

WYZNACZANIE NACISKÓW KRYTYCZNYCH NA PODSTAWIE WIELOKROTNYCH TESTÓW JEDNOOSIOWEGO ZAGĘSZCZANIA GLEBY

Krzysztof Lejman

Instytut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

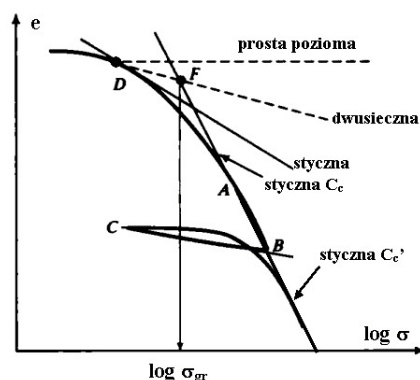
Streszczenie. Przedstawiono metodę wyznaczania nacisków krytycznych. Metoda ta różni się od metody standardowej tym, że prosta aproksymująca przebiegi eksperymentalne zagęszczania w zakresie odkształceń pierwotnych wyznaczana jest jako styczna do kilku przebiegów eksperymentalnych zarejestrowanych przy różnych wartościach naprężeń prekonsolidacyjnych. Do wyznaczania przebiegu tej stycznej opracowano algorytmy obliczeniowe i program komputerowy oparty na metodach iteracyjnych. Stwierdzono, że moduły nachylenia wyznaczonych stycznych różnią się od tych, jakie uzyskuje się przy zastosowaniu metody standardowej, co skutkuje różnymi wartościami nacisku krytycznego otrzymywanymi przy zastosowaniu obu metod.

Słowa kluczowe: gleba, nacisk krytyczny, metoda wyznaczania

Wstęp, analiza problemu badawczego i cel pracy

Ciągła intensyfikacja polowej produkcji rolniczej wymaga poszukiwania i stosowania metod pozwalających na wyznaczanie aktualnej wytrzymałości gleby będącej podłożem dla poruszających się po niej mechanizmów jezdnych maszyn i pojazdów rolniczych. Jedną z takich metod jest edometryczny test jednoosiowego zagęszczania gleby. W wyniku przeprowadzenia tego testu uzyskuje się możliwość wyznaczenia naprężeń, jakie zdolna jest przenieść gleba w zakresie odkształceń sprężystych. Znajomość tych naprężeń, opisywanych jako prekonsolidacyjne lub graniczne, warunkuje możliwość ograniczania przekazywanych na glebę obciążeń do zakresu, który nie będzie powodował jej nadmiernego, niekorzystnego zagęszczania powodującego pogorszenie stosunków wodno-powietrznych i w konsekwencji obniżenia produktywności i zwiększenia nakładów na uprawę i doprawianie [Buliński 2006]. Terzaghi [1948] stwierdził, że krzywe konsolidacji i odprężania mają przebiegi logarytmiczne, co oznacza, że przedstawione w skali półlogarymicznej (rys. 1) będą prostoliniowe (A-B i B-C). Fakt ten, w połączeniu z występowaniem większej krzywizny przebiegu w zakresie odkształceń wtórnych, pozwolił na opracowanie metody wyznaczania naprężeń granicznych, której interpretację graficzną przedstawiono na rys. 1. Według metody Casagrande [1936], poszukiwana wartość naprężenia granicznego odpowiada odciętej punktu (F) leżącego na przecięciu stycznej (C_c) do przebiegu w zakresie odkształceń pierwotnych (A-B) i dwusiecznej kąta utworzonego przez prostą poziomą i styczną do przebiegu w zakresie odkształceń wtórnych. Punkt (D), przez który przecho-

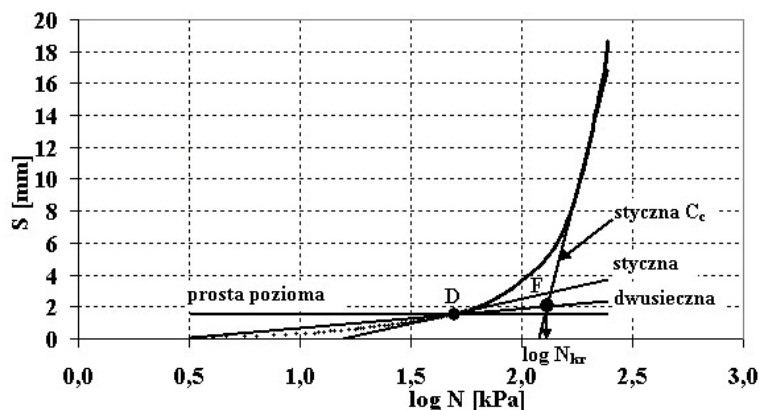
dą prosta pozioma i styczna, jest punktem, w którym krzywa ściśliwości ma największą krzywiznę. Często do oszacowania położenia maksymalnej krzywizny stosowane są metody analityczne polegające na aproksymowaniu przebiegów eksperymentalnych równaniami wielomianowymi [Arvidsson, Keller 2004] lub sigmoidalnymi [Baumgartl, Köck 2004]. Zastosowanie takich metod wprowadza upraszcza algorytmy obliczeniowe, powoduje jednak powstawanie dużych błędów wynikających z linearyzacji przebiegów.



