

Nowoczesne badania trójosiowe istotnym wsparciem współczesnej geotechniki

Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. IBW PAN, mgr inż. Marcin Smyczyński
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Badania trójosiowego ściskania dostarczają najwięcej informacji na temat mechanicznych i odkształceniowych charakterystyk badanego ośrodka. Pomimo tego, że ich prowadzenie jest bardziej skomplikowane i wymagające w porównaniu z innymi badaniami, na przykład bezpośredniego ścinania, stały się one współcześnie podstawowymi testami wytrzymałościowymi prowadzonymi w laboratoriach mechaniki gruntów. Za ich pomocą można poznać reakcję gruntu w różnych warunkach obciążenia, nawodnienia i drenażu, bez wymuszania powierzchni poślizgu przy ścinaniu. Dodatkowo, w przypadku zaawansowanych systemów trójosiowych niebagatelne znaczenie dla celów poznawczych mają takie aspekty jak możliwość dowolnego kształtowania ścieżki naprężenia, lokalnego pomiaru przemieszczeń, kontroli ciśnienia wody w porach gruntu i stanu nasycenia ośrodka, czy połączenia badania trójosiowego na przykład z pomiarem prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w badanej próbce gruntu, w różnych fazach jego trwania. Stąd badania trójosiowe są podstawowym narzędziem do weryfikacji i kalibracji wszelkiego rodzaju modeli konstytutywnych opisujących pracę ośrodka gruntowego. Takie badania prowadzone są również od lat w laboratorium geotechnicznym Instytutu Budownictwa Wodnego PAN, gdzie bada się między innymi mechanizmy rządzące zjawiskiem upłynnienia gruntów niespoistych zarówno pod wpływem obciążenia monotonicznego, jak i cyklicznego, przy różnych warunkach nasycenia ośrodka gruntowego. Za pomocą specjalistycznych badań trójosiowych poszukiwana jest odpowiedź na pytanie, jaka jest reakcja gruntów na obciążenie wewnętrzne zmiennym ciśnieniem porowym, co odpowiada na przykład warunkom, na jakie wystawione jest dno morskie w czasie falowania sztormowego. Prowadzone są również badania reakcji gruntów w pełnym, trójwymiarowym stanie naprężenia umożliwiające zweryfikowanie modeli, które stworzono na bazie doświadczeń osiowosymetrycznych oraz takich, które do tej pory funkcjonowały jedynie teoretycznie, czy też badania reakcji mocno spoistych ilów trzeciorzędowych na próbkach o nie-naruszonej strukturze pobranych ze znacznych głębokości w celu identyfikacji osłabionych glaciektogenicznie powierzchni ścięcia.

Badania trójosiowe mają olbrzymie znaczenie praktyczne. Dostarczają informacji o wytrzymałości ośrodka, jak również wyszukanych parametrów gruntowych potrzebnych do modelowania numerycznego.

Kluczowe znaczenie dla jakości otrzymanych wyników ma staranność wykonywania badań trójosiowych, jak również stosowanie niestandardowych technik badawczych, szczególnie w przypadku wykorzystywania wyników do celów poznawczych, gdyż już od najwcześniejszego etapu badania eksperymentator musi mierzyć się z szeregiem problemów, których rozwiązanie ma wpływ na wynik końcowy.

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane elementy właściwego prowadzenia badań trójosiowych, będące wynikiem wieloletniego doświadczenia w wykonywaniu takich badań w laboratorium IBW PAN, na tle bazy sprzętowej, będącej w posiadaniu Instytutu, omawiając przy tym możliwości współczesnych aparatów trójosiowych.

FORMOWANIE I PRZYGOTOWANIE PRÓBEK GRUNTÓW NIESPOISTYCH DO BADAŃ

W przypadku niespoistego ośrodka gruntowego brak spistości stanowi istotną cechę odróżniającą go od typowego ciała stałego. Powoduje to między innymi, że pobranie próby o nie-naruszonej strukturze do badań laboratoryjnych jest praktycznie niemożliwe. Istnieją co prawda w chwili obecnej specjalistyczne próbki, które umożliwiają pobór takich prób (tzw. próbki żelowe – typu *gel-push*), niemniej jednak ich cena oraz mała popularność powoduje, że nie mają jeszcze zbyt dużego praktycznego zastosowania. Stąd, w celu dokładnej kontroli stopnia upakowania ziaren w próbce z gruntu niespoistego, czy to ze względu na prowadzone badania poznawcze, aby wiernie odwzorzyć rzeczywiste zagęszczenie gruntu występujące w warunkach *in situ*, istotne jest zastosowanie odpowiednich procedur formowania próbek do badań trójosiowych.



Rys. 1. Forma z rozciągniętą membraną

Do wyższych stopni zagęszczenia wystarczy stosować tradycyjny sposób formowania próbek metodą depozycji na sucho poprzez wypełnianie dwudzielnej formy wyłożonej gumową membraną badanym gruntem niespoistym o zadanej masie, czy też stosować metodę na mokro, wsypując grunt do formy wypełnionej wcześniej częściowo wodą, a następnie zagęszczając próbkę tak, aby przyjęta masa idealnie wypełniła objętość formy. Należy przy tym pamiętać o dokładnym ułożeniu i zapewnieniu przylegania gumowej membrany we wnętrzu formy (rys. 1), co uzyskuje się przez usunięcie znajdującego się między nimi powietrza i stworzenie podciśnienia, lecz to wydaje się być ogólnie przyjętym i stosowanym standardem.

Większym wyzwaniem przygotowania próbki do badań jest uzyskanie pożądanego stopnia zagęszczenia próbek luźniejszych, a szczególnie bardzo luźnych, których formowanie jest niezbędne, na przykład w badaniach zjawiska upłynniania się gruntu. Wśród metod, które można zastosować, szczególnie skuteczna jest tak zwana „metoda podzagęszczania” (z jęz. ang. *undercompaction method*), zaproponowana oryginalnie przez Ladda [1]. Polega ona na usypywaniu próbki gruntu niespoistego o niewielkiej wilgotności (od 2 do 5%) warstwami o okre-

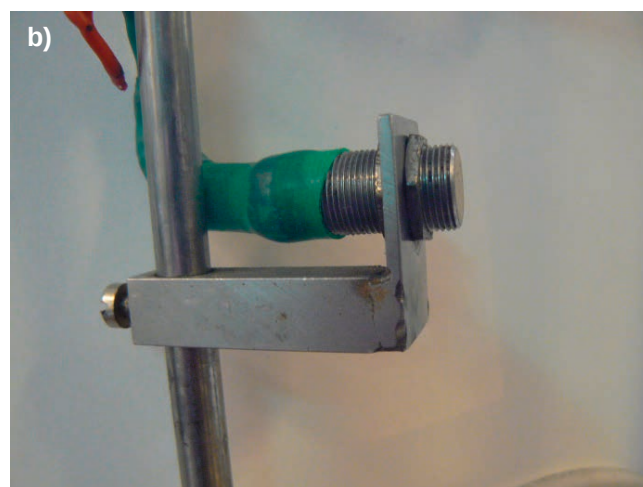
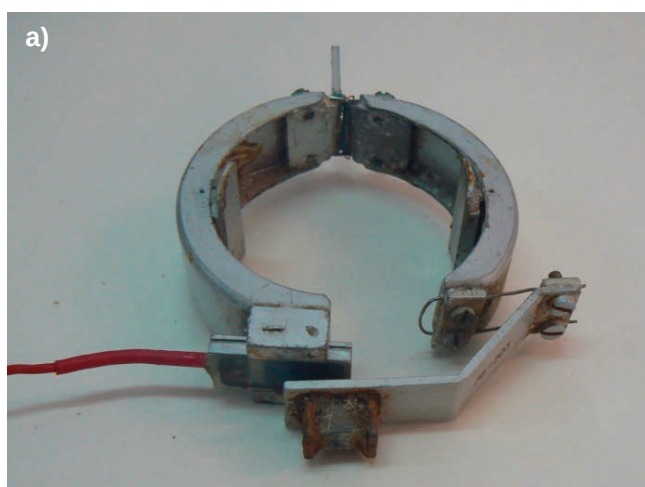
ślonej wysokości i masie w danej warstwie w taki sposób, aby niżej położone warstwy dogęszczały się w trakcie usypywania. Wymaga to starannego doboru poszczególnych warstw, tak aby uzyskać próbkę o założonym wcześniej wskaźniku porowatości, a zarazem o jednorodnym zagęszczeniu.

Po uformowaniu próbki, aby uchronić ją od zniszczenia w trakcie procesu usuwania formy, instalacji czujników do lokalnego pomiaru przemieszczeń, zamknięcia komory aparatu, zalania jej wodą i zadanie ciśnienia hydrostatycznego utrzymującego próbkę, stosuje się niewielkie podciśnienie (około 20 kPa). Wartość ciśnienia w porach gruntu mniejsza niż ciśnienie atmosferyczne powoduje powstanie stanu naprężenia, w którym średnie naprężenie efektywne ma dodatnią wartość równą wartości wprowadzonego podciśnienia. W kolejnym etapie, wykorzystując elektroniczne sterowanie kontrolerów ciśnienia zamienia się podciśnienie w próbce na ciśnienie wody w komorze, utrzymując stały, początkowy poziom ciśnienia efektywnego w próbce na poziomie 20 kPa.

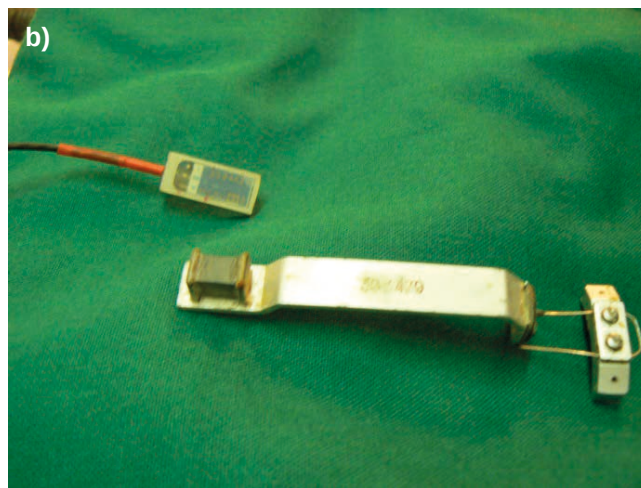
Ważnym aspektem przygotowania próbki do badania jest również jej właściwe nasycenie. Najczęściej pożądanym jest, aby pory gruntu były całkowicie wypełnione wodą. Za wystarczające w warunkach laboratoryjnych uznaje się osiągnięcie odpowiednio wysokiej wartości parametru Skempton'a B ($B > 0,96$), [2]. Aby zrealizować ten cel, powietrze występujące w porach gruntowych zastępuje się dwutlenkiem węgla (ang. *flushing CO₂*), który znacznie lepiej rozpuszcza się w wodzie, a po wypełnieniu porów wodą (co również powinno odbywać się w sposób kontrolowany, przy małej prędkości nasycania oraz pomiarze ilości wody wtłaczanej do próbki) podnosi się ciśnienie wyrównawcze, tak aby ewentualne pęcherzyki powietrza lub dwutlenku węgla zostały ściśnięte lub rozpuściły się w wodzie. W celu zwiększenia rozpuszczalności CO₂ do nasączania próbek należy stosować odpowietrzoną wodę destylowaną.

POMIAR ODKSZTAŁCEŃ I PROBLEMY Z NIM ZWIĄZANE

W czasie badań trójosiowego ściskania bardzo istotnym zagadnieniem jest pomiar deformacji próbki. Większość aparatów



Rys. 2. Naprówkowe czujniki przemieszczeń bocznych: Halla (a), zbliżeniowy (b)



Rys. 3. Napróbkowe czujniki przemieszczeń typu LVDT (a) i Halla (b)

trójosiowych umożliwia jedynie zewnętrzny pomiar przemieszczeń pionowych. Informacja ta jest jednak niewystarczająca na przykład do określenia zmian objętości próbki. Stąd konieczny jest również pomiar przemieszczeń bocznych próbki. Zazwyczaj realizuje się go lokalnie, poprzez stosowanie napróbkowych czujników przemieszczenia. Obecnie stosowane są różne rodzaje takich czujników, z których najpopularniejsze to czujniki typu Halla, zbliżeniowe czy LVDT. Niektóre z nich pokazano na rys. 2.

Konsekwencją stosowania pomiaru lokalnego może być ryzyko oparcia się próbki o czujnik po wyczerpaniu jego zakresu bądź czujnika o elementy komory. Sytuacja taka powoduje pozorne wzmocnienie się próbki i zakłamanie wyników badania.

Podobnie, lokalnych czujników przemieszczenia używa się do pomiaru przemieszczeń pionowych. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe czujniki napróbkowe typu: LVDT i Halla. Zapewniają one większą dokładność pomiaru, gdyż wolne są od wpływu czynników zaburzających pomiar zewnętrzny. Ważnym elementem stosowania czujników lokalnych jest również to, że pomiar deformacji próbki można rozpocząć już na wstępnym etapie jej przygotowywania do badań, co ma niezwykle istotne znaczenie dla wiarygodnego wyznaczenia początkowego stanu gruntu (szczególnie niespoistego), wyrażonego na przykład wskaźnikiem porowatości, przed przyłożeniem jakiegokolwiek obciążenia oraz kontrolą jego zmiany w trakcie badania, [3].

W przypadku badań związanych z wyznaczaniem parametrów gruntu w stanie ustalonym deformacji mamy zazwyczaj do czynienia z bardzo dużymi odkształceniami pionowymi rzędu 30%. W takiej sytuacji znaczenia nabiera charakter deformacji próbki. Próbkę gruntu najczęściej przyjmują kształt beczki, gdzie przemieszczenia poziome w środkowej jej części są zdecydowanie większe niż w sąsiedztwie górnej i dolnej kopułki aparatu. Dzieje się tak ze względu na tarcie między gruntem, z którego utworzona jest próbka, a metalowymi elementami, które ją zamykają. To oczywiście znacznie ogranicza możliwość stosowania czujników do lokalnego pomiaru przemieszczeń ze względu na stosunkowo niewielki zakres ich działania. W tym przypadku istotną rolę odgrywają czujniki zbliżeniowe i sama konstrukcja aparatu trójosiowego pozwalająca na zmianę położenia tych czujników względem próbki, bez przerywania badania, [2]. Traci się jednak wówczas kontrolę nad zmianami

odkształceń bocznych. Mając świadomość takiego zachowania, do ich wyznaczania można stosować pomiar objętości wody wypływającej z lub wpływającej do próbki (przy pełnym nasyceniu ośrodka utożsamianej ze zmianami objętości próbki) [4].

NIETYPOWE ŚCIEŻKI NAPRĘŻENIA W OSIOWOSYMETRYCZNYM STANIE NAPRĘŻENIA

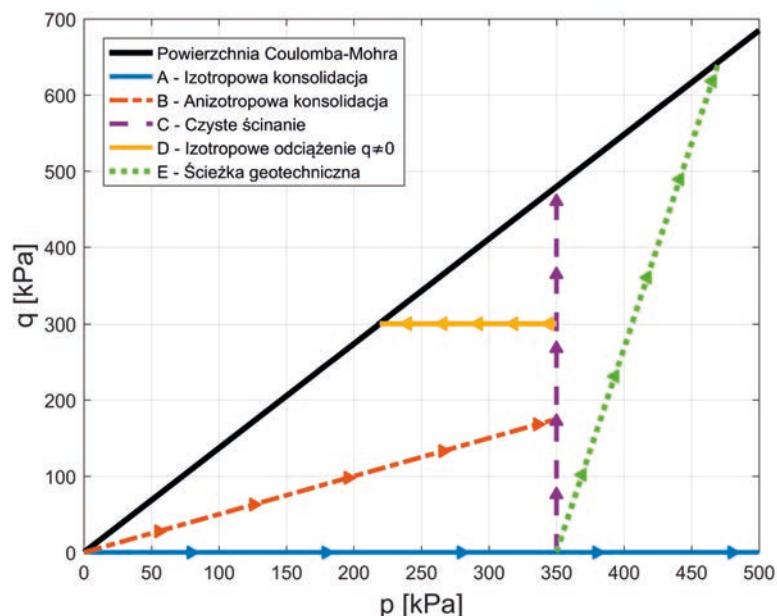
Standardowe aparaty trójosiowe pozwalają najczęściej na realizację jedynie prostych ścieżek naprężenia, takich jak izotropowe ściskanie lub ścinanie tak zwaną ścieżką geotechniczną (ściskanie wywołane monotonicznym przyrostem wartości naprężenia pionowego przy zachowaniu stałej wartości ciśnienia wody w komorze) (rys. 4 – ścieżki A i E).

Do tworzenia i kalibracji zaawansowanych gruntowych modeli konstytutywnych często potrzebne jest jednak przeprowadzenie doświadczeń wzdłuż innych, bardziej nietypowych ścieżek naprężenia, takich jak na przykład anizotropowa konsolidacja, czyste ścinanie czy odciążenie przy stałym niezerowym dewiatorze (rys. 4 – ścieżki B, C i D).

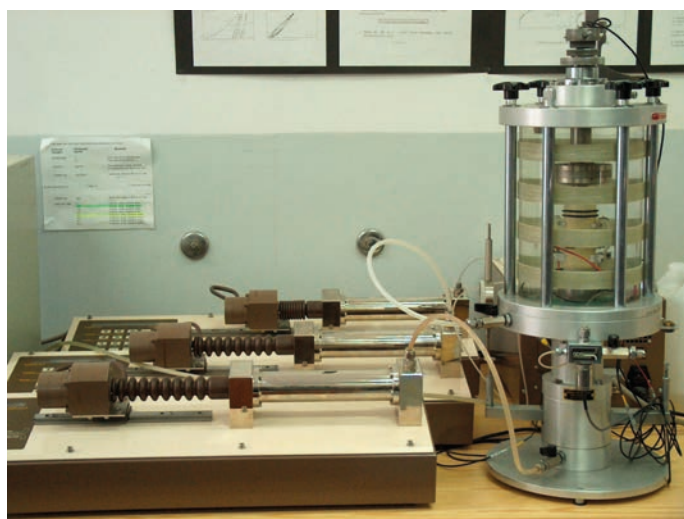
Możliwość zadania dowolnej liniowej ścieżki obciążenia w przestrzeni naprężeń jest wielkim atutem aparatu trójosiowego. W tym celu niezbędne jest niezależne sterowanie ciśnieniem w komorze aparatu oraz naprężeniem pionowym. Efekt ten można uzyskać na przykład w aparacie firmy GDS Instruments Ltd. wyposażonym w niezależne kontrolery ciśnienia oraz odpowiednie oprogramowanie sterujące systemem obciążenia (rys. 5).

Składa się on z komory typu Bishopa-Wesleya, z ruchomym stolikiem, poprzez który zadawane jest obciążenie pionowe. Poprzez nasadkę zamykającą i kulę próbka połączona jest przegubowo z komorą obciążeniową, zespoloną w trakcie procesu obciążania na sztywno z komorą aparatu trójosiowego.

Zastosowanie takiego rozwiązania konstrukcyjnego ma jednak swoją wadę powodującą możliwość powstania mimośrodowego obciążania próbki w początkowej fazie ścinania. Ponadto, na skutek dopasowywania się do siebie w początkowej fazie badania elementów przegubu przekazującego obciążenie pionowe, następują zazwyczaj przemieszczenia, które nie są rzeczywistymi przemieszczeniami próbki. Wpływ takiego rodzaju konstruk-



Rys. 4. Przykłady nietypowych ścieżek naprężenia

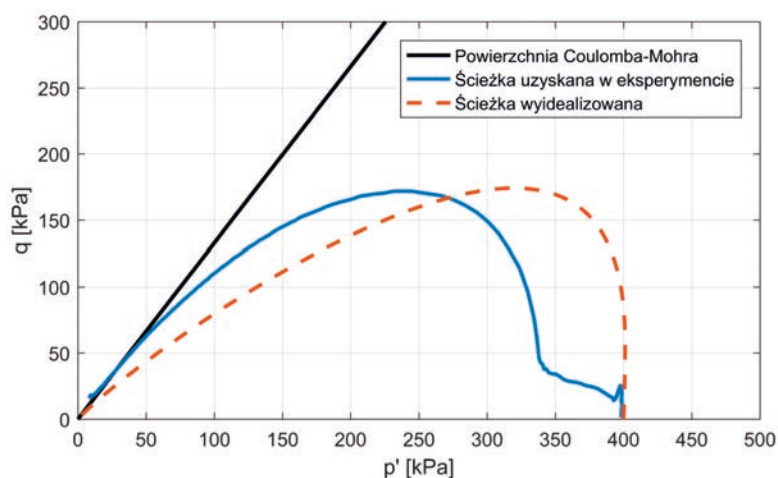


Rys. 5. Aparat trójosiowego ściskania typu Bishopa-Wesleya firmy GDS Instruments Ltd. z systemem kontrolerów ciśnienia

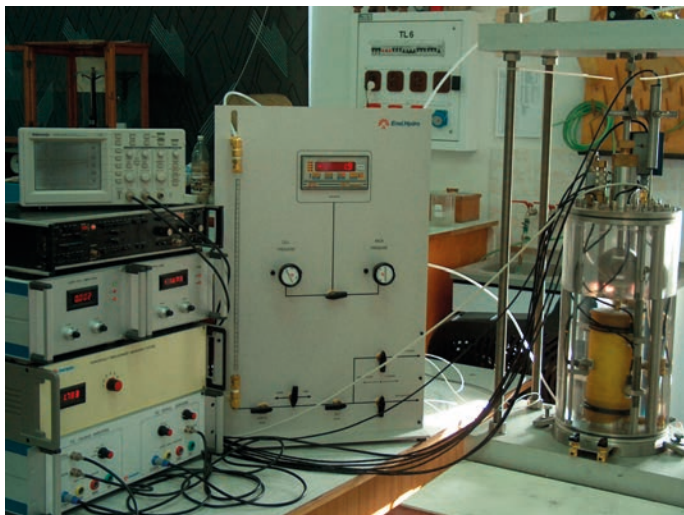
cji aparatu na ścieżkę naprężenia widoczny jest dobrze na rys. 6, przedstawiającym wyniki ścinania nawodnionego gruntu niespoistego o początkowym stanie kontraktywnym w warunkach bez odpływu wody z porów. W takim badaniu obserwuje się charakterystyczne „snucie się” ścieżki naprężenia nim wejdzie ona na właściwą trajektorię.

CYKLICZNE BADANIA TRÓJOSIOWE

Współczesne aparaty trójosiowe umożliwiają prowadzenie badań cyklicznego trójosiowego ściskania przy częstotliwościach dochodzących do 10 Hz. Dzięki nim możliwe jest rozpoznanie reakcji gruntu, jak też weryfikacja i kalibracja modeli mających prognozować zachowanie się ośrodka gruntowego poddanego nietypowym obciążeniom cyklicznym wywołanym trzęsieniami ziemi, wstrząsami górniczymi, pracą maszyn obciążających fundamenty, oddziaływaniem sztormowym falowania morskiego czy ruchem różnego rodzaju pojazdów.



Rys. 6. Efekt „dopasowywania się” układu obciążającego w początkowej fazie badania w przypadku połączenia przegubowego w aparacie trójosiowym



Rys. 7. Cykliczny aparat trójosiowy firmy Enel Hydro

Zazwyczaj obciążenie cykliczne w warunkach trójosiowego ściskania realizowane jest poprzez zmianę naprężenia pionowego σ_1 . Ponieważ $q = \sigma_1 - \sigma_3$, a w komorze utrzymywana jest stała wartość ciśnienia σ_3 , uzyskiwana w ten sposób zmiana dewiatora q jest opisana równaniem:

$$q = q_0 + q_m \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

gdzie:

q_0 – początkowa wartość dewiatora,

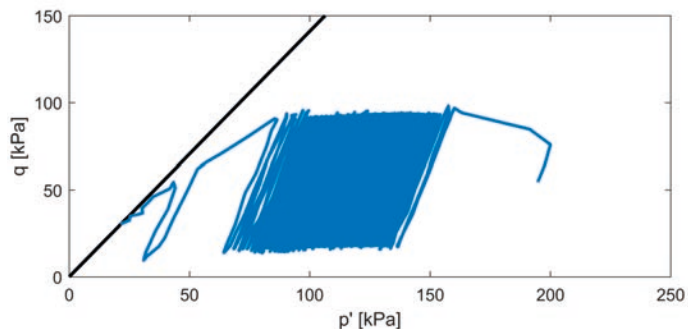
q_m – amplituda dewiatora,

f – częstotliwość obciążenia,

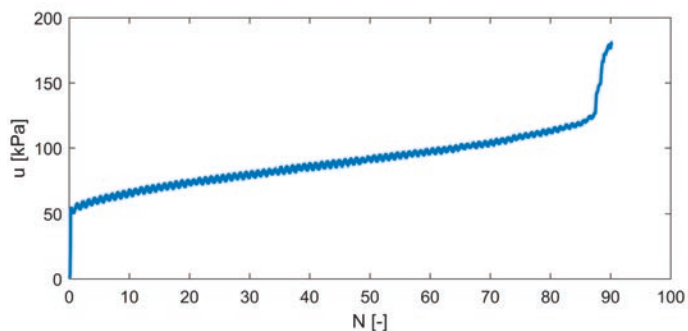
t – czas.

Przykładem urządzenia przeznaczonego do takich badań jest znajdujący się w IBW PAN cykliczny aparat trójosiowego ściskania (rys. 7). Ma on tłok sztywno połączony z tłoczyskiem, co pozwala na zapewnienie idealnie osiowego obciążenia próbki, eliminując wady połączenia komory obciążeniowej przez kulkę omawiane wcześniej. Istotną rolę odgrywa przy tym inna konstrukcja aparatu w porównaniu z tym z rys. 5, posiadająca wewnętrzne pręty łączące jego dolną i górną część. Cykliczny aparat trójosiowy będący na wyposażeniu laboratorium IBW PAN ma szereg czujników do lokalnego (napróbkowego) pomiaru przemieszczeń (czujniki zbliżeniowe) oraz elementy piezoelektryczne umożliwiające pomiar prędkości rozchodzenia się poprzecznej i podłużnej fali sejsmicznej, co stanowi niezwykle istotne uzupełnienie prowadzonych badań z punktu widzenia wyznaczania charakterystyk odkształceniowych, szczególnie w zakresie małych odkształceń i związanych z nimi modułów sztywności opisujących sprężystą reakcję badanego gruntu.

Zmiany naprężenia pionowego realizowane są poprzez układ pneumatyczny, co pozwala na zadawanie szybkozmiennych obciążeń z częstotliwością do 2 Hz. Wysoka częstotliwość umożliwia efektywne prowadzenie doświadczeń, badając reakcje gruntów poddanych nawet dziesiątkom tysięcy cykli obciążenia. Dla porównania, za pomocą pierwszego z prezentowanych aparatów trójosiowych (typu Bishopa-Wesleya – rys. 5) można również zadawać, w ograniczonym zakresie, obciążenia cykliczne, lecz z częstotliwością maksymalną wynoszącą jedynie $f = 0,0167$ Hz. Dodatkowo, system zadawania obciążeń w aparacie cyklicznym jest w pełni zautomatyzowany, obciążenie jest definiowane poprzez wartość amplitudy dewiatora na-



Rys. 8. Ścieżka naprężenia dla obciążenia cyklicznego



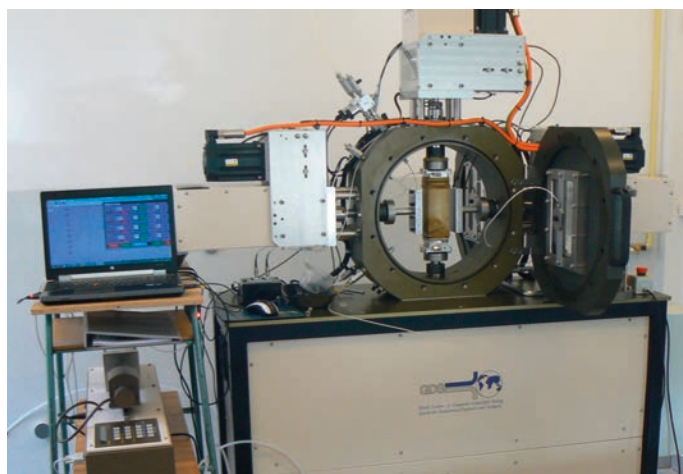
Rys. 9. Zmiany ciśnienia wody z porach w funkcji liczby cykli obciążenia

prężenia oraz liczbę cykli obciążenia, podczas gdy w przypadku aparatu Bishopa-Wesleya sinusoidalne obciążenia przybliżana jest liniowymi odcinkami z ograniczoną liczbą cykli obciążenia.

