

GIMPM を用いた三軸圧縮試験の破壊シミュレーション

その2：FDM と GIMPM の比較解析

清水建設 桐山貴俊・○福武毅芳

1. はじめに 格子法は、複雑な形状を対象とした場合は、要素作成に時間を要し、大変形問題を対象とした場合は、要素形状の破綻や、再分割による計算負荷の増大等に課題がある。他方、要素を用いない粒子法はモデル形状や変形に対する制約が少なく、複雑な地形や大変形問題を対象とした場合、格子法に比べて優位な手法と言える。しかしながら、地盤解析を対象とした場合に、格子法、粒子法を比較した事例は少なく、変形性能に関する相違点は明らかではない。本論文では、格子法として有限差分法 (FDM=Finite Difference Method¹⁾)、粒子法の長所を取り入れた手法として GIMPM²⁾を用いて、三軸圧縮試験を対象に比較解析を実施し、両者の変形性能について考察する。

2. 解析ケースおよび解析条件 解析ケースを表1に示す。Case1、Case2はキャップの境界条件による結果の相違を考察するもので、その内容はその1に記載の通りである。Case1、3、4でポアソン比 (ν)、Case2、5、6で初期不整 (e)の影響を検討し、最終的にCase2、7、8で三軸試験の再現解析を実施した。各ケースともFDM、GIMPMで実施した。GIMPMによる三軸圧縮試験の解析モデル、解析条件はその1に記載した。FDMでは要素数を粒子数と同数にすることでモデルを作成した。この方法は、結果評価点数は同数であるが、計算点数はFDMの方が多い。両者は、载荷速度、積分時間間隔、減衰、物性値等の計算条件を揃えている。FDMでは関連流れ則による弾塑性モジュールを採用する点はGIMPMと異なる。

3. 検討解析 (1)ポアソン比：Case1、3、4の応力・ひずみ関係を図1に、Case1の軸ひずみ10%時の結果を図2に示す。応力・ひずみ関係は、Case1 ($\nu=0.2$)で両手法とも実験結果を良く再現している。Case3 ($\nu=0.3$)においても実験結果の再現性は良いが、主応力差がやや振動している。Case4 ($\nu=0.4$)では主応力差の振動はさらに大きくなる。Case1に比べてCase4で振動成分が増加するのは、ポアソン比が大きいほど側方への膨張性が高くなり、より広い範囲に引張領域が形成されるためである。Case1の場合、FDMは軸ひずみ13%以降において主応力差が振動し、Case4では7%付近で発散する。GIMPMも振動の発生は同傾向であるが、FDMに比べて長周期である(図1(c))。GIMPMは計算点数がFDMに比べて少なく、両手法のモデル化で、振動成分の解像度に差があること、また、使用する構成則に違いがあることが、振動成分の差に表れていると考えられる。Case4を除き、応力・ひずみ関係は両手法とも実験結果を良く再現している。図2の破壊形態を見ると、せん断帯形成後に試験体中央に引張領域が形成される。この領域で不釣合力が解消されず主応力差の振動につながっている。また、せん断帯の形成に関しては、FDMが発散する以前のみを比較すれば、両者は同等の結果を与えと言える。

表1 解析ケース

Case No	ポアソン比 ν	初期不整 e(%)	キャップ 水平条件	拘束圧 kPa	検討内容		
					ポアソン比	初期不整	再現解析
1	0.2	1	固定	10	○		
2			自由			○	○
3			固定		○		
4					○		
5	0.2	0	自由	50		○	
6		10				○	
7		1		100			○
8				100			○

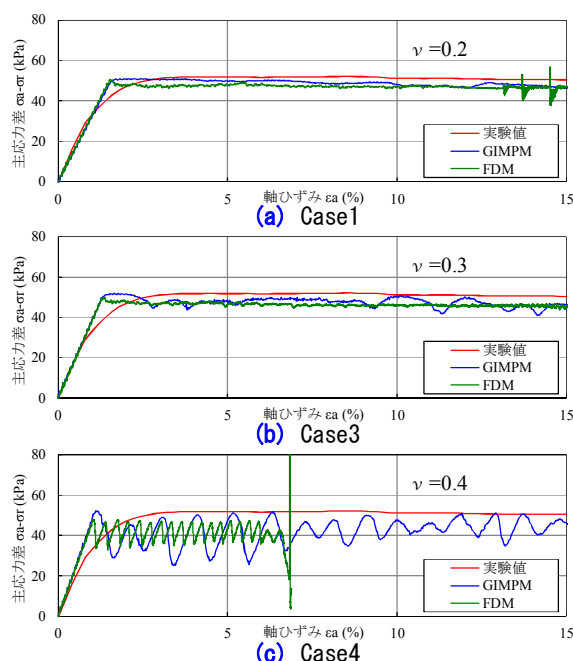
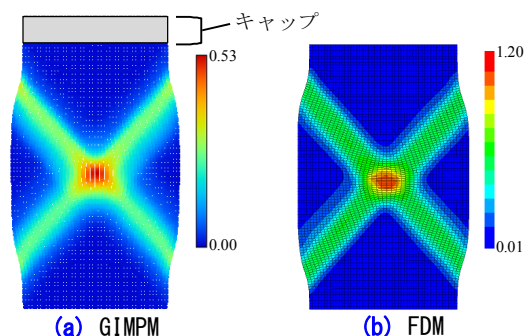


図1 応力・ひずみ関係 (ポアソン比の検討)

図2 最大せん断ひずみ分布 (Case1: $\varepsilon a=10\%$)

キーワード
連絡先

GIMPM、FDM、三軸圧縮試験、大変形解析
〒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

(2)初期不整: Case2、5、6の応力・ひずみ関係を図3に、Case5の軸ひずみ10%時の結果を図4に示す。解析による主応力差は各ケースとも初期降伏後に減少傾向を示す。キャップの拘束条件に依存した結果であり(その1参照)、この点に関しては解析手法による相違はない。Case5($e=0.0\%$)の場合であっても、キャップの水平変位を拘束しなければ変形は左右のいずれかに集中する(図4)。これは数値誤差が蓄積する結果として、非対称性を示すことによる。GIMPMの結果(図3)によれば、主応力差の減少は、Case5が軸ひずみで6%付近から、Case2($e=1.0\%$)、Case6($e=10.0\%$)は4%付近から始まっており、左右いずれかへ変形が集中する要因として、数値誤差よりも初期不整の方が支配的である。初期不整を与えたCase2、6の主応力差の減少はほぼ同じ傾向であり、僅かな初期不整を与えるだけで、試料の非均一性とたすき型せん断帯の形成を表現できることが分かる。

4. 再現解析 三軸圧縮試験の再現解析として実施したCase2、7、8の応力・ひずみ関係を図5に、Case2の軸ひずみ10%時の結果を図6に示す。解析による応力・ひずみ関係が各ケースとも初期降伏後に減少傾向を示すのは、キャップの水平変位を拘束することが原因であり、これまでの解析結果と同じ傾向である。その1で記載した通り、この境界条件では何れの初期拘束圧においても、応力・ひずみ関係は実験結果を再現できない。しかしながら、応力・ひずみ関係を数値解析法と言う観点から解釈する場合、FDM、GIMPMとも同様な解析結果を与え、手法として両者が同等のものであると言える。また、図6に示す通り、左右の違いはあるものの、軸ひずみの増加に伴い形成するせん断帯は、両手法とも実験結果と整合する位置に発現し、この観点からも両手法は同等の結果を与える手法と言える。一方、FDMを用いた解析では、Case7で軸ひずみ8%、Case8で軸ひずみ7%で主応力差が不安定化する(図5)。初期降伏後の振動に加え、要素形状による誤差により不安定さが増大することが原因である。GIMPMは初期降伏後に主応力差が振動するものの、軸ひずみ15%に至るまで不安定性を示すことなく試験体を押し切ることができる。このように大変形領域に至るまで、要素形状による不安定性を示すことなく解析を継続できることは、格子法に比べた場合、GIMPMを含めた粒子法の優位点と言える。

5. まとめ FDMとGIMPMを用いて、三軸圧縮試験の再現解析を実施し、以下のことが明らかになった。(1)GIMPMはFDMによる解析と同等の結果を得ることができる。(2)大変形に着目した場合、FDMは要素形状に起因する誤差が発生し、解が不安定化または発散する。一方、GIMPMは要素形状に起因する誤差はなく、大変形領域に至るまで、安定的に解析を継続することができる。

参考文献 1) Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions, ITASCA international inc, <http://www.itscascg.com/flac3d/>.

