



WPLYW KORZENI GRABU NA WYTRZYMAŁOŚĆ GRUNTU NA ŚCINANIE

Tymoteusz Zydróż

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kollątaja w Krakowie

THE INFLUENCE OF HORNBEAM ROOTS ON SHEAR STRENGTH OF SOIL

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań parametrów wytrzymałościowych korzeni grabu (*Carpinus betulus* L.) pobranych z jednego ze zboczy z okolic Ciężkowic (Pogórze Ciężkowickie). W ramach badań przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie, dokonano pomiaru względnej powierzchni korzeni w gruncie oraz przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie gruntu oraz gruntu zbrojonego korzeniami. Badania wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono w zrywarka produkcji firmy Hounsfield H50KS na próbkach o długości 0,1 m stosując prędkość odkształceń $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki 120 x 120 mm na próbkach gruntu oraz gruntu zbrojonego 6 oraz 10 korzeniami grabu. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie oraz ich analiza wykazały, że korzenie grabu charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu do innych gatunków drzew. Pomiaru względnej powierzchni korzeni w gruncie wykazały, że największe zagęszczenie korzeni występuje w przypowierzchniowej warstwie gruntu sięgającej do ok. 0,3 m ppt., a na głębokości 1,0 m ppt. występują pojedyncze korzenie. Udział korzeni w profilu gruntowym wyniósł ok. 0,4 %, co stanowi niską wartość w stosunku wyników badań tego typu systemu korzeniowego. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wykazały, że wraz ze wzrostem względnej powierzchni korzeni w gruncie następuje zwiększenie jego wytrzymałości na ścinanie, przy czym

wzrost ten jest spowodowany znaczącą zmianą spójności. Przy wartościach względnej powierzchni korzeni w gruncie w zakresie 0,11–0,26% uzyskano przyrost wytrzymałości gruntu na ścinanie od 2,7 do 8,6 kPa.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na rozciąganie, grab, spójność, zbrojenie gruntu,

Summary

*Results of mechanical parameters of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) originated from slope near Ciężkowice (Pogórze Ciężkowickie Mts.) are presented in the paper. In the frame of research were performed tensile force tests, were determined root area ratio within soil profile and shear strength tests of soil and reinforced soil were done. Tensile strength tests were carried out in the tensile testing machine manufactured by Hounsfield H50KS on samples with a length of 0.1 m using a strain speed of 10 mm per minute. Shear strength tests were performed in a direct shear box with measurements 120 x 120 mm for soil samples and soil reinforced by 6 and 10 roots of hornbeam. Results of tensile tests and their analysis revealed that hornbeam roots are very strong in comparison to some species of plants. Root area ration measurements show that the highest density of roots was observed in the upper superficial layer of soil profile (at the depth of 0,3 m below terrain level) and at the depth 1,0 m below terrain level were observed individual roots. Maximum value of root area ratio was equal to 0,6% and it was smaller in comparison to tests results obtained for this species cited in literature. Results of shear strength tests revealed that the increase of root area ratio within soil influenced on the increase of shear strength of soil, which was related mainly to the change of cohesion. The shear strength tests showed that at the root area ratio in the range 0,11-0,26% the increase of shear strength of soil due to root reinforcement was from 2,7 to 8,6 kPa.*

Key words: *tensile force, hornbeam, root cohesion, reinforcement of soil*

WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych zagadnień z zakresu geotechniki i geologii inżynierskiej stanowi stateczność zboczy. Podstawowym parametrem wpływającym na stateczności pokryw stokowych jest wytrzymałość na ścinanie ośrodka gruntowego. Wśród innych czynników wpływających na stateczność zboczy wymienia się m.in. roślinność, przy czym wpływ ten może być zarówno pozytywny jak i negatywny [Sonnenberg i in. 2010]. Obecność roślinności na zboczach

wpływa na warunki obiegu wody w gruncie powodując zwiększenie jego wodoprzepuszczalności w strefie występowania systemów korzeniowych. Z kolei zapotrzebowania wody przez rośliny do prowadzenia procesów biochemicznych przyczynia się do zmniejszenia wilgotności gruntu w ich sąsiedztwie. Inny rodzaj oddziaływań flory na stateczność zboczy związany jest z ich dodatkowym obciążeniem wynikającym z ciężaru części nadziemnej roślin czy też sił dynamicznych wywieranych przez wiatr na koronę drzew. Istotny wpływ roślin na stateczność zboczy związany jest również z systemem korzeniowym, który pełni rolę tzw. naturalnego zbrojenia gruntu. Korzenie roślinne mają bowiem możliwość przenoszenia naprężeń rozciągających powodującym tym samym wzrost wytrzymałości gruntu na ścinanie, który związany jest przede wszystkim z przyrostem spójności.

Stąd też celem badań było określenie wpływu korzeni grabu na spójność gruntu.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BADANEGO GATUNKU

Grab (*Carpinus betulus* L.) należy do drzew z rodziny leszczynowatych, które osiągają do 20 (25) m wysokości i pierśnicę do 60 cm. Zasięg występowania grabu obejmuje środkową Europę po Pireneje i południe Anglii oraz Skandynawii; występuje **również w Grecji i Włoszech**. Optymalne warunki znajduje w północno-wschodniej części Polski i na Litwie [Jaworski 1995]. Obszar występowania grabu obejmuje głównie tereny nizinne lub podgórskie do wysokości ok. 600 m n.p.m. i dotyczy gleb gliniasto-piaszczystych bogatych w próchnicę. Drzewa te charakteryzują się silnie rozwiniętym sercowym systemem korzeniowym, który cechuje się promieniście rozchodzącymi korzeniami we wszystkich kierunkach. Głębokość korzeni zależy w dużej części od warunków glebowych. W przypadku gleb gliniastych, łąk i gleb szkieletowych grab ukorzenia się płasko, niemniej poszczególne korzenie pionowe mają dużą zdolność wnikania w głąb podłoża. Z kolei na glebach piaszczystych roślina ta rozwija długi i silny korzeń palowy [Tomanek 1997].

W niniejszej pracy do badań wykorzystano korzenie pobrane ze zbocza zlokalizowanego w pobliżu ulicy Nadbrzeżnej w Ciężkowicach woj. małopolskie. Korzenie zostały pobrane z fragmentu zbocza stanowiącego odsłonięcie rynny osuwiska. Zbocze charakteryzuje się dużym nachyleniem (ponad 30°), a jego pokrycie stanowi drzewostan grabowy, okazjonalnie dąb oraz leszczyna.

ZAKRES I METODYKA BADAŃ

W ramach prac terenowych wykonano cztery wkopy badawcze celem wstępnego rozpoznania zasięgu i architektury systemu korzeniowego grabu.

W tym celu wyselekcjonowano jedno drzewo o pierśnicy ok. 10 cm, w którego promieniu wynoszącym 5 m nie występowały inne rośliny. W odległości ok. 0,2–0,5 m powyżej i poniżej drzewa wykonano po dwa wkopy badawcze maksymalnie do głębokości 1,0 m, w których odsłonięto system korzeniowy drzewa. W wykonanych wkopach zinwentaryzowano ilość oraz średnice korzeni w odstępach co 0,1 m. Przy określaniu średnicy korzeni wyróżniono 4 klasy średnic: <2; 2-5; 5-8 oraz powyżej 8 mm, przy czym pominięto korzenie o średnicy mniejszej od 0,5 mm.

Do określenia wpływu korzeni na wytrzymałość gruntu na ścinanie zastosowano dwie metody badań. Pierwsza z nich polegała na określeniu wytrzymałości na rozciąganie korzeni, a następnie „przeliczeniu jej” na wytrzymałość na ścinanie. Badania te wykonano w zrywarce produkcji firmy Hounsfield H50KS, która umożliwia elektroniczny pomiar odkształceń korzenia oraz wielkości siły zrywającej z dokładnością do 0,5 N. Do badań pobrano korzenie z osłonek profilu gruntowego rynien osuwisk, które odcinano, a następnie przewożono do laboratorium. Kilkanaście godzin przed badaniem próbki umieszczano w naczyniu z wodą w celu niedopuszczenia do ich przesuszenia. Następnie korzenie były wyciągane z wody i wycierane, a następnie mocowane w szczękach zrywarki. Do badań wykorzystano próbki korzeni o średnicach nie przekraczających 6 mm i długości ok. 0,20–0,25 m, przy czym odległość pomiędzy szczękami zrywarki wynosiła 0,1 m. Rozciąganie korzeni prowadzono z prędkością 10 mm·min⁻¹ do momentu zerwania korzenia. Po usunięciu korzenia z aparatu mierzono jego średnicą w miejscu zerwania. Na podstawie otrzymanych wyników badań określono zależność siły zrywającej oraz wytrzymałości na rozciąganie korzeni od ich średnic zakładając przekrój kołowy korzeni. Wyniki te wykorzystano do określenia przyrostu wytrzymałości na ścinanie związanej z obecnością korzeni w gruncie.

