

PRACE NAUKOWO-PRZEGLĄDOWE

Research review papers

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (3), 488–499

Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (3)

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (3), 488–499

Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (3)

<http://iks.pn.sggw.pl>

DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.3.45

Krzysztof MICHALCZUK, Mirosław LIPIŃSKI, Małgorzata WDOWSKA

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

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Wybrane zagadnienia dotyczące budowy tuneli z wykorzystaniem zmechanizowanych tarcz zawieszinowych Selected issues concerning mechanized tunneling using TBM

Słowa kluczowe: tarcza zmechanizowana, tarcza zawieszinowa, zawieszina ilowa, parametry geotechniczne

Key words: mechanized tunneling using TBM, slurry shield, bentonite suspension, geotechnical parameters

Wprowadzenie

W ostatnich latach zrealizowano w Polsce trzy inwestycje polegające na budowie tuneli z wykorzystaniem zmechanizowanej tarczy do drażenia tuneli, tzw. w skrócie TBM (ang. *tunnel boring machine*). Zakres średnic tuneli wykonywanych z wykorzystaniem tarcz zmechanizowanych wynosi od kilku do kilkunastu metrów. Są to tunele komunikacyjne lub transportowe. W tabeli 1 zestawiono dane techniczne tuneli wykonanych tarczami zmechanizowanymi.

Na świecie akronim TBM może być różnie rozumiany. W przypadku niemieckiego opracowania Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen – DAUB (Bredenstein et al., 2015) skrót TBM jest zarezerwowany dla maszyn przeznaczonych do tunelowania w twardych skałach. Klasyfikacja DAUB jest stosowana w Niemczech, ale również w Austrii i Szwajcarii. W artykule skrót TBM jest użyty do określenia zmechanizowanej zamkniętej tarczy z pełnym urabianiem przodka. Jest to zgodne z klasyfikacją przyjętą przez International Tunneling Association – ITA. Skrót TBM jest w taki sam sposób rozumiany również we Włoszech, Francji oraz w Japonii.

Tarcze TBM, które wykorzystano w Polsce, można zaklasyfikować do poniższych technologii:

TABELA 1. Zestawienie tuneli wykonanych w Polsce do 2015 roku z zastosowaniem tarcz zmechanizowanych

TABLE 1. The list of TBM's tunnels build in Poland until 2015 year

Nazwa obiektu Construction site name	Podstawowe dane techniczne obiektów – Basic technical data of the tunnels				
	długość tuneli tunnels length [m]	średnica wewnętrzna tuneli inside diameter [m]	średnica zewnętrzna tuneli outside diameter [m]	średnica tarczy TBM TBM shield diameter [m]	rodzaj tarczy TBM TBM shield type
Syfon pod Wisłą w Warszawie Sewage tunnel under the Vistula in Warsaw	1300	4,50	5,10	5,39	zawieszona mixshield
Tunele szlakowe II linii metra Running tunnels of the central section of II metro line in Warsaw	2 × 6000	5,40	6,00	6,30	EPB
Tunele drogowe pod Martwą Wisłą w Gdańsku Two tubes road tunnel under the Martwa Vistula in Gdańsk	2 × 1070	11,00	12,20	12,56	zawieszona mixshield

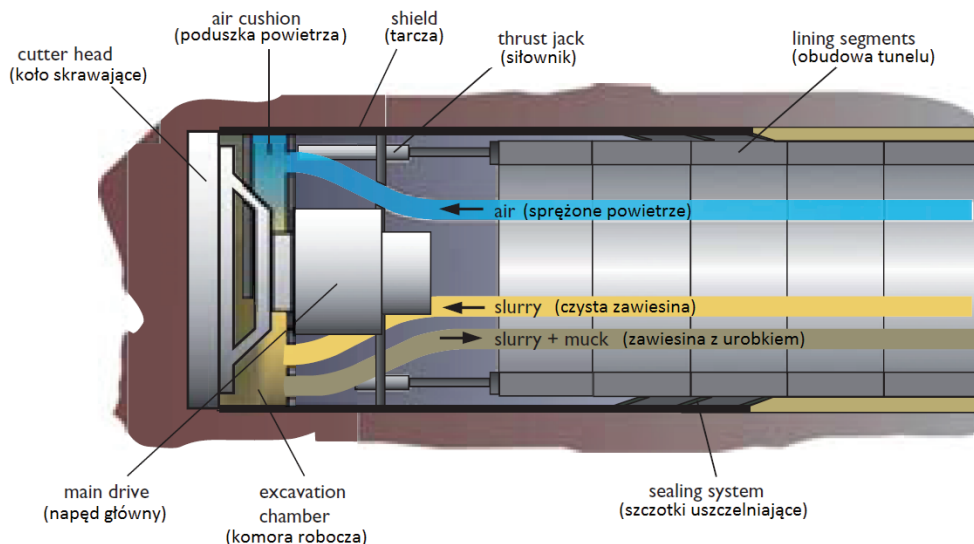
- tarcza zamknięta zawieszona – to tarcza wykorzystująca zawieszoną łożwą do zapewnienia stateczności przodka; maszyna łącząca ze sobą funkcję *hydroshield* i *slurry shield* nazywana jest przez jednego z producentów *mixshield*,
- tarcza zamknięta EPB (ang. *earth pressure balance*) – to tarcza, w której parcie gruntu na głowicę skrawającą jest równoważone w komorze roboczej parciem urobionego gruntu z dodatkami uplastyczniającymi.

Podstawy technologii tunelowania TBM – tarcza zawieszona

Podstawowa różnica między omówionymi wcześniej tarczami polega na sposobie podparcia przodka podczas

drażenia tunelu. W tarczy zawieszona wykorzystuje się zjawisko kolmatacji przodka odpowiednio przygotowaną zawieszoną łożwą w celu jego podparcia. Powstała przesłona, nazywana również plackiem filtracyjnym (ang. *filter cake*), przenosi na przodek siłę wytworzoną w tarczy, której zadaniem jest równoważenie parcia gruntu oraz wody gruntowej. W zależności od rodzaju gruntu (spoisty/niespoisty) wspomniane zjawisko przyjmuje różną formę.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat tarczy zawieszona (ang. *slurry shield*, *hydroshield*) pracującej w trybie z poduszką sprężonego powietrza w komorze roboczej. Ten wariant technologiczny najczęściej jest wykorzystywany do drażenia tuneli tarczami o największych średnicach w najbardziej skomplikowanych warunkach geotechnicznych.



RYSUNEK 1. Schemat tarczy zawiesinowej z poduszką sprężonego powietrza (Gugliemetti, Grasso, Mahtab i Xu, 2008)

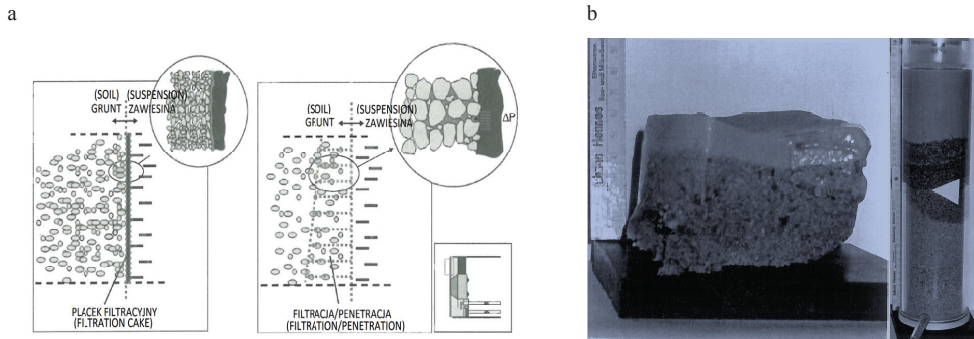
FIGURE 1. Scheme of hydroshield (Gugliemetti, Grasso, Mahtab & Xu, 2008)

Tarcza zawiesinowa pracująca w trybie *hydroshield* realizuje podparcie przodka (ang. *face support/pressure*) za pomocą zawiesiny ilowej, na którą odpowiednie ciśnienie wywierane jest za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza. Zawiesina równowagi parcie gruntu i wód gruntowych poprzez wytworzoną przesłonę filtracyjną (ang. *filter cake*). Warstwa uszczelniająca urabiany grunt przodka powstaje w wyniku kontrolowanej penetracji zawiesiny ilowej w ośrodek gruntowy (rys. 2). Jednocześnie tarcza skrawająca obracając się, urabia grunt, który miesza się z zawiesiną. Wybór tego rodzaju tarczy wiąże się z koniecznością zastosowania stacji separacji urobku.

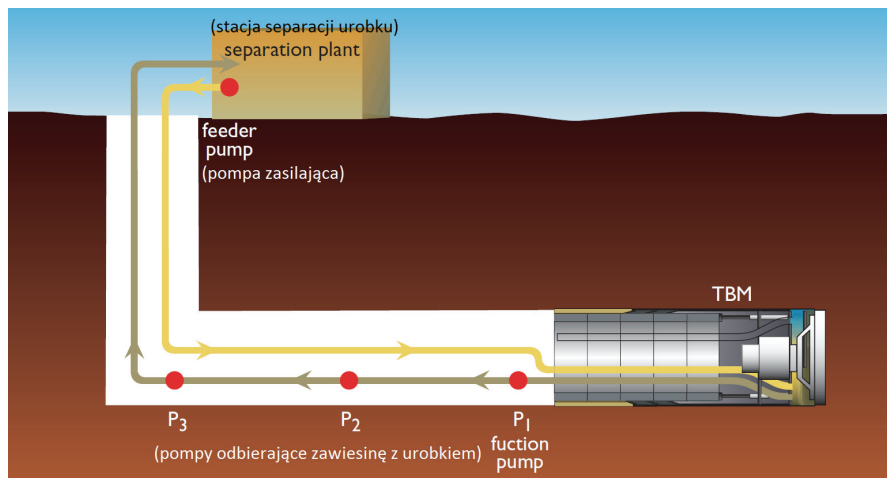
Stacja separacji urobku jest integralnym elementem technologii drążenia tuneli z wykorzystaniem tarcz zawiesinowych. Separacja polega na oddzieleniu maksymalnie dużej ilości fazy stałej od

zawiesiny. Czysta zawiesina jest dostarczana za pomocą pompy i rurociągu do komory roboczej tarczy, a po wymieszaniu z urobkiem odpompowywana jest do stacji separującej. Separacja odbywa się przez zestaw sit o różnych rozmiarach oczek, dostosowanych do frakcji urabianego gruntu. Hydrocyklony oraz wirówki lub prasy filtracyjne są wykorzystywane do usuwania cząsteczek pylastych i ilastych. W technologii tej urabiany materiał wymieszany z zawiesiną ilową jest transportowany na zewnątrz wykonywanego tunelu (do stacji separacji urobku) z wykorzystaniem pomp i systemu rurociągów. Schemat obiegu zawiesiny przedstawiono na rysunku 3.

Podczas drążenia dostarczana do tarczy zawiesina ma zazwyczaj ciężar właściwy $10,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, a powrotna obciążona urobkiem około $13,0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$. Wszystkie powyżej wymienione sposoby oczyszczania mają za zadanie pozo-



RYSUNEK 2. Mechanizm powstawania przesłony filtracyjnej (a) (Gugliemetti i in., 2008) i próbka gruntu (b) (Stein, 2005)
 FIGURE 2. Mechanism of filter cake formation (a) (Gugliemetti et al., 2008) and sample of the soil (b) (Stein, 2005)



RYSUNEK 3. Schemat cyrkulacji płuczki wiertniczej przy drążeniu tunelu tarczą zawiesinową (Gugliemetti i in., 2008)
 FIGURE 3. Scheme of slurry circuit for hydroshield (Gugliemetti et al., 2008)

stawienie zawiesiny ilowej w zamkniętym obiegu, tak aby w maksymalnym stopniu została wykorzystana powtórnie. Koszt zakupu mieszanek iłu wykorzystywanych podczas tunelowania może stanowić kilkuprocentową część kosz-

tów związanych z tą technologią. Należy również dodać, że utylizacja zawiesiny ilowej jest bardzo kłopotliwa i kosztowna, mimo że sam odpad nie oddziałuje szkodliwie na środowisko naturalne.

Rola zawiesiny ilowej w technologii zmechanizowanych tarcz

Rodzaj przesłony filtracyjnej powstającej podczas drażenia jest zależny od przepuszczalności gruntu i jego uziarnienia (składu granulometrycznego). W przypadku tunelowania w gruntach drobniejszych niż żwiry i piaski (współczynnik filtracji $k < 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), zawiesina penetrując grunt, tworzy rodzaj nieprzepuszczalnej dla wody membrany, na którą przekazywane jest ciśnienie czołowe podpierające przodek wyrobiska.

Ciśnienie czołowe wytwarzane jest w komorze roboczej za pomocą poduszki powietrznej wytworzonej na powierzchni zawiesiny. Poduszka powietrzna znajdująca się w tylnej części komory roboczej tarczy. Przesłona ilowa tego typu powstaje w bardzo krótkim czasie (1–2 s). Mechanizm powstawania takiej membrany polega na zakolmatowaniu cząstek ilastych znajdujących się w zawieszynie ilowej na powierzchni urabiającego przodka. Mechanizm ten pokazano na rysunku 2.

W przypadku gruntów o dużych wartościach współczynnika filtracji (rzędu $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i więcej) i o grubszym uziarnieniu zawiesina ilowa penetrując grunt, kolmatuje go i w wyniku zjawiska tiksotropii tworzy żel. Dzięki odpowiedniej lepkości zawiesina wypełnia szkielet gruntowy, wypychając jednocześnie z niego część wody gruntowej. Powstała w ten sposób warstwa szkieletu gruntowego przekazuje ciśnienie stabilizujące parcie górotworu i wody gruntowej.

Bardzo istotne jest odpowiednie dobranie parametrów reologicznych zawiesiny w celu uniknięcia przebicia

hydraulicznego, czyli niekontrolowanej ucieczki zawiesiny do gruntu (ang. *blowout*). Jest to zjawisko niekorzystne, którego efektem jest utrata zarówno dużej ilości zawiesiny, jak i stateczności przodka.

Głębokość penetracji zawiesiny może być wyznaczona ze wzoru (Maidl, Herrenknecht, Maidl i Wehrmeyer, 2013; rys. 4):

$$s = \frac{\Delta p \cdot d_{10}}{2 \cdot \tau_F} \quad (1)$$

gdzie:

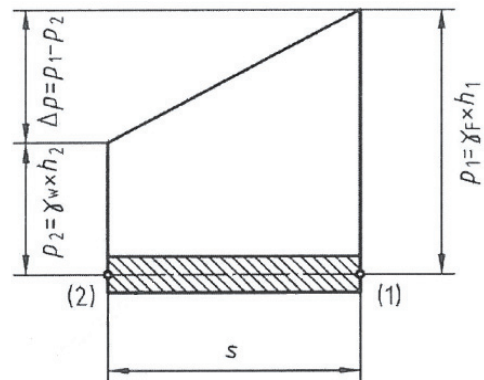
s – głębokość penetracji [mm],

Δp – różnica ciśnienia między zawieszyną ilową a wodą gruntową [Pa],

d_{10} – średnica miarodajna [mm],

τ_F – granica płynięcia zawiesiny ilowej [Pa].

Wraz ze zmniejszaniem średnicy miarodajnej d_{10} do wielkości rzędu 0,001 mm grubość warstwy, w którą penetruje zawiesina, zmniejsza się do



RYSUNEK 4. Graficzna interpretacji wzoru na głębokość penetracji (Maidl i in., 2013)

FIGURE 4. Graphical interpretation of the formula for the depth of penetration (Maidl et al., 2013)

wartości od kilku do kilkunastu milimetrów. Efekt ten jest osiągany w czasie nie dłuższym niż 2 s. Zgodnie ze wzorem (1) występująca w liczniku średnica miarodajna d_{10} może mieć największy wpływ na głębokość, na jaką nastąpi penetracja zawiesziny do przodka podczas urabiania gruntu przy podparciu zawiesiną iłową. Powyższe można uzasadnić tym, że stosowane zakresy różnicy ciśnień są do siebie zbliżone, co powoduje, że uziarnienie gruntu ma decydujący wpływ na grubość powstałej membrany.

Typową zawiesinę o lepkości rzędu kilkudziesięciu sekund mierzonych na lejku Marsha (45–65 s) powinno otrzymać się z wymieszania 25–50 kg bentonitu z 1 m³ wody. Bentonity obecnie stosowane przy drażeniu tuneli z wykorzystaniem tarcz zawieszinowych są produktami tzw. jednownikowymi, co oznacza, że zawierają wszystkie niezbędne składniki dla prawidłowego drażenia tarczą. Poniżej podano orientacyjne grubości miąższości strefy kolmatacji dla trzech rodzajów gruntów:

- żwir – Ż (gr), ($f_i = 0\%$, $f_\pi = 0\%$, $f_p = 48\%$, $f_z + k = 52\%$) – miąższość od 100 do 150 mm,
- piasek gruby – Pr (CSa), ($f_i = 0\%$, $f_\pi = 0\%$, $f_p = 100\%$) – miąższość od 50 do 100 mm,
- piasek pyłasty ze żwirem – P π + Ż (si Sa), ($f_i = 0\%$, $f_\pi = 29\%$, $f_p = 56\%$, $f_z = 15\%$) – miąższość około 50 mm.

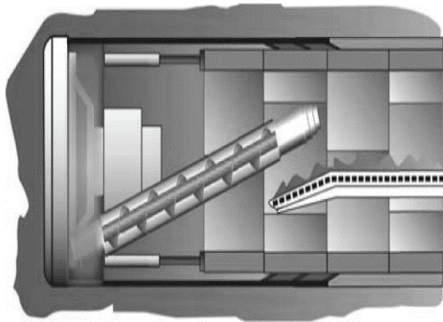
Podstawowe zadania zawiesziny wiertniczej:

- zapewnienie stateczności przodka tunelu podczas drażenia,
- transport urobku,
- utrzymywanie urobku w stanie zawieszenia w trakcie przerw w drażeniu,
- smarowanie dysków skrawających.

Podstawy technologii drażenia tunelu tarczą zmechanizowaną typu EPB

Tarczę TBM typu EPB wykorzystuje się do stabilizacji czoła odwiertu urobiony grunt, który jest homogenizowany, gromadzony w komorze roboczej i utrzymywany pod ciśnieniem. Ciśnienie podpierające (ang. *face pressure*) otrzymywane jest przez docisk maszyny wyposażonej w szczelną przegrodę siłownikami głównymi, dzięki czemu w komorze urabiania tworzy się ciśnienie czołowe. Można je regulować, zmniejszając objętość urobku odbieranego za pośrednictwem podajnika ślimakowego (jego obrotów) i zmniejszając bądź zwiększając docisk na siłownikach głównych. Ciśnienie w komorze urabiania równoważy parcie gruntu i wody gruntowej. Utrzymanie ciśnienia na określonym poziomie wymaga ciągłej kontroli nacisku siłowników głównych tarczy oraz objętości urabianego gruntu. Objętość odbieranego gruntu regulowana jest liczbą obrotów przenośnika ślimakowego zainstalowanego wewnątrz tarczy, której schemat zamieszczono na rysunku 5.

Kolejną podstawową różnicą między tarczą typu zawieszinowego oraz tarczą EPB jest sposób transportowania urobku na zewnątrz tunelu. W tarczy zawieszinowej urobek jest transportowany hydraulicznie za pośrednictwem rurociągów z wykorzystaniem pomp odśrodkowych. Tarcza EPB wykorzystuje do transportu urobionego materiału system taśmociągów. Obydwa systemy są rozbudowywane w sposób ciągły za przemieszczającą się wraz z postępem drażenia głowicą.



RYSUNEK 5. Schemat tarczy TBM typu EPB z głównymi jej elementami (Gugliemetti i in., 2008)

FIGURE 5. Scheme of the TBM shield type EPB with its main components (Gugliemetti et al., 2008)

Warunki geologiczno-inżynierskie determinujące wybór technologii drążenia

Głównym kryterium determinującym wybór technologii tunelowania z wykorzystaniem zmechanizowanych tarcz są warunki geologiczne i hydrogeologiczne w obszarze planowanej inwestycji. W przypadku gruntów nieskalistych można je podzielić na dwie kategorie: spoiste i niespoiste (według EC7 odpowiednio drobnoziarniste i gruboziarniste). Istnieje dość płynna granica między warunkami stosowania tarczy zawieszinowej i tarczy EPB. Tarcze zawieszinowe w głównej mierze znajdują zastosowanie w gruntach niespoistych nawodnionych lub w gruntach mieszanych (spoistych i niespoistych). Grunty niespoiste są tu reprezentowane przez nawodnione piaski i żwiry.

Tarcze zawieszinowe charakteryzują się możliwością precyzyjnego regulowania parcia czołowego podczas drążenia tunelu, co wywiera duży wpływ na

powstawanie deformacji powierzchni terenu znajdującego się powyżej maszyny. Jest to istotne podczas wykonywania tuneli w gęstej zabudowie miejskiej. Kolejną ważną cechą tarcz zawieszinowych, determinującą ich użycie, jest wyposażenie w kruszarkę kamieni. Urządzenie to jest w stanie połamać kamienie nawet o średnicy przekraczającej 1 m. Jest to bardzo ważne w drążeniu tuneli w warstwach geotechnicznych mogących zawierać kamienie narzutowe. Kruszarka kamieni w tarczy zawieszinowej jest urządzeniem niezbędnym. Sterowanie kruszarką może odbywać się w trybie automatycznym lub ręcznym. Tarcze EPB ze względu na brak kruszarki narażone są na blokowanie się mechanizmów odbierających urobek z komory roboczej kamieniami przekraczającymi dozwolone wymiary.

Stosowanie Prawa geologicznego i górniczego do budowy tuneli drążonych

Przepisy Prawa geologicznego i górniczego z 2011 roku stosuje się m.in. do „drążenia tuneli z zastosowaniem techniki górniczej” (art. 2, pkt 1, ust. 4). Generalnie są rozbieżne opinie co do definiowania pojęcia techniki górniczej, jednak celem nie jest rozstrzygnięcie tej kwestii formalnej, a wspomnienie o pewnych aspektach przygotowania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej i hydrogeologicznej na potrzeby takich realizacji. Wytoczne dotyczące sporządzenia takich dokumentacji zawarte są w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2014 roku w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-

-inżynierskiej oraz w cytowanym Prawie geologicznym i górniczym. Bazując na tych dwóch aktach prawnych, sporządza się niezbędną dokumentację.

Warto dodać, że w cytowanym rozporządzeniu nie rozpatruje się w sposób szczególny dokumentowania na potrzeby robót tunelowych, a jedynie pewne ogólne wskazania można czerpać z § 23 dotyczącego określenia warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby posadowienia obiektów budowlanych inwestycji liniowych. Można także w bardzo ograniczonym stopniu czerpać z § 24 dotyczącego jednak znacznie głębszej prospekcji podziemnej oraz innych celach (podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji lub składowanie odpadów).

Schematyzacja warstw geotechnicznych

Pierwszym problemem jest odpowiednio rozpoznanie – schematyzacja (pogrupowanie) warstw geotechnicznych w serie o zbliżonych własnościach (wartościach parametrów geotechnicznych) mających wpływ na drążenie tunelu. Profile geologiczno-inżynierskie, które zawierają niekiedy zbyt dużo wydzielonych warstw geotechnicznych o podobnych własnościach istotnych dla drążenia, są nieefektywne do wykorzystania w obliczeniach i analizach MES. Najczęściej wynika to z błędnej praktyki, w której odrębną warstwę kreuje się na podstawie granulometrycznej klasyfikacji gruntu, nie zaś genezy i stanu. Odpowiednia schematyzacja budowy geologicznej oraz pogrupowanie warstw geotechnicznych w serie o zbliżonych

wartościach parametrów geotechnicznych mających wpływ dla drążenia są zatem niezbędne. Poprzez uśrednianie tych parametrów można uniknąć dzielenia w zasadzie tej samej warstwy geotechnicznej na inne o mniejszych miąższościach, ale o podobnych wartościach danego parametru. Racjonalne określanie parametrów geotechnicznych pozwala zoptymalizować rozwiązania projektowe dotyczące obiektów budowlanych oraz inżynierskich współpracujących z podłożem gruntowym.

Warunki odpływu przy wyznaczeniu parametrów geotechnicznych dla obliczeń ciśnienia czołowego podczas tunelowania tarczą zawieszoną TBM

Określenie parametrów geotechnicznych istotnych przy tunelowaniu wymaga indywidualnego podejścia. Jednym z podstawowych kryteriów określenia parametrów gruntu jest właściwy dobór metody ich wyznaczenia. Metoda wyznaczenia parametru zależy również od celu, dla którego wyznacza się te parametry. Kluczowymi wielkościami, jakie należy wziąć pod uwagę w sytuacjach obliczeń podparcia przodka, są parametry określające wytrzymałość urabianego materiału. W przypadku gruntu podstawowym kryterium doboru rodzaju wytrzymałości i sposobu jej wyznaczenia są warunki odpływu. Standardowo rozróżnia się warunki z pełnym odpływem oraz warunki bez odpływu. O tym, jakie warunki będą występować podczas ścinania, decyduje relacja między intensywno-

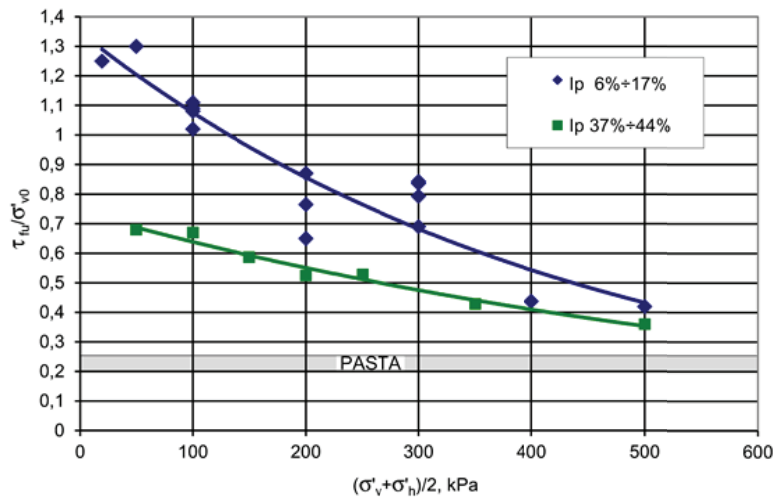
ścią obciążenia a możliwością odpływu wody z porów. Intensywność obciążenia określona jest przez przyrost obciążenia w jednostce czasu, z kolei możliwość odpływu wody z porów wynika z przepuszczalności ścinanego gruntu. W gruntach o małym współczynniku filtracji nawet niewielka intensywność obciążenia powoduje powstawanie nadwyżki ciśnienia wody w porach, przez co (zgodnie z zasadą Terzagiego) zmienia się naprężenie efektywne, którego wielkość decyduje o kształcie ścieżki naprężenia efektywnego i wytrzymałości. W przypadku braku generacji ciśnienia wody podczas ścinania (czyli warunków z pełnym odpływem) wytrzymałość jest najczęściej opisywana kryterium Coulomba–Mohra, w którym położenie obwiedni zniszczenia określają dwa parametry, tj. kąt tarcia wewnętrznego (φ') i spójność (c'). W przypadku wytrzymałości bez odpływu jej wartość opisywana jest jedną liczbą i oznaczana symbolem τ_{fu} lub S_u . Parametr ten zależy od wielkości naprężenia efektywnego poprzedzającego fazę ścinania, dlatego też często jej wartość odnosi się do pionowej składowej naprężenia efektywnego, tj. τ_{fu} / σ'_v .

Różnice w wartościach obu rodzajów wytrzymałości (tj. z odpływem i bez niego) nie są stałe i zależą w największym stopniu od historii stanu naprężenia (Lipiński i Wdowska, 2017). Dla gruntów słabych, tj. najczęściej organicznych lub mineralnych o wskaźniku plastyczności nieprzekraczającym 20% i znajdującym się w stanie miękkoplastycznym, wytrzymałość w warunkach bez odpływu może być znacząco mniejsza od wytrzymałości z odpływem. Dla gruntów silnie prekonsolidowanych wytrzymałość bez odpływu (τ_{fu}) jest większa od tej wyzna-

czanej w warunkach z odpływem. Wynika z tego, że zakres zmienności wytrzymałości wyznaczanej bez odpływu jest większy niż określonej w warunkach z pełnym odpływem dla takich samych przyrostów naprężenia całkowitego.

Niezależnie od historii stanu naprężenia wytrzymałość w warunkach bez odpływu zależy również od rodzaju gruntu, który może być liczbowo reprezentowany przez wskaźnik plastyczności. W celu zilustrowania wpływu rodzaju gruntu oraz jego historii naprężenia na wytrzymałość w warunkach bez odpływu na rysunku 6 przedstawiono zmienność znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} / σ'_v w zależności od naprężenia średniego poprzedzającego ścinanie. Na wykresie są dwa zbiory punktów reprezentujące grunty mało i średnio plastyczne (pyły i gliny) oraz bardzo plastyczne (iły). Wykres ten, zaczerpnięty z pracy Tymińskiego i Kiełczewskiego (2013), uzupełniono o przedział znormalizowanej wytrzymałości typowej dla gruntów normalnie skonsolidowanych, tj. bez historii obciążenia. Zakres $\tau_{fu} / \sigma'_v = 0,20\text{--}0,25$ oznaczono na rysunku 6 jako „pasta”. Z wykresu wynika, że w pyłach i glinach silnie prekonsolidowane ($OCR \approx 15$) znormalizowana wytrzymałość bez odpływu jest sześciokrotnie większa niż dla materiału bez historii. Dla iłów ten wzrost jest dwukrotnie mniejszy.

Z powyższych rozważań wynika, że bardzo istotne jest więc wybranie odpowiedniej metodologii postępowania, na którą składa się wybór rodzaju wytrzymałości i metodyki jej określenia. Inaczej wygląda ustalenie warunków dla budowli typu nasypy, obudowy wykopów, a inne – przy drażeniu tunelu z wykorzystaniem zmechanizowanych tarcz



RYSUNEK 6. Wpływ rodzaju gruntu i historii naprężenia na zmienność znormalizowanej wytrzymałości w warunkach bez odpływu (Tyimiński i Kielczewski, 2013)

FIGURE 6. The influence of the type of soil and the history of the stress variation in no runoff conditions (Tyimiński & Kielczewski, 2013)

zawieszonych. W przypadku prowadzenia robót tunelowych z wykorzystaniem tych tarcz i wykonywaniu obliczeń związanych ze statecznością przodka, istotną wydaje się analiza parametrów geotechnicznych w warunkach bez odpływu z uwagi na znaczącą szybkość drążenia, dochodząca nawet do kilkudziesięciu metrów na dobę (30 m / 24 h). Oznacza to, że trudno jest mówić o wystąpieniu warunku pełnego odpływu, a co za tym idzie dyssypacji ciśnienia porowego przewiercanych tarczą warstw w przeciwieństwie do „klasycznego” fundamentowania, gdzie przyrost naprężenia w gruncie następuje bardzo powoli w miarę wznoszenia danego obiektu.

Podstawowymi analizami i obliczeniami związanymi z technologią tunelowania z podparciem przodka zawieszoną ilową są:

- obliczenie ciśnienia czołowego *face pressure/support* podpierającego przodek tunelu podczas drążenia,

- określenie warunków kontroli przodka – wytworzenie kesonu,
- określenie ciśnienia iniekcji przestrzeni pierścieniowej podczas drążenia.

Powyższe obliczenia są ściśle związane z samą technologią drążenia i mają bezpośredni wpływ na zasięg i wielkość niecki osiadania podczas drążenia tunelu.

Podsumowanie i wnioski

Nawiązując do powyższych zagadnień, sformułowano następujące wnioski:

- prawidłowe przeprowadzenie obliczeń i analiz z wykorzystaniem MES możliwe jest w przypadku odpowiedniego rozpoznania geotechnicznego polegającego na schematyzacji (pogrupowaniu) warstw geotechnicz-

nych w serie o zbliżonych własnościach mechanicznych (parametrach geotechnicznych) mających wpływ na drażnienie;

- obliczanie wartości ciśnienia na przodku podczas prowadzenia robót z wykorzystaniem tarcz zawieszinowych wymaga analizy parametrów geotechnicznych w warunkach bez odpływu z uwagi na znaczącą szybkość drażenia tunelu, dochodzącą do kilkudziesięciu metrów na dobę;
- racjonalny dobór parametrów geotechnicznych oraz właściwego modelu obliczeniowego jest najtrudniejszym zadaniem w obliczaniu konstrukcji współdziałających z gruntem.

Literatura

- Breidenstein, M., Handke D., Fritzsche, W., Gärtner, B., Glitsch, W., Goj, K., Petrasch, H., Remmer, F., Rengshausen, R., Schwarz, J., Wehrmeyer, G., Weiner, T., Wirtz, C. i Zaunsede, M. (2015). *Diskussionspapier zur Erarbeitung konfliktarmer Bauverträge im Tunnelbau*. Köln: Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen.
- Gugliemetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. i Xu, S. (2008). *Mechanized tunneling in urban areas*. London: Taylor & Francis.
- Lipiński, M.J. i Wdowska, M. (2017). *A new method for evaluation of yield stress in cohesive soils*. W *Proceedings of 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul (pp. 435-438). Seoul: Korea Geotechnical Society.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U. i Wehrmeyer G. (2013). *Mechanised shield tunnelling*. Wyd. 2. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Dz.U. 2014, poz. 596.
- Stein, D. (2005). *Trenchless technology for installation of cables and pipelines*. Bochum: Stein & Partner.

Tymiński, W. i Kielczewski, T. (2013). Wpływ wskaźnika plastyczności na parametry wytrzymałościowe gruntów. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 12(2), 73-82.

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. Dz.U. 2011 Nr 163, poz. 981.

Streszczenie

Wybrane zagadnienia dotyczące budowy tuneli z wykorzystaniem zmechanizowanych tarcz zawieszinowych. Głównym kryterium determinującym wybór technologii tunelowania z wykorzystaniem tarczy zmechanizowanej, tzw. TBM (ang. *tunnel boring machine*), są warunki geologiczne i hydrogeologiczne w obszarze planowanej inwestycji. W przypadku gruntów nieskali- stych można je podzielić na dwie kategorie: spoiste i niespoiste. Określenie parametrów geotechnicznych istotnych przy tunelowaniu wymaga indywidualnego podejścia. Jednym z podstawowych kryteriów określenia parametrów gruntu jest właściwy dobór metody ich wyznaczania. W przypadku prowadzenia robót tunelowych z wykorzystaniem tarcz zawieszinowych TBM i wykonywania obliczeń związanych ze statecznością przodka wyznaczenie i analiza parametrów geotechnicznych powinna odnosić się do warunków bez odpływu. W artykule przedstawiono zasady schematyzacji warstw geotechnicznych w pakiety o zbliżonych parametrach wytrzymałościowych. Prawidłowa schematyzacja jest ważna, gdyż interpretacje profili geologiczno-inżynierskich, które zawierają zbyt dużo wydzielonych warstw geotechnicznych o podobnych własnościach, w zasadzie uniemożliwiają wykorzystanie ich w obliczeniach i analizach MES. Należy również zwrócić uwagę, że nadmiernie drobiazgowy i niecelowy podział na warstwy geotechniczne nie wynika z żadnych zapisów aktów prawnych, norm oraz instrukcji, ale jest efektem często spotykanej nieprawidłowej praktyki. W artykule przedstawiono przykłady prawidłowych rozwiązań oraz zasad w zakresie podziału

podłoża na jednorodne warstwy w odniesieniu do budowy tuneli z wykorzystaniem zawieszinowych tarcz zmechanizowanych.

Summary

Selected issues concerning mechanized tunneling using TBM. The major criteria which determine selection of tunneling technology with use of tunnel boring machine (TBM) technique concern geotechnical and hydrogeological conditions of a site. When subsoil strata does not consist of rock the soils are grouped in two categories, i.e. coarse grained and fine grained soils. Determination of geotechnical parameters pertinent to the problem of tunneling requires individual approach in each case. In case of slurry shield technique, calculations of pressure required for face support should account for real load-

ing conditions. In particular, with respect to shear strength, drainage conditions should be properly accounted for. Thus determined shear strength should be assigned to properly distinguished soil layers. The proper division of soil strata into soil layers is also discussed in the paper.

Authors' address:

Krzysztof Michalczyk

Małgorzata Wdowska

(<https://orcid.org/0000-0001-7592-0424>)

Mirosław Lipiński

(<https://orcid.org/0000-0002-6235-8185>)

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa

Poland

e-mail: krzysztof.michalczyk@hddserwis.pl

malgorzata_wdowska@sggw.pl

miroslaw_lipinski@sggw.pl