Źródło: opracowanie własne według metody Casagrande [1936]

Rys. 1. Krzywe ściśliwości gleby i graficzna interpretacja metody wyznaczania naprężenia granicznego (σ_{gr})
 Fig. 1. Soil compressibility curves and graphical interpretation of the method used to determine boundary stress (σ_{gr}), source: own study according to the Casagrande method

Badanie ściśliwości gleby w edometrze jest badaniem modelowym i polega na obciążaniu próbki umieszczonej w metalowym pierścieniu, a więc w warunkach uniemożliwiających boczną rozszerzalność. Fakt ten znacznie utrudnia zastosowanie takich badań w odniesieniu do warunków rzeczywistych, ponieważ pobieranie próbek i umieszczanie ich w aparaturze laboratoryjnej powoduje naruszenie naturalnej struktury gleby, natomiast w warunkach polowych nie jest możliwe ciągłe rejestrowanie zmian porowatości lub wskaźnika porowatości. Metodę pozwalającą na wyznaczenie naprężeń granicznych w oparciu o przebiegi bezwzględnego przemieszczenia elementu zagęszczającego (stemplu) przedstawili Dawidowski i Koolen [1994], Dawidowski i in. [1998], Dawidowski i in. [2001]. Wykorzystując ogólne założenia przedstawione przez Casagrande [1936], autorzy ci opracowali algorytmy obliczeniowe, w których, w odróżnieniu od cytowanych wcześniej metod analitycznych, wyznaczanie punktów charakterystycznych przebiegu odbywa się bez konieczności linearyzacji przebiegów eksperymentalnych. Konstrukcja graficzna przedstawionej metody (rys. 2) zasadniczo nie różni się od przedstawionej wcześniej z tym, że w przypadku przeprowadzania testów zagęszczania w warunkach możliwej bocznej rozszerzalności (warunki polowe) możemy mówić o wyznaczaniu granicznego naprężenia stykowego lub nacisku krytycznego, co jednak pozwala na bardziej rzeczywiste odwzorowanie zachowania się gleby, do jakiego dochodzi w trakcie przemieszczania się po jej powierzchni mechanizmów jezdnych maszyn rolniczych.



Źródło: opracowanie własne, metoda Dawidowski i Koolen [1994]

- Rys. 2. Wyznaczanie nacisku krytycznego (N_{kr}) w oparciu o przebieg bezwzględnej przemieszczenia (S)
- Fig. 2. Determination of critical pressure (N_{kr}) on the basis of absolute displacement trajectory (S), source: own study, the Dawidowski and Koolen method

Przeprowadzone przez Dawidowskiego i in. [1998] badania wykazały, że zastosowanie omawianej metody, w przypadku testów przeprowadzanych w warunkach niemożliwej rozszerzalności bocznej, daje bardzo zbliżone wartości naprężenia obliczonego do naprężenia prekonsolidacyjnego. Jednak w warunkach polowych obliczone wartości nacisków były znacząco wyższe od prekonsolidacyjnych [Dawidowski i in. 2001]. Przeprowadzona w cytowanym artykule analiza wykazała, że przyczyną rozbieżności uzyskanych wyników jest większy kąt nachylenia prostej (C_c – rys. 2), jaki uzyskuje się przeprowadzając test w warunkach możliwej bocznej rozszerzalności od tego, jaki obserwowany jest w badaniach edometrycznych.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy problemu badawczego, możliwość wyznaczania nacisku krytycznego na podstawie rejestracji bezwzględnej przemieszczenia w warunkach polowych ograniczona jest prawdopodobnie występowaniem rozporu bocznego i tworzeniem się stacjonarnego klina glebowego pod elementem zagęszczającym. Towarzystwo tych dwóch zjawisk procesowi zagęszczania powoduje, że rejestrowane gradienty przemieszczenia są wyższe, co w konsekwencji skutkuje zawyżaniem obliczanej wartości nacisku przy zastosowaniu metody przedstawionej przez Dawidowskiego i Koolena [1994]. Dlatego celowym wydaje się poszukiwanie takiej metody, której konstrukcja nie będzie wymagała aproksymowania przebiegów eksperymentalnych w zakresie odkształceń pierwotnych. Opracowanie takiej metody pozwoli na porównanie uzyskiwanych wyników i wyjaśnienie przyczyn zawyżania wartości prognozowanego nacisku prekonsolidacyjnego, do jakiego dochodzi przy zastosowaniu metody standardowej.