Najpowszechniej stosowanym modelem opisującym wpływ korzeni na wytrzymałość na ścinanie gruntu jest propozycja Waldrona [1977], gdzie przyrost wytrzymałości gruntu wywołany obecnością korzeni jest tożsamy z przyrostem spójności:

$$c_R = t_R \cdot (\cos \alpha \cdot \tan \phi' + \sin \alpha) \quad (1)$$

gdzie: c_R – spójność wynikła z obecności korzeni w gruncie, t_R – wytrzymałość korzenia na rozciąganie, α – kąt odkształcenia korzenia w strefie poślizgu względem pionu, ϕ' – kąt tarcia wewnętrznego gruntu.

Wu i in. [1979] wykazali, że dla $25^\circ < \phi' < 40^\circ$ oraz $40^\circ < \alpha < 75^\circ$ wartość członu powyższego równania przedstawiona w nawiasie mieści zwykle w stosunkowo wąskim przedziale (1,0-1,3) i może być przyjęta jako równa 1,2. W związku z tym wielkość wpływ systemu korzeniowego na wytrzymałość gruntu na ścinanie (przyrost spójności) zapisywany jest najczęściej następująco:

$$c_R = 1,2 \cdot \sum_{i=1}^n t_R \cdot \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad (2)$$

gdzie: A_R – powierzchnia korzeni w strefie ścięcia, A – powierzchnia ścięcia objęta zasięgiem korzeni, t_R – jw.

Jak wykazały porównania wyników prac terenowych oraz obliczeń teoretycznych m.in. Dockera i Hubble [2008] model Waldrona z reguły zawyża wpływ korzeni na wytrzymałość gruntu na ścinanie, gdyż zakłada, że w momencie zerwania mobilizowane są wszystkie korzenie. Dlatego też coraz częściej do opisu wpływu korzeni na grunt wykorzystano jest tzw. model wiązkowy (Fiber Bundle Model) zakładający progresywny sposób przekazywania naprężeń rozciągających na system korzeniowy. Stąd do obliczeń przyrostu wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami zastosowano jedno z równań podanych w pracy Mao i in. [2012]:

$$c_R = (\cos \alpha \cdot \tan \phi' + \sin \alpha) \cdot \max \left(t_R \cdot j \cdot \frac{A_R}{A} \right) \quad (3)$$

gdzie: t_{Rj} – wytrzymałość na rozciąganie najsłabszego korzenia, A_{Rj} – powierzchnia korzeni w gruncie, j – ilość korzeni w systemie nie zerwanych, α – kąt odkształcenia korzenia w strefie poślizgu względem pionu, ϕ' – kąt tarcia wewnętrznego gruntu, A – powierzchnia przekroju.

Jako kryterium kolejności niszczenia korzeni przyjęto iloczyn wytrzymałości na rozciąganie i kwadratu ich średnic. Zgodnie z tym kryterium korzeń x ulegał zniszczeniu wcześniej niż korzeń y , jeśli był spełniony następujący warunek:

$$t_x \cdot d_x^2 < t_y \cdot d_y^2 \quad (4)$$

gdzie: t_x, t_y – wytrzymałość na rozciąganie odpowiednio korzenia x i y , d_x, d_y – średnica odpowiednio korzenia x i y . Do obliczeń przyjęto, że w trakcie rozciągania mobilizowane są wszystkie korzenie z danego zakresu średnic, a wartość równania w pierwszym członie równania (3) wynosi 1,0. W obliczeniach pominięto korzenie najdrobniejsze (o średnicy mniejszej od 2 mm), gdyż jak wykazały wyniki prac m.in. Adhikari i in. [2013] ze względu na wysoką wytrzymałość na rozciąganie po przeliczeniu za pomocą wzoru (2) mają decydujący wpływ na wyniki obliczeń wytrzymałości na ścinanie, dając nierealne wartości tego parametru. Z drugiej strony, jak pokazują wyniki badań Pollen [2007], korzenie o tak małych średnicach w trakcie mobilizowania naprężeń rozciągających mają zwykle tendencję do wyslizgiwania się z gruntu niż przenoszenia tych naprężeń.

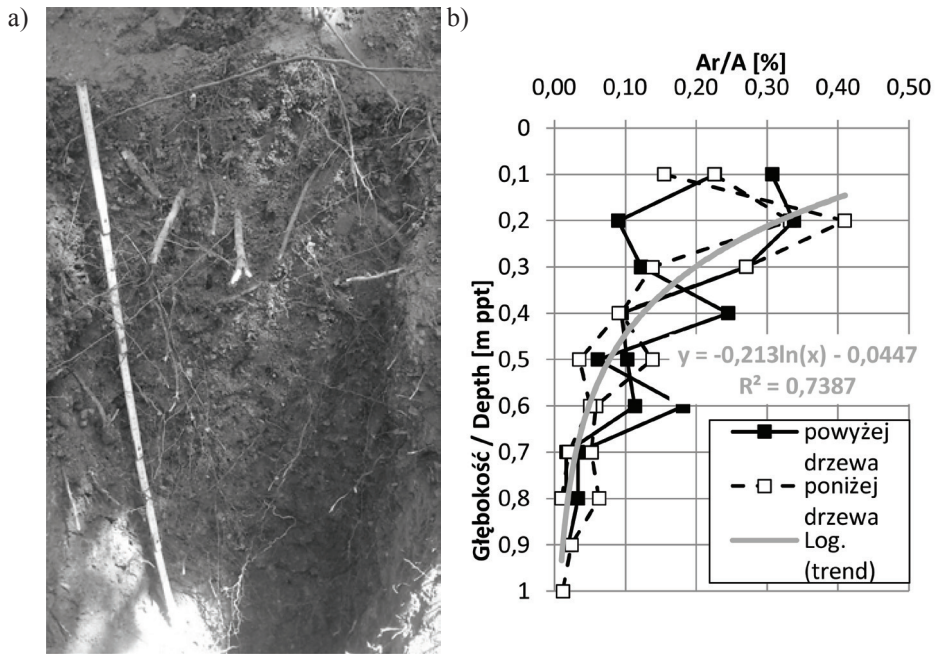
W drugiej części badań przeprowadzono bezpośrednie oznaczenie wytrzymałości na ścinanie gruntu oraz gruntu zbrojonego korzeniami. Badania te wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania o przekroju skrzynki 120 x 120 mm. Materiał gruntowy stanowił równoziarnisty piasek średni, który charakteryzował się wartościami maksymalnej i minimalnej gęstości objętościowej szkieletu odpowiednio 1,81 oraz 1,51 g cm⁻³. Badania wytrzymałości na ścinanie gruntu przeprowadzono na 12 próbkach piasku (3 serie badań) o stopniu zagęszczenia $I_D=0,5$ w stanie powietrzno-suchym. Badania te wykonano na próbkach gruntu bez korzeni oraz zawierających odpowiednio 6 i 10 korzeni grabu zorientowanych prostopadłe względem płaszczyzny przesuwu skrzynki. W trakcie badań dolna część korzeni była zamocowana do płytki oporowej u podstawy skrzynki, natomiast górna część korzenia była wyprowadzona poza górną krawędź aparatu. Podobny sposób zbrojenia gruntu zastosowano w pracy Gray'a i Ohashi [1983]. W każdej serii badań zastosowano wartości naprężeń konsolidacyjnych 6,75; 12,5; 18,75 oraz 25,0 kPa. Czas konsolidacji próbek wynosił 5 minut, a po jej zakończeniu były one ścinane z prędkością 1 mm min⁻¹ do uzyskania przemieszczeń skrzynki co najmniej 16 mm (odkształcenie względne ok. 14,5%). Kryterium ścięcia odpowiadało maksymalnej wartości oporu gruntu na ścinanie. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójność określono metodą najmniejszych kwadratów.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy widok systemu korzeniowego grabu w jednej z odkrywek oraz uśrednione wyniki pomiarów gęstości systemu korzeniowego wybranego drzewa na zboczu w profilach zlokalizowanych powyżej oraz poniżej pnia drzewa. Wyniki pomiarów wykazały, że zasadniczo zasięg głębokościowy występowania korzeni dla analizowanego drzewa wyniósł ponad 1,0 m ppt, przy czym największe gęstość korzeni występowała do głębokości ok. 0,4 m ppt i była ona związana z budową geologiczną terenu. Głębokość ta odpowiadała położeniu stropu zwietrzałych łupków, poniżej których obserwowano, że duża część korzeni była silnie poskręcana. Wyniki pomiarów gęstości systemu korzeniowego w profilu wykazały, że względna powierzchnia korzeni w gruncie (Ar/A – Area Root Ratio) wyniosła maksymalnie 0,4%, a wartość tego parametru generalnie zmniejszała się wraz z głębokością.

Otrzymane wyniki pomiarów powierzchni względnej korzeni są w dużej części zbliżone do wyników badań systemów korzeniowych buka, modrzewia i świerku z regionu Lombardii w północnych Włoszech przedstawionych w pracy Bischettiego i in. [2005]. Z kolei otrzymane wyniki pomiarów powierzchni względnej systemu korzeniowego grabu są wyraźnie mniejsze od wyników badań tego samego gatunku podanych pracy Abdi i in. [2009]. Autorzy ci uzyskali

wartości względnej powierzchni korzeni w gruncie nawet powyżej 1,0%, a wartości tego parametru w powierzchniowej części profilu wynosiły przeciętnie ok. 0,5%. Otrzymane różnice mogą wynikać z kilku przyczyn. Przede wszystkim Abdi i in. (2009) prowadzili badania dla drzew położonych w innej strefie klimatycznej (północy Iran) i innych warunkach siedliskowych (glebowych). Drzewa badane przez wspomnianych autorów charakteryzowały się dużymi wartościami pierśnicy, a zasięg ich korzeni był mniejszy niż uzyskano dla badanego drzewa.

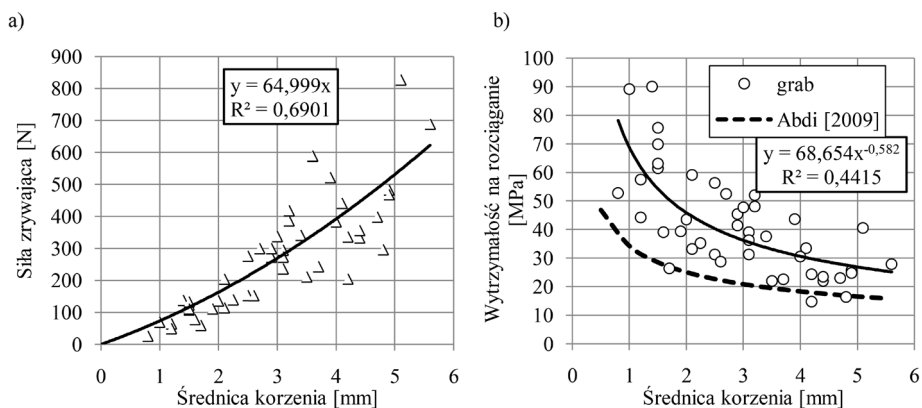


Rysunek 1. Widok systemu korzeniowego grabu w odkrywce (a) oraz wyniki pomiarów względnej powierzchni korzeni w gruncie (b)

Figure 1. View of hornbeam root system in soil profile (a) and results of root area ratio measurements (b)

Na rysunku 2a przedstawiono wyniki pomiarów siły zrywającej w zależności od średnicy korzeni opisanej funkcją wielomianową, która jest standardowo stosowana do opisu związku tych dwóch parametrów. Otrzymana wartość wskaźnika determinacji wskazuje na silny związek pomiędzy obu parametrami. Nieco inaczej przedstawia się zależność wytrzymałości na rozciąganie od średnicy korzeni (rys. 2b), które to parametry są ujemnie skorelowane, co jest typowe dla wielu gatunków roślin [Bischetti i in. 2005, Comino i Marengo 2010, Adhikari i in. 2013]. Ponadto uzyskana wartość współczynnika determinacji jest

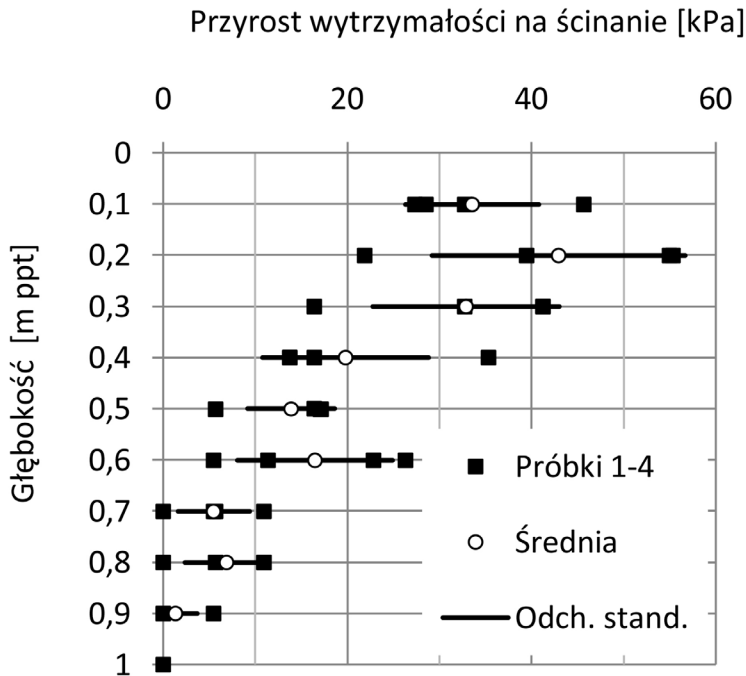
wyraźnie mniejsza niż w przypadku relacji siła zrywająca-średnica korzeni. Podobne zależności przedstawione są również w pracy Preti i Giadrossich [2009] oraz Comino i Marengo [2010]. Zauważalne jest, że wartości wytrzymałości na rozciąganie badanych korzeni są bardzo zróżnicowane i wynoszą od 15 do 90 MPa, niemniej zasadnicza część wartości tego parametru (80%) występuje w przedziale wartości od 20 do 60 MPa, co zawiera się w zakresie wartości podawanym dla korzeni drzew [Donat 1995]. Średnia wartość wytrzymałości na rozciąganie badanych próbek korzeni wyniosła 42,2 MPa przy odchyleniu standardowym 17,8 MPa.



Rysunek 2. Zależność siły zrywającej (a) i wytrzymałości na rozciąganie (b) od średnicy korzenia grabu

Figure 2. Tensile force (a) and root tensile strength (b) vs. root diameter for Hornbeam

Na rysunku 2b przedstawiono również zależność opracowaną dla korzeni grabu przez Abdi i in. [2009], którzy badania prowadzili na materiale pochodzącym z północnej górzystej części Iranu. Zauważalne jest, że otrzymana w tej pracy wytrzymałość na ścinanie korzeni grabu jest znacznie mniejsza niż uzyskano w niniejszej pracy. Z kolei porównując wartości parametrów równania opisującego zależność wytrzymałości na rozciąganie od średnicy badanych korzeni stwierdzono, że są one podobne do wyników otrzymanych dla korzeni buka przedstawionych w pracy Genet i in. [2005], korzeni leszczyny pospolitej [Bischetti i in. 2005], korzeni krzewu z rodzaju łoboda (*Atriplex halimus*) [Mattia i in. 2005] czy też gatunku *Carya cathayensis* z rodziny orzechowatych [Genet i in. 2010]. Należy podkreślić, że wytrzymałość na rozciąganie badanych korzeni grabu jest wyraźnie większa w stosunku do korzeni sosny zwyczajnej [Zydroń i Borusiński 2013], sosny czarnej, świerku, kasztanu jadalnego [Genet in. 2005], wierzby iwa, jesionu czy też olszy zielonej [Bischetti i in. 2005].



Rysunek 3. Teoretyczne wartości przyrostu spójności gruntu zbrojonego korzeniami
Figure 3. Theoretical values of root cohesion

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu oraz gruntu zbrojonego korzeniami grabu

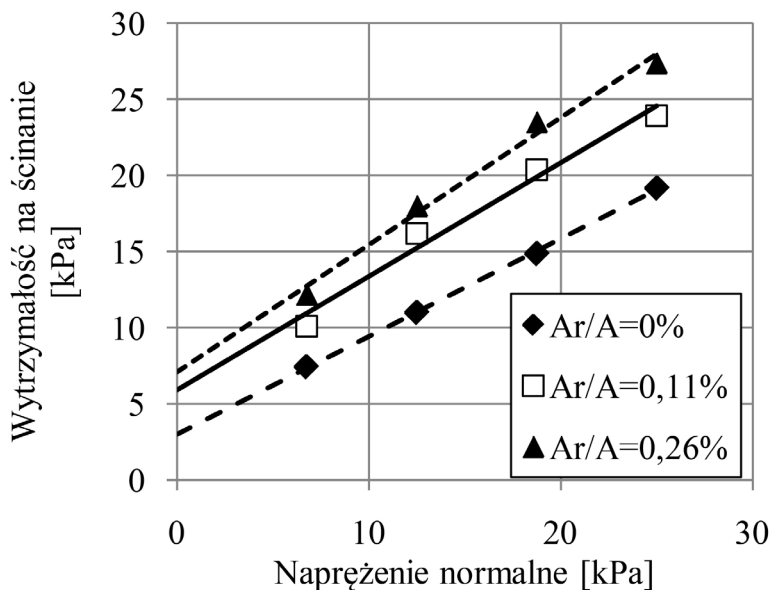
Table 1. Results of shear strength of soil and soil reinforced by Hornbeam

