Zastosowanie płyt systemowych typu Kopras oraz słupów z profili szerokostopowych do zabezpieczeń ścian tymczasowych wykopów liniowych związanych z wykonywaniem gazociągów

dr inż. Marek Kopras, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

1. Wprowadzenie

Od lat 90. ubiegłego stulecia można zaobserwować wzrost zapotrzebowania na technologie i urządzenia do zabezpieczania tymczasowych wykopów liniowych i punktowych. Wzrost świadomości firm wykonawczych i zaostrzone przepisy dotyczące bezpieczeństwa powodują już od wielu lat widoczny wzrost kultury i bezpieczeństwa pracy w otwartych tymczasowych głębokich wykopach.
Firma Kopras pierwsze swoje konstrukcje płyt opracowała na początku lat 90. XX wieku. Jako pierwsza polska firma wprowadziła na rynek krajowy systemowe konstrukcje oporowe pod nazwą OW-Wronki.

Rys. 1. *Obudowa OWS-5 firmy Kopras [22]*

Ciągłe poszukiwanie alternatywy dla ścianek szczelnych, np. Larssena, doprowadziło do opracowania płyt i słupów rozpartych za pomocą rozpór rozkręcanych i stałych (rys. 1). Takie rozwiązania zapewniały zabezpieczenie wykopów wąskoprzestrzennych linowych i punktowych. Dla celów zabezpieczania wykopów szerokoprzestrzennych, a także wykopów liniowych o znacznych długościach (np. powyżej 100 m) opracowano system oparty na idei ścianki systemowej firmy Kopras opartej na konstrukcjach pionowych z profili szerokostopowych wbijanych, wciskanych lub podwiercanych w grunt w odstępach odpowiadających długości prefabrykowanych płyt (rys. 2).
Obudowa tego typu nie wymaga użycia nadmiernej ilości stali w porównaniu np. z zastosowaniem ścianek z grodzic

Rys. 2. *Budowa jednostki ratowniczo-gaśniczej przy ul. Wolnica w Poznaniu (1997 rok); przykład mocowania płyt systemowych firmy Kopras w dwuteowych profilach stalowych*

Rys. 3. *Budowa gazociągu Olszyniec k. Żar, 2016 rok, z przykładem zabezpieczenia ścian wykopu z zastosowaniem płyt systemowych i słupów z profili szerokostopowych*

Rys. 4. *Gazociąg Pogórska Wola-Pałęcznica to inwestycja o długości łącznej ok. 78 km; wykop zabezpieczono ściankami słupowo-płytowymi [12]*

stalowych Larssena, a większość elementów, np. płyty, są wielokrotnego użytku i mogą być użytkowane nawet przez 20 lat. W miarę wzrostu świadomości społecznej i ochrony przed nadmiernym zanieczyszczeniem środowiska inwestorzy w dziedzinie budowy gazociągów zdecydowali się na zamianę ścianek szczelnych na obudowy słupowo-płytowe (rys. 3). Liczba inwestycji kanalizacyjnych, wodociągowych oraz gazowych wraz z wejściem Polski do Unii Europejskiej zwiększyła się znacznie ze względu chociażby na napływ środków unijnych na inwestycje infrastrukturalne. Od paru lat działania inwestycyjne polegające na rozbudowie sieci rurociągów przesyłowych na terenie całego kraju powodują wzrost zapotrzebowania na tanie, a zarazem bezpieczne technologie zabezpieczania tymczasowych wykopów liniowych niejednokrotnie długości kilkudziesięciu kilometrów. Ściany słupowo-płytowe idealnie nadają się do zabezpieczania wykopów liniowych pod budowę gazociągów. Wbijane lub wciskane słupy z profili szerokostopowych z wypełnieniem z płyt systemowych firmy Kopras bez rozparcia i podparcia spełniają oczekiwania firm układających rurociągi. Ułożenie rurociągu następuje na zaprojektowanej głębokości pozwalającej na przysypanie warstwami gruntu o grubości, co najmniej 1,2 m, licząc od góry rurociągu, a na terenach zdrenowanych odpowiednio grubszą warstwą. Poszczególne odcinki rurociągu są łączone w całość na powierzchni terenu poprzez spawanie i w długich odcinkach układane są przy użyciu tzw. żurawi bocznych do wykopu, po czym następuje etapowy demontaż obudowy wraz z zasypywaniem rurociągu.