Celem pracy było opracowanie metody i algorytmów obliczeniowych służących do wyznaczania nacisków krytycznych przy użyciu stycznych do kilku przebiegów eksperymentalnych zarejestrowanych przy rosnących wartościach naprężeń prekonsolidacyjnych.

Metoda i algorytmy obliczeniowe

Dla przyjętego celu pracy przyjęto założenie, że proste aproksymujące przebiegi eksperymentalne bezwzględnie odkształcenia w funkcji logarytmu nacisku w zakresie odkształceń pierwotnych mają zbliżony przebieg dla różnych wartości nacisków prekonsolidacyjnych, co wynika ze zbliżonych wartości indeksów zagęszczania (ściskana), jakie obserwuje się przy wielokrotnym zagęszczaniu gleby przeprowadzanemu w testach edometrycznych. Założenie to przyjęto zgodnie z obserwacjami Terzagiego [1948], który stwierdził, że po odprężeniu (B-C, rys. 1) i przy kolejnych zagęszczaniach styczne do krzywych ściśliwości (C_c') wpisują się w styczną do krzywej odkształcenia pierwotnego (C_c) lub są do niej równoległe. Wyznaczenia punktu charakterystycznego przebiegu (D) w zakresie odkształceń wtórnych i wynikającego z tego położenia przebiegu dwusiecznej (rys. 2) dokonano zgodnie z metodą Casagrande [1936], przy użyciu algorytmów przedstawionych w pracy Dawidowskiego i Koolena [1994]. W odróżnieniu od metody standardowej (rys. 2) położenie stycznej do przebiegu w zakresie odkształceń pierwotnych (C_c) wyznaczano w taki sposób, żeby spełniony był warunek równoległości stycznych do wszystkich przebiegów (TZ_1 – TZ_4), zarejestrowanych przy różnych wartościach nacisków prekonsolidacyjnych (rys. 3), przy zachowaniu minimalnej odległości pomiędzy tymi stycznymi.

W celu wyznaczenia stycznych spełniających podane warunki zdefiniowano prostą obliczeniową (i) (rys. 4) o równaniu:

$$S = a \cdot (\log N - \log N_{\max}) \quad (1)$$

gdzie:

- a – współczynnik kierunkowy,
- $N_{\max}$ – maksymalna dla wszystkich przebiegów eksperymentalnych wartość nacisku.

Odległość ($d_{k,n}$) dowolnego punktu (n) przebiegu eksperymentalnego (k) od zdefiniowanej prostej obliczeniowej (i) wyrażona jest równaniem:

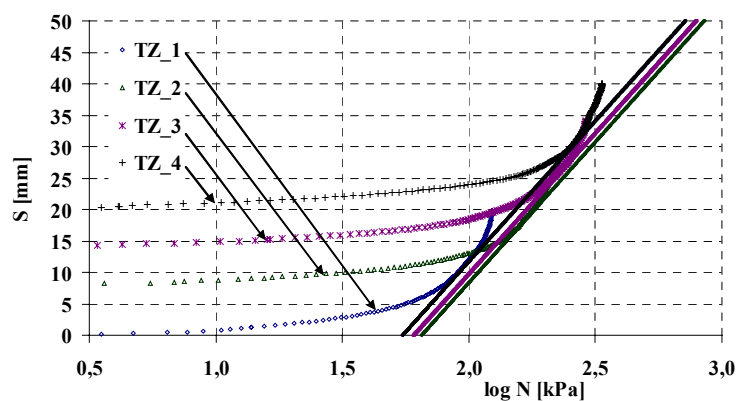
$$d_{k,n} = \cos(\arctg a) \cdot |S_{k,n} + a \cdot (\log N_{\max} - \log N_{k,n})| \quad (2)$$

a odległość (D_k) prostej obliczeniowej (i) od równoległej do niej stycznej do przebiegu eksperymentalnego (k) - równaniem:

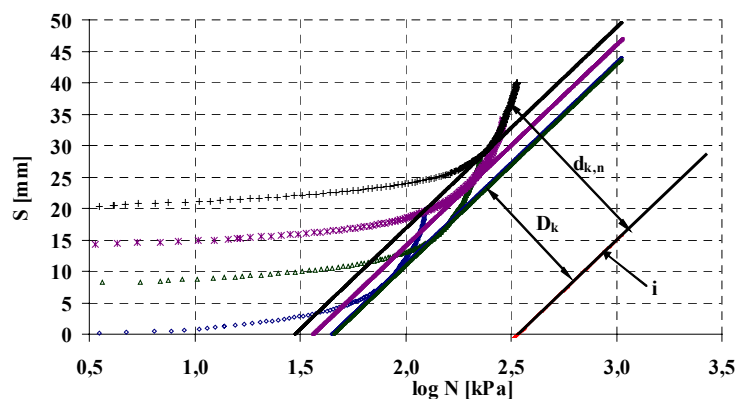
$$D_k = \min_{1 \leq n \leq c} [\cos(\arctg a) \cdot |S_{k,n} + a \cdot (\log N_{\max} - \log N_{k,n})|] \quad (3)$$

gdzie:

- c – liczba punktów pomiarowych przebiegu eksperymentalnego (k).



Rys. 3. Położenie stycznych do przebiegów przemieszczenia (S) w funkcji nacisku (N) w zakresie odkształceń pierwotnych dla różnych wartości nacisków prekonsolidacyjnych
Fig. 3. Position of tangents to displacement curves (S) in pressure function (N) in the scope of primary strains for different pre-consolidation pressure values



Rys. 4. Położenie prostej obliczeniowej (i) i jej odległości od punktów ($d_{k,n}$) i stycznych do przebiegów eksperymentalnych (D_k)
Fig. 4. Position of analytical straight line (i) and its distance from points ($d_{k,n}$) and tangents to experimental curves (D_k)

Po uwzględnieniu wzorów (1-3), równanie stycznej do przebiegu eksperymentalnego (k), równoległej do prostej obliczeniowej (i) można wyrazić:

$$S = a \cdot (\log N - \log N_{\max}) + \frac{D_k}{\cos(\arctg a)} \quad (4)$$

Poszukiwana nowa wartość indeksu ściskania (zagęszczania), który jest współczynnikiem kierunkowym prostej (i), obliczana jest w taki sposób, żeby suma odległości pomiędzy kombinacjami wszystkich prostych stycznych do przebiegów eksperymentalnych była jak najmniejsza. Poszukujemy więc takiej wartości współczynnika kierunkowego (a) prostej obliczeniowej (i), dla której funkcja $F(a)$ będzie spełniała warunek:

$$F(a) = \min \sum_1^K |D_d - D_e| \text{ dla } d \neq e \quad (5)$$

gdzie:

- d, e – numer przebiegu eksperymentalnego,
- K – liczba przebiegów eksperymentalnych.

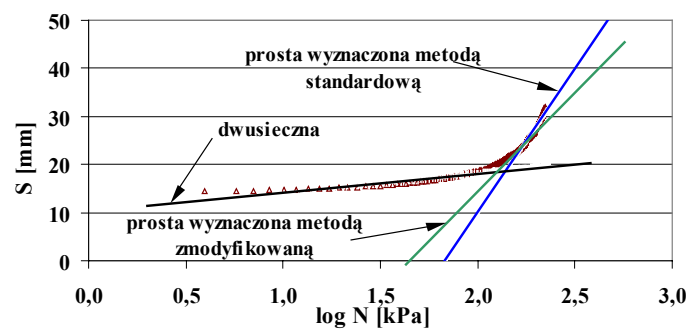
Minimalizacji wartości funkcji (5) i w konsekwencji wyznaczenia wartości współczynników kierunkowych prostych stycznych do poszczególnych przebiegów dokonano metodami numerycznymi. Do tego celu posłużono się programem napisanym w Microsoft Visual Basic programu Excel z wykorzystaniem dodatku „SOLVER”. Obliczone wartości współczynników kierunkowych pozwalają na wyznaczenie równań stycznych do poszczególnych przebiegów, zgodnie z przyjętymi założeniami. Nowe równania prostych stycznych do przebiegów eksperymentalnych (k) w zakresie odkształceń pierwotnych mają postać:

$$S = a' \cdot (\log N - \log N_{\max}) + \frac{D_k}{\cos(\arctg(a'))}, \quad (6)$$

gdzie:

- a' – współczynnik kierunkowy prostej (i) będący wynikiem minimalizacji funkcji (5).

Na podstawie badań wstępnych stwierdzono, że gradienty stycznych do przebiegów w zakresie odkształceń pierwotnych, wyznaczonych metodą standardową, są wyższe od tych, jakie obserwuje się przy zastosowaniu metody zmodyfikowanej (rys. 5).



Rys. 5. Interpretacja graficzna występowania różnic w wartościach nacisku krytycznego wyznaczonego metodami standardową i zmodyfikowaną

Fig. 5. Graphical interpretation for the occurrence of differences in values of critical pressure determined using the standard method and the modified method

Konsekwencją tego są również wyższe wartości odciętej punktu przecięcia tych stycznych z dwusieczną i obliczane na tej podstawie wartości nacisku krytycznego. Sugeruje to, że jedynie w początkowej fazie przemieszczenie stempla, zarejestrowana krzywa przebiega zgodnie z przebiegiem odkształceń pierwotnych. Późniejszy przebieg jest wynikiem nałożenia kilku, wymienionych wcześniej, zjawisk, których występowanie powoduje wypieranie gleby ze strefy objętej oddziaływaniem elementu zagęszczającego. Przedstawiona, zmodyfikowana metoda wyznaczania stycznej do przebiegu w zakresie odkształceń pierwotnych prawdopodobnie umożliwia wyeliminowanie wpływu tych zjawisk na prognozowaną w warunkach polowych wartość nacisku krytycznego.

Wnioski

1. Zmodyfikowana metoda wyznaczania nacisku krytycznego polegająca na wyznaczaniu stycznych do przebiegów eksperymentalnych zarejestrowanych przy różnych wartościach nacisków prekonsolidacyjnych umożliwia wyznaczenie tych nacisków, bez konieczności aproksymowania przebiegów przemieszczenia w zakresie odkształceń pierwotnych.
2. Zastosowanie przedstawionej metody numerycznej, polegającej na minimalizacji odległości pomiędzy stycznymi do przebiegów eksperymentalnych, będących wynikiem testów jednoosiowego zagęszczania gleby, umożliwia wyznaczenie wspólnej dla tych przebiegów wartości indeksu ściskania.
3. Obserwowane różnice w wartościach nacisków krytycznych dla metody standardowej i zmodyfikowanej są spowodowane zawyżonymi wartościami indeksów zagęszczania w metodzie standardowej, co hipotetycznie można przypisać zjawiskom rozporu bocznego i tworzenia się stacjonarnego klina glebowego, w trakcie przeprowadzania testów jednoosiowego zagęszczania gleby w warunkach możliwej jej bocznej rozszerzalności.

Bibliografia

- Arvidsson J., Keller T. 2004. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Tillage Res.* 77. s. 85-95.
- Baumgartl T., Köck B. 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68. s. 57-65.
- Buliński J. 2006. Problemy ugniatania gleb uprawnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, Zeszyt 508.
- Casagrande A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. In: *Proc. Int. Conf. Soil Mech. Foun. Eng.*, 22-26 June 1936, Cambridge, MA, vol. 3. s. 60-64.
- Dawidowski J. B., Koolen A. J. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil & Tillage Res.* 31. s. 277-282.
- Dawidowski J. B., Śnieg M., Błażejczak D. 1998. Preliminary studies on determination of soil pre-compaction stress from strain-stress relationship. In: *AgENG Oslo 98 International conference on agricultural engineering*, 24-27 August, Oslo, Part 2. s. 846-847.
- Dawidowski J. B., Morrison J. E., Śnieg M. 2001. Measurement of Soil Layer Strength with Plate Sinkage and Uniaxial Confined Methods. *Transaction of the ASAE*, Vol. 44(5). s. 1059-1064.
- Terzaghi K., Peck R. B. 1948. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley.

DETERMINATION OF CRITICAL PRESSURE VALUES ON THE BASIS OF MULTIPLE ONE-AXIAL SOIL COMPACTION TESTS

Abstract. The work presents the method used to determine critical pressure values. This method differs from standard method with regards to the fact that straight line approximating experimental compaction trajectories in the scope of primary strains is determined as the tangent to several experimental curves registered for different values of pre-consolidation stress values. Computational algorithms and computer program based on iterative methods have been developed for the purposes of determining trajectory of this tangent. It has been observed that inclination modules for determined tangents differ from those obtained using the standard method, which results in different critical pressure values obtained with both methods.

Key words: soil, critical pressure, determination method

Adres do korespondencji:

Krzysztof Lejman; e-mail: krzysztof.lejman@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław