

## **Modelowanie i obliczenia projektowe – referat generalny**

**Dr hab. inż. Marcin Cudny**

**Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Na sesję II XVIII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej zakwalifikowano po recenzjach 13 artykułów zestawionych w spisie literatury. W grupie tej najczęściej podejmowanym bezpośrednio tematem jest analiza próbnych obciążeń pojedynczych fundamentów palowych – artykuły [6, 7, 8]. Analizy numeryczne różnych geotechnicznych zagadnień brzegowo-początkowych z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) przedstawiono w artykułach [4, 10, 11]. Tematyka artykułów [2, 9] dotyczy obliczeń konstrukcji

geotechnicznych z zastosowaniem modeli belkowych na podporach sprężystych. Zagadnienia ogólne dotyczące projektowania geotechnicznego w świetle aktualnych przepisów omówiono w artykule [1]. Podobną tematykę klasycznego projektowania i obliczeń geotechnicznych podjęto w artykułach [3, 12]. Artykuł [5] poświęcono metodyce pomiarów i obliczeń z dynamiki gruntów, natomiast jedynym artykułem dotyczącym zagadnień teoretycznych mechaniki gruntów jest pozycja [13].

Nawiązując do przyjętej powyżej klasyfikacji tematycznej odniosę się do poszczególnych artykułów sesji II, wskazując na ich najważniejsze punkty z uwagami dotyczącymi ich znaczenia w problematyce modelowania i obliczeń projektowych w geotechnice.

## FUNDAMENTY PALOWE – OBCIĄŻENIA PRÓBNE

W artykule [6] Autor przedstawił kontynuację swoich prac dotyczących analizy pali pojedynczych ze wzmocnieniem w postaci iniekcji pod podstawą poddanych statycznym obciążeniom próbnym. Zaproponowany teoretyczny mechanizm współpracy pala z gruntem z uwzględnieniem kolejnych faz wykonawstwa, iniekcji i próbnego obciążenia zilustrowano w artykule dwoma przykładami obliczeniowymi, które reprezentują dwa najczęściej spotykane przypadki posadowienia pala, to jest w podłożu uwarstwionym z wszystkimi warstwami nośnymi oraz w podłożu uwarstwionym z obecnością warstwy gruntu organicznego o dużej ściśliwości. Najważniejsze wnioski dotyczą efektywności iniekcji, która w przypadku podłoża z warstwą ściśliwą nie poprawia znacząco charakterystyki sztywności podparcia przedstawionej w postaci krzywej obciążenie – osiadanie uzyskanej w badaniu próbnym. Cennym elementem przedstawionej pracy jest jasne określenie zakresu przeprowadzonych badań i ich podstaw, jak również sprecyzowanie w jakim kierunku będą podążać dalsze prace Autora w przedmiotowym temacie. W artykułach [7, 8], opracowanych w ośrodku badawczym w Szczecinie przedstawiono doświadczenia z zastosowaniem opracowanego równania krzywej obciążenie – osiadanie w badaniu próbnym pali. W artykule [7] przedstawiono sposób określenia oddzielnie nośności pobocznic i podstawy pala na podstawie analizy parametrów zaproponowanego równania krzywej obciążenie – osiadanie, natomiast w artykule [8] zaproponowano sposób odtworzenia przedmiotowej krzywej w przypadku zmiany średnicy pala i znajomości parametrów równania krzywej przy pewnej bazowej średnicy odniesienia. Parametrami wyjściowymi do analiz są wyniki sondowań statycznych podłoża gruntowego oraz informacja dotycząca przyjętej technologii wykonawstwa, którą uwzględnia się poprzez odpowiedni współczynnik technologiczny. Lektura artykułów [7, 8] wywołuje pewne wątpliwości dotyczące samej filozofii przedstawionej metodyki, która oddala się od szczegółowej analizy geotechnicznej i skupia się na czysto matematycznym opisie zaproponowanego równania krzywej osiadania, co często określa się jako *curve fitting methods*. Analiza dotycząca rozdziału nośności pobocznic i podstawy pala jest klasyczna i moim zdaniem jej rozwój wymaga uwzględnienia szczegółów charakterystycznej budowy geologicznej podłoża, to jest początkowego stanu naprężenia, sztywności i wytrzymałości reprezentowanej poprzez oznaczone parametry materiałowe i zmienne stanu rozwijanych współcześnie modeli gruntów. Nie bez znaczenia są także konsekwencje zmiany naprężenia w gruncie, jaką wywołuje się poprzez określoną technologię wykonawstwa pala oraz prędkość wykonania próbnego obciążenia pala. Innym zagadnieniem ogólnym, które dotyczy wszystkich artykułów tej grupy tematycznej, jest znaczenie próbnego obciążenia pala pojedynczego w projektowaniu. Dyskutując ten problem z wieloma projektantami konstrukcji geotechnicznych zauważyłem, że niekiedy wyniki próbnych obciążeń są bezkrytycznie ekstrapolowane do analiz pracy fundamentów posadowionych na grupach pali. Jednakże można w prosty sposób