W dotychczasowej praktyce przy budowie rurociągów o znacznych długościach np. gazociągów, stosowano najczęściej obudowy typu Larssena oraz tradycyjne ścianki berlińskie.

2. Ścianka berlińska

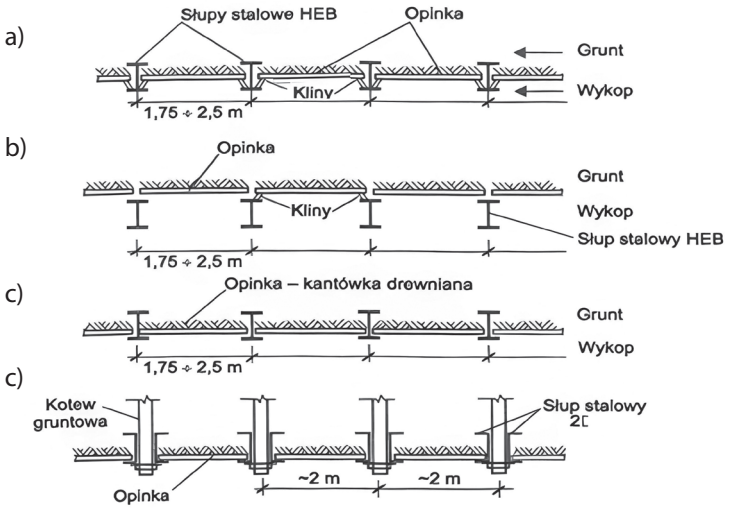
Obudowa berlińska (*Berlin wall* lub *soldier pile wall*) to ściana oporowa służąca do zabezpieczania wykopów tymczasowych składająca się z pionowych elementów najczęściej stalowych profili dwuteowych pogrążanych w gruncie, co kilka metrów, a następnie przestrzeń pomiędzy nimi jest wypełniana opinką z drewna. Nazwa tego typu obudowy pochodzi od metody zabezpieczania głębokich wykopów prowadzonych podczas budowy metra berlińskiego przed II wojną światową.

Obudowa berlińska jest konstrukcją stosunkowo wiotką i dlatego istnieją ograniczenia co do jej stosowania. Elementy składowe ścianki berlińskiej to pionowe stalowe słupy oraz poziome elementy opinki. Częścią ścianki berlińskiej są też kotwy, oczepy, rozpory i podpory. Wykonywanie obudowy wykopu w konstrukcji ścianki berlińskiej dzieli się na trzy fazy: roboty przygotowawcze, osadzenie słupów stalowych w gruncie, zakładanie opinki i rozpieranie obudowy [4, 5].

Ściankę typu berlińskiego cechuje niższy koszt niż w przypadku ścianki szczelnej z grodzic stalowych, np. Larssenów. W przypadku gruntów mocno nawodnionych bardziej opłacalne jest stosowanie ścianki szczelnej Larssena. Największą wadą ścianki berlińskiej jest jej niska szczelność, w związku z tym jest szczególnie polecana na terenach o zwierciadle wód gruntowych znajdującym się poniżej dna wykopu

Fot. Stump – Hydrobudowa Sp z o. o.

Rys. 5. *Ścianka berlińska*



Rys. 6. *Schematy montażu ścianki berlińskiej: a) typowy montaż opinki za półkami słupów dwuteowych z użyciem klinów, b) montaż opinki pomiędzy słupem a gruntem z klinami, c) montaż opinki za półkami słupów dwuteowych bez użycia klinów, d) słupy stalowe złożone z dwóch ceowników umożliwiających montaż kotew gruntowych [1]*

(chyba że zostanie zastosowana instalacja odwadniająca, np. igłofiltrowa). Istnieje też niebezpieczeństwo, że przesączająca się woda doprowadzi do upłynnienia gruntu i powstania zjawiska kurzawki, co w konsekwencji może doprowadzić do osiadania terenu. Dlatego podczas prac należy stosować ciągły monitoring przemieszczeń obudowy i gruntu za ścianką. Kolejnym przeciwskazaniem są nieco większe osiadania terenu za ścianką berlińską niż w przypadku palisady z pali CFA. Wykopy o głębokości około 3–4 m z reguły są zabezpieczane ścianką o schemacie wspornikowym, przy większej głębokości stosuje się rozparcia lub kotwienie [3].

W przypadku ścian rozpieranych sposób i metoda rozparcia zależą od szerokości wykopu. W przypadkach zabezpieczenia wykopów o rozpiętościach ponad 25 m zaleca się stosowanie kotew lub zastrzałów.

Zwyczajowo stosowane profile do ścianki berlińskiej wykonane są z dwuteowników szerokostopowych (HEB, HEM), które charakteryzują się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi w tym wysoką sztywnością giętną. Rzadziej stosowane są profile dwuteowe normalne lub ekonomiczne albo zespawane ceowniki. Dzięki zastosowaniu słupa składającego się z dwóch profili ceowych możemy pomiędzy nimi wykonać kotwy gruntowe. Na opinkę wykorzystuje się wypełnienie z kantówek drewnianych lub desek [1].

3. Perspektywy wykorzystania obudów w wykopach liniowych

Ze względu na dywersyfikację źródeł zaopatrzenia w gaz Polska realizuje budowę m.in. gazociągu Baltic Pipe łączącego Polskę i Danię transportującego gaz ziemny z Norwegii, rozbudowę terminala LNG w Świnoujściu, budowę instalacji LNG w Zatoce Gdańskiej oraz połączeń międzysystemowych ze Słowacją, Litwą, planowanych z Czechami (tzw. projekt interkonektora Stork II) oraz z Ukrainą. Zamierzenia planowane przez operatorów systemów przesyłowych otwierają nowe możliwości i długą perspektywę rozwojową dla firm zaangażowanych w proces budowy sieci gazowych na terenie kraju. Aktualne rozwiązania oferowane przez firmę Kopras przyczyniają się do wzrostu bezpieczeństwa na budowach realizowanych na gazociągach.

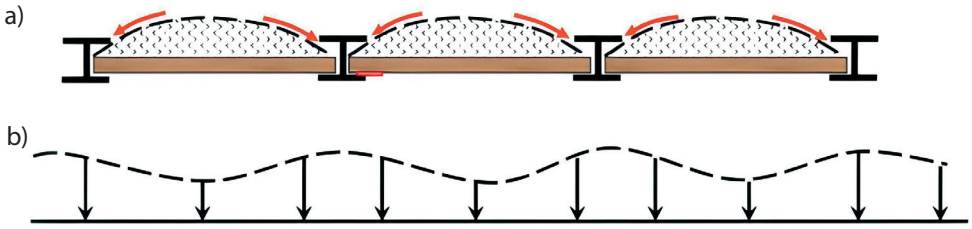
W odróżnieniu od tradycyjnego systemu zawierającego opinkę drewnianą charakteryzującą się wysoką pracochłonnością montażu, małą rozpiętością między podporami, aspektem bezpowrotnej utraty materiału, która to jest sprzeczna z promowaną przez UE ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, firma Kopras zaproponowała stosowanie opinki z płyt systemowych tzw. systemu ścian oporowych słupowo-płytowych, wolnego od powyżej przedstawionych wad i zapewniającego szybki i bezpieczny montaż w zgodzie ze środowiskiem.

Zgodnie z przewidywaniami do końca 2023 roku powstanie w Polsce ok. 2200 km zupełnie nowych gazowych sieci przesyłowych, a w latach 2024–2029 ma powstać kolejne 1183 km nowych sieci gazowych. Należy również mieć na uwadze, że rozbudowa systemu sieci gazowych, oprócz budowy setek kilometrów rurociągów układanych głęboko pod ziemią, obejmuje również budowę nowych zespołów zaporowo-upustowych, stacji gazowych wyposażonych w urządzenia do regulacji paliwa gazowego, pomocniczą infrastrukturę drogową, linie światłowodowe itp. [19].

4. Projektowanie opinki

Według licznych autorów [2, 6, 7, 8, 10, 15] zjawisko przesklepienia gruntu charakteryzuje się tym, że wraz z odkształceniem opinki grunt ma tendencję do mostkowania pomiędzy sztywnymi elementami, tj. periodycznie rozstawionymi słupami, co w rezultacie wywołuje mniejsze parcie gruntu działające na opinkę. Innymi słowy zjawisko to polega na przeniesieniu parcia z mas gruntu z poddającej się odkształceniu opinki na sztywne słupy. Model ten powszechnie spotykany jest w geotechnice inżynierskiej (rys. 7).

Sprawą dyskusyjną jest to, czy rozkład parcia gruntu np. za ścianką berlińską pokazany na rysunku 7b jest wynikiem przesklepienia gruntu, czy jest to efekt wystąpienia parcia czynnego działającego na odkształcającą się opinkę oraz parcia spoczynkowego działającego na nieodkształcalne słupy. Wystąpienie parcia gruntu czynnego, spoczynkowego czy odporu gruntu jest uzależnione od przemieszczenia elementu



Rys. 7. *Zjawisko łukowego przesklepienia gruntu pomiędzy sztywnymi słupami według [2]: a) schemat zjawiska przesklepienia gruntu, b) schemat rozkładu parcia gruntu za ścianka berlińską*

obudowy – jego wielkości i kierunku. Zbieżności te przedstawiono np. w pracy Dembickiego [13].

Na temat rozkładu parcia gruntu za ścianą oporową istnieje kilka propozycji: Terzaghi'ego, Pecka czy Lehmanna. Inni autorzy wykorzystując zjawisko przesklepienia gruntu opisane w [16], które występuje w przekroju poziomym, w konstrukcji słupowo-płytowej pomiędzy słupami, podjęli próbę wykorzystania tego zjawiska do projektowania opinki w ściankach typu berlińskiego. Wymienić tu można takich autorów jak: Liang [18], Li [8], Lee [14, 9], Kourkoulis [17], Perko [6], Spencer [10], Rodatz [11].

Autorzy Ci wskazali, że najbardziej ekonomiczny rozstaw słupów, przy którym występuje zjawisko łukowego przesklepienia gruntu, ma miejsce przy zachowaniu warunku $S \leq 4D$ (gdzie S – rozpiętość opinki, D – szerokość słupa). Tak gęsty rozstaw słupów nie może znaleźć zastosowania przy zabudowach wykopów liniowych stosowanych podczas budowy gazociągów z użyciem opinki z płyt systemowych.

Inni autorzy jak Goldberg-Zoino [2], Macnab [20] czy Perko [6], Li [8] zaproponowali różniące się od poprzednio wymienionych metody obliczania parcia gruntu działającego za opinką.

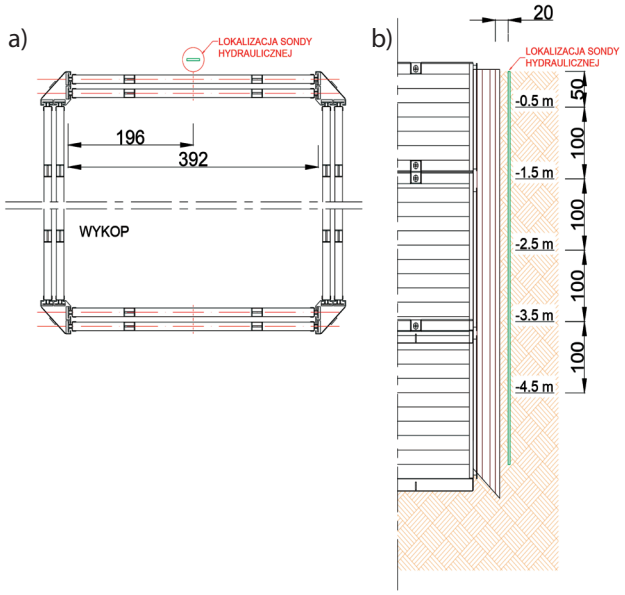
5. Porównanie wyników z badaniami terenowymi

W ramach realizacji pracy doktorskiej [21] przeprowadzono badania w skali naturalnej. Zastosowany układ statyczny na stanowisku badawczym Hipodrom Wola można uznać za porównywalny do podpartej ścianki sztywnej zagłębionej. Komora badawcza o wymiarach 3,92x3,92x6,00 m charakteryzuje się dużą sztywnością poprzeczną – układ płyt ustawionych pod kątem 90° zabezpiecza słup w dwóch płaszczyznach przed przemieszczeniem. Ponadto słupy charakteryzują się znacząco większą sztywnością aniżeli opinka, przez co można je uznać za elementy sztywne, a tym samym możliwe jest wystąpienie zjawiska przesklepienia gruntu za płytami, podobnie jak to przedstawiono w powołanych artykułach. Celem porównania była odpowiedź na pytanie: czy można zastosować do obliczania opinki firmy Kopras, schematy obliczeniowe uwzględniające zjawisko przesklepienia w piaskach drobnych i średnich? Jest to zagadnienie, na które warto szukać odpowiedzi, ponieważ opinka stosowana w ścianach słupowo-płytowych ma decydujący wpływ na całkowitą wagę systemu, a w konsekwencji na koszt najmu obudowy. Płyty aktualnie produkowane i wynajmowane w obudowach systemowych, na podstawie wyników wynikających z doktoratu [21], można uznać za przewymiarowane w stosunku do parć działających na opinkę.

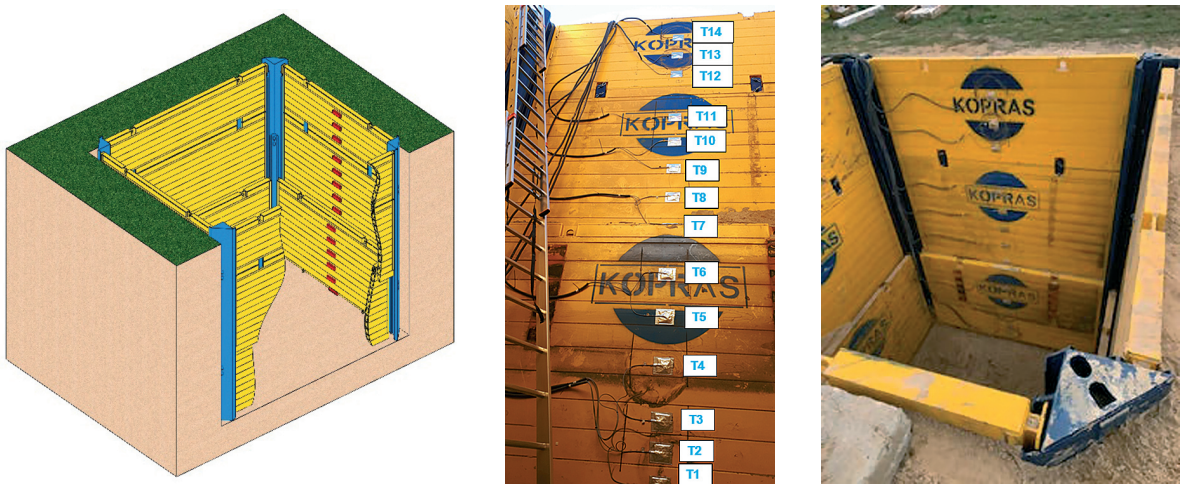
Należy to zagadnienie zgłębić w celu uzyskania miarodajnej metody analitycznej służącej do obliczeń parcia gruntu odwzorowującej warunki i zjawiska występujące w rzeczywistości. W przeprowadzonej niżej analizie wykonano porównanie dla ścian o głębokości do 4,0 m przy założeniu, że najbardziej optymalnie tego typu ścianki będą wykorzystywane do tych właśnie głębokości bez żadnego rozparcia i podparcia, tak jak to ma miejsce podczas budowy gazociągów.

5.1. Opis stanowiska badawczego

Badania terenowe przeprowadzone były w 2019 roku na terenie Hipodromu Wola w Poznaniu. Schemat badanej obudowy przedstawiono na rysunku 8. Badania obejmowały pomiary parcia gruntu za pomocą czujników hydraulicznych oraz pomiary odkształcenia płyt obudowy z użyciem tensometrów elektrooporowych. Lokalizacje umiejscowienia sondy hydraulicznej pokazano na rysunku 8, a położenie czujników tensometrycznych przestawiono na rysunku 9. Parametry geotechniczne w rejonie przeprowadzonych badań zostały wyznaczone za pomocą sondowań CPTU, analiz sitowych oraz badań laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania, Kopras [21].



Rys. 8. *Szkic sytuacyjny stanowiska badawczego obudowy o wymiarach 3,92x3,92x6,00 m (a), przekrój poprzeczny stanowiska badawczego (b)*



Rys. 9. *Wizualizacja miejsca usytuowania tensometrów wraz ze zdjęciem przedstawiającym umiejscowienie tensometrów – po zainstalowaniu*

5.2. Porównanie wyników

Na podstawie metod analitycznych [6, 8, 20] wykonano obliczenia dla parametrów gruntowych stwierdzonych w rejonie stanowiska badawczego Hipodrom Wola, Poznań. Rezultaty badań terenowych porównano z wynikami obliczeń analitycznych i przedstawiono na rysunku 10.

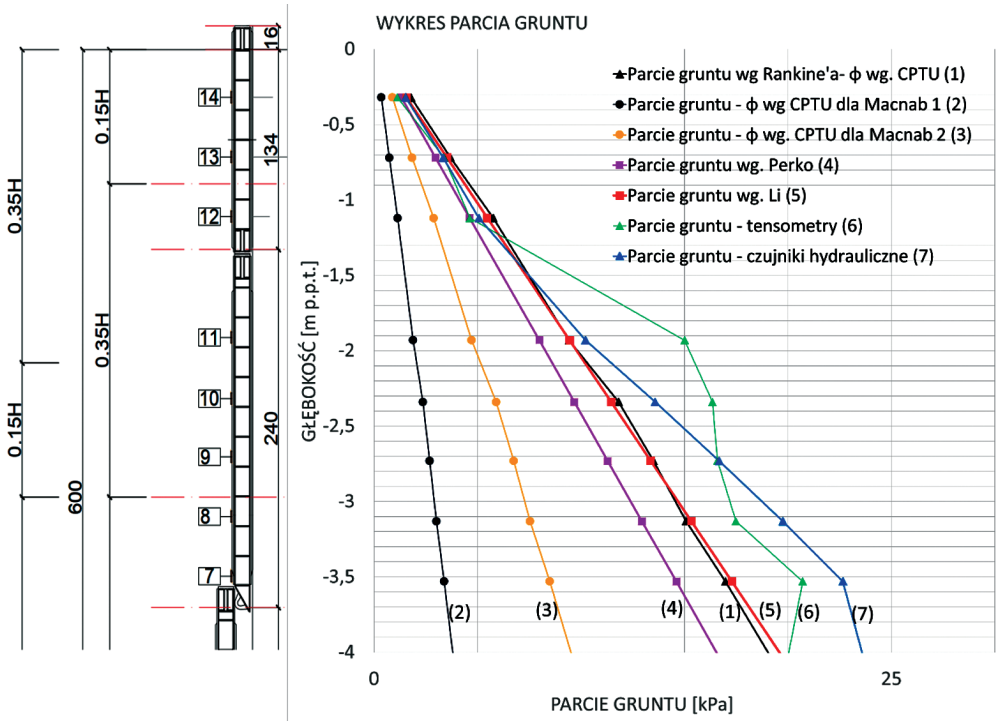
Z uwagi na to, że najbardziej optymalna obudowa słupowo-płytowa ze względu na równowagę statyczną bez podparcia/rozparcia projektowana stosowana jest do 4 m (rys. 10), przedstawiono porównanie rozkładu parć do tej głębokości.

6. Podsumowanie

Spostrzeżenia i wnioski wynikające z przeprowadzonych badań in situ do głębokości 4,0 m p.p.t. na terenie Hipodromu Wola i wyselekcjonowanych metodologii analitycznych przedstawiono poniżej.

- Parcie gruntu na płyty do 4,0 m głębokości, obliczone przy wykorzystaniu metody według Li pokrywa się z parciem obliczonym metodą Rankine'a, jednak powyższe wyniki są niższe niż pomierzone przez czujniki hydrauliczne oraz wynikające z przeliczeń dokonanych z odczytów tensometrów.
- Wyniki obliczeń każdej z metod do 4,0 m głębokości charakteryzują się hydrostatycznym rozkładem parcia gruntu, a więc podobnym do otrzymywanych z klasycznych obliczeń wzorami Coulomba. Obliczone i odczytane wartości parcia zawierają się w przedziale do 25 kPa. Przy zastosowaniu cząstkowego współczynnika bezpieczeństwa $\gamma_F = 1{,}50$ (w stosunku do działania gruntu) obliczeniowe parcie gruntu wyniesie 37,5 kPa.

Rys. 10. *Wykresy parć gruntów na obudowę słupowo-płytową uzyskane z badań terenowych oraz obliczeń analitycznych do głębokości 4,0 m*



- Przy budowie gazociągów w wykopach do 4 m głębokości wystarczy stosować płyty o wytrzymałości do 40,0 kPa.
- Na podstawie dokonanych analiz należy stwierdzić, że w konstrukcjach słupowo-płytowych wielokrotnego użytku firmy Kopras w gruntach niespoistych do 4,0 m głębokości oraz przy długości płyt 3,92 m nie wystąpi za opinką efekt przesklepienia gruntu.
- Dla obliczania wielkości parcia gruntu w przypadku stosowania płyt konstrukcji Kopras nie można stosować metod proponowanych w [6, 8].
- Metoda Macnab [20] dla wyznaczania parcia na opinkę w konstrukcjach Kopras nie powinny być stosowane ze względu na otrzymywane zaniżone wartości.
- Przyczyna niewykształcenia się zjawiska przesklepienia gruntu może wynikać z zastosowania stosunkowo długiej płyty (S = 3,92 m) w stosunku do szerokości słupa, braku wstępnego sprężenia z wykorzystaniem kotew, a tym samym dociśnięcia słupów do masy gruntu, braku ręcznego klinowania opinki podczas montażu.

BIBLIOGRAFIA

[1] Siemińska-Lewandowska A., Głębokie wykopy – projektowanie i wykonawstwo, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2016

[2] California Department of Transportation, Trenching and shoring manual, USA, 2011

[3] Rychlewski P., Obudowa berlińska, Inżynier budownictwa, 2012, https://inzynierbudownictwa.pl/obudowa-berlinska/)

[4] Urbański A., Grodecki M., Analiza stanu awaryjnego zabezpieczenia głębokich wykopów ściankami berlińskimi, Czasopismo Techniczne. Środowisko, 2012

[5] Urbański A., Łabuda A., Metoda modelowania 2D/3D układów typu ścianka berlińska zabezpieczających głębokie wykopy, Czasopismo Techniczne. Środowisko, 2012

[6] Perko H. A., Lateral Earth Pressure on lagging in Soldier Pile Wall Systems, DFI Journal, tom 2, 1/2008

[7] Vermeer P. A., Punlor A., Ruse N., Arching effects behind a soldier pile wall. Computers and Geotechnics, 2001, https://doi.org/10.1016/S0266-352X(01)000106

[8] Li F., Hong Z., Yu J., A novel method of calculating active earth pressure on laggings between piles considering the soil arching effect, Taylor&Francis Group, 2020

[9] Lee min Lee, Design and construction of soil nail reinforced soldier pile wall as a temporary shoring system for deep excavation – a case study, Taylor&Francis Group, 2020

[10] Spencer, White and Prentis, Inc., Lagging Design, Sample Calculationsprovided by Tom Tuozzolo, Moretrench Geotec, Rockaway, 1986

[11] Rodatz W., Geotechnical engineering. Institute of Geotechnical Engineering, Technical University of Braunschweig, Germany, 1995

[12] Gaz system, Gaziociąg Pogórska Wola-Tworzeń, www.gaz-system.pl

[13] Dembicki E., Parcie, odpór i nośność gruntu, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1979

[14] Lee C.-J., Wei Y.-C., Chen H.-T.,. Chang Y.-Y, Lin Y.-C., Huang W.-S., Stability Analysis of Cantilever Double Soldier-piled Walls in Sandy Soil, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011

[15] Hosseinian S., Seifabad M. C., Optimization the distance between Piles in supporting structure using soil arching effect, Journal of Civil Engineering and Urbanism, 2013

[16] Terzaghi K., Theoretical Soil Mechanics, Wiley and Sons, New York, 1943

[17] Kourkoulis R., Gelagoti F., Anastasopoulos I., Gazetas G., Slope stabilizing piles and pile groups: Parametric study and design insights, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011

[18] Liang R., Sanping Z., Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization, Soils and Foundations, 2002

[19] Gaz-System, Krajowy Dziesięcioletni Plan Rozwoju systemu przesyłowego na lata 2022–2031, www.gaz-system.pl

[20] Macnab A., Earth Retention Systems Handbook, McGraw-Hill Companies, 2002

[21] Kopras M., Rozprawa doktorska, Weryfikacja metod projektowania i obliczeń konstrukcji płyt obudowy wykopów tymczasowych, Poznań, 2021

[22] Katalog produktów firmy Kopras, 2022 https://www.kopras.pl/images/download/kopras_katalog_2022.pdf