Względna powierzchnia korzeni w strefie ścięcia Root area ratio A_r/A_s , [%]	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction ϕ , [°]	Spójność Cohesion c , [kPa]
0,00	32,7*	3,0*
0,11	36,7	5,9
0,26	39,9	7,1

Objaśnienie/ Explanation: * – wartości przy maksymalnym odkształceniu próbki / ultimate values

Wyniki obliczeń z wykorzystaniem modelu wiązkowego (równania 3-4) wykazały, że maksymalna wartość przyrostu wytrzymałości na ścinanie w przypadku analizowanego systemu korzeniowego wynosi ok. 55 kPa dla strefy ko-

rzenia położonej 0,2 m ppt. Z kolei przyrosty wytrzymałości dla strefy korzeni położonych na głębokości 0,7 m ppt i niżej były znacząco mniejsze, i nie przekraczały zazwyczaj 10 kPa (rys. 3). Otrzymane wyniki obliczeń są bardzo podobne do prezentowanych w cytowanej powyżej pracy Abdi i in. [2010], którzy dla korzeni *Parrotia perisica*, charakteryzujących się podobnym rozkładem powierzchni korzeni do badanego w niniejszej pracy grabu, uzyskali maksymalne wartości przyrostów wytrzymałości na ścinanie przekraczające 60 kPa.



Rysunek 4. Zależność wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami przy różnych wartościach względnej powierzchni korzeni

Figure 4. Relationship of shear strength of reinforced soil by roots vs. root area ratio

W dalszej części pracy przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie dla gruntu oraz gruntu zbrojonego korzeniami, których wyniki zilustrowano na rysunku 4 oraz zestawiono w tabeli 1. Ogólnie wyniki badań wykazały wyraźny wpływ obecności korzeni w gruncie na jego wytrzymałość na ścinanie oraz wartości parametrów ją charakteryzujących. Stwierdzono, że obecność korzeni w gruncie wpłynęła na zwiększenie zarówno wartości kąta tarcia wewnętrznego jak i spójności, przy czym znacząco większy przyrost odnotowano w przypadku drugiego z tych parametrów. Porównanie uzyskanych wartości wytrzymałości na ścinanie gruntu bez oraz ze zbrojeniem wykazało, że względne przyrosty wartości tego parametru wyniosły w 2,7–5,5 oraz 4,8–8,6 kPa, odpowiednio dla względnej powierzchni korzeni w gruncie 0,11 i 0,26%. Otrzymane

wyniki badań są częściowo podobne do rezultatów podanych w pracy Dockera i Hubble [2008]. Autorzy ci na podstawie badań *ex situ* czterech gatunków roślin z Australii o względnej powierzchni korzeni $Ar/A=0,11\%$ oraz $0,26\%$ uzyskali przyrosty wytrzymałości na ścinanie odpowiednio w zakresach 4–19 kPa oraz 9–12 kPa.

Z kolei wyniki obliczeń teoretycznych wykazały, że nawet stosując model wiązkowy obliczony przyrost wytrzymałości na ścinanie (przyrost spójności pozornej) korzeni w gruncie jest co najmniej czterokrotnie zawyżony w stosunku do uzyskanych rezultatów badań. Otrzymane rozbieżności mogą w dużej części z ograniczeń aparaturowych, przede wszystkim z zastosowanego zakresu odkształceń względnych próbki, który wyniósł ok. 14,5%. Taki zakres przesuwu skrzynki powodował, że w końcowej fazie badania następowało wysypywanie się gruntu z górnej ramki aparatu, co powodowało istotne zmniejszenie wartości oporu na ścinanie badanego kompozytu grunt-korzenie. Ponadto zastosowany zakres mógł być zbyt mały, aby w pełni zmobilizować naprężenia rozciągające w obrębie badanych korzeni. W trakcie badań nie stwierdzono bowiem ani zerwania, ani też pełnego wysunięcia korzeni spod płytki ułożonej na podstawie aparatu.

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu systemu korzeniowego grabu na wytrzymałość gruntu na ścinanie z zastosowaniem dwóch standardowych metod badawczych: pośredniej, opierającej się na znajomości wytrzymałości na rozciąganie korzeni i ich liczby w gruncie oraz bezpośredniej, określającej wpływ korzeni na wielkość przyrostu oporu gruntu na ścinanie.

