

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK · INSTYTUT AGROFIZYKI



Ossolineum

zeszyt 51

rok 1987

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT AGROFIZYKI W LUBLINIE

PROBLEMY AGROFIZYKI 51

KRYSTYNA KONSTANKIEWICZ

WPLÝW PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCEŃ NA CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE GLEB

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

1987

Komitet Redakcyjny
prof. dr JAN GLIŃSKI (redaktor naczelny)
prof. dr IGNACY DECHNIK, prof. dr BOGUSŁAW SZOT

Rezerwa habilitacyjna

Okladkę projektował Zygmunt Ziemka

Redaktor Wydawnictwa Hanna Jurek
Redaktor techniczny Elżbieta Garnarczyk

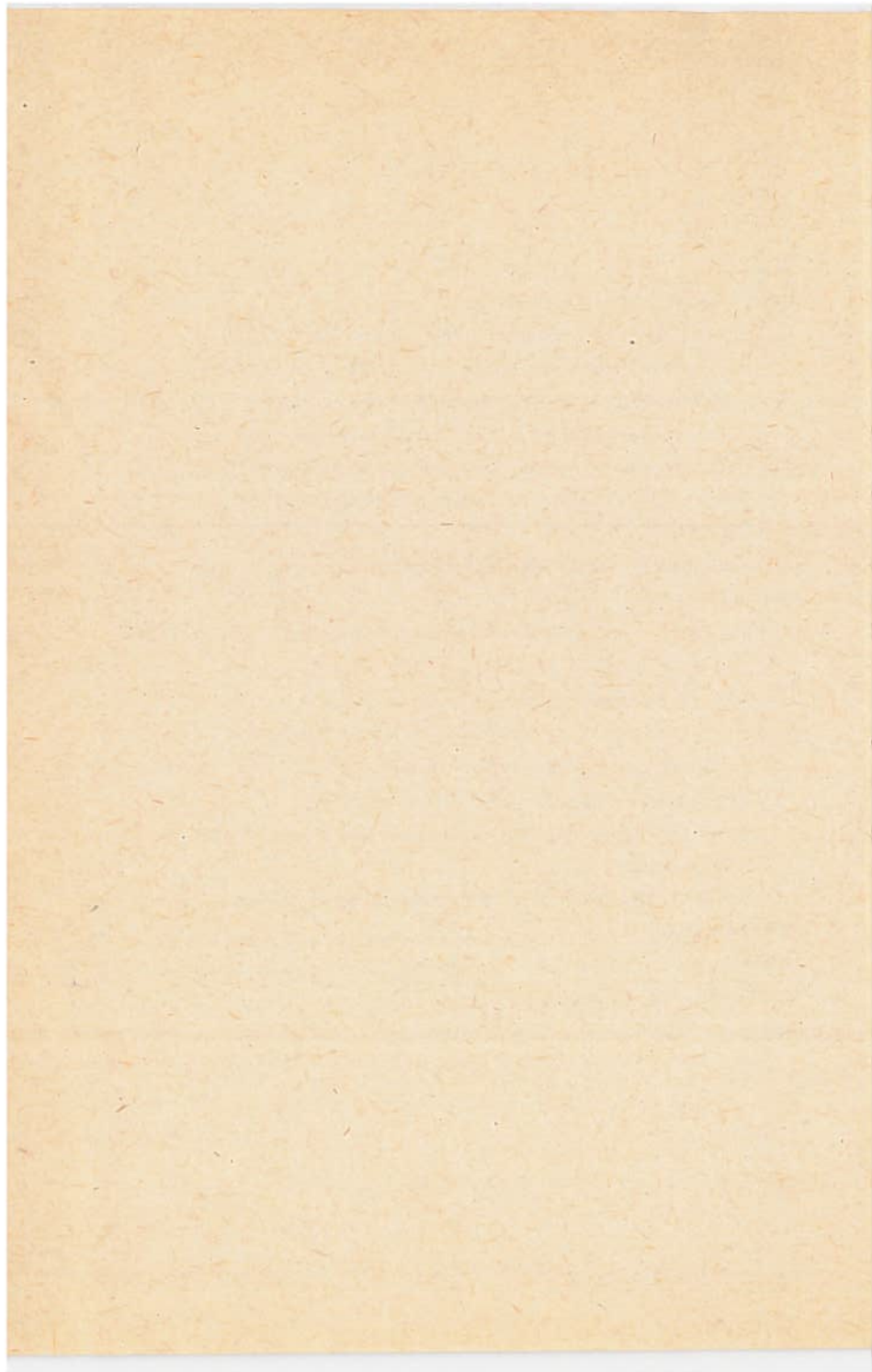
© Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1987
Printed in Poland

PL ISSN 0137-6587

ISBN 83-04-02587-6

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
Odkształcenia gleby i ich opis	7
Odkształcenia objętościowe i postaciowe gleby	8
Matematyczny opis zależności naprężenie - odkształcenie	9
Model ośrodka ciągłego i jednorodnego	9
Teoria plastyczności i liniowe modele reologiczne	10
Metody termodynamiki procesów nieodwracalnych	14
Cel pracy i wybór modelu do weryfikacji doświadczalnej	16
Cel pracy	16
Nieliniowy model lepko-sprężysty	17
Metodyka badań	24
Charakterystyka wybranego materiału glebowego i przygotowanie próbek do badań	24
Opis zastosowanej aparatury	25
Omówienie i interpretacja wyników badań laboratoryjnych	29
Charakterystyki mechaniczne badanych gleb	29
Wytrzymałość badanych ośrodków glebowych	36
Weryfikacja doświadczalna wybranego nieliniowego modelu reologicznego	43
Współczynniki lepkości i sprężystości badanych gleb	48
Podsumowanie	49
Wnioski	52
Bibliografia	53
Summary	60



WSTĘP

Współczesne rolnictwo coraz powszechniej wprowadzające mechanizację staje przed problemem określenia jej wpływu na środowisko rolniczej "przestrzeni" produkcyjnej. Tendencja do zwiększania mocy i ciężaru maszyn, a także komplikowanie technologii prowadzące do wydłużenia drogi ciągnika na polu (czasami ponad 100 km/ha) powoduje coraz większe zainteresowanie skutkami agrofizycznymi działania mechanizacji na glebę. Zagadnienie to jest szczególnie ważne, w obszarze śladu maszyny, jakkolwiek spotyka się duże naciski na glebę w strefie oddziaływania niektórych elementów roboczych tych maszyn. Równoległe ze znacznym wzrostem mocy maszyn rolniczych zwiększają się także prędkości robocze (np. prędkość skrawania).

Odształcenia postaciowe i objętościowe intensywnie uprawianej gleby powodują zmiany jej właściwości fizycznych, a od prawidłowej oceny tych zmian uzależniona jest możliwość wpływu na efektywną produktywność tej gleby.

Poznanie mechanizmu reakcji gleby na przyłożone siły jest niezbędne do rozwiązania problemów technologii prac polowych, konstrukcji kół i narzędzi rolniczych oraz doboru dla nich odpowiednich parametrów ruchu.

Układ "maszyna-gleba-roślina" jest skomplikowany i badania nad nim nie mogą dać prostego, szybkiego i jednoznacznego rozwiązania takiego problemu.

Niezbędne staje się dokładne poznanie zależności naprężenie-odkształcenie w szerokim przedziale wartości, jak też i ich pochodnych czasowych. Główna trudność w teoretycznym opisie takiej zależności wynika zarówno ze struktury gleby, jak też w dużej mierze z jej or-

ganicznego charakteru. Materiał glebowy jest rozdrobniony, wielofazowy, poliminerálny z obecnością związków próchnicznych i w związku z tym wykazuje znaczny rozrzut swoich własności.

Podobnie jak w wielu naukach przyrodniczych, mechanika gleby poszukuje do opisu przedmiotu swoich badań modelu, który z jednej strony umożliwiałby prawidłowe przewidywanie ważnych dla rolnictwa skutków, z drugiej zaś strony upraszczał w wystarczającym stopniu opis fizyczny procesu odkształcania.

Założenia ciągłości i jednorodności badanego ośrodka były podstawą wielu modeli reologicznych opisujących relacje naprężenie-odkształcenie. Liniowe równania konstruowane fenomenologicznie z modeli ciał idealnych (ciało idealnie sprężyste Hooke'a, ciecz Newtona, ciało doskonale plastyczne S. Venanta) nie dają zadowalającego opisu rzeczywistego procesu odkształcania gleby. Wiadomo z doświadczenia, że własności gleby mogą zmieniać się wraz z naprężeniem (np. gęstość), co sugeruje, że założenie stałości współczynników reologicznych nie jest poprawne.

Podejście do zagadnień mechaniki gleb oparte na fenomenologicznej termodynamice procesów nieodwracalnych nie przewyżcza trudności, na jakie trafia klasyczna (liniowa) reologia, nie daje bowiem możliwości opisu struktury badanego materiału, od której w znacznym stopniu zależą własności mechaniczne tego ośrodka.

Coraz powszechniej stosowane w mechanice ośrodków rozdrobnionych metody termodynamiki statystycznej dają możliwości uwzględnienia struktury materiału i sił działających między poszczególnymi jego elementami. Metody takie pozwalają na odejście od abstrakcyjnego modelu ośrodka ciągłego, zastępując go dyskretnym układem elementów strukturalnych, wprowadzając statyczną teorię deformacji uwzględniającą oddziaływanie poszczególnych elementów ośrodka, a naprężeniom i odkształceniom przypisując charakter ciągły. Na podstawie analizy fizycznych zjawisk w wodzie otaczającej cząstki fazy stałej oraz uwzględnieniu oddziaływań między elementami rozdrobnionego ośrodka (gleby) w obecności sił zewnętrznych można wyprowadzić równanie modelu zjawisk mechanicznych w glebie ze zmiennymi współczynnikami lepkości i sprężystości, zależnymi od naprężenia, temperatury, wilgotności, struktury ośrodka glebowego itd.

ODKSZTAŁCENIA GLEBY I ICH OPIS

Problem poznania i fizycznego opisu własności mechanicznych ośrodków glebowych stał się obecnie bardzo aktualny i jednocześnie pilny do rozwiązania. Spowodował to szybki rozwój mechanizacji różnych prac polowych, a co jest z tym związane wzrost różnego rodzaju obciążeń przekazywanych na glebę. Odkształcenia objętościowe warstwy uprawnej wpływają niekorzystnie na strukturę gleby i rozwój korzeni, a duże obciążenia mogą wywoływać zagęszczenie nawet w poziomach leżących poniżej 40 cm. Trwałość zagęszczenia w warstwach niższych jest też zdecydowanie większa [19, 21, 47]. Można temu przeciwdziałać stosując mniejsze obciążenia jednostkowe, większą liczbę osi pojazdu, gąsienice lub zwiększające prędkości przejazdów ciągników i maszyn. Nie można jednak takiego problemu wyeliminować całkowicie [4, 5, 6, 16, 41, 43, 52, 61, 62, 63].

Wszelkie diagnozy i zapobiegawcze działania muszą być poprzedzone dokładnym zbadaniem reakcji gleby na działające siły i poznaniem fizycznych procesów związanych z mechanizmem jej odkształcania. Niezbędne staje się poznanie zależności naprężenie-odkształcenie w szerokim przedziale wartości i ich pochodnych czasowych. Znaczenie takich badań podkreśla Gill [17]: "Każde zagadnienie mechaniki gleb nie oparte na dokładnej zależności naprężenie-odkształcenie może tylko w przybliżeniu reprezentować prawdziwe zachowanie się gleby".

Zależność naprężenie-odkształcenie jest charakterystyczna dla każdej gleby, a o przebiegu jej decydują inne właściwości fizyczne danej gleby takie, jak: gęstość, wilgotność, struktura, warunki osuszania oraz parametry odkształcania: czas obciążenia, historia naprężeń, naprężenie graniczne. W wielu wypadkach możliwe jest uwzględnienie tych wszystkich czynników przez odpowiednią selekcję próbek glebowych i dobranie warunków odkształceń symulujących odpowiednie warunki występujące w polu. Możliwości takie dają badania laboratoryjne i chociaż są pewnym ograniczeniem rzeczywistego odkształcania gleby, to pozwalają z dużą dokładnością kontrolować wszystkie parametry tego procesu [3, 15, 25, 45, 46]. Koncepcja modelowego doświadczenia w laboratorium upraszcza procedurę oznaczenia zależ-

ności naprężenie-odkształcenie i umożliwia ujawnienie i wy tłumaczenie wielu czynników nią rządzących.

Odształcenia objętościowe i postaciowe gleby

W ciągu ostatnich lat autorka wykonała szereg prac podstawowych o zagęszczaniu gleb pod wpływem różnych naprężeń działających statycznie [33, 34, 37, 38, 40]. Uwzględniono wilgotność, porowatość i rozkład wielkości porów badanych próbek glebowych w stanie początkowym oraz zmianę tych wielkości po zastosowaniu naprężeń spotykanych w praktyce i działających w określonych przedziałach czasowych. Otrzymane krzywe konsolidacji świadczą o istotnym wpływie wymienionych parametrów doświadczenia na odształcenia gleby i w związku z tym na zmianę jej podstawowych fizycznych właściwości. Dla każdej wartości zastosowanego ciśnienia odształcenie maleje wraz ze zmniejszaniem wilgotności. Funkcje rozkładu porów konsolidowanych gleb przy różnej wyjściowej wilgotności i różnej wielkości działającego naprężenia, jak też i konsolidowanych przy tej samej wilgotności ($pF\ 1,0$), a zróżnicowanym czasie działania naprężeń, wykazują wyraźne maksima w przedziale wielkości promienia $15 \cdot 10^4 \text{ \AA} > r > 1,5 \cdot 10^4 \text{ \AA}$, tj. w zakresie wielkości porów zatrzymujących wodę łatwo dostępną dla roślin $3,0 > pF > 2,0$. Wpływ ciśnienia na zmianę objętości porów w ww. przedziale maleje wraz ze zmniejszeniem początkowej wilgotności. Zmiany porowatości i gęstości wpływają istotnie na charakterystyki pF - wilgotność zarówno w procesie nawilżania, jak i osuszania.

Wpływ rodzaju gleby, właściwości fizycznych jej fazy stałej oraz zagęszczenia na przebieg krzywych retencji wodnej badało wielu autorów [10, 11, 12, 13, 14, 22, 42, 48, 59, 67, 68, 73], a związek zagęszczenia gleby z wielkością efektu histerezy funkcji potencjał wody glebowej-wilgotność przedstawiono w pracach [70, 71, 72].

Wszystkie badania wykazują, że odształcenia mechaniczne gleb wpływają na produkcję roślinną w sposób pośredni, przede wszystkim przez zmianę porowatości i rozkładu wielkości porów, a co za tym idzie - na zmianę wszystkich podstawowych czynników wzrostu roślin, warunków wodnych, powietrznych, cieplnych.

Uważa się, że zagęszczenie, czyli odkształcenie objętościowe, występuje w wyniku najprostszego układu sił działających na glebę, co występuje w procesach ugniatania, gdy ośrodek poddany jest wszechstronnemu jednakowemu ciśnieniu. Miara odkształcenia objętościowego może być gęstość gleby lub jej porowatość. Ze względu na znikome odkształcenia cząstek fazy stałej za mechaniczne skutki działania takich sił na glebę odpowiadają głównie filtracja wody glebowej i gazu oraz zmiany ułożenia ziarn szkieletu glebowego. W rzeczywistości występują jednak bardziej złożone układy sił działających na glebę, a oprócz odkształceń objętościowych występują odkształcenia postaciowe (ściananie). W wyniku odkształceń postaciowych następuje rozdrobnienie cząstek fazy stałej gleby, a w związku z tym oprócz zmiany porowatości i rozkładu wielkości porów dochodzi też do zmiany rozkładu granulometrycznego, a dodatkowo też do niszczenia systemu korzeniowego roślin [21].

Matematyczny opis zależności naprężenie-odkształcenie

W powyższym rozdziale zwrócono uwagę na rolę struktury gleby w ocenie jej właściwości mechanicznych obrazowanych przez zależność naprężenie-odkształcenie. Wszystkie czynniki składające się na strukturę, a przede wszystkim więzi łączące poszczególne elementy strukturalne decydują o wartościach sił przekazywanych przez nie. Przy obecnych technikach pomiarowych rzeczywiste oddziaływania pojedynczych elementów strukturalnych są niemierzalne, ale możliwe jest oszacowanie statystyczne ich wartości. Poszukując matematycznego opisu charakterystyk mechanicznych gleb trzeba więc skorzystać z modelu fizycznego, stanowiącego pewną uproszczoną interpretację rzeczywistości. Ponadto ostateczne wyniki uzyskiwane dla ośrodka modelowego i dla materiału naturalnego - opisywanego tym modelem - powinny być takie same w granicach przyjętych tolerancji.

Model ośrodka ciągłego i jednorodnego

W mechanice gleb najwcześniej wprowadzony i do dziś najczęściej stosowany jest model ośrodka ciągłego i jednorodnego, został on przeniesiony bezpośrednio z gruntoznawstwa, gdzie już o wiele wcześniej

spełniał wystarczająco dobrą rolę. Rozbudowano go na bazie mechaniki ośrodków ciągłych z założeniem ciągłości i jednorodności ośrodka. W wypadku badania gruntów dla celów budownictwa takie podejście można uzasadnić, gdyż w zagadnieniach mechaniki technicznej gruntów i fundamentowania mamy do czynienia zwykle z zagęszczaniem, długimi czasami działania naprężeń i małymi odkształceniami bez wnikania w strukturę i oddziaływania między elementami strukturalnymi gruntu.

Przyjęcie takich założeń dla gleby jest dużym uproszczeniem, warunki jej odkształcania i problemy z tym związane są zupełnie inne. Naprężenia działają dużo krócej, stan początkowy gleby jest luźny, predkości odkształceń są duże, a same odkształcenia mają charakter objętościowy i postaciowy [24, 26, 51, 64, 69].

Teoria plastyczności i liniowe modele reologiczne

W mechanice materiałów rolniczych używa się dwóch teorii do opisu podstawowych zjawisk mechanicznych w nich występujących: teorii plastyczności i reologii [9, 35, 39, 58, 74].

Hipoteza Coulomba-Mohra, będąca modelem teorii plastyczności zakłada, że gleba jest materiałem z tarcie wewnętrznym, co przejawia się w nagłym załamaniu jego struktury, gdy osiągnięty zostaje pewien stan naprężenia. Stan graniczny maksymalnego naprężenia, tj. wytrzymałość gleby jest charakteryzowany przez dwa podstawowe parametry C i φ , tzn. spójność i kąt tarcia wewnętrznego, występujące w równaniu Coulomba-Mohra

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

gdzie τ - naprężenie ścinające (styczne), σ_n - naprężenie normalne.

Teoria ta może przewidywać siły wywołujące stan graniczny (wytrzymałości), ale nie daje informacji o zależności naprężenie-odkształcenie, nie uwzględnia też zupełnie czynnika czasu [21, 57].

Często zakłada się, że zanim gleba osiągnie stan graniczny, to zachowuje się jak ośrodek sprężysty [49] i może tak się zdarzyć, jeśli

występuje wstępne zagęszczenie, co praktycznie nie jest spotykane, a stan początkowy jest mniej lub bardziej luźny i właśnie w tej początkowej fazie odkształcenia są najbardziej nieodwracalne (niesprężyste). Natychmiastowe odkształcenia powinny być uwzględniane, ponieważ stanowią od 20 do 50% całego odkształcenia. Nie może być zastosowany prosty związek pomiędzy naprężeniem i odkształceniem wynikający z liniowej teorii sprężystości (ciało Hooke'a) [23]. Najprostsze doświadczenia pokazują, że gleba nie może być uważana za ciało idealnie sprężyste, a wytrzymałość jej jest uzależniona od sposobu przyłożonego naprężenia, a więc i od czasu.

Wśród materiałów, które są obiektem zainteresowań nauk rolniczych są takie, których mechaniczne zachowanie się wystarczająco dokładnie opisują metody plastyczności np. ziarna pszenicy w praktycznie spotykanych zakresach wilgotności ($\approx 13\%$) i takie jak gleba, które wymagają w analogicznym opisie uwzględnienia efektów czasowych za pomocą lepko-sprężystych modeli reologicznych.

Badania w tym zakresie prowadziła autorka, których wyniki przedstawiła w pracy [57], a końcowy wniosek można przedstawić następująco: ten sam materiał badawczy można traktować jako sprężysto-plastyczny lub lepko-sprężysty w zależności od czasu trwania rozpatrywanego procesu w porównaniu z czasem ustalania się odkształceń. Procesy o czasach trwania mniejszych lub porównywalnych z czasem ustalania się odkształceń należy opisywać modelami lepko-sprężystymi, które dają możliwość przewidywania naprężeń i odkształceń w funkcji czasu. W pozostałych wypadkach należy preferować opis sprężysto-plastyczny ze względu na jego prostotę, możliwość opisanie stanów granicznych oraz stanu początkowego materiału z uwzględnieniem "historii obciążenia".

W glebie odkształcenia ustalają się podczas kilku sekund, a prędkości, z jakimi oddziałują współczesne maszyny i narzędzia rolnicze na glebę, dochodzą do kilku m/s. Niezbędne jest wprowadzenie równania, które opisywałoby charakterystyki mechaniczne odkształcanej gleby (zależność naprężenie-odkształcenie) i uwzględniało ich zmianę w czasie, a także wpływ innych parametrów fizycznych badanego ośrodka. Możliwość taką daje wykorzystanie metod reologii, ze szczegól-

nym uwzględnieniem teorii lepko-sprężystości [23, 55, 57].

Reologię można określić jako naukę o płynięciu ciał, lub ogólniej [27]: "... jako naukę o procesach nieustalonych (których szczególnym przypadkiem są procesy ustalone), zachodzących w materiałach poddanych działaniu czynników termicznych i mechanicznych". W mechanice gleby rozważa się zwykle tylko czynniki mechaniczne.

Lepko-sprężyste modele reologiczne są reprezentowane przez równania różniczkowe i analogi mechaniczne. Zmiennymi reologicznymi są naprężenie i odkształcenie, a podstawowymi parametrami współczynniki sprężystości i lepkości, które reprezentują odpowiednio ciało idealnie sprężyste Hooke'a i ciecz Newtona.

W analogach mechanicznych występują one jako kombinacje równoległych oraz szeregowych połączeń sprężyn i tłumików [20]. Konsekwencje takich połączeń elementów sprężystych i lepkich uwiadcniają się w zapisie matematycznym i odpowiadającym, a ogólne równanie różniczkowe opisujące dowolną ich liczbę może być przedstawione w postaci [50]

$$\sigma + \sum_{k=1}^n b_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = a_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^m a_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}, \quad (2)$$

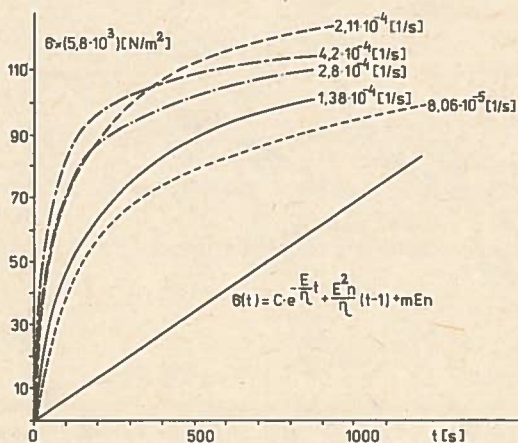
gdzie σ - naprężenie, ε - odkształcenie, b_k , a_0 , a_k - stałe współczynniki związane ze zjawiskami lepkimi i sprężystymi ośrodka glebowego, $m = n$ lub $m = n + 1$

Często w praktyce wystarcza wykorzystanie powyższego równania z ograniczeniem do pierwszych pochodnych względem czasu $f(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0$, które w swojej najprostszej formie jest liniowym równaniem różniczkowym, tzn. występujące w nim współczynniki mają wartości stałe.

Autorka zajmowała się tym zagadnieniem, a rozwiązania dla kilku liniowych modeli reologicznych (Maxwella, Kelvina-Voigta, standardowego, symetrycznego) i ich weryfikację doświadczalną przedstawiła w pracy [36]. Liczba parametrów w tych lepko-sprężystych modelach nie przekraczała czterech i przy założeniu ich stałości uzyskano funkcyjne zależności naprężenia, odkształcenia i czasu (tab. 1).

Tabela 1. Ogólne rozwiązania równań lepko-sprężystych modeli reologicznych dla przypadków: $\dot{\epsilon} = n$ i $\dot{\sigma} = n$

M O D E L				
MAXWELL	KELVIN-VOIGT	STANDARTOWY	SYMETRYCZNY	
$\eta \dot{\sigma} + E \sigma = \eta E \dot{\epsilon}$	$\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon}$	$\eta \dot{\sigma} + E \sigma = 2 E \eta \dot{\epsilon} + E^2 \epsilon$	$\eta \dot{\sigma} + E \sigma = \eta^2 \ddot{\epsilon} + 3 E \eta \dot{\epsilon} + E^2 \epsilon$	
$\dot{\epsilon} = n$	$\sigma(t) = C e^{-\frac{E}{\eta} t} + \frac{E^2 n}{\eta} (t-1) + m E n$			
	$m=1$	$m=1$	$m=2$	$m=3$
$\dot{\sigma} = n$	$\epsilon(t) = C e^{-\frac{E}{\eta} t} + \frac{n}{\eta} k (t-1) + \frac{n}{E} k$			$\epsilon(t) = C_1 e^{-2.6 \frac{E}{\eta} t} + C_2 e^{0.4 \frac{E}{\eta} t} + \frac{n}{E} t - \frac{2 n \eta}{E^2}$
	$k=1$	$k=1$	$k=1/2$	$C_1, C_2 = \text{const}$



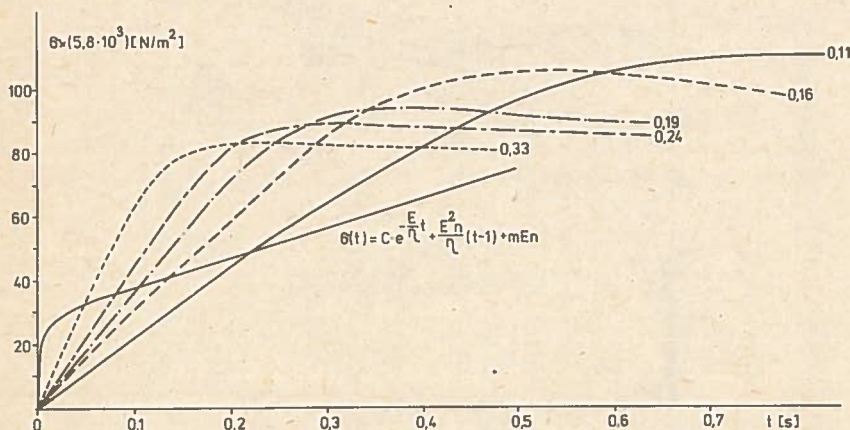
Rys. 1. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby pławowej o składzie granulometrycznym piasku słabogliniastego (Rokitno) otrzymana eksperymentalnie przy różnych wolnych odkształceniach i naprężeniu hydrostatycznym $2 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ oraz wyliczona teoretycznie z założeniem stałych współczynników: lepkości ($4 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^2$), sprężystości (10^5 N/m^2) i prędkości odkształcenia rzędu 10^{-4} 1/s

Weryfikacja doświadczalna nie wykazała przydatności takich liniowych modeli do opisu charakterystyk mechanicznych materiału glebowego i to bez względu na rodzaj gleby i zastosowane parametry doświadczenia - naprężenie osiowe i hydrostatyczne oraz prędkości odkształceń (rys. 1, 2, 3).

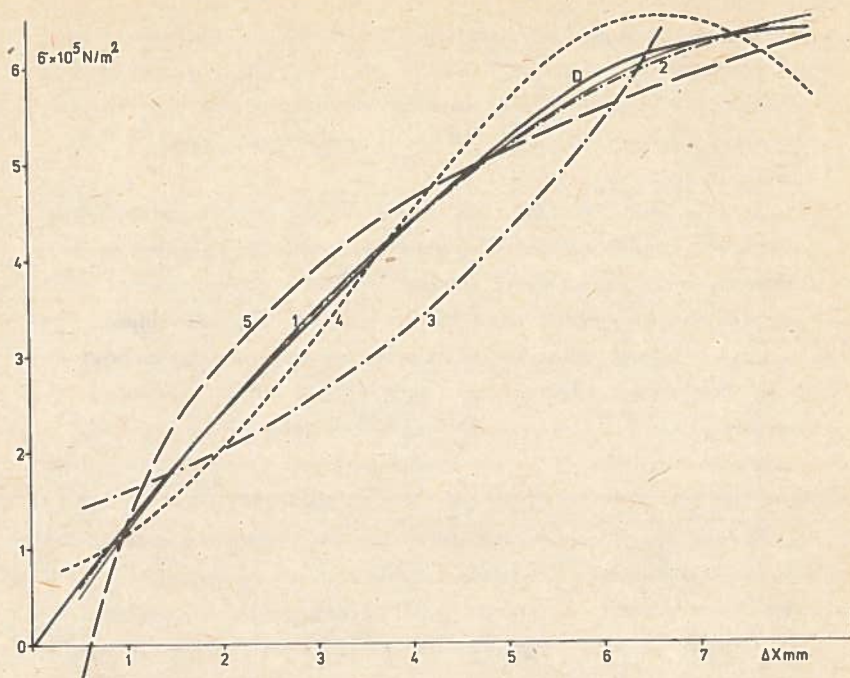
Można przypuszczać, że słabością reologii klasycznej jest założenie liniowości równań konstruowanych fenomenologicznie na bazie modeli ciał idealnych. Nawet proste doświadczenia ujawniają zależność fizycznych własności gleby od naprężenia (np. zmiana gęstości), co kwestionuje wprowadzenie stałych współczynników w równaniach reologicznych.

Metody termodynamiki procesów nieodwracalnych

Stosowane metody fenomenologicznej termodynamiki procesów nieodwracalnych nie uwzględniają wewnętrznej budowy ciał i charakteru ruchu tworzących je elementów [28, 29, 30, 31, 32, 44]. Polegają one na badaniu własności oddziałujących ze sobą układów na podstawie ana-



Rys. 2. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby pławowej o składzie granulometrycznym piasku słabogliniastego (Rokitno) otrzymana eksperymentalnie przy różnych szybkich odkształceniach i naprężeniu hydrostatycznym $2 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ oraz wyliczona teoretycznie z założeniem stałych współczynników: lepkości ($4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$), sprężystości (10^5 N/m^2) i prędkości odkształcenia rzędu 10^{-1} 1/s



Rys. 3. Zależność naprężenia od przemieszczenia, $\sigma = \sigma(\Delta x)$, dla gleby płowej o składzie granulometrycznym piasku słabogliniastego (Rokitno) otrzymana doświadczalnie i z rozwiązań wybranych modeli reologicznych z optymalnymi stałymi współczynnikami lepkości i sprężystości oraz przykładowa empiryczna funkcja aproksymacyjna: $D = 0,11$ 1/s), 1 - aproksymacyjna funkcja empiryczna $y = a_1 + a_2x + a_3x^2$, 2 - model standardowy, 3 - model Kelvina-Voigta, 4 - model Maxwella, 5 - model symetryczny

lize ilościowej, zachodzących procesów przemiany energii. Termodynamika operuje makroskopowymi charakterystykami badanych materiałów opierając się na pewnych zasadach ustalonych doświadczalnie (zasadach termodynamiki), które mają bardzo ogólny charakter. Podstawową rolę odgrywa równanie bilansu entropii, które uwzględnia strumienie i źródła entropii w rozpatrywanym elemencie objętości badanego materiału.

Wykorzystując obowiązujące prawa termodynamiki oraz makroskopowe prawa zachowania masy, pędu i energii, wyliczając natężenie źródła entropii (równanie Gibbsa) można otrzymać zbiór równań feno-

menologicznych dających związki między wielkościami charakteryzującymi naprężenie w ośrodku (tensor naprężenia) i deformację (gradient prędkości). Znane w termodynamice procesów nieodwracalnych zasady Onsagera i Curie pozwalają zredukować liczbę niezależnych współczynników fenomenologicznych.

Interesująca geomechaniczna hipoteza tego typu jest prezentowana w pracy [1], w której pokazano równania ruchu dla niejednorodnego, nieizotropowego ośrodka ciągłego nie precyzując metody doświadczalnej znalezienia współczynników występujących w tych równaniach.

Wykorzystując metody termodynamiki procesów nieodwracalnych można konstruować modele mechaniczne (Hooke'a, Kelvina-Voigta, Newtona) [53, 54], opis taki dotyczy jednak tylko makroskopowego zachowania się ośrodka bez uwzględniania jego struktury. Zaproponowano też zmodyfikowaną termodynamikę dla procesów mechanicznych [7, 8, 53, 54, 65, 66]. Z założeń termodynamiki procesów nieodwracalnych odrzucono aksjomat o istnieniu lokalnego stanu termodynamicznego, a wprowadzono funkcję "pamięci", która pozwala opisać stan układu na podstawie jego "historii". Można dzięki temu rozważać procesy termodynamiczne dalekie od stanu równowagi, ale mimo to teoria ta jest również odległa od rozwiązań przydatnych praktycznie, szczególnie w wypadku ośrodka glebowego.

W wypadku badania gleby i opisu jej odkształceń, większe szanse mogą dać metody termodynamiki statystycznej, której już same założenia są bliższe rzeczywistości. Metody takie mogą być stosowane do opisu badanych procesów tak w ośrodkach ciągłych, jak i rozdrobnionych z uwzględnieniem oddziaływań poszczególnych elementów strukturalnych ośrodka, a przez ciągłą strukturę wiązań tych elementów przyjmując ciągłość naprężeń i odkształceń w tym ośrodku.

CEL PRACY I WYBÓR MODELU DO WERYFIKACJI DOŚWIADCZALNEJ

Cel pracy

Przedstawione powyżej rozważania pokazujące różne sposoby opisu charakterystyk mechanicznych gleb i trudności z tym związane wykazały,

że klasyczne sposoby realizacji odkształceń i odpowiadające im matematyczne zapisy nie stosują się do rzeczywistych procesów zachodzących w glebie.

Celem niniejszej pracy jest wybór innego modelu matematycznego do opisu podstawowej zależności naprężenie-odkształcenie w glebie. Takiego modelu, który uwzględniałby czasowe zależności występujących w nim zmiennych, a jego parametrom można by przypisać realne fizyczne cechy badanego materiału. Kształt równania stanu nie może być dowolnie komplikowany ze względu na techniczne ograniczenia wykonania eksperymentu, który mógłby takie równanie weryfikować także i ze względu na fizyczną jego interpretację.

Założono więc też wybór najlepszego modelu eksperymentu, który pozwoli wyznaczyć ilościowo parametry równania. Związane jest to z zastosowaniem odpowiedniego aparatu i materiału badawczego, który stanowić będą oryginalne próby glebowe.

Pokazano sposób praktycznej realizacji powyższych zadań, umożliwiając powielenie ich na inne rodzaje gleb i inne parametry odkształceń.

Nieliniowy model lepko-sprężysty

Termodynamika statystyczna bada obiekty składające się z bardzo dużej liczby elementów, a równania opisujące badane procesy fizyczne wyprowadza wykorzystując metody statystyczne.

Wzrost liczby elementów komplikuje znacznie własności całego układu, ale jednocześnie wprowadzenie uśrednionych wartości umożliwia statystyczny opis.

Gleba jest naturalnym ciałem fizycznym złożonym z bardzo wielu elementów, a badana próbka stanowi małą część dużego ośrodka. W takim wypadku możliwe jest więc wprowadzenie funkcji rozkładu, tzn. gęstości prawdopodobieństwa przebywania układu w stanie o danych wartościach parametrów. W szczegółowych rozważaniach procesu odkształcania gleby można więc korzystać z prawa rozkładu Gibbsa.

Cząstki gleby są otoczone warstwami wody związanej. Nawet przy małych wilgotnościach gleb mineralnych grubość takich warstw jest wystarczająca do wytworzenia ciągłej struktury wiązań między cząstkami

gleby (np. w piasku o 1% wilgotności i powierzchni właściwej $1 \text{ m}^2/\text{g}$ liczba warstw molekuł wody może wynosić około 40, a w lessie o powierzchni właściwej $10 \text{ m}^2/\text{g}$ - 22).

Sily zewnętrzne przyłożone do takiego ośrodka ziarnistego są przekazywane przez wiązania, a odkształcenie odbywa się wskutek deformacji wiązań (co potwierdza znikoma odkształcalność ziarn cząstek gleby). Ponieważ rozkład wielkości cząstek gleby jest zupełnie losowy, to zawsze będą cząstki o takiej orientacji, że nawet najmniejsza siła będzie mogła spowodować nieodwracalną deformację części wiązań i dlatego też występowanie czystych deformacji sprężystych jest wątpliwe. Natomiast lepkość wody w wiązaniach ma istotny wpływ na procesy deformacji i to w każdej fazie obciążania. Prosty model zjawisk mechanicznych zachodzących w ziarnistym ośrodku można więc przedstawić następująco: elementarne odkształcenia sprężyste zachodzą w tych połączeniach, gdzie siła działająca jest prostopadła do płaszczyzny styecznej ziarn, a elementarne odkształcenia lepkie tam, gdzie siła jest równoległa do płaszczyzny styecznej ziarn [55, 56].