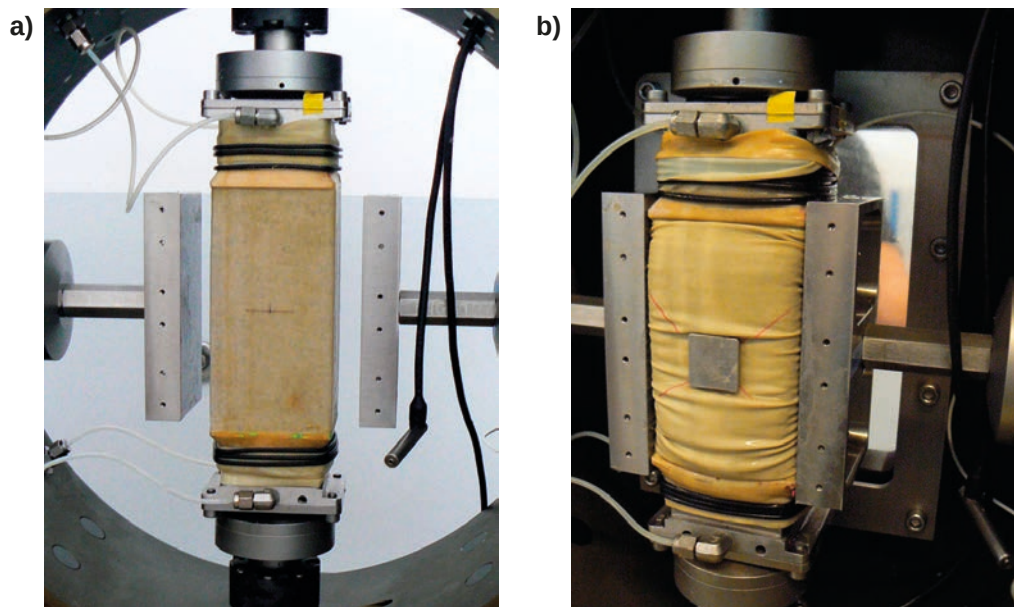
Przykładowe wyniki badania cyklicznego trójosiowego cyklicznego ściskania w warunkach bez odpływu wody z porów przedstawiono na rys. 8 i 9. Zaobserwować na nich można, że na skutek obciążenia cyklicznego próbka gruntu niespoistego uległa zjawisku upłynięcia w 87 cyklu obciążenia.

PEŁNY STAN NAPRĘŻENIA I PSO

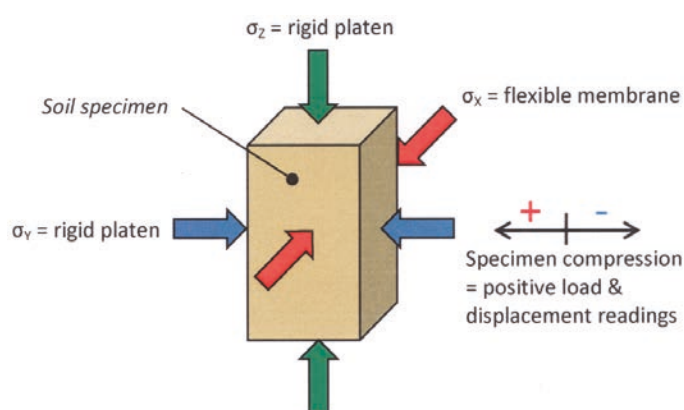
Współczesna aparatura pozwala na wyjście z ograniczeń osiowosymetrycznego stanu naprężenia, jakie narzucają klasyczne aparaty trójosiowe. Na rys. 10 przedstawiono tak zwany



Rys. 10. Prawdziwy aparat trójosiowy – TTA



Rys. 11. Próbkę wewnątrz komory aparatu – po lewej przed, po prawej po wykonaniu badania



Rys. 12. Pełny stan naprężenia w „prawdziwym aparacie trójosiowego ściskania”

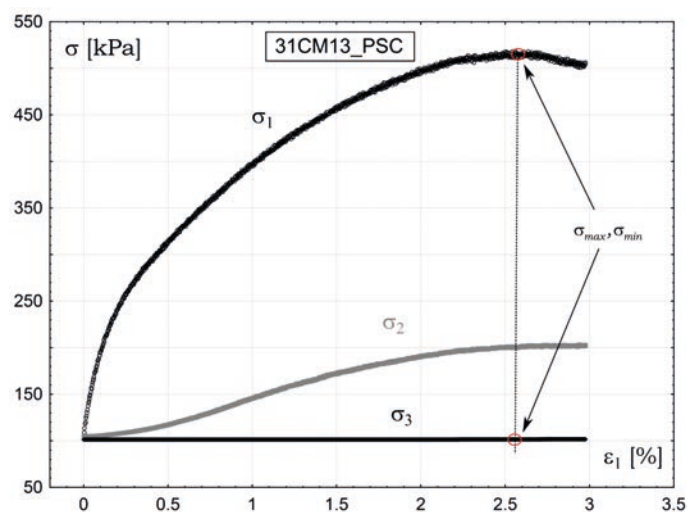
„prawdziwy aparat trójosiowego ściskania” (ang. *True Triaxial Apparatus* – TTA), znajdujący się również w IBW PAN. Jest to jedyny w Polsce tego rodzaju aparat.

Umożliwia on przeprowadzanie badań w pełnym stanie naprężenia z niezależną kontrolą wszystkich trzech głównych składowych tensora naprężenia. W odróżnieniu od tradycyjnych aparatów trójosiowych, w których badania prowadzi się na próbkach walcowych, badania w aparacie TTA wykonywane są na próbce prostopadłościowej (rys. 11). Zadawanie obciążeń odbywa się za pomocą dwóch par siłowników elektrycznych (w pionie – σ_z oraz jednym z kierunków poziomych – σ_y) oraz ciśnienia wody w komorze (na drugim z kierunków poziomych – σ_x) (rys. 12).