pokazać, że schemat pracy pala pojedynczego oraz grupy pali – często związanych z oczepem lub płytą fundamentową to dwie różne historie. Nie wnioskowałbym jednak, że próbne obciążenia są niepotrzebne. Ich podstawowym celem jest sprawdzenie jakości wykonania pala w określonych warunkach i w tym sensie badania próbne należy bezwzględnie zalecać przy realizacji inwestycji i raczej wykonywać na istniejących palach niż próbować poddawać je symulacji. W tym świetle ważnym kierunkiem w badaniach próbnych pali jest raczej zrozumienie otrzymanych wyników i poprawne wnioski dotyczące ewentualnych odstępstw od założonego na etapie projektowania schematu pracy.

## MODELOWANIE NUMERYCZNE MES

Pierwszy artykuł dotyczący zastosowania MES w analizie konstrukcji geotechnicznych dotyczy analizy pracy fundamentu płytowo-palowego pod wysokim budynkiem w Warszawie [4]. Zastosowano kompleksową analizę, w której schemat konstrukcji zamodelowano w dwóch komputerowych systemach obliczeniowych. W pierwszym podejściu schemat konstrukcji przyjęto w standardowym systemie z elementami strukturalnymi (płyty, belki podpory sprężyste odzwierciedlające bezpośrednią interakcję konstrukcja – grunt), natomiast w drugim podejściu oprócz elementów strukturalnych uwzględniono kontinuum gruntowe z dokładniejszym opisem materiałowym opartym na modelu konstytutywnym *Hardening Soil Small* (HSS). Podejście takie jest często stosowane w praktyce w przypadku współpracy konstruktorów z dziedziny mechaniki budowli i konstruktorów geotechników. Z własnego doświadczenia wiem, że współpraca taka może być bardzo problematyczna i Autorzy słusznie skupiają się na problemach organizacji i procedury przeprowadzenia takiego zadania projektowego. Z punktu widzenia mechaniki budowli najważniejsza jest konstrukcja obiektu nadziemnego, natomiast geotechnikę sprowadza się do wyznaczenia sztywności podpór sprężystych, których zadaniem jest odtworzenie bezpośredniej interakcji z gruntem (ściany obudowy wykopu, płyta) oraz podparcia na elementach posadowienia głębokiego – w tym przypadku baret. Od strony geotechniki analizuje się zatem kompleksowo współpracę konstrukcji podziemia z otaczającym kontinuum gruntowym, a następnie na podstawie wyników w postaci rozkładów naprężenia oraz przemieszczenia wyznacza się mapy sztywności podparcia. Dużym problemem jest tutaj wybór schematu konstrukcji do obliczeń, a w szczególności określenie, w którym miejscu modelu należy ograniczyć konstrukcję i przyjąć obciążenia od części nadziemnej tak, aby prawidłowo odtworzyć sztywność przestrzenną układu fundamentowego. Ostatecznym parametrem wynikowym jest stosunek udziału płyty fundamentowej do udziału fundamentów głębokich w przekazywaniu obciążenia na podłoże gruntowe. Parametr ten pozwala np. na przeprowadzenie optymalizacji konstrukcji układu fundamentowego. Tak wygląda ogólnie schemat analiz projektowych, jednakże z lektury artykułu trudno jest wyciągnąć wnioski co do ich poprawności lub krytyki i propozycji zmian. Na uwagę zasługują schematy blokowe przyjętej analizy, których szczegóły nie są w pełni wyjaśnione i odnosi się wrażenie, że forma artykułu jest za krótka na prezentację wykonanych prac. Przedstawiony materiał jest raczej raportem z obliczeń na przyjętym modelu bez propozycji wariantowości lub podkreślenia newralgicznych faz analizy.

W artykule [10] podjęto tematykę modelowania procesu drążenia tunelu metodą tarczową (TBM) ze stabilizacją ciśnieniową na czele tarczy (EPB). Stosując MES w tego rodzaju analizach, można uzyskać kompleksowy model pozwalający zarówno określić odkształcenie ośrodka gruntowego wokół podziemnego wyrobiska, jak i siły wewnętrzne i obciążenie obudowy tunelu realizowanej w technologii tubingów. Stanowi to znaczący postęp w stosunku do metod empirycznych, w których problemy odkształcenia gruntu i sił wewnętrznych w obudowie traktuje się oddzielnie za pomocą różnych metod empirycznych. Autor skupia się głównie na efektach w wyniku drążenia związanych z konsolidacją nawodnionych gruntów drobnoziarnistych o znaczącej podatności. Konsolidacja jest tutaj następstwem zmian ciśnienia wody w porach zalegających gruntów, które są generowane na skutek iniekcji za głowicą TBM oraz stabilizacji EPB, jak również zmian położenia zwierciadła wody gruntowej. Przyjęty schemat modelu numerycznego oraz jego parametry oparto na danych literaturowych dotyczących drążenia tunelu w Bangkoku. Artykuł jest streszczeniem pracy doktorskiej Autora zrealizowanej na Politechnice Śląskiej. Na szczególną uwagę zasługuje próba jak najbardziej realistycznego odzwierciedlenia modelu numerycznym procedury i elementów drążenia tunelu w obrębie tarczy z uwzględnieniem iniekcji ciśnieniowej za głowicą TBM oraz stabilizacji hydrostatycznej na czele tarczy. Jest to zaawansowane podejście w stosunku do przyjętej w praktyce metody kontrakcji obudowy, którą precyzuje się na podstawie empirycznego parametru zmiany objętości równej objętości obserwowanej niecki osiadania terenu nad tunelem (*Volume Loss* – *VL* albo *Ground Loss Ratio* – *GLR*). Przyjęty model opracowano w bardzo podobny sposób do przedstawionego w pracy Kasper&Meschke (2004). Do obliczeń numerycznych zastosowano system obliczeniowy *Abaqus*. Opis materiałowy warstw gruntowych oparto na implementacjach numerycznych różnych modyfikacji modelu hipoplastycznego opracowanych przez różnych autorów. Implementacje te udostępnione są w serwisie sieciowym projektu *SoilModels* prowadzonego przez D. Mašina. Przedstawiona analiza stanowi zatem kompilację zaawansowanych i najbardziej aktualnych narzędzi i procedur obliczeniowych dostępnych do analiz naukowych w dziedzinie geotechniki.

Zagadnienie wpływu zmian temperaturowych w gruncie wokół tak zwanych pali grzewczych przedstawiono w artykule [11]. Przedstawiono w nim wyniki badań ściskania trójosiowego bez odpływu próbek iłu w różnych warunkach temperaturowych oraz wyniki analizy numerycznej opartej na oznaczonych parametrach. Analiza numeryczna dotyczyła prototypu badań modelowych wyciągania pali grzewczych o długości 0,5 m planowanych do dalszych prac w przedmiotowym temacie. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych zastosowano temperatury dodatnie (około 18°C) oraz ujemne (od -18°C do -15°C) przy różnych czasach zamrażania gruntu. Wytrzymałość w warunkach bez odpływu wyraźnie rosła ze spadającą temperaturą i wzrastającym czasem zamrażania. Do opisu materiałowego zastosowano model Mohra-Coulomba, przyjmując otrzymane parametry wytrzymałościowe z badań bez odpływu, nie podając pozostałych parametrów materiałowych – przede wszystkim sztywności. Zastosowano sprzężoną analizę numeryczną przepływu ciepła oraz równowagi statycznej, przyjmując różne warunki brzegowe przepływu ciepła (do gruntu i do pala) przy jednoczesnym wyciąganiu pala ze stopniowo wzra-

stającą siłą. Zestawione różnice bezwzględne w postaci zmobilizowanych wartości jednostkowego tarcia na pobocznicy pala oraz przemieszczenia są niewielkie i nie przekraczają 2,5 kPa w przypadku tarcia i około 0,1 mm w przypadku przemieszczenia (uniesienia pala). Autorzy jednakże wskazują na fakt, że względna różnica w przypadku tarcia na pobocznicy osiąga około 12% w stosunku do referencyjnego przypadku bez gradientów temperatury pal – grunt i dodatnich temperatur. Studiując przedstawiony artykuł, odniosłem wrażenie, że jest on raportem z początkowych badań w temacie i Autorzy próbują jeszcze odnaleźć właściwy cel badań i ich powiązanie z rzeczywistymi problemami praktycznymi. Podstawowym problemem mechanicznym gruntów zamrożonych nie jest jednak ich wytrzymałość krótkoterminowa, która jak można było przewidzieć, wzrasta ze spadkiem temperatury poniżej 0°C, lecz zachowanie długoterminowe przy temperaturach, w których rozpoczyna się topnienie lodu w porach gruntu. Analizowany ośrodek jest więc wielofazowy – powietrze, woda, lód i szkielec gruntowy. Przedmiotem badań laboratoryjnych w takim przypadku są efekty pełzania – szczególnie pełzania trzeciorzędowego, które charakteryzuje się wzrostem prędkości odkształcenia z czasem przy stałym naprężeniu. Ponadto pale grzewcze w zastosowaniach inżynierskich są znacznie dłuższe i kluczowym zagadnieniem obliczeniowym nie jest ich statyka (powinno się przyjmować przypadek najbardziej niekorzystny, to jest grunt niezamrożony lub topniejący) ale optymalizacja wymiany ciepła z uwzględnieniem przepływu wody gruntowej.

