

## WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE ODPADÓW KOMUNALNYCH A STATECZNOŚĆ SKARP SKŁADOWISK

Tymoteusz Zydroń, Mariusz Cholewa

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Piotr Demczuk

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

**Streszczenie.** W pierwszej części pracy dokonano analizy literatury tematycznej dotyczącej parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych. Wykazała ona, że odpady komunalne charakteryzują się bardzo zróżnicowanymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności, które zależą m.in. od ich struktury, stopnia rozkładu, metody badań, w tym zakresu odkształceń. Wpływ tych czynników na wytrzymałość na ścinanie odpadów jest często niejednoznaczny, co powoduje, że dobór parametrów wytrzymałościowych dla prognozowania stateczności składowisk jest zadaniem złożonym. W drugiej części pracy dokonano obliczeń stateczności skarpy kwatery składowiska odpadów komunalnych w Chelmku, wykorzystując wartości parametrów wytrzymałościowych przyjętych z przedmiotowej literatury. Wykazano, że tradycyjna metoda obliczeń stateczności skarpy składowiska, z zastosowaniem uśrednionych parametrów wytrzymałościowych odpadów, dała wysoką wartość współczynnika stateczności, natomiast analiza probabilistyczna wykazała, że bezpieczeństwo konstrukcji można uznać jako sytuujące się pomiędzy słabym, a przeciętnym.

**Słowa kluczowe:** odpady komunalne, wytrzymałość na ścinanie, stateczność skarp, analiza probabilistyczna

---

Adres do korespondencji – Corresponding Authors: dr inż. Tymoteusz Zydroń, dr inż. Mariusz Cholewa, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; mgr inż. Piotr Demczuk, Zakład Geomorfologii, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, al. Kraśnicka 2cd, 20-718 Lublin; e-mail: [t.zydron@ur.krakow.pl](mailto:t.zydron@ur.krakow.pl), [m.cholewa@ur.krakow.pl](mailto:m.cholewa@ur.krakow.pl), [demczuk@poczta.umcs.lublin.pl](mailto:demczuk@poczta.umcs.lublin.pl).

## WSTĘP

Jednym z podstawowych zagadnień z zakresu geotechniki czy też geologii inżynierskiej jest stateczność skarp nasypów i wykopów oraz naturalnych zboczy. Zasadniczo zagadnienie to dotyczy utworów pochodzenia naturalnego (skał, gruntów), ale w niektórych przypadkach zasady mechaniki gruntów są stosowane dla utworów gruntopodobnych, które stanowią m.in. odpady komunalne. Wśród podstawowych czynników decydujących o stateczności skarp wymienia się przede wszystkim wytrzymałość gruntów na ścinanie, która w przypadku gruntów naturalnych określana jest według standardowych procedur badawczych [PKN-CEN ISO/TS 17892-9, PKN-CEN ISO/TS 17892-10] bądź bazuje na opracowanych zależnościach korelacyjnych pomiędzy parametrami wiodącymi gruntów a wartościami parametrów charakteryzujących ich wytrzymałość na ścinanie. W przypadku odpadów komunalnych, które są mieszaniną wielu składników często podatnych na rozkład biologiczny w trakcie eksploatacji składowisk, istnieje problem właściwej oceny ich parametrów wytrzymałościowych. W praktyce są one często dobierane na podstawie dostępnej literatury, co powoduje, że wykonane w oparciu o nie obliczenia stateczności skarp składowisk mogą być obciążone dużą niepewnością. W takim przypadku pomocnym narzędziem oceny bezpieczeństwa wznoszonych budowli mogą być metody probabilistyczne. Stąd też przedmiotem pracy była analiza literatury dotyczącej badań wytrzymałości na ścinanie odpadów komunalnych oraz określenie wpływu niepewności doboru parametrów wytrzymałościowych tych materiałów na wyniki obliczeń stateczności.

## CZYNNIKI WARUNKUJĄCE WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE ODPADÓW KOMUNALNYCH

Wśród czynników wpływających na wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych wymienia się m.in. skład morfologiczny, wilgotność, wiek i stopień ich rozkładu, metodę badań (w tym zakres odkształceń). Według danych zamieszczonych w pracy Garbulewskiego [1999] głównymi składnikami odpadów w naszym kraju są: papier, metale, tekstylia, szkło, tworzywa sztuczne, odpady organiczne zwierzęce i roślinne, odpady palne oraz pozostałość nieorganiczna, przy czym – jak zauważa Sieja [2006] – ich zawartość procentowa jest bardzo zróżnicowana w zależności od charakteru i wielkości jednostki administracyjnej, pełniących funkcji gospodarczo-społecznych oraz standardu życia mieszkańców.

Jedną z pierwszych prac przeglądowych poświęconych właściwościom wytrzymałościowym odpadów komunalnych była publikacja Eid i in. [2000]. Autorzy ci stwierdzili ogólnie, że parametry charakteryzujące wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych są mało zróżnicowane. Podali oni, że efektywne wartości kąta tarcia odpadów wynoszą w przybliżeniu  $35^\circ$ , natomiast wartości spójności mieszczą się w zakresie od 0 do 50 kPa. Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach wzrost świadomości ekologicznej i związany z tym rozwój dziedziny tzw. geotechniki środowiskowej spowodował wzrost zainteresowania odpadami, w tym również badaniami właściwości geotechnicznych odpadów komunalnych, wpływając tym samym na poszerzenie wiedzy na temat tego typu materiałów. W tab. 1 zestawiono wartości parametrów wytrzymałościowych odpadów komunalnych bardzo zróżnicowanych pod względem pochodzenia i zastosowanych metod badawczych.

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe odpadów komunalnych podawane w literaturze  
 Table 1. Shear strength parameters of municipal solid wastes according to various sources

Źródło – Source	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction °	Spójność Cohesion kPa	Uwagi – Notices
Landva i Clark 1986	33–42	16–19	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady zleżałe Direct shear tests, old wastes
Landva i Clark 1990	24	23	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady świeże Direct shear tests, fresh wastes
Jessberger 1994	15–42	0–28	Analiza wsteczna, obserwacje terenowe, dane literaturowe Back analysis, analysis of literature
Del Greco i Oggeri 1993	15,7–23,5	21–22	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Garbulewski 1999	27	53	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Eid i in. 2000	35	38–42	Analiza wsteczna Back analysis
Pelkey i in. 2001	29,4	0	Aparat bezpośredniego ścinania, świeże odpady Direct shear tests, fresh waste
Hossain 2002	27–32	0	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Reddy i in. 2009a	26–30	31–64	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady świeże Direct shear tests, fresh waste
Reddy i in. 2009a	16	38	Badania trójosiowe – parametry efektywne, odpady świeże Triaxial tests – effective parameters, fresh waste
Reddy i in. 2009b	31–35	12–63	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady 1,5-letnie Direct shear tests, 1,5-year-old waste
Reddy i in. 2009b	1–11	18–51	Badania trójosiowe – parametry efektywne, odpady 1,5-letnie Triaxial tests – effective parameters, 1,5-year-old wastes
Kavazanjian i in. 1999	33–59	16–30	Aparat prostego ścinania Simple shear
Gabr i Valero 1995	20–39	0–28	Badania trójosiowe – parametry całkowite, odpady zleżałe (15–30 lat) Triaxial tests, 15–30-year-old wastes

Tabela 1. cd.  
Table 1. cont.

Źródło – Source	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internat friction °	Spójność Cohesion kPa	Uwagi – Notices
Vilar i Carvalho 2005	23–29	39,2–60,7	Badania trójosiowe CD Traxial CD tests
Gabr i in. 2007	24–32	0	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Dixon i in. 2008	34	0	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Singh i in. 2009	35–47	0–8,4	Badania trójosiowe CU Traxial CD tests
Singh i in. 2009	36	14	Aparat bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Reddy in. 2011	35	1	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady świeże częściowo rozłożone Direct shear tests, partly decomposed wastes
Reddy in. 2011	28–34	16–40	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady o różnym stopniu rozkładu Direct shear tests, wastes of various degree of decomposition
Reddy i in. 2011	1–11	18–56	Aparat trójosiowy CU, odpady o różnym stopniu rozkładu Traxial CU tests, wastes of various degree of decomposition
Singh i Fleming 2011	30–41	16–36	Aparat trójosiowy Traxial apparatus
Zhao 2012	14,4–27,8	0–19,9	Badania bezpośredniego ścinania Direct shear tests
Zhao 2012	29–37	35,9–66,4	Badania trójosiowego ściskania Traxial tests
Bareither i in. 2012	31,5–43,9	6,8–25,7	Aparat bezpośredniego ścinania, odpady o zróżnicowanym stopniu rozkładu Direct shear tests, wastes of various degree of biodegradation
Bingjian i in. 2013	9–28,7	5,5–47,9	Badania bezpośredniego ścinania Direct shear tests

Przedstawione dane, będąc częściowo w sprzeczności z wynikami obserwacji Eida i in. [2000], wskazują, że zakresy wartości zarówno kąta tarcia wewnętrznego, jak i spójności mieszczą się w bardzo szerokich przedziałach wartości. Ogólnie można jednak stwierdzić, że odpady komunalne charakteryzują się wysoką wytrzymałością na ścinanie, która prawdopodobnie wynika z interakcji tworzyw sztucznych i innych materiałów [Eid i in. 2000]. Potwierdzeniem tej tezy są wyniki badań Braya i in. [2009] przeprowadzonych na rekonstruowanych próbkach odpadów, które wykazały, że przy orientacji włókien względem płaszczyzny ścinania wynoszącej 60° pikowe wartości oporu na ścinanie są 3–4-krotnie większe w stosunku do wartości uzyskanych przy orientacji włókien wynoszącej 0° (kierunek równoległy względem płaszczyzny ścicia). Z kolei Singh [2013] podaje, że odnotowywana w odpadach spójność, nazywana czasami spójnością pozorną, wynika z efektu ząbienia się różnego rodzaju składników odpadów o zróżnicowanych kształtach.

Wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych jest zmienna w czasie, co związane jest przede wszystkim z ich kompresją oraz rozkładem substancji organicznych. Jessberger i Kockel [1991, za: Garbulewski 1999] twierdzą, że w wyniku rozkładu odpadów następuje zmniejszenie wartości kąta tarcia wewnętrznego, co może być spowodowane przyrostem zawartości drobnych cząstek. Z kolei wyniki badań Zhana i in. [2008] odpadów z jednego ze składowisk w Chinach wykazały, że wytrzymałość odpadów na ścinanie przy naprężeniach normalnych większych od 50 kPa zwiększa się wraz z ich wiekiem, co związane jest ze wzrostem wartości kąta tarcia wewnętrznego, a zmniejszeniem spójności. Podobne zależności przedstawione są częściowo w pracach zespołu Reddy [Reddy i in. 2009a, Reddy i in. 2011]. Należy tu jednak zwrócić uwagę, że część wyników badań podanych w tych samych publikacjach [Reddy i in. 2009a, Reddy i in. 2011] otrzymanych dla tych samych odpadów, ale badanych innymi metodami, wykazała brak wyraźnej zależności pomiędzy parametrami wytrzymałości na ścinanie a biodegradacją odpadów czy też czasem ich składowania. Autorzy tych publikacji zwracają uwagę, że niejednoznaczny wpływ czasu składowania odpadów na zmianę ich właściwości mechanicznych wynika zwykle z tego, że wyjściowy skład odpadów poddawanych analizom różni się strukturą. Analiza wyników badań własnych oraz danych literaturowych przeprowadzona przez Bareithera i in. [2012] wykazała, że obecność składników gruntopodobnych, żwiru, szkła i metalu przyczynia się do zwiększenia wartości kąta tarcia wewnętrznego odpadów. Z kolei obecność w odpadach składników palnych, takich jak papier, kartony, tworzywa sztuczne, drewno i tekstylia, powoduje zmniejszenie wartości kąta tarcia wewnętrznego.

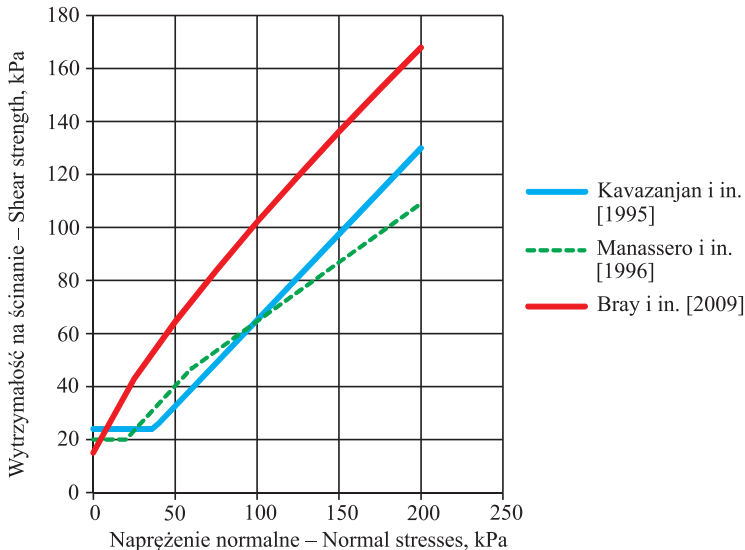
W przypadku badań gruntów mineralnych podstawowymi czynnikami warunkującymi ich wytrzymałość na ścinanie są wilgotność oraz zagęszczenie. W przypadku odpadów komunalnych wpływ obu czynników na parametry wytrzymałościowe, podobnie jak przy określaniu wpływu czasu składowania odpadów, jest niejednoznaczny. Z jednej strony wyniki badań Braya i in. [2009] wskazują, że im większe zagęszczenie odpadów, tym większa ich wytrzymałość. Z kolei zależności tej nie potwierdzają wyniki badań Vilara i Carvalho [2005]. Podobnie niejednoznaczne wyniki badań wpływu wilgotności na wytrzymałość na ścinanie odpadów opisywane są m.in. w pracach Bareithera i in. [2012], Reddy i in. [2009a, 2011].

Ważnym czynnikiem determinującym ocenę wytrzymałości na ścinanie odpadów komunalnych jest zakres odkształceń, jakim poddawane są próbki w trakcie badań [m.in.

Jessberger i Kockel 1991, Vilar i Carvalho 2005, Zhan i in. 2008, Reddy i in. 2009b, Bingjian i in. 2013]. Najczęściej charakter zniszczenia próbek odpadów odpowiada ścięciu plastycznemu, co związane jest z dużą ściśliwością tego typu materiału występującą w trakcie jego ścinania, a tym samym wpływa na jego wzmocnienie, prowadząc jednocześnie do uzyskiwania większych wartości oporu na ścinanie.

Ważnym problemem przy ocenie właściwości wytrzymałościowych odpadów komunalnych jest interpretacja wyników badań. Najczęściej stosuje się liniowe równanie Coulomba, natomiast metoda ta nie zawsze daje zadowalające rezultaty. Wyniki badań Kōelscha [2009] wykazały, że stosując liniową interpretację prawa Columba, uzyskuje się w pewnych przypadkach ujemne wartości spójności odpadów. Stąd też przy opisie zależności wytrzymałości na ścinanie odpadów od naprężeń normalnych można spotkać przykłady funkcji nieliniowych, których przykłady przedstawiono na ryc. 1. Jedną z nich zaproponowali Kavazanjan i in. [1995], którzy założyli, że dla naprężeń normalnych mniejszych od 30 kPa odpady zachowują się jak utwory spoisłe, których wytrzymałość na ścinanie można opisać jedynie spójnością  $c = 24$  kPa. Z kolei przy większych wartościach naprężeń odpady zachowują się jak grunt ziarnisty, którego wytrzymałość charakteryzuje jedynie kąt tarcia wewnętrznego  $\phi = 33^\circ$ . Nieco inny sposób opisu wytrzymałości na ścinanie podany jest w pracy Manassero i in. [1996], którzy wyróżnili trzy przedziały charakterystyki wytrzymałościowej odpadów:

- dla naprężenia normalnego  $\sigma \leq 20$  kPa odpady zachowują się jak grunty spoisłe i można je scharakteryzować poprzez spójność  $c = 20$  kPa,
- przy wartości naprężeń normalnych  $20 < \sigma \leq 60$  kPa odpady można scharakteryzować jako utwory ziarniste z kątem tarcia wewnętrznego  $\phi = 38^\circ$ ,
- dla naprężeń normalnych  $\sigma > 60$  kPa,  $\phi = 38^\circ$ , a  $c = 20$  kPa.



Ryc. 1. Propozycje nieliniowego opisu wytrzymałości na ścinanie odpadów komunalnych  
Fig. 1. Non-linear characteristics of shear strength of municipal solid wastes

Z kolei Bray i in. [2009], korzystając z zależności przedstawionej w pracy Duncan i Wright [2005], zaproponowali następującą funkcję nieliniową:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi_{\sigma}) \quad (1)$$

gdzie:

$$\operatorname{tg}(\phi_{\sigma}) = \phi_0 - \Delta\phi \cdot \log\left(\frac{\sigma}{p_a}\right) \quad (2)$$

$\phi_0$  – kąt tarcia wewnętrznego określony przy naprężeniu normalnym równym 1 atm ( $\phi_0 = 41^\circ$ ),

$\Delta\phi$  – zmiana kąta tarcia wewnętrznego przy zmianie naprężenia normalnego ( $\Delta\phi = 12^\circ$ ),

$p_a$  – ciśnienie atmosferyczne,

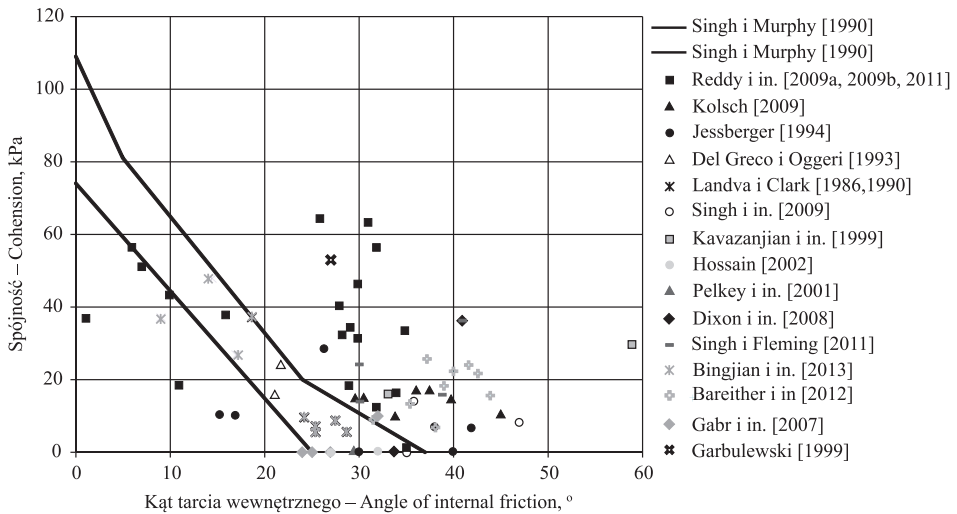
$c$  – spójność ( $c = 15$  kPa).

Biorąc pod uwagę podane powyżej informacje, można stwierdzić, że dobór parametrów wytrzymałościowych odpadów komunalnych do analiz stateczności jest trudny, a w przypadku braku bezpośrednich badań obarczony jest dużą niepewnością. W tab. 2 przedstawiono przykładowe wartości parametrów wytrzymałościowych zalecane przez różne instytucje do celów projektowych. Z kolei na ryc. 2 porównano wyniki oznaczeń parametrów wytrzymałościowych odpadów komunalnych zestawionych w tab. 1 z zaleceniami podanymi w pracy Singha i Murphy'ego [1990]. Z zestawienia tego wynika, że generalnie większość par parametrów wytrzymałościowych jest powyżej lub w obszarze wartości rekomendowanych przez Singha i Murphy'ego. Z kolei wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności znajdujące się poniżej wartości zalecanych pochodzą w większości z badań Reddy i in. [2009b] przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu (CU). Autorzy tych badań podkreślają jednak, że tego typu badania odzwierciedlają możliwie najmniej korzystne warunki, które mogą wystąpić jedynie w przypadku stałego występowania i gromadzenia się odcieków na składowisku.

Przedstawione w powyższej części pracy wyniki oznaczeń parametrów charakteryzujących wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych zestawiono w postaci histogramów uwzględniających liczebność prób w wybranych przedziałach wartości (ryc. 3). Na rycinie pomięto część wyników badań z pracy Reddy i in. [2009b] uzyskanych metodą trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu. Otrzymane rozkłady liczebności wartości obu parametrów wytrzymałości na ścinanie wskazują, że rozkład wartości kąta tarcia wewnętrznego jest bardzo zbliżony do rozkładu normalnego, a w przypadku spójności odpowiada rozkładowi wykładniczemu.

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe odpadów komunalnych zalecane dla celów projektowych  
 Table 2. Shear strength parameters of municipal solid wastes recommended for project's purposes

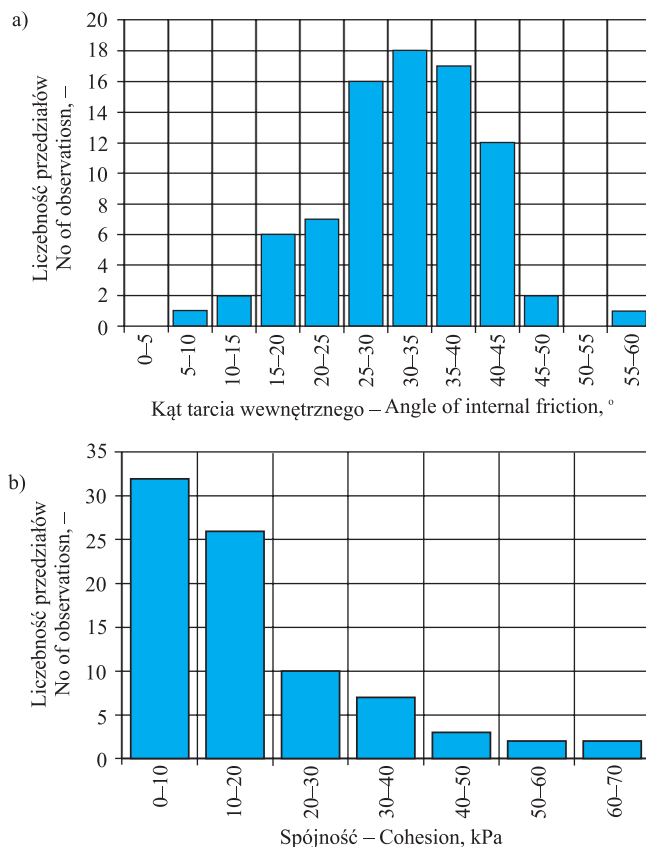
Rodzaj zaleceń – Type of recommendations		Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction	Spójność Cohesion kPa
Niemcy Germany [Köelsch 2009]	Odpady nie poddane obróbce (świeże) Untreated municipal solid wastes	25–30	< 10
	Odpady poddane obróbce mechaniczno- -biologicznej Mechanical-biological treated wastes	30–35	< 10
Solid Waste Association of North America (SWANA) [McCready i Law 2010]		33	0
SCS Engineers [McCready i Law 2010]		32	12
Environmental Protection Agency (EPA) [McCready i Law 2010]		31	9,5
ITB – Building Research Institute [Wysokiński 2009]		25/12,5	10



Ryc. 2. Wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego odpadów komunalnych w świetle danych literaturowych

Fig. 2. Values of cohesion and angle of internal friction of municipal solid wastes according to various sources





Ryc. 3. Rozkład wartości kąta tarcia wewnętrznego (a) i spójności (b) odpadów komunalnych  
 Fig. 3. Distribution of angle of internal friction (a) and cohesion (b) of municipal solid wastes

## OBLICZENIA STATECZNOŚCI SKARPY WYBRANEGO SKŁADOWISKA

Dla zobrazowania wpływu parametrów geotechnicznych na stateczność budowli wznoszonych z odpadów komunalnych poddano analizie skarpe składowiska odpadów komunalnych w miejscowości Chelmek. Obiekt ten jest składowiskiem nadpoziomowym składającym się z pięciu kwater, których wierzchożyna docelowo wznosi się na ok. 4–5 m ponad powierzchnię terenu. Składowisko to jest w chwili obecnej zamknięte i podlega rekultywacji. Podłoże składowiska stanowią utwory czwartorzędowe reprezentowane przez piaski drobne z lokalnymi soczewkami utworów organicznych zalegające do głębokości 5 m p.p.t., a pod nimi zalegają utwory trzeciorzędowe, które stanowią ily pylaste w stanie twardoplastycznym i półzwarłym o miąższości ok. 70 m. Poziom wody gruntowej kształtuje się w zakresie 0–1,8 m p.p.t. [Z.W.O.Ś. 2003]. W ramach rekultywacji technicznej powierzchni kwatery II składowiska przewidziano wyrównanie ostatniej warstwy odpadów, przykrycie jej warstwą gliny o grubości 0,35 m, a następnie ułożenie warstwy ziemi urodzajnej o grubości 0,15 m. Górna powierzchnia kwatery będzie

ukształtowana ze spadkiem 1% na zewnątrz składowiska, a skarpy tej nadpoziomowej kwatery będą posiadały nachylenie 1:1.

Analiza stateczności skarp [Cholewa 2012] wykonana przy założeniu stałych wartości parametrów wytrzymałościowych odpadów komunalnych dobranych na podstawie Wytycznych ITB [Wysokiński 2009] wykazała, że w typowych warunkach eksploatacyjnych współczynnik bezpieczeństwa wynosi ponad 1,25, co oznacza, że prawdopodobieństwo powstania zsuwu skarpy jest mało prawdopodobne.

W niniejszej pracy przy doborze parametrów do obliczeń stateczności wykorzystano częściowo parametry wytrzymałościowe gruntów mineralnych przyjętych w pracy Cholewy [2012], które zestawiono w tab. 3. Natomiast charakterystykę wytrzymałościową odpadów komunalnych przyjęto na podstawie danych zestawionych w tab. 1, a schemat obliczeniowy skarpy przedstawiono na ryc. 4. Obliczone dla tego zbioru wartości średniej arytmetycznej kąta tarcia wewnętrznego i spójności wyniosły odpowiednio 31,7° i 16,6 kPa, a odchylenie standardowe tych parametrów 8,7° oraz 15,2 kPa. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu Geo-Slope, stosując metody Felleniusa, Bishopa oraz Janbu. Zakładając, że parametry wytrzymałości na ścinanie odpadów komunalnych są zmiennymi losowymi, jako miarę bezpieczeństwa skarpy przyjęto prawdopodobieństwo utraty stateczności według następującej definicji:

$$p_f = P[FS \leq 1,0] = \int_{-\infty}^1 f(FS) dFS \quad (3)$$

gdzie:

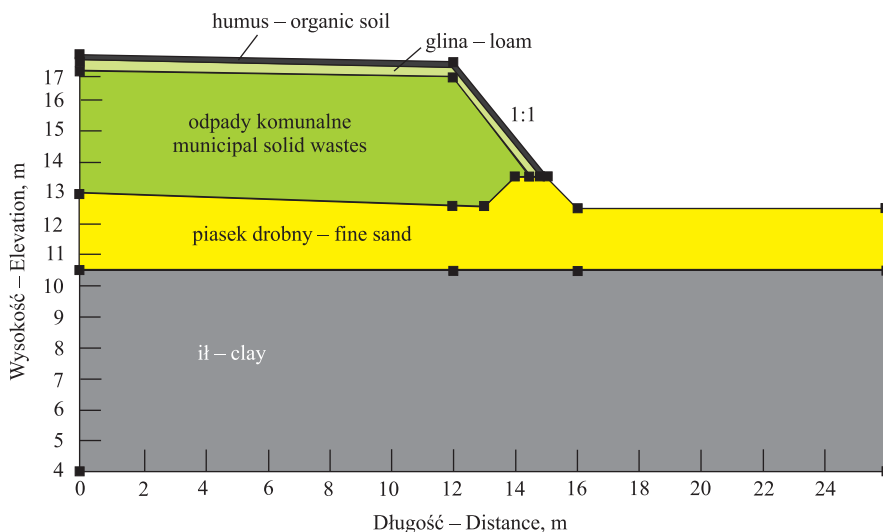
FS – współczynnik stateczności.

Tabela 3. Dobór parametrów do obliczeń stateczności składowiska w Chełmku [Cholewa 2012 – zmodyfikowane]

Table 3. Geotechnical parameters of materials of sanitary landfill in Chełmek [Cholewa 2012 modified]

Rodzaj gruntu Type of soil	Stopień plastyczności/ zagęszczenia Liquididity index/Degree of compaction $I_L/I_D$	Gęstość objętościowa Bulk density, $\rho$ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction, °	Kohezja Cohesion, kPa	Lokalizacja warstwy Localization of soil layer
Humus – Organic soil*	–	1760	3,2	13,0	Warstwa rekultywacyjna Reclamation layer
Gлина – Loam (siCl)	0,20	1950	14,7	16,0	Uszczelnienie korony składowiska Sealing of sanitary landfill
Piasek drobny – Fine sand (FSa)	0,20	1700	29,0	0,0	Podłoże Base of landfill
И – Clay (Cl)	0,25	1950	14,0	15,0	Podłoże Base of landfill

\* parametry dobrane na podstawie Cała i Olesiak [2007] – geotechnical parameters taken from Cała and Olesiak [2007]

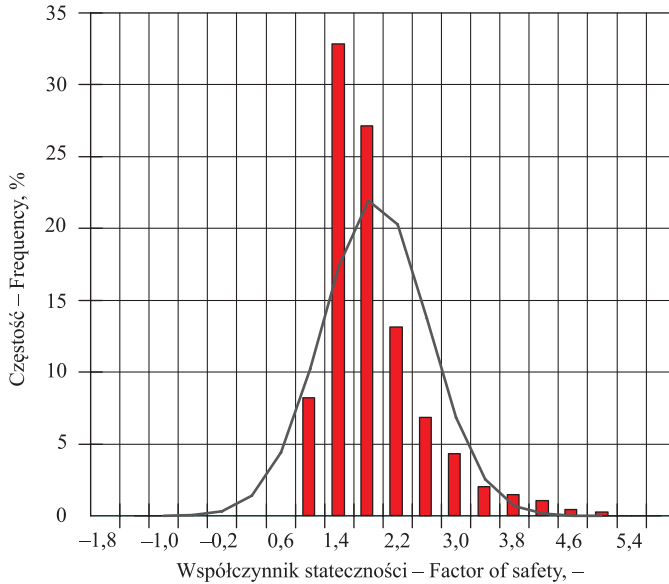


Ryc. 4. Schemat obliczeniowy skarpy składowiska odpadów komunalnych w Chełmku  
 Fig. 4. Scheme of sanitary landfill in Chełmek

Wyniki obliczeń zestawiono zbiorczo w tab. 4 oraz częściowo zilustrowano na ryc. 5. Ogólnie można stwierdzić, że średnie wartości współczynników stateczności są wysokie i w zależności od metody obliczeniowej wynoszą 1,74–1,90. Z kolei minimalne wartości tego parametru wyniosły poniżej 1,0, wskazując na możliwość utraty stateczności skarpy. Prawdopodobieństwo awarii skarpy wyniosło w zakresie 0,5–2,8%, wskazując zgodnie z wytycznymi korpusu inżynierów armii amerykańskiej [1999], że bezpieczeństwo konstrukcji jest pomiędzy słabym a powyżej przeciętnej. Z kolei wartość wskaźnika bezpieczeństwa, określającego standardowe odchylenie współczynnika stateczności od jego granicznej wartości (1,0), wynosi 1,15–2,04, co oznacza, że bezpieczeństwo konstrukcji jest pomiędzy słabym a poniżej przeciętnej.

Tabela 4. Wyniki obliczeń stateczności skarpy składowiska odpadów komunalnych  
 Table 4. Slope stability calculation results for slope of sanitary landfill

Parametry – Parameters		Metoda obliczeń – Calculation method		
		Fellenius	Bishop	Janbu
Współczynnik stateczności Factor of stability	Średnia – Mean	1,97	1,90	1,74
	Wartość minimalna Minimum value	0,69	0,74	0,81
	Wartość maksymalna Maximum value	6,03	5,35	3,14
	Odchylenie standardowe Standard dev.	0,841	0,721	0,364
Prawdopodobieństwo utraty stateczności Probability of failure, %		2,75	1,35	0,5158
Wskaźnik bezpieczeństwa – Reliability index		1,153	1,244	2,038



Ryc. 5. Rozkład wartości współczynnika stateczności obliczonych metodą Bishopa dla skarpy składowiska odpadów komunalnych

Fig. 5. Distribution of safety factor determined by Bishop method of analyzed slope of sanitary landfill

## PODSUMOWANIE

Analiza dostępnej literatury wykazała, że odpady komunalne cechują się bardzo zróżnicowanymi wartościami parametrów charakteryzującymi ich wytrzymałość na ścinanie, które zależne są od szeregu czynników. Istotny wpływ na wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójność odpadów komunalnych ma przede wszystkim ich struktura, stopień rozkładu, metoda badań, w tym m.in. zakres odkształceń. Przytoczone w niniejszej pracy przykładowe wyniki badań wskazują, że wpływ wyżej wymienionych czynników na wytrzymałość na ścinanie odpadów nie jest jednoznaczny, co powoduje, że dobór parametrów wytrzymałościowych dla prognozowania stateczności składowisk jest zadaniem złożonym i trudnym.

Biorąc pod uwagę, że w praktyce ocena stateczności skarp składowisk odpadów komunalnych wykonywana jest na podstawie parametrów geotechnicznych przyjmowanych na podstawie literatury wydaje się, że standardowa analiza stateczności bazująca na wartości współczynnika stateczności jest obarczona dużą niepewnością. W związku z tym uzasadniona wydaje się potrzeba wykonywania analizy probabilistycznej, która uwzględnia niepewność doboru parametrów obliczeniowych w analizie. Przedstawiona w pracy analiza stateczności skarpy jednej z kwater składowiska w Chełmku wykazała, że współczynnik stateczności określony jedną z metod równowagi granicznej dla uśrednionych wartości parametrów wytrzymałościowych odpadów komunalnych jest wysoki (1,90), spełniając wymogi techniczne stawiane tego typu konstrukcjom. Z kolei mini-

malna jego wartość wyniosła już tylko 0,74, a prawdopodobieństwo utraty stateczności skarpy wyniosło 1,35%, co oznacza, że poziom jej bezpieczeństwa jest pomiędzy słabym, a poniżej przeciętnej. Zatem wyniki te wskazują, że projektowana skarpa jest zbyt stroma, aby zagwarantować odpowiedni z punktu widzenia potrzeb inżynierskich poziom bezpieczeństwa.

## PIŚMIENNICTWO

- Bareither, C.A., Benson, C.H., Edil, T.B. (2012). Effects of waste composition and decomposition on the shear strength of municipal solid waste. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 138, 10, 1161–1174.
- Bingjian, Z., Zhanhong, Q., Hao, X., Chunmu, H., Helong, C. (2013). Effect of Water Content on the Shear Strength Parameters of Municipal Solid. *Electr. J. Geotech. Engin.*, 18, 1181–1188.
- Bray, J.D., Zekkos, D., Kavazanjian, E.Jr., Athanasopoulos, G.A., Riemer, M.F. (2009). Shear Strength of Municipal Solid Waste. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 135, 6, 709–722.
- Cała, M., Olesiak, S. (2007). Analiza stateczności zboczy drugiej kwatery Nowego składowiska odpadów komunalnych w Zakopanem. *Górn. Geoinż.*, 31, 3, 57–69.
- Cholewa, M. (2012). Składowisko odpadów komunalnych w Chełmku – analiza stateczności skarpy przy zmiennych warunkach geotechnicznych. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2/IV, 117–127.
- Del, Greco, O., Oggeri, C. (1993). Geotechnical parameters of sanitary wastes. *Proceedings Sardinia '93. Fourth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy*, 1421–1431.
- Dixon N., Langer U., Gotteland P. (2008). Classification and mechanical behavior relationships for municipal solid waste: study using synthetic wastes. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 134(1), 79–90.
- Duncan, J.M., Wright, S.G. (2005). *Soil strength and slope stability*. Wiley, Hoboken, New York.
- Eid, H., Stark, T.D., Evans, W.D., Sherry, P.E. (2000). Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 126, 5, 397–407.
- Gabr, M.A., Valero, S.N. (1995). Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotech. Testing J., ASTM*, 18, 241–251.
- Gabr, M.A., Hossain, M.S., Barlaz, M.A. (2007). Shear strength parameters of municipal waste with leachate recirculation. *J. Geotech. Geoenviron. Engin.*, 133, 4, 478–484.
- Garbulewski, K. (1999). *Geotechnika środowiskowa. Zeszyt I. Skład i geotechniczne właściwości odpadów komunalnych*. Wydawnictwo SGGW, 56.
- Hossain, S. (2002). *Mechanics of compressibility and strength of solid waste in bioreactor landfills*. North Carolina State University, Department of Civil Engineering, 183.
- Jessberger, H.L. (1994). Geotechnical aspects of landfill design and construction, Part 2: Materials parameters and test methods. *Institution of Civil Engineers Geotech. Engin. J.*, 107, 105–113.
- Jessberger, H.L., Kockel, R. (1991). Mechanical properties of waste materials. *Proc. of the XV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino*, 1–40.
- Kavazanjian, E. Jr., Matasovic, N., Bachus, R.C. (1999). Large diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste. *Proc., Sardinia '99 7th Int. Waste Management and Landfill Symp.*, 3, 437–444.
- Köelsch, F. (2009). Shear strength of waste. *Third International Workshop "Hydo-Physico-Mechanics of Landfills"*, Braunschweig, Germany, 10–13 March, 1–10.
- Landva, A., Clark, J.I. (1986). Geotechnical testing of waste fill. *Proceedings of Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario*, 371–385.
- Landva, A., Clark, J.I. (1990). Geotechnics of waste fills. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070*, 86–106.

- Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A. (1996). Waste disposal and containment. [W:] Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, 3, 1425–1474.
- McCready, A.A., Law, H.J. (2010). Solving the landfill puzzle. Proceedings of SWANA, Wastecon, 1–5
- PKN-CEN ISO/TS 17892-9: 2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 9: Badania gruntów w aparacie trójosiowego ściskania po nasyceniu wodą. PKN, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10: 2009. Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 10: Badania w aparacie bezpośredniego ścinania. PKN, Warszawa.
- Pelkey, S.A., Valsangkar, A.J., Landva, A. (2001). Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituents. *Geotechnical Testing Journal*, 24(4), 381–390.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J.E. (2009a). Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill. *Waste Manag.*, 29, 952–959.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Parakalla, N.S., Bogner, J.E., Lagier, T. (2009b). Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. *Waste Manag. Res.*, 27, 578–587.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J.E. (2011). Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. *Waste Manag.*, 31, 2275–2286.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów Dz.U. z 2003 r. Nr 61, poz. 549 ze zm.
- Sieja, L. (2006). Charakterystyka odpadów komunalnych na podstawie badań w wybranych miastach Polski. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 1, 28(1).
- Singh, S. (2013). A new approach for characterizing shear strength of municipal solid waste for land fill design. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 3072–3075.
- Singh, S., Murphy, B.J. (1990). Evaluation of the stability of sanitary landfills. *Geotechnics of waste fills: Theory and Practice*, ASTM STP 1070 1070, Landva A and Knowles G.D. (Eds.) Philadelphia: ASTM, 240–258.
- Singh, M.K., Sharma, J.S., Fleming, I.R. (2009). Shear strength testing of intact and recompacted samples of municipal solid waste. *Canad. Geotech. J.*, 46, 1133–1145.
- Singh, M.K., Fleming, I.R. (2011). Application of a hyperbolic model to municipal solid waste. *Geotechnique*, 61, 7, 533–554.
- U.S. Army Corps of Engineers (1999). Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies, engineering and design, Rep. No. 20314-1000, Dep. of Army, Washington, D.C.
- Vilar, O.M., Carvalho, M.F. (2005). Shear strength and consolidation properties of municipal solid waste. International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills", Grenoble, France, 21–22 March 2005, 1–4.
- Wysokiński, L. (2009). *Zasady budowy składowisk odpadów*. ITB, Warszawa, 376.
- Zhao, Y. (2012). Shear strength and creep settlement properties of municipal solid waste at the Chong Qing Landfill, China. *Environmental Science and Technology*, <http://www.paper.edu.cn>, 1–19.
- Z.W.O.Ś. „WASTE” (2003). Projekt techniczny rekultywacji składowiska odpadów komunalnych w miejscowości Chelmek, ms, 14.

**SHEAR STRENGTH OF MUNICIPAL SOLID WASTES VS. SLOPE STABILITY ANALYSIS**

**Abstract.** The review of literature related to tests of shear strength of municipal solid wastes is presented in the first part of the paper. It was revealed that MSW have very various values of angle of internal friction and cohesion, which are depended from composition of wastes, degree of biodegradation, test methods (type of tests, range of strain). It was stated, that the influence of aforementioned factors is often unclear, what causes that the choice of shear strength parameters of MSW for slope stability analysis is complicated. Slope stability analysis of exemplary sanitary landfill in Chelmek is presented in the second part of paper. The shear strength parameters of wastes were taken from the first of paper. It was revealed that typical slope stability calculations gave high value of safety factor, whereas probability analysis show that expected performance level of sanitary landfill is between poor and below average.

**Key words:** municipal solid waste, shear strength, slope stability, probability analysis

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.12.2015*

Do cytowań – For citation: Zydróż, T., Cholewa, M., Demczuk, P. (2015). Wytrzymałość na ścinanie odpadów komunalnych a stateczność skarp składowisk. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14 (4), 141–155.