

大変形を考慮した軸対称問題における地盤一構造連成解析の検証

清水建設(株) 正会員 ○桐山貴俊
京都大学大学院 正会員 肥後陽介

1. はじめに 著者らの既往の報告^{例えば 1),2)}では、粒子法³⁾は格子法に比べ変形性能に優れ、建設現場で生じる様々な施工過程を考慮した数値解析が実施できることが報告されている。本報では、軸対称空間において粒子法⁴⁾と既存の格子法との相違点を明らかにするための比較解析、ならびに、計算負荷を軽減するための空間離散化方法に着目した比較解析、について報告する。

2. 粒子法と格子法の相互比較 本検討で対象とした解析モデルを Fig.1 に示す。既報⁵⁾を参考にしたフーチングと基礎地盤を配置した検証モデル(対称軸は Fig.1 の左端)を軸対称へ拡張した。粒子法は GIMP 粒子を正方配置し、粒子法における計算格子は格子法(FDM⁶⁾)の要素と同じ空間解像度としている。Fig.1(a),(b)は、Fig.1(a)では粒子領域を図示するため、一見異なるが同一の空間解像度を有している。载荷方法は、重力場においてフーチングの単位体積重量を段階的に増加させる方法²⁾とした。境界条件は、側方は鉛直ローラー、底面は固定条件を付与した。地盤物性値を Table.1 に示す。粘着力と摩擦力を有する地盤材料に対して、塑性時に体積変化あり／なし、の2条件を変更して解析を実行した。

Fig.2 に数値解析より得られた貫入量－接地圧関係を示す。貫入量は基礎直下地盤で対称軸上の鉛直変位、接地圧は载荷荷重から算出した。Fig.2 によれば、粒子法と格子法の貫入量－接地圧関係は、格子法が計算可能である接地圧レベル(体積変化なし: 1900kPa, 体積変化あり: 1700kPa)までそれぞれ同等の値を示す。粒子法による数値解析は、格子法が計算可能な载荷(変形)レベルを超えた範囲でも計算を遂行できており、粒子法の変形性能の高さが改めて確認できた。Fig.3, Fig.4 に、格子法が計算可能な最終接地圧レベルの地盤内最大せん断ひずみ分布をそれぞれ示す。図化する空間解像度が異なるため、粒子法、格子法の凡例は空間解像度の比率に合わせてコンター色が同一となるよう調整している。Fig.3, Fig.4 によれば、粒子法、格子法共に格子法が計算可能な範囲内では、地盤内ひずみは同等の結果が得られている。

3. 軸対称粒子・要素混合法の空間離散化範囲の検討

粒子・要素混合法は粒子法解析において、計算負荷を軽減する方法として活用されてきた^{例えば 7)}。また既報によれば粘着力のみ有する基礎地盤にフーチングを貫入させる場合、基礎側端から基礎幅の 1/2 の離隔を確保し粒子を配置(それ以外は要素を配置)すれば、基礎地盤全面に粒子を配置したモデルと同等の解析精度を確保できることが報告されている²⁾。今回は Fig.5 に示す、基礎側端から基礎半径の 1 倍, 2 倍, 3 倍までを粒子でモデル化し、空間離散化条件による貫入量－接地圧の関係について比較解析を実施することで空間離散化による解析精度の変化を調査した。解析モデル、条件、物性値は Fig.1, Table.1 と同じである。Fig.5 にモデル化に要した離散化要素数(粒子数+要素数)と計