## MODELE BELKOWE NA PODPORACH SPRĘŻYSTYCH

Zastosowanie schematów konstrukcji geotechnicznych, w których elementy strukturalne są idealizowane poprzez belki lub lokalnie pręty kratowe, natomiast interakcja z gruntem poprzez podpory sprężyste jest nadal bardzo powszechna w projektowaniu. Dotyczy to przede wszystkim konstrukcji oporowych w postaci ścianek szczelnych oraz ścian szczelinowych, fundamentów palowych oraz ław lub płyt fundamentowych (w układach trójwymiarowych reprezentowanych przez elementy płytowe na podporach sprężystych). Z jednej strony jest to związane z szerokim dostępem programów komputerowych, w których można w prosty sposób szybko zdefiniować i przeanalizować dany schemat konstrukcyjny z dużą liczbą wariantów obciążenia, z drugiej strony z minimalną bazą potrzebnych danych wyjściowych – często wymagane są tylko podstawowe parametry geotechniczne. Ponadto rozpoznanie parametrów dotyczy tylko lokalnych miejsc, gdzie projektowana jest dana konstrukcja. Jest to wygodne i pozwala na przeprowadzenie obliczeń także konstruktorom nie specjalizującym się w zagadnieniach geotechnicznych. Problem pojawia się, gdy zadaniem nie jest tylko określenie sił wewnętrznych w poszczególnych elementach konstrukcyjnych przy zewnętrznym obciążeniu monotonicznym, ale także dokładniejsze oszacowanie przemieszczeń całej konstrukcji oraz odkształcenia ośrodka gruntowego w większym obszarze i tym samym wpływu na obiekty sąsiednie. W takim przypadku lokalne określenie sztywności podłoża nie wystarcza i zamiast podpór sprężystych wprowadzamy do modelu kontinuum gruntu i związany z nim znacznie bardziej zaawansowany opis materiałowy niż prawo Hooke'a –

ostatnia uwaga dotyczyć może także samych elementów konstrukcyjnych, na przykład uwzględnienia pełzania i zarysowania w elementach betonowych. Wymaga to jednak specjalizacji i dokładniejszej wiedzy z dziedziny mechaniki gruntów, mechaniki ośrodków ciągłych, praw konstytutywnych, metod numerycznych, zagadnień filtracji itd. Pociąga to za sobą również potrzebę szczegółowego rozpoznania parametrów podłoża oraz jego uwarstwienia i profesjonalnego opisu genezy geologicznej. Jednym zdaniem, więcej ciekawych tematów w geotechnice – w biurach projektowych, laboratoriach, firmach specjalizujących się w badaniach polowych, jak i na uczelniach, a co ważne potrzebna jest współpraca pomiędzy tymi ośrodkami. Współpraca nie udawana, bo często w finalnym rozliczeniu opłacalna – nie tylko ekonomicznie.

Problematyka zastosowania teorii belek na podłożu sprężystym w geotechnice jest zaprezentowana szeroko z dodatkowym ciekawym rysem historycznym w artykule [2]. Tematem szczegółowym jest projektowanie hybrydowych konstrukcji oporowych. W konstrukcjach tych sztywność ściany oporowej jest zwiększona poprzez dodatkową poziomą płytę wspornikową. We wstępnej części artykułu omówiono hipotezę współczynnika Winklera oraz ogólne zasady przyjmowania jego zmienności. Następnie przedstawiono metodykę przyjmowania odpowiedniego schematu obliczeniowego konstrukcji hybrydowych z uwzględnieniem zarówno obciążeń od parcia gruntu (jego rodzaju w zależności od lokalizacji na powierzchni konstrukcji), jak i wyboru miejsca podparcia na podporach sprężystych. Do omówionych schematów dołączono część teoretyczną, w której przedstawiono klasyczne rozwiązania równania belki na podłożu sprężystym przy różnych warunkach brzegowych i założeniach dotyczących sztywności belki. Kluczowym etapem przygotowania danych do obliczeń, związanym najbardziej z rozpoznaniem podłoża i mechaniką gruntów, jest wyznaczenie odpowiednich współczynników reakcji podłoża, które służą następnie do wyznaczenia sztywności podpór sprężystych w modelu. Współczynniki te związane są bezpośrednio z aktualną sztywnością gruntu, czyli relacją naprężenie-odkształcenie w różnych warunkach naprężenia początkowego. Podjęty zostaje zatem ciekawy i ważny temat barotropii sztywności – w artykule opisany jako wzrost sztywności z głębokością. Warto zatrzymać się na tym zagadnieniu, gdyż uważam, że jest najbardziej dyskusyjne w modelowaniu z zastosowaniem podpór sprężystych. Autorzy analizują podstawowy parametr wpływający na zmienność sztywności z naprężeniem jakim jest wykładnik  $m$  w potęgowym prawie ściśliwości. Można tutaj dodać na marginesie, że prawo to jest najczęściej wiązane z publikacją Janbu z 1963 roku, natomiast praktycznie identyczną relację znacznie wcześniej zaproponował Ohde w 1936 roku. Pracując na kilkuletnim stażu na Uniwersytecie w Stuttgarcie, miałem okazję uczestniczyć w pracach związanych z wdrażaniem i testowaniem modelu *Hardening Soil*, w którym wszystkie parametry/moduły sztywności objęte są prawem potęgowym. Doświadczenie wyniesione z tych prac wskazuje że relację liniową sztywność-naprężenie, to jest  $m = 1,0$ , przyjmuje się w ściśliwych drobnoziarnistych gruntach normalnie skonsolidowanych lub lekko prekonsolidowanych. Odpowiada to praktycznie tak zwanemu logarytmicznemu prawu ściśliwości, gdzie stosuje się zamiast modułów sztywności wskaźniki ściśliwości (np.  $C_c$ ,  $C_s$ ). W starszych geologicznie gruntach drobnoziarnistych o wyższej prekonsolidacji współczynnik  $m$  maleje ze stopniem prekonso-

lidacji do wartości 0,5. Natomiast w naturalnych gruntach ziarnistych generalnie przyjmuje się niską wartość  $m = 0,5$ , wartość wyższą można zastosować w przypadku gruntów nasypowych. Problem dotyczy jednak równoległej zależności sztywności od przyrostu odkształcenia mierzonego w stosunku do referencyjnego stanu początkowego. Mamy tutaj do czynienia ze znaną w literaturze krzywą  $S$ , za pomocą której opisuje się degradację sztywności z odkształceniem (najczęściej wyrażonego miarą odkształcenia dewiatorowego). Ponadto w przypadku zmiany kierunku obciążenia/odkształcenia sztywność rośnie skokowo do wartości początkowej (histereza). Procesy te są dobrze opisane w literaturze, zachodzą przed osiągnięciem granicznej wytrzymałości na ścinanie i jak pokazuje praktyka obliczeniowa ostatnich lat uwzględnienie ich w opisie mechanicznym znacznie poprawia dokładność predykcji odkształcenia w interakcji konstrukcja – podłoże gruntowe. W pewnym zakresie obciążenia monotonicznego można oczywiście wyznaczyć w miarę realistycznie sztywność sieczną i wykorzystać do określenia parametrów podpór sprężystych, ale trudno jest wyznaczyć tę sztywność jako stałą w przypadku fazowego wykonawstwa konstrukcji oporowej – obciążenie pierwotne, wtórne, odwodnienie, instalacja/deinstalacja rozpór/kotew, sprężenie zakotwienia, zmiany temperaturowe, pełzanie/skurcz betonu itd. W modelach belkowych można przyjąć także nieliniowe podpory sprężysto-plastyczne, ale wtedy sytuacja zaczyna się komplikować – zwiększa się liczba niefizycznych parametrów i komplikacja opisu matematycznego, natomiast sztywność dotyczy cały czas lokalnego miejsca styku z konstrukcją. Myślę, że bardziej odpowiada mi wtedy idealizacja gruntu jako ośrodka ciągłego z prawami konstytutywnymi, które rozwijane są od wielu lat. To oczywiście tylko mój komentarz, bo wiem jak wygląda praktyka projektowa, jakimi danymi wyjściowymi dysponujemy, jak przebiegają sposoby ich wyznaczania i jakim czasem dysponujemy w celu zaprojektowania danej konstrukcji.

W kolejnym artykule [9] zmienia się schemat statyczny zagadnienia inżynierskiego, ale problem pozostaje ten sam. Zagadnieniem inżynierskim jest wielkośrednicowy monopół stanowiący posadowienie morskiej elektrowni wiatrowej obciążony quasi-statycznie (zastępczym poziomym obciążeniem statycznym od oddziaływań dynamicznych: wiatru, falowania i prądów morskich). Ewidentnie trójwymiarowy problem dynamiczny jest uproszczony do schematu statycznego belki opartej na podporach sprężystych w układzie płaskim. Charakterystyki sprężyste podpór obliczane są według normy norweskiej DNV-OS-J101 dotyczącej projektowania morskich elektrowni wiatrowych oraz na podstawie tak zwanej metody Koseckiego – popularnej w obliczeniach fundamentów palowych w Polsce. Obciążenia i model konstrukcji są identyczne, zmienia się tylko sposób przyjęcia oparcia bocznego w gruncie poprzez podpory sprężyste (rozstaw i parametry). Nie do końca rozumiem celu takiej analizy – porównywane są dwie metody, z których jedna dedykowana jest przedmiotowej konstrukcji, natomiast druga dotyczy standardowych fundamentów palowych obciążonych statycznie. Brak jest odniesienia, na przykład, do referencyjnego przykładu z pomiarami na obiekcie rzeczywistym. Wnioski sformułowane są jednak w sposób, w którym przyjęto, że metodą dokładną są zalecenia DNV i metoda Koseckiego wymaga dopracowania w przedmiotowej aplikacji – głównie w związku ze współczynnikami dotyczącymi wpływu dużych średnic pala na wartości przyjmowanych charakterystyk sprężystych.

W artykule [1] przedstawiono raport z aktualnej sytuacji dotyczącej stosowania Eurokodu 7 oraz prac prowadzonych nad jego kolejną generacją. Szczególnie chodzi tutaj o uwzględnienie nowej części 1, poświęconej wyłącznie zasadom ogólnym projektowania geotechnicznego. Zaprezentowano najważniejsze zmiany zaproponowane w projektach norm prEN 1990 [2017] oraz prEN 1997-1 [2017]. Jako wyróżniającą cechę zmian wskazano praktyczne wprowadzenie zasad kontroli niezawodności i zarządzania jakością. W konkluzji wskazano jednak, że wprowadzenie nowej wersji Eurokodu 7 najpewniej nie rozwiąże wielu dotychczasowych problemów – projektanci nadal będą zmuszeni do polegania na swoim doświadczeniu oraz w dużym stopniu na dotychczasowej praktyce krajowej.

### ZAGADNIENIA PROJEKTOWE

Klasyczny problem określenia rozkładu parcia spoczynkowego w podejściu analitycznym na przykładzie zagadnienia wykonawstwa głębokiego wykopu zaprezentowano w artykule [3]. Materiał przedstawiony we wstępie stanowi zestawienie podstawowych informacji dotyczących sposobów wyznaczania wartości współczynnika parcia – zarówno granicznych, jak i spoczynkowej oraz udziału odkształcenia w przejściu do wartości pośrednich. Właściwa problematyka artykułu przedstawiona jest w interpretacji i opisie własnych hipotez dotyczących zmian oddziaływania gruntu na obudowę wielokrotnie rozpieranego wykopu w trakcie głębienia. W tym miejscu należałoby wyjaśnić różnicę w rozumieniu parcia spoczynkowego w różnych praktykowanych metodach analiz głębokich wykopów. Uważam, że jest to potrzebne w celu ułatwienia lektury artykułu projektantom skupionym głównie na analizach numerycznych głębokich wykopów. W artykule [3] jako współczynnik parcia spoczynkowego przyjmuje się wartość zmienną, zależną od stanu naprężenia i małych odkształceń obudowy (obudowa musi być jednak odpowiednio usztywniona). Poruszone w artykule zmiany parcia spoczynkowego utożsamiane są więc ze zmianami pionowego rozkładu obciążenia poziomego na obudowę wykopu w trakcie jego głębienia. Rodzaj parcia nie zmienia się (pozostaje z założenia spoczynkowe) pomimo małych odkształceń obudowy wykopu – zmienia się tylko jego rozkład. Przemieszczenia nie są tutaj dokładnie obliczane i uwzględnia się tylko jakościowy opis ich zmian i wpływ na pionowy rozkład parcia spoczynkowego (przytoczony model HSM). W analizach, w których głębienie wykopu poddaje się symulacjom numerycznym odpowiednio sformułowanego zagadnienia brzegowo-początkowego parcie spoczynkowe dotyczy tylko warunków początkowych. Parcia spoczynkowe gruntu w stanie *in situ* nie da się zasymulować – należy go przyjąć wstępnie na podstawie genezy geologicznej gruntu. W praktyce sprowadza się to do zastosowania wzoru Jaky'ego w przypadku gruntów normalnie skonsolidowanych lub wybranej relacji empirycznej, gdy grunty są prekonsolidowane. Warto wykorzystać tutaj okazję, aby zwrócić uwagę na fakt, że nośne grunty naturalne są praktycznie zawsze prekonsolidowane, natomiast z moich doświadczeń wynika, że rzadko uwzględnia się tę informację przy wprowadzaniu wartości współczynnika parcia spoczynkowego do obliczeń. Dalsze zmiany relacji pomiędzy poszczególnymi składowymi naprężeniami zachodzą już zależnie

od przyjętego opisu sztywności (modelu konstytutywnego) oraz przyjętych warunków brzegowych i ich zmian w trakcie obliczeń.

Dokładne oszacowanie i sprawdzenie dopuszczalności osiadań podłoża gruntowego pod obciążeniem (SLS) jest w stosunku do sprawdzania warunków nośności (ULS) zagadnieniem, które podlega znacznie mniejszej standaryzacji. Wykorzystuje się różne metody obliczeń, często związane z technologią pomiarów parametrów sztywności gruntów. Tutaj z kolei problematyczny jest fakt, że parametry sztywności są rzadko wyznaczane bezpośrednio z badań – dominuje podejście korelacji z innymi mierzonymi wielkościami (na przykład  $q_c$ ). W artykule [12] problematykę tę przedstawiono w świetle badań dylatometrem Marchettiego (DMT). Prezentację i dyskusję przyjętej metody oparto na dwóch rzeczywistych przykładach posadowienia budowli: nasypu zapory czołowej w Nieliszu na podłożu z warstwami gruntów organicznych o dużej ściśliwości oraz fundamentów bezpośrednich budynku na terenie kampusu SGGW, gdzie występują ły o stosunkowo dużej sztywności. Parametry sztywności w obu przykładach określono na podstawie interpretacji badań DMT z odpowiednią obróbką statystyczną oraz zaproponowaną przez Autora analizą z wykorzystaniem podejścia Bayesa. W efekcie zestawienia wyników przeprowadzonych obliczeń z przebiegami rzeczywistych osiadań zaproponowano nową zależność empiryczną do określania modułu sztywności oraz wskaźników ściśliwości i odprężenia z bezpośrednich wyników badań DMT, to jest naprężenia  $p_1$  oraz składowej pionowej naprężenia efektywnego  $\sigma_{v0}$ .

### ZAGADNIENIA DYNAMICZNE

W dynamice gruntów najczęściej wykorzystywanym źródłem informacji o obciążeniu sejsmicznym jest akcelerogram będący zapisem pomiaru przyspieszeń w wybranym punkcie gruntu w trzech prostopadłych do siebie kierunkach. Akcelerogramy różnych obciążeń dynamicznych są dostępne w bazach danych i przy analizowaniu zachowania się konstrukcji w warunkach wstrząsów sejsmicznych są cennym źródłem pozwalającym na definicję obciążenia. W artykule [5] przedstawiono kryteria wyboru akcelerogramów do analiz stateczności zapór ziemnych. Kryteria te uzupełniono o tak zwane kryterium intensywności Ariasa, gdzie uwzględnia się widmo amplitudowe. Pozwala to wybrać akcelerogram dający największe wartości przemieszczeń trwałych zapory powstających podczas trzęsienia ziemi. Ważnym elementem przedstawionej pracy jest zaproponowanie modyfikacji bezpośrednio mierzonych przebiegów przyspieszeń jako warunków brzegowych pozwalających na wiarygodną ocenę stateczności. Analizy numeryczne dotyczących stateczności uproszczonego modelu zapory ziemnej poddanej obciążeniom dynamicznym przeprowadzono metodą Newmarka. Na podstawie wyników tych analiz pokazano, że ze względu na amplifikację fal o niskich częstotliwościach i tłumienia fal o wyższych częstotliwościach w wyniku zalegania warstwy podłoża gruntowego, na którym spoczywa zapora ziemna, ocena stateczności w warunkach brzegowych uzyskanych z sygnałów mierzonych na powierzchni terenu jest po stronie bezpiecznej. W artykule opisano wiele szczegółów analitycznych tego skomplikowanego zagadnienia, jednakże sposób ich przedstawienia jest bardzo przejrzysty i pozwala na stosunkowo szybkie zapoznanie się z przedstawionym materiałem.

