

SYMULACJA KOMPUTEROWA PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH GLEBY NA BAZIE MODELI JANOSI-HANAMOTO ORAZ COULOMBA-MOHRA

Zbigniew Błaszkiwicz, Artur Szafarz

Institut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono program komputerowy do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gleby i symulacji zależności naprężeń ścinających od poziomego odkształcenia gleby obliczanej na bazie modeli Janosi-Hanamoto i Coulomba-Mohra. W badaniach symulacyjnych wykazano, że modele dobrze opisują nowe zależności naprężeń ścinających od poziomego odkształcenia gleby uzyskane metodą zmodyfikowaną w aparacie bezpośredniego ścinania przy narastających naprężeniach normalnych. Testy zostały przeprowadzone dla wilgotności gleby 4% wag. i dla maksymalnych naprężeń normalnych 70 i 130 kPa.

Słowa kluczowe: bezpośrednie ścinanie, modele, program komputerowy, aproksymacja

Wstęp i cel pracy

Modele opisujące zjawiska zachodzące na powierzchni współpracy kół z podłożem są podstawą prognozowania parametrów trakcyjnych kół pojazdów rolniczych oraz agrotechnicznych i ekologicznych skutków ich oddziaływania na glebę. Większość tych modeli jest oparta o parametry wytrzymałościowe gleby, oznaczane zarówno w warunkach polowych jak i laboratoryjnych. W tym zakresie zmierza się do tego, aby uzyskiwane podczas pomiarów laboratoryjnych parametry wytrzymałościowe coraz dokładniej opisywały glebę dla zwiększenia dokładności uzyskiwanych wyników i budowanych modeli. W zmodyfikowanym teście zaproponowanym przez Błaszkiwicza [Błaszkiwicz 2002] pomiary parametrów wytrzymałościowych gleby są przeprowadzane w aparacie bezpośredniego ścinania przy narastających naprężeniach normalnych, podobnie, jak to ma miejsce pod kołami na długości kontaktu opony z podłożem. Powstało jednak pytanie, czy nowe zależności otrzymywane metodą zmodyfikowaną mogą być opisane za pomocą znanych równań Janosi-Hanamoto [Janosi i Hanamoto 1962] oraz Coulomba-Mohra [Kezdi 1969] stosowanych dotychczas do opisu testów standardowych.

W niniejszej pracy przedstawiono program komputerowy do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gleby oraz wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych przy pomocy tego programu dotyczące wyznaczenia zależności naprężeń ścinających glebę od jej odkształcenia poziomego z modeli Janosi-Hanamoto oraz Coulomba-Mohra, które porównano z wynikami badań doświadczalnych.

Metody badań

W pracy uzyskano zależności naprężeń normalnych od poziomego odkształcenia gleby w badaniach przeprowadzonych metodą standardową i zmodyfikowaną. Podczas ścinania gleby w aparacie bezpośredniego ścinania AP-2a, po zadaniu wymaganych naprężeń normalnych, wymuszano ruch górnej części skrzynki powodując jej poziome przemieszczenie j i jednocześnie mierzono wartość poziomej siły ścinającej, na podstawie, której obliczano działające naprężenia ścinające τ .

Doświadczenie przeprowadzono dla gleby lekkiej, o składzie granulometrycznym piasku gliniastego, pobranej z pola z naruszeniem struktury o wilgotności 4% wag. W pierwszym etapie badań wykonano ścinanie gleby (po konsolidacji próbki), zgodnie z metodą standardową, przy stałych naprężeniach normalnych: 70 i 130 kPa i w zakresie przemieszczenia (odkształcenia) poziomego j gleby od 0 do 40 mm. W etapie drugim, badania przeprowadzono metodą zmodyfikowaną przy naprężeniach normalnych narastających liniowo podczas procesu ścinania gleby do ich wartości końcowych 70 i 130 kPa. Naprężenia normalne wzrastały liniowo od zera na początku procesu ścinania gleby do maksymalnej wartości, występującej przy określonym poziomym odkształceniu, nazwanym w pracy przemieszczeniem granicznym j_g , wynoszącym w pracy $j_g = 5, 10$ i 20 mm. Narastanie obciążenia na próbkę gleby w skrzynce aparatu realizowano przez przesuwanie obciążnika na dźwigni połączonej z układem wywierania nacisku. Uzyskane wyniki badań, w postaci zależności naprężeń ścinających gleby od przemieszczeń poziomych $\tau[j]$, uzyskane z badań metodą standardową i zmodyfikowaną przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

W badaniach symulacyjnych sprawdzano, czy zależności $\tau[j]$, uzyskane z badań doświadczalnych metodą zmodyfikowaną, można opisać za pomocą znanych równań Janosi-Hanamoto oraz Coulomba-Mohra, stosowanych dotychczas z powodzeniem do opisu testów standardowych. Obliczano zatem wartości naprężeń stycznych gleby z poniżej przedstawionego równania (1), do którego maksymalne naprężenia ścinające wyznaczano z równania Coulomba–Mohra (2). Zastosowany wzór Janosi-Hanamoto ma postać:

$$\tau = \tau_{max} \left(1 - e^{-\frac{j}{K}}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- τ – naprężenie styczne [kPa],
- τ_{max} – maksymalne naprężenie ścinające [kPa],
- j – poziome odkształcenie gleby [mm],
- K – moduł odkształcenia poziomego gleby [mm].

Znane równanie Coulomba–Mohra, z którego wyznaczano maksymalne naprężenia ścinające τ_{max} jest następujące:

$$\tau_{max} = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (2)$$

gdzie:

- σ - naprężenie normalne gleby [kPa],
- ϕ - kąt tarcia wewnętrznego gleby [°],
- c - spójność gleby, kPa].

Do weryfikacji przydatności powyższych równań były niezbędne dane wejściowe w postaci następujących parametrów wytrzymałościowych gleby: c , ϕ , K , n , k oznaczanych przedstawionymi poniżej metodami.

Spójność c i kąt tarcia wewnętrznego ϕ gleby określono ogólnie znaną metodą na podstawie zależności maksymalnych naprężeń ścinających od naprężeń normalnych, dla serii pomiarów przeprowadzonych metodą standardową dla $j_g = 0$ (naprężenie normalne stałe) i metodą zmodyfikowaną dla $j_g = 5, 10$ i 20 mm.

Parametr trakcyjny K wyznaczono metodą podaną przez Bekkera [Bekker 1960] w oparciu o wzór przedstawiony poniżej na podstawie empirycznych krzywych ścinania $\tau[j]$:

$$K = \frac{j}{\ln \frac{\tau_{max}}{\tau_{max} - \tau}} \quad (3)$$

Parametry trakcyjne gleby n , k wyznaczano w oparciu o przedstawiony poniżej wzór (4) Saakjana [Saakjan 1959] na podstawie zależności nacisku płytki bewametru q_b od jej zagłębienia z_b , uzyskanych w polu za pomocą bewametru ręcznego, którego opis przedstawiono w pracy Błaszkiwicza [Błaszkiwicz 2001]:

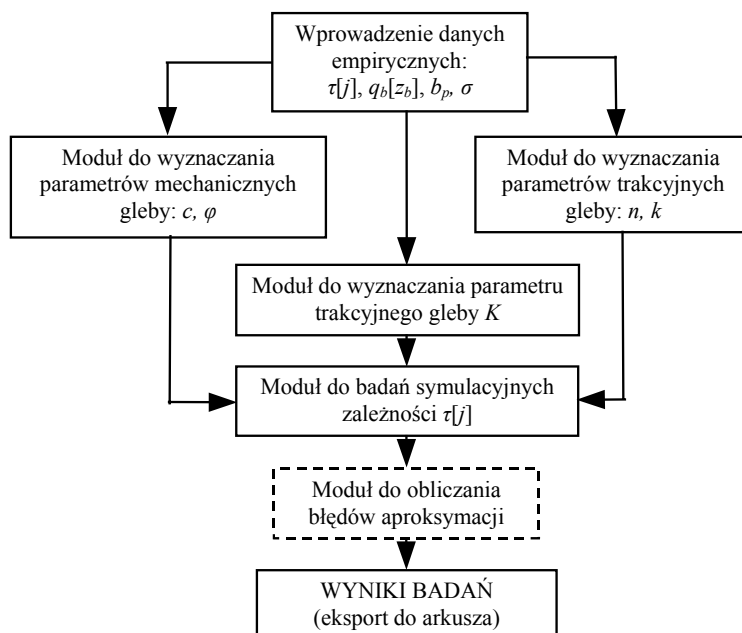
$$q_b = k \cdot \left(\frac{z_b}{b_p} \right)^n \quad (4)$$

gdzie:

- k – współczynnik charakteryzujący parametry trakcyjne gleby [$\text{kN} \cdot \text{cm}^{-2}$],
- n – bezwymiarowy wykładnik,
- b_p – szerokość płytki bewametru [cm],
- q_b – nacisk jednostkowy płytki bewametru [kPa],
- z_b – zagłębienie płytki bewametru [cm].

Zbudowano symulacyjny program komputerowy w oparciu o analizę zależności zmodyfikowanego testu bezpośredniego ścinania gleby i powyżej cytowanych modeli, którego ogólny algorytm przedstawiono na rys. 1. Program posiada moduły do wyznaczania zależności naprężeń ścinających od odkształcenia poziomego gleby $\tau[j]$ oraz jej parametrów wytrzymałościowych: c , ϕ , K , n . Projekt programu powstał w postaci diagramów notacji UML, zaś sam program został zaimplementowany w języku C++ w środowisku Borland C++Builder 6.

W badaniach symulacyjnych przeprowadzono obliczenia zależności $\tau[j]$ z modeli (1) i (2) i w oparciu o powyżej przedstawione dane wejściowe wyznaczone dla testu standardowego i zmodyfikowanego.



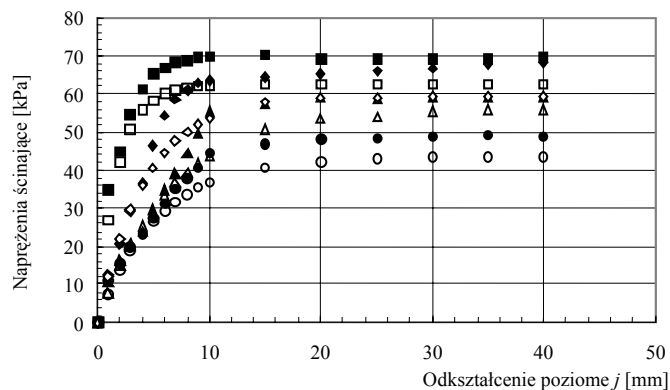
Rys. 1. Algorytm numeryczny programu komputerowego

Fig. 1. Numerical algorithm of the computer program

Wyniki badań i ich omówienie

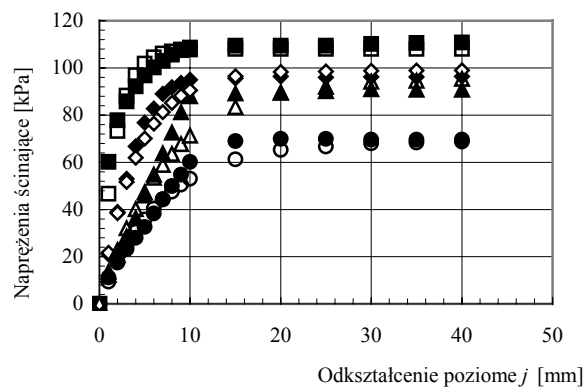
Uzyskane zależności $\tau[j]$ z badań doświadczalnych przeprowadzonych metodą standardową i zmodyfikowaną oraz odpowiednio z badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 2 i 3. Na podstawie analizy tych danych można sformułować ogólne stwierdzenie, że zależności $\tau[j]$ uzyskane z testu zmodyfikowanego mają przebieg podobny do uzyskanych z testu standardowego. W każdym przypadku naprężenia ścinające wzrastają wraz ze wzrostem odkształcenia poziomego gleby i zbliżają się asymptotycznie do maksymalnej wartości.

Zastosowanie jednak narastającego obciążenia normalnego podczas zmodyfikowanego procesu ścinania powoduje, że wzrost naprężeń ścinających jest tym mniejszy im większe wartości przyjmuje graniczne przemieszczenie poziome gleby, do którego narasta to obciążenie. Ponadto wykazano, że im większe wartości przyjmuje graniczne przemieszczenie poziome gleby, tym maksymalne naprężenia ścinające są mniejsze. Te zależności aproksymowano w pracy równaniami Janosi-Hanamoto w oparciu o wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego i parametru K wyznaczonych odpowiednio na bazie wyników badań uzyskanych metodą standardową i zmodyfikowaną. Jak wynika z analizy zależności przedstawionych na rysunkach 2 i 3, równania te na ogół dobrze opisują wyniki badań empirycznych tj. zależności $\tau[j]$ uzyskane metodą zmodyfikowaną dla dwóch wartości maksymalnych naprężeń normalnych 70 i 130 kPa.



Rys. 2. Zależności $\tau[j]$ uzyskane z badań doświadczalnych oraz symulacyjnych dla maksymalnych naprężeń normalnych 70 kPa. Oznaczenia badań doświadczalnych: test standardowy - ■; test zmodyfikowany przy naprężeniach normalnych narastających do wartości granicznej odkształcenia poziomego gleby: ◆ - $j_b = 5$ mm, ▲ - $j_b = 10$ mm, ● - $j_b = 20$ mm. Oznaczenia badań symulacyjnych: test standardowy - □; test zmodyfikowany przy narastających naprężeniach normalnych do wartości granicznej odkształcenia poziomego gleby: △ - $j_b = 5$ mm, ◇ - $j_b = 10$ mm, ○ - $j_b = 20$ mm.

Fig. 2. Relations $\tau[j]$ obtained through experimental and simulation research for maximum normal stress of 70 kPa. Symbols for experimental research: standard test - ■; modified test at growing normal stress values, up to the boundary value of horizontal soil strain: ◆ - $j_b = 5$ mm, ▲ - $j_b = 10$ mm, ● - $j_b = 20$ mm. Symbols for simulation research: standard test - □; modified test at growing normal stress values, up to the boundary value of horizontal soil strain: △ - $j_b = 5$ mm, ◇ - $j_b = 10$ mm, ○ - $j_b = 20$ mm.



Rys. 3. Zależności $\tau[j]$ uzyskane z badań doświadczalnych oraz symulacyjnych dla maksymalnych naprężeń normalnych 130 kPa. Oznaczenia jak na rys. 2

Fig. 3. Relations $\tau[j]$ obtained through experimental and simulation research for maximum normal stress of 130 kPa. Symbols as in fig. 2

Opracowany i przedstawiony nieskomplikowany program komputerowy jest bardzo przydatny i znacznie przyspiesza wykonywanie badań symulacyjnych, zwłaszcza, że zawiera moduły do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gleby, stanowiących parametry wejściowe do tych obliczeń. Jego kompatybilność sprawia, że uzyskane wyniki można eksportować i graficznie eksponować w postaci zależności na wykresach za pomocą innych znanych programów.

Wnioski

1. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wykazano, że model Janosi-Hanamoto uwzględniający równanie Coulomba-Mohra dobrze opisuje zależności naprężeń ścinających od poziomego odkształcenia gleby $\tau[j]$ uzyskane ze zmodyfikowanego testu bezpośredniego ścinania realizowanego przy narastających naprężeniach normalnych.
2. Zaproponowany program komputerowy do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych gleby oraz do prowadzenia badań symulacyjnych zależności $\tau[j]$ znacznie ułatwia i przyspiesza obliczenia.

Bibliografia

- Błaszkiwicz Z.** 2002. Badania wytrzymałości gleby przy narastających naprężeniach normalnych w procesie bezpośredniego ścinania. Inżynieria rolnicza. Nr 5(38). s. 189-195.
- Błaszkiwicz Z.** 2001. Polowe badania wpływu występu na zależność nacisk-zagłębienie płytki bewametry. Inżynieria Rolnicza. Nr 13(33). s. 90-96.
- Bekker M.G.** 1960. Off the road locomotion. The Univ. of Michigan Press. Michigan.
- Kezdi A.** 1969. Handbuch der Bodenmechanik. Band. 2. Bodenmechanik im Erd-,Grund-und Strassenbau. VEB Verlag fuer Bauwesen. Berlin.
- Janosi Z., Hanamoto B.** 1962. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Edizioni Minerva Technica.
- Saakjan S.S.** 1959. Wzajemodziejstwie biedomogo koleca i poczwy. Erewań.

THE COMPUTER SIMULATION OF THE SOIL STRENGTH PARAMETERS ON THE BASIS OF THE JANOSI-HANAMATO AND THE COULOMB-MOHR MODELS

Abstract. The paper presents a computer application used to determine soil strength parameters and to simulate relations between shearing stresses and horizontal soil strain, computed using the Janosi-Hanamoto and Coulomb-Mohr models. Simulation tests have proven that these models characterise well new relations between shearing stresses and horizontal soil strain, obtained using the modified method in a direct shear apparatus at growing normal stress values. The tests were performed for soil humidity 4% by weight, and for maximum normal stress values of 70 and 130 kPa.

Key words: direct shear test, models, computer program, approximation

Adres do korespondencji:

Zbigniew Błaszkiwicz; e-mail: blaszki@au.poznan.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska polskiego 50
60-627 Poznań