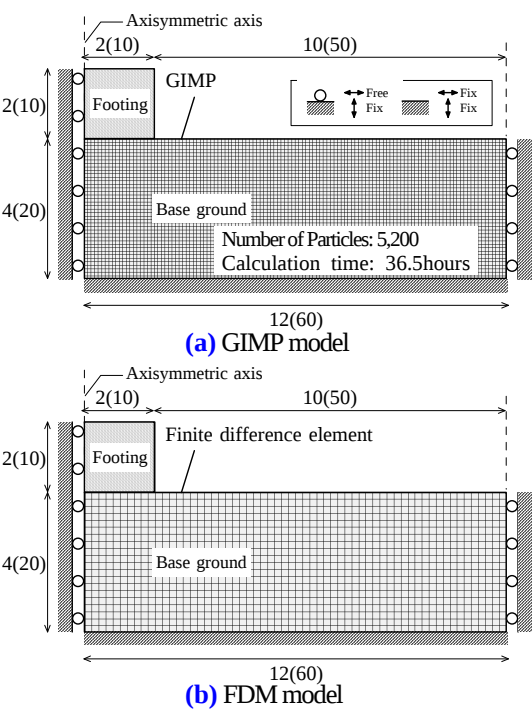


Fig.1 numerical model (unit:m)⁸⁾

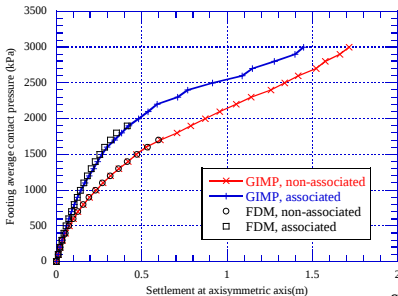


Fig.2 Pressure-settlement by GIMP and FDM⁸⁾

Table.1 Material properties⁸⁾

	Young's modulus E kPa	Poisson's ratio ν	Unit weight γ kN/m ³	Internal frictional angle ϕ deg	Cohesion c kPa	Dilatancy angle ψ deg
Footing	200000	0.3	50 to 1500	-	-	-
soil	20000	0.3	15	20	50	0/20

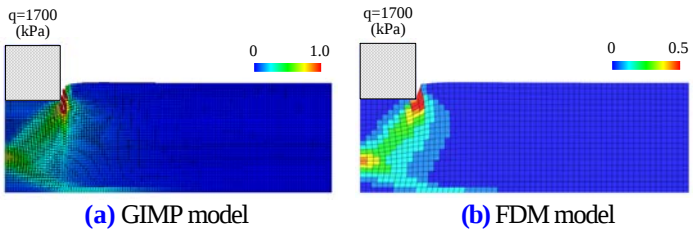


Fig.3 Non-dilative deformation (maximum shear strain contour)⁸⁾

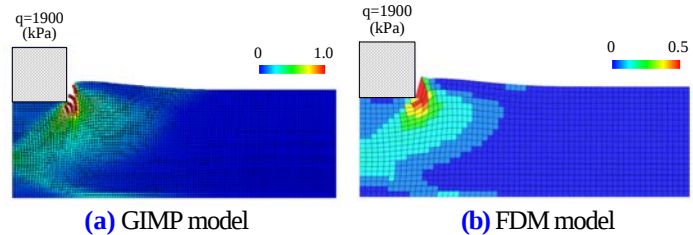


Fig.4 Dilative deformation (maximum shear strain contour)⁸⁾

算時間を併記した。model-1 は粒子モデルに比べて離散化要素数を半分以下に、計算負荷もおおよそ半分まで軽減している。

Fig.6 に貫入量－接地圧関係を示す。図中の実線（Particle-model）は粒子のみを用いて空間離散化した結果である。**Fig.6** によれば **Fig.5** に示す全ての解析モデルにおいて、体積変化の有無に関わらず、粒子モデルと同等の貫入量－接地圧関係を示すことが分かる。

Fig.7, **Fig.8** にそれぞれ、塑性時に体積変化のない場合、体積変化のある場合の地盤内最大せん断ひずみの分布図を示す。粒子モデル、いずれの粒子・要素混合モデルもすべて同等のひずみ分布を示しており、比較解析で用いた空間離散化（離隔距離が 1/2 基礎幅の 1 倍, 2 倍, 3 倍）条件では、同一の結果が得られることが分かる。**Fig.8** に示す、体積変化ありの場合で顕著であるが、せん断帯が粒子、要素を跨いで大変形が生じる場合、粒子および要素境界が変形、荷重共に連続しないことも想定される。しかしながら、本解析においては粒子と要素境界における不連続が見られず、空間離散化の境界で大変形が生じても精度良く基礎の貫入解析を実行できている。

4. まとめ 粒子法は、既存の格子法と同等の計算精度を有しかつ格子法に比べより大変形まで計算可能であることを示した。基礎側壁より基礎半径分の離隔まで粒子モデルとし、遠方を要素モデルとすることで計算精度を確保可能であること、また、計算負荷は離散化要素数に比例し、離散化要素数を減じることで計算負荷を軽減できることを示した。

参考文献 1) 桐山・福武, 計算格子に基づく数値計算法の軸対称定式化, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回学術講演会, I-177, 2020. 2) 福武・桐山, 軸対称問題における粒子・要素混合法とその適用, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回学術講演会, I-178, 2020. 3) Sulsky et al., Axisymmetric form of the material point method with applications to upsetting and Taylor impact problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 139, 409-429, 1996. 4) Kiriya, T., and Higo, Y.: Arbitrary particle domain interpolation method and application to problems of geomaterial deformation, Soils and Foundations, 60(6), 1422-1439, 2020. 5) Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C., and Lewis, R.W.: Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, Geotechnique, 25(4), 671-689, 1975. 6) ITASCA consulting group, FLAC3D version 5.0 manuals; theory and backgrounds, 2018. 7) 遠藤ら, 縁切鋼矢板を考慮した動的なニューマチックケーソン沈没解析, 平成 30 年度土木学会全国大会第 73 回学術講演会, 713-714, 2018. 8) Kiriya, T., and Higo, Y.: Axisymmetric particle-element coupled method for deformation problems of geomaterial, Soils and Foundations, 62(5), 101180-1-12, 2022.

※本稿は著者らの既報 8)の一部を和文報告として再編集したものである。

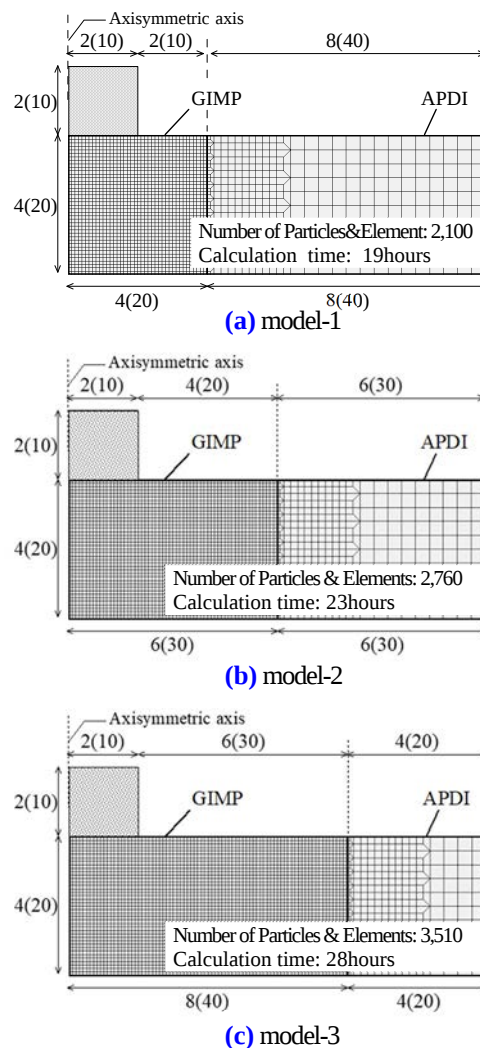


Fig.5 coupled spatial discretization (unit:m)⁸⁾

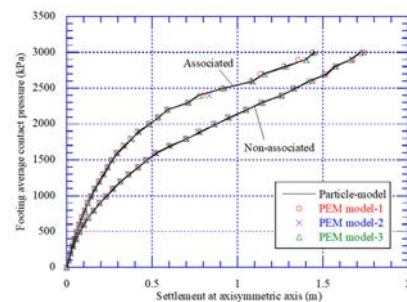


Fig.6 Comparison of pressure-settlement⁸⁾

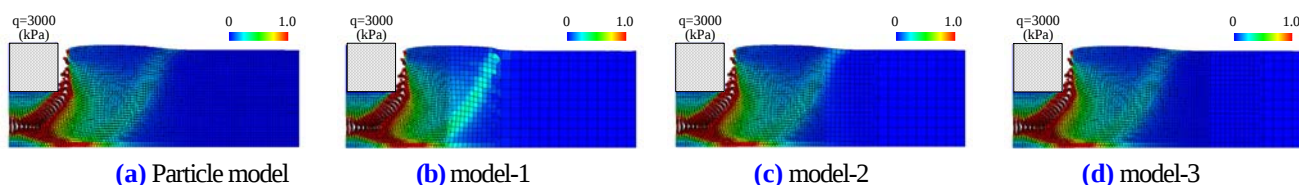


Fig.7 Non-dilative deformation under footing penetration among different spatial discretization (maximum shear strain contour)⁸⁾

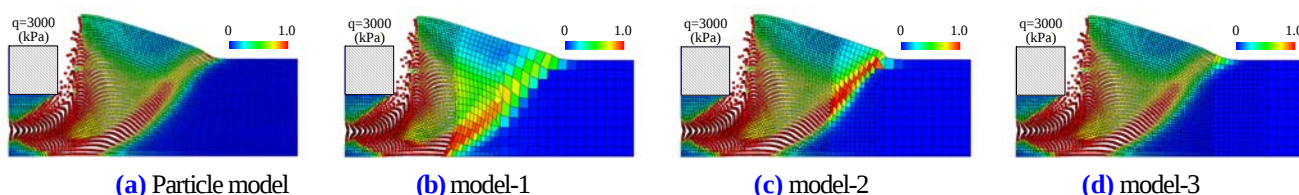


Fig.8 Dilative deformation under footing penetration among different spatial discretization (maximum shear strain contour)⁸⁾