2) 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.

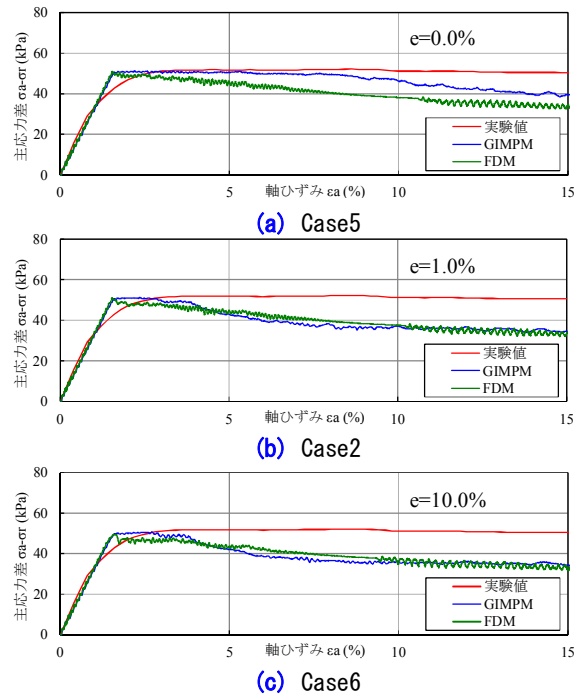


図3 応力・ひずみ関係(初期不整の検討)

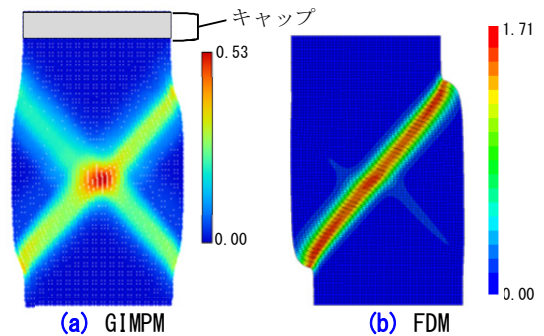


図4 最大せんひずみ分布 (Case5: $\varepsilon_a=10\%$)

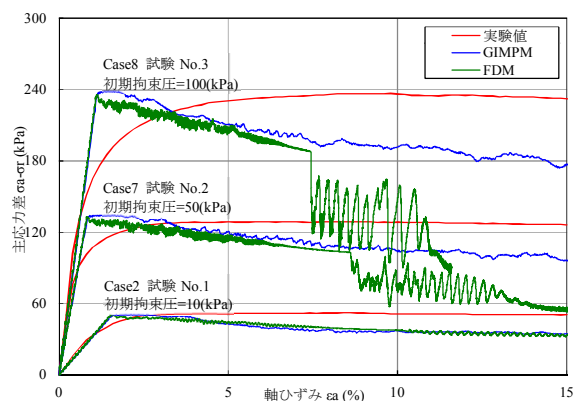


図5 応力・ひずみ関係(再現解析)

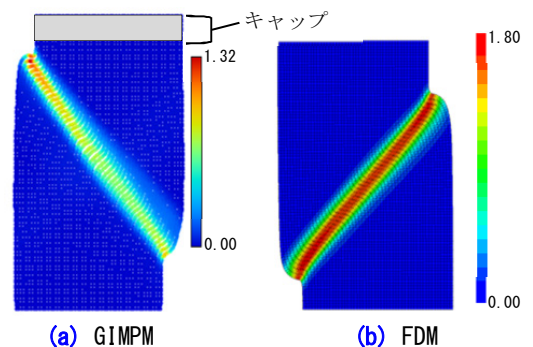


図6 最大せんひずみ分布 (Case2: $\varepsilon_a=10\%$)