Wyniki badań zrywania wykazały, że korzenie grabu charakteryzują się wysokimi wartościami wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu do innych gatunków drzew występujących w naszym klimacie. Pomiary względnej powierzchni korzeni wykazały, że największy udział korzeni grabu w profilu gruntowym występuje w powierzchniowej strefie do głębokości ok. 0,3 m ppt natomiast na głębokości 1,0 m ppt występują zwykle pojedyncze korzenie. Wyniki teoretycznych obliczeń wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem modelu wiązkowego wykazały, że maksymalny przyrost wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami grabu występuje w przypowierzchniowej warstwie gruntu i wyniósł ok 55 kPa, a w głębiej położonych strefie gruntu zwykle nie przekraczał 10 kPa.

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie potwierdziły mechanizm interakcji korzenie-grunt wykazując, że obecność systemu korzeniowego w profilu gruntowym powoduje zwiększenie jego wytrzymałości na ścinanie. Stwierdzono, że w zakresie względnej powierzchni korzeni w gruncie wynoszącej $Ar/$

A=0,11–0,26% wzrost wytrzymałości na ścinanie wyniósł od 2,7 do 8,6 kPa. Wyniki te wskazują jednocześnie, że system korzeniowy grabu pełni w naturze istotną rolę wzmacniającą powierzchniową warstwę profilu gruntowego.

LITERATURA

- Abdi E., Majnounian B., Rahimi H., Zobeiri M. (2009). *Distribution and tensile strength of Hornbeam (Carpinus betulus) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran*. Journal of Forestry Research, 20(2), 105-110.
- Abdi E., Majnounian B., Genet M., Rahimi H. (2010). *Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (Parrotia Persica) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran*. Ecological Engineering, 36, 409-1416.
- Adhikari A.R., Gautam M.R., Yu Z., Imada S., Acharya K. (2013). *Estimation of root cohesion for desert shrub species in the Lower Colorado riparian ecosystem and its potential for streambank stabilization*. Ecological Engineering, 51, 33-44.
- Bischetti G.B., Chiaradia E.A., Simonato T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A. (2005). *Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)*. Plant and Soil, 278, 11-22.
- Comino E., Marengo P. (2010). *Root tensile strength of three shrub species: Rosa canina, Cotoneaster dammeri and Juniperus horizontalis. Soil reinforcement estimation by laboratory tests*. Catena, 82, 227-235.
- Docker B.B., Hubble T.V.T. (2008). *Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species*. Geomorphology, 100: 401-418.
- Gray D.H., Ohashi H. (1983). *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, 109, 3: 355-353.
- Donat M. (1995). *Bioengineering Techniques for Streambank Restoration. A Review of Central European Practices*. Watershed Restoration Project Report No. 2, British Columbia, ss 86.
- Genet A., Stokes A., Salin F., Mickovski S.B., Fourcaud T., Dumail J-F., van Beek R. (2005). *The influence of cellulose content on tensile strength in the tree roots*. Plant and Soil, 278: 1-9.
- Genet A., Stokes A., Fourcaud T., Norris J.E. (2010). *The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest*. Ecological Engineering, 36, 265-275.
- Jaworski A. (1995). *Charakterystyka hodowlana drzew leśnych*. Gurtenberg, Kraków.
- Mao Z., Saint-Andre L., Genet M., Mine F-X., Jourdan Ch., Rey H., Courbaud B., Stokes A. (2012). *Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models*. Ecological Engineering, 45, 55-69.
- Mattia Ch., Bischetti G.B., Gentile F. (2005). *Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species*. Plant and Soil, 278, 23–32.
- Pollen N. (2007). *Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture*. Catena, 69: 197-205

- Preti F., Giadrossich F. (2009). *Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (Spartium junceum L.)*. Hydrology and Earth System Sciences, 13: 1713-1726.
- Sonnenberg R., Bransby M.F., Hallett P.D., Bengough A.G., Mickovski S.B., Davies M.C.R. (2010). *Centrifuge modeling of soil slopes reinforced with vegetation*. Canadian Geotechnical Journal, 47. 1415-1430.
- Tomanek J. (1997). *Botanika leśna*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne
- Waldron, L.J. (1977). *The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*. Journal of the Soil Science Society of America 41, 843–849.
- Wu, T.H., McKinnell III W.P., Swanston, D.N., (1979). *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska*. Canadian Geotechnical Journal 16, 19–33.
- Zydroń T., Borusiński D. (2013). *Wytrzymałość na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami roślin*. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, 12(1), 147-156.

Dr inż. Tymoteusz Zydroń
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e:mail: t.zydron@ur.krakow.pl