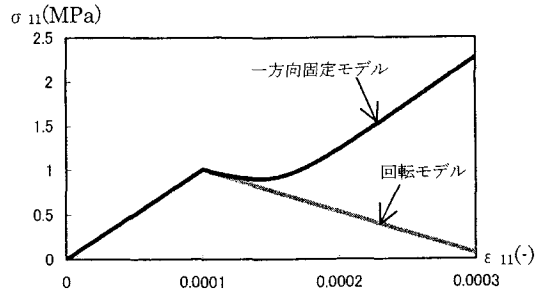


図-3 引張りせん断の主応力-主ひずみ関係

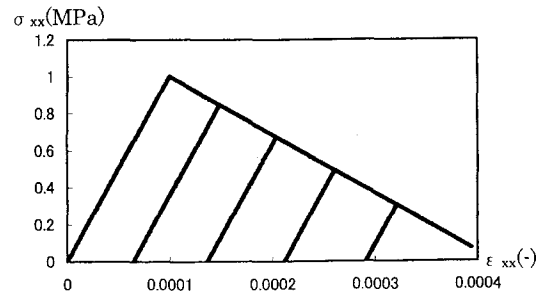


図-4 除荷再載荷の繰り返しの計算結果

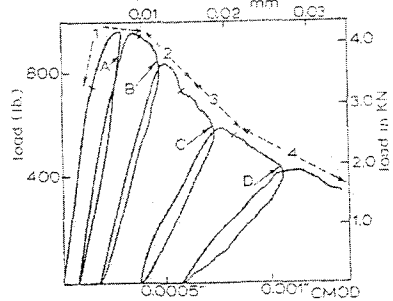


図-5 除荷再載荷の繰り返しの実験データ

8 参考文献

- [1] Rots J.G. : Computational modeling of concrete fractuer, pp.1-41, 1988
- [2] Mazars Jacky , Bazant Z.P. : Cracking and damage, pp.18, 1989