

京都大学大学院工学研究科 正会員 ○中谷美登理
 京都大学大学院工学研究科 国際会員 橋本涼太
 京都大学大学院工学研究科 国際会員 肥後陽介

1. 研究背景と目的

Material Point Method (MPM) は背景格子と物理量を輸送する粒子を併用した連続体解析手法である。オリジナルのMPM では補間関数の導関数が要素間で不連続となることに起因して、粒子が格子をまたぐ際に応力が振動するCell-Crossing-Error と呼ばれる問題が生じることが報告されている。このMPM 特有の問題に対する解決策として二次B-spline 基底関数を用いる方法やGeneralized Interpolation Material Point Method(GIMP 法)などが提案されている。これらの手法はともに要素間で滑らかな補間関数を仮定して応力振動を防ぐ手法であるが、近似された変位場に違いが現れる。本研究では、MPM-DDA を用いた地盤と構造物の相互作用解析を例として取り上げ、補間関数の選択が解析結果に与える影響について考察する。

2. 補間関数の種類

2. 1 二次 B-spline 基底関数

二次 B-spline 基底関数では補間関数に C^1 連続な関数を用いることにより、要素境界で補間関数の導関数の連続性を満たす。一次元での、二次 B-spline 基底関数の補間関数と導関数のグラフを図 1(a)に示す。各節点の補間関数は 1.5 要素分離れた位置まで定義されているため、ある粒子の変位は常に隣接する 3 節点を参照して補間される。一般に、二次以上の B-spline 基底関数で補間された物理量は滑らかで丸みを帯びた分布となる。そのため、勾配が不連続に変化するような特異点では誤差が生じ得る。

2. 2 GIMP 法

GIMP 法では粒子について支配領域の概念を導入することで、滑らかな補間関数を導出し、導関数が要素境界で連続となるように定義する。一次元での、GIMP 法の補間関数と導関数のグラフを図 1(b)に示す。粒子の支配領域が所属要素からはみ出る場合は隣接節点も参照して曲線的な形状近似がなされるが、粒子が所属要素内に収まる場合は線形補間となる。

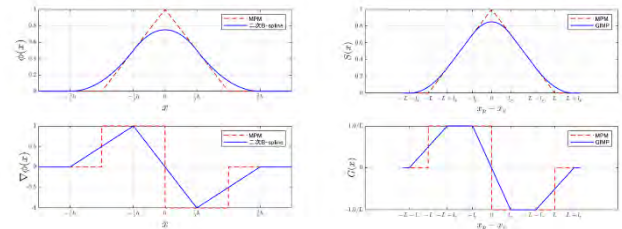


図 1 補間関数と導関数

((a) 二次 B-spline 基底関数, (b) GIMP 法)

3. 解析手法

本研究では、地盤と構造物の相互作用を考慮するにあたり、解析手法に MPM-DDA を用いる。Discontinuous Deformation Analysis(DDA) は粒子と辺の距離に基づいて接触判定を行い、接触ペナルティ項を付与して接触条件を近似的に満たす。接触アルゴリズムを持つ陰解法ベースの手法である。地盤を陰解法 MPM で、構造物を DDA でモデル化し、両者を接触ペナルティ項を介して連成することで系全体の力のつり合いを各時刻で満たす強連成解析が可能となる。

4. 解析条件

補間関数の選択が解析結果に影響を検証することを目的とし、MPMDDA を用いて帯基礎の貫入解析を行った。図 2(a)のように対称性を考慮して右半分のみをモデル化し、平面ひずみ条件とした。モデルは DDA でモデル化された帯基礎と MPM でモデル化された地盤の二つからなり、一要素当たりの粒子数は 16 とした。時間増分は 0.01s とし、2000 ステップ解析を行った。荷重条件については全ステップを通して鉛直方向下向きに 2.0m の変位を与える変位制御で行い、自重はなしとした。構成則には,Drucker-Prager モデルを用いた。両ケースともに実質的な要素変位の近似次数は一次であり、FEM の四辺形双一次要素と同様に体積ロッキングが生じることが懸念されるため、対策として B-bar 法を用いた。

Midori, NAKAYA, Ryota HASHIMOTO, Yosuke HIGO

higo.yosuke.5z@kyoto-u.ac.jp

ここでは、補間関数の選択が解析結果に与える影響を見ることを目的とし、補間関数に二次 B-spline 基底関数を用いた場合と GIMP 法を用いた場合の 2 ケースについて解析を行った。

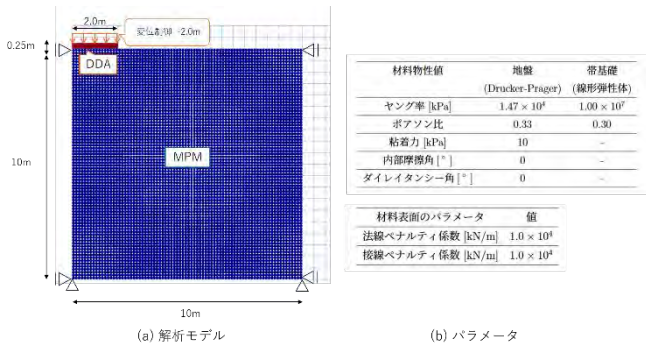


図2 解析モデルとパラメータ

5. 結果と考察

各ケースについて荷重—変位関係と各時刻の地表面形状を並べた結果を図3と図4に示す。両ケースの結果は変位量0.28 m までは概ね一致する結果を示しているが、二次B-spline基底関数(図3)では変位量0.3m 前後で荷重値の急減と回復が見られ、その後も荷重値が振動する傾向にある。この原因について、図3に示す荷重の急減前後の基礎端部周辺の粒子の配置に着目して考察する。まず、荷重の減少開始直後(図3(a))には、基礎直下で粒子剥離が生じている。その後、変位が進むと、帯基礎角部と接触していた粒子が外側へ押し出されることで、基礎端部と粒子との接触が失われており、これは荷重の減少が最大となるタイミングと一致している(図3(b))。そして、解放された地盤がリバウンドして基礎と再接触することで荷重が回復している(図3(c))。よって、二次B-spline基底関数を用いた際の荷重値の振動の原因は、基礎端部での粒子の剥離と再接触にあると考えられる。本来、帯基礎を地盤に貫入する際、その隅角部において地表面の勾配が不連続になる特異点が生じる。先述のように二次B-spline 基底関数では粒子が所属要素と常に隣接する要素の節点を参照し、補間で表現される変位場は空間的に滑らかな分布を示す。そのため、帯基礎端部の地表面形状を表現する際に図3(a)のようなアンダーシュートを生じることとなり、基礎と粒子の間で剥離する。

一方、GIMP では図4のように二次B-spline基底関数と比べて地表面の近似形状が直線的になり、基礎端部における地表面形状の急変を捉えやすいため、荷重の振動が抑制されていると考えられる。

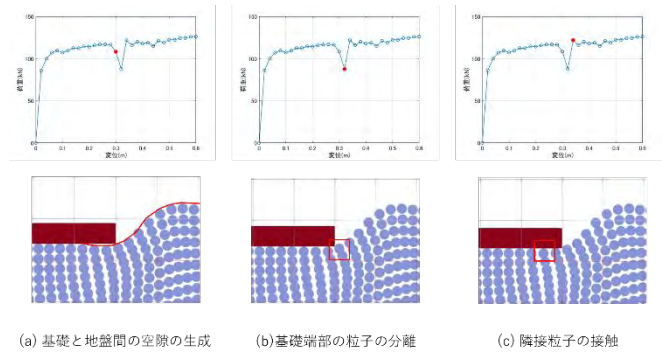


図3 荷重—変位関係と地表面形状
(二次 B-spline 基底関数)

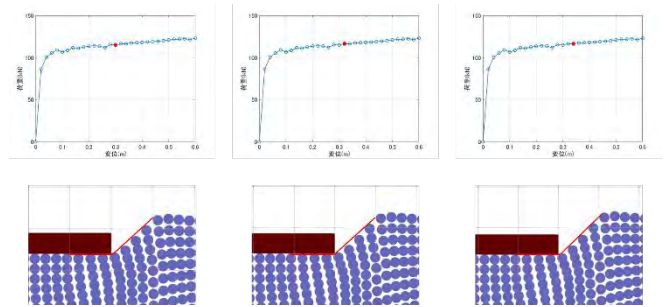


図4 荷重—変位関係と地表面形状 (GIMP 法)

6. 結論

本研究では、MPM-DDA による地盤と構造物の相互作用問題の解析において、MPM で用いられる補間関数の選択が解析結果に与える影響について考察した。その結果、基礎の隅角部のように地盤と構造物の界面において幾何学的な特異点が存在すると、二次 B-spline 基底関数では界面の形状変化を近似する上での誤差を生じることが分かった。また、要素間の補間関数の滑らかさを与えつつも線形補間をベースとする GIMP 法ではこの問題が抑制されることが示された。なお、この現象は構造物の状を線分で表現し、それと粒子の距離に基づき接触判定と接触処理を行うアプローチ全般で起こり得るため、本研究で得られた知見は MPM-DDA に限らず、MPM を用いて行われる接触解析一般において留意すべき点であると言える。

参考文献

- 1) Sulsky, D., Chen, Z. and Schreyer, H.L., *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 118, No. 1, pp. 179-196, 1994.
- 2) Steffen, M., Kirby, R.M., and Berzins, M., *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 76, No. 6, pp. 922-948, 2008.
- 3) Bardenhagen, S. and Kober, E., *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 5, June, 2004.
- 4) Hughes, T. J. R., *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 15, No. 9, pp. 1413-1418, 1980.