

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE GRUNTU ZBROJONEGO KORZENIAMI ROŚLIN

### SHEAR STRENGTH OF SOIL REINFORCED BY PLANT ROOTS

Tymoteusz Zydróż

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Dawid Borusiński\*

Agro-Trade, Kielce

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu systemu korzeniowego roślin na wytrzymałość gruntu na ścinanie. Badania te wykonano, stosując dwie metody badawcze. W ramach metody pierwszej wykorzystano zaproponowaną przez Wu i in. [1979] teoretyczną zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie korzeni roślinnych a wielkością spójności gruntu zbrojonego. W ramach metody drugiej przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach gruntu zbrojonego korzeniami. W obu metodach do badań użyto próbek korzeni sosny zwyczajnej. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że wartości tej wytrzymałości w przypadku sosny zasadniczo mieściły się w przedziale od 5 do 25 MPa. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami wykazały, że zwiększenie wytrzymałości na ścinanie gruntu związane jest zasadniczo ze wzrostem jego spójności (o 2,9–8 kPa), natomiast zbrojenie gruntu nie powoduje istotnych zmian wartości jego kąta tarcia wewnętrznego. Porównanie wyników z obu metod dowiodło, że wartości przyrostów wytrzymałości na ścinanie określone teoretycznie na podstawie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie korzeni były znacznie zawyżone w stosunku do wyników badań bezpośrednich w aparacie skrzynekowym.

**Abstract.** Results of tests considering the influence of root reinforcement on shear strength of soil are presented in the paper. The tests were performed using two methods. In the first method were used Wu et al. [1979] model, in which the increase of soil shear strength due to presence of roots is calculated using values of tensile strength of roots. In the second

---

\* Adresy do korespondencji – Corresponding Authors: dr inż. Tymoteusz Zydróż, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: t.zydron@ur.krakow.pl.

method were performed tests in direct shear box apparatus for soil reinforced by roots. In both methods for tests were used roots of Scotch pine. The results of tensile tests showed that the tensile strength of Scotch pine are basically in a range from 5 to 25 MPa. The results of the shear strength tests of soil reinforced by roots showed that the increase of the shear strength of the soil due to presence of roots is generally associated with an increase in the cohesion of soil (about 2,9-8 kPa), while the reinforcement of the soils does not cause significant changes in the value of its internal friction angle. Comparison of the results of the two methods showed that the increase of the shear strength estimated theoretically, based on the results of the tensile tests, were much too high in comparison to the results obtained from direct shear test.

**Słowa kluczowe:** wytrzymałość na ścinanie, zbrojenie gruntu przez korzenie

**Key words:** shear strength, root reinforcement

## WSTĘP

Jedno z ważnych zagadnień z zakresu geotechniki stanowi stateczność zboczy naturalnych i sztucznych. Zagadnienie to ma szczególnie istotne znaczenie na terenach charakteryzujących dużymi deniwelacjami (w tym obszar karpacki), w dolinach rzek poddanych erozji bocznej, a także w sąsiedztwie skarp wykopów i nasypów drogowych i kolejowych. Typowym zabiegiem na skarpach, które zostały wzniesione (stworzone) przez człowieka, stosowanym w celu poprawy ich walorów użytkowych jest ich obsiew mieszkami traw. Obecność roślinności na zboczach przyczynia się bowiem do ograniczenia erozji w obrębie powierzchniowych warstw zboczy, a także poprawia ich walory estetyczne. Ponadto występowanie roślinności na zboczach oddziałuje na ich stateczność, przy czym może to być oddziaływanie zarówno pozytywne, jak i negatywne [Najder 2003, Ammann i in. 2009]. Istotny wpływ na stateczność zboczy wywierają korzenie roślinne, które stanowią naturalne kotwienie w gruncie powodując zwiększenie jego wytrzymałości na ścinanie, a z drugiej strony mogą przyczyniać się do zwiększenia przepuszczalności gruntów w powierzchniowych warstwach zboczy. W praktyce inżynierskiej szczególną uwagę poświęca się zagadnieniu wpływu systemów korzeniowych na stateczność zboczy [m.in. Cammeraat i in. 2005, Mattia i in. 2005, Schmidt i in. 2001, Osman i Barakbah 2006, 2011, Mickovski i van Beek 2009, Rickli i Graf 2009]. Jedną z pierwszych prób opisu interakcji grunt–korzenie przedstawiona została w pracy Waldrona [1977], który założył, że korzenie w gruncie zorientowane są pionowo, a ścięcie gruntu (jego przemieszczenie) powoduje mobilizację naprężeń rozciągających w korzeniu. Autor ten przyjął, że naprężenia rozciągające przenoszone przez korzenie stanowią dodatkowy czynnik wpływający na zwiększenie wytrzymałości gruntu na ścinanie, który w teorii Coulomba odpowiada spójności pozornej:

$$\tau = (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi' + c' + c_R \quad (1)$$

gdzie:

- $\tau$  – wytrzymałość gruntu na ścinanie,
- $\sigma$  – naprężenie normalne,
- $u$  – ciśnienie porowe,

$\phi'$  – efektywny kąt tarcia wewnętrznego,  
 $c'$  – spójność efektywna,  
 $c_R$  – spójność pozorna wynikająca z przenoszenia przez korzenie sił rozciągających.

Waldron [1977] opisał opór korzeni w strefie ścięcia następująco:

$$c_R = t_R \cdot (\cos \alpha \cdot \tan \phi' + \sin \alpha) \quad (2)$$

gdzie:

$t_R$  – wytrzymałość korzenia na rozciąganie,  
 $\alpha$  – kąt wychylenia korzenia z pionu, spowodowany jego deformacją w strefie ścięcia.

Wu i in. [1979] wykazali, że w większości przypadków komponent równania zawarty w nawiasie powyższego równania można przyjąć jako równy 1,2. W związku z tym przyrost spójności gruntu wynikający z obecności systemu korzeniowego można określać za pomocą następującego równania:

$$c_R = 1,2 \cdot \sum_{i=1}^n t_{Ri} \cdot \left( \frac{A_{ri}}{A} \right) \quad (3)$$

gdzie:

$A_r$  – powierzchnia korzeni w strefie ścięcia,  
 $A$  – powierzchnia ścięcia.

Powyższa formuła jest dość powszechnie stosowana do określenia wpływu systemów korzeniowych roślin na stateczność zboczy [m.in. Schmidt i in. 2001, Mattia i in. 2005, Mickovski i van Beek 2009], przy czym, jak podkreśla Buryło i in. [2011], zastosowanie tej formuły stanowi duże uproszczenie rzeczywistości. Model Wu [Wu i in. 1979] zakłada bowiem, że w trakcie ścięcia gruntu mobilizowana jest wytrzymałość na rozciąganie całego systemu korzeniowego, co może powodować przeszacowanie wpływu korzeni na stateczność zboczy.

Innym typem badań umożliwiającym określenie wpływu systemów korzeniowych na wytrzymałość gruntu na ścinanie jest metoda bezpośredniego ścinania [m.in. Wu i in. 1988, Mickovski i van Beek 2009, Comino i Druetta 2010]. Metoda ta może być stosowana zarówno w warunkach in-situ, jak i w laboratorium, przy czym istnieją różne jej modyfikacje. Zasadniczą korzyścią tego typu badań jest przede wszystkim możliwość bezpośredniego określenia wpływu korzeni na wytrzymałość gruntu na ścinanie z uwzględnieniem złożonego charakteru interakcji kompozytu grunt–korzenie.

Celem badań w niniejszej pracy było określenie wpływu korzeni sosny (*Pinus sylvestris* L.) na wytrzymałość gruntu na ścinanie. Gatunek ten ze względu na małe wymagania siedliskowe stanowi jeden z najbardziej popularnych gatunków drzew w naszym kraju.

## ZAKRES I METODYKA PRACY

W ramach pracy przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie kilkudziesięciu próbek korzeni oraz wykonano badania wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami sosny w aparacie bezpośredniego ścinania o wymiarach skrzynki  $12 \times 12$  cm.

Badania wytrzymałości na rozciąganie korzeni wykonano w zrywarcie produkcji brytyjskiej firmy Hounsfield H50KS. Przed badaniem korzenie przywiezione z terenu wyczyszczono i umieszczono w naczyniu z wodą w celu ograniczenia ich przesuszenia. Tuż przed rozciąganiem korzenie były wyciągane z wody i wycierane. Następnie umieszczano je w szczękach zrywarki i mocowane za pomocą uchwytów. Długość całkowita próbek wynosiła ok. 20–25 cm, a odległość pomiędzy szczękami zrywarki 10 cm. Rozciąganie korzeni prowadzono z prędkością  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do momentu zerwania korzenia. Po usunięciu korzenia z aparatu mierzono jego średnicę w miejscu zerwania. Na podstawie otrzymanych wyników określono zależność funkcyjną siły zrywającej korzenie od ich średnicy oraz wartości wytrzymałości na rozciąganie, które wykorzystano do określenia przyrostu spójności w gruncie zbrojonym korzeniami.

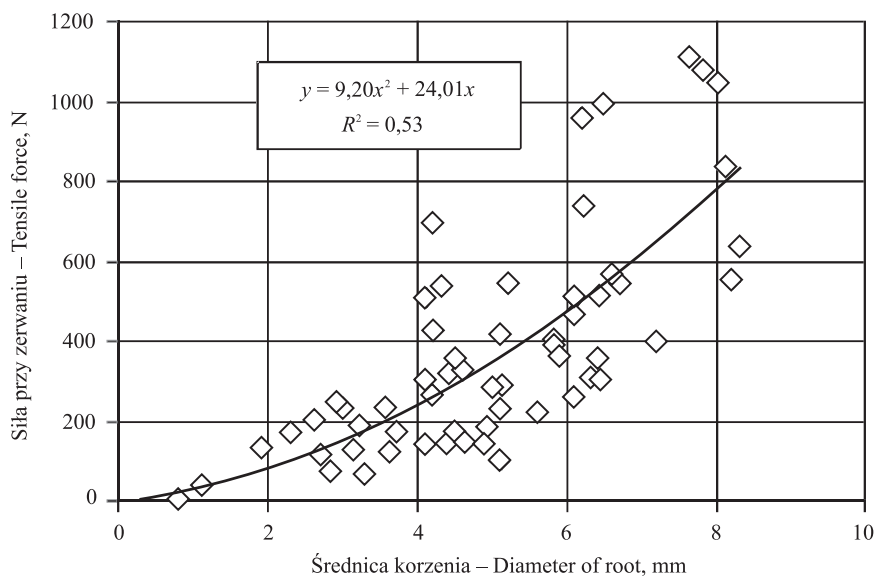
Badania wytrzymałości na ścinanie wykonano dla równoziarnistego piasku średniego ( $C_u = 2,5$ ). Grunt ten charakteryzował się wartościami maksymalnej i minimalnej gęstości objętościowej szkieletu odpowiednio 1,81 oraz  $1,51 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono dla gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 30\%$  (stan luźny) oraz  $I_D = 70\%$  (stan średniozagęszczony), przy czym przy każdym zagęszczeniu badania wykonywano dla gruntu bez korzeni oraz próbek zawierających 7, 14 i 20 korzeni sosny. W trakcie badań dolna część korzeni była zamocowana do płytki oporowej, natomiast górna część była swobodna. Podobną metodę zamontowani zbrojenia w gruncie zastosowano w pracy Gray'a i Ohashi [1983]. W badaniach stosowano wartości naprężeń konsolidacyjnych 12,5, 25,0, 37,5, 50,0, 75,0 i 100,0 kPa. Czas konsolidacji próbek wynosił 5 min, a po jej zakończeniu były one ścinane z prędkością  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do uzyskania przemieszczeń skrzynki co najmniej 17 mm (odkształcenie względne ok. 14,5%). Kryterium ścięcia odpowiadało maksymalnej wartości oporu gruntu na ścinanie. Wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie, tj. kąt tarcia wewnętrznego i spójność określono metodą najmniejszych kwadratów.

## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań rozciągania próbek korzeni sosny wskazują, że istnieje wyraźna zależność pomiędzy wartościami siły zrywającej korzeni a ich średnicą (rys. 1). Zależność ta wyrażona współczynnikiem korelacji wynosi 0,73, co oznacza, że związek pomiędzy obu parametrami jest silny. Należy zwrócić uwagę, że pomimo uzyskania wysokiej wartości współczynnika korelacji uzyskane wartości siły zrywającej przy tej samej średnicy korzenia mieszczą się w bardzo szerokim przedziale. Przykładowo dla korzeni o średnicy 8 mm wartości siły zrywającej mieściły się w zakresie od 580 do ok. 1100 N. W trakcie badań zauważalne było, że mniejsze wartości siły zrywającej otrzymano dla korzeni silnie poskręcanych.

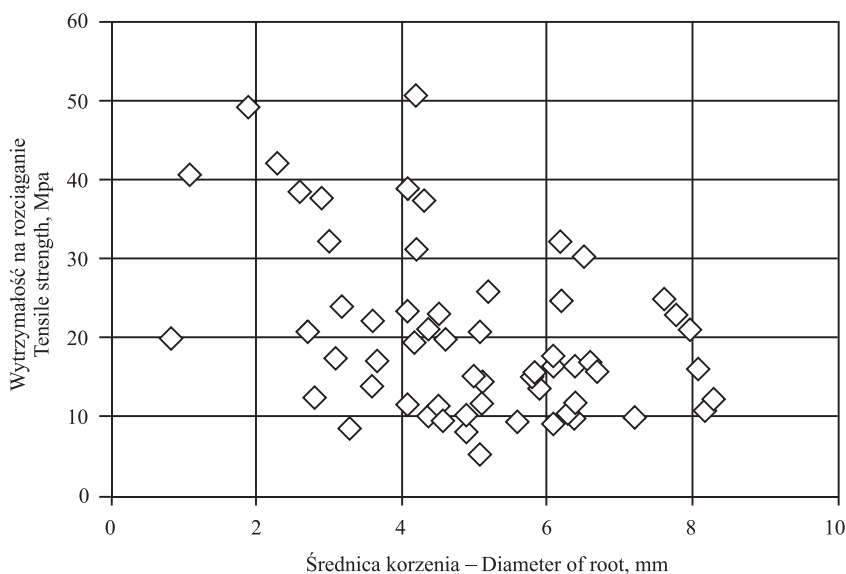
W dalszej części obliczeń wartości siły zrywającej odniesiono do pola powierzchni przekroju korzenia, przyjmując, że korzeń w przekroju ma kształt okrągły. Otrzymane w ten sposób wartości wytrzymałości na rozciąganie mieściły się w przedziale od 5 do 51 MPa (rys. 2), wynosząc średnio 19,9 MPa. Najder [2003] podaje, że typowe wartości wytrzymałości na rozciąganie podawane dla drzew sięgają od 10 do 40 MPa. Z kolei w pracy Mafiana i in. [2009] przedstawione są przykłady gatunków drzew charakteryzujących się większymi wartościami wytrzymałości na rozciąganie, np. korzenie drzewa guaje (*Leucaena leucocephala*) pochodzącego z Meksyku osiągają wytrzymałość na rozciąganie ponad 100 MPa. Z kolei wartości wytrzymałości na rozciąganie podane w wyżej cytowanej pracy dla drzew z rodziny sosnowatych wyniosły 10–33 MPa. Analizując wartości wytrzymałości na rozciąganie badanej próbek sosny można jednak zauważyć, że zasadniczy zakres wartości tego parametru zawiera się w przedziale od 5 do 25 MPa, obejmując 77% uzyskanych wyników. Na podstawie pomierzonych w trakcie badań wielkości wydłużenia korzenia w momencie zerwania próbki oraz obliczeń wytrzymałości na rozciąganie określono dodatkowo wartości modułów Younga, które wyniosły od 48 do 715 MPa, przy czym zasadniczo mieściły się one w przedziale 50–200 MPa. Dla porównania podane w pracy Mafiana i in. [2009] wartości modułów Younga dla topoli i wierzby zamykają się w przedziale 200–300 MPa. Wyniki powyższych badań zostały wykorzystane w dalszej części pracy do określenia wielkości przyrostu spójności gruntu zbrojonego korzeniami roślin.

W ramach dalszych prac przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami sosny metodą bezpośredniego ścinania. Dla określenia wpływu korzeni na wielkości oporu na ścinanie wykonano badania dla gruntu niezbrojonego (bez



Rys. 1. Zależność siły zrywającej od średnicy korzenia dla sosny zwyczajnej

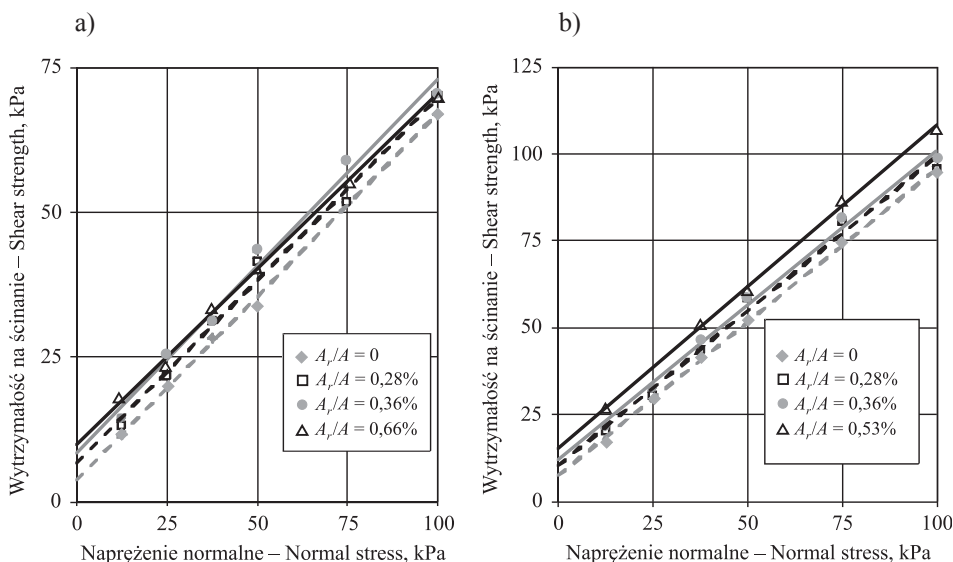
Fig. 1. Tensile force vs root diameter for Scotch pine



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie korzeni sosny od ich średnicy  
 Fig. 2. Relationship between root tensile strength and root diameter for Scotch pine

korzeni) oraz zbrojonego dodatkiem 7, 14 i 20 korzeni. Dla przejrzystości opisu w przypadku każdej próby obliczono stosunek powierzchni korzeni do całkowitej powierzchni ścinania ( $A_r/A$ ). Wyniki badań przedstawione na rysunku 3 wskazują wyraźnie, że obecność korzeni w próbce gruntu wpływa na zwiększenie jego oporu na ścinanie. Wielkość przyrostu wytrzymałości na ścinanie jest proporcjonalna do ilości korzeni w próbce gruntu, natomiast pozostaje praktycznie niezależna od wartości naprężeń normalnych. W przypadku gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 30\%$  wartości wytrzymałości dla próbki gruntu zawierającej 20 korzeni ( $A_r/A = 0,66\%$ ) były o od 3 do 7 kPa większe niż dla gruntu bez korzeni. Z kolei dla gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 70\%$  próbka o zawartości 20 korzeni ( $A_r/A = 0,53\%$ ) uzyskała o od 8 do 13 kPa większe wartości wytrzymałości na ścinanie niż grunt bez zbrojenia. Podobne zależności uzyskali w swej pracy Gray i Ohashi [1983], którzy prowadzili badania wytrzymałości piasku zbrojonego włóknami trzciny, PVC, włókna palmowego oraz drutu miedzianego.

W tabeli 1 oraz na rysunku 4 przedstawiono wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie badanego gruntu tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności w zależności od ilości zbrojenia. Analizując uzyskane wyniki badań można stwierdzić, że wartości kąta tarcia wewnętrznego wykazały istotną zależność od stopnia zagęszczenia, natomiast nie wykazały istotnej zależności od ilości korzeni w próbce (rys. 4). Przykładowo dla gruntu niezawierającego korzeni ( $A_r/A = 0$ ) wzrost jego stopnia zagęszczenia od  $I_D = 30\%$  do  $I_D = 70\%$  wpłynął na zwiększenie wartości kąta tarcia wewnętrznego z  $32,2^\circ$  do  $41,4^\circ$ . Natomiast wartości kąta tarcia dla gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 30\%$  mieściły się w stosunkowo niewielkim przedziale od  $31,2^\circ$  do  $32,8^\circ$ , a w przypadku gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 70\%$  wartości kąta tarcia wewnętrznego wynosiły o  $41,4^\circ$  do  $42,8^\circ$ .



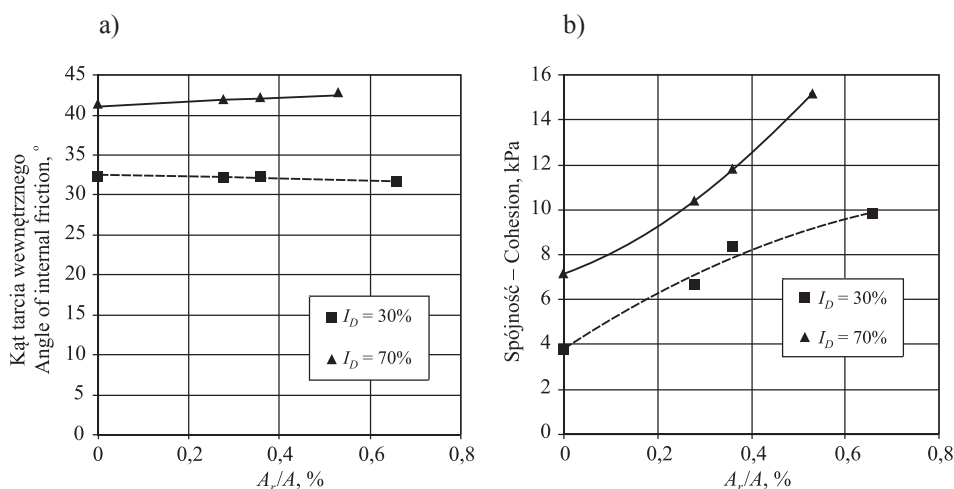
Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami przy stopniu zagęszczenia  $I_D = 0,3$  (a) i  $I_D = 0,7$  (b)

Fig. 3. Relationship of shear strength of reinforced soil by roots obtained at compaction degree  $I_D = 0.3$  (a) i  $I_D = 0.7$  (b)

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami sosny  
Table 1. Results of shear strength of soil reinforced by Scotch pine

Stopień zagęszczenia gruntu Degree of compaction $I_D, \%$	Względna powierzchnia korzeni w strefie ścięcia Root area ratio $A_r/A, \%$	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction $\varphi, ^\circ$	Spójność Cohesion $c, \text{kPa}$
30	0,00	32,2	3,7
	0,28	32,2	6,6
	0,36	32,8	8,4
	0,66	31,2	9,8
70	0,00	41,4	7,2
	0,28	41,6	10,4
	0,36	41,7	11,8
	0,53	42,8	15,2

Z kolei wartości spójności wykazały zależność zarówno od stopnia zagęszczenia, jak i ilości korzeni w próbce gruntu (wyrażonej stosunkiem  $A_r/A$ ). Przy stopniu zagęszczenia gruntu  $I_D = 70\%$  uzyskano o 3,4–3,8 kPa większe wartości spójności w stosunku wyników uzyskanych przy stopniu zagęszczenia  $I_D = 30\%$ .



Rys. 4. Wpływ zbrojenia na wartości kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójności (b) gruntu  
 Fig. 4. Influence of root reinforcement on values of angle of internal friction (a) and cohesion (b) of soil

Nieco większy wpływ na wartości spójności badanego gruntu miała liczba korzeni w próbce. Przy stopniu zagęszczenia gruntu  $I_D = 30\%$  dla próbki zawierającej 20 korzeni ( $A_r/A = 0,66\%$ ) wartość spójności była o 6,1 kPa większa niż dla próbki gruntu bez zbrojenia. Z kolei dla gruntu o stopniu zagęszczenia  $I_D = 70\%$  wartość spójności próbki z 20 korzeniami ( $A_r/A = 0,53\%$ ) była o 8,0 kPa większa niż w przypadku gruntu niezbrojonego. Analizując wielkość przyrostu wartości spójności badanego gruntu, można zauważyć, że jest on proporcjonalny do wzrostu względnej powierzchni zbrojenia w gruncie. Podobna zależność podana jest również w pracy Graya i Ohashi [1983], którzy dla względnej powierzchni zbrojenia  $A_r/A = 0,45\%$  uzyskali przyrost spójności o ok. 4–10 kPa. Zaprezentowane w pracy Mafiana i in. [2009] wyniki badań polowych Wu i in. [1979] dla ziół z rodziny *Conium* wykazały, że w zakresie  $A_r/A = 0,1–0,4\%$  wartości przyrostów spójności wyniosły od 1 do 8 kPa, a więc były bardzo podobne do uzyskanych przez autorów niniejszej pracy.

Podsumowując zatem uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie i ich zależności, można stwierdzić, że są one zgodne z założeniami teoretycznymi podanymi w pracy Wu i in. [1976], które wskazują że system korzeniowy roślin wpływa przede wszystkim na przyrost spójności gruntu. Opierając się na modelu wytrzymałości systemu korzeniowego opisanym równaniem (3), obliczono teoretyczne wartości przyrostu spójności dla analizowanej próbki gruntu. Z obliczeń przeprowadzonych dla próbki gruntu zawierającej 7 korzeni ( $A_r/A = 0,28\%$ ) uzyskano wartość przyrostu spójności równą aż 75 kPa, podczas gdy wyniki badań w aparacie bezpośredniego wykazały przyrosty spójności w zakresie 2,9–3,2 kPa. Rozbieżność ta wynika przede wszystkim z założeń modelu opracowanego przez Wu i in. [1979], który przyjmuje, że w trakcie ścięcia następuje pełna mobilizacja wszystkich korzeni. Założenie to, jak podają m.in. Buryło i in. [2011], prowadzi do przeszacowania wielkości wpływu systemu korzeniowego na roślin



na przyrost spójności gruntu. Świadczą o tym również wyniki kilkunastu prac zestawionych przez Mafiana i in. [2009], które wykazały, że wielkości przyrostu spójności gruntu zbrojonego korzeniami obliczone wzorem (3) wynoszą maksymalnie 30 kPa, a określone na podstawie bezpośrednich badań nie przekraczają wartości 8 kPa. Innym przykładem pracy, w której uzyskano duże wartości przyrostu spójności w gruncie zbrojonym korzeniami roślin, jest publikacja Schmidta i in. [2001]. Autorzy ci, opierając się na równaniu (3), wyliczyli dla korzeni drzew liściastych wielkość przyrostu spójności gruntu wynoszącą w skrajnym przypadku ponad 150 kPa.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu systemu korzeniowego roślin na wytrzymałości na ścinanie gruntu. Badania te wykonano przy użyciu dwu metod stosowanych powszechnie w geoinżynierii. W metodzie pierwszej wykorzystano teoretyczną zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie korzeni roślinnych a wielkością spójności gruntu zbrojonego. W ramach metody drugiej przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach gruntu zbrojonego korzeniami. Do badań w obu metodach wykorzystano próbki korzeni sosny zwyczajnej. Wyniki badań przy obu metodach dowiodły jednoznacznie, że obecność korzeni w gruncie powoduje zwiększenie jego wytrzymałości na ścinanie.

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że wartości sił powodujących zerwanie korzeni sosny o średnicach w przedziale 0,8–8,3 mm wynoszą od 10 do 1115 N, wykazując silną korelację pomiędzy tymi parametrami. Obliczone wartości wytrzymałości na rozciąganie dla wszystkich próbek mieściły się w zakresie 5–54 MPa, przy czym zasadniczo zawierały się one w przedziale od 5 do 25 MPa.

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego korzeniami wykazały, że zwiększenie wytrzymałości na ścinanie gruntu związane jest zasadniczo ze wzrostem spójności gruntu (o 2,9–8 kPa), natomiast zbrojenie gruntu nie powoduje istotnych zmian wartości jego kąta tarcia wewnętrznego. Wzrost wytrzymałości na ścinanie gruntu zbrojonego, wyrażony zwiększeniem spójności, jest zależny od gęstości systemu korzeniowego. Wykazano, że wzrost wytrzymałości na ścinanie jest proporcjonalny do ilości korzeni w gruncie.

Wartości przyrostów wytrzymałości na ścinanie określone teoretycznie na podstawie wyników badań wytrzymałości na rozciąganie korzeni były znacznie zawyżone w stosunku do wyników badań bezpośrednich z aparatu skrzynkowego.

## PIŚMIENNICTWO

- Ammann M., Böll A., Rickli Ch., Speck T., Holdenrieder O., 2009. Significance of tree root decomposition for shallow landslides. *For. Snow Landsc. Res.* 82(1), 79–94.
- Buryło M., Hudek C., Rey F., 2011. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). *Catena* 84, 70–78.
- Cammeraat E., van Beek R., Kooijman A., 2005. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. *Plant Soil* 278, 135–147.

- Comino E., Druetta A., 2010. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment. *Soil Tillage Res.* 106, 194–201.
- Gray D.H., Ohashi H., 1983. Mechanics of fiber reinforcement in sand. *J. Geotech. Engin.* 109(3), 355–353.
- Mafian S., Huat B.B.K., Ghiasi V., 2009. Evaluation on root theories and root strength properties in slope stability. *Eur. J. Sci. Res.* 30(4), 594–607.
- Mattia Ch., Bischetti G.B., Gentile F., 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant Soil* 278, 23–32.
- Mickovski S.B., van Beek L.P.H., 2009. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant Soil* 324, 43–56.
- Najder T., 2003. Wpływ roślinności na zmiany stateczności zboczy. *Inż. Mors. Geotech.* 2, 86–92.
- Osman N., Barakbah S.S., 2006. Parameters to predict slope stability—Soil water and root profiles. *Ecol. Engin.*, 28, 90–95.
- Osman N., Barakbah S.S., 2011. The effect of plant succession on slope stability. *Ecol. Engin.* 37, 139–147.
- Rickli Ch., Graf F., 2009. Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. *For. Snow Landsc. Res.* 82(1), 33–44
- Schmidt K.M., Roering J.J., Stock J.D., Dietrich W.E., Montgomery D.R., Schaub T. 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canad. Geotech. J.* 38, 995–1024.
- Waldron L.J., 1977. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *J. Soil Sci. Soc. Amer.* 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. *Canad. Geotech. J.* 16, 19–33.
- Wu T.H., Beal P.E., Lan C., 1988. In-situ shear test of soil-root systems. *J. Geotech. Engin.* 114(12), 1376–1394.

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2013*