

OPINIA
dotycząca rozprawy doktorskiej
mgra inż. Nikhila Madana
n.t.

New formulation of the discrete element method with deformable particles

1. Podstawa opracowania opinii

Podstawą opracowania opinii są:

- pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, pana dra hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego informujące o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Nikhila Madana, datowane w dniu 26 kwietnia 2019 r.;
- dołączony do pisma tekst rozprawy doktorskiej wraz z CV jej Autora i kopiami dyplomów potwierdzających ukończenie przez Niego studiów I i II stopnia oraz wykaz Jego publikacji.

2. Przedmiot i cel rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest udoskonalenie metody elementów dyskretnych (angielski skrót DEM – discrete element method) poprzez uwzględnienie odkształceń elementów, które w tradycyjnym podejściu traktowane są jako idealnie sztywne. Zmodyfikowana metoda (angielski skrót DDEM – deformable discrete element method) – zaproponowana w pracy – ma szerszy zakres zastosowań w porównaniu do swojego pierwowzoru. Celem pracy jest weryfikacja spodziewanych zalet udoskonalonego podejścia, pozwalających złagodzić ograniczenia DEM i lepiej opisywać makroskopowe własności ośrodków modelowanych przy jej użyciu, w tym także ośrodków ciągłych. Autor przeanalizował warunki zbieżności zaproponowanej metody, stabilność algorytmu rozwiązującego zagadnienie kontaktu między elementami oraz zbadał zależność makroskopowych własności modelowanego ośrodka od parametrów charakteryzujących to zjawisko kontaktu. Przedmiotem rozprawy jest ponadto zastosowanie DDEM do modelowania zagadnienia propagacji fali sprężystej w ośrodku ciągłym. W rozprawie analizowano zagadnienia dwuwymiarowe, przyjmując kołowy kształt elementów.

3. Zawartość rozprawy

Praca jest napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów poprzedzonych streszczeniami w językach angielskim i polskim. Pierwszy z rozdziałów stanowi wprowadzenie, natomiast ostatni zawiera wnioski końcowe. Praca zawiera listę oznaczeń oraz spis cytowanych prac, mający 164 pozycje. Rozprawa liczy łącznie 138 stron.

4. Opis i ocena rozprawy

Wybór tematu pracy jest właściwy. Uwzględnienie wpływu odkształcalności elementów dyskretnych, jeśli nie eliminuje, to przynajmniej łagodzi niedoskonałości metody elementów dyskretnych, sformułowanej w sposób standardowy i pozwala istotnie rozszerzyć zakres zastosowań metody. Metoda DEM jest stosowana jako narzędzie modelowania zjawisk fizycznych i analizy zagadnień inżynierskich przez wielu naukowców i zainteresowanie nią rośnie w ostatnim okresie, co zostało podkreślone w pierwszym rozdziale pracy.

Poniżej przedstawiony jest opis każdego rozdziału rozprawy wraz z uwagami dotyczącymi danego rozdziału.

4.1. W pierwszym rozdziale rozprawy Autor umotywował wybór tematu, przedstawił obecny stan zaawansowania metody elementów dyskretnych oraz sformułował cel i zakres pracy. Podsumowując zakres badań opisanych w rozprawie, Autor sformułował jej tezę:

The new formulation of discrete element method with deformable particles is capable of mitigating the limitations of standard formulation and broadening the range of macroscopic properties that can be represented using discrete element method.

Tezę tę Autor potwierdził przedstawiając wyniki swoich badań w następnych rozdziałach pracy.

Nie mogę się zgodzić z uwagą Autora (str. 22), że metoda punktów materialnych (MPM) – w kontekście jej porównania z DEM – ze względu na czas obliczeń ma ograniczone zastosowanie z uwagi na małą liczbę cząstek (wiersze 10–11 od dołu).

