



岩石の変形の局所化現象における数値シュミレーション

金, 永民

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1996-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1534

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001534>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	金 永 民 (大韓民国)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	博い第93号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	平成8年3月31日
学位論文題目	岩石の変形の局所化現象における数値シミュレーション

審査委員	主査 教授 桜井 春 輔
	教授 冨田 佳 宏 教授 北 村 泰 寿

論文内容の要旨

岩石などの地盤材料では、破壊に至る過程でひずみ軟化現象が観察される。すなわち、せん断により応力は増加して最大強度に達するが、その後減少に転じ最終的には大ひずみでの強度（残留強度）に到達する。このひずみ軟化挙動は、地盤工学の問題で論じられている変形の局所化現象と密接に関係すると考えるから、その挙動を記述できる構成モデルの確立は重要である。

軟化モデルを用いる際、次のような問題が指摘されて来ている。すなわち、硬化係数を負とする古典的な軟化モデルを有限要素法などの解析に用いると、剛性マトリックスが負になるため、境界値問題が不適切問題となり、解の不安定、メッシュサイズ依存性などの問題が起こる。

この問題に対処するために、本論文では、まず、古典的な軟化モデルを用いてひずみの局所化を数値解析する時の注意点、また、どのような形状で変形の局所化が成長するかを明らかにし、変形の全領域での変形の挙動を数値シミュレーションで分析した。次に、ひずみの局所化の変形挙動をより正確に予測するために、より洗練されたモデルを用いて平面ひずみ条件下で一軸圧縮を受ける岩石材料の変形挙動について数値シミュレーションを行った。一連の数値実験を検討することによって得られた岩石のひずみの局所化における数値シミュレーションに関する結果をまとめたものである。本論文は6章から構成されている。

第1章では、序論であり、本研究の背景、目的およびその構成について述べている。

第2章では、地盤材料のひずみの局所化現象と現在用いられている局所化理論及びその特性、問題点を紹介するとともに関連する従来の研究についてまとめている。

第3章では、von Mises軟化モデルを用いて有限要素法でひずみの局所化解析するとき、現れるいくつかの問題点すなわち、要素の配置と選択の問題、メッシュサイズの依存性、微小変形と大変形理論の差、変位制御と圧力制御による変形挙動の差について、平面ひずみの一軸圧縮問題と支持力問題の変形挙動の数値シミュレーションを行った。ひずみの局所化の数値シミュレーションより明らかになったことは以下のようなものである。

ひずみの局所化の数値シミュレーションにおいては要素の配置と選択によって随分違う挙動を示す。

その中に4CST要素を用いた場合は比較的に良い結果が得られる。古典的な弾塑性理論を用いたひずみの局所化の数値シミュレーションでは要素のメッシュサイズの大きさが解析の結果に著しく影響を与えるので、何らかの形で適切な調整を行わない限り、妥当な解を得ることができない。

また、ひずみの局所化の数値シミュレーションでは一部の領域に非常に大きな変形が発生するために、大変形理論を用いた場合がより良い結果を与える。さらに、ピーク以後の変位挙動を数値シミュレーションする場合、初期不整のいれ方、変位制御と圧力制御によって現れるひずみの局所化は随分違う挙動を示すことが分かった。

第4章では、岩石材料のひずみ局所化の変形挙動をより正確に予測するために、ひずみ速度依存性を考慮したひずみ軟化性質を持つ大変形理論によって、平面ひずみ条件下で一軸圧縮を受ける岩石材料の変形挙動の数値シミュレーションを行った。得られた結果は次のようである。

岩石のひずみの局所化の数値シミュレーションでは、降伏及びポテンシャル関数と非関連流れ則による影響が強く現れて尖り点を持つMohr-Coulomb関数を用いた方が良い結果を表す。また、完全弾塑性モデルの場合にも強い非関連流れ則によってひずみの軟化現象が起こる。ひずみ速度依存性モデルによれば、静的荷重条件下でのひずみ局所化のシミュレーションは、緩やかな軟化領域でメッシュサイズの影響をより減少させる事ができ、妥当なひずみ局所化現象を表わしている。さらに、ひずみの局所化の数値シミュレーションにおいて、降伏及びポテンシャル関数の尖り点の有無、試供体の形状と端面の拘束条件によって現れる変形の様子はずいぶん違う挙動を示す。また、岩石材料の変形挙動は、与える変位速度が大きいほど強度と降伏ひずみが高くなる。しかし、全般的な変形形状は与えるひずみ速度に関係なく一定な変形モードを示す。また、分岐後に現われるせん断帯の角度は、平面ひずみ条件下の数値シミュレーションでは $\theta = 45^\circ + \phi_r/2$ に接近する結果を示す。局所化が発生し破壊に至る進行性破壊の過程は、まず、破壊が岩石材料の表面から発生し、ほぼ同時に材料内部に発生する塑性領域と共に局所化が進行して全般的な破壊に至ることが分かった。

第5章では、岩石材料のひずみ局所化の数値シミュレーションに現れるメッシュサイズ依存性の除去とせん断帯の幅について分析するために、非局所理論を検討し、相当応力に相当粘塑性ひずみの勾配を導入した勾配依存非局所形ひずみ速度依存性構成式を用いて、平面ひずみ条件下で一軸圧縮を受ける岩石材料の変形挙動の数値シミュレーションを行った。得られた結果は次のようである。非局所形構成式中の非局所効果項の係数(1, $C > 0$)の影響をみるために、平面ひずみ一軸圧縮条件で解析した結果、1, C の値が大きくなる程、非局所効果が大きくなり、ひずみの局所化が安定することが判った。また、非局所形構成式の導入によるメッシュサイズ依存について解析を行った結果、有限要素解析結果におけるメッシュサイズ依存性は除去可能であることが明らかになった。さらに、有限要素分割数を一定とした場合の有限要素解析結果への試料寸法導入の可能性についての検討では、試料寸法が大きくなる程、激しい変形の局所化が見られた。また、非局所理論の特性長さを取り入れることによってひずみの局所化問題のせん断帯の幅が予測することができる事が分かった。

第6章では、結論として本研究で得られた結果の要約を行っている。

論文審査の結果の要旨

岩石などの地盤材料では一般に破壊に至る過程でひずみ軟化現象が観察される。このひずみ軟化現象は変形の局所化現象と密接に関係すると考えられる。変形の局所化の解析は多くの研究者によって研究がなされているが、せん断帯の発生時期と角度、その幅、初期不整の影響、メッシュ依存性など、

いまだに多くの問題を残している。そこで、本論文では、岩石材料を対象に、変形の局所化の解析に対するより優れた方法の開発を試みた。さらに、得られたコンピュータプログラムを用いた数値シミュレーションによって岩石の変形の局所化の挙動を明かにした。

本論文は6章から構成されている。第1章は、序論であり、本研究の背景、目的およびその構成について述べている。

第2章では、地盤材料のひずみの局所化現象に対する解析の問題点と、現在用いられている局所化理論及びその特性を紹介するとともに、関連する従来の研究についてまとめている。

第3章では、まずvon Mises軟化モデルを用いた有限要素法によるひずみの局所化解析において発生するいくつかの問題点、すなわち、要素の種類とその配置の影響、メッシュサイズの依存性、微小変形と大変形理論の差、変位制御と圧力制御による変形挙動の差などを明かにするために、平面ひずみの一軸圧縮問題と支持力問題に対する変形の局所化の数値シミュレーションを行ない、以下の結果を得ている。

すなわち、ひずみの局所化要素の種類とその配置によって大きく影響を受ける。その中で4CST要素を用いた場合は比較的に良い結果が得られる。古典的な弾塑性理論によると要素の大きさが解析結果に著しく影響を与える。また、ひずみの局所化においては一部の領域に大きな変形が生ずるために、大変形理論を用いた場合がより良い結果を与える。さらに、ピーク以後の変形挙動の解析においては、初期不整の与え方、変位制御と圧力制御の差によって変形の局所化は大きく影響を受けることが分かった。

第4章では、岩石材料のひずみの局所化の挙動をより正確に予測するために、ひずみ速度依存性を考慮したひずみ軟化性質を持つ大変形理論によって、平面ひずみ条件下で一軸圧縮を受ける岩石材料の変形挙動の数値シミュレーションを行ない、次の結果を得ている。

すなわち、岩石のひずみの局所化の数値シミュレーションでは尖り点を持つMohr-Coulomb関数を用いる方が良い結果を得る。また、完全弾塑性モデルの場合にも非関連流れ則によってひずみの軟化現象が生ずる。ひずみ速度依存性モデルによれば、緩やかな軟化領域でメッシュサイズの影響を減少させることができる。また、与える変位速度が大きいほど強度と降伏ひずみが高くなる。さらに、分岐後に現われるせん断帯の角度は平面ひずみ条件での数値シミュレーションでは $\theta = 45^\circ + \phi_f/2$ に近く、妥当な結果を得る。また、局所化が発生し、破壊に至る進行性破壊の過程では、まず破壊が岩石試料の表面から発生し、ほぼ同時に材料内部に発生する塑性領域と共に局所化が進行して全般的な破壊に至ることが分かった。

第5章では、岩石のひずみ局所化の数値シミュレーションに現われるメッシュサイズ依存性の除去とせん断帯の幅について検討している。まず、非局所理論を検討し、相当応力と相当粘塑性ひずみの勾配を導入したひずみ速度依存性の勾配依存非局所形構成式を用いて、平面ひずみ条件下で一軸圧縮状態における岩石材料の変形挙動の数値シミュレーションを行なった。そして、次の結果を得ている。

まず、非局所形構成式を導入することにより、有限要素解析結果におけるメッシュサイズの影響を除去し得ることを明らかにした。さらに、有限要素分割数を一定とした場合、試料寸法が大きくなる程、急激な変形の局所化がみられる。また、非局所理論の特性長さを取り入れることによって、ひずみの局所化問題におけるせん断帯の幅が予測し得る可能性のあることが分かった。

第6章は、結論として本研究で得られた結果の要約を示している。

以上のように、本研究は岩石材料を対象に、変形の局所化解析に対するより優れた方法の開発を試み、数値シミュレーションに基づき、変形の局所化解析に対する多くの重要な知見を得たものとして

価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 金永民は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。