Autor artykułu [13] zaprezentował wyniki analizy porównawczej dwóch izotropowych kryteriów wytrzymałości na ścinanie, które stosowane są w modelowaniu różnych geomateriałów – zarówno jako główna lub składowa powierzchnia plastyczności oraz jako funkcja stosowana przy określaniu kierunku odkształcenia plastycznego w prawie płynięcia. Wybór dotyczy klasycznego w mechanice gruntów kryterium Mohra-Coulomba (MC) oraz kryterium Druckera-Pragera (DP). W tych dwóch kryteriach używa się tego samego zestawu parametrów wytrzymałościowych, to jest kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  i spójności  $c$ . O ile w kryterium MC kontur w przestrzeni naprężeń głównych jest praktycznie konturem  $\phi = \text{const}$ , to w przypadku kryterium DP wartość graniczna zmobilizowanego  $\phi$  zależy od aktualnej wartości kąta Lodego  $\theta$ . Autor przyjął zatem do porównań przedmiotowych kryteriów nie wartość  $\phi$ , lecz bezpośrednio wytrzymałość na ścinanie w postaci miary naprężenia dewiatorowego. Parametrem porównawczym jest stała  $A$  będąca stosunkiem wytrzymałości na ścinanie w kryterium DP do wytrzymałości na ścinanie w kryterium MC, której wartość przeanalizowano w różnych warunkach stanu naprężenia. Szczegółowe zestawienie porównawczych wykresów jest głównym sposobem prezentacji uzyskanych wyników i wymaga szczegółowych studiów nad artykułem. Nawiązując do treści artykułu, chciałbym podzielić się pewnym doświadczeniem zdobytym w czasie bezpośredniej współpracy z firmą *Plaxis*, gdzie zajmowałem się implementacją prostych modeli sprężysto-idealnie plastycznych opartych na kryteriach DP oraz dodatkowo Ladego-Duncana i Matsuoki-Nakai'ego. Chodziło o porównanie wyników tak sformułowanych modeli z klasycznym modelem Mohra-Coulomba (sprężystość Hooke'a z kryterium MC). Ze względu na to, że praca tam miała znaczenie czysto praktyczne, zastosowano ten sam zestaw parametrów, którym były  $\phi$  i  $c$  wyznaczone w standardowym badaniu ściskania trójosiowego. Przyjęcie ich w kryterium DP stanowiło jednak problem związany z bardzo wysoką i nierealistyczną wytrzymałością w obliczeniach nośności w różnych zagadnieniach brzegowych. Jedynym sensownym rozwiązaniem było zaniżanie wartości  $\phi$  – pozostaje jednak dyskusja, jak to robić?, która wzbudzała tyle wątpliwości, że ostatecznie odrzucono jakiegokolwiek zastosowanie kryterium DP w modelowaniu powierzchni plastyczności. Jako rozwiązanie optymalne wskazano kryterium Matsuoki-Nakai'ego. Wyjątkiem jest przyjęcie funkcji DP do opisu powierzchni stanu krytycznego w modelu *Modified Cam-clay*, który w takiej postaci nie jest zalecany do symulacji zagadnień brzegowo-początkowych w celach projektowych. Należy jednak podkreślić, że

kryterium DP jest bardzo atrakcyjne w algorytmach obliczeń numerycznych – prosta forma matematyczna pozwala na mapowanie naprężenia na powierzchnię plastyczności w jednym kroku. Tutaj pojawia się jego zastosowanie – funkcję DP wykorzystuje się często jako potencjał plastyczny (przynajmniej w pierwszych iteracjach mapowania na skomplikowane powierzchnie plastyczności) oraz jako kryterium wytrzymałości na ścinanie w celu uzyskania pierwszego przybliżenia w algorytmie mapowania. Różnice pomiędzy wszystkimi wspomnianymi tutaj kryteriami wytrzymałości na ścinanie zanikają w przypadku bardzo niskich lub zerowych wartości  $\phi$  – z tego względu można znaleźć zastosowanie kryterium DP w uproszczonym modelowaniu gruntów w warunkach bez odpływu.

## LITERATURA

1. Bogusz W., Kłosiński B.: Nowa generacja Eurokodów – zmiany w projektowaniu geotechnicznym.
2. Brząkała W., Herbut A.: Zastosowanie modelu Winklera przy obliczaniu hybrydowej konstrukcji oporowej.
3. Dembicki E., Rymsza B.: Zmienność parcia spoczynkowego gruntu przy wykonywaniu wykopów.
4. Kacprzak G., Bodus S.: Numerical analysis of the load distribution under the piled raft foundation of the high-rise building.
5. Korzec A., Świdziński W.: Wybór i przygotowanie rejestracji zdarzeń sejsmicznych do modelowania numerycznego reakcji zapór ziemnych obciążonych sejsmicznie.
6. Krasiński A.: Prognozowanie krzywej osiadania pała wierconego z iniekcją ciśnieniową pod podstawą.
7. Meyer Z., Stachecki K.: Static load test curve (Q-s) conversion in to pile of different size.
8. Meyer Z., Szmeczel G.: Ocena możliwości wykorzystania próbnych obciążeń statycznych do obliczania nośności pobocznic i podstawy pała.
9. Międlarz K., Więclawski P.: Application of the Kosecki's method in designing of offshore wind power plants foundation.
10. Ochmański M.: Long-term settlement induced by epb tunnelling studied with numerical simulations.
11. Piotrowicz B., Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: Determination of the heating pile numerical model parameters based on the laboratory strength tests of clay at low temperatures.
12. Rabarijoely S.: Dwa przykłady oceny osiadań budowli z wykorzystaniem badań dylatometrycznych (DMT).
13. Wojciechowski M.: A note on the differences between Drucker-Prager and Mohr-Coulomb shear strength criteria.