

カオリンの平面圧縮せん断試験と分岐シミュレーション

東北大学大学院	学生員	○ 生出 佳
長岡技術科学大学	正会員	山川優樹
アキシード	非会員	我妻 大輔
東北大学	正会員	須藤 良清
東北大学	正会員	寺田 賢二郎
東北大学	正会員	池田 清宏

1. はじめに

土質材料に関する現行の分岐解析は2次元の長方形領域を対象にすることが多いのに対し、比較する実験は通常3次元の円柱形領域で行われる場合が多い。実験的・解析的研究の成果をより有用なものとし、地盤材料の強度に関する議論を可能にするためには、より整合性のとれた比較研究が必要である。3次元分岐解析は大規模な計算となるため現状では現実的でない。また、三軸供試体の3次元的な変形パターンを内部まで観察することは困難である。したがって、3次元解析と実験の比較は難しいのが現状である。

そこで、本研究では現在可能である2次元の分岐解析と比較するために、平面ひずみ状態を模擬した圧縮せん断試験を行った。実験から観察される変形形態について考察するとともに、この実験から算定した材料パラメータを用いた弾塑性分岐解析を行い、実験結果と比較をした。また、三軸圧縮試験から得られた材料パラメータを用いた既往の解析結果¹⁾との比較により、弾塑性材料特性に関する検討を行った。

2. 実験

(1) 実験概要

実験に用いた試料は一般用標準品の商品名 NN カオリン粘土(土屋カオリン工業岡山工場製品)である。試験には長方形供試体を用い、载荷断面の縦・横幅をそれぞれ50mm・20mmとし、軸方向長さを112.5mmとした。せん断試験装置には、一面せん断試験機を改良したものを用いた。

(2) 実験結果

繰り返し実験を行った中で、分岐解析により得た分岐モード¹⁾に最も近い変形を示した供試体のせん断終了時点(軸ひずみ20%)の写真と応力-ひずみ曲線を図-1に示す。

本実験では、既往の解析結果では得られない現象として、図-1の(a)に示すようなひび割れと、図-1の(b)の応力-ひずみ曲線に示すようなひずみ硬化型の挙動が、全ての供試体に共通して観察された。さらに、有限の幅を持つせん断帯が複数のひび割れに囲まれるように形成されることが確認された。

3. 圧縮せん断時の弾塑性分岐の数値解析

(1) 解析概要

本解析では、有限変形を考慮した一般的な弾塑性境界値問題に基づく有限要素解析¹⁾を、図-1(a)の応力-ひずみ曲線と三軸圧縮試験¹⁾の、2つの実験結果から算定した材料パラメータに対して行う。ただし、実験は様々な初期不

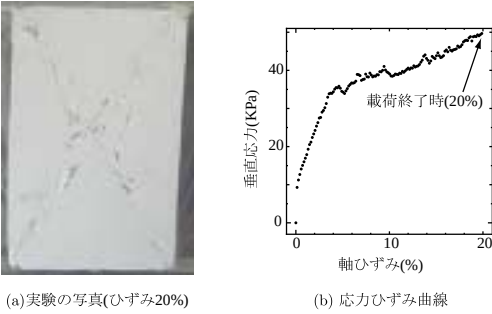


図-1 実験の写真と応力-ひずみ曲線

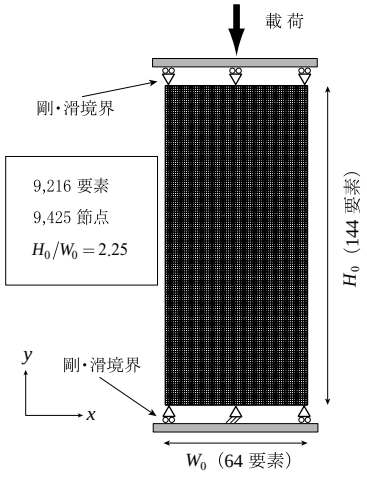


図-2 解析モデル

整を伴っているため、解析で想定する完全系に比べて強度が低くなることを材料パラメータの決定の際に考慮した。本研究では、運動学的に厳密とされる変形勾配の乗算型分解と超弾性構成式に基づく定式化²⁾を採用する。解析モデルは図-2に示すように、幅 W_0 、高さ H_0 とすると、実験で用いた供試体の縦横比と同様の寸法比 $H_0/W_0 = 2.25$ を用い、幅方向64要素、高さ方向144要素の9,216要素(9,425節点)に均等に分割した。上下端面の x 方向変位については、下端中央の一点のみを拘束して剛体移動を止める以外は拘束しない。平面ひずみ状態を仮定し、上端に一樣な y 方向荷重を与える。

なお、間隙水との連成を無視し、完全排水条件を想定する。また、現状では実験で見られたひび割れを再現することができないため、変位・ひずみの連続性が保たれた下でのみ議論し、また透水性・間隙比・载荷速度は考慮していない。

(2) 実験結果と弾塑性分岐解析の比較

Key Words: 平面圧縮せん断試験, 弾塑性分岐解析, 三軸圧縮試験, 材料定数, 硬化係数
〒 980-8579 仙台市青葉区新巻字青葉 06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 Tel.022-217-7420 Fax.022-217-7418

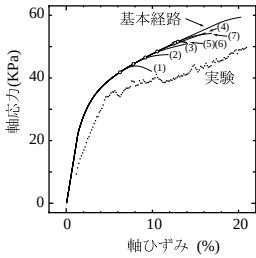


図-3 実験値と解析値のつり合い経路

図-3 には、図-1(b) の実験値を●で示し、図-1(b) の応力-ひずみ曲線から算定した材料パラメータを用いた解析により求めた基本経路と分岐経路を実線で示し、分岐点を○で示す。各分岐経路に示した括弧付き数字は、対応する分岐点の番号である。ただし、解析値に関しては、実験の単位と合致させるために、供試体上辺部の y 方向変位 ΔH を初期高さ H_0 で除したものを供試体全体の見掛けの軸ひずみとし、供試体端面に働く合力 F を初期幅 W_0 で除したものを軸応力とした。

図-3 の分岐点 (5) における分岐モードの軸ひずみの分布と、これに近い変形を示した実験の写真を図-4 に示す。図-4(b) のような変形は、実験で最も多く見られた破壊形態である。実験には様々な初期不整が考えられ、それが特定のモードを誘発している場合がある。なかでも、摩擦などによるせん断条件の不均一さや荷重分布の不均一さなど初期不整が大きいため、軸上・下方向で変形の異なる図-4(a) のような変形が最も多く表れたと考えられる。

図-3 の分岐点 (2) における分岐モードの、ひずみ 20% 時点での軸ひずみ・軸応力・除荷領域分布図を図-5 に示す。図-1(a) にあるくさび型に入った 2 本のひび割れに対応するように、図-5(a) の軸ひずみ分布図にはひずみの急変領域がある。また、図-5(b) の軸応力分布図に示すように、図-5(a) の急変領域の境界に応力が集中することが分かる。この帯状に延びるせん断帯の中央部には図-5(c) に示すように除荷領域が広がっており、特に境界上は応力の値が高いことから、ひずみが急激に成長する可能性、つまりひび割れが生じる可能性を示唆している。以上のことから、実験で観察されたせん断帯の境界にひび割れが入る現象は、このような力学的メカニズムによるものと推察される。また、せん断帯がひび割れを誘発していると仮定すると、ひび割れよりも分岐現象の方が先に発生する可能性も否定できない。

(3) 2 種類の材料パラメータを用いた解析の比較

図-4(b) に示すような軸ひずみ分布図は、三軸圧縮試験から算定した材料パラメータを用いて行う解析結果¹⁾では得られなかった。このことは、実験で得られた変形形態の再現に際し、材料パラメータを実験モデルに近づけることの重要性を示している。このことは、材料パラメータを実験モデルに近づけることにより、実験で得られた変形形態をある程度再現できることを示している。

4. 結論

本研究では、平面ひずみ状態を模擬した圧縮せん断試験を行った。実験から観察される変形形態を考察し、この実

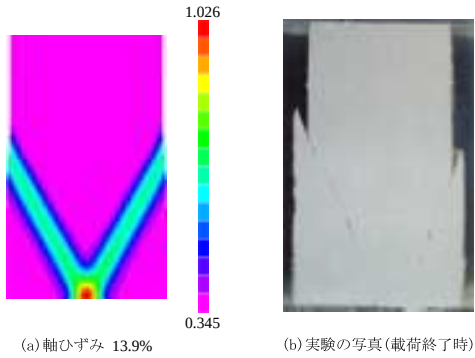


図-4 図-3 の分岐点 (5) における分岐モードと実験写真との比較

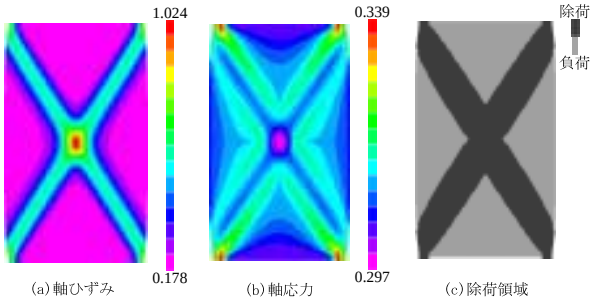


図-5 図-3 の分岐点 (2) における分岐モードと実験写真との比較

験から算定した材料パラメータを用いて弾塑性分岐解析を行い、実験結果と比較した。また、既往の三軸圧縮試験から得られた材料パラメータを用いた解析結果¹⁾と比較することにより弾塑性材料特性に関する検討を行い、以下のような結論が得られた。

平面圧縮せん断試験では、全ての供試体において、せん断帯に沿って必ずひび割れが生じることが確認された。また、実験の応力-ひずみ曲線においてひずみ硬化現象が見られた。

弾塑性分岐解析では、実験で得られた変形形態をある程度再現できた。また、解析において帯状に表現されるせん断帯には、そのせん断帯の両端に沿ってひび割れが生じることが予測され、このことから、ひび割れよりも先にせん断帯が形成されていることが推察された。

本研究の数値解析ではひび割れをシミュレートできなかったため、実験結果を正確に再現するには至らなかった。しかし、2 次元解析に似た条件の下で実験を行い、一般的な弾塑性境界値問題に基づく有限要素法を用いた 2 次元分岐解析により、実挙動をある程度再現できた。今後、実験的研究との真の比較を可能にするためには、ひび割れや供試体に影響を及ぼしていると考えられる諸事象を数値解析で表現できるようにする必要がある。

参考文献

1) 山川優樹：圧縮場における弾塑性体の分岐解析とパスジャンプ挙動、土木学会論文集に投稿中
2) Simo, J. C.: Algorithms for static and dynamic multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 99, pp. 61-112, 1992.