Zaproponowano statystyczny model lepkiego płynięcia oraz stworzono termodynamiczną teorię wyjaśniającą wykładniczą zależność szybkości procesów płynięcia od temperatury [18]. Podejście takie może być zastosowane do szerokiej klasy płynięcia lepkiego, w tym i do odkształcenia materiału glebowego [56]. W modelu tym przyjęto, że dwie warstwy molekuł cieczy znajdują się w odległości l_1 i przesuwały się jedna względem drugiej pod wpływem przyłożonej siły f (rys. 4).

Z praw termodynamiki wynika, że jeśli układ podlega prawu rozkładu Gibbsa, to szybkość procesu równa jest szybkości przechodzenia układu nad barierą potencjału o skończonej szerokości, przy spełnionym warunku, że układ znajduje się w pobliżu wierzchołka bariery, tzn. wysokość bariery nie jest duża w porównaniu z gradientem potencjału, który powoduje dany przepływ (w wypadku odkształceń oznacza to, że składowe tensora naprężenia powinny należeć do odpowiedniego przedziału wartości). Warunek ten jest spełniony w sposób oczywisty, gdy bada się eksperymentalnie różne prędkości procesów.

W wypadku przedstawionego modelu z definicji lepkości możemy napisać wyrażenie na prędkość względną warstw

$$\eta = \frac{fl}{\eta}, \quad (3)$$

gdzie η - różnica prędkości warstw,
 η - współczynnik lepkości dynamicznej.

Zakładając, że ruch warstwy zachodzi dzięki przejściu molekuly z jednego stanu równowagi w drugi w tej samej warstwie należy przewidzieć wolne miejsce (dziurę) w uporządkowanych molekułach warstwy. Do przesunięcia pozostałych molekuł i otrzymania wolnego miejsca potrzebna jest energia. Skok, który wykonuje molekula przy przejściu z jednego położenia równowagi w drugie można rozpatrywać jako przejście układu nad barierą energii potencjalnej. Przy założeniu, że bariera jest symetryczna, działanie siły powodujące przepływ daje zmniejszenie wysokości bariery energetycznej o wielkość $\frac{1}{2} fl_2 l_3$, a przy ruchu w przeciwnym kierunku wysokość bariery zwiększa się o tę samą wartość.

Prawdopodobieństwo, że molekula w warstwie porusza się w kierunku siły f jest [18, 56]

$$K_f = K_{\exp} \frac{fl_2 l_3}{2kT}, \quad (4)$$

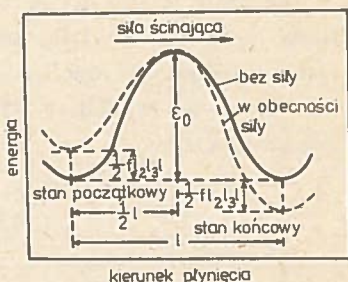
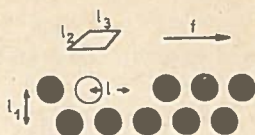
i w kierunku przeciwnym

$$K_b = K_{\exp} \frac{-fl_2 l_3}{2kT}, \quad (5)$$

gdzie k - stała Boltzmanna, T - temperatura, K - liczba przejść molekuly nad barierą potencjału w ciągu sekundy bez udziału siły

Prędkość przepływu V (równ. 3) jest

$$V = (K_f - K_b) l. \quad (6)$$



Rys. 4. Energia potencjalna lepkiego odkształcenia, l_1 - odległość warstw, l - odległość między dwoma położeniami równowagi w kierunku ruchu, l_3 - odległość między molekułami w kierunku prostym do kierunku ruchu

Wartość K otrzymuje się z termodynamicznego rozkładu Gibbsa, a końcowe równanie na prędkość lepkiego przepływu ma postać

$$\dot{\gamma} = 2kT \sin h \frac{f_{12} f_{13}}{2kT} \exp \frac{-\Delta F}{kT}, \quad (7)$$

gdzie ΔF - zmiana energii swobodnej cząstki

Równanie to jest słuszne, kiedy badany ośrodek jest złożony z dużej liczby elementów oraz kiedy dla danego przepływu istnieje bariera potencjału o skończonych rozmiarach.

Porównując równania 3 i 7, możemy otrzymać zależność na współczynnik lepkości

$$\eta = \frac{f_{12} h \exp \frac{\Delta F}{kT}}{2kT \sin h \frac{f_{12} f_{13}}{2kT}}, \quad (8)$$

gdzie h - stała Plancka.

Zapisując stałe w postaci dwu A i B , dla wypadku izotermicznego mamy

$$\eta = \frac{A \sigma(t)}{\sin h [B \sigma(t)]}, \quad (9)$$

gdzie σ - siła na jednostkę powierzchni

Podobnie możemy rozważyć wiele elementów strukturalnych ściskanych siłą powierzchniową σ . Oddziaływanie pomiędzy elementami opisuje potencjał $V(x_0 - x)$, gdzie x jest współrzędną położenia pewnego dowolnego elementu strukturalnego zależną od naprężenia, x_0 - współrzędną położenia równowagi tego elementu [44, 55].

Istotnym problemem jest tu wybór potencjału, który dostatecznie dobrze opisywałby oddziaływanie elementów i równocześnie w obliczeniach dawałby analityczne wyrażenie na współczynnik sprężystości E .

Rolę sił potencjalnych prowadzących do oddziaływań sprężystych w ośrodku gębowym odgrywają głównie siły elektrostatyczne wywołane przez jony zaadsorbowane na powierzchni cząstek fazy stałej gleby. Ponieważ koncentracja jonów z odległością od powierzchni cząstek gleby zmienia się wykładniczo, to można przyjąć, że i potencjał będzie miał podobny kształt. Za takim kształtem potencjału przemawia też fakt, że głównie interesują nas niewielkie odchylenia od położeń

nia równowagi (minimum energii potencjalnej), jak również to, że we-
ryfikacją doświadczalną jest test ściskania (a nie rozciągania) i w ta-
kim wypadku potencjał wykładniczy jest dobrym przybliżeniem [24, 26].

Dodając do siebie dwa wyrażenia na potencjał w postaci funkcji
 $\exp(x_0 - x)$ pochodzące od sąsiednich elementów otrzymujemy wyrażenie

$$V(x) = Mch \left[\alpha (x_0 - x) \right], \quad (10)$$

gdzie M, α - stałe parametry potencjału.

Definiując współczynnik sprężystości E jako moduł sprężystości po-
dłużnej

$$E = \frac{\sigma_{11}}{\epsilon_{11}} = \frac{\sigma d}{\Delta d}, \quad (11)$$

gdzie σ_{11} - siła powierzchniowa prostopadła do warstwy kulek, ϵ_{11} -
okształcenie podłużne spowodowane przyłożoną siłą, d - wymiar
liniowy warstwy, Δd - zmiana długości próbki spowodowana przy-
łożeniem siły;

oraz korzystając z rozkładu Gibbsa i praw termodynamiki otrzymujemy
zależność współczynnika sprężystości E od naprężenia

$$E = \frac{\sigma \alpha d \exp\left(\frac{\Delta F}{kT}\right)}{kT \operatorname{arc sh} \frac{\sigma_{11}}{M\alpha}}. \quad (12)$$

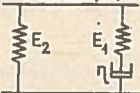
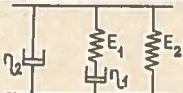
Podobnie jak w wypadku współczynnika lepkości stałe występujące
w równaniu 12 możemy wyrazić przez dwie nowe stałe C i D , wtedy
mamy

$$E = \frac{C \sigma(t)}{\operatorname{arc sh} [D \sigma(t)]}. \quad (13)$$

Otrzymane wyrażenia na współczynniki lepkości i sprężystości,
przedstawione odpowiednimi wzorami 9 i 13, mogą być wprowadzone
bezpośrednio do różnych modeli reologicznych.

Autorka we wcześniejszych swoich pracach [35, 36] przedstawiła
przykładowo rozwiązania równań najprostszych modeli reologicznych, w któ-
rych liczba parametrów nie przekracza 4, wprowadzając funkcyjny współ-
czynnik lepkości (9) oraz jego pierwsze przybliżenie (tab. 2).

Tabela 2. Rozwiązania równań modeli reologicznych dla przypadku $\dot{\epsilon} = n$ przy dwóch przykładach funkcyjnej zależności $\eta = \eta(\sigma)$

M O D E L				
MAXWELL	KELVIN-VOIGT	STANDARDOWY	SYMERYCZNY	
				
$\eta\dot{\sigma} + E\dot{\epsilon} = \eta E \dot{\epsilon}$	$\dot{\sigma} = E\dot{\epsilon} + \eta\dot{\epsilon}$	$\eta\dot{\sigma} + E\dot{\epsilon} = 2E\eta\dot{\epsilon} + E^2\dot{\epsilon}$	$\eta\dot{\sigma} + E\dot{\epsilon} = \eta^2\dot{\epsilon} + 3E\eta\dot{\epsilon} + E^2\dot{\epsilon}$	
$\eta = \frac{A\delta(t)}{\sinh\delta(t)}$ $A\dot{\sigma} = E \int \sinh\delta(t) dt =$ $= AEnt$	$(1 - \frac{An}{\sinh\delta(t)})\dot{\sigma} =$ $= Ent$	$\dot{\sigma} + \frac{E}{A} \int \sinh\delta(t) dt -$ $- \frac{E^2n}{A} \int \frac{\sinh\delta(t)}{\delta(t)} dt =$ $= 2Ent$	$\dot{\sigma} + \frac{E}{A} \int \sinh\delta(t) dt -$ $- E^2 \eta \int \frac{\sinh\delta(t)}{A\delta(t)} dt = 3Ent$	
$\eta = k\dot{\sigma} + c$ $k \frac{\dot{\sigma}^2}{2} + c\dot{\sigma} +$ $+ E(1+kn) \int \delta(t) dt =$ $= cEnt$	$\dot{\sigma} = \frac{n}{1+kn} (Et + c)$	$- \frac{k}{2} \dot{\sigma}^2 + c\dot{\sigma} +$ $+ E(1+2kn) \int \delta(t) dt =$ $= 2cEnt + \frac{E^2n}{2} t^2$	$\dot{\sigma} + \int \frac{E}{k\dot{\sigma} + c} \delta(t) dt -$ $- \int \frac{E^2n}{k\dot{\sigma} + c} dt = 3Ent$	

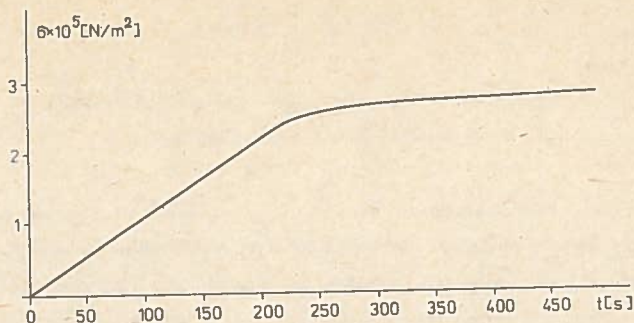
$$\eta = -k\dot{\sigma} + c, \quad (14)$$

gdzie k , c - stałe niezależne od naprężenia.

Wprowadzając zmienny współczynnik lepkości (9) do równania modelu standardowego otrzymano też numeryczne ogólne rozwiązanie tego równania dla wypadku $\sigma = \sigma(t)$ przy stałej prędkości odkształcenia rzędu 10^{-1} 1/s i stałym współczynniku sprężystości E rzędu 10^5 N/m² (rys. 5). Wykres odpowiadający temu rozwiązaniu potwierdził słuszność przyjętej fizycznej analizy procesu odkształcenia gleby, szczególnie w wypadku szybkich odkształceń.

Zgodnie z przyjętym modelem w glebie mogą występować elementy sprężyste (powierzchnia styczości ziarn jest równoległa do kierunku działania siły) w połączeniach równoległych i szeregowych.

Wszystkie elementy pierwszego rodzaju tworzą pewną ciągłą strukturę wiązań sprężystych, nie łączą się szeregowo z wiązaniami lepкими i dają w wyniku pewien efektywny moduł sprężystości E_2 . Pozostałe elementy sprężyste tworzą połączenia szeregowe z elementami lepкими i



Rys. 5. Ogólne rozwiązanie $\sigma = \sigma(t)$ modelu standardowego przy stałym współczynniku sprężystości i zmiennym współczynniku lepkości :

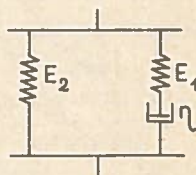
$$\eta = \frac{A \sigma(t)}{\dot{\sigma}(t)}, \text{ dla prędkości odkształcenia rzędu } 10^{-1} \text{ 1/s}$$

można im przypisać efektywny moduł sprężystości E_1 oraz współczynnik lepkości η .

Najprostszy model lepko-sprężysty, w którym występuje najmniejsza z możliwych do przyjęcia liczba parametrów, przedstawia analog mechaniczny (rys. 6).

Model ten jest identyczny ze znanym modelem Poyntinga-Thomsona i dobrze opisuje wszystkie podstawowe procesy reologiczne w glebie: pełzanie, relaksację, opóźnianie sprężyste.

Zależność naprężenia i odkształcenia oraz ich pochodnych czasowych w modelu standardowym przedstawia równanie 15, które jest pierwszym przybliżeniem równania 1 dla $m = n = 1$



Rys. 6. Analog mechaniczny modelu standardowego

$$E_1 E_2 \varepsilon + (E_1 + E_2) \eta \dot{\varepsilon} = E_1 \sigma + \eta \dot{\sigma}, \quad (15)$$

gdzie: σ - naprężenie, ε - odkształcenie, a kropki nad nimi oznaczają odpowiednie pochodne czasowe.

METODYKA BADAŃ

Charakterystyka wybranego materiału glebowego
i przygotowanie próbek do badań

W celu przeprowadzenia weryfikacji doświadczalnej wybranego, nieliniowego modelu reologicznego poszukiwano odpowiedniego materiału badawczego. Z założeń modelu wynika, że powinien on cechować się wyraźną budową ziarnistą o naturalnym rozkładzie wielkości elementów strukturalnych. Nie może zawierać dużo związków organicznych, ażeby nie deformować obrazu połączeń (wiązań) między elementami przez kontakt otoczek wodnych zaadsorbowanych na tych elementach. W badanym materiale należy utrzymywać taką wilgotność podczas doświadczenia, która zapewni wytworzenie ciągłej struktury wiązań pomiędzy elementami, a tym samym umożliwi przekazywanie poprzez takie wiązania naprężeń przyłożonych z zewnątrz do badanej próbki i jednocześnie rejestrowanie odkształceń.

Wybrany materiał badawczy powinien być z jednej strony bardzo zbliżony do teoretycznie wytworzonego modelu ośrodka ziarnistego, dla którego dobrano matematyczny opis procesu odkształcenia, a z drugiej strony powinien być naturalną glebą o losowym rozkładzie wielkości ją charakteryzujących wszystkich cech fizycznych.

Badania wpływu prędkości odkształceń na charakterystyki mechaniczne przeprowadzono dla trzech prób z poziomów akumulacyjnych gleb pływowych o składzie granulometrycznym: piasku słabo gliniastego (Rokitno), piasku gliniastego mocnego (Jabłoń) oraz gliny lekkiej pylastej (Felin).

Materiał badawczy pobrano z głębokości 0-0,25 m, a więc z warstwy najbardziej narażonej na działanie naprężeń zewnętrznych i odkształceń.

W celu scharakteryzowania badanych gleb wykonano wiele standardowych analiz gleboznawczych, a otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 3.

Glebę powietrznie suchą przesiewano przez sito o średnicy oczek 1 mm, następnie dodawano odpowiednią ilość wody i pozostawiano na

Tabela 3. Wybrane fizyczne własności badanych gleb

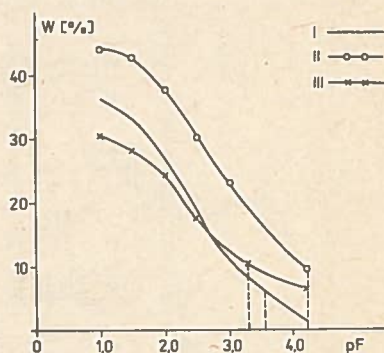
	Badana gleba	I Rokitno	II Jabłoń	III Felin
Skład granulometryczny (%)	1-0,1 mm	77	62	2
	0,1-0,02 mm	16	18	56
	0,02-0,002 mm	5	16	29
	< 0,002 mm	2	4	13
Porowatość ogólna (%)		41,5	46,5	49,8
Próchnica (%)		1,03	1,30	1,48
Gęstość gleby S_0 (kg/m^3)		1,51	1,39	1,25
Gęstość fazy stałej S_1 (kg/m^3)		2,58	2,59	2,49
Wilgotność eksperymentalna (%)		5,8	9,4	10,4

kilka dni w termohigroście w celu uzyskania ustalonej wilgotności poszczególnych gleb. Próbki walcowe osłonięte gumą lateksową preparowano w specjalnej formie cylindrycznej, a kontrolowaną gęstość uzyskiwano przez stosowanie wibracji.

Taka procedura przygotowywania próbek do badań pozwala na uzyskanie dużej powtarzalności otrzymanych wyników.

Dla wszystkich charakterystyk mechanicznych (11 różnych prędkości odkształceń i dla każdej z nich 4 naprężeń hydrostatycznych) wykonanych w trzech powtórzeniach (razem 132 krzywe) błąd względny wyniósł 4-5%.

Wilgotność badanych próbek glebowych utrzymywana na niskim poziomie w granicach między pF 3,3 i pF 4,2 pozwalała ograniczyć eksperyment do testów bezfiltracyjnych (rys. 7).

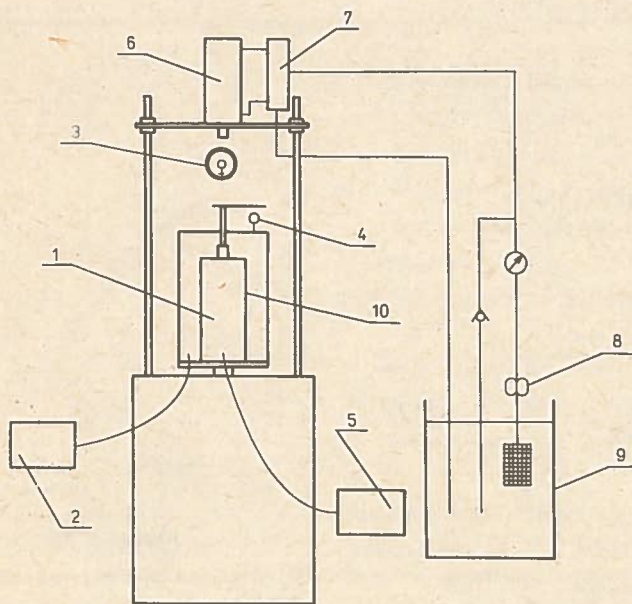


Rys. 7. Charakterystyki potencjału wody badanych gleb w funkcji wilgotności z zaznaczonymi wilgotnościami eksperymentalnymi

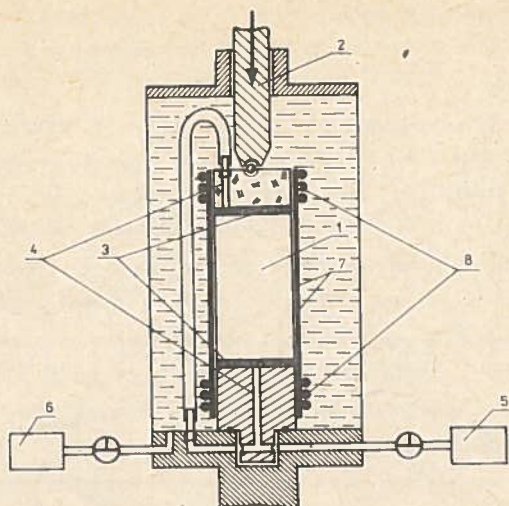
Opis zastosowanej aparatury

Weryfikację doświadczalną przedstawionego nieliniowego modelu reologicznego można przeprowadzić za pomocą aparatu umożliwiającego realizację testu odkształcenia próbki glebowej z różnymi ustalonymi prędkościami odkształcenia.

Najprostsze i powszechnie stosowane aparaty, takie jak: edometr, aparat bezpośredniego ścinania, klasyczny i typu Roscoe oraz aparaty z grupy tzw. przekątniowych i skrętnych nie dają możliwości przeprowadzenia podobnych eksperymentów, przede wszystkim nie można w nich zrealizować testów odkształcenia z kontrolowanymi prędkościami odkształceń.



Rys. 8. Schemat aparatu trójosiowego ściskania, 1 - próbka glebowa, 2 - system wytwarzający i mierzący ciśnienie w celce, 3 - dynamometr, 4 - rejestrator osiowej deformacji próbki, 5 - układ mierzący ciśnienie wody w próbce, 6 - cylinder, 7 - system kontrolny, 8 - zabezpieczenie wydajności pompy, 9 - zbiornik, 10 - cienka guma lateksowa.



Rys. 9. Schemat celki pomiarowej, 1 - badana próbka, 2 - obciążenie osiowe, 3 - kamienie filtracyjne, 4 - wyjście do atmosfery lub układu pomiarowego, 5 - układ pomiarowy ciśnienia w próbce, 6 - regulacja ciśnienia wody w celce, 7 - gumowe pierścienie uszczelniające, 9 - osłaniająca próbkę cienka guma lateksowa

Najlepszym aparatem do uzyskania charakterystyk mechanicznych gleb w kontrolowanych warunkach wymuszeń jest aparat trójosiowego ściskania typu norweskiego [2], szczególnie nadaje się do tego celu wersja aparatu zmodyfikowanego w Zakładzie Agrofizyki [60], rysunki 8 i 9. Aparat ten umożliwia przeprowadzenie testu odkształcenia próbki glebowej z różnymi ustalonymi prędkościami odkształcenia. Specjalny napęd hydrauliczny umożliwia uzyskiwanie szybkich odkształceń, do 1 m/s, koniecznych w badaniach rolniczych ze względu na spotykane w praktyce takie wartości. Trójosiowe testy z różnymi, ale ustalonymi prędkościami odkształceń, $\dot{\epsilon} = n$, dają możliwość uzyskania danych doświadczalnych potrzebnych do weryfikacji wybranego nieliniowego modelu reologicznego. W czasie procesu odkształcenia możliwa jest ciągła rejestracja naprężenia i odkształcenia. Warunki brzegowe i początkowe badanego procesu można zadawać i kontrolować przez regulację ciśnienia wody otaczającej próbkę w celce aparatu. Dodatkową zaletą badań w aparacie trójosiowym jest możli-

wość wykonywania badań wytrzymałościowych, gdzie powierzchnia zniszczenia badanej próbki glebowej nie jest determinowana przez konstrukcję urządzenia.

Wszystkie pomiary przeprowadzono w warunkach izotermicznych ($T = 293 \text{ K}$), realizując test konsolidacji bez filtracji, wykorzystując modelowe walcowe próbki glebowe o wymiarach: średnica - 38,1 mm, wysokość - 76,2 mm. Przy ustalonym wstępnym naprężeniu hydrostatycznym panującym w celce aparatu rejestrowano naprężenie w kierunku osiowym próbki w zależności od odkształcenia osiowego (przemieszczenia), dla różnych zadanych prędkości odkształcenia. Wykonano oznaczenia dla czterech wartości naprężeń hydrostatycznych ($0,5; 1; 2; 3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$) oraz jedenastu różnych prędkości odkształceń w dwóch zakresach wielkości: wolnych ($0,25; 0,80; 1,38; 2,11; 2,80; 4,20 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$) i szybkich ($0,11; 0,16; 0,19; 0,24; 0,33 \text{ 1/s}$), dla każdej z trzech badanych prób glebowych.

Przez określenie naprężenie hydrostatyczne oznaczono wstępne ciśnienie panujące w celce aparatu, przy którym przebiega proces konsolidacji próbki. Ustalone zostają w ten sposób warunki początkowe wyznaczające fizyczny stan próbki glebowej przed wprowadzeniem kontrolowanego odkształcenia. W każdym badanym wypadku wstępną konsolidację uzyskiwano po upływie określonego czasu (5 min.), który jest wystarczający do osiągnięcia stanu równowagi tego procesu w badanych glebach [34, 55].

Test bezfiltracyjny oraz wstępna konsolidacja zapewniały prowadzenie eksperymentu bez zmiany objętości próbki. Przy takich warunkach odkształcenie próbki jest rzeczywiście funkcją tylko odkształcenia osiowego (przemieszczenia), bez konieczności uwzględniania zmiany powierzchni przekroju próbki z jej wysokością.

Dwa stosowane zakresy prędkości odkształceń określono jako szybkie i wolne w celu podkreślenia istotnej różnicy między nimi. Pierwsze z nich dotyczą sytuacji kiedy czas, w którym zachodzi odkształcenie jest porównywalny z czasem ustalania się równowagi samego procesu, a drugie dotyczą odkształceń w znacznie dłuższym czasie. Oba takie wypadki mogą wystąpić w praktyce rolniczej. Bardziej jednak in-

interesujące jest poznanie oddziaływań szybkich, które w pracy maszyn i narzędzi rolniczych dominują. Przyjęte określenia - szybkie i wolne - są też odpowiednikami tych samych wielkości występujących w literaturze obcojęzycznej, np. w języku angielskim "fast" i "slow", w języku niemieckim "schnell" i "langsam", w języku rosyjskim "быстрый" i "медленный". Granicę podziału na szybkie i wolne procesy oznacza czas ustalania się danego procesu wyznaczany indywidualnie dla każdego badanego ośrodka.

OMÓWIENIE I INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

Charakterystyki mechaniczne badanych gleb

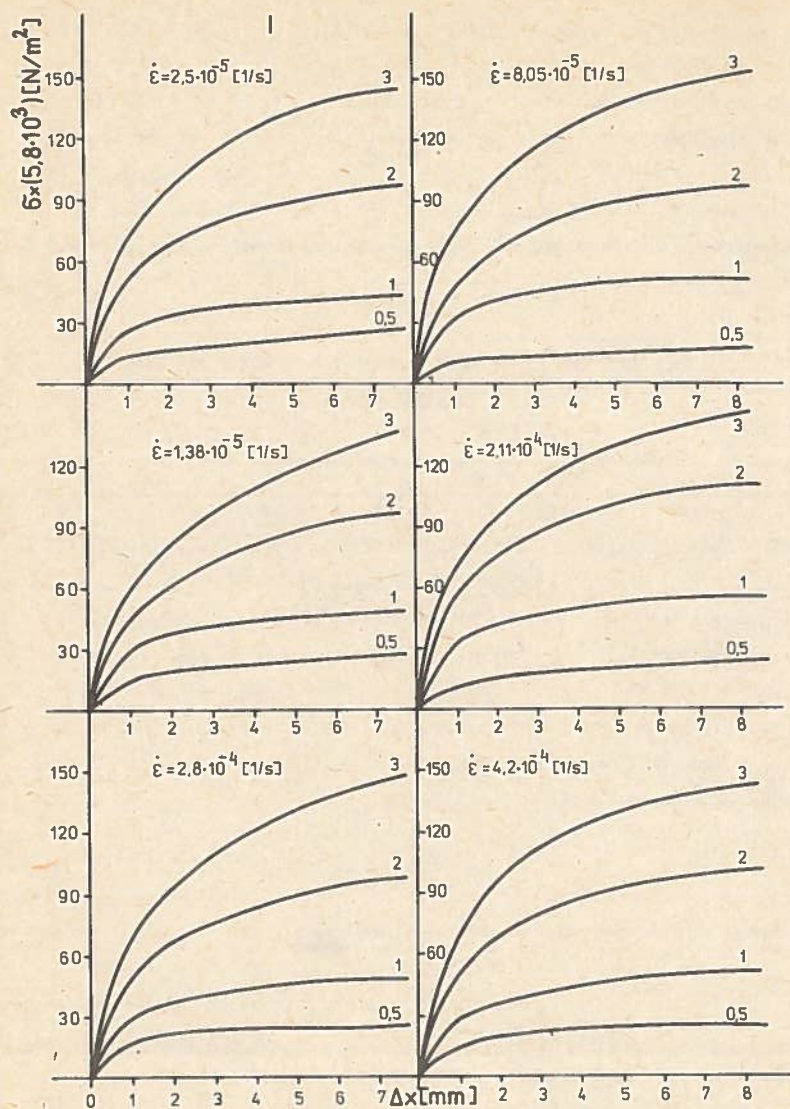
Otrzymane charakterystyki mechaniczne badanych gleb odpowiednio dla wolnych i szybkich odkształceń przedstawiają kolejne rysunki (10, 11, 12, 13, 14, 15). Wykresy pochodzą bezpośrednio z zapisu rejestratora i pokazują zależność siły osiowej na jednostkę powierzchni przekroju próbki σ wyrażonej w N/m^2 od bezwzględnego odkształcenia osiowego Δx (zmiany wysokości próbki) wyrażonego w mm. Parametrami tego doświadczenia są cztery różne naprężenia hydrostatyczne, a więc po prostu ciśnienia panujące w celce aparatu trójosiowego oraz ustalone prędkości odkształcenia

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta x}{x} \cdot \frac{1}{t} = \text{const}, \quad (16)$$

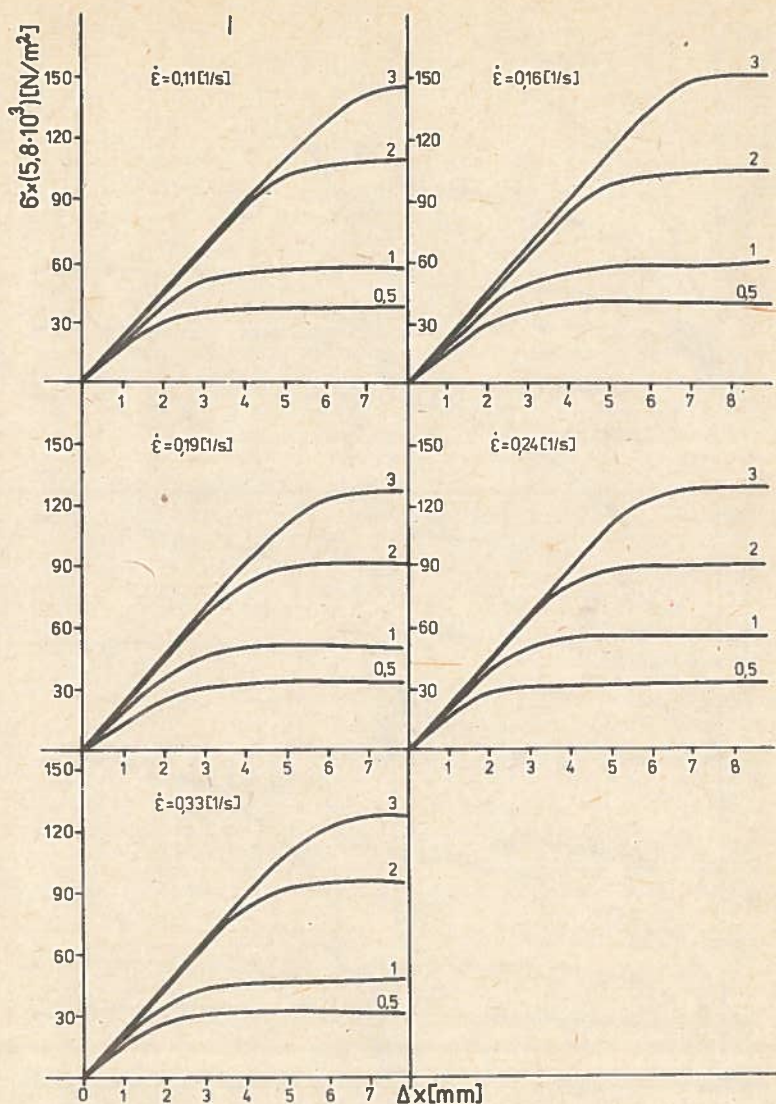
gdzie: Δx - bezwzględne odkształcenie osiowe, x - wysokość początkowa próbki, t - czas, w jakim to odkształcenie następuje.

Wszystkie wykresy, bez względu na rodzaj badanej gleby, wykazują ten sam charakter zależności $\sigma = \sigma(\Delta x)$ w ramach tego samego zakresu prędkości odkształcenia.

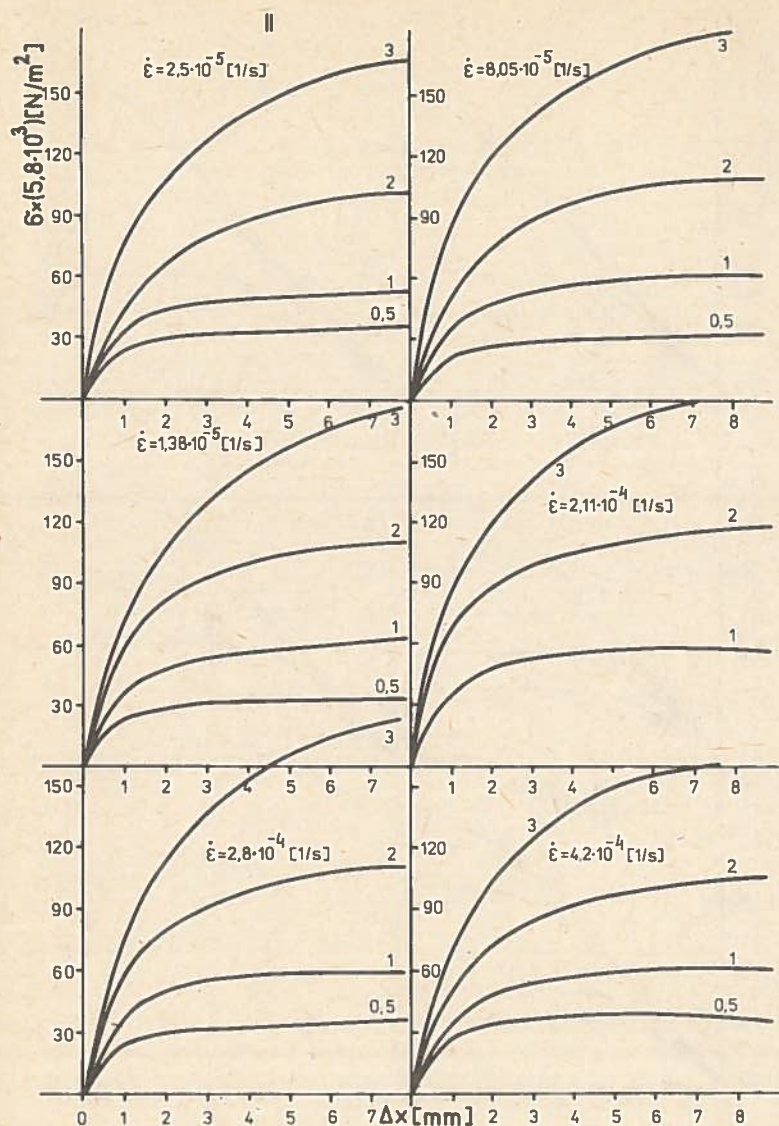
Wolne odkształcenia i większe wartości naprężeń hydrostatycznych powodują przyrost naprężenia praktycznie w całym zakresie zmiany wysokości wszystkich badanych prób glebowych. Graniczne wartości naprężeń przyjmują wysokie wartości, ale też przy dużych odkształceniach



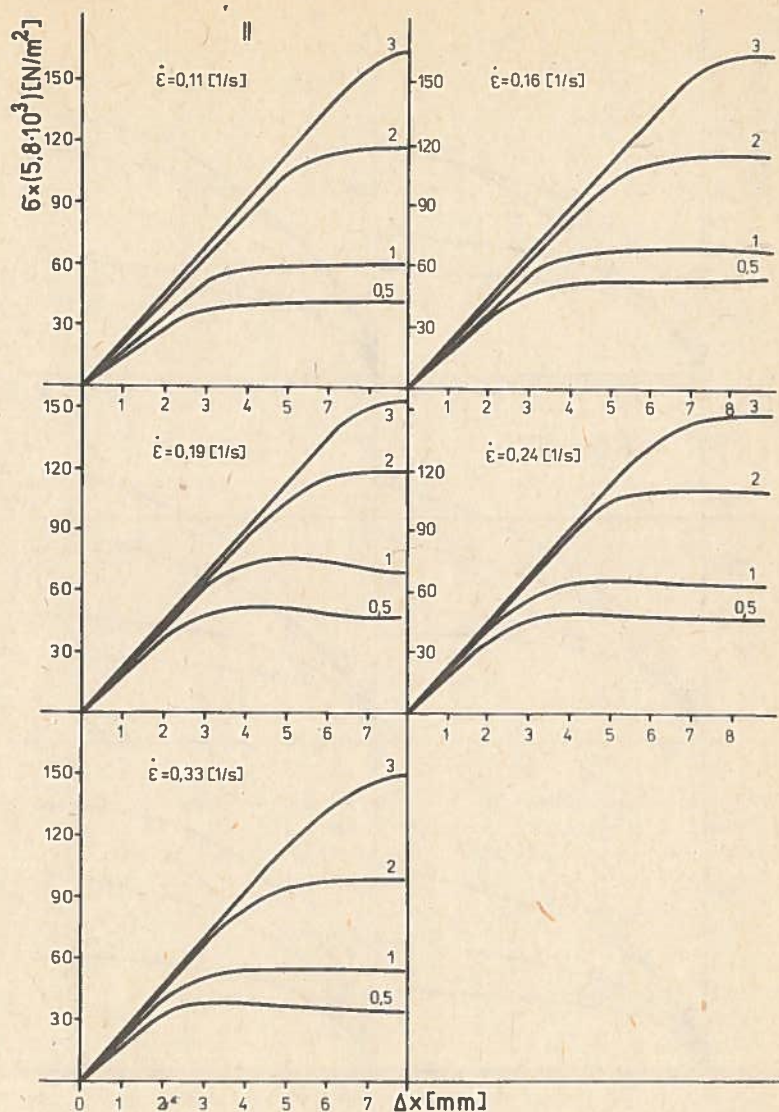
Rys. 10. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego (Rokitno) dla wolnych odkształceń



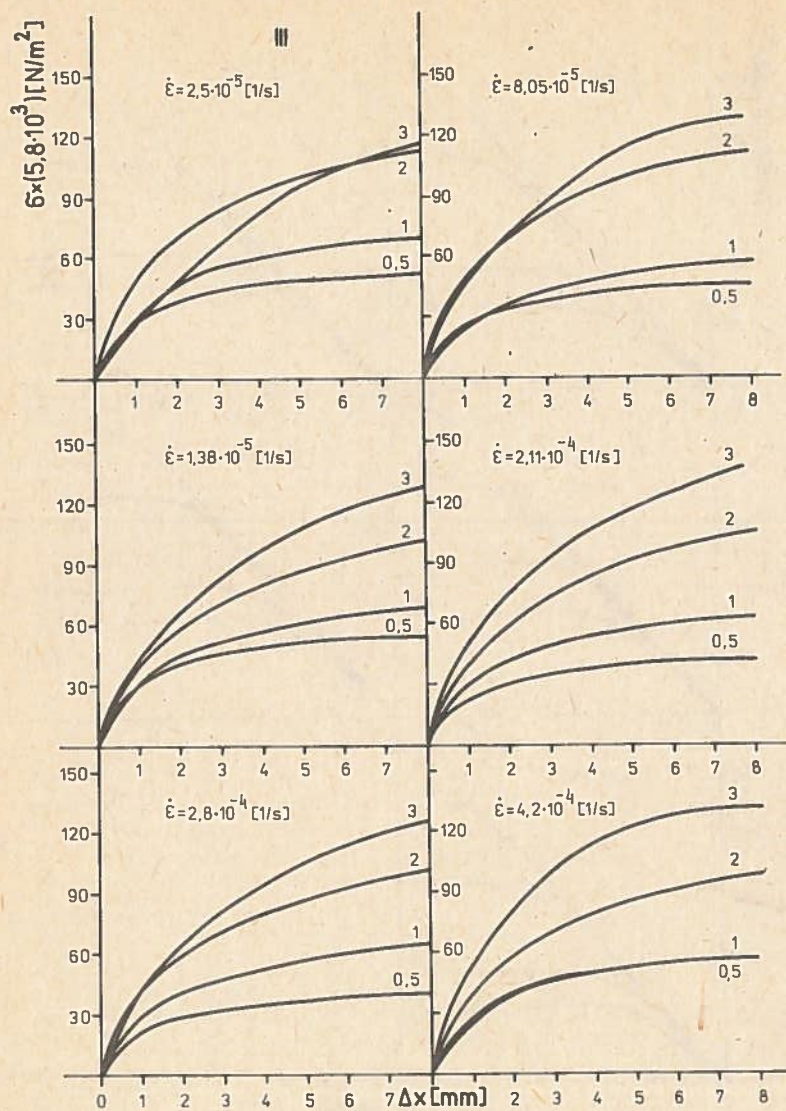
Rys. 11. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego (Rokitno) dla szybkich odkształceń



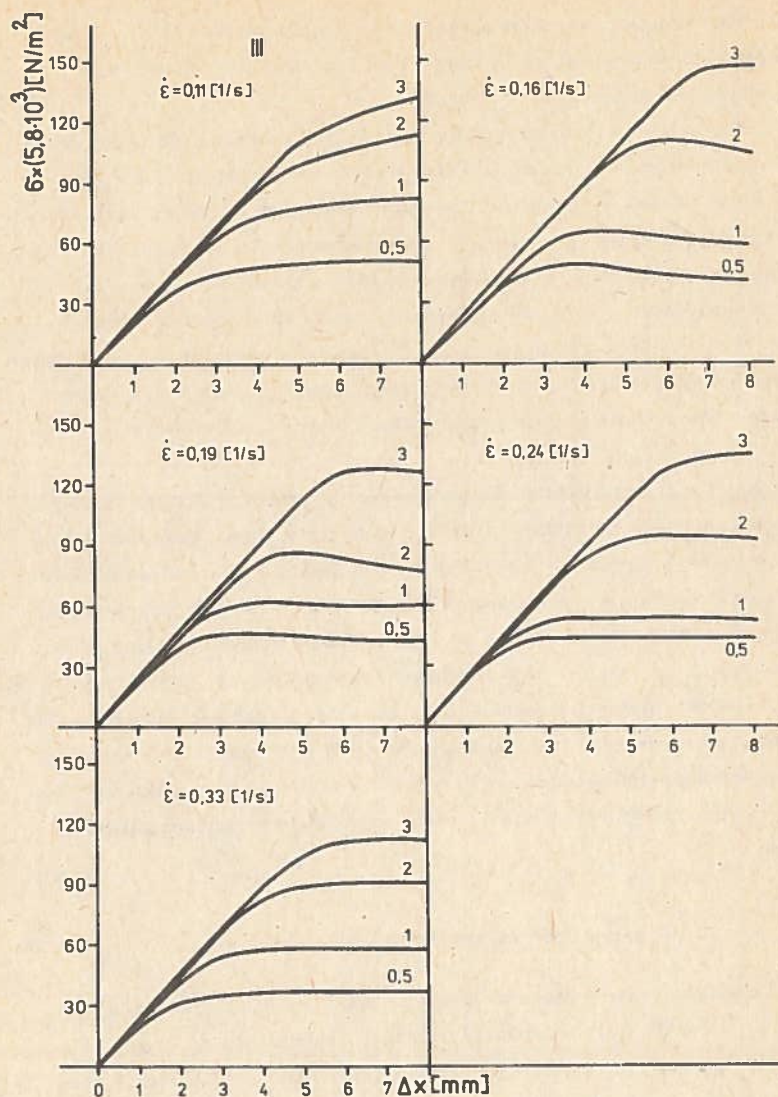
Rys. 12. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (Jabłoni) dla wolnych odkształceń



Rys. 13. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (Jabłoń) dla szybkich odkształceń



Rys. 14. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej (Felin) dla wolnych odkształceń



Rys. 15. Charakterystyki mechaniczne gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej (Felin) dla szybkich odkształceń

osiowych. Mniejsze wartości naprężeń hydrostatycznych wpływają na zmniejszenie wytrzymałości badanych gleb i granica jej wypada przy mniejszych odkształceniach osiowych.

Analogiczne charakterystyki otrzymane przy szybkich odkształceniach mają podobny przebieg, a oznaczenie wytrzymałości badanych gleb jest wyraźnie widoczne. Wytrzymałość jest uzależniona od wielkości zastosowanych naprężeń hydrostatycznych, a maksymalna ich wartość wypada w wypadku gleb o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego i piasku gliniastego mocnego przy odkształceniu osiowym próbek od 6 do 7 mm, dla gleby zaś o składzie granulometrycznym gleby lekko pylastej 7-8 mm. Przy dwóch mniejszych naprężeniach hydrostatycznych granica wytrzymałości obniża się i zauważana jest przy niższych wartościach odkształceń osiowych, w przedziale 3-5 mm.

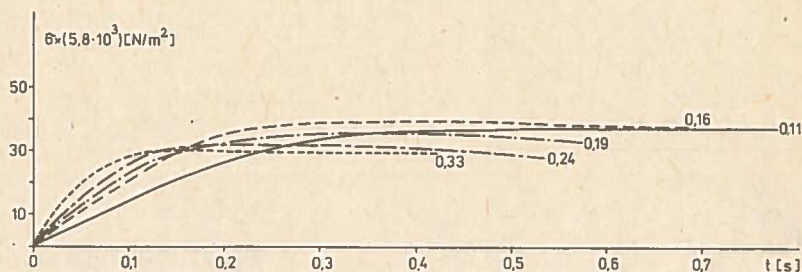
Naprężenie hydrostatyczne przyłożone do próbki w fazie wstępnego zagęszczania jest przejmowane przede wszystkim przez wodę znajdującą się w glebie i zgodnie z lepko-sprężystym modelem odkształcenie ośrodka będzie trudniejsze przy dużych naprężeniach występujących w stykach wodnych między cząsteczkami fazy stałej. Może wtedy dochodzić do łatwiejszego przenoszenia sił działających prostopadle do płaszczyzny styczności dwóch cząstek fazy stałej niż dopuszczenia lepkiego płynięcia. Charakter całego procesu jest bardziej sprężysty lub lepki w zależności od wielkości naprężeń występujących w wodzie otaczającej cząstki fazy stałej, a więc zależy od naprężeń, które wywołały wstępną konsolidację gleby.

Wytrzymałość badanych ośrodków glebowych

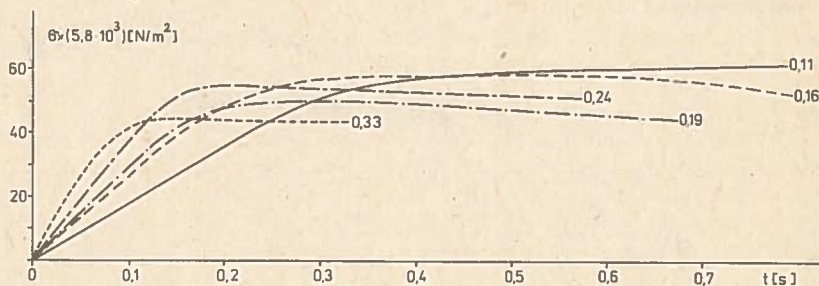
Przeprowadzone trójosiowe testy ze stałą prędkością odkształcenia, $\dot{\epsilon} = n$, pozwoliły też przedstawić zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, zgodnie ze wzorem (16). Znalezienie takiej zależności w funkcjach analitycznych bezpośrednio jako rozwiązanie równania reologicznego (15) jest praktycznie niemożliwe nawet po wprowadzeniu prostszych związków lepkości i sprężystości od naprężenia.

Za kryterium wytrzymałości przyjęto moment uzyskania stałej wartości naprężenia osiowego, niezależnie od wzrastającego odkształcenia osiowego i czasu w jakim ono zachodzi.

Zależność naprężenia osiowego od czasu przy różnych naprężeniach hydrostatycznych i szybkich odkształceniach badanych gleb przedstawiono na kolejnych rysunkach (16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 i 27).

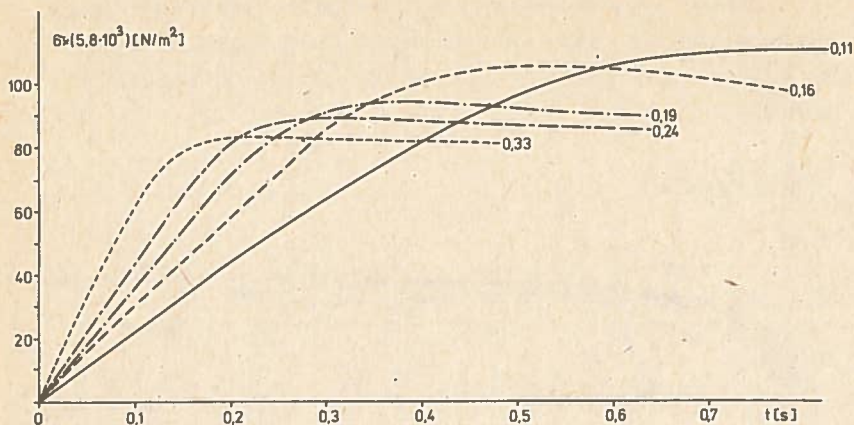


Rys. 16. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego, przy naprężeniu hydrostatycznym $0,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach

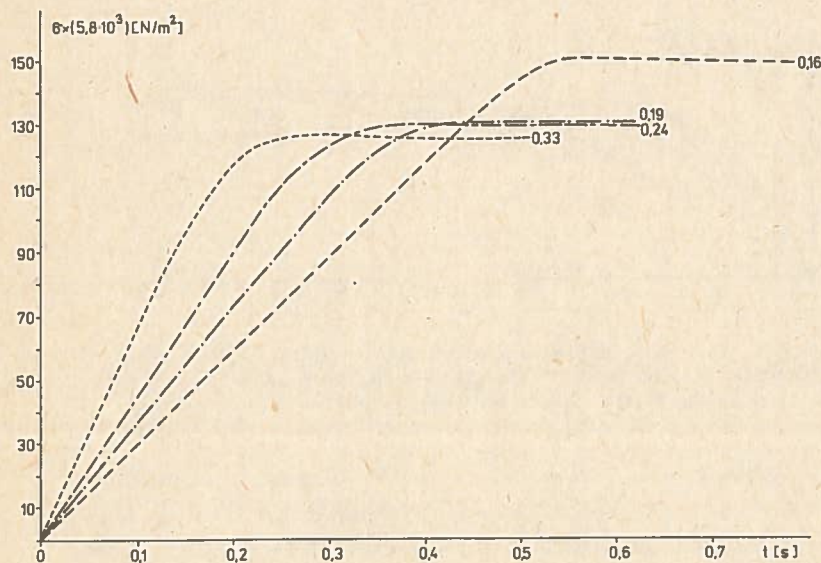


Rys. 17. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego, przy naprężeniu hydrostatycznym $1 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach

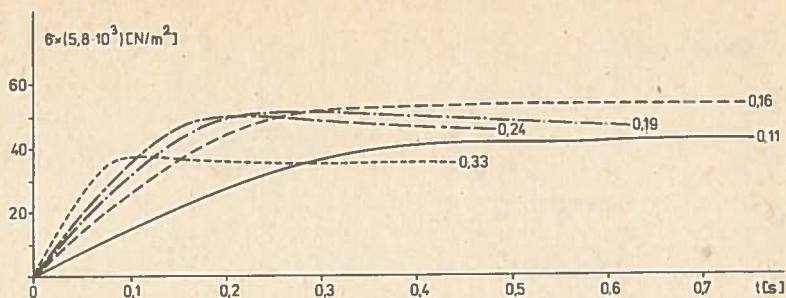
Wybrano tylko wykresy zmian naprężeń w czasie dla szybkich odkształceń jako zdecydowanie częściej występujących w praktyce rolniczej. Zastosowanie kilku wartości naprężeń hydrostatycznych podkreśla charakter przebiegu procesu w czasie, a stosunkowo niskie ich wartości jako parametrów doświadczeń zapewniają dużą odkształcalność badanych gleb i tym samym pozwalają uwzględnić większe przedzia-



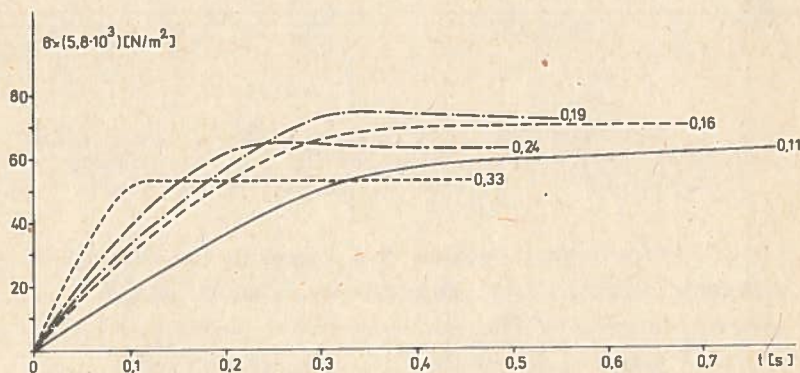
Rys. 18. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego, przy naprężeniu hydrostatycznym $2 \cdot 10^4$ N/m² i różnych szybkościach odkształceń



Rys. 19. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego, przy naprężeniu hydrostatycznym $3 \cdot 10^4$ N/m² i różnych szybkościach odkształceń



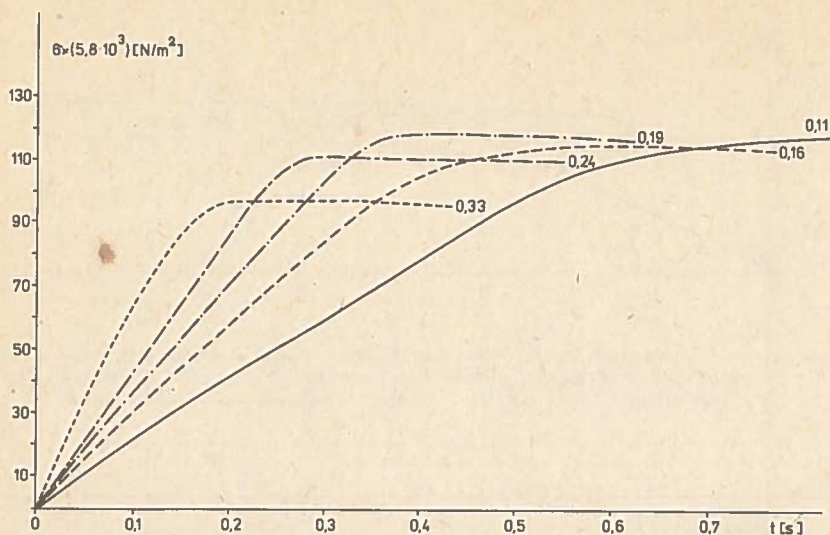
Rys. 20. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego, przy naprężeniu hydrostatycznym $0.5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach



Rys. 21. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego, przy naprężeniu hydrostatycznym $1 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach

ły czasowe rejestrowanych zmian naprężenia. Ze wzrostem wartości odkształcenia rośnie też dokładność prowadzonych pomiarów.

Wzrost naprężenia hydrostatycznego, wstępnej konsolidacji próbki, zwiększa wytrzymałość badanego materiału. Wartości maksymalnych naprężeń są wyższe ponad dwukrotnie przy największym ze stosowanych naprężeń w celce aparatu trójosiowego. Zależność ta jest charakterystyczna dla wszystkich trzech gleb, natomiast prędkość odkształcenia

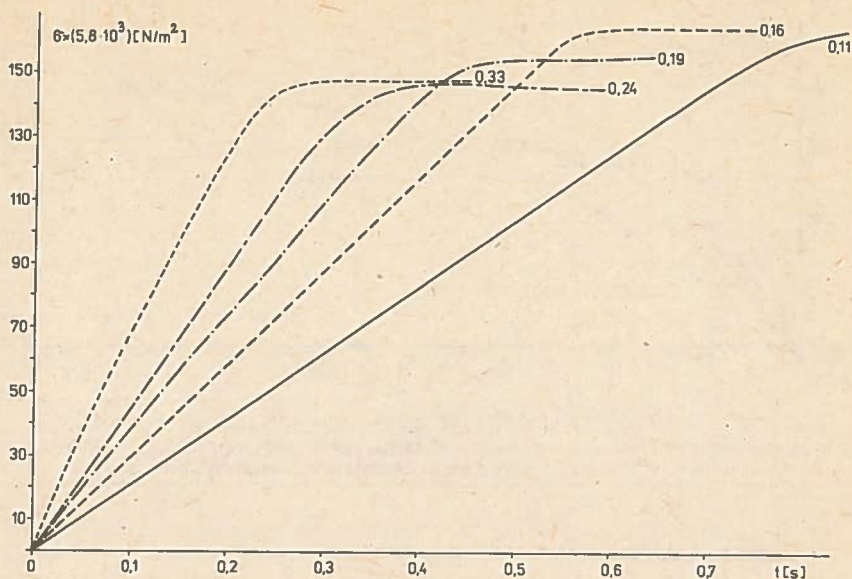


Rys. 22. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego, przy naprężeniu hydrostatycznym $2 \cdot 10^4$ N/m² i różnych szybkich odkształceniach

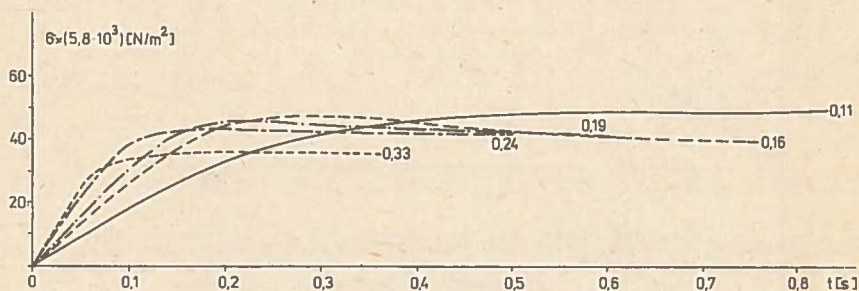
każdej badanej próbki glebowej przy wszystkich zastosowanych naprężeniach hydrostatycznych wpływa na czas, w którym pojawia się maksymalne naprężenie. Dla najniższych wartości prędkości odkształcenia, $\dot{\epsilon} = 0,11$ 1/s, maksymalne wartości naprężeń występują po upływie 0,4-0,5 s od momentu przyłożenia i rejestrowania naprężenia osiowego, przy największym naprężeniu hydrostatycznym. Wzrost prędkości odkształcenia do $\dot{\epsilon} = 0,33$ 1/s skraca czas pojawiania się maksymalnych naprężeń do wartości mniejszych od 0,1 s przy najmniejszych naprężeniach hydrostatycznych i 0,2-0,3 s przy największym naprężeniu hydrostatycznym.

Wzrost prędkości odkształcenia zmniejsza wytrzymałość każdej badanej próby glebowej i jednocześnie maksymalne naprężenie osiągnęte jest w krótszym czasie niż przy wolniejszych odkształceniach.

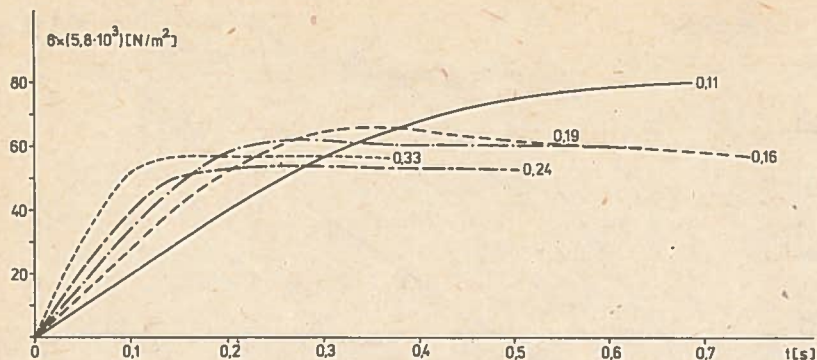
Czas, po którym następuje całkowite zniszczenie próbki w wyniku kompletnej wewnętrznej jej przebudowy jest ściśle związany z parametrami



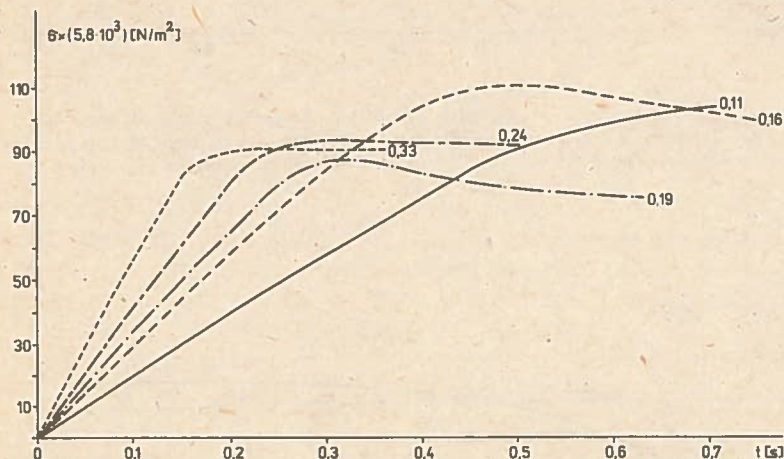
Rys. 23. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego, przy naprężeniu hydrostatycznym $3 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach



Rys. 24. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej, przy naprężeniu hydrostatycznym $0,5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach

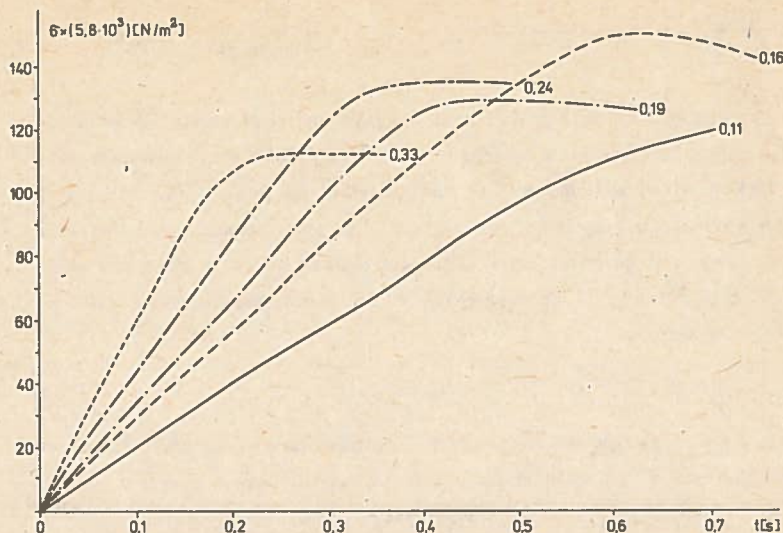


Rys. 25. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej, przy naprężeniu hydrostatycznym $1 \cdot 10^4$ N/m² i różnych szybkich odkształceniach.



Rys. 26. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej, przy naprężeniu hydrostatycznym $2 \cdot 10^4$ N/m² i różnych szybkich odkształceniach

trami odkształcania gleby. Znając jednak wartości tych parametrów można dokładnie określić, do jakiego momentu mamy do czynienia ze znanym wyjściowym materiałem zachowującym się zgodnie ze znanymi zależnościami fizycznymi, a kiedy pojawia się nowy materiał, którego cechy należałoby oznaczyć.



Rys. 27. Zależność naprężenia od czasu, $\sigma = \sigma(t)$, gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pyłastej, przy naprężeniu hydrostatycznym $3 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ i różnych szybkich odkształceniach

Weryfikacja doświadczalna wybranego nieliniowego modelu reologicznego

Rozważany przykład odkształcania gleby ze stałą prędkością odkształcania ($\epsilon = nt$, $\dot{\epsilon} = n$, $n = \text{const}$) i przy wprowadzeniu zmiennych współczynników lepkości i sprężystości, zgodnie ze wzorami odpowiednio (9) i (13), prowadzi do nieliniowego równania różniczkowego pierwszego rzędu następującej postaci:

$$\frac{C_1 C_2 \sigma^2}{\text{arc sh}(D_1 \sigma) \text{arc sh}(D_2 \sigma)} \epsilon + \left(\frac{C_1 \sigma}{\text{arc sh}(D_1 \sigma)} + \frac{C_2 \sigma}{\text{arc sh}(D_2 \sigma)} \right) \frac{A \sigma}{\text{sh}(B \sigma)} \dot{\epsilon} =$$

$$= \frac{C_1 \sigma}{\text{arc sh}(D_1 \sigma)} \sigma + \frac{A \sigma}{\text{sh}(B \sigma)} \dot{\sigma}, \quad (17)$$

gdzie:

$$\eta = \frac{A\sigma}{\text{sh}(B\sigma)}; \quad E_1 = \frac{C_1\sigma}{\text{arc sh}(D_1\sigma)}; \quad E_2 = \frac{C_2\sigma}{\text{arc sh}(D_2\sigma)}; \quad \varepsilon = nt, \quad \dot{\varepsilon} = n, \\ n = \text{const.}$$

Ze względu na brak możliwości rozwiązania równania (17) w funkcjach elementarnych zastosowano metody przybliżone przez minimalizację funkcji wielu zmiennych (bez minimalizacji na prostej) w celu otrzymania wartości parametrów występujących w tym równaniu, dla konkretnych wziętych z doświadczenia wielkości naprężenia σ i odkształcenia ε .

W celu otrzymania odkształcenia ε dokonano transformacji $\Delta x \rightarrow \varepsilon$ zgodnie ze wzorem

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}, \quad (18)$$

gdzie Δx - bezwzględne odkształcenie osiowe, x - wysokość początkowa. Posłużono się w tym celu analizą numeryczną. Ażeby w znaczny sposób uprościć rachunki, przyjęto stałą wartość modułu sprężystości $E_2 \sim 10^5 \text{ N/m}^2$, którą potwierdzają wykazane wyżej doświadczalne charakterystyki mechaniczne. W związku z tym równanie (17) upraszcza się do postaci

$$\frac{C}{\text{arc sh}(D\sigma)} E_2 \sigma \varepsilon + \frac{C}{\text{arc sh}(D\sigma)} \sigma + E_2 \frac{A\sigma}{\text{sh}(B\sigma)} \dot{\varepsilon} = \frac{C\sigma}{\text{arc sh}(D\sigma)} \sigma + \frac{A\sigma}{\text{sh}(B\sigma)} \dot{\sigma}. \quad (19)$$

Obliczone wartości parametrów A , B , C , D dla trzech badanych gleb w zależności od wartości naprężeń hydrostatycznych i prędkości odkształceń zestawiono w tabelach 4, 5 i 6.

Porównano doświadczalne i teoretyczne zależności naprężenie-odkształcenie przy optymalnym dopasowaniu parametrów równania (18), uzyskując wysoki współczynnik korelacji nie mniejszy niż 95%. Wysoki współczynnik korelacji potwierdza słuszność wyboru nieliniowego modelu reologicznego do opisu badanych procesów odkształceń z wymuszoną stałą prędkością odkształcenia. Uzyskane wyniki potwierdzają założony kształt funkcyjnej zależności współczynników lepkości i sprężystości od naprężenia w zakresie stosowanych warunków doświadczenia i rodzaju badanych gleb.

Tabela 4. Wartości liczbowe parametrów A, B, C, D występujących w równaniu 18 oraz współczynnik korelacji wynikający z porównania krzywej teoretycznej i mechanicznych charakterystyk doświadczalnych gleby o składowie granulometrycznym płasku słabo gliniastego

Gleba	ε	Napężenie hydrostatyczne 10^{-1} MPa	Wartości liczbowe parametrów				Współczynnik korelacji
			A	B	C	D	
I	0,11	0,5	$3,14 \cdot 10^{-11}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$2,31 \cdot 10^{-10}$	$3,62 \cdot 10^{-8}$	0,98
		1	$4,02 \cdot 10^{-11}$	$2,55 \cdot 10^{-7}$	$2,55 \cdot 10^{-10}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$	0,97
		2	$3,56 \cdot 10^{-11}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$2,61 \cdot 10^{-10}$	$3,61 \cdot 10^{-8}$	0,96
		3	$3,45 \cdot 10^{-11}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	$2,51 \cdot 10^{-10}$	$3,72 \cdot 10^{-8}$	0,97
	0,16	0,5	$3,93 \cdot 10^{-11}$	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-10}$	$3,75 \cdot 10^{-8}$	0,96
		1	$4,20 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$2,58 \cdot 10^{-10}$	$3,86 \cdot 10^{-8}$	0,98
		2	$3,50 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	0,98
		3	$4,17 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-10}$	$4,10 \cdot 10^{-8}$	0,97
	0,19	0,5	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$1,61 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-8}$	0,96
		1	$2,40 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^{-10}$	$3,76 \cdot 10^{-8}$	0,95
		2	$2,40 \cdot 10^{-11}$	$3,60 \cdot 10^{-7}$	$2,40 \cdot 10^{-10}$	$3,61 \cdot 10^{-8}$	0,97
		3	$3,10 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	0,98
	0,24	0,5	$3,30 \cdot 10^{-11}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	0,96
		1	$2,42 \cdot 10^{-11}$	$3,76 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-8}$	0,96
		2	$2,96 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$2,09 \cdot 10^{-10}$	$3,61 \cdot 10^{-8}$	0,97
		3	$2,69 \cdot 10^{-11}$	$3,59 \cdot 10^{-7}$	$2,47 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	0,98
	0,33	0,5	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$3,59 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	0,97
		1	$3,21 \cdot 10^{-11}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	0,97
		2	$3,43 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-10}$	$3,65 \cdot 10^{-8}$	0,95
		3	$2,62 \cdot 10^{-11}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$1,78 \cdot 10^{-10}$	$3,66 \cdot 10^{-8}$	0,97

Tabela 5. Wartości liczbowe parametrów A, B, C, D występujących w równaniu 18 oraz współczynnik korelacji wynikający z porównania krzywej teoretycznej i mechanicznych charakterystyk doświadczalnych gleby o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego

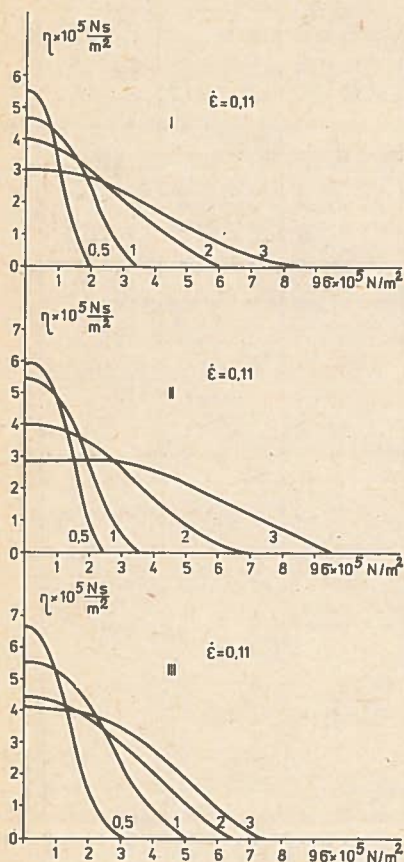
Gleba	ε	Napięcie hydrostatyczne 10 ⁻¹ MPa	Wartości liczbowe parametrów				Współczynnik korelacji
			A	B	C	D	
II	0,11	0,5	4,34 10 ⁻¹¹	1,31 10 ⁻⁷	2,86 10 ⁻¹⁰	4,50 10 ⁻⁸	0,98
		1	3,24 10 ⁻¹¹	0,90 10 ⁻⁷	2,24 10 ⁻¹⁰	3,55 10 ⁻⁸	0,97
		2	3,22 10 ⁻¹¹	1,04 10 ⁻⁷	2,36 10 ⁻¹⁰	3,62 10 ⁻⁸	0,96
		3	3,80 10 ⁻¹¹	1,32 10 ⁻⁷	2,68 10 ⁻¹⁰	3,75 10 ⁻⁸	0,97
	0,16	0,5	3,39 10 ⁻¹¹	1,02 10 ⁻⁷	2,05 10 ⁻¹⁰	3,59 10 ⁻⁸	0,96
		1	4,15 10 ⁻¹¹	1,23 10 ⁻⁷	2,49 10 ⁻¹⁰	4,29 10 ⁻⁸	0,96
		2	3,74 10 ⁻¹¹	1,08 10 ⁻⁷	2,84 10 ⁻¹⁰	3,99 10 ⁻⁸	0,98
		3	3,49 10 ⁻¹¹	1,03 10 ⁻⁷	2,51 10 ⁻¹⁰	3,72 10 ⁻⁸	0,98
	0,19	0,5	4,04 10 ⁻¹¹	1,19 10 ⁻⁷	2,82 10 ⁻¹⁰	3,98 10 ⁻⁸	0,96
		1	3,25 10 ⁻¹¹	1,02 10 ⁻⁷	2,39 10 ⁻¹⁰	3,60 10 ⁻⁸	0,98
		2	3,30 10 ⁻¹¹	1,00 10 ⁻⁷	2,28 10 ⁻¹⁰	0,97 10 ⁻⁸	0,97
		3	3,91 10 ⁻¹¹	1,17 10 ⁻⁷	2,50 10 ⁻¹⁰	3,73 10 ⁻⁸	0,97
	0,24	0,5	3,21 10 ⁻¹¹	1,09 10 ⁻⁷	2,28 10 ⁻¹⁰	3,66 10 ⁻⁸	0,95
		1	2,15 10 ⁻¹¹	1,11 10 ⁻⁷	1,50 10 ⁻¹⁰	3,55 10 ⁻⁸	0,97
		2	2,40 10 ⁻¹¹	3,60 10 ⁻⁷	2,40 10 ⁻¹⁰	3,60 10 ⁻⁸	0,98
		3	3,37 10 ⁻¹¹	1,07 10 ⁻⁷	2,41 10 ⁻¹⁰	3,71 10 ⁻⁸	0,96
	0,33	0,5	3,45 10 ⁻¹¹	1,02 10 ⁻⁷	2,51 10 ⁻¹⁰	3,72 10 ⁻⁸	0,96
		1	4,31 10 ⁻¹¹	1,14 10 ⁻⁷	2,95 10 ⁻¹⁰	3,96 10 ⁻⁸	0,97
		2	3,56 10 ⁻¹¹	1,04 10 ⁻⁷	2,62 10 ⁻¹⁰	3,61 10 ⁻⁸	0,98
		3	3,64 10 ⁻¹¹	1,19 10 ⁻⁷	2,45 10 ⁻¹⁰	3,77 10 ⁻⁸	0,96

Tabela 6. Wartości liczbowe parametrów A, B, C, D występujących w równaniu 18 oraz współczynnik korelacji wynikający z porównania krzywej teoretycznej i mechanicznych charakterystyk doświadczalnych gleby o składzie granulometrycznym gliny lekkiej pylastej

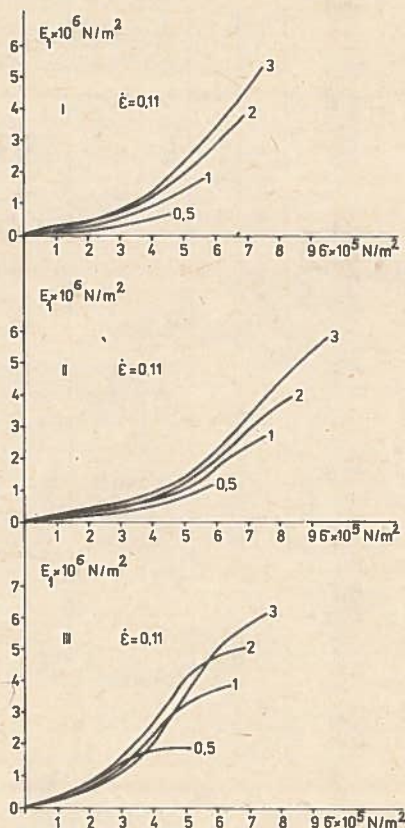
Gleba	$\dot{\epsilon}$	Napężenie hydrostatyczne 10^{-1} MPa	Wartości liczbowe parametrów				Współczynnik korelacji
			A	B	C	D	
III	0,11	0,5	$4,20 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$2,58 \cdot 10^{-10}$	$3,86 \cdot 10^{-8}$	0,97
		1	$4,08 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$1,26 \cdot 10^{-10}$	$3,89 \cdot 10^{-8}$	0,95
		2	$4,99 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-7}$	$3,16 \cdot 10^{-10}$	$4,93 \cdot 10^{-8}$	0,98
		3	$3,51 \cdot 10^{-11}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$6,99 \cdot 10^{-10}$	$3,91 \cdot 10^{-8}$	0,97
	0,16	0,5	$4,48 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$9,36 \cdot 10^{-10}$	$3,82 \cdot 10^{-8}$	0,98
		1	$3,43 \cdot 10^{-11}$	$9,93 \cdot 10^{-7}$	$2,50 \cdot 10^{-10}$	$3,56 \cdot 10^{-8}$	0,97
		2	$3,50 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	0,97
		3	$3,25 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$	$2,01 \cdot 10^{-10}$	$3,58 \cdot 10^{-8}$	0,96
	0,19	0,5	$4,16 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$2,49 \cdot 10^{-10}$	$3,74 \cdot 10^{-8}$	0,95
		1	$3,25 \cdot 10^{-11}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	0,98
		2	$3,64 \cdot 10^{-11}$	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-10}$	$3,58 \cdot 10^{-8}$	0,96
		3	$3,14 \cdot 10^{-11}$	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$2,09 \cdot 10^{-10}$	$3,57 \cdot 10^{-8}$	0,96
	0,24	0,5	$4,17 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-10}$	$4,10 \cdot 10^{-8}$	0,96
		1	$2,45 \cdot 10^{-11}$	$2,07 \cdot 10^{-7}$	$3,23 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$	0,97
		2	$1,28 \cdot 10^{-11}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-10}$	$2,59 \cdot 10^{-8}$	0,96
		3	$1,18 \cdot 10^{-11}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-10}$	$2,76 \cdot 10^{-8}$	0,98
	0,33	0,5	$3,32 \cdot 10^{-11}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$2,26 \cdot 10^{-10}$	$3,63 \cdot 10^{-8}$	0,98
		1	$3,27 \cdot 10^{-11}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$2,24 \cdot 10^{-10}$	$3,56 \cdot 10^{-8}$	0,95
		2	$2,56 \cdot 10^{-11}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-10}$	$3,71 \cdot 10^{-8}$	0,97
		3	$3,51 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^{-10}$	$3,76 \cdot 10^{-8}$	0,97

Współczynniki lepkości i sprężystości badanych gleb

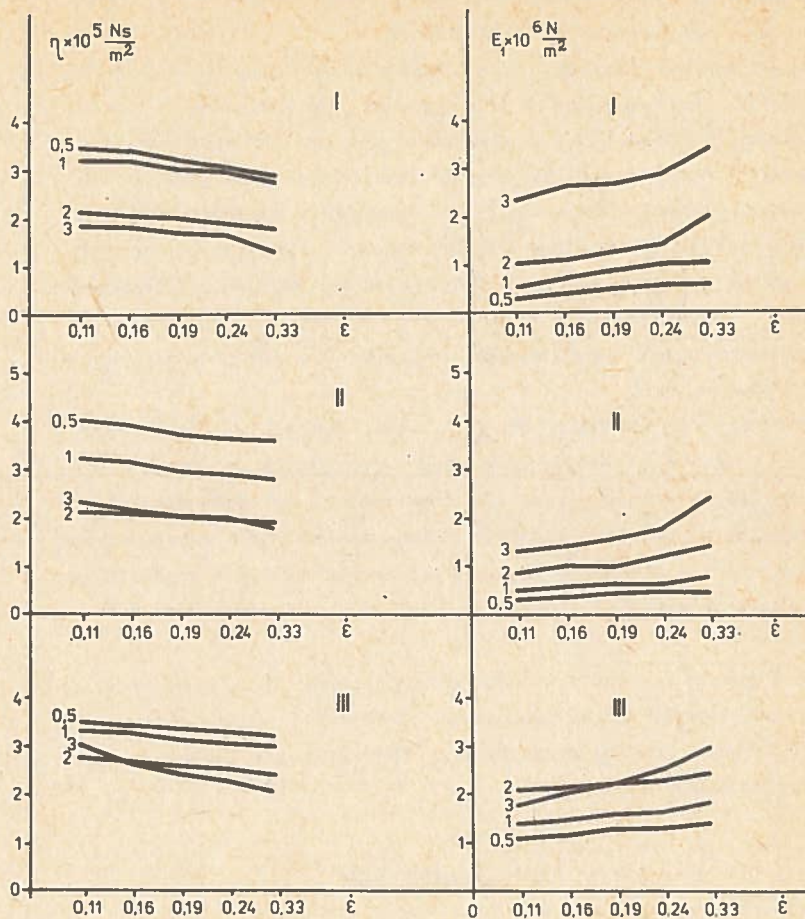
Obliczone parametry równania (19) pozwalają na dokładne, ilościowe przedstawienie zależności lepkości od naprężenia $\eta = \eta(\sigma)$ i sprężystości od naprężenia $E_1 = E_1(\sigma)$, co też zrobiono dla przebadanych gleb. Wybrane przykładowo krzywe pokazano na kolejnych rysunkach.



Rys. 28. Zależność współczynnika lepkości od naprężenia, $\eta = \eta(\sigma)$, badanych gleb dla wybranej prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 0,11$ i czterech naprężeń hydrostatycznych



Rys. 29. Zależność współczynnika sprężystości od naprężenia, $E_1 = E_1(\sigma)$, badanych gleb dla wybranej prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 0,11$ i czterech naprężeń hydrostatycznych



Rys. 30. Wpływ prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}$ na wielkość współczynnika lepkości η i współczynnika sprężystości E_1 przy czterech naprężeniach hydrostatycznych dla trzech badanych gleb

Rysunek 28 przedstawia zależność współczynnika lepkości η od naprężenia osiowego dla prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = 0,11$ i czterech stosowanych naprężeń hydrostatycznych. Wartość współczynnika lepkości maleje wraz ze wzrostem naprężenia osiowego przy wszystkich badanych prędkościach odkształceń i wszystkich naprężeniach hydrostatycznych; zależność ta ma ten sam charakter dla wszystkich trzech gleb. Im naprężenie hydrostatyczne mniejsze, tym istotniejsza występuje zmiana wielkości współczynnika lepkości. Największemu stosowanemu naprężeniu hydrostatycznemu odpowiada mniejsza zmiana wartości współczynnika lepkości. Wzrost prędkości odkształcenia ma wpływ na nieznaczne obniżenie wartości tego współczynnika, tendencja taka występuje dla wszystkich badanych gleb.

Analogicznie też dla tej samej wybranej wartości prędkości odkształcenia przedstawiono funkcijną zależność współczynnika sprężystości E_1 od naprężenia osiowego (rys. 29). Stwierdzono, że współczynnik sprężystości rośnie wraz ze wzrostem naprężenia osiowego i to tym bardziej im większe jest naprężenie hydrostatyczne. Dla większych prędkości odkształcenia otrzymano nieco wyższe wartości współczynnika sprężystości.

Otrzymane zależności współczynników lepkości i sprężystości od naprężenia osiowego są charakterystyczne dla każdej badanej gleby, a wartości liczbowe tych współczynników są różne przy tych samych parametrach odkształcenia.

PODSUMOWANIE

W pracy zaprezentowano dotychczasowy dorobek w zakresie poznania podstawowej zależności naprężenie-odkształcenie niezbędnej w opisie fizycznego stanu gleby.

Znajomość charakterystyk mechanicznych, a szczególnie umiejętności ich przewidywania i kształtowania przez dobór odpowiednich parametrów ruchu ciągników i maszyn oddziałujących na glebę jest podstawowym problemem współczesnego rolnictwa.

Rozwiązanie takiego problemu jest możliwe przede wszystkim przez poszukiwanie odpowiedniego modelu matematycznego i jednocześnie modelowego eksperymentu, który weryfikowałby założenia teoretyczne i uwzględniał parametry odkształceń najbardziej zbliżone do występujących w praktyce rolniczej.

Dotychczas niewiele prac dotyczyło opracowania takich modeli dla gleby. Analogicznie do dużo wcześniej rozwiniętych badań gruntoznawczych wykorzystywano przede wszystkim założenia jednorodności i ciągłości ośrodka budując liniowe modele reologiczne. Korzystając z fizycznych podstaw procesu odkształcenia i własnych prac eksperymentalnych nie stwierdzono praktycznej przydatności modeli ze stałymi parametrami w badaniach ośrodka glebowego. W związku z tym wybrano nieliniowy model reologiczny ze zmiennymi parametrami - współczynnikiem lepkości i sprężystości. Do weryfikacji doświadczalnej zastosowano test ze stałą prędkością odkształcenia. Wykonanie takiego eksperymentu umożliwił specjalnie przystosowany do tego typu badań aparat trójosiowego ściskania, za pomocą którego otrzymano charakterystyki mechaniczne w szerokim zakresie prędkości odkształceń. Przede wszystkim uwzględniono szybkie odkształcenia, a więc takie jakie wywołują maszyny rolnicze i ich elementy robocze.

Przedstawione po raz pierwszy oryginalne wyniki badań trójosiowych z naturalnym materiałem glebowym posłużyły do weryfikacji doświadczalnej wybranego nieliniowego modelu reologicznego ze zmiennymi współczynnikami lepkości i sprężystości. Wyznaczono na tej podstawie i przedstawiono po raz pierwszy ilościowe zależności tych współczynników od naprężenia.

Stwierdzono, że współczynnik sprężystości rośnie wraz ze wzrostem naprężenia osiowego - i to tym bardziej im większe jest naprężenie hydrostatyczne. Wartość współczynnika lepkości maleje wraz ze wzrostem naprężenia osiowego przy wszystkich badanych prędkościach odkształceń i wszystkich naprężeniach hydrostatycznych. Im naprężenie hydrostatyczne mniejsze, tym istotniejsza występuje zmiana wielkości współczynnika lepkości. Zależności te mają ten sam charakter dla wszystkich zbadanych gleb.

Wyliczone parametry reologiczne mogą być użyte do charakterystyk materiałowych gleb, a także do rozwiązywania podstawowych zadań mechaniki jak wyliczanie charakterystyk pełzania, relaksacji, opóźnień sprężystych.

Przedstawiony wybrany model i pokazany sposób jego doświadczalnej weryfikacji dla przykładowo wybranych trzech gleb mineralnych może wydać się skomplikowany i wymagający wielu obliczeń. Dotyczy to zarówno funkcji wprowadzonych na współczynniki lepkości i sprężystości, jak i samego rozwiązania równania modelu po ich uwzględnieniu, jednak cała procedura weryfikacji doświadczalnej, przy wykorzystaniu zaprezentowanych obliczeń numerycznych, może być łatwo powtórzona dla różnych rodzajów gleb i różnych, w zależności od konkretnych potrzeb, warunków odkształcania ośrodka.

Dalsze badania prowadzone w tym zakresie powinny uwzględniać inne czynniki mające duży wpływ na przebieg analizowanych funkcji, a przede wszystkim wilgotność i strukturę badanej gleby oraz przeprowadzenie pomiarów dla gleb o nienaruszonej strukturze, zawierającej także korzenie roślin. Otrzymane wyniki zbliżą jeszcze bardziej przyjęty teoretyczny opis zależności naprężenie-odkształcenie do warunków rzeczywistych i będą bliższe do bezpośredniego zastosowania praktycznego.

WNIOSKI

Przedstawione powyżej wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przebieg podstawowej zależności naprężenie-odkształcenie w badaniach procesów odkształcania gleby nie może być opisany ani liniowymi modelami reologicznymi, ani metodami fenomenologicznej termodynamiki procesów nieodwracalnych. Lepiej nadaje się do tego celu wybrany nieliniowy, lepko-sprężysty model reologiczny ze zmiennymi współczynnikami lepkości i sprężystości, wyprowadzony na podstawie termodynamiki statystycznej.

2. Wybrany trójosiowy test odkształcania badanych gleb z różnymi stałymi prędkościami odkształceń w specjalnie przystosowanym aparacie

umożliwia dokonanie doświadczalnej weryfikacji nieliniowego modelu reologicznego i ilościowe oznaczenie współczynników lepkości oraz sprężystości w funkcji naprężeń.

3. Współczynnik lepkości maleje wraz ze wzrostem naprężenia osiowego, i to tym bardziej im mniejsze naprężenia hydrostatyczne, natomiast współczynnik sprężystości rośnie wraz ze wzrostem naprężenia osiowego, i to tym bardziej im większe jest naprężenie hydrostatyczne. Są to zależności charakterystyczne dla każdej badanej gleby.

4. Prędkość odkształcenia wpływa na czas, w którym pojawia się maksymalne naprężenie badanych gleb - im prędkość odkształcenia większa, tym wartość maksymalnego naprężenia mniejsza i osiągane jest ono szybciej niż przy wolniejszych odkształceniach.

5. Wartości maksymalnych naprężeń i czas ich osiągania zależą od wstępnej konsolidacji badanych gleb, przy wszystkich stosowanych prędkościach odkształceń. Wzrost naprężenia hydrostatycznego powoduje wzrost maksymalnego naprężenia, tym większy im prędkość odkształcenia mniejsza.

BIBLIOGRAFIA

1. Asszonyi C.: Ideas about a new geomechanical theory, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 87-97.
2. Bishop A.W., Henkel D.J.: The measurement of soil properties, Arnold (2nd), London 1974.
3. Borowiec J.: Course and effects of drying of muck-peat soil material in aspect of the transformations occurring in the drained low peat, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1978, 220.
4. Cerny V.: Wpływ nowoczesnych technologii na glebę i jej uprawę, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1971, 112.
5. Chancellor W.J.: Combined hypotheses for anticipating soil strains beneath surface impressions, Trans. ASAE, 1966, 895, 887-892.
6. Chancellor W.J.: Compaction of soil by agricultural equipment, Div. Agric. Sci. Univ., California 1977, 1981.

7. Coleman B.D., Noll W.: The thermodynamics of elastic materials with heat conduction and viscosity, Arch. Rat. Mech. Anal. 1963, 13.
8. Coleman B.D.: Thermodynamics of materials with memory, Arch. Rat. Mech. Anal. 1964, 17.
9. Csorba L.: Rheological investigation of agricultural soils, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 67-73.
10. Dobrzański B., Domżał H.: Wpływ melioracyjnej orki na wilgotność i zapas wody w glebie wytworzonej z piasku, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1968, 77b, 75.
11. Domżał H.: Wpływ zagęszczenia gleby na zawartość wody silnie związanej oraz retencja wody produkcyjnej i użytkowej, Roczn. Gleb. 1979, XXX, 3-45.
12. Domżał H.: Compaction of the solid phase and its role in the formation of the water-air properties of soil, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1983, 220-II, 137.
13. Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A.: Wpływ nacisku na strukturę porów i pojemność wodną gleby, Roczn. Gleb. 1975, XXVI, 1, 49.
14. Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Turski R., Paliłko M.: The influence of agricultural cultivation on the density and water retention of soils formed loesses, Polish J. Soil Sci. 1980, 13, 2, 91-98.
15. Duncan J.M., Chin-Yung Chang: Nonlinear analysis of stress and strain in soils, Jour. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 1970, SM 5, 7513, 1629-1653.
16. Gill W.R.: The effects of drying on the mechanical strength of Lloyd clay, Proc. Soil Sci. Am. 1959, 23 (4), 253-257.
17. Gill W.R.: Soil dynamics in tillage and traction, USDA Washington 1967.
18. Glasstone S., Leidler K., Eyring H.: The theory of rate processes, Mc Graw Hill, New York 1941.
19. Hakansson I.: Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth, VIIth Int. Conf. Terrain-Vehicle System, August 16-20, 1981, Canada.

20. Haman J., Zdanowicz A.: O potrzebie rozszerzenia studiów nad reologią materiałów w rolnictwie, Roczn. Nauk Roln. 1969, 68.
21. Hillel D.: Fundamentals of soil physics, Academic Press, New York 1980.
22. Hodara J., Słowińska-Jurkiewicz A.: The changes of the soil structure and the physical properties of soil being compacted, Proc. IXth Conf. ISTRO, Yugoslavia 1982, 219-224.
23. Huszar I.: Soil mechanics in agriculture, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 11-20.
24. Jeske T., Przedecki T., Rosiński B.: Mechanika gruntów, PWN Warszawa 1966.
25. Kalinowski K., Macha E.: Wyznaczenie rozkładów gęstości prawdopodobieństwa wielkości charakteryzujących płaski stan naprężenia przy wymuszeniach losowych, Prace Nauk. Inst. Mater. i Mech. Techn. Pol. Wrocław 1975, 26, SM 17, 59-70.
26. Kisiel I.: Dociekania z reologii gruntów i skał, Zakł. Nar. im. Ossolińskich, Wrocław 1970.
27. Kisiel I., Lysik B.: Zarys reologii gruntów, Arkady, Warszawa 1966.
28. Kluitenberg G.A.: Thermodynamical theory of elasticity and plasticity, Physica 1962, 28, 217.
29. Kluitenberg G.A.: A note of the thermodynamics of Maxwell bodies, Kelvin bodies (Voight bodies) and fluids, Physica 1962, 28, 561.
30. Kluitenberg G.A.: On the thermodynamics of viscosity and plasticity, Physica 1963, 29, 633.
31. Kluitenberg G.A.: A unified thermodynamic theory for large deformations in elastic media and in Kelvin (Voight) media, and for viscous fluid flow, Physica 1964, 30, 1945.
32. Kluitenberg G.A.: A thermodynamic derivation of the stress-strain relations for Burgers media and related substances, Physica 1968, 38, 513.
33. Konstankiewicz K.: The influence of deformation on pore size distribution in the soil of various moisture, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 211-220.

34. Konstankiewicz K.: The influence of pore distribution on water potential in soils subjected to consolidation, Zesz. Probl. Post. auk. Nauk. Roln. 1977, 197, 79-97.
35. Konstankiewicz K.: Model rheological investigations of sandy soil, Proc. II Int. Conf. Phys. Prop. Agric. Mat., August 26-28, 1980, Hungary.
36. Konstankiewicz K.: Mechanical characteristics of soil for different constant strain velocities, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1984, 245, 29-35.
37. Konstankiewicz K.: Porowatość gleby: definicje, metody oznaczania, Problemy Agrofizyki 1985, 47.
38. Konstankiewicz K., Moreno F.: Porowatość gleb oznaczana metodą porozymetrii rtęciowej i z charakterystyk wodnych, Polish J. Soil Sci. 1984 (1986), XVII, 1-2, 45-51.
39. Konstankiewicz K., Moreno F., Martin Aranda J.: Mechanical characteristics of a calcic rhodoxeralf soil in agronomic conditions, 3rd Int. Conf. Phys. Prop. Agric. Mat., August 19-23, Prague, Czechoslovakia 1985.
40. Konstankiewicz K., Stawiński J.: The use of the mercury porosimeter for studies of some soil properties, Polish J. Soil Sci. 1976, IX, 1, 3-10.
41. Kowal J., Karczewski T., Skwarek W., Przesmycki J.: Oddziaływanie mechanizmów jezdnych i maszyn rolniczych na glebę, Biul. Inf. IBMER, 1977, 1, 68-73.
42. Kowaliński S., Giedrojc B.: Wpływ składu mechanicznego gleby na dostępność wody dla roślin uprawnych, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1968, 86, 23.
43. Kozicz J.: Wpływ ugniatającego działania kół w różnym stopniu obciążonego ciągnika na właściwości fizyczne gleby oraz wzrost, rozwój i plony niektórych roślin uprawnych, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1971, 112.
44. Kurek J.: Fizyczny model odkształceń lepko-sprężystych ośrodka glebowego, UMCS, Lublin 1979.

45. Lambe T.W.: Methods of estimating settlement, J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 1964, 90, SM 5, 4060, 43-67.
46. Lambe T.W.: Stress path method, J. Soil Found. Div. ASCE, 1967, 93, SM 6, 5613, 117-141.
47. Mech S.J., Horner G.M., Cox L.M., Cary E.E.: Soil profile modification by backhoe mixing and deep plowing, Transactions ASAE, 1967, 10 (6), 775-779.
48. Moreno F., Martin Aranda J., Konstankiewicz K., Gomez-Rojas F.: Effect on physical and mechanical properties of a soil due to change from dry farming (olive field) to irrigated land (annual crops), Xth Conf. ISTRO, July 8-12, Canada 1985.
49. Mróz Z., Drescher A.: Podstawy teorii plastyczności ośrodków rozdrobnionych, Ossolineum, Wrocław 1972.
50. Müller Z.: Classification of rheological models composed of springs and dashpots, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1976, 168, 99-108.
51. Nowacki W.: Teoria sprężystości, PWN, Warszawa 1970.
52. Ostrowska D.: Wpływ zagęszczenia gleby na wzrost buraków cukrowych, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1978, 220.
53. Perzyna P.: Termodynamiczna teoria materiałów o własnościach reologicznych, PWN, Warszawa 1966.
54. Perzyna P., Płochocki Z., Valanis K.S.: Thermodynamical problems of continuous media, Ossolineum, Wrocław 1970.
55. Pukos A.: Interpretacja termodynamiczna odkształceń ośrodka glebowego, AR Lublin, 1977.
56. Pukos A.: Thermodynamical interpretation of soil medium deformation, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1983, 220, 367-400.
57. Pukos A., Grundas S., Horabik J., Konstankiewicz K.: On the identification of elasto-plastic and elasto-viscous phenomena in the mechanics of soil and plant materials, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1984, 245, 87-96.
58. Pukos A., Walczak R.: Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb, Problemy Agrofizyki 1973, 7.

59. Skawiński R.: Laboratoryjna metoda ciągłego pomiaru współczynnika filtracji, *Geotechnika i Hydrogeologia*, Wyd. Geolog., Warszawa 1960.
60. Skrynicki J., Golygowski W., Pukos A., Walczak R.: Sposób przeprowadzania dynamicznych badań właściwości materiałów w urządzeniach trójosiowych, *Biul. Urz. Pat. PRL*, 26/80/Rok IV Kl. G 01 n.
61. Sołtyński A.: Ugniatanie podłoża miękkiego przez opony pojazdów terenowych, *Tech. Motoryz.* 1962, 8.
62. Söhne W.H.: Fundamentals of pressure distributions and soil compaction under tractor tires, *Agricultural Engineering*, 1958, 39(5), 290, 276-281.
63. Stoinev K.: Effect of compaction of leached cinnamonic forest soil on the growth and productivity of cats, *Pochvoznanie i Agrokhimia*, 1975, 10, 103-110.
64. Timoshenko S.: *Theory of elasticity*, New York, Mc Graw Hill, 1934.
65. Truesdell C., Noll W.: *The nonlinear field theories of mechanics*, Enc. Phys., Springer Berlin 1965, III/3.
66. Truesdell C., Toupin R.: *The classical field theories*, Enc. Phys., Springer Berlin 1965, III/1.
67. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A.: Badania właściwości wodno-powietrznych gleb ugniatanych kołami ciągników i narzędzi rolniczych podczas wykonywania prac polowych, *Rocz. Nauk Roln.* 1974, A-100-3, 97.
68. Turski R., Domżał H., Słowińska-Jurkiewicz A.: Wpływ frakcji koloidalnej z uwzględnieniem próchnicy na maksymalną higroskopijność, granice konsystencji i pęcznienia gleb lessowych, *Rocz. Gleb.* 1974, XXV, 3, 85.
69. Walczak J.: *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności*, PWN, Warszawa 1969, t. II.
70. Walczak R.: The effect of soil compaction on water bounding energy, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 1976, 168, 187-209.

71. Walczak R.: Model investigations of water binding energy in soils of different compaction, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 1977, 197, 11-43.
72. Walczak R.: Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby, Problemy Agrofizyki 1984, 41.
73. Zawadzki S., Michałowska K.: The relationship between pF values and soil surface area, Polish J. Soil Sci. 1974, VII, 1, 47-51.
74. Zienkiewicz O.C., Humphenson C., Lewis R.W.: Associated and non-associated viscoplasticity in soil mechanics, Geotechnique 1975, 25, 671-691.

THE EFFECT OF THE RATE OF DEFORMATION ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOILS

Summary

Knowledge of the mechanism of soil reaction to forces applied, caused by increasing mechanisation, is necessary for the solution of the problems of field work technology, the design of wheels and agricultural tools, and the selection of optimum motion parameters for tools and machines. It is also necessary to get to know the stress-strain relationships in a wide range of values, and their time derivatives. The main difficulty in a theoretical description of such a relationship follows from the complex spatial structure of soil and, to a considerable degree, its organic character.

Like in the case of many natural sciences, soil mechanics seeks, for the description of the object of its interest, a model that, on the one hand, would enable accurate prediction of effects of significance to agriculture, and on the other would sufficiently simplify the physical description of the process of deformation.

The objective of the study is to show the necessity of the introduction of a model description of the stress-strain relation, and a way for the development of studies directed towards finding the simplest model for the requirements of soil physics. Most important, however, is to prove the possibility of experimental verification of the simplest visco-elastic rheological models, the parameters of which can be assigned real physical meanings, and determined quantitatively.

The fundamental working hypothesis of the study is to prove that variable coefficients of viscosity and elasticity, introduced on the basis of the principles of statistical thermodynamics into a selected simplest model, permit a real physical description of the process of soil deformation with the individual properties of the soil considered.

For the experimental verification of theoretical models the author uses the triaxial consolidation test without water filtration, with preselected various steady rates of deformation and various spherical strains.

The experiments were carried out for three samples of the accumulative horizons of grey brown podzolic soils of the granulometric composition of weakly loamy sand (Rokitno), strong loamy sand (Jabłoń), and light silty loam (Felin). The soils were used to prepare model samples, after screening them through a sieve (1 mm) and bringing them to a steady level of moisture (approx. $pF = 4.2$). A considerable replicability of results was obtained.

The resultant mechanical characteristics of the soils included in the experiment, for slow and fast rates of deformation at various spherical strains, are presented in the form of diagrams. None of the characteristics obtained may be described by means of a linear rheological equation. In view of the impossibility of solving a nonlinear equation in elementary functions, approximate methods by means of the minimization of functions were used, and numerical values were obtained for the parameters of the equation, for specific, taken from the experiment, values of stress and strain deformation. Numerical analysis was used for the purpose. The parameters calculated permit an accurate presentation of $\eta = \eta(\sigma)$ and $E = E(\sigma)$ relations, and this has been done for the soils under investigation.

The results of the study permit the formulation of the following conclusions:

1. The stress - soil deformation relationship can be described by means of a nonlinear visco-elastic rheological equation;
2. Function coefficients of viscosity and elasticity may be determined quantitatively by means of the triaxial consolidation test with a constant rate of deformation;

3. The initial status of the soil deformed decisively affects the relation of the viscosity and elasticity coefficients to stress.
4. The rate of the deformation applied determines the qualitative changes in the coefficients of viscosity and elasticity;
5. The quantitative determinations of the course of $\eta = \eta(\sigma)$ and $E = E(\sigma)$ functions should be performed individually for every soil and taken into consideration during the evaluation of its physical conditions in each case of deformation.

Dotychczas ukazały się następujące zeszyty
PROBLEMÓW AGROFIZYKI

1. Jan Gliński, Witold Stępniewski - Zastosowanie chromatografii gazowej w badaniach gleboznawczych. 1972.
2. Piotr Kowalik - Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej. 1972.
3. Jan Gliński, Jerzy Duliban - Potencjał oksydoredukcyjny w glebach. 1972.
4. Małgorzata Dąbek-Szreniawska - Mikrobiologiczne aspekty tworzenia się agregatów glebowych. 1972.
5. Bogusław Szot - Rozwój badań właściwości fizycznych materiałów rolniczych. 1972.
6. Ignacy Dechnik, Janusz Stawiński - Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb. 1973.
7. Adam Pukos, Ryszard Walczak - Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb. 1973.
8. Bogusław Szot, Grażyna Kolemba - Metody oceny wylegania zbóż. 1973.
9. Janusz Haman, Bogusław Szot, Wanda Woźniak - Zagadnienie wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych. 1973.
10. Materiały seminarium poświęconego fizyce wody glebowej. Praca zbiorowa. 1973.
11. Henryk Czachor, Ryszard Walczak - Zamknięte źródła radioizotopowe w badaniach fizycznych właściwości gleb. 1974.
12. Zastosowania analizy spektralnej w badaniach rolniczych. Praca zbiorowa. 1974.

13. Krystyna Konstankiewicz, Adam Pukos, Ryszard Walczak - Domenowa teoria histerezy dla termodynamicznych procesów w glebie. 1974.
14. Jerzy Szczypa, Zofia Sokołowska - Zastosowanie radioizotopów do badania fizykochemicznych właściwości gleb. 1975.
15. Janusz Haman, Adam Pukos - Aktualne zagadnienia mechaniki gleb. 1975.
16. Jan Gliński, Zofia Stępniewska - Zastosowanie elektrod selektywnych w badaniach gleboznawczych. 1975.
17. Ignacy Dechnik, Jerzy Lipiec - Zwięzłość gleby jako czynnik środowiska rozwoju roślin. 1975.
18. Ignacy Dechnik, Stanisław Tarkiewicz - Zmiany właściwości agrofizycznych gleb pod wpływem działania narzędzi aktywnych. 1975.
19. Ryszard Walczak, Barbara Witkowska - Metody badania i sposoby opisywania agregacji gleby. 1976.
20. Władysław Byszewski, Janusz Pala - Niektóre aspekty związku między poziomem mechanizacji produkcji roślinnej a właściwościami fizycznymi roślin. 1976.
21. Ignacy Dechnik, Ryszard Dębicki - Czynniki zaskorupiania gleb oraz metody przeciwdziałania temu zjawisku. 1976.
22. Helena Lisowa, Janusz Haman, Tadeusz Lis - Właściwości cieplne ciał kapilarno-porowatych i metody ich pomiaru. 1976.
23. Ignacy Dechnik, Ryszard Dębicki - Wykorzystanie syntetycznych środków do ulepszania gleb. 1977.
24. Ludomir Pavel, Stanisław Uziak - Metody badania składu i właściwości mineralnych wysokodispersyjnych składników gleb. 1977.
25. Małgorzata Dąbek-Szreniawska, Maria Drażkiewicz - Zagadnienia sorpcji mikroorganizmów w glebach. 1977.
26. Ryszard Turski, Henryk Domżał, Anna Słowińska-Jurkiewicz, Jan Hodara - Metody badania i wskaźniki oceny agrofizycznego efektu działania narzędzi uprawowych na glebę. 1977.
27. Jan Kossowski, Ewa Sikora - Ciepłe właściwości gleb i metody ich wyznaczania. 1978.
28. Edmund Ślusarczyk, Ewa Kośmider - Potencjał wody w glebie i roślinie oraz metody jego oznaczania. 1978.

29. Bogusław Szot, Jerzy Tys - Przyczyny osypywania się nasion roślin oleistych i strączkowych oraz metody oceny tego zjawiska. 1979.
30. Jolanta Kaniewska, Piotr Kowalik - Numeryczne równania przepływu wody w glebie. 1979.
31. Marek Malicki - Przegląd metod pomiaru wilgotności gleby i oceny ich przydatności w badaniach polowych. 1979.
32. Ignacy Dechnik, Jerzy Lipiec - Przewodnictwo wodne gleby w strefie nienasyconej i metody jego pomiaru. 1980.
33. Bogusław Szot, Józef Horabik - Zagadnienia mechaniki ośrodków sypkich pochodzenia roślinnego. 1980.
34. Jerzy Szczypa, Jerzy Czajkowski - Stabilność układów zdyspergowanych a procesy flokulacji i aglomeracji. 1980.
35. Stanisław Dąbrowski, Józef Grochowicz, Wiktor Pietrzyk - Elektryczne właściwości nasion i ich praktyczne wykorzystanie. 1981.
36. Słownik agrofizyczny. Praca zbiorowa. 1981.
37. Piotr Staszczuk, Andrzej Waksmundzki - Właściwości warstewek hydratacyjnych na powierzchni ciał stałych. 1981.
38. Grażyna Skubisz - Zagadnienie sprężystości żdźbła zbóż. 1982.
39. Jan Gliński, Witold Stępniewski, Stanisław Łabuda - Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym. 1983.
40. Jerzy Lipiec - Możliwość oceny przewodnictwa wodnego gleb na podstawie ich niektórych właściwości. 1983.
41. Ryszard Walczak - Modelowe badania zależności retencji wodnej od parametrów fazy stałej gleby. 1983.
42. Witold Stępniewski, Jan Gliński - Procesy transportu gazów w glebie i skład powietrza glebowego. 1983.
43. Jan Gieroba, Kazimierz Dreszer - Proces przemieszczania ziarna w przenośnikach śrubowych i zabierakowych. 1984.
44. Jan Gliński, Witold Stępniewski - Procesy biologiczne i chemiczne w glebie uzależnione od jej stanu natlenienia. 1984.
45. Witold Stępniewski, Jan Gliński - Reakcja roślin na stan aeracji gleby. 1985.
46. Witold Stępniewski, Jan Gliński - Metody pomiaru aeracji gleb. 1985.

47. Krystyna Konstankiewicz - Porowatość gleby - definicje i metody oznaczania. 1985.
48. Józef Horabik - Opis początkowej fazy grawitacyjnego wypływu roślinnego ośrodka ziarnistego ze zbiornika. 1985.
49. Tadeusz Wolski, Jan Glinński - Odpady przemysłowe i ich przetwarzanie na sole techniczne oraz preparaty do nawożenia gleb i żywienia zwierząt. 1985.
50. Jan Gieroba, Kazimierz Dreszer - Problemy strat i uszkodzeń ziarna podczas kombajnowego zbioru. 1986.

Problemy Agrofizyki można
nabyć w księgarni OR PAN
Pałac Kultury i Nauki
00-901 Warszawa

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1988.
Nakład 400 egz. Objętość ark. wyd. 3,20, ark. druk. 4,25. Papier
offsetowy kl. V, 70 g, A-1. Oddano do drukarni 1987.12.18.
Druk ukończono w lutym 1988 r. Wrocławska Drukarnia Naukowa.
Zam. 1249/87. C-14. Cena zł 75,—

