

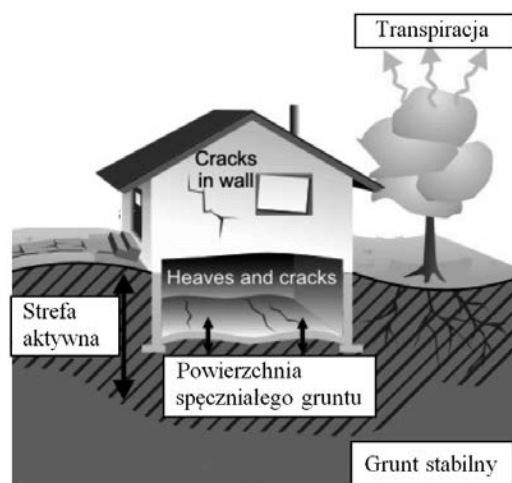
Badania gruntów nienasyconych – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy rozwoju

Dr inż. Zdzisław Skutnik

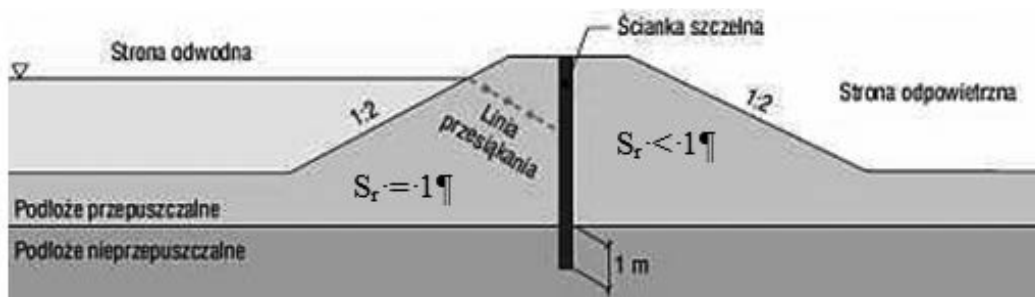
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Grunt z definicji jest ośrodkiem trójfazowym. Stan nienasycony gruntów występuje powszechnie. Obejmuje wszystkie grunty w strefie aeracji. Zwykle w stanie niepełnego nasycenia występują grunty ekspansywne wykazujące zdolność do zmian objętości pod wpływem wahań wilgotności. W wielu krajach koszty związane z usuwaniem szkód budowlanych wywołanych przez zmiany objętościowe podłoża spowodowane pęcznieniem, skurczem czy osiadaniem (rys. 1) są ogromne [13, 17, 26]. Grunt wbudowany w konstrukcję ziemną, wał przeciwpowodziowy (rys. 2), zapórę uszczelnioną rdzeniem (rys. 3), szczególnie grunt spoisty zaraz po zagęszczeniu znajduje się w stanie niepełnego nasycenia, o czym należy pamiętać na etapie projektowania, a także w czasie budowy i eksploatacji, zwłaszcza budowli hydrotechnicznych [7, 9, 18, 20, 33, 34, 36, 40, 46].

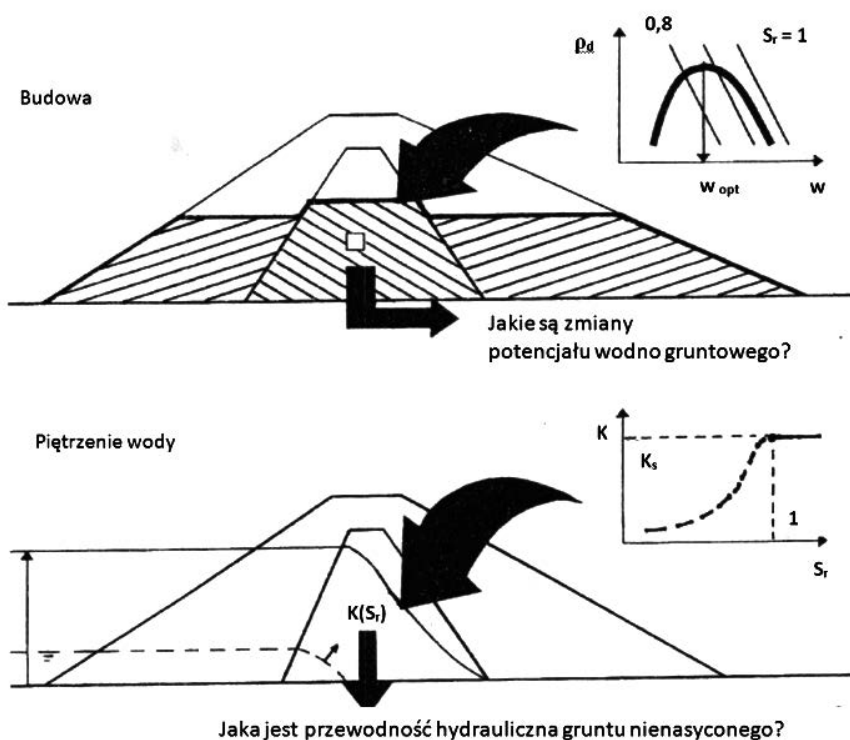
W odróżnieniu od gruntów w pełni nasyconych wodą, gdzie występują tylko dwie fazy, właściwości gruntów nienasyconych



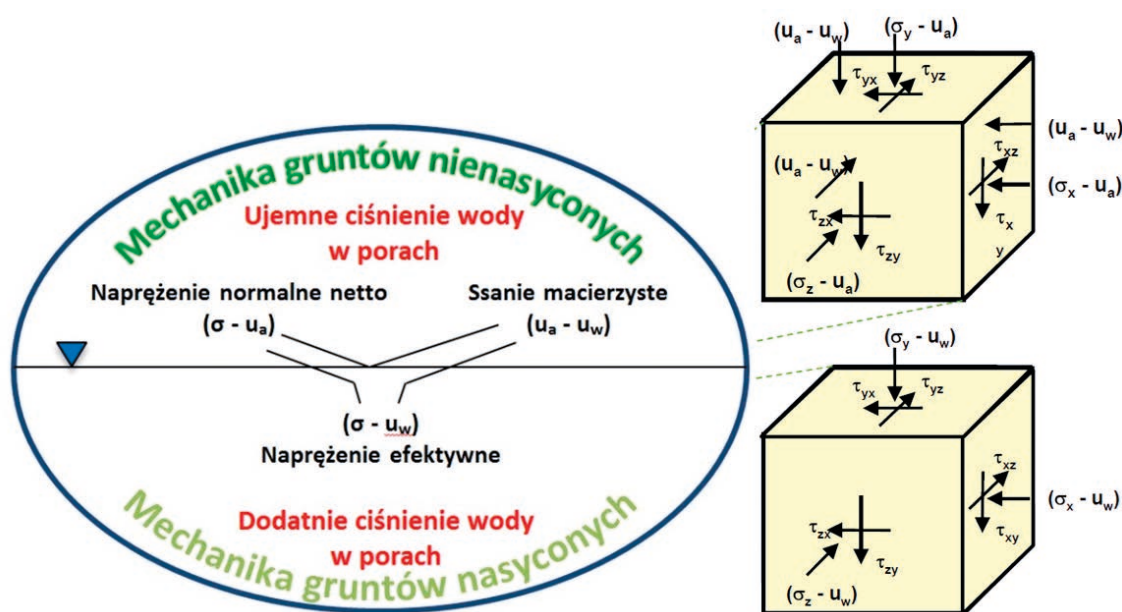
Rys. 1. Podłoże ekspansywne – skutki pęcznienia, skurczu, osiadania



Rys. 2. Wał przeciwpowodziowy podczas wezbrania



Rys. 3. Zmiany stanu nasycenia i przewodności hydraulicznej rdzenia zapory w czasie budowy i pierwszego piętrzenia wody w zbiorniku [7]



Rys. 4. Stan naprężenia w gruntach nasyconych i nienasyconych [2]

Tabl. 1. Najważniejsze konferencje międzynarodowe dotyczące tematyki badań laboratoryjnych i terenowych oraz modelowania numerycznego gruntów nienasyconych

1st International Conference (UNSAT 95),	Paris, France
2nd International Conference (UNSAT 98),	Beijing, China
1st Asian Conference (UNSAT-ASIA 2000),	Singapore
3rd International Conference (UNSAT 2002),	Recife, Brazil
2nd Asian Conference (UNSAT-ASIA 2003),	Osaka, Japan
4th International Conference (UNSAT 2006),	Carefree, Arizona, USA
3rd Asian Conference (UNSAT-ASIA 2007),	Nanjing, China
1st European Conference (E-UNSAT 2008),	Durham, UK
4th Asia Pacific Conference (AP-UNSAT 2009),	Newcastle, Australia
5th International Conference (UNSAT 2010),	Barcelona, Spain
5th Asia Pacific Conference (AP-UNSAT 2011),	Pattaya, Thailand
2nd European Conference (E-UNSAT 2012),	Napoli, Italy
1st Pan-American Conference (Pan-Am UNSAT 2013),	Cartagena de Indias, Columbia
6th International Conference (UNSAT 2014),	Sydney, Australia

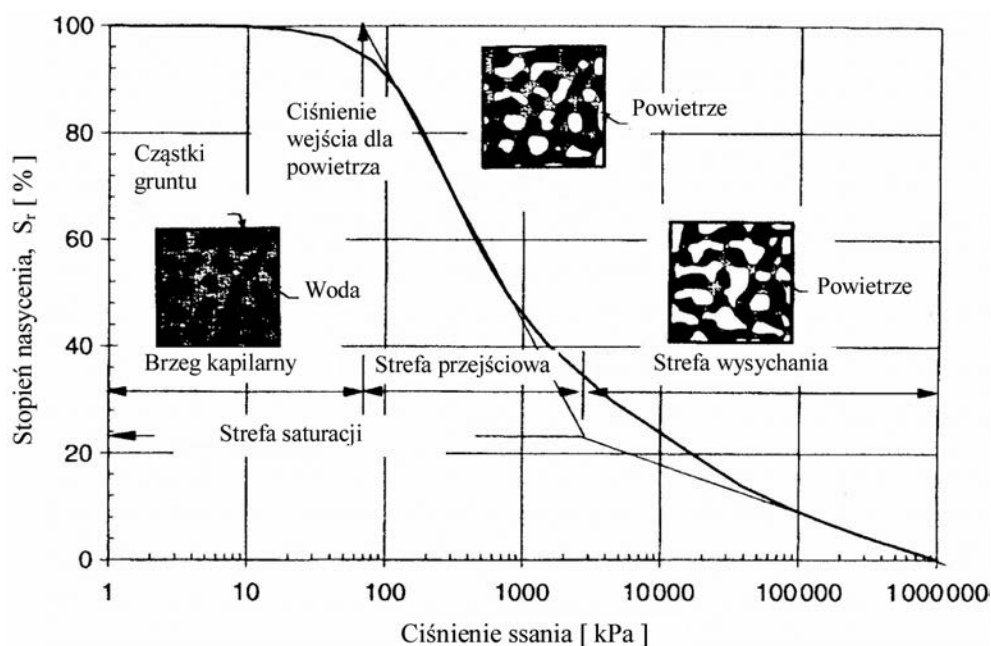
nie mogą być analizowane tylko na podstawie jednej zmiennej stanu naprężenia, tj. naprężenia efektywnego, $\sigma' = \sigma - u_w$. Wynika to z zupełnie różnego oddziaływania na szkielet gruntu naprężenia od zewnętrznych obciążeń i ssania macierzystego fazy ciekłej wypełniającej tylko częściowo pory gruntu. Dlatego też do opisu stanu naprężenia gruntów nienasyconych wprowadzono dodatkowe zmienne: naprężenie netto σ_{net} oraz ssanie macierzyste s (rys. 4) [1, 2, 11, 41].

Pierwsze próby powiązania ciśnienia ssania z zachowaniem się gruntów nienasyconych w odniesieniu do problemów inżynierskich i geotechnicznych podjął zespół Corneya w Road Research Laboratory w Londynie w latach pięćdziesiątych XX wieku [2]. Dopiero jednak w latach osiemdziesiątych mechanika gruntów nienasyconych wyodrębniła się jako osobny dział. W 1993 roku wydano pierwszy podręcznik mechaniki gruntów nienasyconych [2].

Od 1995 roku są organizowane międzynarodowe konferencje poświęcone w całości problematyce gruntów nienasyconych (tabl. 1).

KRZYWA RETENCJI WODNEJ

Zależność pomiędzy ssaniem macierzystym a wilgotnością objętościową gruntu θ jest podstawową charakterystyką opisującą zachowanie się gruntów nienasyconych i nazywana krzywą retencji lub też krzywą pF [1, 2, 15, 29, 42, 47, 49]. W geotechnice krzywa retencji bywa częściej przedstawiana jako zależność stopnia nasycenia S_r i ciśnienia ssania, ponieważ S_r jest parametrem bardziej znanym i częściej stosowanym przez inżynierów geotechników. Przykładową krzywą retencji gruntu przedstawiono na rys. 5, na której zaznaczono również jej charakterystyczne punkty i przedziały [42].



Rys. 5. Przykładowa krzywa retencji gruntu spoistego [42]

Wyznaczenie krzywej retencji, polegające na pomiarach ssania macierzystego przy różnych wartościach wilgotności gruntu, jest jednym z podstawowych zadań w badaniach gruntów nienasyconych. Istnieje wiele metod wyznaczania ciśnienia ssania zarówno laboratoryjnych, jak i polowych. Do najbardziej popularnych metod laboratoryjnych można zaliczyć następujące: bibuły filtracyjnej, psychrometru, talerzy ciśnieniowych, tensjometryczną, aparatu trójosiowego ściskania i sakedometru [6, 13, 24, 47]. Metody polowe można podzielić w zależności od sposobu pomiaru przewodności termicznej, przewodności elektrycznej, tensjometrycznej i piezometrycznej [2, 4, 13, 15, 31, 39, 44].

W literaturze [49] można znaleźć wiele równań matematycznych opisujących krzywą retencji powstałych na bazie doświadczeń. Do najbardziej znanych należą:

$$(Gardner, 1958) \quad \theta_w = \theta_s / [1 + (\psi / a_G)_G^n] \quad (1)$$

$$(Mualem, 1976) \quad \theta_w = \theta_s / [1 + (\psi / a_M)_M^n]_M^m \quad (2)$$

$$(van Genuchten, 1980) \quad \theta_w = \theta_s / [1 + (\psi / a_{VG})_{VG}^n]_{VG}^m \quad (3)$$

gdzie:

θ_w – wilgotność objętościowa gruntu,

θ_s – wilgotność objętościowa przy pełnym nasyceniu,

ψ – wartość ciśnienia ssania macierzystego (przy małych wartościach ciśnienia ssania) bądź ssania całkowitego (przy dużych wartościach ciśnienia ssania),

a – wartość ciśnienia ssania odpowiadająca „punktowi wejścia powietrza”,

G – według Gardniera, M – Mualema, VG – van Genuchtena,

n – parametr gruntowy odpowiadający nachyleniu krzywej retencji w strefie przejściowej (od punktu wejścia powietrza do wilgotności rezydualnej),

m – parametr gruntowy odpowiadający rezydualnej wartości ssania.

Pomiędzy krzywą retencji a zachowaniem się gruntu istnieje szczególnie związek, dlatego krzywa ta może być wykorzystana do wyznaczania parametrów gruntów nienasyconych [2, 49]. Na jej podstawie są obliczane przepływy w nienasyconych ośrodkach gruntowych. Istnieje kilka empirycznych rozwiązań zagadnienia przepływu w gruntach nienasyconych. Bazują one na znajomości dwóch zasadniczych charakterystyk: zależności między wilgotnością a ciśnieniem ssania (krzywa charakteryzująca układ grunt – woda) oraz współczynnika przepuszczalności w stanie pełnego nasycenia (współczynnika filtracji).

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE I NOŚNOŚĆ ORAZ PRZEPŁYW I ZMIANY OBJĘTOŚCIOWE GRUNTÓW NIENASYCONYCH

Spośród zagadnień mechaniki gruntów nienasyconych do najważniejszych należą: wytrzymałość na ścinanie i nośność oraz przepływ i zmiany objętości (rys. 6).

Wytrzymałość na ścinanie gruntu nienasyconego jest na ogół większa niż tego samego gruntu w pełni nasyconego wodą [2, 12, 32]. Fredlund [2] zaproponował odniesienie równania wytrzymałości na ścinanie Coulomba-Mohra do naprężenia normalnego netto $(\sigma - u_a)$ i ciśnienia ssania macierzystego $s = u_a - u_w$ w następującej postaci:

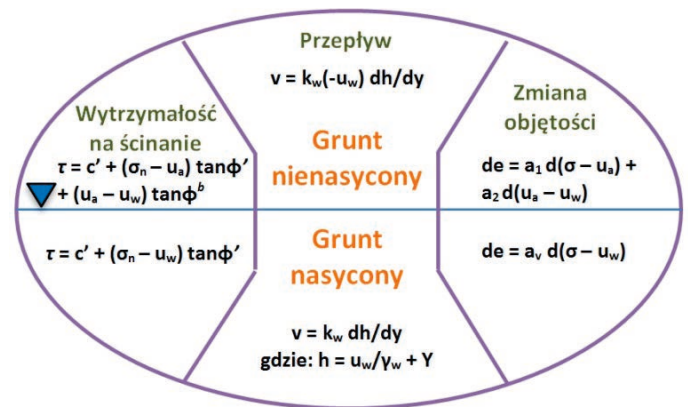
$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

gdzie:

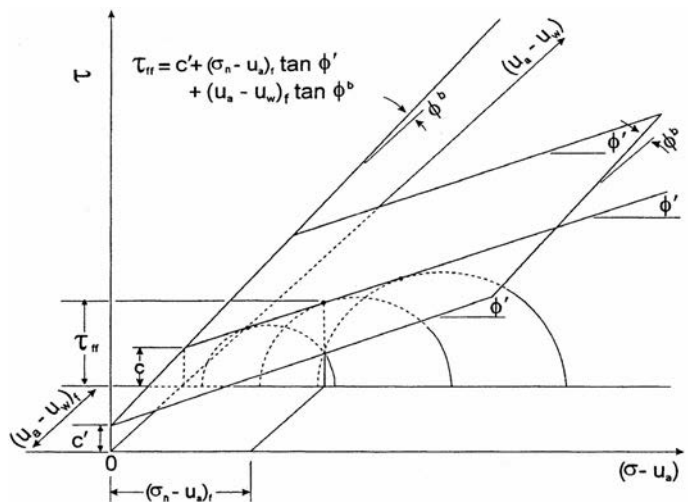
c' – spójność efektywna (taka sama jak gruntu w pełni nasyconego),

ϕ' – kąt tarcia wewnętrznego efektywny (taki sam jak gruntu nasyconego),

ϕ^b – parametr wytrzymałości gruntu zależny od ciśnienia ssania macierzystego.



Rys. 6. Kategorie zagadnień – podstawowe związki w mechanice gruntów nienasyconych i nasyconych



Rys. 7. Graficzna interpretacja obwiedni zniszczenia Coulomba – Mohra dla gruntów nienasyconych [2]

Graficzną interpretację równania (4) w układzie trójwymiarowym przedstawiono na rys. 7.

W najprostszej, podstawowej formie wzór Terzaghi'ego na nośność podłoża, który powstał w 1943 roku, przedstawia się następująco:

$$q_u = c'N_c + qN_q + 0,5B\gamma N_\gamma \quad (5)$$

gdzie:

q_u – ostateczna nośność gruntu [kPa],

q – opór graniczny nadkładu [kPa],

c' – spójność efektywna gruntu [kPa],

N_c, N_q, N_γ – współczynniki nośności [–],

γ – ciężar objętościowy gruntu [kN/m³],

B – szerokość prostokątnej podstawy fundamentu [m].

W odniesieniu do nośności gruntów nienasyconych, dla fundamentów powierzchniowych, zaprezentowane równanie Terzaghi'ego może być odpowiednio zmodyfikowane. Przybiera ono wtedy postać:

$$q_u = [c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b] N_c + 0,5B\gamma N_\gamma \quad (6)$$

gdzie:

ϕ^b – parametr wytrzymałości gruntu zależny od ciśnienia ssania macierzystego [°].

Można zastosować uproszczoną relację pomiędzy $\tan \phi^b$ oraz $\tan \phi'$ w celu oceny wytrzymałości na ścinanie gruntów nienasy-

conych. Proponuje się relację w postaci $\tan \phi^b = S^k \tan \phi'$, gdzie S to stopień nasycenia gruntu wodą [–], zaś k – względny współczynnik filtracji gruntu [–]. Do zagadnień geotechnicznych, rozwiązanie których wymaga znajomości parametrów wytrzymałości gruntu na ścinanie, należą: nośność podłoża, stateczność skarp i zboczy oraz parcie gruntu na konstrukcje oporowe.

Najwięcej jednak problemów sprawiają zjawiska związane ze zmianą objętości, do których należą: pęcznienie, skurcz i osiadanie zapadowe. W przypadku gruntów nienasyconych obecność w porach gruntowych zarówno wody, jak i powietrza sprawia, że całkowita zmiana objętości próbki gruntu nie jest równa objętości wody odpływającej z porów. Dlatego też nie można w bezpośredni sposób stosować do oceny odkształceń objętościowych gruntów nienasyconych obowiązujących w mechanice gruntów nasyconych teorii konsolidacji Terzaghiego czy Biot’a. Wynika to z faktu, że zmiany objętościowe (pęcznienie czy osiadanie) z jednej strony zależą od sztywności ośrodka gruntowego, na którą wpływ ma wartość ciśnienia ssania i stan naprężenia, jak również od przepuszczalności wody i powietrza w zależności od wskaźnika porowatości i stopnia nasycenia ośrodka gruntowego [2, 3, 5, 10, 16, 22, 25, 30, 43]. W odniesieniu do oceny przepływu w gruntach nienasyconych do największych trudności należy ustalenie warunków brzegowych oraz zmienności przepływu (ustalony i nieustalony). Badanie przewodności hydraulicznej gruntów nienasyconych jest bardziej złożone i pracochłonne niż gruntów nasyconych [49].

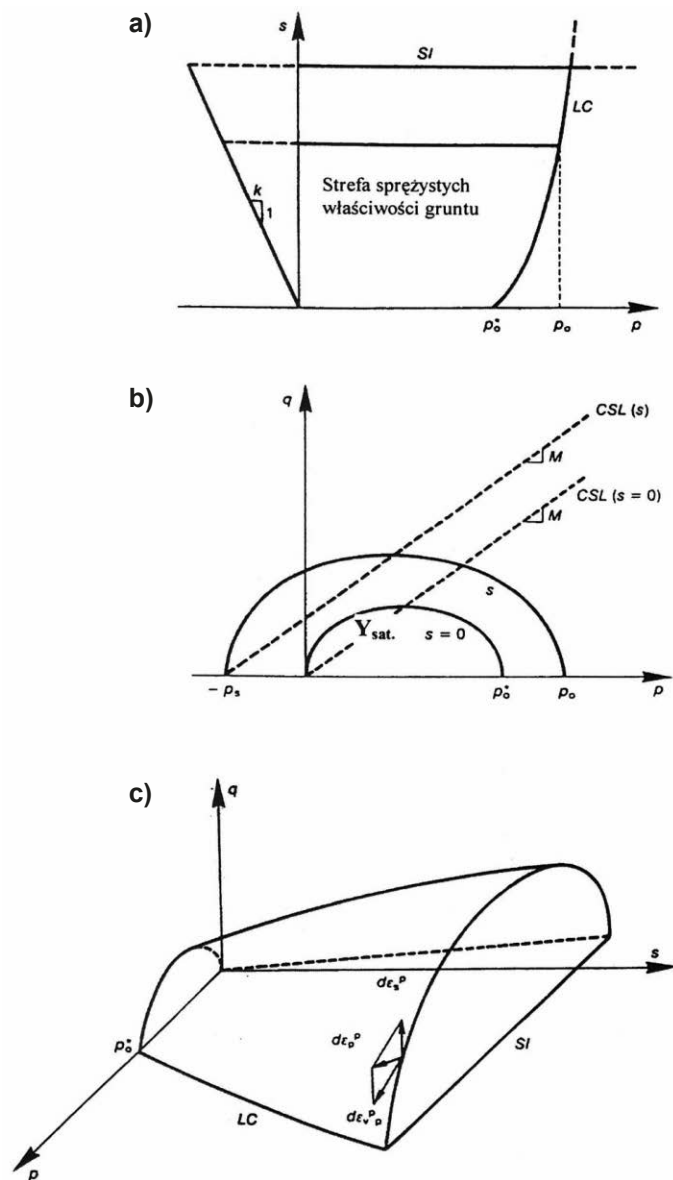
MODELE KONSTYTUTYWNE I OBLICZENIA NUMERYCZNE

W ostatnim okresie są podejmowane próby analizy zachowania się gruntów nienasyconych, podobnie jak nasyconych, za pomocą modelu stanu krytycznego Cam-Clay, który wprowadzono w Cambridge University w Anglii w latach 1958-68 dla izotropowych gruntów nasyconych. Badacze z Politechniki Katalońskiej w Barcelonie rozszerzyli koncepcję stanu krytycznego również dla gruntów nienasyconych, proponując model sprężysto-plastyczny o nazwie *Barcelona Basic Model* (BBM) [1, 11]. Koncepcję i graficzną interpretację modelu BBM przedstawiono na rys. 8.

Jednym z istotnych założeń tego modelu, będącego w zasadzie rozszerzeniem modelu Cam-Clay, jest obwiednia plastyczności nazwana LC (rys. 8a), rozdzielająca sprężyste i plastyczne zachowanie się gruntu zależnie od stanu naprężenia i ciśnienia ssania. Jeżeli grunt nasycony o naprężeniu prekonsolidacji p_o^* jest izotropowo konsolidowany, to linia stanu krytycznego jest przedstawiona jako Y_{sat} (rys. 8b). W przypadku wzrostu ciśnienia ssania obszar sprężystego zachowania się gruntu powiększa się, izotropowe naprężenie płynięcia zwiększa się zgodnie z linią LC (rys. 8a) i linią stanu krytycznego (rys. 8b). W modelu BBM założono, że nachylenie linii stanu krytycznego (wyrażone przez kąt tarcia) jest stałe i niezależne od ciśnienia ssania.

Równanie obwiedni plastyczności (rys. 8c) niezbędne do obliczeń numerycznych gruntów nienasyconych przedstawia się następująco [1]:

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_o - p) = 0 \quad (7)$$



Rys. 8. Koncepcja modelu BBM – *Barcelona Basic Model* [1]

Typowy model stanu krytycznego (np. Model Cam-Clay) wymaga wyznaczenia czterech parametrów: $\lambda(0)$, κ , G i M . Zastosowanie modelu BBM wymaga wyznaczenia dodatkowych parametrów: p^c – naprężenia prekonsolidacji, r – parametru definiującego maksymalną sztywność gruntu, β – wzrostu sztywności gruntu spowodowanej wzrostem ciśnienia ssania, λ_s – sztywności gruntu w zależności od zmian ciśnienia ssania, κ_s – sztywności sprężystej w zależności od zmian ciśnienia ssania, k – parametru wzrostu spójności w zależności od wzrostu ciśnienia ssania, M – nachylenie linii stanu krytycznego [1].

Obliczenia numeryczne zachowania się gruntów nienasyconych w podłożu i budowach ziemnych można wykonać programem CODE_BRIGHT [27, 33, 34]. Program powstał w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych. Jest to pakiet pozwalający na sprzężoną analizę odkształceń oraz przepływu gazu, wody i ciepła. Stąd nazwa programu (*CO*upled *DE*formation, *BR*ine, *GA*s and *HE*at *TR*ansport). Jak większość współczesnych programów również CODE_BRIGHT wykorzystuje metodę elementów skończonych. Przygotowanie danych, w tym geometrii, dyskre-

tyzacja oraz wizualizacja wyników obliczeń odbywa się w środowisku GID [27].

Do rozwiązywania zagadnień z zakresu przepływu wody w gruncie można wykorzystać program PLAXFLOW z grupy powszechnie znanych programów PLAXIS, który jest przydatny zarówno w praktyce geotechnicznej, jak i hydrotechnicznej [36]. Pozwala rozwiązywać zagadnienia związane z przepływem wody gruntowej wokół tuneli, ścianek szczelnych, dopływem wody do drenażu, dopływem lub wypływem wody ze studni i inne. Możliwe jest wykonywanie obliczeń przepływu ustalonego (*steady flow*) – stałego w czasie i nieustalonego (*transient flow*) – zmiennego w czasie. Użytkownik może skorzystać z kilku modeli opisujących właściwości gruntu. Podstawowym modelem wykorzystywanym w programie PLAXFLOW, opisującym zachowanie się gruntu nienasyconego, jest model Van Genuchtena, według którego stopień nasycenia jest funkcją efektywnej wysokości ciśnienia w następującej postaci:

$$S(\phi_p) = S_r + (S_s - S_r) \left(1 + \left(g_a |\phi_p| \right)^{g_n} \right)^{\left(\frac{1-g_n}{g_n} \right)} \quad (8)$$

zaś przewodność względna jest wyrażona równaniem:

$$k_{rel}(S) = (S_e)^{g_l} \left(1 - S_e^{\left(\frac{1-g_n}{g_n} \right)} \right)^{\left(\frac{g_n-1}{g_n} \right)^2} \quad (9)$$

gdzie:

$$\phi_p = p/\gamma,$$

p – ciśnienie cieczy,

γ – ciężar objętościowy cieczy,

g_a, g_n, g_l – parametry empiryczne modelu określone dla danego rodzaju gruntu,

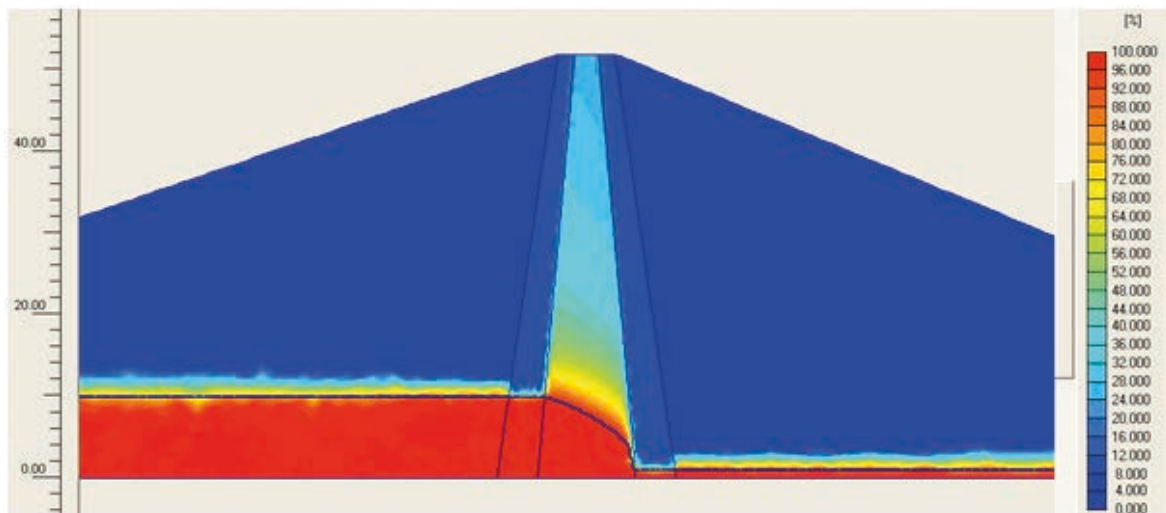
S_r – reszkowy stopień nasycenia,

S_s – stopień pełnego nasycenia,

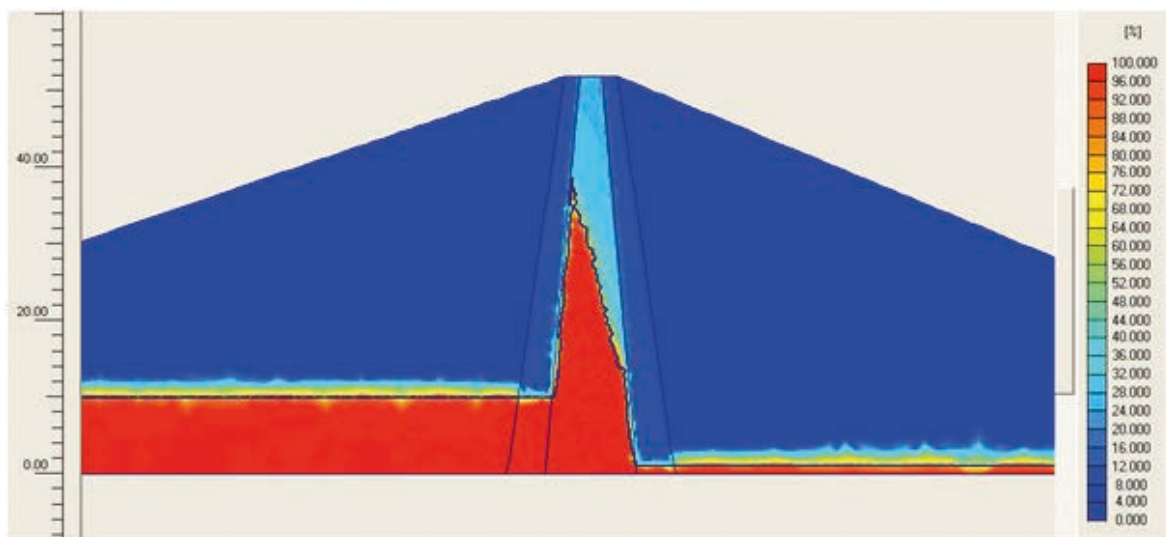
S_e – efektywny stopień nasycenia według równania:

$$S_e = \frac{S - S_r}{S_s - S_r} \quad (10)$$

W uproszczonym modelu Van Genuchtena zakłada się liniową zmienność współczynnika filtracji od ciśnienia ssania gruntu, a także liniową zmienność stopnia nasycenia od ciśnienia ssania. Każdy z modeli Van Genuchtena wymaga od użytkownika



Rys. 9. Stan nasycenia rdzenia zapory Czorsztyn z obliczeń programem PLAXFLOW – stan początkowy, napelnienie 10 m [36]



Rys. 10. Stan nasycenia rdzenia zapory Czorsztyn z obliczeń programem PLAXFLOW – obniżenie poziomu wody do 10 m w czasie 110 dni [36]

nika znajomości parametrów opisujących krzywą retencji gruntu, takich jak: g_a , g_n , g_p , oraz S_r (resztkowy stopień nasycenia), a także współczynnika filtracji w stanie pełnego nasycenia K_s .

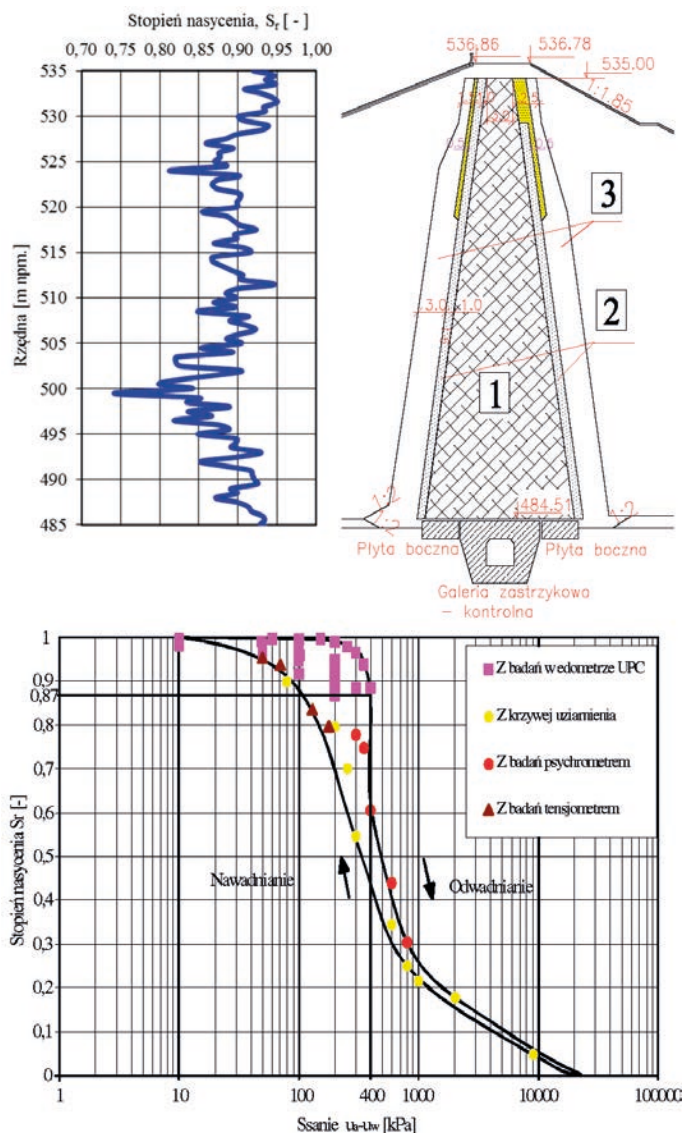
Warunki brzegowe mogą być stałe w czasie (np. niezmienną napętnienie zbiornika retencyjnego, stały poziom zwierciadła wód gruntowych), wówczas wykonanie obliczeń składa się z jednego kroku i jest to obliczenie przepływu wody w stanie ustalonym (*steady flow*). W celu symulacji przepływu zmiennego w czasie (*transient flow*) (np. napętnianie – opróżnianie zbiornika retencyjnego, zmiany poziomu wód gruntowych) należy zdefiniować kilka kroków wykonywania obliczeń, które będą zawierały początkowe i końcowe wartości ciśnień, tj. początkowy i końcowy poziom zwierciadła wody.

Na rys. 9 i 10 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń zmian stanu nasycenia rdzenia zapory podczas napętniania oraz obniżania poziomu wody w zbiorniku [36].

BADANIA LABORATORYJNE WYBRANYCH PARAMETRÓW GRUNTÓW NIENASYCONYCH

Metody badań i aparatura do badań laboratoryjnych są opisane szczegółowo w wielu pracach [2, 4, 5, 8, 13, 19, 21, 23, 29, 31, 35, 37, 38, 45, 50], a także prezentowane na licznych seminariach i konferencjach (tabl. 1). Wysiłek innowacyjny skierowany na rozwój badań laboratoryjnych sprawił, że wyznaczenie parametrów do przedstawionych wcześniej modeli numerycznych nie jest już problemem. Podstawowym ograniczeniem rozwoju tej dziedziny badań jest przede wszystkim ich długotrwały charakter, a także niezwykłe dostatecznie w praktyce inżynierskiej relacje konstytutywne. Na ostatniej konferencji ICSMGE w 2013 roku w Paryżu, Jomni [14] stwierdziła, że zaledwie w kilku artykułach przedstawiono wdrażanie wyników badań, jak i mechaniki gruntów nienasyconych do praktyki inżynierskiej, pomimo tego, że na konferencji mechaniki gruntów nienasyconych UNSAT 2010 (tabl. 1) podkreślano konieczność wdrożenia do praktyki geotechnicznej przynajmniej określenia krzywej retencji wodnej. Wiele właściwości gruntów nienasyconych, zbadanie których jest czasochłonne i wymagające zaawansowanej aparatury, można uzyskać pośrednio, wykorzystując krzywą retencji. Stąd też osobny rozdział tego artykułu poświęcono temu zagadnieniu. Na rys. 11 przedstawiono rozkład początkowego stanu nasycenia rdzenia zapory Czorsztyn oraz krzywą retencji wodnej tego gruntu, którą określono różnymi metodami, uzyskując jej histerezę w zależności, czy mamy do czynienia z procesem wzrostu wilgotności, czy suszeniem.

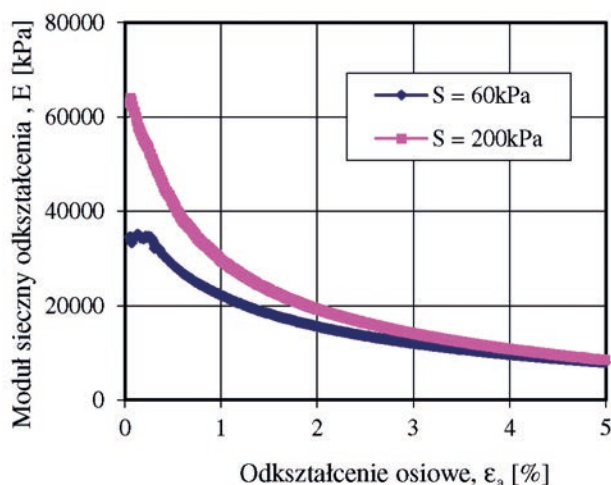
Analizując przedstawione w literaturze wyniki badań gruntów w stanie niepełnego nasycenia w aparacie trójosiowego ściskania, zauważamy, że zdecydowanie częściej są wykonywane badania z kontrolowanym ciśnieniem ssania niż badania w warunkach bez odpływu, czy badania ze stałą wilgotnością. W badaniach z kontrolowanym (zadawanym metodą translacji osi) ciśnieniem ssania stan naprężenia jest jednoznaczny, co ułatwia interpretację wyników tych badań. Na rys. 12 przedstawiono widok aparatury do badań trójosiowych, próbek gruntu w stanie niepełnego nasycenia.



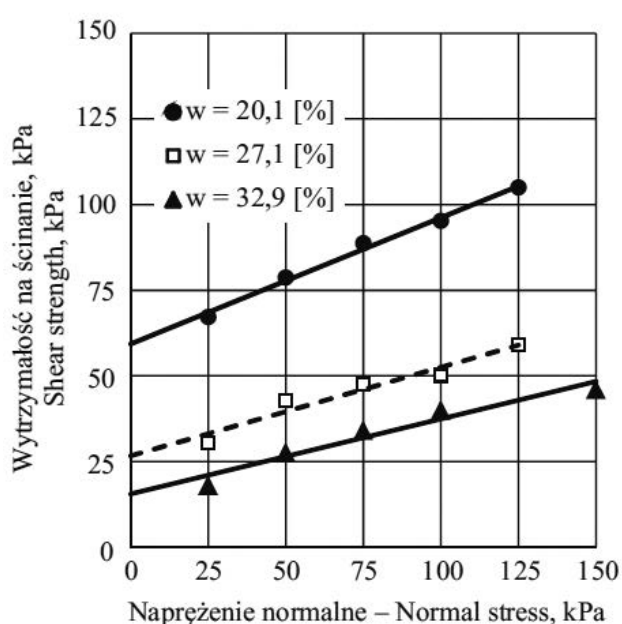
Rys. 11. Początkowy stan nasycenia oraz histereza krzywej retencji gruntu rdzenia zapory Czorsztyn określona na podstawie badań laboratoryjnych [34, 35]



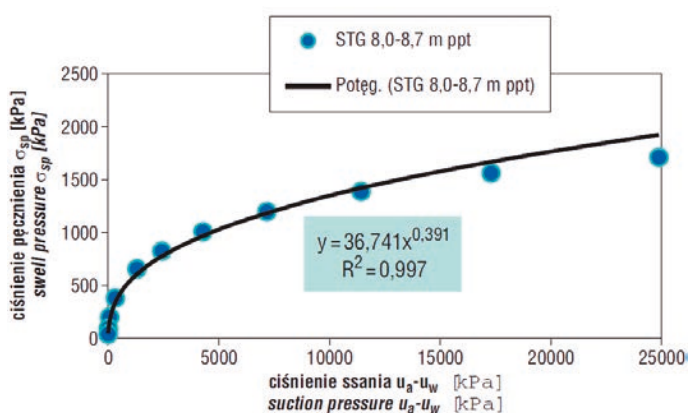
Rys. 12. Stanowisko do badań trójosiowych gruntów nienasyconych



Rys. 13. Wpływ ciśnienia ssania na sztywność gliny z badań trójosiowych [38]



Rys. 14. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania żwiru pylasto-ilestego [50]



Rys. 15. Zależność między ciśnieniem ssania a ciśnieniem pęcznienia łów mio-pliedeńskich [44]

Przykładowe wyniki badań potwierdzające wpływ ciśnienia ssania na sztywność gruntu spoistego przedstawiono na rys. 13.

Znajomość zależności parametrów wytrzymałościowych gruntu od jego uwilgotnienia jest kluczem do wyjaśnienia przyczyn i uwarunkowań powstawania ruchu mas ziemnych. Wzrost wilgotności jest głównym czynnikiem powodującym uruchomienie osuwiska, z jednej strony jako dodatkowe obciążenie wodą, z drugiej zaś powodując spadek wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych oraz wzrost przewodności hydraulicznej, co jeszcze bardziej przyspiesza ten proces. Na rys. 14 przedstawiono wyniki badań w aparacie bezpośredniego ścinania wpływu stanu nasycenia na wytrzymałość żwiru pylasto-ilestego [50].

Ciśnienie pęcznienia i ciśnienie ssania zależą od wielu czynników, między innymi od wilgotności gruntu. Zależność funkcyjna między ciśnieniem pęcznienia a ciśnieniem ssania może być źródłem informacji potrzebnych do prognozowania zachowania się gruntów poddanych zmianom wilgotności. Na podstawie takiej zależności oraz znajomości ciśnienia ssania można szybko przewidzieć podatność danego gruntu na pęcznienie. Uzyskana na podstawie badań laboratoryjnych zależność wskazuje na wzrost ciśnienia pęcznienia wraz ze wzrostem ciśnienia ssania (rys. 15) [44]. Chcąc rozdzielić odkształcenia spowodowane pęcznieniem i odprężeniem Lendo-Siwicka i Garbulewski [19] zaproponowali badania w specjalnie skonstruowanym konsolidometrze KKSZ (rys. 16), za pomocą którego można wykonywać badania z kontrolowaną wilgotnością i ciśnieniem ssania.

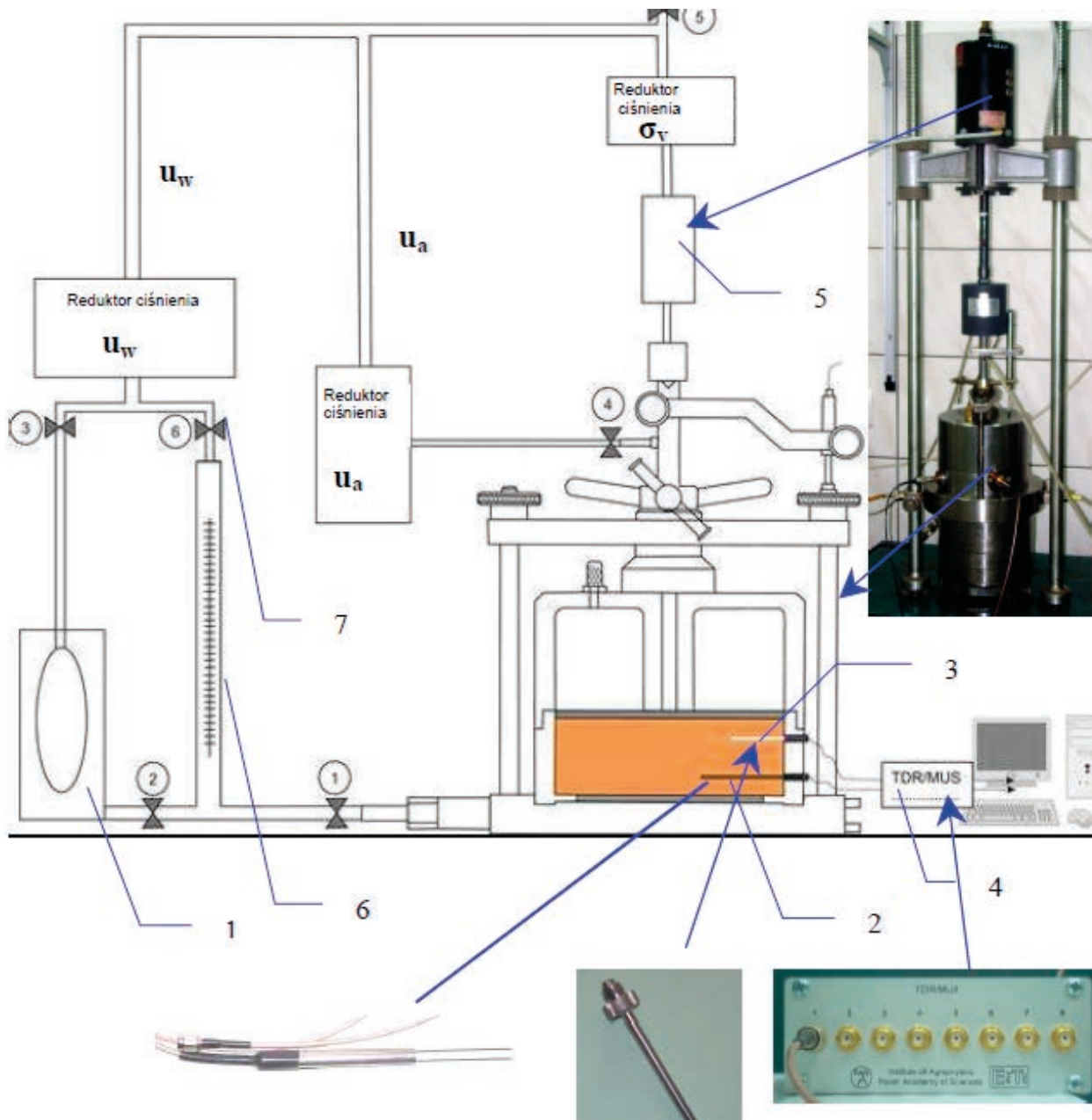
PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w niniejszym artykule zagadnienia obejmujące problematykę badań i modelowania zachowania się gruntów w stanie niepełnego nasycenia ograniczono do najważniejszych, które powinny być rozwijane w Polsce.

W zakresie badań laboratoryjnych: rozszerzenie standardowych badań o badania przynajmniej krzywej retencji wodnej oraz jak zmiany stopnia nasycenia wpływają na parametry mechaniczne, wytrzymałościowe i odkształceniowe oraz parametry hydrauliczne.

W zakresie obliczeń numerycznych jest wskazane rozszerzenie wykonywanych zazwyczaj obliczeń również o analizę zmian stanu nasycenia. W analizach stateczności naturalnych zboczy i skarp, w których stan nasycenia podlega ciągłym zmianom i jest często czynnikiem decydującym o stateczności, należy przyjmować parametry wyznaczone na podstawie badań odzwierciedlających rzeczywiste zachowanie się gruntu.

W aspekcie pojawiających się coraz częściej w Polsce ekstremalnych zjawisk pogodowych, zarówno suszy, jak i nadmiernych opadów, coraz częściej obserwujemy uaktywnianie się różnych procesów (osuwiska, nadmierne osiadania itp.). Niektóre ośrodki akademickie w Polsce dysponują już aparaturą, za pomocą której można wykonywać wiele badań, o których była mowa w tym artykule. Konieczny jest jednak większy wysiłek w zakresie wdrażania do praktyki niektórych metod badawczych i obliczeniowych.



Rys. 16. Konsolidometr KKS-1000

1 – naczynie do zadawania ciśnienia wody w porach, 2 – czujnik TDR do pomiaru wilgotności, 3 – czujnik do pomiaru potencjału ssania, 4 – urządzenie do przetwarzania i zbierania danych, 5 – siłownik pneumatyczny do zadawania obciążenia, 6 – biureta do pomiaru zmian objętości wody [19]

LITERATURA

- Alonso E. E., Gens A., Josa A.: A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40, No. 3, 1990, 405-429.
- Fredlund D. G., Rahardjo H.: *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons, INC, New York, 1993
- Garbulewski K., Skutnik Z., Lendo-Siwicka M.: Unloading/ swelling behavior of unsaturated clay in Warsaw. *Millpress Science Publishers, Rotterdam, The Netherlands. 14th ECSMGE, Madrid, v. 2, 2007, 565-568.*
- Garbulewski K., Skutnik Z.: Badanie gruntów nienasyconych w konsolidometrze UPC. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3-4/2003, 126-128.
- Garbulewski K., Żakowicz S., Wolski W.: Laboratory methods for testing of the swelling soils permeability. *Proc. of the XI ECSMGE, Copenhagen, 1995.*
- Garbulewski K., Żakowicz S.: Suction as an indicator of soil expansive potential. *Proc. of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris 1995.*
- Garbulewski K., Żakowicz S., Król P., Wolski W.: Potencjał wodno-gruntowy w rdzeniu budowanej zapory ziemnej. *Mat. na VI Konferencję Technicznej Kontroli Zapór, Sobieszewo, 1994.*
- Garbulewski K., Żakowicz S.: Application of TDR technique for compaction control of engineered fills. *Proc. XIV ICSMFE, Hamburg, 1997.*
- Garbulewski K., Żakowicz S.: Znaczenie stanu nasycenia gruntu w kontroli zapór ziemnych z rdzeniem. *Mat. na VII Konferencję Technicznej Kontroli Zapór, Ryto, 1996.*
- Garbulewski K.: Wpływ pęcznienia-odpężenia na przepuszczalność hydrauliczną gruntów drobnoziarnistych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budownictwo, Z. 28, t. 1, 2006, 69-79.*

11. Gens A., Alonso E.E.: A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. Geotechnical Engineering Department, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Gran Capitán s/n. Módulo D-2, Technical University of Catalunya, 08034 Barcelona, Spain, 1992, 1013-1031.
12. Goulding B. R.: Tensile strength, shear strength, and effective stress for unsaturated sand, A dissertation, presented to the Faculty of the Graduate School University of Missouri – Columbia 2006
13. Grabowska-Olszewska B.: Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych, PWN, Warszawa 1998.
14. Jommi C.: Unsaturated soils, General report of TC 106, Proc. of the 18th ICSMGE, Paris 2013
15. Kaczyński R.: Badanie gruntów nienasyconych. Materiały z Seminarium „Nowoczesne metody badań gruntów”, Warszawa 2003.
16. Kumor M.: Badanie fazy skurcz-pęcznienie iłu jako możliwość przewidywania przemieszczeń podłoża ekspansywnego. Z. Nauk Polit. Białostockiej, Budownictwo, z. 28, 2006.
17. Kumor M.K., Ciesielski Z.: Awaria budynku mieszkalnego posadowionego na ile plicieńskim. Inżynieria i Budownictwo, 10/1984, 372-375.
18. Lendo M., Skutnik Z.: Badania współczynnika konsolidacji c_v nienasyconych iłów plicieńskich. Przegląd Naukowy WliKŚ, rocznik XIV, z. 2/32, 2005, 40-49.
19. Lendo-Siwicka M., Garbulewski K.: Nowy konsolidometr do badania gruntów nienasyconych. Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2010, 193-200.
20. Leong E. C., Rahardjo H., Fredlund D. G.: Application of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. Proc. of the 8th East Asian Pacific Conf. on Structural Eng. And Construction, Singapore, 2001.
21. Lipiński M.J., Wdowska M.: Wybrane standardy określania parametrów geotechnicznych na podstawie badań laboratoryjnych, Architectura (Budownictwo), nr 13 (1), 2014, 73–89.
22. Lloret A., Alonso E. E.: State surfaces for partially saturated soils. Proc. XI ICSMFE, San Francisco, USA, 557-562. 1985.
23. Lu N., Likos W.: Unsaturated soil mechanics, John Wiley and Sons, INC, New York, 2004.
24. Malaya, C., Sreedeeep, S.: A laboratory procedure for measuring high soil suction. Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 34, 2011.
25. Matyas E. L. & Radhakrishna H. S.: Volume change characteristics of partially saturated soils. Géotechnique 18, No. 4, 1968, 432-448.
26. Niedzielski A., Kumor A.: Geotechniczne problemy posadowień na gruntach ekspansywnych w Polsce. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2009, 180-190.
27. Olivella S., Gens A. i inni: CODE BRIGHT, User's Guide, Departamento de Ingenieria del Terreno – Universidad Politècnica de Catalunya, 1997.
28. Pournaghiazar M, Russell A.R. i Khalili N.: The challenges of performing laboratory controlled cone penetration tests in unsaturated soils. Unsaturated Soils – Alonso & Gens (eds) © Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60428-4, 2011.
29. Ridley A.M., Burland J.B.: A new instrument for the measurement of soil suction, Géotechnique 43, No. 2, 1993, 321-324.
30. Rojas, E., Chávez, O.: Volumetric behavior of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 50(2), Online publication date: 1-Feb-2013, 209-222.
31. Romero E.: Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study, Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona 1999.
32. Sheng D, Zhou A.: Shear Strength Criteria for Unsaturated Soils. Geotech. Geol Eng 29: 2011, 145-159.
33. Skutnik Z.: Code-Bright application for numerical calculation of Czorsztyn Dam. Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW, Land Reclamation, z. 34, 113-120.
34. Skutnik Z.: Weryfikacja parametrów geotechnicznych rdzenia zapory nasypowej na podstawie badań prowadzonych podczas budowy. Praca doktorska, SGGW, Warszawa, 2002.
35. Skutnik Z.: Nowe metody badań i obliczeń numerycznych zagęszczonych nienasyconych gruntów spoistych rdzenia zapory nasypowej. XV Konferencja Naukowa „Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej Korbielów, 2004.
36. Skutnik Z., Szymański T.: Modelowanie numeryczne zmian stanu nasylenia i ciśnienia wody w porach w rdzeniu zapory Czorsztyn za pomocą programu Plaxflow. Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, R. 18, z. 4, 2009, 87-96.
37. Skutnik Z.: Badanie parametrów wytrzymałościowych piasku średniego w aparacie trójosiowego ściskania z kontrolowanym ciśnieniem ssania. Budownictwo i Inżynieria Środowiska/Politechnika Białostocka, Vol. 4 No. 2, 2013, 159-165.
38. Skutnik Z., Biliniak M.: Suction controlled triaxial testing of unsaturated medium sand and sandy clay. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Land Reclamation No 46 (4), 2014, 302-307.
39. Skutnik Z., Garbulewski K.: Suction – swelling relation for Warsaw Clays. Proceedings of 16th ICSMGE. Millpress Science Publishers Rotterdam, Osaka, vol. 2, 2005, 595-598.
40. Skutnik Z., Lendo-Siwicka M., Garbulewski K.: Assessment of the c_v coefficient for unsaturated Warsaw Clay. Unsaturated soils, Proc. of the fifth international conference on unsaturated soils : Barcelona, Spain, 6-8 September Vol. 1 / ed. Eduardo Alonso & Antonio Gens. 2010, 371-380.
41. Toll D.G.: A framework for unsaturated soil behaviour. Géotechnique 40 (1), 1990, 31-44.
42. Vanapalli S. K., Fredlund D. E., Pufahl D. E.: The influence of soil structure and stress history on the soil – water characteristics of a compacted till. Géotechnique 49, No. 2, 1999, 143-159.
43. Vu H. Q., Fredlund D. G.: Challenges to modelling heave in expansive soils. Canadian Geotechnical Journal, 43(12): 2006, 1249-1272.
44. Wójcik E. Zależność między wilgotnością a ciśnieniem ssania w profile mio-plicieńskich iłów na Stegnach. Przegląd Geologiczny vol. 53, nr 8, 2005.
45. Wójcik E., Trzeciński J., Łądkiewicz K.: Zmiany mikrostrukturalne past gruntowych pod wpływem ciśnienia ssania. Przegląd Geologiczny, vol. 61, nr 1, 2013.
46. Wolski W., Skutnik Z., Król P., Barański T.: Parametry geotechniczne rdzenia zapory Czorsztyn – weryfikacja „podczas budowy”. Gospodarka Wodna, Nr 12, Wyd. Sigma NOT, 1997, 414-417.
47. Woodburn J. A. Holden J. i Peter P.: The transistor psychrometer: a new instrument for measuring soil suction. In S.L. Houston and W.K. Wray (eds.), Unsaturated Soils – Geotechnical Special Publications, No. 39, ASCE, Dallas, 1993, 91-102.
48. Youndfu Xu.: Bearing capacity of unsaturated expansive soils. Geotechnical and Geological Engineering, 01, 2004, 611-625.
49. Zaradny H.: Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach. Rozprawa habilitacyjna, IBW PAN, Gdańsk 1990.
50. Zydrón T., Gadowska B.: Wytrzymałość na ścinanie gruntów nienasyconych w świetle badań laboratoryjnych oraz modeli empirycznych. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumietus, nr 12(4), 2013, 119-130.