

Material Point Method を用いた三軸圧縮試験の三次元解析

その1: 解析条件と破壊形態

清水建設 ○桐山貴俊・福武毅芳

1. はじめに 地盤の破壊現象は変形の局所化が伴う。数値解析的に破壊後まで再現するためには、解像度が高く、大変形領域まで追跡が可能であり、地盤材料の構成則を導入することができる数値解析法が望まれる。また、自然地盤は複雑に堆積し、地表面形状も平坦ではない。平面ひずみ的な二次元状態であることはごく限られた土構造物（河川堤防、道路・鉄道盛土等の線形構造物の直線部）のみであり、多くの地盤は三次元的な形状および地層を有している。従って、自然地盤まで対象とした場合、数値解析を実施するにあたり、幾何学的な三次元性まで考慮する必要がある。有限要素法に代表される格子法は、高解像度の解析、リメッシングアルゴリズム、構成則を用いることが可能であり、三次元解析による解析事例も豊富である。実施にあたっては、リメッシュによる計算負荷が膨大である点が課題とされている。一方、粒子法は、メッシュが破綻することが無く、格子法同様に高解像度の解析および地盤の構成則を考慮した解析が可能である。しかしながら、粒子法による解析事例の多くは二次元解析¹⁾、²⁾であり、地盤の破壊現象を三次元的に検討した解析例は報告されていない。本論文では粒子法として Material Point Method を用い、三軸圧縮試験の三次元解析を実施することで、地盤非線形問題への手法の適用性を検討するとともに、解析により得られたせん断帯の生成モードについて考察する。

2. 解析手法 MPM は PIC を固体力学に応用した手法として Sulsky ら³⁾が初めて提案した。衝突解析や接触解析など動的な破壊現象に対して応用が試みられ一定の成果が報告されている。しかしながら、粒子が計算格子を超える際に数値振動が発生するという難点を抱えていた。この難点を解消するために Bardenhagen ら⁴⁾は粒子の影響範囲を考慮にいたれた GIMPM を提唱し、数値振動を最小化し、MPM を連続体の変形解析に利用可能な手法に発展させた。著者は、三次元の GIMPM に、地盤の非線形性としてモールクーロンの弾塑性構成則を組み込んだ解析プログラムを構築し、構築したプログラムを用いて以降の解析を実施した。

3. 三軸圧縮試験 本論文で対象とするのは桐山が実施した地盤材料を用いた三軸圧縮試験である²⁾。地盤材料は不飽和（含水比 16.6%）の DL クレイであり、軸ひずみ 15%までの単調載荷試験を実施している。試験により得られた応力ひずみ関係を図 1 に、試験結果から算出した材料定数を表 1 に示す。また試験終了後の試験体のスケッチを図 2 に示す。

4. 解析条件 解析モデルおよび解析条件を図 3 に示す。試験体上部に載荷用キャップ、下部にペDESTAL を配置している。試験体は、直径 5cm、高さ 10cm、キャップおよびペDESTAL は直径 5cm、高さ 0.8cm の粒子群でそれぞれモデル化した。マテリアルポイントは 1 格子あたり 8 粒子とし、モデル全体で 212,112 粒子配置した。試験体はモールクーロンの構成則を付与した弾塑性モデルとし、引張には抵抗しない処理を施している。またキャップおよびペDESTAL は弾性体とした。各粒子へは表 1 に示す物性値を付与した。ペDESTAL は固定とし、ひずみ制御を再現するために、キャップへ鉛直方向の速度を一定とする条件を付与した。試験体端面の境界条件の影響を見るために、キャップの水平変位を固定した条件、自由とした条件の 2 ケース解析を実施した。

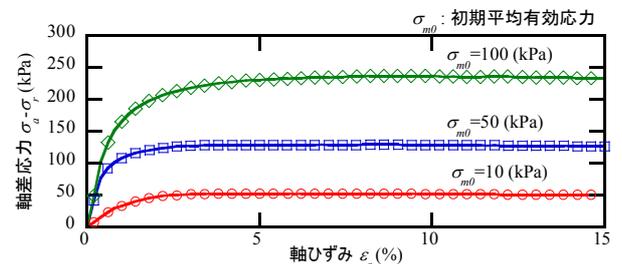


図 1 三軸圧縮試験から得た応力ひずみ関係

表 1 試験結果から算出した材料定数

試験番号 No.	初期平均 有効応力 σ_{m0} (kPa)	せん断 弾性係数 G (kPa)	密度 ρ (g/cm ³)	見かけの 粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)
1	10	1311	1.53		
2	50	6401	1.53	8.5	30.5
3	100	8514	1.53		

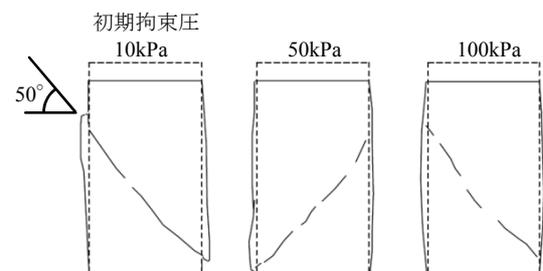


図 2 三軸圧縮試験終了時のスケッチ

キーワード
連絡先GIMPM, 三軸圧縮試験, 大変形解析, 局所化
〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 Fax 03-3820-5955

三軸試験から得られた応力ひずみ関係と解析結果を比較するために、解析モデルの試験体下部にある粒子応力を総和することで試験体の軸力とし、初期拘束圧を減じることで解析的な軸差応力を求め、キャップ変位との関係から解析的な応力ひずみ関係を算出した。

5. 解析結果 解析から得られたマクロでみた応力ひずみ関係を **図 4** に、载荷した軸ひずみに対応する最大せん断ひずみのコンター図を **図 5** に示す。キャップの水平変位を固定した場合、軸ひずみ 1%では弾性状態でありせん断帯はみられない。軸ひずみ 2%では複数の初期せん断帯が観測できる。軸ひずみが 5%から大きい領域では、2つの明瞭なせん断帯による X 型せん断帯が形成された。 **図 4(a)** によれば、解析的な応力ひずみ関係は、大変形領域において試験結果を良好に再現できていることが分かる。このことは、粒子1つ1つに与えたミクロな応力ひずみ関係が試験体全体の応力ひずみ関係を説明できることを示している。キャップの水平変位を自由にした場合、軸ひずみ 1%ではせん断帯が発生しない。これは水平固定条件と同じ結果である。軸ひずみ 2%の段階で、試験体下部に初期せん断帯が見られた。軸ひずみ 5%から大きい領域では、1つのせん断帯が発達し、明瞭なたすき型せん断帯を形成していることが分かる。 **図 4(b)** によれば、マクロで見た応力ひずみ関係は、試験体降伏後、応力が減少する。これはキャップが偏心することにより鉛直方向の拘束圧が解放されることが原因である。

6. まとめ 粒子法の1つである MPM を用いて三軸圧縮試験の三次元解析を実施し、応力・ひずみ関係および試験体の破壊形態に関する考察を行った。キャップの水平自由度を拘束した場合、応力・ひずみ関係は試験結果のピークを良好に再現でき、この時、X 型せん断帯を示した。キャップの水平を自由とした場合は、応力・ひずみ関係は試験結果を再現できず、破壊形態としてたすき型せん断帯を示した。

参考文献 1) 吉田郁政: MPS 法を用いた地盤構造物の地震時破壊挙動解析のための基礎検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.1, pp.93-104, 2011. 2) 桐山貴俊: GIMP 法を用いた三軸圧縮試験の破壊シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.2 (応用力学論文集 Vol.16), pp.1_321-1_332, 2013. 3) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L.: A particle method for history-dependent materials, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. Vol.118, pp179-196, 1994. 4) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M.: The generalized interpolation material point method, Computer Modeling in Engineering and Science, Vol.5, No.6, pp447-495, 2004.

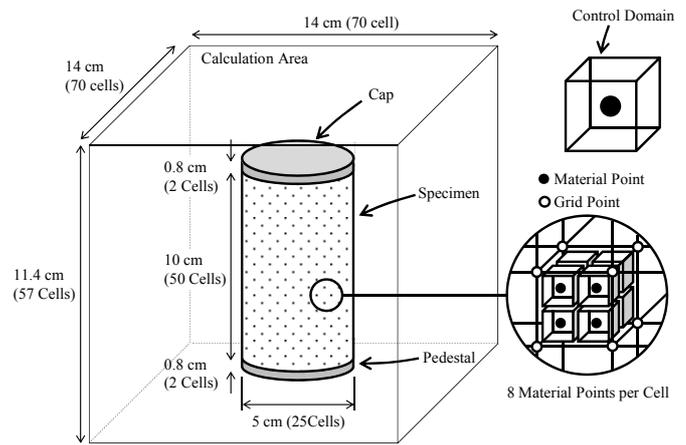
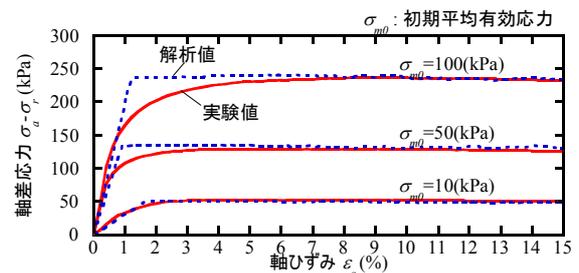
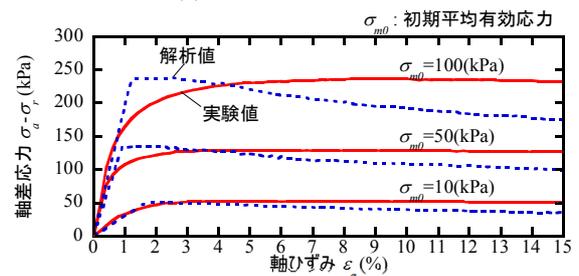


図 3 三軸圧縮試験の解析モデル

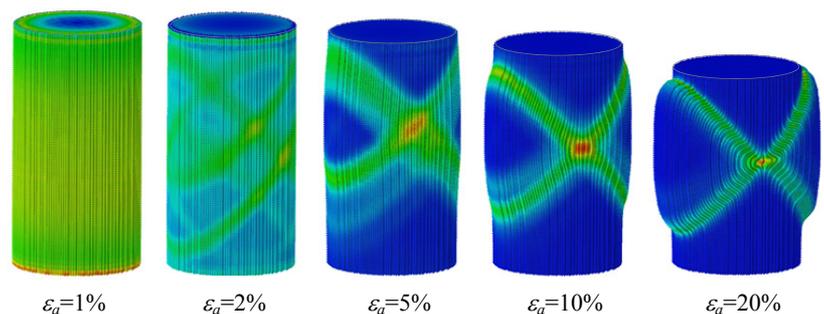


(a) キャップ水平固定条件

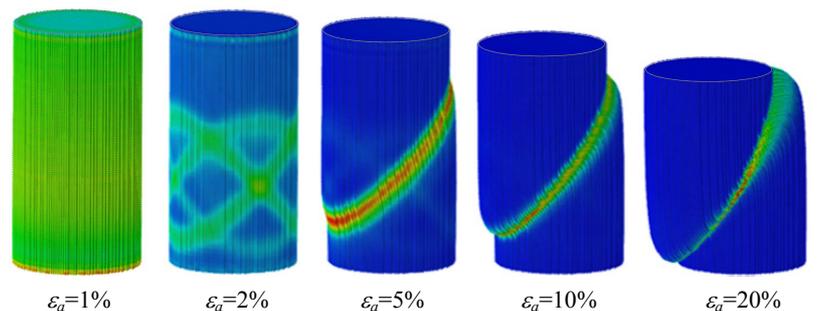


(b) キャップ水平自由条件

図 4 マクロでみた応力ひずみ関係



(a) キャップ水平固定条件



(b) キャップ水平自由条件

図 5 せん断帯の形成過程 (変形および最大せん断ひずみコンター)