Gdy ściskana próbka doznaje nieco większych odkształceń, odpowiadających na przykład stanowi ustaleniemu, zastosowanie układu, w którym obciążenie zadawane jest poprzez sztywne ścianki przesuwane siłownikami mechanicznymi na dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach powoduje powstanie problemu potencjalnej ich kolizji. Należy wówczas stosować specjalne procedury badawcze, w ramach których na przykład powiększa się nieznacznie początkowe wymiary próbki dla jednego wybranego kierunku w stosunku do drugiego.

Możliwość operowania w pełnym stanie naprężenia pozwala na prowadzenie badań weryfikujących modele konstytutywne, między innymi w szczególnym przypadku, jakim jest płaski stan odkształcenia. Stan taki jest bardzo charakterystyczny dla wszelkiego rodzaju budowli ziemnych oraz różnych zagadnień geotechnicznych związanych ze współpracą budowli z podłożem gruntowym. W przypadku „prawdziwego aparatu trójosiowego ściskania” stan ten osiąga się poprzez uzyskanie styku płyt bocznych i próbki (rys. 11) i zablokowanie ich dalszego ruchu w trakcie badania. Rejestrowany jest wówczas nacisk, jaki próbka wywiera na płyty obciążające, a na jego podstawie określone jest naprężenie boczne. Przykładowe wyniki badania trójosiowego ściskania w płaskim stanie odkształcenia przedstawiono na rys. 13.

Ciekawym aspektem dotyczącym badań w pełnym stanie naprężenia jest zastosowanie obciążeń cyklicznych. „Prawdziwy aparat trójosiowego ściskania” TTA umożliwia wykonywanie szybkozmiennych obciążeń cyklicznych (z częstotliwością do



Rys. 13. Zależność naprężeń od odkształcenia pionowego w trakcie ścinania w płaskim stanie odkształcenia, za [5]

5 Hz) na dwu kierunkach obciążenia, zarówno pionowym jak i poziomym. Obciążenia te mogą być zadawane równocześnie, a nawet być względem siebie przesunięte w fazie w ramach jednego eksperymentu. Stwarza to ogromne możliwości w projektowaniu doświadczeń i uzyskiwaniu potencjalnie cennych danych do modelowania.

PODSUMOWANIE

Badania trójosiowe są bardzo prężnie rozwijającą się gałęzią badań geomechanicznych. Współczesne modelowanie coraz częściej wymaga dostarczania parametrów, które muszą być wyznaczane zaawansowanymi metodami badawczymi. Obecnie, zdecydowana większość dostępnych na rynku komercyjnych systemów trójosiowych jest całkowicie zautomatyzowana oraz wyposażona w niezbędne urządzenia do zadawania dowolnych ścieżek naprężenia, w tym cyklicznych, jak też układy czujników, zarówno do lokalnego pomiaru odkształceń, jak i w piezoelementy do wyznaczania sztywności gruntu w zakresie bardzo małych odkształceń. Obok możliwości wiarygodnego wyznaczania parametrów mechanicznych i odkształceniowych gruntów systemy takie pozwalają również na poznawanie reakcji ośrodka gruntowego poddanego bardzo złożonym stanom obciążenia, a co za tym idzie wszechstronną weryfikację zaawansowanych modeli gruntowych.

W coraz większej liczbie ośrodków naukowych, choć ciągle jeszcze niewielu, prowadzone są badania w pełnym stanie naprężenia. Poprzez możliwość niezależnej kontroli wszystkich

trzech głównych składowych naprężenia pozwala on na realizowanie zaawansowanych badań zachowania się ośrodka gruntowego w warunkach najbardziej zbliżonych do rzeczywistości, jak też weryfikację modeli konstytutywnych dla wszystkich scenariuszy obciążenia.

Prowadząc eksperymenty, a później interpretując wyniki, trzeba brać pod uwagę wiele czynników i zjawisk zachodzących w czasie badania, gdyż nawet niewielkie niedokładności w przygotowaniu próbki do badań czy podczas jej instalacji w aparacie trójosiowym, jak też we wstępnych etapach doświadczenia, mogą mieć duży wpływ na jakość i wiarygodność ostatecznych wyników.

LITERATURA

1. Ladd, R.: Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 1978.
2. Lipiński M.: Kryteria Wyznaczania Parametrów Geotechnicznych. Warszawa: Wydawnictwo SSGW, 2013.
3. Sławińska J.: The Mohr-Coulomb friction angle of granular soils under different stress conditions. *Acta Scientiarum Polonorum: Architectura*, 17(4), 2018.
4. Świdziński W.: 2006. Mechanizmy Zagęszczania i Upłynniania Gruntów Sypkich. Gdańsk: IBW PAN, 2006.
5. Świdziński W., Mierczyński J.: On the Measurement of Strains in the Triaxial Test. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 49(1), 2002.