

MECHANICZNE WŁAŚCIWOŚCI DARNI TRAW

Szczepan L. Dąbkowski, Kazimierz Garbulewski, Kinga Pachuta

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości 15-letniej i 6-miesięcznej darni traw. Do uprawy 6-miesięcznej darni wykorzystano mowę trzecinową (*Phalaris arundinacea*) i wyczyniec łąkowy (*Alopecurus pratensis*). W celu określenia wytrzymałości darni przeprowadzono badania metodą bezpośredniego ścinania i wyciągania korzeni traw. Wartości i rozkład naprężeń stycznych na powierzchniach ścicia równoległych do powierzchni próbek darni zależą od wymiarów próbek, rodzaju roślinności i prędkości deformacji gruntu z korzeniami traw. Wartości wytrzymałości na ścinanie darni zwiększają się przy wzroście prędkości deformacji.

Słowa kluczowe: darni, właściwości mechaniczne, metody badań, bezpośrednie ścinanie, metoda wyciągania, wytrzymałość na ścinanie

WSTĘP

Systemy korzeniowe roślin pełnią rolę „zbrojenia” gruntu, wzmacniając go przez stabilizację zawartych w nim cząstek stanowiących szkielet gruntu, a także poprzez wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie samych korzeni. Fakt ten jest od dawna znany i wykorzystywany do umocnienia powierzchniowych warstw budowli ziemnych oraz ochrony przed erozją wodną i wietrzną, niszczeniem przez pojazdy, ludzi i zwierzęta. Miąższość warstwy wzmocnionej korzeniami zależy od rodzaju roślinności, a w zasadzie od głębokości strefy korzeniowej, zwanej ryzosferą. W przypadku niektórych gatunków drzew może ona osiągać ponad 1 m, a roślin trawiastych – kilkanaście centymetrów. Stopień wzmocnienia gruntu poprzez warstwę przerośniętą korzeniami zależy od gęstości systemu korzeniowego, stadium i warunków rozwoju roślinności oraz od budowy anatomicznej i morfologicznej pojedynczych korzeni. Elementami wzmacniającymi korzenie są komórki włókien (wiązki przewodzące), zwykle rozmieszczone w środkowej części przekroju korzenia.

Roślinność, zwłaszcza trawiasta, chroni grunt przed erozją wodną i wietrzną, także poprzez okrycie jego powierzchni i zmniejszenie prędkości wiatru lub wody w warstwie przy powierzchni terenu. Aspekty ochronnej roli roślinności były badane zarówno w laboratoriach, jak i w naturze oraz analizowane teoretycznie [Böhm, 1985]. Badana

była trwałość okrywy roślinnej oraz systemu korzeniowego w różnych siedliskach, w tym odporność na suszę, na czas oddziaływania i prędkość przepływu wody. Badano również wpływ roślinności na hydraulikę i morfologię koryt rzecznych [np. Dąbkowski i in., 1995; Żelazo i in. 2003; Pachuta i Pachuta, 2003].

Mechaniczna rola korzeni w gruncie, polegająca na współoddziaływaniu obu tych elementów w procesie ścinania (poślizgu) i rozciągania była badana przez Graya [1974], Graya i Leisera [1982], Hewletta i innych [1985], Greenwaya [1987], Wu i innych [1988a, b], Halla i innych [1994]. Przyjęty przez nich model fizyczny odpowiadał systemowi i właściwościom korzeni drzew, a badania na modelach i *in situ* oraz opis teoretyczny prowadzili, traktując pojedynczy korzeń jak belkę, ciężno lub kabel. Wu i inni [1988a, b] analizowali wytrzymałość korzeni na rozciąganie i przyczepność w gruncie. Z obszernego przeglądu wcześniejszych badań wynikało, że wytrzymałość gruntu na ścinanie zwiększa się wraz z powiększaniem się objętości masy korzeniowej i że rola korzeni jako zbrojenia zależy od sztywności i układu w przestrzeni gruntowej.

W ogólnym przypadku gruntu charakteryzującego się spójnością (c) i kątem tarcia wewnętrznego (φ), wytrzymałość na ścinanie zbrojonego korzeniami roślin (s) można określić na podstawie równania zaproponowanego przez Waldrona [1977], Waldrona i Dakesiana [1982] i Wu [Wu i in. 1988a]:

$$s = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + (T/A) \quad (1)$$

gdzie: σ – naprężenie normalne do powierzchni ścinania w gruncie bez korzeni,

A – pole powierzchni ścinania w gruncie z korzeniami,

T – siła ścinania korzeni przecinających pole powierzchni A .

Wartość siły T obejmuje rozciąganie (wydłużanie) korzenia, przyczepność gruntu do korzenia oraz przemieszczanie i prędkość przemieszczania korzenia w gruncie. Określenie składowych siły T jest zadaniem złożonym w badaniach *in situ*, a nawet na fizycznych modelach korzeni drzew. W przypadku traw zadanie to jest jeszcze trudniejsze, z uwagi na dużą liczbę korzeni w jednostce objętości gruntu, małe wymiary i znacznie mniejsze oraz bardziej zróżnicowane siły zrywające [Waldron i Dakessian, 1982; Dąbkowski i in. 1994].

W pracy przedstawiono metodykę i wyniki badania wytrzymałości warstwy gruntu przerośniętej korzeniami traw, nazywanej dalej darnią. Zasadniczym celem była ocena stopnia wzmocnienia gruntu przez korzenie traw. Założono, że wzmocnienie jest wyrażone większą wytrzymałością na ścinanie gruntu z korzeniami niż z gruntem bez korzeni traw. Badano 15-letnią darń naturalną i 6-miesięczną wyhodowaną w wazonach.

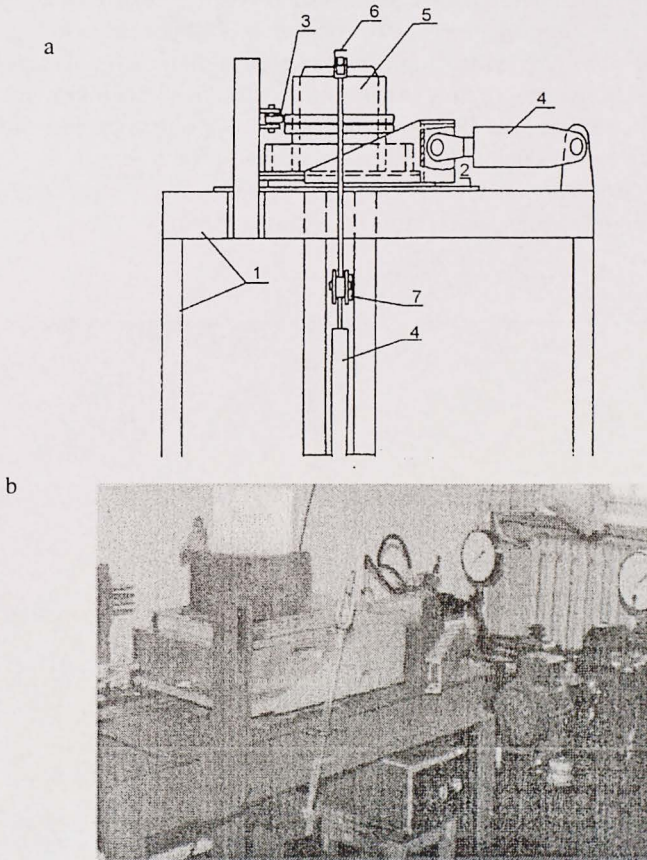
METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W etapie wstępnym zaprojektowano i wykonano prototypowe urządzenie do bezpośredniego ścinania darni i urządzenie do wyciągania korzeni, a następnie przeprowadzono serię badań w celach sprawdzenia aparatury i przyjęcia metodyki badawczej. Rozpoznano również mechanizmy niszczenia próbek gruntu „zbrojonego” korzeniami. W drugim etapie wykonano serie badań

wytrzymałości darni na ścinanie w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz wytrzymałości na rozrywanie i wyciąganie korzeni.

Badania¹ metodą bezpośredniego ścinania przeprowadzono, stosując dwa aparaty:

- wielkowymiarowy (prototypowy) z napędem hydraulicznym, dla próbek o wymiarach $0,25 \times 0,25 \times 0,25$ m, przy obciążeniach: pionowym w zakresie 5–20 kN, poziomym do 20 kN oraz prędkości ścinania od 0,1 do 100 mm/min (rys. 1);
- standardowy skrzynkowy, dla próbek o wymiarach $0,12 \times 0,12 \times 0,08$ m (aparat ten wykorzystano do przeprowadzenia wstępnej serii badań w celu opracowania metodyki badań zasadniczych).

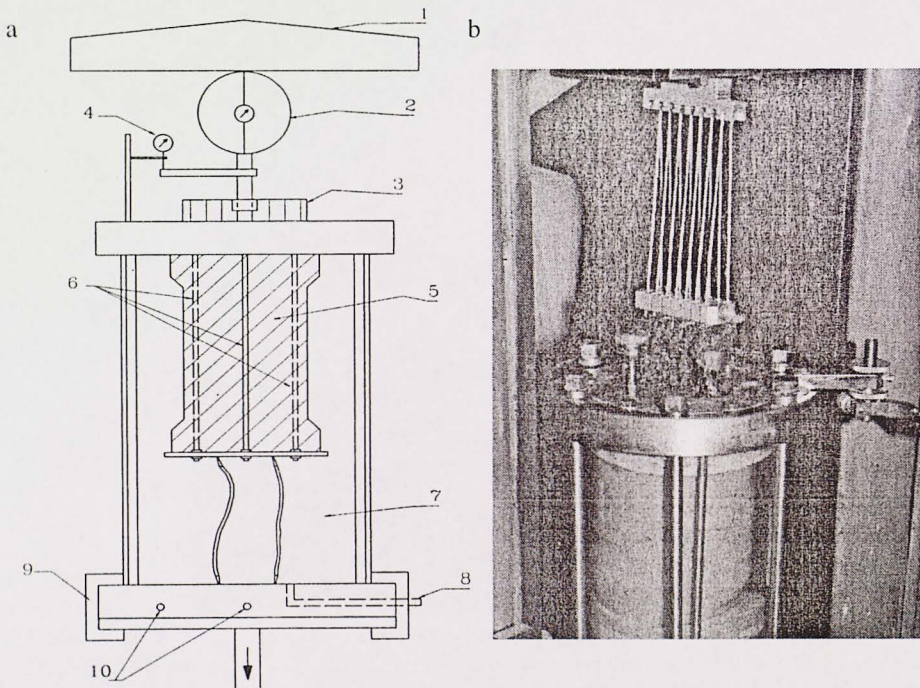


Rys. 1. Wielkowymiarowy aparat bezpośredniego ścinania (skrzynka $0,25 \times 0,25 \times 0,25$ m): a – schemat, b – widok; 1 – rama podstawy stanowiska, 2 – płyta, 3 – czujnik tensometryczny, 4 – siłownik, 5 – skrzynka, 6 – dźwignia, 7 – czujnik tensometryczny

Fig. 1. Large-dimension apparatus for direct box shearing (box $0,25 \times 0,25 \times 0,25$ m): a – scheme, b – view; 1 – frame of stand basement, 2 – plate, 3 and 7 – tensometric gauge, 4 – servo, 5 – box, 6 – lever

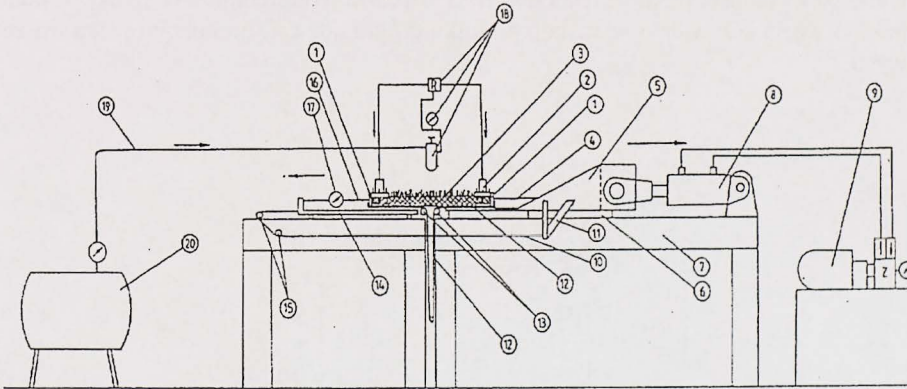
¹Badania wykonano w laboratorium geotechnicznym Katedry Geotechniki SGGW w Warszawie.

W badaniach metodą wyciągania korzeni wykorzystano prasę mechaniczną i zmodyfikowaną komorę aparatu trójosiowego ściskania. Próbki gruntu „zbrojonego” miały kształt cylindryczny o średnicy 0,10 m i wysokości 0,20 m. Modyfikacja komory polegała na wykonaniu w jej pokrywie owalnego, specjalnie wyprofilowanego w przekroju pionowym otworu oraz urządzenia wprowadzanego przez otwór w powierzchniową część próbki gruntu i chwytającego system korzeniowy poniżej węzłów krzewienia. Schemat i widok aparatu do wyciągania korzeni przedstawiono na rysunku 2. Cylindryczna próbka gruntu w osłonie gumowej umieszczana była w górnej części komory w taki sposób, że darń stykała się z pokrywą komory. Po napełnieniu komory wodą i podłączeniu jej do układu hydraulicznego zadawano wymagane ciśnienie powodujące obciążenie zewnętrzne próbki poprzez wodę. Chwytek do wyciągania korzeni składał się z 14 prętów zakończonych pazurkami. Pręty w górnych końcach połączone były za pomocą uchwyty. Ustawienie prętów regulowano suwakiem znajdującym się przy uchwycie w górnej części prętów. Przesuwając suwak w dół, uzyskiwano zbliżenie się pazurków prętów do siebie i uchwycenie korzeni, a przesuwając suwak do góry – rozsuniecie pazurków. Chwytek mocowany był w szczękach prasy hydraulicznej z napędem, umożliwiającą rejestrację czasu i siły wyciągania korzeni.



Rys. 2. Metodą wyciągania korzeni traw: a – schemat urządzenia, b – badanie darni; 1 – rama blokująca, 2 – pierścień dynamometryczny, 3 – chwytak, 4 – czujnik, 5 – próbka, 6 – pręty, 7 – cylinder z pleksi, 8 – układ ciśnienia wody w komorze, 9 – klamra, 10 – czujniki ciśnienia wody
Fig. 2. Pull-out method: a – scheme of device, b – turf testing; 1 – frame, 2 – proving ring, 3 – grab, 4 – gauge, 5 – sample, 6 – rods, 7 – plexi cell, 8 – pressure system, 9 – clamp, 10 – gauges

Badania rozrywania darni (wytrzymałości na rozciąganie) przeprowadzono w zmodyfikowanym wielkowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 3). Modyfikacja aparatu polegała na dobudowaniu do jego podstawy, na której normalnie umieszcza się dwudzielną skrzynkę, metalowego stołu z płytą o wymiarach $0,5 \times 0,6$ m na rolkach. Dobudowana płyta stanowi przedłużenie płyty podstawy aparatu i jest połączona łańcuchowym ciągnem z płaskownikiem sprzężonym z hydraulicznym siłownikiem aparatu. Ciężno powoduje rozchodzenie się obu płyt w przeciwnych kierunkach z taką samą prędkością, co umożliwia uzyskanie większego odkształcenia próbki darni do momentu jej zerwania. Pomiędzy dobudowany stół i podstawę aparatu wprowadzono ceratę przymocowaną do sprężyn. Wysuwa się ona ze szczeliny między stołem i podstawą, stanowiąc zabezpieczenie próbki gruntu i eliminując tarcie między dolną powierzchnią darni i płytami aparatu znajdującymi się na stole i podstawie. Obie te płyty umieszczone są na rolkach i mogą przesuwać się praktycznie bez oporów. Krawędzie próbek darni były mocowane specjalnymi mechaniczno-pneumatycznymi szczękami (uchwyty) w postaci płaskowników szerokości 5 cm. W dolnym płaskowniku były trzy rzędy gwoździ długości 4 cm, rozstawionych w wierzchołkach trójkątów równobocznych. Płaskownik górny był dociskany do darni trzema miniaturowymi siłownikami pneumatycznymi. Siła rozciągająca mierzona była za pomocą dynamometru pierścieniowego. Początkowo został on połączony osiowo z uchwytem darni, lecz po testach wstępnych zmieniono połączenie na trójkątą ramę. Obie krawędzie próbki ciągnięte były w przeciwnych kierunkach ze znaną siłą, a do pomiaru odkształcenia próbki darni zastosowano miernik zegarowy.



Rys. 3. Schemat aparatu do badania wytrzymałości darni na rozciąganie: 1 – szczęki z bolcami, 2 – siłownik pneumatyczny, 3 – darni, 4 – łącznik, 5 – „sanki”, 6 – prowadnice, 7 – podstawa, 8 – siłownik, 9 – układ hydrauliczny, 10 – łańcuch, 11 – mocowanie łańcucha, 12 – cerata, 13 – rolki, 14 – sanki na płozach, 15 – koła zębate, 16 – mocowanie szczęk, 17 – dynamometr, 18 – instalacja pneumatyczna, 19 – przewód ciśnieniowy, 20 – sprężarka

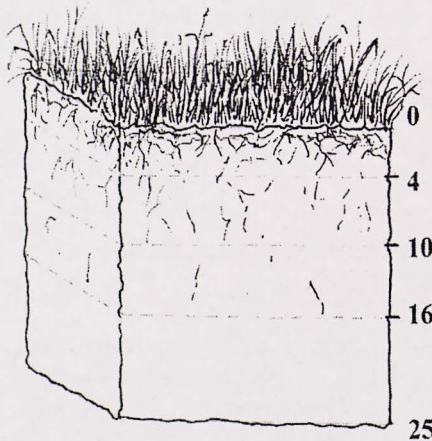
Fig. 3. Scheme of device for extension test of turf: 1 – holder jaws with bolts, 2 – pneumatic jack, 3 – turf, 4 – connector, 5 – slide, 6 – slide-ways, 7 – base, 8 – jack, 9 – hydraulic system, 10 – coil chain, 11 – chain clamping, 12 – oilcloth, 13 – rolls, 14 – slide on runner, 15 – gear, 16 – clamping of holder jaws, 17 – dynamometer, 18 – pneumatic system, 19 – pressure conduit, 20 – compressor

BADANIE WIELOGATUNKOWEJ DARNI 15-LETNIEJ

W składzie botanicznym darni naturalnej w przybliżeniu równy udział miały: kostrzewa czerwona (*Festuca rubra*), życica trwała (*Lolium perenne*), wiechlina roczna (*Poa annua*) i kupkówka pospolita (*Dactylis glomerata*), które pokrywały powierzchnię gleby w 100%, dając wraz z gatunkami towarzyszącymi zadarnienie wynoszące 75–85%. Na powierzchni 25 × 25 cm występowały 543 pędy. Główna masa korzeniowa (oznaczona jako sucha masa metodą Schuurmana) znajdowała się w warstwie A (od 0 do 4 cm od powierzchni gleby). W warstwie B (od 4 do 10 cm od powierzchni gleby) masa korzeni była 20-krotnie mniejsza niż w warstwie A, a warstwa C (poniżej 10 cm) zawierała nieznaczną masę korzeni (rys. 4).

Z jednego źdźbła wychodził co najmniej jeden korzeń pierwszorzędowy, a najwięcej pięć korzeni. Na 1 dm² występowało 65–176 źdźbeł. Objętość jednego korzenia pierwszorzędowego (w warstwie A, 0–4 cm) wynosiła 0,38–54,02 mm³, a suma powierzchni bocznej i czołowej 7,6–338,25 mm².

W prostopadłości na podstawie 10 × 10 cm, wyciętym z warstwy A (o miąższości 4 cm), objętość korzeni pierwszorzędowych wynosiła 25–47 538 mm³, a ich powierzchnia boczna 494–297 660 mm². Sucha masa korzeni w tej objętości wynosiła 0,25–3,08 g, stanowiąc do 2,6% suchej masy gruntu. Wśród 100 korzeni długości 1,2–15,5 cm i grubości 0,16–1,00 mm, wypreparowanych z warstwy A, większość stanowiły korzenie długości 3,5–14,0 cm i o średniej grubości 0,32 mm. Na każdym pojedynczym korzeniu pierwszorzędowym występowało do 48 korzeni drugorzędowych (średnio 5–15 sztuk) oraz do 17 korzeni trzeciorzędowych (średnio 2–7 sztuk). Z pojedynczego węzła krzewienia wyrastało od kilku do kilkudziesięciu korzeni pierwszorzędowych.



Rys. 4. Schemat próbki darni 15-letniej do badań wytrzymałości
Fig. 4. Scheme of 15 years old turf sample for strength tests

Próbki wielogatunkowej darni naturalnej pobrano wiosną i poddano badaniom:

- w wielkowymiarowym aparacie na wymuszonych płaszczyznach ścinania położonych na głębokościach 4, 12 i 20 cm poniżej powierzchni próbki (terenu); prędkość ścinania wynosiła 0,33 mm/min w przypadku płaszczyzn na głębokościach 4 i 12 cm oraz 0,75 mm/min dla płaszczyzny ścinania 20 cm poniżej powierzchni terenu; pionowe obciążenie próbek było jednakowe i wynosiło 25 kPa,
- w standardowym aparacie bezpośredniego ścinania przy obciążeniu pionowym 25 kPa i prędkościach ścinania: 0,1, 1,0 i 10,0 mm/min (płaszczyzna ścinania znajdowała się w połowie wysokości próbek, tzn. na głębokości około 4 cm od powierzchni terenu); ponadto wykonano ścinanie próbek gruntu bez korzeni, sztucznie zagęszczonego.

Darń naturalną pobraną we wrześniu poddano podobnym badaniom na ścinanie, lecz w płaszczyźnie prostopadłej do jej powierzchni.

Według klasyfikacji geotechnicznej, grunt pod darnią naturalną to glina zawierająca 50% frakcji piaskowej (2,0–0,05 mm), 39% frakcji pyłowej (0,05–0,002 mm) i 11% frakcji ilastej (< 0,002 mm). Inne parametry gruntu podano w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości gruntów badanych darni

Table 1. Properties of soils for turf tested

Parametr Parameter	Grunt w darni Soil of turf	
	naturalnej natural	w wazonach cultivated
Wilgotność naturalna [%] Moisture content	25	22
Gęstość objętościowa [kg/m ³] Bulk density	1830	1760
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [kg/m ³] Dry density	1470	1440
Zawartość części organicznych Organic matter content	4,21* 3,10**	8,1

*W warstwie powierzchniowej próbki (A).

In subsurface part of sample (A).

**W warstwie środkowej próbki (B).

In middle part of sample (B).

BADANIE DARNI JEDNOGATUNKOWEJ WYHODOWANEJ W WAZONACH

Badania na próbkach darni wyhodowanej w wazonach, w które w maju wysiano móżgę trzcinową (*Phalaris arundinacea*) i wyczyniec łąkowy (*Alopecurus pratensis*), wykonano po 6 miesiącach wegetacji. Grunt wypełniający wazonny to glina, zawierająca

55% frakcji piaskowej, 34% pylastej i 11% ilastej, a więc o uziarnieniu i właściwościach podobnych do gliny występującej pod badaną darnią naturalną (tab. 1). Badania właściwości plastycznych tego gruntu, wykonane metodą spadającego stożka (granica płynności – w_L) i metodą waleczkowania (granica plastyczności – w_p) wykazały: $w_L = 41\%$, $w_p = 28,2\%$, wskaźnik plastyczności $I_p = 12,8\%$.

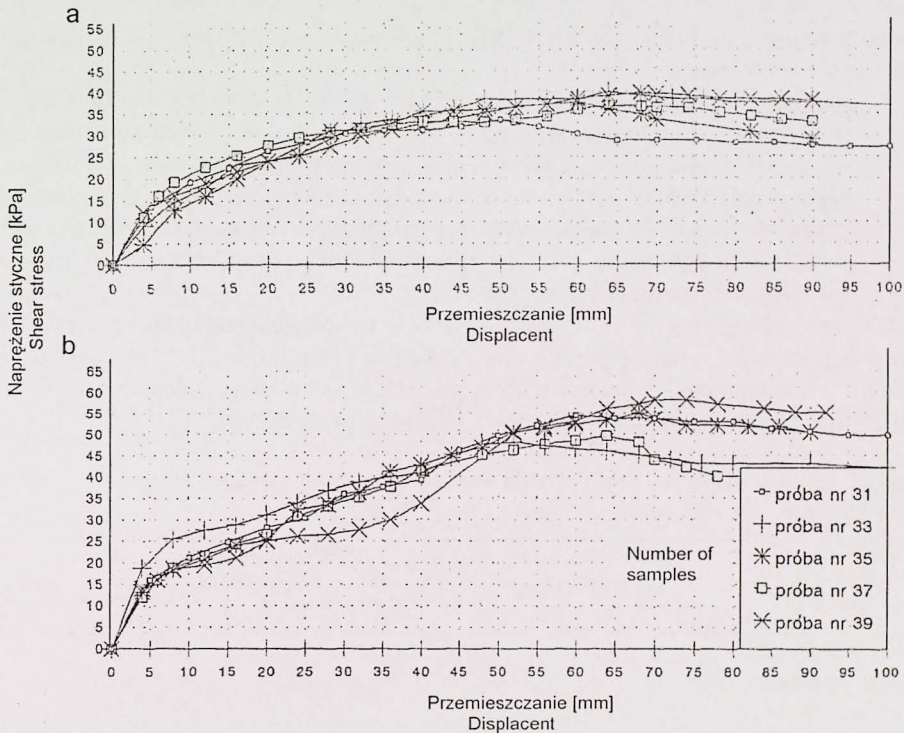
Grunt we wszystkich wazonach był zagęszczany w taki sam sposób. W każdym wazonie umieszczono 25 kg gruntu o wilgotności 22–23% i zagęszczono do uzyskania wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95$. Według badań w aparacie Proctora, grunt charakteryzował się następującymi parametrami zagęszczenia: maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntu $\rho_{ds} = 1460 \text{ kg/m}^3$, wilgotność optymalna $w_{opt} = 23\%$. Wytrzymałość gruntu (bez korzeni traw) określono dla pobranych z dwóch wazonów 6 próbek o wymiarach $12 \times 12 \times 12 \text{ cm}$ za pomocą standardowego aparatu bezpośredniego ścinania. Trzy próbki miały wilgotność naturalną, tzn. taką, jaką utrzymywano w wazonach, a pozostałe 3 badano po nasączeniu gruntu wodą. W obu seriach badań stosowano takie same obciążenia pionowe: 25, 50 i 75 kPa. Obliczone wartości parametrów wytrzymałościowych badanego gruntu wynosiły: kąt tarcia wewnętrznego $\phi = 32^\circ$ i spójność $c = 10 \text{ kPa}$. Dla próbek nasączonych wodą wartości te wynosiły odpowiednio: wytrzymałość na ścinanie $\tau_f = 22,0, 33,5$ i $51,0 \text{ kPa}$, zależnie od obciążenia pionowego, $\phi = 29^\circ$ i $c = 6 \text{ kPa}$.

Próbki darni z wazonów (po 3 dla każdego gatunku) poddano bezpośredniemu ścinaniu w wielkowymiarowym aparacie w dwóch płaszczyznach, położonych 4 i 10 cm poniżej powierzchni próbki, oraz wyciąganiu korzeni z cylindrycznych próbek gruntu. Ścinanie z prędkością $0,16 \text{ mm/min}$ wykonano przy pionowym obciążeniu próbek wynoszącym 25, 35 i 50 kPa . Badania metodą wyciągania korzeni wykonano dla 4 próbek z mózga trzciniowatą i 4 próbek z wyczyńcem łukowym. Wyciąganie korzeni z prędkością 6 mm/min odbywało się bez obciążenia gruntu w komorze.

WYNIKI I DYSKUSJA

Badania w wielkowymiarowym aparacie bezpośredniego ścinania wykazały, że próbki miały wytrzymałość na ścinanie (τ_f) przy obciążeniu 25 kPa równą 38 i 45 kPa w płaszczyznach położonych odpowiednio 4 i 12 cm poniżej powierzchni darni. Ścinanie na głębokości 20 cm wykazało wytrzymałość 45 kPa , lecz było ono wykonane z prędkością $0,75 \text{ mm/min}$, co miało wpływ na wartości τ_f . Na charakterystykach ścinania (przykładowe na rys. 5) widoczny jest długotrwały, ciągły wzrost wartości naprężeń stycznych aż do wartości maksymalnych, po czym zawsze następowało zmniejszenie τ_f . Odształcenia przy ścięciu próbek wynosiły od 20 do 32% .

Z badań w aparacie standardowym na próbkach o wymiarach $12 \times 12 \times 12 \text{ cm}$ uzyskano wartości naprężeń ścinających od 23 kPa przy prędkości ścinania $0,1 \text{ mm/min}$ do 33 kPa przy prędkości ścinania 10 mm/min . Wynika z tego, że naprężenia ścinające uzyskiwane w badaniach darni zależą od wymiarów próbki i prędkości ścinania. Badania w aparacie standardowym próbek tego samego gruntu, lecz bez korzeni traw, po doprowadzeniu ich do zagęszczenia i wilgotności jak w próbkach naturalnych, wykazały $\tau_f = 23 \text{ kPa}$, czyli wytrzymałość mniejszą niż wytrzymałości próbki naturalnej z systemem korzeniowym.



Rys. 5. Charakterystyki ścinania próbek wyhodowanej w wazonach darni (mozga trzcinowata) przy naprężeniu normalnym 35 kPa i prędkości ścinania 20 mm/h: a – na głębokości 10 cm, b – na głębokości 4 cm

Fig. 5. Shear strength characteristics of turfs planted (*Phalaris arundinacea*) under normal stress of 35 kPa and rate of shearing equal 20 mm/h: a – for the depth of 10 cm, b – for the depth of 4 cm

Ścinanie próbek w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni darni (równoległe do ogólnego przebiegu korzeni) wykazało, że zarówno w aparacie wielkowymiarowym, jak i standardowym, przy możliwych do pomierzenia odkształceniach (20–30%), nie uzyskiwano maksimum wartości naprężeń ścinających. Wartość ta rosła wraz ze wzrostem odkształceń próbek. Wyniki badań zestawiono w tabeli 2. Z badań w aparacie standardowym otrzymano mniejsze wartości τ_f w stosunku do wyników badań w aparacie wielkowymiarowym: o 9% przy obciążeniu 25 kPa, a o 32% przy obciążeniu 50 kPa.

Tabela 2. Naprężenia ścinające w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni darni [kPa]
Table 2. Shear stresses in the plain perpendicular to the turf surface

Obciążenia pionowe Vertical loading [kPa]	Rodzaj aparatu Apparatus type	
	wielkowymiarowy large – dimension	standardowy standard
25	32	29
50	80	52

Wyniki badań darni mozgi trzcinowej (*Phalaris arundinacea*) i wyczyńca łąkowego (*Alopecurus pratensis*) zestawiono w tabeli 3. Wskazują one, że po półrocznej wegetacji traw system korzeniowy:

- mozgi trzcinowatej rozwinął się w glebie na tyle, że wyraźnie uwidaczniał się opór gruntu na ścinanie, przy czym wpływ głębokości systemu korzeniowego na wytrzymałość gruntu na ścinanie jest bardziej widoczny dla wartości c niż φ ,
- wyczyńca łąkowego silniej wpłynął w tym samym czasie na wytrzymałość gruntu na ścinanie (większe wartości parametrów wytrzymałościowych); rozwinął się on bardziej w wierzchniej warstwie gleby (do głębokości 4 cm), głębiej sięgają tylko nieliczne korzenie.

Dla darni obu gatunków traw obserwowano w trakcie ścinania ciągły przyrost naprężeń stycznych, co na wykresach „naprężenie – przemieszczenie” uwidacznia się brakiem wyraźnego punktu ścięcia gruntu; po osiągnięciu maksymalnej wartości τ_f nie występowało jej zmniejszenie (w granicach badanych odkształceń).

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości darni na ścinanie w płaszczyźnie poziomej
Table 3. Results of shear strength tests for horizontal plains

Próbka darni Turf sample	Głębokość ścinania Depth of shearing [cm]	Parametry wytrzymałościowe Shear strength parameters	
		φ [°]	c [kPa]
Mozga trzcinowata	4	47	7,4
<i>Phalaris arundinacea</i>	10	48,5	4,2
Wyczyńiec łąkowy	4	52,3	10,7
<i>Alopecurus pratensis</i>	10	47,3	9,8

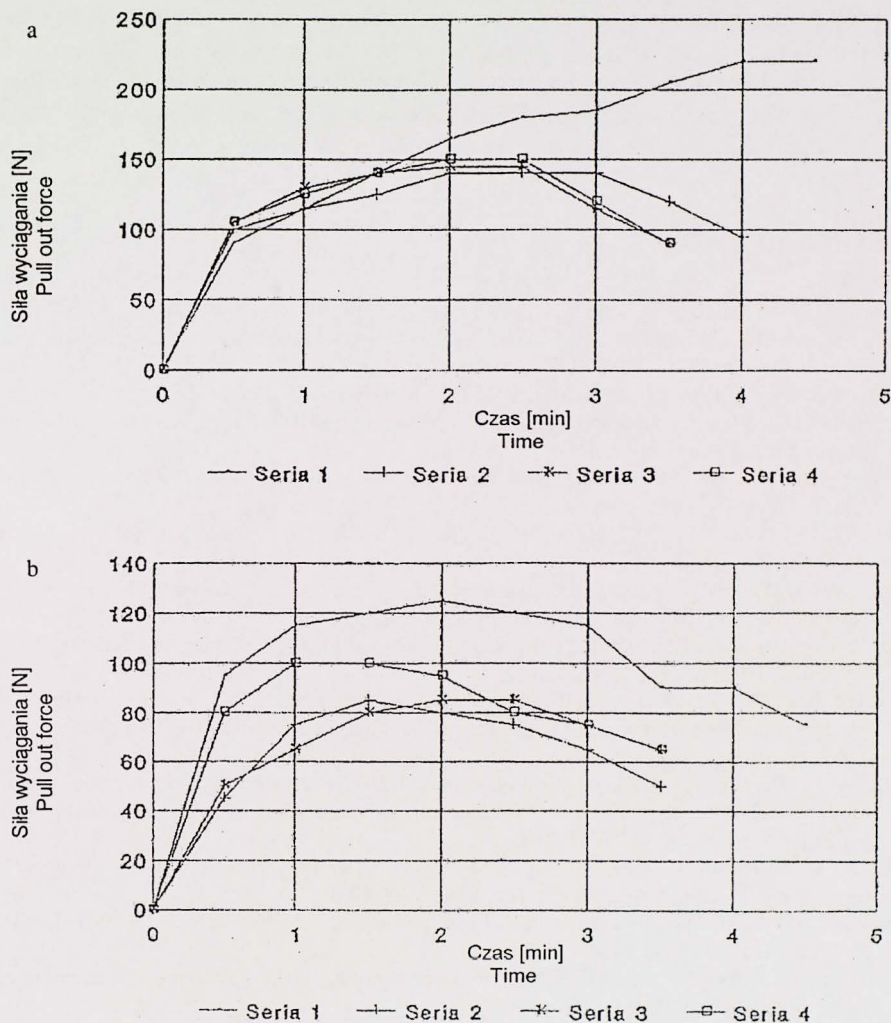
Dla darni obu gatunków traw wykonano też pomiary sił przy wyciąganiu korzeni (rys. 6), uzyskując:

- dla wyczyńca łąkowego wartości maksymalnej siły 60–80 N; w przypadku zastosowania szybkiego wyciągania (nie kontrolowano prędkości) siła ta wynosiła 40 N,
- dla mozgi trzcinowatej maksymalna siła potrzebna do wyciągnięcia korzeni z gruntu wynosiła 35–80 N.

PODSUMOWANIE

Zebrane doświadczenia i wyniki badań potwierdziły przydatność zastosowanej metodyki do oceny wzmocnienia gruntu korzeniami traw. Na wartość badanych charakterystyk wpływają zasadniczo wymiary próbek i prędkość ścinania.

Przy zastosowaniu małych próbek ($12 \times 12 \times 12$ cm) uzyskiwano ogólnie mniejsze wartości wytrzymałości na ścinanie niż w przypadku badań na próbkach o wymiarach dwukrotnie większych ($25 \times 25 \times 25$ cm). Wzrost prędkości ścinania od 0,1 mm/min do 10 mm/min (czyli stukrotny) spowodował zwiększenie wytrzymałości na ścinanie gruntu z korzeniami prawie o 50%, tj. z $\tau_f = 23$ kPa do $\tau_f = 33$ kPa.



Rys. 6. Wyniki badań wytrzymałości na wyciąganie korzeni: a – wyczyńca łąkowego (*Alopecurus pratensis*), b – mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinacea*)

Fig. 6. Results of pull-out tests for a – *Alopecurus pratensis*, b – *Phalaris arundinacea*

Charakterystyki wytrzymałościowe uzyskane w stosowanych aparatach cechowała na ogół ciągła tendencja przyrostowa, w związku z czym nie obserwowano w zasadzie wartości resztkowej wytrzymałości na ścinanie.

Nawet już po półrocznym okresie rozwoju systemy korzeniowe obu badanych gatunków traw wyraźnie zmieniły wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu gliniastego. Wartość kąta tarcia wewnętrznego wzrosła o ponad 50% w przypadku mozgi trzcinowatej i o ponad 60% w przypadku wyczyńca łąkowego; spójność zmalała w przypadku mozgi i prawie nie uległa zmianie w przypadku wyczyńca łąkowego. Po

pół roku wegetacji darń wyczyńca łąkowego miała większą wytrzymałość na ścinanie niż darń mozgi trzcinowatej. Korzenie wyczyńca łąkowego były też odporniejsze na wyciąganie, gdyż średnia siła dla badanych 4 próbek wyniosła około 145 N (dla mozgi ok. 96 N), natomiast zerwanie korzeni następowało po 2,5 minutach (w przypadku mozgi 1,5–2 minut).

PIŚMIENNICTWO

- Böhm W., 1985. Metody badania systemów korzeniowych. PWRiL, Warszawa.
- Dąbkowski Sz.L., Garbulewski K., Pachuta K., 1994. Badania mechanicznych właściwości darni. Roczn. AR Poznań. CCLXVIII, Melior. Inż. Środ., 15, 2, 219–227.
- Dąbkowski Sz.L., Pachuta K., Garbulewski K., Bajkowski S., Popke Z., Pietraszek Z., 1995. Badania szorstkości hydraulicznej i odporności powierzchni trawiastych na ruch wody. Raport z realizacji grantu KBN nr 5 708 92 03.
- Gray D.H., 1974. Reinforcement and stabilization of soil by vegetation. J. Geotech. Eng. Div. ASCE, 100 (GT6), 695–699.
- Gray D.H., Leiser A.J., 1982. Biotechnical slope protection and erosion control. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Greenway D.R., 1987. Vegetation and slope stability. Chapter 6 in "Slope Stability" (ed.) M.G. Anderson and K.S. Richards. John Wiley & Sons Ltd., New York.
- Hall B.E., Giles E.L., Rauch H.P., 1994. Experiences with the use of trees in slope stabilization. Proc. of XIII IC SMFE, New Delhi.
- Hewlett H.W.M., Boorman L.A., Bramley M.E., Whitehead E., 1985. Reinforcement of steep grassed waterways. Review and preliminary design recommendations. CIRIA. Technical Note 120.
- Pachuta K., Pachuta A., 2003. Application of the GPS-RTK method to the determination of the location and influence of river plant communities on water movement and river bed morphology. Reports on Geodesy. PW, 1 (64).
- Temple D.M., Robinson K.M., Ahring R.M., Davis A.G., 1987. Stability design of grass-lined open channels. USDA Agricultural Handbook 667, 147.
- Waldron L.J., 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 41, 843–849.
- Waldron L.J., Dakessian S., 1982. Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance. Soil Sci. Soc. Am. J., 46, 894–899.
- Wu T.H., McOmber R.M., Erb R.T., Beal Ph.E., 1988a. Study of soil-root interaction. J. of Geotech. Engrng ASCE, 114, 12, 1351–1375.
- Wu T.H., Beal Ph.E., Lan Ch. (1988 b): In situ shear test of soil-root systems. J. of Geotech. Engrng ASCE, 114, 12, 1376–1394.
- Żelazo J., Ogłücki P., Popke Z., Pachuta K., Wasilewicz M. (2003): The morphological and biological characteristics of the middle Wkra River natural reaches. Annals of Agricult. Univ. – SGGW Land Reclamation, Warsaw.

MECHANICAL PROPERTIES OF TURFS

Abstract. The laboratory measurements of rooted soils (turfs) for 15 years and 6 months old are presented. In case of 6 months old turf two plant species were used: *Alopecurus pratensis* and *Phalaris arundinacea*. To assess the strength values for turfs the direct

shear tests and pull-out tests were made. Shear stress on the sliding planes oriented parallel to the surface depends on the dimensions of rooted soil sample, the plant species and the rate of soil deformation. The shear strength values of turfs increase with the increasing of deformation rate.

Key words: turf, mechanical properties, test methods, direct shearing, pull-out test, shear strength

Sz.L. Dąbkowski, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Wodnej, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 1, 25-314 Kielce,

K. Garbulewski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-766 Warszawa,

K. Pachuta, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Kształtowania Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-766 Warszawa