4.2. W rozdziale drugim zostały opisane algorytmy standardowej DEM oraz zaproponowanego przez Autora podejścia uwzględniającego odkształcalność elementów. Autor założył, że stany naprężenia i odkształcenia w obszarze pojedynczego elementu są jednorodne. Stan naprężenia uzyskuje się na drodze uśrednienia jego składowych wiążąc je z siłami kontaktowymi zgodnie z formułą zaproponowaną przez S. Ludinga. Stosując liniowe związki sprężystości, oblicza się przemieszczenia punktów kontaktu elementów i dalej wpływ deformacji elementu na siły kontaktowe. Autor przedstawił procedurę przyrostową udoskonalonej metody. Następnie rozważył poszczególne wyrażenia występujące w równaniu zachowania energii, w celu wykorzystania tej zasady jako narzędzie kontroli dokładności obliczeń. Autor zweryfikował zaproponowany model DDEM, rozważając jedną warstwę elementów poddaną osiowemu ścisnieniu. Autor pokazał, że odpowiednio dobierając wartości parametrów sztywności opisujących kontakt elementów w DDEM oraz współczynnika Poissona można odtworzyć efekty obserwowane w rozwiązaniu zagadnienia kontaktowego układu dwóch walców. Autor rozwiązał to ostatnie zagadnienie za pomocą metody elementów skończonych.

Pisząc związki (2.33) i (2.34), definiujące siły tłumienia, Autor stwierdza, że współczynniki tłumienia, które w nich występują, mogą być związane z tłumieniem krytycznym. Przydałby się komentarz, czy zawsze powinny być wybrane w ten sposób. Czy wybór tych współczynników w przypadku DEM wynika z przesłanek fizycznych, czy podyktowany jest potrzebą osiągnięcia stabilności rozwiązania numerycznego?

W równaniu (2.59), wyrażającym energię potencjalną sił kontaktowych brakuje mnożnika $\frac{1}{2}$.

Czemu w podpisie rys. 2.9 jest użyty termin *rheological model*, chociaż symbole k_p i k_n występujące na rysunku, oznaczają współczynniki sprężystości?

4.3. W rozdziale trzecim Autor zajmuje się określeniem warunków zbieżności i stabilności rozwiązania uzyskanego metodą DDEM. Zaczynając od algorytmu niejawnego, Autor wyprowadził warunek jego zbieżności rozważając maksymalną wartość własną macierzy definiującej zależność między różnicami sił kontaktowych odpowiadających dwóm kolejnym iteracjom. Rozwiązując zagadnienie ścisnienia osiowego nieskończenie długiego rzędu elementów dyskretnych analitycznie i odpowiadającego mu zadania przy użyciu dwóch elementów numerycznie, Autor

osiągnął zgodność wyników, co potwierdza poprawność implementacji komputerowej zaproponowanej metody DDEM. Podobnie rozważając zagadnienie ściskania jednokierunkowego pasma złożonego z elementów upakowanych regularnie w postaci siatek prostokątnej i heksagonalnej, Autor otrzymał zbieżność rozwiązań zgodnie z wyprowadzonymi analitycznie jej warunkami. Warunki zbieżności, wiążące wartości modułu Younga i liczbę Poissona charakteryzujące własności sprężyste elementów oraz wartość sztywności kontaktowej, zostały zilustrowane w postaci czytelnych wykresów.

W celu zachowania efektywności działania DDEM na poziomie zbliżonym do standardowej DEM, Autor również rozważył algorytm jawny i pokazał, że ten sam warunek stabilności algorytmu obowiązuje w przypadku obu podejść: standardowego i uwzględniającego odkształcalność elementów.

W równaniu (3.7) pominięto po lewej stronie numer iteracji $k-1$ (jako górny indeks symbolu siły kontaktowej).

Zdanie „*However, the norm of \mathbf{B} could be small in some norms and quite large in others.*” (strona 50, wiersze 4-5) należałoby przeformułować.

4.4. Celem rozważań przedstawionych w rozdziale 4. jest pokazanie, że zaproponowane w rozprawie podejście pozwala odtworzyć zachowanie liniowo sprężystego, izotropowego ośrodka ciągłego. Rozważając ściskanie ciała o przekroju prostokątnym złożonym z regularnie upakowanych w postaci siatki prostokątnej dysków, Autor wyznaczył zależności wartości parametrów ośrodka ciągłego: E i ν od parametrów wejściowych metody elementów dyskretnych: k_n , E_p i ν_p , które przedstawił w postaci serii wykresów. Autor przeprowadził podobną analizę w przypadku ciała o przekroju kwadratowym złożonym z elementów upakowanych nieregularnie. Rozważając to drugie zadanie, Autor rozszerzył analizę poza zakres liniowo sprężysty i otrzymał zależność naprężenie-odkształcenie obrazującą efekt osłabienia materiału właściwy kruchemu pękaniu. Autor porównał wyniki uzyskane zaproponowaną metodą DDEM z wynikami otrzymanymi za pomocą standardowej DEM oraz metodą elementów skończonych, a także z wartościami wynikającymi z hipotezy Voigta.

Równania (4.1)–(4.3) napisane są niekonsekwentnie, ich lewe strony nie zawierają indeksów, natomiast prawe – tak.

Autor jako jedno z rozwiązań odniesienia chce mieć rozwiązanie uzyskane metodą elementów skończonych, ale zasadniczo koncentruje się na porównaniu z rozwiązaniem analitycznym zadania quasi-statycznego, co potwierdza na stronie 78. (wiersz 11. od dołu). W przypadku jednorodnego stanu naprężenia poprawne rozwiązanie dostępne metodą elementów skończonych jest rozwiązaniem dokładnym i można je otrzymać stosując wyłącznie jeden element (Autor stosuje tyle samo elementów skończonych co dyskretnych). Wprowadzenie symboli ν_{FEM} lub E_{FEM} (str. 80. i 82.) jest nieporozumieniem – te parametry są po prostu związane z modelem liniowo sprężystego ośrodka ciągłego.

Autor nazywa wykresy na rys. 4.3, 4.5 izoliniami (ang. *contours*); powinny być nazywane mapami (ang. *colour maps*). Izolinie można rozpoznać tylko na wykresach, mających charakter ciągły (np. rys. 4.5c lub 4.5d) jako granice sąsiednich podobszarów, gdzie występuje zmiana koloru.

Nie jest jasno sformułowane, czy zadanie dwukierunkowego ściskania (rys. 4.19a) dotyczy płaskiego stanu odkształcenia, czy płaskiego stanu naprężenia. Wzory (4.34) i (4.35) budzą wątpliwość. Na przykład, w przypadku płaskiego stanu odkształcenia powinno być $\sigma_h = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$. Czy w związku z powyższą uwagą wykres na rys. 4.20a należałoby skorygować?

4.5. W rozdziale piątym Autor pokazał, że udoskonalona metoda elementów dyskretnych (DDEM) pozwala analizować zjawiska falowe w ośrodku sprężystym. W tym celu rozważył zadania propagacji fal podłużnej i poprzecznej w pręcie o stałym przekroju podpartym na jednym końcu. Fale wywołane były przez wymuszenie przemieszczeń w otoczeniu drugiego końca pręta w kierunkach odpowiednio podłużnym i poprzecznym. Wyniki obliczeń zostały

porównane z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowej DEM. Obliczenia zostały wykonane przy założeniu nieregularnego upakowania elementów w postaci dysków o zróżnicowanych średnicach.

Wzór (5.5) nie jest napisany poprawnie. Prawdopodobnie wymiar oznaczony na rys. 5.2 jako x powinien być oznaczony jako L .

4.6. W ostatnim rozdziale Autor podsumował wyniki przedstawione w rozprawie, wymienił oryginalne składniki rozprawy i nakreślił kierunki dalszych badań związanych z tematem pracy.

4.7. Ocena rozprawy:

Rozprawa jest napisana w sposób jasny i staranny. Autor precyzyjnie sformułował podstawowe cele pracy i je zrealizował. Wybór tematu uważam za uzasadniony – rozwinięcie metody elementów dyskretnych przez uwzględnienie w jej algorytmie wpływu odkształcalności elementów jest kierunkiem pożądanym i otwiera szersze pole zastosowań metody. Autor starannie zbadał zbieżność i stabilność metody i określił ich warunki, co jest wymagane w przypadku każdej metody obliczeniowej. Autor wykazał, że udoskonalona metoda może w szerszym zakresie odtwarzać zachowanie ośrodka ciągłego, w szczególności zjawisko propagacji fali w takim ośrodku. Praca potwierdza osiągnięcie przez Autora dojrzałości w prowadzeniu badań naukowych.

Wydaje się, że należałoby porównać efektywność obu podejść do metody elementów dyskretnych: DDEM i standardowej DEM pod kątem potrzebnego czasu wykonania obliczeń.

Pewien niedosyt wywołuje fakt, że Autor nie pokusił się o rozwiązanie w ramach rozprawy bardziej złożonego zagadnienia inżynierskiego, np. z jednej z dziedzin, o których Autor wspomina w pracy, jak inżynieria lądowa lub geotechnika.

Powyższe uwagi nie zmieniają mojej ogólnej oceny pracy, która jest pozytywna. **W moim przekonaniu opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej.**

5. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Praca – jak wspomniano wcześniej – jest napisana w języku angielskim. Autor używa jasnych sformułowań, co sprawia, że rozprawa jest czytelna i oceniam ją jako napisaną poprawnie, chociaż chciałbym wskazać na kilka wyjątków, które budzą moje wątpliwości i wymieniam je poniżej.

Uwagi dotyczące tekstu pracy:

- Autor niekonsekwentnie stosuje partykułę *the*, np. nie jest ona potrzebna w przypadku fragmentu zdania *the Poisson's ratio*, str. 15, w. 15.
- Autor niekonsekwentnie stosuje znaki przecinka i kropki, szczególnie po formułach matematycznych wyróżnionych w oddzielnych wierszach.
- Str. 16, wiersze 17–18 i inne. Autor używa frazy *infinite degrees of freedom* lub *finite degrees of freedom*. Proponowałbym użyć *infinite number of degrees of freedom* lub *finite number of degrees of freedom*.
- Str. 19, wiersz 7. Zamiast *Extension form* powinno być *Extension from*.
- Str. 20, wiersz 8. Zamiast *w.r.t. to* powinno być *w.r.t.*
- Str. 41, wiersz 3. Zamiast *equal sized* powinno być *equally sized*.
- Str. 52, wiersz 15. Zamiast *k-the* powinno być *kth*.

- Str. 71, wiersz 6. Zamiast *analytical numerical* powinno być *analytical and numerical*.
- Str. 71, wiersz 5 od dołu. Zamiast *both standard and deformable DEM case* powinno być *both the standard and deformable DEM cases*.
- Np. str. 87, wiersz 3 od dołu. Zwrot *in contrary to ...* jest niepoprawny. Zwrot ten funkcjonuje jako część zdania (*On the contrary, ...*). W tym przypadku należy użyć *in contrast to ...*
- Str. 112, wiersz 8. Zamiast *infact* powinno być *in fact*.
- Str. 112, wiersz 14. Zamiast *paramters* powinno być *in parameters*.

6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Nikhila Madana nt. *New formulation of the discrete element method with deformable particles* zawiera oryginalny wkład Autora w zakresie zastosowania nowoczesnych metod obliczeniowych w naukach technicznych. Rozprawa i wyniki w niej przedstawione potwierdzają wysoki poziom wiedzy Autora w tym zakresie i jego umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Zdzisławski

