

Wpływ wybranych wodnych roztworów chlorków na właściwości mechaniczne piasków drobnych

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer¹, prof. dr. inż. Thomas Priesemann², mgr inż. Jakob Machon²

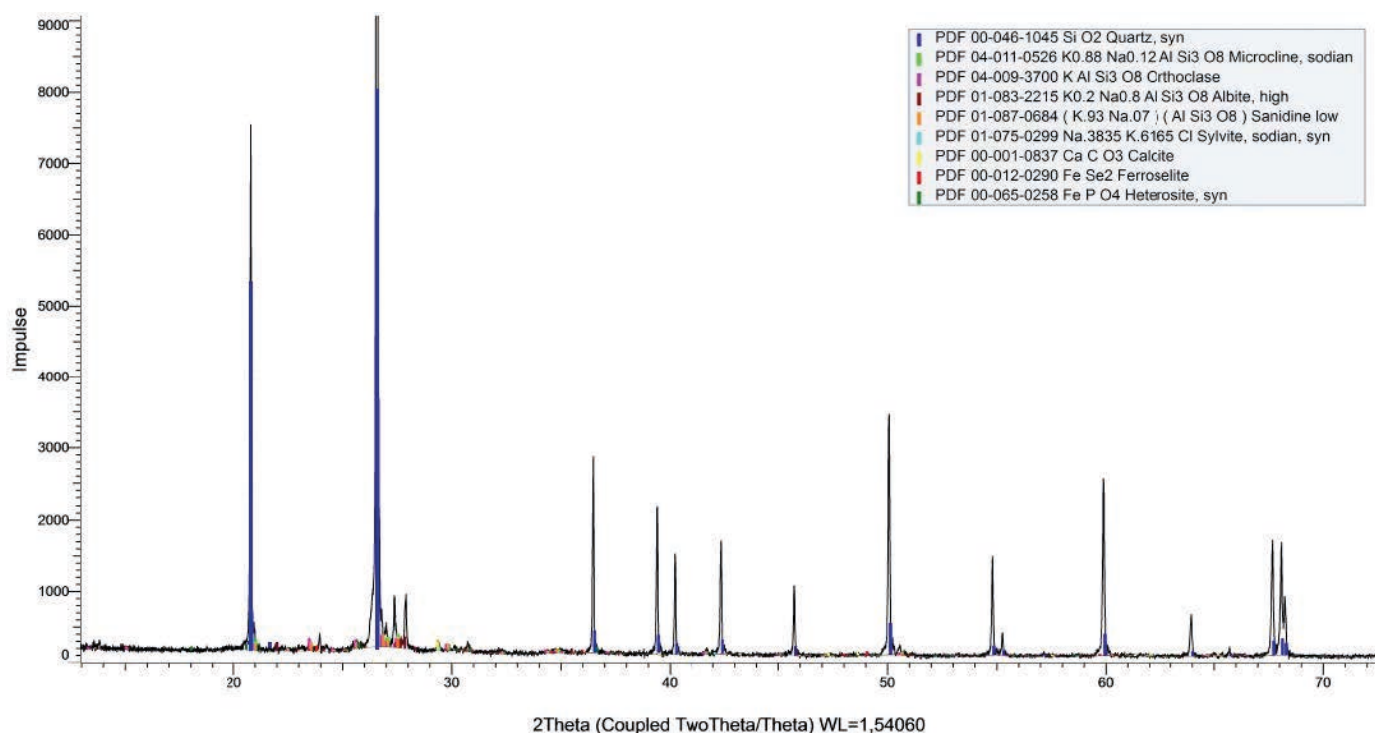
¹Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

²Jade Hochschule Oldenburg, Germany, University of Applied Sciences

W celu utrzymania w zimie nawierzchni dróg wolnych od lodu używa się soli, na przykład chlorków. Zapobiegają one zamarzaniu wody na powierzchni drogi, a zawarte w solach kationy i aniony przedostają się do podłoża drogi. Jeśli warstwy ścieralne asfaltu i konstrukcyjne pozwalają na infiltrację w pory gruntu, oddziałują one z ziarnami tych warstw, zmieniając ich właściwości mechaniczne. Później, po odtajaniu zmarzliny, obserwowane są zmiany nawierzchni drogi charakteryzujące się

rozwarstwieniami oraz obniżeniem wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształcalności podłoża drogowego.

Przeprowadzane badania w skali laboratoryjnej na próbkach naturalnych gruntów mineralnych z zawartością piasku kwarcowego pochodzenia glacialnego mają na celu określenie i zbadanie wpływu wybranych związków chlorkowych zawartych w roztworze porowym na właściwości mechaniczne warstw gruntu. Pod uwagę należy wziąć zarówno jakościową, jak i ilo-



Rys. 1. Dyfraktoqram badanych próbek gruntu

ściową analizę wpływu chlorków na ścisłość gruntu, zdolność zagęszczania i wytrzymałość gruntu na ścinanie.

Wpływ na właściwości gruntu należy wyjaśnić w zależności od stężenia roztworu i wartościowości kationów. Z drugiej strony należy zbadać, czy i w jakim zakresie przewidywana zmiana właściwości mechanicznych podłoża gruntowego w czasie użytkowania drogi może być uzyskana wcześniej przed oddaniem drogi do eksploatacji przez dodanie roztworów chlorków już w czasie budowy.

Wyniki eksperymentów powinny wykazać, że istnieje możliwość poprawy właściwości mechanicznych gruntów niespoistych poprzez wprowadzenie do szkieletu gruntu roztworów soli oraz które chlorki i w jakiej ilości nadają się najbardziej do tego celu.

POMIARY LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne przeprowadzono w Niemczech w laboratorium mechaniki gruntów Wydziału Budownictwa Geoinformacji Technologii Medycznych Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Oldenburgu (Jade Hochschule Oldenburg, Jade University of Applied Sciences in Oldenburg). Materiał do nich użyty jest typowym materiałem mineralnym regionu północnoniemieckiego używanym jako materiał wymienny korpusu drogowego. Jest to piasek kwarcowy pochodzenia glacialnego wydobyty z dna zbiornika wodnego. W celu wykorzystania wyników badań do planowania konkretnych projektów w tym regionie, badania przeprowadzono przy użyciu obowiązujących norm niemieckich i europejskich. Należy wspomnieć, że normy europejskie w Niemczech (DIN-EN) różnią się od używanych w Polsce (PN-EN) tylko językiem, natomiast krajowe normy niemieckie nie są ogólnie zgodne z krajowymi normami polskimi, lecz są one porównywalne.

Skład chemiczny próbek zbadano metodą dyfrakcji rentgenowskiej XRD [8]. Wyniki przedstawiono na rys. 1.

Przedstawiona analiza potwierdza, że badany jest piasek kwarcowy.

Próbki do badań laboratoryjnych przygotowano zgodnie z normą (DIN EN 932-2, 1999-03) [14] odpowiednikiem (PN-EN 932-2, 2001-02) [24] i miało na celu uzyskanie takiej frakcji granulometrycznej, która będzie reprezentatywna do całości późniejszych badań.

Oznaczenie i klasyfikacja uziarnienia gruntu

Badanie składu granulometrycznego przeprowadzono według normy (DIN 18123, 2011-04), która odpowiada aktualnej międzynarodowej normie niemieckiej (DIN EN ISO 17892-4, 2017-04) [18], a tym samym międzynarodowej polskiej (PN-EN ISO 17892-4, 2017-01) [29] i jest wynikiem kombinowanej analizy sitowej i areometrycznej [3]. W wyniku otrzymano skład granulometryczny przedstawiony na rys. 2.

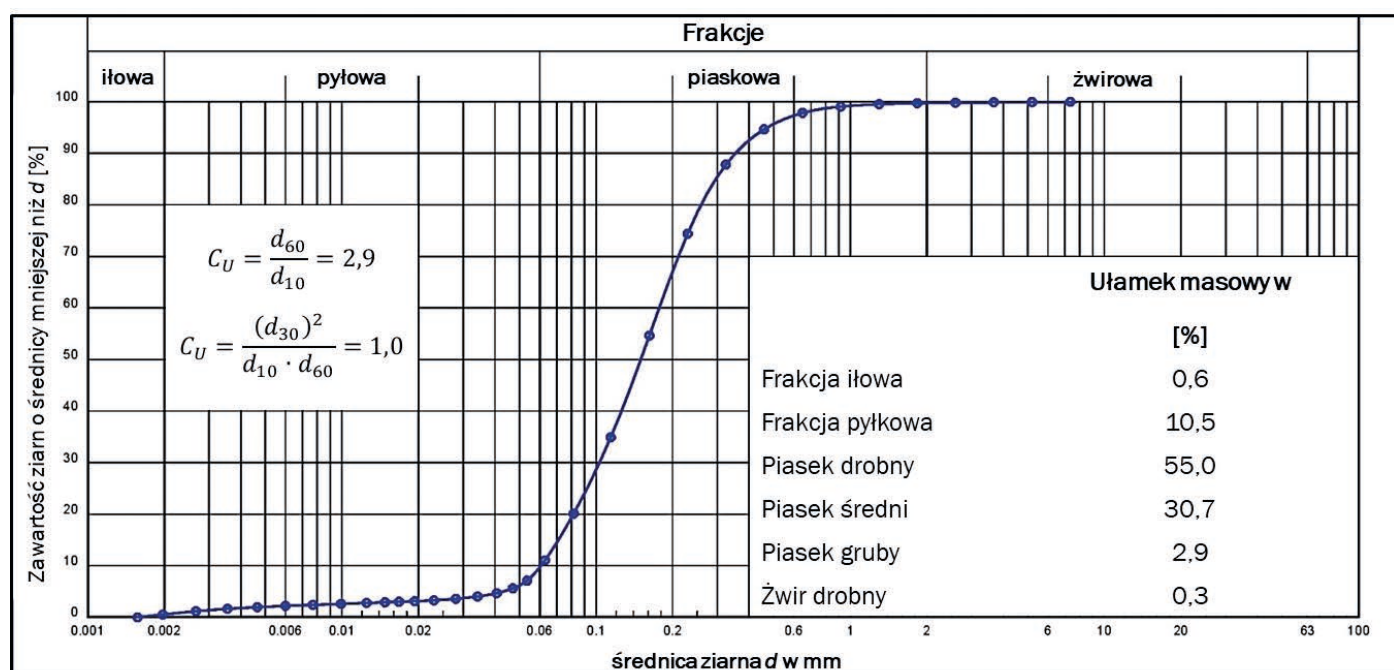
W tabl. 1 przedstawiono średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 10[%], 30[%] i 60[%] masy próbki.

Tabl. 1. Średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia

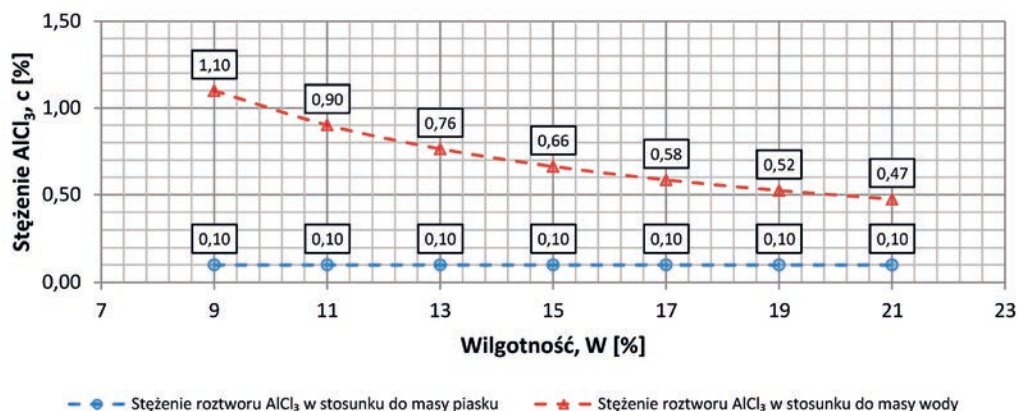
d_{10} [mm]	d_{30} [mm]	d_{60} [mm]
0,06063	0,10303	0,17716

Wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia C_U według wzoru (1) wynosi:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,17716}{0,06063} = 2,9 \quad (1)$$



Rys. 2. Krzywa uziarnienia użytych próbek materiału wydobytego z dna zbiornika wodnego



Rys. 3. Stężenie AlCl₃ w przeliczeniu na masę wody lub piasku

Według wzoru (2) wyznaczono wskaźnik krzywizny uziarnienia C_c , który wynosi:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{0,10303}{0,06063 \cdot 0,17716} = 1,0 \quad (2)$$

Grunt o przedstawionym składzie uziarnienia można nazwać według norm (DIN EN ISO 14688-1, 2013-12) [16] i (PN-EN ISO 14688-1, 2006-06) [26].

<i>simsaFSa</i>	Piasek drobny, średnio piaszkowy i pyłowy	
<i>FSa</i>	Piasek drobny	Część główna
<i>msa</i>	Piasek średni	Dalsza część – ponad 30 [%] składu
<i>si</i>	Pył	Dalsza część – poniżej 15 [%] składu

Przygotowanie próbek

Wartościami porównawczymi badań właściwości mechanicznych gruntu z dodatkami roztworów są wyniki badań ścisłości gruntu, wytrzymałości gruntu na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania i zagęszczalności gruntu, które są przeprowadzane z wyłączeniem dodatków, przy użyciu czystej wody.

Pomiary wykonano w systemie gruntowo-wodnym otwartym bez uprzedniego przemrażania. Próbkę były wyprażane w temperaturze 105°C, jak wymaga tego norma DIN-EN ISO 17892-1 (2015-03) [19], względnie PN-EN ISO 17892-1 (2015-02) [28], aby następnie nasączyć je odpowiednią ilością wody lub roztworu.

Badania główne obejmowały pomiary ścisłości gruntu, wytrzymałości gruntu na ścinanie i zagęszczalności gruntu, które przeprowadzano po dodaniu do gruntu odpowiednio roztworów chlorku sodu NaCl, chlorku wapnia CaCl₂ i chlorku glinu AlCl₃.

Do badania ścisłości gruntu i wytrzymałości gruntu na ścinanie przygotowano roztwory wodne o stężeniu $c = 0,3\%$ NaCl, CaCl₂ i AlCl₃, natomiast do badania zagęszczalności gruntu roztwór wodny o stężeniu $c = 0,1\%$ AlCl₃.

Zawartość dodatków chlorków w próbkach była stała dla wszystkich pomiarów ścisłości gruntu i wytrzymałości gruntu na ścinanie i wynosi 0,3% w stosunku do masy badanej próby

liczonej według suchej masy szkieletu gruntowego. Dla badań zagęszczalności gruntu zawartość ta wynosiła 0,1% AlCl₃. Ponieważ indywidualne (częściowe) badania muszą być przeprowadzone z różnymi zawartościami wody w próbce i w sumie tworzą badanie całkowite zagęszczalności gruntu, użyty za każdym razem roztwór wodny chlorku glinu miał odpowiednie stężenie tak, aby zawartość chlorku glinu w stosunku do masy próby pozostała stała. W tym celu obliczono stężenie wodnego roztworu AlCl₃ dodawanego do kolejnych próbek, które przedstawiono na rys. 3.

Badania zagęszczalności gruntu

Badania zagęszczalności gruntu metodą Proctora, których wyniki przedstawiono na rys. 4 przeprowadzono zgodnie z aktualną niemiecką krajową normą (DIN 18127, 2012-09) [11] odpowiadającą w kwestii przeprowadzenia badań i obliczeń „starej” krajowej polskiej normie (PN-B-04481, 1988-06) [23].

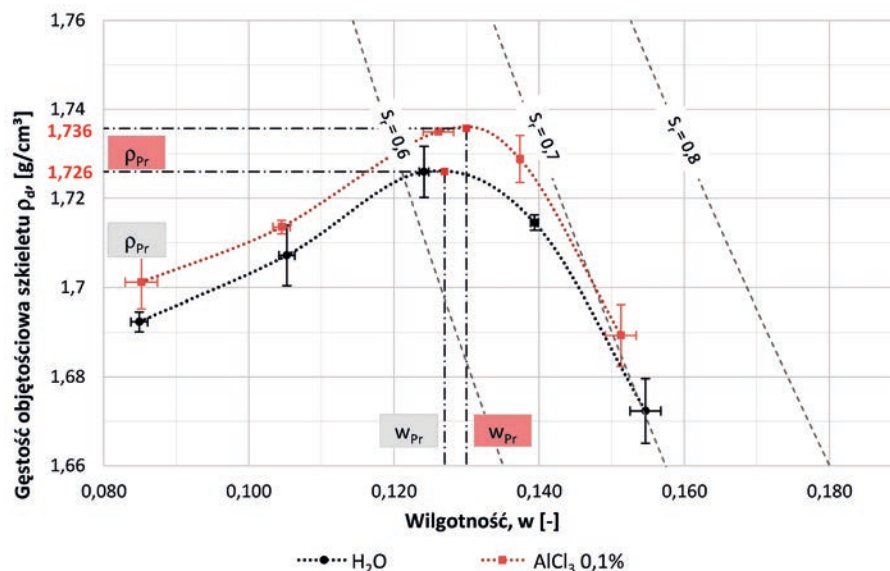
Uśredniona krzywa Proctora próbek z dodatkiem roztworu chlorku glinu przebiega powyżej uśrednionej krzywej próbek kontrolnych z czystą wodą w całym badanym zakresie wilgotności. Dodatek roztworu wodnego AlCl₃ powoduje zwiększenie gęstości objętościowej szkieletu gruntowego po obydwu stronach maksimum przebiegów krzywych, które różnią się o $\Delta\rho_{ds} = 0,010$ [Mg/m³].

Badania ścisłości gruntu

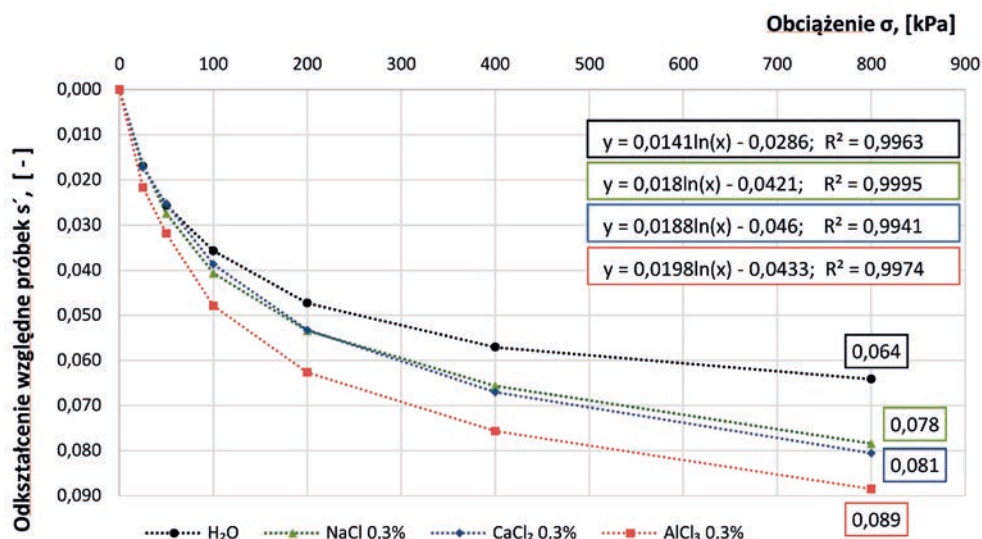
Badania ścisłości gruntu w edometrach przeprowadzono zgodnie z niemiecką normą krajową (DIN 18135, 2012-04) [12], która jest identyczna z normą europejską (DIN EN ISO 17892-5, 2017-08) [20], a tym samym z normą europejską (PN-EN ISO 17892-5, 2017-06) [30]. Wyniki przedstawiono na rys. 5.

Ze zwiększającym się obciążeniem σ zwiększa się zgodnie z przewidywaniami odkształcenie względne. Wielkość tego odkształcenia jest inna dla różnych roztworów. Najmniejsza jest dla próbek nawilżonych czystą wodą. Próbkę nawilżone roztworami soli wykazują zwiększające się odkształcenie względne ze wzrostem wartościowości kationu.

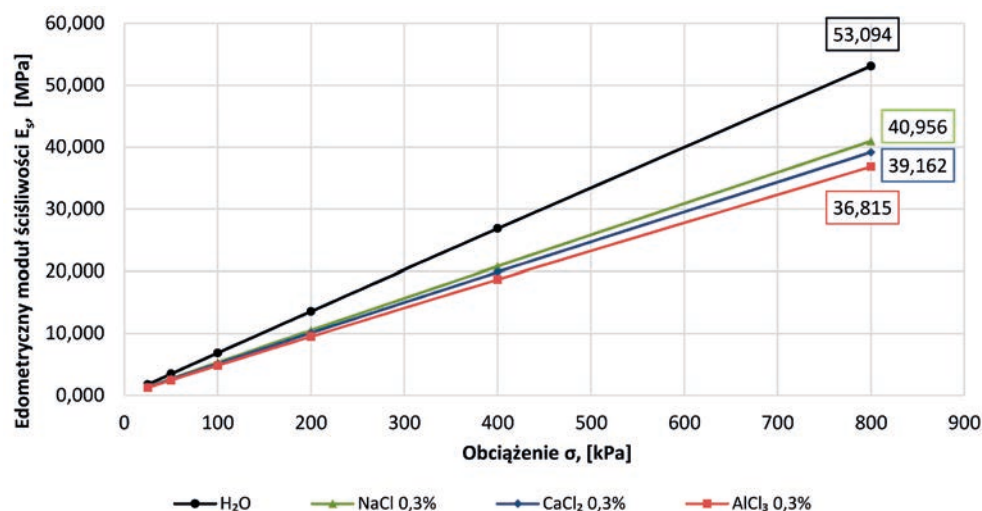
Do dalszych obliczeń dopasowano do uzyskanych punktów pomiarowych krzywe, stosując metodę najmniejszych kwadratów.



Rys. 4. Uśrednione krzywe zagęszczalności energii 2,69 MNm/m³ dla próbek bez i z dodatkiem roztworu wodnego AlCl₃



Rys. 5. Zestawienie odkształcenia względnego próbek o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³] w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3\%$ oraz wodą



Rys. 6. Zestawienie edometrycznych modułów ściśliwości pierwotnej w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3\%$ oraz wodą

tów. Najlepsze współczynniki determinacji i dopasowanie używano do krzywych logarytmicznych w postaci $y = a \cdot \ln(x) + b$, które następnie użyto do obliczenia edometrycznego modułu ścisłości metodą stycznych według norm (DIN 18135, 2012-04) [12].

Przyjmując wyznaczoną zależność logarytmiczną odkształcenia względnego próbek od obciążenia otrzymujemy wzór (3) określający zależność odwrotną.

$$s' = m \cdot \ln(\sigma) + b \Leftrightarrow \sigma = e^{\frac{s'-b}{m}} \quad (3)$$

Stąd:

$$\frac{d\sigma}{ds'} = \frac{1}{m} \cdot e^{\frac{s'-b}{m}} \quad (4)$$

Zgodnie z normą (DIN EN ISO 17892-5, 2017-08) [20] i (PN-EN ISO 17892-5, 2017-06) [30] obliczono edometryczny moduł ścisłości E_s przy użyciu wskaźnika porowatości gruntu e , który może być obliczony z odkształcenia Δs . Ponieważ metoda ta nie została jeszcze przyjęta na poziomie krajowym w Niemczech, zastosowano alternatywną metodę obliczania modułu ścisłości E_s przy użyciu odkształcenia względnego s' według (DIN 18135, 2012-04) [12], gdzie edometryczny moduł ścisłości E_s wyznaczamy jako:

$$E_s = \frac{d\sigma}{ds'} \cdot (1 - s') \quad (5)$$

gdzie:

E_s – edometryczny moduł ścisłości,

σ – obciążenie,

s' – odkształcenie względne

Następnie obliczamy podstawiając (4):

$$E_s = \frac{1}{m} \cdot e^{\frac{s'-b}{m}} \cdot (1 - s') \quad (6)$$

Wyniki obliczeniowe przedstawiono na rys. 6.

Przy stałym obciążeniu i większych odkształceniach otrzymujemy mniejszy edometryczny moduł ścisłości. Powoduje to, że przy stałym obciążeniu próbki nawilżone czystą wodą

mają największy edometryczny moduł ścisłości, a w kolejności zwiększającej się wartościowości kationu moduł się zmniejsza. Przykładowo dodatek roztworu $AlCl_3$ prowadzi przy obciążeniu 800 kPa do powstania edometrycznego modułu ścisłości o wartości 36,815 MPa, podczas gdy dodanie czystej wody daje edometryczny moduł ścisłości 53,094 MPa.

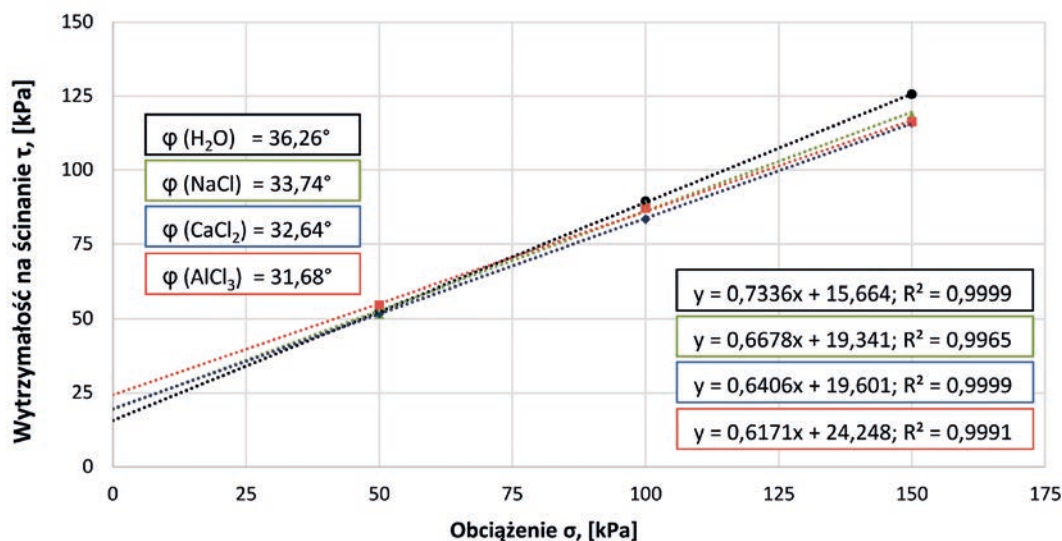
Badania wytrzymałości gruntu na ścinanie

Wyniki badań wytrzymałości gruntu na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania, zestawione na rys. 7 określono zgodnie z normą (DIN 18137-3, 2002-09) [13], która jest identyczna z niemiecką normą europejską (DIN ISO/TS 17892-10, 2005-01) [21], a tym samym z polską normą europejską (PKN-CEN ISO/TS 17892-10, 2009-08) [22].

Obserwując przecięcia wykresów z osią rzędną można stwierdzić, że spójność badanych próbek zgodnie z przewidywaniami była ogólnie mała (najmniejsza dla próbek nawilżonych czystą wodą) i rosła wraz ze wzrostem wartościowości kationów. Ponieważ kąt tarcia wewnętrznego jest największy dla próbek z czystą wodą, a dla próbek z roztworami maleje wraz ze wzrostem wartościowości kationów, otrzymujemy przy wzroście obciążenia wprawdzie wzrost wytrzymałości na ścinanie wszystkich próbek, ale ponieważ ten wzrost nie jest jednakowy, następuje „odwrócenie kolejności”. Największą wytrzymałość na ścinanie wykazują próbki nasączone czystą wodą, a próbki nasączone roztworami soli charakteryzują się malejącą wytrzymałością na ścinanie przy rosnącej wartościowości kationów – jeśli obciążenie jest dostatecznie duże.

ZASTOSOWANIE W PRAKTYCE INŻYNIERSKIEJ

Obecnie nie są znane praktyczne zastosowania roztworów soli do zmiany właściwości mechanicznych podłoża drogowego i badań w tym kierunku w Europie. Znane są natomiast przypadkowe zastosowania solanki w zastępstwie słodkiej wody w budownictwie drogowym w przeciwieństwie do praktyki



Rys. 7. Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej $\rho_d = 1,65 \text{ Mg/m}^3$ od obciążenia σ w kPa dla próbek roztworów o stężeniu 0,3% oraz wody

amerykańskiej, gdzie roztwory wodne chlorków metali stosuje się celowo w budownictwie drogowym. Również badania nad celowością takiego postępowania miały tam miejsce, jednakże ograniczały się one naturalnie do warunków gruntowych, klimatycznych i potrzeb amerykańskich.

Przypadkowe zastosowanie miało miejsce w Niemczech przy budowie drogi gruntowej w okolicach Hanoweru w latach trzydziestych ubiegłego wieku, gdzie wykorzystano dostępną na miejscu solankę z potoku Foesse. Tak wybudowana droga okazała się odporniejsza na wpływy mechaniczne i klimatyczne w porównaniu do dróg budowanych z wykorzystaniem wody słodkiej [4, 5]. Metoda ta, w przeciwieństwie do Ameryki, nie znalazła jednak większego zastosowania w Niemczech, ponieważ skupiono się na zastosowaniu cementu, wapna i bitumu.

Celowe zastosowania na dużą skalę miały miejsce w USA i Kanadzie na podstawie badań terenowych i laboratoryjnych między innymi [1, 2, 6, 7, 9].

Również celowe wydaje się zastosowanie wody morskiej w latach dwudziestych ubiegłego wieku w Grecji przez budowlaną firmę amerykańską przy budowie drogi [10]. Podobnie jak na kontynencie amerykańskim okazało się w warunkach Europy południowej, że zastosowanie soli wpływa korzystnie na nawierzchnię drogi, powodując jej stabilizację.

WNIOSKI

Przedstawione badania dowodzą, że dodanie roztworów soli do próbek gruntu (konkretnie: piasku *simsaFSa*) ma wpływ na ich właściwości mechaniczne.

Dodanie roztworu chlorku glinu powoduje zwiększenie używanej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego w porównaniu z próbkami kontrolnymi przy tej samej energii zagęszczania w całym przedziale badanej wilgotności czyli ułatwia zagęszczanie.

Nawilżanie badanych próbek roztworami chlorków powoduje zwiększenie odkształcenia względnego, co powoduje, że zmniejsza się obliczony edometryczny moduł ścisłości. Zmienia się również wytrzymałość gruntu na ścinanie. Dla dużych obciążeń maleje wraz ze wzrostem wartościowości, a dla małych wzrasta. Kąt tarcia wewnętrznego maleje, a spójność rośnie. Wpływ ten zwiększa się z rosnącą wartościowością kationów w kolejności Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} .

LITERATURA

1. Baylard E. M.: Performance study of calcium-chloride-treated roads. w: Highway Research Board Proceedings (31), 1952, 336-348.
2. Johnson A. M.: The role of calcium chloride in compaction of some granular soils. w: Highway Research Board Proceedings, 594f, 1946.
3. Machon J.: Wpływ środków powierzchniowoczących na gęstość objętościową gruntu, w: Badania naukowe w zakresie geotechnicznego wspomagania projektowania. XXII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin, 9 października 2015, red. URSZULA TUSIŃSKA. Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny. Wydział Budownictwa i Architektury. Katedra Geotechniki, 2015, 69-82.
4. Orthaus M. G.: Mit Salz und Lehm verfestigte Straßen. (Bauausführungen in der Hauptstadt Hannover). w: Der Straßenbau (30), 1939, 186-188.

5. Orthaus M. G.: Verfestigung von Erd- und sonstigen Straßen mit Hilfe von Salz und Lehm. (Bauausführungen in Hannover). w: Steinindustrie und Straßenbau (35), 1939, 280-285.
6. Slate F. O.: Use of calcium chlorite in subgrade soils for frost prevention. w: Highway Research Board Proceedings (22), 1942, 422-441.
7. Smith H. R.: Calcium chloride treatment of frost action. w: Highway Research Board Special Report (2), 1952, 326-330.
8. Spieß L., Schwarzer R., Behnken H., Teichert G.: Moderne Röntgenbeugung – Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, 3. Überarb. Auflage, Wiesbaden, Vieweg & Teubner, 2015.
9. Tribble J. F.: Mechanics of calcium chloride treatments. w: Highway Research Board Proceedings (24), 1944, 492-497.
10. Wiegner G.: Some physical-chemical properties of clays. w: Journal of the Society of Chemical Industry (8), 1931, 65-71.
11. DIN 18127 (2012-09): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch.
12. DIN 18135 (2012-04): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch.
13. DIN 18137-3 (2002-09): DIN 18137 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch.
14. DIN EN 932-2 (1999-03): Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben.
15. DIN EN 13286-2(2013-02): Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes – Proctorversuch.
16. DIN EN ISO 14688-1 (2013-12): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung.
17. DIN EN ISO 14688-2 (2013-12): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.
18. DIN EN ISO 17892-4 (2017-04): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung.
19. DIN EN ISO 17892-1 (2015-03): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts.
20. DIN EN ISO 17892-5 (2017-08): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung.
21. DIN ISO/TS 17892-10 (2005-01): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 10: Direkte Scherversuche
22. PKN-CEN ISO/TS 17892-10 (2009-08): Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ścinania.
23. PN-B-04481 (1988-06): Grunty budowlane – Badania próbek gruntu.
24. PN-EN 932-2 (2001-02): Badania podstawowych właściwości kruszyw – Metody pomniejszania próbek laboratoryjnych.
25. PN-EN 13286-2(2010-02): Mieszanki niezwiązane i związane hydraulicznie – Część 2: Metody badań laboratoryjnych gęstości na sucho i zawartości wody – Zagęszczanie metodą Proctora.
26. PN-EN ISO 14688-1 (2006-06): Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów – Część 1: Oznaczanie i opis.

27. PN-EN ISO 14688-2 (2006-06): Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów – Część 2: Zasady klasyfikowania.

28. PN-EN ISO 17892-1 (2015-02): Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 1: Oznaczanie wilgotności naturalnej.

29. PN-EN ISO 17892-4 (2017-01): Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 4: Badanie uziarnienia gruntów.

30. PN-EN ISO 17892-5 (2017-06): Rozpoznanie i badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów.