

Współczesne technologie podziemnego budownictwa komunikacyjnego.

Metody drażenia tuneli komunikacyjnych

Rosnące potrzeby komunikacyjne dużych aglomeracji miejskich w zestawieniu z wysokim stopniem zurbanizowania ich obszarów zmuszają planistów i projektantów do sytuowania nowych lub istniejących już ciągów komunikacyjnych pod powierzchnią terenu. Powstaje zatem potrzeba budowy obiektów zlokalizowanych pod ziemią.

Podstawowymi obiektami komunikacyjnego budownictwa podziemnego [1], do których odnoszą się omawiane w pracy technologie, są:

- tunele przeznaczone dla pojazdów szynowych (obiekty typu liniowego),
- tunele podziemnej kolei miejskiej (metro),
- tunele tramwajowe (tramwaj, tramwaj szybki, premetro),
- tunele kolejowe,
- tunele przeznaczone dla pojazdów samochodowych (obiekty typu liniowego),
- tunele drogowe,
- tunele miejskie (uliczne),
- przejścia podziemne dla pieszych (obiekty liniowe lub powierzchniowe),
- podziemne parkingi i garaże (obiekty powierzchniowe lub kubaturowe).

Wymienione obiekty zlokalizowane są tuż pod powierzchnią terenu (obiekty płytkie) lub na znacznych głębokościach sięgających kilkudziesięciu i więcej metrów (obiekty głębokie). Zagłębienie tych obiektów uzależnione jest między innymi od:

- istniejącej lub planowanej infrastruktury na powierzchni terenu,
- istniejącej lub przewidywanej infrastruktury podziemnej,

- warunków hydrogeologicznych,
- preferowanej metody realizacji budowl podziemnej.

W warunkach miejskich szczególnie istotne jest uwzględnienie wpływu komunikacyjnej budowl podziemnej na sąsiadujące z nią inne budowle zarówno w stadium budowy jak i późniejszej eksploatacji. Dotyczy to szczególnie obiektów zabytkowych stanowiących przedmiot dziedzictwa kulturowego. Stadium budowy obiektu podziemnego na terenach historycznych powinno uwzględniać badania archeologiczne. Ograniczenie emisji hałasu oraz drgań związanych z budowlą jest współcześnie ważnym wymogiem jaki muszą spełnić projektant i wykonawca obiektu. Ponadto budowla podziemna nie powinna nadmiernie ingerować w istniejące tereny zieleni miejskiej. Obecnie, wymaganym najczęściej warunkiem jest zmniejszenie do minimum ograniczeń i trudności komunikacyjnych jakie niesie ze sobą realizacja nowego obiektu.

Złożone uwarunkowania budowy komunikacyjnych budowli podziemnych w miastach zaowocowały rozwojem wielu metod i technologii. Metody te, jak pokazuje praktyka, pozwalają efektywnie realizować skomplikowane konstrukcyjnie i geometrycznie obiekty nawet w najtrudniejszych warunkach lokalizacyjnych.

W pracy przedstawiono przegląd i krótką charakterystykę podstawowych technologii i metod stosowanych współcześnie przy realizacji komunikacyjnych budowli podziemnych. Wybór technologii i metod budowy podyktowany jest między innymi:

- typem budowl,
- lokalizacją wysokościową (zagłębieniem pod powierzchnią terenu),
- sposobem użytkowania powierzchni terenu,
- warunkami hydrogeologicznymi,
- względami ekonomicznymi.

W ogólności wykonawstwo komunikacyjnych budowli podziemnych może przebiegać pod powierzchnią terenu z zastosowaniem różnych metod bezwykopowych lub metodami wykopowymi (odkrywkowymi) realizowanymi z poziomu terenu.

2. Podział metod drażenia tuneli w miastach

Dynamiczny rozwój technik i technologii stosowanych w ostatnich latach do budowy tuneli komunikacyjnych i sieci infrastruktury podziemnej miast spowodował, że liczba potencjalnie możliwych do wykorzystania w warunkach miejskich metod tunelowania systematycznie wzrasta, a nowe metody wypierają

lub stają się alternatywą dla metod stosowanych dotychczas.

Większość z opisanych w literaturze podziałów metod budowy tuneli wyróżnia metody klasyczne (nazywane zazwyczaj górniczymi) i metody drążenia tuneli przy użyciu maszyn do tunelowania TM (Tunnelling Machines) dzielących się na maszyny wierzące TMB (Tunnel Boring Machines) oraz tarcze SM (Shield Machines). Do metod klasycznych zalicza się zazwyczaj także Nową Austriacką Metodę Budowy Tuneli - NATM (New Austrian Tunnelling Method), której zasady ogłosił w 1948 roku prof. Ladislaus von Rabcewicz.

Wymienione metody miały i mają zastosowanie przede wszystkim do realizacji tuneli głębokich - w miastach głównie do budowy tuneli komunikacyjnych. Metody te są na tyle uniwersalne, że pozwalają wykonywać tunele zarówno w łukach pionowych jak i poziomych.

Równocześnie z doskonaleniem wymienionych metod z początkiem lat 70-tych ubiegłego stulecia pojawiły się metody bezwykopowego wykonywania prostoliniowych płytkich tuneli komunikacyjnych, polegające na przeciskaniu ich obudowy (przeciski hydrauliczne) oraz tworzeniu obudowy wstępnej np. z połączonych ze sobą rur - pipe roofing.

3. Metody górnicze

Drążenie urobku w metodach górniczych odbywa się przy użyciu materiałów wybuchowych lub mechanicznie: koparkami albo tzw. kombajnami chodnikowymi. Metodami tymi drąży się tunele o dużych przekrojach (80 - 120 m²). W łatwych warunkach hydrogeologicznych tunele mogą być drążone pełnym przekrojem, jednak w większości przypadków są one wykonywane z podziałem przekroju na strefy: kalota, sztrośa i spąg. Przy dalszych podziałach kalotę dzieli się na sztolnie pilotującą - stropową oraz sztolnie ociosowe. W wyjątkowo trudnych warunkach

geologicznych lub przy przejściach pod przeszkodami stosuje się dodatkowe (wyprzedzające) zabezpieczenia kaloty ekranami prętowymi lub z dyli, metodą jet-grouting, iniektowanymi ekranami rurowymi lub tworząc tzw. „parasol z rur” (system Alwag). Do powszechnie znanych metod górniczych zalicza się [8]:

- system angielski (z końca XVIII w.) stosowany przede wszystkim w gruntach stabilnych,
- system belgijski (pierwsze zastosowanie w 1828 roku przy budowie tunelu Charleroy) stosowany także w gruntach rozdrobnionych,
- system niemiecki (z początku XIX w.) służący do budowy tuneli o dużych przekrojach i przy znacznych naciskach górotworu,
- system austriacki (z początku XIX w.) z urabianiem górotworu praktycznie na całej powierzchni przekroju poprzecznego (rozpoczyna się od sztolni spągowej, z której następuje wdzierka pod strop, poszerzenie jej na boki i wybieranie warstw ku spągowi),
- system włoski nadający się do stosowania w słabym górotworze (rumosz skalny), słabych gruntach (piaski, żwiry) oraz w gruntach nasypanych.

Wymienione systemy ze względu na ich długoletnie stosowanie są dobrze znane, przy czym większość realizowanych przy ich użyciu tuneli nie miała związku z podziemną infrastrukturą komunikacyjną miast.

Z klasycznych metod do realizacji miejskich budowli w większym zakresie wykorzystywano NATM i z częstym stosowaniem tej metody należy liczyć się także w przyszłości. W tabeli 1 przedstawiono przykłady zastosowań NATM do budowy tuneli komunikacyjnych w miastach, włącznie z użyciem tej metody przy budowie ukończonej w 1998 roku linii metra w Londynie (Jubilee Line) [3].

Spośród 21 zasad określonych przez Rabcewicza dla NATM przeło-

mowe znaczenie miało przyjęcie założenia, że górotwór należy traktować jako element nośny konstrukcji tunelu. Dopuszczając odkształcenia górotworu (w pewnych granicach) otoczenie wyrobiska traktuje się tu jako rodzaj „nośnej powłoki” spełniającej rolę obudowy wstępnej. W takim ujęciu kolejność robót polega na wykonaniu wyłomu w odcinkach, montażu obudowy wstępnej (ze zbrojonego siatkami metalowymi betonu natryskowego) o relatywnie małej nośności, konstrukcji spągowej, ułożeniu izolacji oraz wykonaniu obudowy ostatecznej. Stąd też najistotniejszym w NATM jest prawidłowe wykonanie obudowy wstępnej, której optymalne dopasowanie do mogących zmieniać się na trasie warunków wymaga prowadzenie bieżących badań geotechnicznych i pomiarów odkształceń. Na tej podstawie oraz wcześniejszych wyników badań geologicznych ocenia się na bieżąco wymaganą nośność obudowy i wprowadza ewentualne zmiany w stosunku do oszacowań wstępnych. Jest to droga umożliwiająca osiągnięcie dobrych efektów ekonomicznych, gdyż umożliwia dopasowanie obudowy do rzeczywistych warunków. Wiąże się to jednak z koniecznością prowadzenia wyjątkowo precyzyjnych pomiarów geotechnicznych, ponieważ ich wyniki są tu traktowane nie tylko jako baza dla doboru optymalnej konstrukcji, ale także jako baza dla systemu wcześniejszego ostrzegania o możliwości zawału lub wystąpienia innych problemów.

Jak dotąd nie ma doświadczeń wynikających ze stosowania NATM w kraju, jednakże polskie firmy budowały tunele w tej technologii poza granicami (np. tunel kolejowy na linii Frankfurt n. Menem - Kolonia). W związku z tym, biorąc także pod uwagę nasze duże doświadczenia w budownictwie górniczym, można stwierdzić, że merytorycznie polskie środowisko inżynierskie jest przygotowane do podjęcia budowy tuneli

Tabela 1. Wybrane projekty wykonane metodą NATM.

Projekt	Dane techniczne	Warunku gruntowe	Koszt	Termin wykonania
Tunele metro – Frankfurt n. Menem	2 bliźniacze tunele o długości 300 m	ity frankfurckie, (muły i piaski), wodonośne	10 milionów DM	1980–1983
Stacja City Place – metro w Dallas	2 tunele o długości 17000 stóp i średnicach 21 stóp, 3 tunele klatek dla ruchomych schodów, 4 tunele wentylacyjne 2 szyby bezpieczeństwa	wapień, kreda, tarasy piaskowe	125 milionów \$	1992–1996
Stacja Waterloo – metro w Londynie	perony, tunele szlakowe, przejście dla pasażerów, tunele wentylacyjne	mady, osady rzeczne, tarasy żwirowe, ity londyńskie	150 milionów L	1993–1996

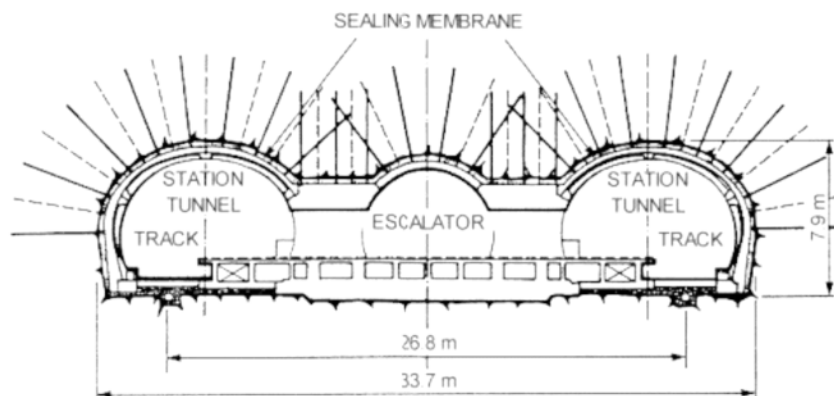
tą metodą. Schemat tunelu wybudowanego Nową Austriacką Metodą Tunelowania przedstawiono na rys.1 [3].

4. Metody z wykorzystaniem maszyn do tunelowania

4.1. Metody z użyciem maszyn wierzących (TBM)

Maszyny wierzące dzieli się na maszyny bez tarczy (TBM) oraz maszyny z tarczą TBM-S (TBM with Shield). Pierwsze, stosowane są przede wszystkim w gruntach skalistych, począwszy od skał twardych (stabilnych) do kruchych w przypadku braku wód gruntowych lub głębinowych, albo gdy wody te występują w zakresie możliwym do opanowania (mały napływ wody do wyrobiska). Wytrzymałość na ścislenie skał (w jednoosiowym stanie naprężenia), w których stosowane mogą być TBM może wahać się w granicach od 300-50 MPa. Przy wyższej wytrzymałości ze względu na szybkie zużywanie się urządzeń tnących koszt użycia TBM może okazać się zbyt wysoki. Ponadto, dla poprawnego funkcjonowania TBM wytrzymałość gruntu na rozciąganie powinna wahać się w granicach 25 - 5 MPa, stopień zwietrzenia w przedziale od 100 - 50 %, a odległość pomiędzy szczelinami powinna być większa od 0,6 m [2]. W wyniku drążenia powstaje wyrobisko o kształcie kołowym. W przypadku tuneli o średnicy większej od 10 m stosuje się nieraz maszyny ekspansywne. W pierwszej kolejności wykonuje się wtedy tunel pilotowy o małej średnicy, który następnie rozwierca się do wymaganej projektem średnicy końcowej. W stabilnych wyrobiskach obudowa tunelu wykonywana jest w odległości około 10 - 15 m za głowicą wierzącą. Maszyna w takim przypadku musi być kotwiona w ścianach wyrobiska w celu przekazania na nie reakcji poziomych podczas przesuwania jej do przodu. W skałach kruchych, mniej stabilnych do czasu wykonania obudowy końcowej wyrobisko jest zabezpieczane kotwami, betonem natryskowym lub stalowymi łukami podpierającymi (profile walcowane lub kratownice z wiotkich prętów).

Maszyny TBM-S wyposażone w szczelne osłony czoła, głowicy skrawającej oraz tyłu. Stosowane mogą być w spękanych i niestabilnych skałach, także przy dużym stopniu ich nawod-



Rysunek 1. Schemat konstrukcji stacji metro wybudowanej w wykorzystaniu NATM
 sealing membrane - izolacja przeciwwodna, station tunnel - platforma peronu,
 track - torowisko, escalator - schody ruchome

nienia. Odległość między szczelinami może tu wahać się w granicach 0,6 - 0,06 m, a stopień zwietrzenia od 50 do 10 %. Wytrzymałość na ścislenie skał, w których stosowane mogą być TBM-S może zawierać się w granicach 50 - 5 MPa, a na rozciąganie od 5 - 0,5 MPa [2]. Obudowa wyrobiska (o przekroju kołowym) montowana jest z wewnątrz maszyny i o nią opierają się siłowniki dociskające głowicę wierzącą do czoła wyrobiska, w związku z czym nie ma potrzeby stosowania systemu kotwienia maszyny do ścian wyrobiska. Obudowa wykonywana jest z tubingów ze staliwa lub żeliwa, betonowych albo z betonu wciskanego pomiędzy kołnierz tarczy a przesuwne deskowanie. Ostatnia z obudów stanowi skuteczną zapórę dla wód gruntowych.

4.2. Metoda z zastosowaniem tarczy SM

Metodę drążenia tuneli z użyciem tarczy zastosowano znacznie wcześniej od maszyn wierzących (TBM). Po raz pierwszy w 1825 roku przy realizacji tunelu komunikacyjnego pod Tamizą w Londynie. Za wynalazcę tej technologii uważa się Lorda Marc'a Isambard'a Brunel'a, który opatentował swój pomysł w 1818 roku. Pierwsza tarcza, w przeciwieństwie do rozwiązań późniejszych, miała kształt prostokątny i wymiary: szerokość 11,0 m, wysokość ok. 6,7 m [3]. Podzielona była na sekcje i służyła do realizacji konstrukcji tunelu wykonywanej z cegły. Budowa tego tunelu, trwająca 18 lat została ukończona, a obiekt stanowi zabytek techniki i jest traktowany jako

pierwszy wytwór współczesnych technologii tunelowania.

Tarcze dzielą się na tarcze z wydobyciem całym przekrojem (SM full-face) i tarcze z wydobyciem częścią przekroju (SM with part heading). Główną cechą charakteryzującą tarcze jest sposób podparcia czoła wyrobiska. Ze względu na to kryterium SM full-face dzielą się na tarcze [4]:

- bez podparcia (face without support) stosowane w przekonsolidowanych, suchych gruntach gliniastych,
- z podparciem mechanicznym (face with mechanical support) stosowane w łatwoskrawalnych, suchych gruntach - przede wszystkim w niestabilnych gruntach spoistych lub gruntach uwarstwionych składających się z warstw gruntów spoistych i niespoistych,
- ze wspomaganie sprężonym powietrzem (face with compressed air application) stosowane, gdy oba typy wymienionych wyżej maszyn muszą pracować w gruntach nawodnionych,
- z podparciem płuczką (face with fluid support) stosowane w gruntach niespoistych (np. żwirach lub piaskach) nawodnionych lub nie nawodnionych,
- z podparciem szlamem z urobionego materiału gruntowego (face with earth pressure balance support) stosowane szczególnie chętnie w gruntach spoistych.

Tarcze drugiego rodzaju (SM with part heading) dzielą się na tarcze:

- bez podparcia (face without support) stosowane przy stabilnym czołe wyrobiska,

- z podparciem mechanicznym (face with mechanical support) stosowane, gdy oparcie gruntu leżącego pod kątem stoku naturalnego na platformach czoła tarczy jest wystarczające dla kontroli deformacji podczas przesuwania się maszyny do przodu,
- ze wspomaganiami sprężonym powietrzem (face with compressed air application) stosowane w przypadku występowania wody gruntowej (urobek przedostaje się do wnętrza tarczy przez służę),
- z podparciem płuczką (face with fluid support) stosowane w gruntach piaszczysto-gliniastych.

Obudowa tunelu w przypadku wykorzystania tarczy, podobnie jak w przypadku użycia maszyn typu TBM-S, jest wykonywana we wnętrzu maszyny, z tubingów lub wciskanego betonu jako konstrukcja końcowa (bez obudowy wstępnej).

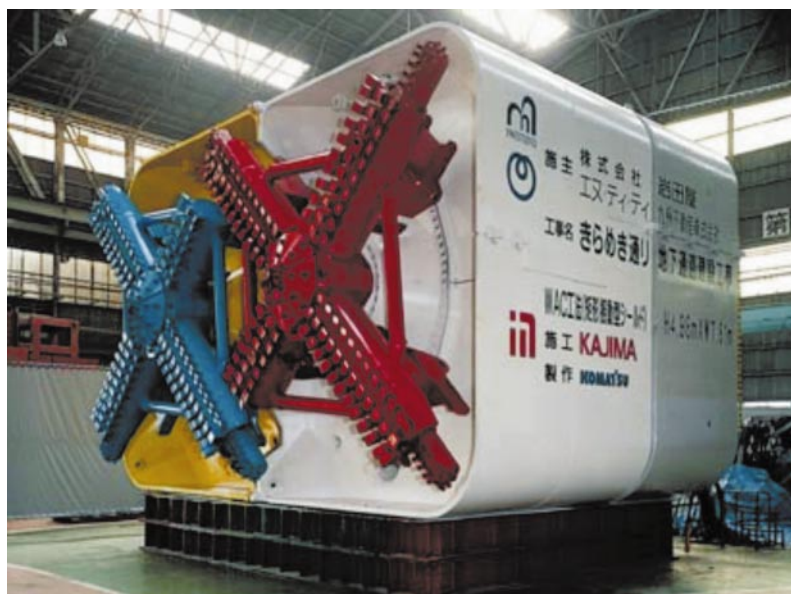
4.3. Nietypowe maszyny drążące

Dynamiczny rozwój TBM i SM spowodował, że w ostatnich latach przystąpiono do produkcji maszyn umożliwiających wykonywanie tuneli o niekołowych przekrojach poprzecznych. Do maszyn tego typu zalicza się [5]:

- DPLEX Shield Machines (Developing Parallel Link Excavating Shield Machines), które umożliwiają drążenie tuneli o przekrojach prostokątnych, owalnych i podkowiatych,
- WCST - Wagging Cutter Shield Machines oraz RSM - Rectangle Shield Machines, które umożliwiają drążenie tuneli prostokątnych,
- MCFSM - Multi-Circular Face Shield Machines oraz MMSM - Multi Micro Shield Machines, które umożliwiają drążenie tuneli o złożonych kształtach przekroju poprzecznego (np. całych stacji metro).

Grunt w takich maszynach urabiany jest przy użyciu zespołu urządzeń tnących dopasowanych do niekołowych kształtów przekrojów poprzecznych wyrobisk. Zdjęcie pierwszej maszyny typu WCST przedstawiono na rys.2 [6].

Maszyny te są szczególnie przydatne w obszarach zurbanizowanych, gdzie klasyczne (kołowe) przekroje



Rysunek 2. Maszyna typu WCST.

tuneli mogą okazać się nieekonomiczne, gdyż nie odpowiadają kształtom skrajni komunikacyjnych. Największą z dotychczasowych maszyn typu DPLEX Shield wykorzystano w gruntach błotnistych przy budowie tunelu na jedenastej linii tokijskiego metro. Średnica zewnętrzna tej maszyny miała 9,6 m. WCSM po raz pierwszy zastosowano podczas budowy tunelu prostokątnego o przekroju 9,9 x 6,5 m dla podziemnej kolei w Kyoto. Całkowita długość tunelu wynosi 753 m, z czego na odcinku o długości 697 m jego obudowa została podparta w środku słupami tworząc niejako tunel dwunawowy.

Maszyna typu MCFSM została użyta do budowy stacji metro „Business Park” o wymiarach przekroju poprzecznego 17,30 x 7,8 m w Osace, a maszyna MMSM, do budowy odcinka tunelu o przekroju 15 x 14 m na autostradzie Trans-Kawasaki w Japonii.

Niewątpliwy przełom na rynku maszyn do drążenia tuneli w miastach może w bliskiej perspektywie być związany z popularyzacją metody umożliwiającej wykonywanie tuneli bez szybów pośrednich. Metoda MSD (Mechanical Shield Docking Method) opiera się na zastosowaniu maszyn ze specjalnie skonstruowanym kołnierzem stalowym wysuniętym przed urządzenie skrawające. Kołnierze te po zakończeniu przemieszczenia się

naprzeciw siebie poruszających się maszyn, łączą się mechanicznie tworząc ciągłą obudowę bez potrzeby budowy szybu w miejscu połączenia obu pierścieni. Przy użyciu tej metody wybudowano w 1997 roku Trans-Tokyo Bay Tunnel o średnicy 14,4 m.

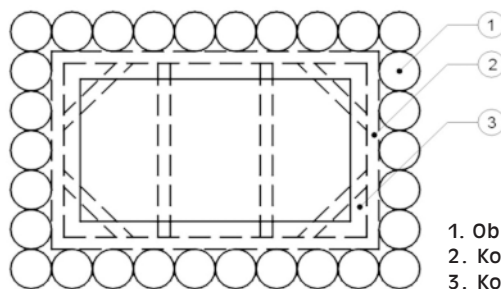
Tak szeroka gama możliwości maszyn typu TBM i SM oraz ich pochodnych powoduje, że pokrywają one w pełni cały zakres warunków hydrogeologicznych w jakich mogą być drążone tunele oraz potrzeb kształtów przekrojów poprzecznych komunikacyjnych budowli podziemnych. To też powoduje, że metoda tarczowa znajduje najczęstsze zastosowania we współczesnym tunelowaniu. W kraju doświadczenia z wykorzystaniem metody tarczowej wiążą się wyłącznie z realizacją warszawskiego metro. Niemniej jednak pracujące tam firmy wykonywały tunele tą metodą także poza granicami Polski. Można zatem sądzić, że ze względu na uniwersalność metody oraz zdobyte doświadczenia byłyby w stanie podjąć się wykonania tuneli komunikacyjnych metodą tarczową także w warunkach jakie występują w Krakowie.

5. Metoda pipe roofing

Metoda pipe roofing polega na dwuetapowej realizacji budowli podziemnej. W pierwszym etapie wykonywana jest obudowa wstępna

z szeregu połączonych ze sobą tuneli o małych średnicach (ca' 1000 mm) wykonanych z rur stalowych i łączonych wzdłuż pobocznic tzw. zamkami. W wyniku takich działań na całym obszarze budowli podziemnej lub jego fragmencie powstaje konstrukcja umożliwiająca wydobycie z chronionej przez nią części górotworu gruntu i przygotowanie przestrzeni, w której wykonywana jest końcowa konstrukcja projektowanej budowli. Przy użyciu tej metody można tworzyć obudowy prostoliniowe o prostokątnych, kołowych i łukowych kształtach przekroju poprzecznego. W przypadkach szczególnych tworzone mogą być także inne kształty.

Wykonanie konstrukcji tymczasowej odbywa się pomiędzy dwiema studniami roboczymi - studnią początkową i końcową. Studnia początkowa wyposażona jest w klasyczne urządzenia do mikrotunelowania, przy czym jej gabaryty dostosowane są do wymiarów przekroju poprzecznego realizowanej budowli podziemnej i zestawu urządzeń. Wprowadzanie w grunt rur stalowych (mikrotuneli) rozpoczyna się „od góry”, co oznacza, że pierwsze mikrotunele wykonywane są w części stropowej, następnie w ścianach bocznych, a ostatnie w części spągowej. Po umieszczeniu obudowy wstępnej w gruncie wydobywa się urobek, który może być urabiany ręcznie lub mechanicznie. Prace prowadzone są równocześnie z obu studni lub z jednej z nich. W miarę postępu prac w wyrobisku, w przypadku przekrojów prostokątnych i bramowych, instalowane są stalowe konstrukcje ramowe mające za zadanie tymczasowe podparcie obudowy wstępnej, tak aby nie zmie-



1. Obudowa wstępna typu pipe roofing.
2. Konstrukcja tymczasowa - stalowa.
3. Konstrukcja finalna - żelbetowa.

Rysunek 3. Elementy obudowy w metodzie pipe roofing.

niała ona kształtu przekroju poprzecznego. Schemat tak zabezpieczonej obudowy przedstawiono na rys.3 [7]. W przypadku obudów wstępnych o innym kształcie przekroju poprzecznego, dopasowanym do ciśnień sklepienia gruntowego i spągu (gdy nie występują w nich momenty zginające), stosowanie ram stalowych nie jest konieczne.

Pierwsze zastosowanie metody miało miejsce w 1998 roku przy realizacji tunelu wentylacyjnego dla obsługi metro w Warszawie. Tunel wykonano pod 5-cio piętrowym budynkiem o konstrukcji szkieletowej opartej na stopach fundamentowych, a zatem bardzo wrażliwej na osiadania.

Przekrój wykonanego tunelu ma wysokość 5 m, szerokość 10 m i długość 25 m. Obudowę wstępną wykonano z 21 mikrotuneli o średnicy 800 i 1200 mm, tworzących sklepienie łukowe przechodzące w odcinki proste w przyspągowych częściach przekroju. Projektowaną geometrię tunelu zapewniono wprowadzając z dużą dokładnością pierwszy (pilotujący) mikrotunel o średnicy 1200 mm, który służył do naprowadzania następnych mikrotuneli o średnicach 800 mm, po-

zez prowadnice zamków. W trakcie prac przeciskowych dla zmniejszenia tarcia stosowano lubrykat w postaci zawiesiny bentonitowej. Prace wykonała polska firma specjalizująca się w bezwykopowych metodach realizacji budowli podziemnych w miastach.

6. Metoda przeciskania hydraulicznego

Metoda przeciskania, podobnie jak metoda pipe roofing, może służyć do wykonywania krótkich (kilkudziesięciometrowych), prostoliniowych tuneli komunikacyjnych. Tunele wykonywane tą metodą są też zazwyczaj mocno wypłycone. Wymienione cechy powodują, że obie metody najczęściej wykorzystywane są do budowy krótkich tuneli komunikacji samochodowej oraz przejść podziemnych dla pieszych. Możliwości techniczne kształtowania przekroju poprzecznego w obu metodach zachęcają do takiego ich stosowania, gdyż umożliwiają realizację tuneli o prostokątnym kształcie przekroju poprzecznego, co dobrze odpowiada skrajni wymienionych typów tuneli. Metody te różnią się jednak zasadniczo etapami wykonywania budowli.

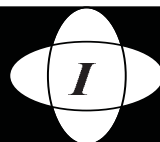


**Zakład Usług
Hydrotechnicznych
i Podwodnych**

**ul. Zaciszna 2/28
02-912 Warszawa
tel./fax 0 22/642 72 75**

Przebierty sterowane do 400 mb i 600 mm
Przebierta metodą bagrowania - długość bez ograniczeń dla wszystkich średnic rurociągów.

**najniższe ceny!
zadzwoń!**



INKOP

<http://www.inkop.pl> e-mail: inkop@inkop.pl
30-389 Kraków ul. Komuny Paryskiej 5 tel.262 14 41, fax:262 41 32

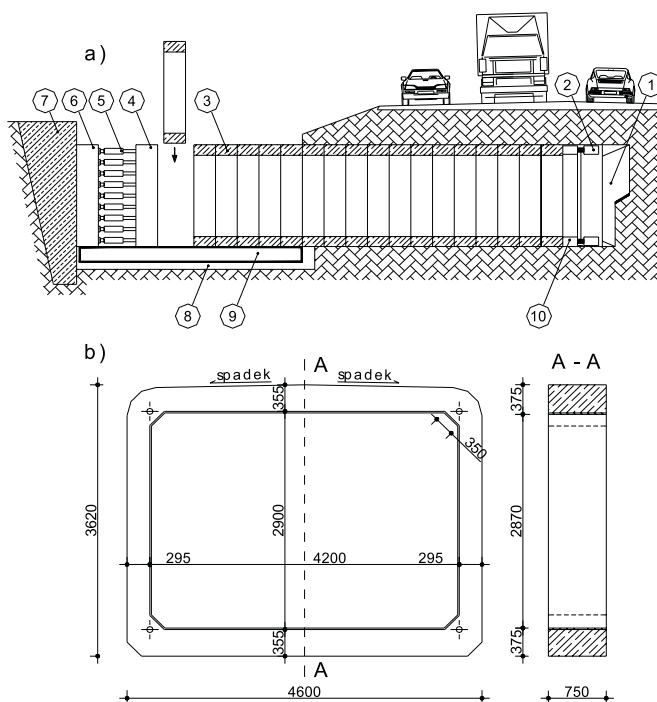
**PROFESJONALNY WYKONAWCA
PRECYZYJNYCH PRZEBIERTÓW
W EKSTREMALNYCH WARUNKACH
GRUNTOWO - WODNYCH**

Przebiert sterowany teleoptycznie do DN 1300 mm
Przecisk pneumatyczny do DN 2100 mm
Mikrotunelling, igłofiltr, ścianki szczelne

W przypadku metody pipe roofing, podobnie jak w klasycznych metodach, najpierw wykonuje się obudowę wstępną a następnie końcową. W przypadku przecisków hydraulicznych wykonuje się, podobnie jak w metodach TBM i SM, od razu obudowę końcową. Połączeniem stosowania obu metod jest przypadek, gdy małe zagłębienie tunelu realizowanego metodą przecisku hydraulicznego może powodować nadmierne deformacje gruntu nad tunelem. W takich sytuacjach wykorzystuje się często horyzontalny typ metody pipe roofing do stworzenia przepony poziomej pomiędzy powierzchnią terenu a stropem wciskanej konstrukcji tunelu [8]. Wykonawstwo przepony złożonej z połączonych mikrotuneli generuje bowiem zdecydowanie mniejsze osiadania, co umożliwia przepychanie tuneli na małych głębokościach np. pod trakcjami kolejowymi i innymi budowlami o dużej wrażliwości na osiadania.

Przeciskanie rozpoczyna się od wykonania szybu początkowego i końcowego. Wymiary szybu początkowego zależą od wymiarów przepychanych elementów, głębokości na jakiej elementy będą przepychane, wymiarów zespołu urządzeń do przepychania, które zostaną w szybie zainstalowane (siłowników, bloku oporowego, płyty dennej i torowiska) oraz sposobu zabezpieczenia ścian szybu i jego odwodnienia. Po wykonaniu komór i ich wyposażeniu według schematu przedstawionego na rys. 4 [9] rozpoczyna się proces przepychania obudowy tunelu.

W pierwszym etapie prac stalowa tarcza z nożem lub urządzeniem drążącym montowana jest na ślizgowym torowisku, a następnie wpychana w grunt, przez wykonane w przeciwległej do bloku oporowego ścianie „okno”, którego przekrój jest ściśle dopasowany do zewnętrznych wymiarów przekroju poprzecznego obudowy tunelu. Reakcja z pchających tarczę siłowników hydraulicznych przekazywana jest za pomocą bloku oporowego, poprzez ścianę zabezpieczającą skarpe szybu, na grunt. Po wpechnięciu tarczy w grunt, na torowisku układany jest pierwszy element obudowy. Pchając ten element, poprzez sztywny pierścień rozkładający równomiernie punktowe naciski siłow-



Rysunek 4. Schemat metody przecisku hydraulicznego.

- a) - schemat technologiczny: 1 - nóż, 2 - siłowniki korygujące kierunek przesuwu, 3 - prefabrykat żelbetowy, 4 - sztywna rama do przekazania nacisków od siłowników, 5 , 6 - układ pchających siłowników hydraulicznych, 7 - blok oporowy, 8 - dno komory, 9 - prowadnice, 10 - rama utrzymująca siłowniki korygujące,
 b) przykład prefabrykatu dla wykonywania przejść podziemnych dla pieszych

ników na powierzchnię czoła elementu, zarówno on jak i tarcza przemieszczane są w głąb górotworu. Po wpechnięciu elementu i wydobyciu urobku z jego wnętrza i tarczy na torowisku układany jest następny element obudowy i czynności zastają powtórzone. Teoretycznie można więc przepychać bardzo długie odcinki tuneli. W praktyce jest to jednak ograniczone wzrastającą, ze wzrostem długości wpychanej obudowy wyrobiska, siłą tarcia. Ponadto, długość przeciskanych odcinków ograniczona jest warunkami ekonomicznymi jakie wynikają z kosztów transportu urobku, wentylacji, oświetlenia i łączności, a także możliwości iniektowania lubrykatu. Przeciskane tunele o profilach prostokątnych mają zazwyczaj konstrukcję żelbetową. Szyby, podobnie jak w innych technikach bezwykopowych (także pipe roofing), najczęściej mają kształt prostokątny lub okrągły. Skarpy szybów są zabezpieczane ściankami szczelnymi z profili stalowych lub konstrukcjami żelbetowymi. Odwodnienia szybów zależą od ilości napływającej wody i mogą być z wnętrza szybów, igłofiltr, studnie,

a nawet instalacje zamrażające górotwór lub urządzenia do jego uszczelniania.

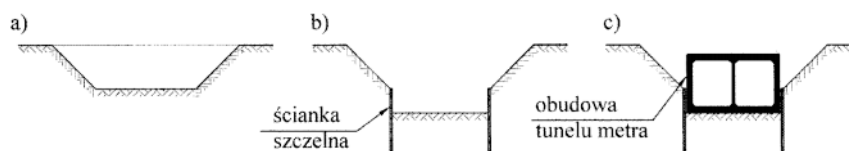
Metoda przeciskania konstrukcji tuneli komunikacyjnych była stosowana przez polskie firmy na terenie kraju, między innymi przy budowie tuneli drogowych w Nowym Sączu (lata 90. XX w.) i Piotrkowie Trybunalskim oraz przejść podziemnych dla pieszych pod nasypami kolejowymi w Łodzi i województwie łódzkim (lata 1977-2000), gdzie wspomagano ją metodą pipe roofing dla tworzenia wspomnianych przepon zapobiegających nadmiernym osiadaniom.

7. Metody wykopowe (odkrywkowe)

W przypadku budowli komunikacyjnych, położonych niezbyt głęboko pod powierzchnią terenu, szerokie zastosowanie znajdują metody wykopowe (odkrywkowe) polegające na realizacji obiektów w wykopach szerokoprzestrzennych (metoda tradycyjna) lub wąskoprzestrzennych. W warunkach gęstej zabudowy miejskiej z reguły możliwe jest tylko wykonywanie wykopów wąskoprzestrzennych.

7.1. Realizacja budowli w wykopie szerokoprzecznym

Metoda ta znajduje zastosowanie na obszarach wolnych od zabudowy i w szerokim zakresie dostępnych dla inwestora i wykonawcy. Wznoszenie obiektu podziemnego (np. stacji metra, parkingu, garażu, przejścia dla pieszych, tunelu drogowego) jest analogiczne do realizacji budowli kubaturowej na poziomie odpowiednio obniżonym w stosunku do powierzchni otaczającego terenu. Skarpy wykopu kształtujemy stosownie do własności geotechnicznych gruntu. Wspomagająco można stosować ścianki szczelne w dolnych partiach wykopów. Często występuje potrzeba obniżania zwierciadła wód gruntowych, filtrujących do wykopu. Schemat realizacji płytkiego tunelu metra w wykopie szerokoprzecznym pokazano na rys. 5.



Rysunek 5a. Realizacja płytkiego tunelu metra w wykopie szerokoprzecznym. a) wykop szerokoprzecznym z ukształtowanymi skarpami, b) pogłębienie wykopu z zabezpieczeniem ściankami szczelnymi, c) wykonanie obudowy tunelu.

7.2. Wykonawstwo w wykopach wąskoprzecznym

Gęsta zabudowa powierzchni terenów, zwłaszcza w centrach miast, bliskość tej zabudowy w stosunku do planowanej lokalizacji obiektów podziemnych, konieczność minimalizacji utrudnień komunikacyjnych zmuszają wykonawców do znacznego ograniczenia zajętości terenów podczas budowy, zarówno w rozumieniu terytorialnym jak i czasowym.

Minimalizacja zajętości terytorialnej osiągnięta jest dzięki wykonawstwu obiektów podziemnych w wykopach wąskoprzecznym. Podstawowym problemem jaki tutaj występuje jest zabezpieczenie ścian wykopów, zwłaszcza tych o znacznych głębokościach.

7.2.1. Sposoby zabezpieczania ścian wykopów

Sposoby zabezpieczania ścian wykopów przeszły głęboką ewolucję na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat. Poniżej ograniczono się do przedstawienia technik najczęściej wykorzystywanych we współczesnych realizacjach.

Do zabezpieczania ścian wykopów wąskoprzecznym są stosowane:

- ścianki szczelne, zazwyczaj stalowe, kształtowane w postaci brusów o różnych profilach (np. Larssen, Krupp, Peine) lub żelbetowe wpro-

- wadzone w grunt poprzez wbijanie, wciskanie, wwirowanie,
- ścianki berlińskie w rozwiązaniu klasycznym (stalowe dwuteowniki szerokostopowe wprowadzane pionowo w grunt co kilka metrów, głębienie wykopu etapowane z jednoczesnym instalowaniem opinki drewnianej),
- ścianki berlińskie w rozwiązaniu współczesnym (słupy prefabrykowane lub formowane w gruncie różnymi technikami, opinka w postaci płyt betonowych prefabrykowanych, belek stalowych, elementów drewnianych lub torkretu), ścianki paryskie (opinka pomiędzy słupami prefabrykowanymi), ścianki lutecjańskie (opinka pomiędzy palami zbrojonymi),
- ścianki typu palisadowego wykorzystujące:
- pale wiercone dużych średnic (do 3 m) w układach rozłącznych, stycznych i przenikających się, wykonywane w rurach obsadowych lub pod osłoną hydrostatyczną (tiksotropowa zawieszina bentonitowa),
- pale wiercone wykonywane w technologii ciśnieniowego betonowania ciągłego typu CFA lub STARSOL (świder ślimakowy z rurą centralną) o średnicach 0,4 - 1,5 m [10] i [11],
- pale wykonywane techniką wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej („jet grouting”),

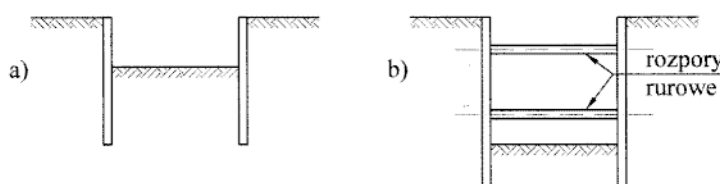
- mikropale o średnicach 100 - 200 mm,
- pale baretowe o różnych kształtach (dla prostokąta szer. 0,52 - 1,52 m, dł. 1,80 - 3,0 m),
- ściany szczelinowe formowane w gruncie pod osłoną hydrostatyczną z zawiesziny bentonitowej (betonowane metodą podwodną „contractor”, głębokość do 50 m, grubości standardowe 0,62, 0,82, 1,02 m, przeciętna szerokość panelu 5-6 m) lub prefabrykowane z betonu zbrojonego z uszczelnieniem typu „water-stop” [10].

Ściany szczelinowe znajdują obecnie najszersze zastosowanie, rozwiązując wiele trudnych problemów do pokonania metodami tradycyjnymi. Są to elementy o dużej uniwersalności, pełniące jednocześnie trzy funkcje:

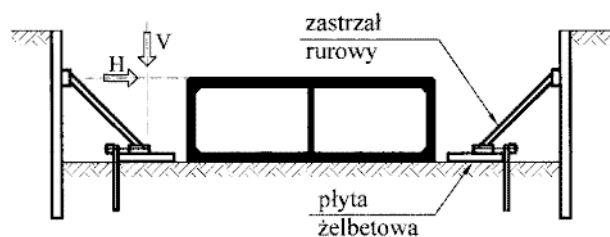
- przejmowanie parcia gruntu (obciążenie poziome),
- przenoszenie obciążeń pionowych w przypadku, gdy stanowią element konstrukcyjny obudowy,
- stanowią wodoszczelną osłonę wykopu.

7.2.2. Techniki przejmowania parcia gruntu na ściany wykopów

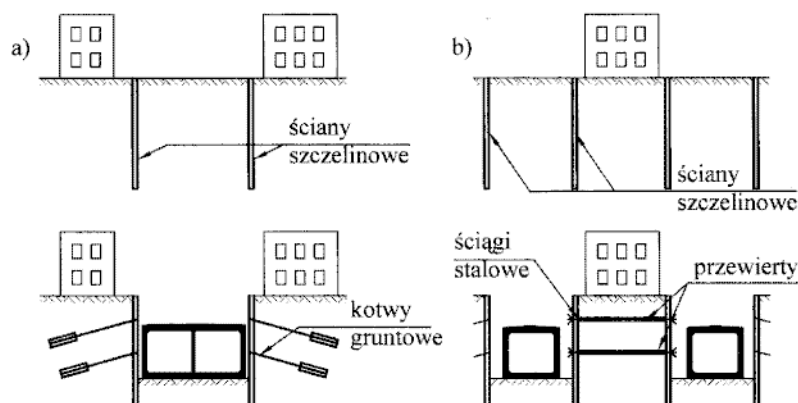
W przypadku małych głębokości możliwe jest przejście parcia gruntu wyłącznie przez elementy zabezpieczające ściany wykopu (omówiono je w punkcie 7.2.1.). W takim przypadku mamy do czynienia z układem



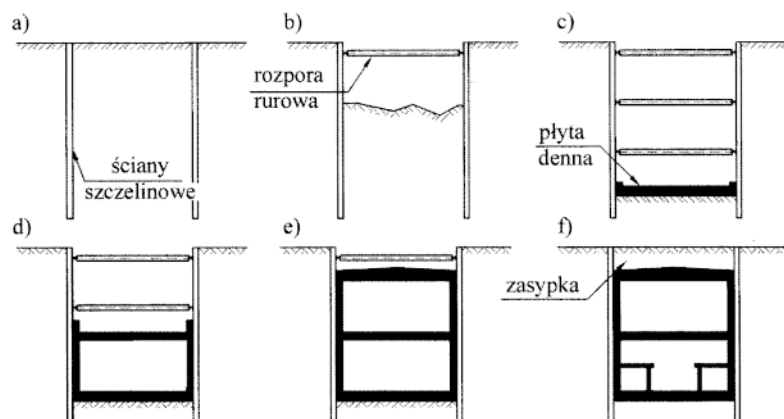
Rysunek 5b. Sposoby przejmowania parcia gruntu na ściany wykopów. a) układ wspornikowy ściany zabezpieczającej, b) rozpięcie ścian wykopu elementami stalowymi (np. rozpory rurowe).



Rysunek 6. Przekazanie parcia gruntu ze ścian szczelnych na dno wykopu za pomocą konstrukcji zastrzałowych.



Rysunek 7. Sposoby kotwienia ścian zabezpieczających wykop.
a) zastosowanie kotew gruntowych,
b) zastosowanie ściągnięć między ścianami umieszczonych w przewiertach.



Rysunek 8. Budowa stacji metra w wykopie wąskoprzestrzennym otwartym.
a) wykonanie ścian szczelinowych, b) głębienie wykopu z jednoczesnym rozpięciem ścian, c) wykonanie płyty dennej, d) demontaż rozpór dolnych, wykonanie środkowej partii obudowy, e) zakończenie konstrukcji obudowy stacji, f) zwolnienie górnego poziomu rozpór i wykonanie zasyпки na stropie budowlany.

swobodnym, gdzie obudowa ścian pracuje wspornikowo. Ważne jest dostatecznie głębokie wpuszczenie obudowy w grunt, dla zapewnienia jej utwierdzenia poniżej dna wykopu (rys. 5a).

Głębsze wykopy wymagają obudowy wyposażonej w dodatkowe elementy. Zazwyczaj stosowane są róż-

nego typu stalowe rozpory, najczęściej typu rurowego. Długość rozpór sięga około 30 m. Rozmieszczane są na wysokości ściany nawet w 6 poziomach. W zależności od typu obudowy wykopu stosuje się również poziome rygle pośredniczące w przekazywaniu obciążeń poziomych na rozpory (rys. 5b).

W przypadku wykopów ze znacznie oddalonymi ścianami stosowanie konstrukcji rozporowych staje się niemożliwe. Sytuacja taka występuje np. przy realizacji płytkich garaży i parkingów. Można wtedy zastosować konstrukcje zastrzałowe, przenoszące parcie gruntu z obudowy ścian na dno wykopu. Schemat takiego rozwiązania pokazano na rys. 6. Zwraca się uwagę na oryginalny sposób przekazania ukośnego obciążenia na grunt za pomocą płyty żelbetowej współdziałającej ze stalową ścianką szczelną. Podobne rozwiązanie zostało zastosowane w Krakowie podczas wykonywania podziemnych garaży pod „Domem wschodzącego słońca” przy ulicy Pielęgniarek. Obciążeniem naziomu za stalową ścianką szczelną był m.in. tabor tramwajowy.

Większe głębokości posadowienia budowli podziemnych (wykop głęboki), duże odległości między krawędziami wykopu oraz duże obciążenia na naziemie bezpośrednio przy wznoszonym obiekcie podziemnym (budowle kubaturowe, obciążenia ruchome pojazdami) to warunki zmuszające do wykorzystania techniki kotwienia ścian w gruncie (rys. 7a). Kotwy gruntowe, w zależności od potrzeb, sytuowane są na jednym lub kilku poziomach. Buława kotwy, współdziałając z prętem, rurą lub splotem (ogólnie-cięgnem), przekazuje na grunt siłę rozciągającą, będącą oddziaływaniem równoważącym parcie poziome na ścianę obudowy wykopu. Każda kotwa od strony ściany jest zakończona głowicą umożliwiającą jej sprzężenie.

W pewnych przypadkach do przejścia parcia gruntu stosowane są ściągnięcia stalowe (pręty, rury lub sploty) sytuowane w gruncie na jednym lub kilku poziomach (rys. 7b). Elementem współpracującym są wtedy poziome rygle, rozkładające oddziaływanie na szerokości ściany, umieszczane na poziomach ściągnięć. W zależności od potrzeb ściągnięcia mogą być sprzężone. Ściągnięcia wprowadzane są do gruntu techniką przewiertów kontrolowanych.

Opisana metoda została z powodzeniem zastosowana przy budowie tunelu drogowego w Krakowie, w/c ulicy Wrocławskiej, pod układem torowym stacji Łobzów (obiekt oddany do eksploatacji w 2002 r.). Ujęta w stalowe ściany szczelinowe bryła gruntu

była obciążona na naziemie taborem kolejowym [12].

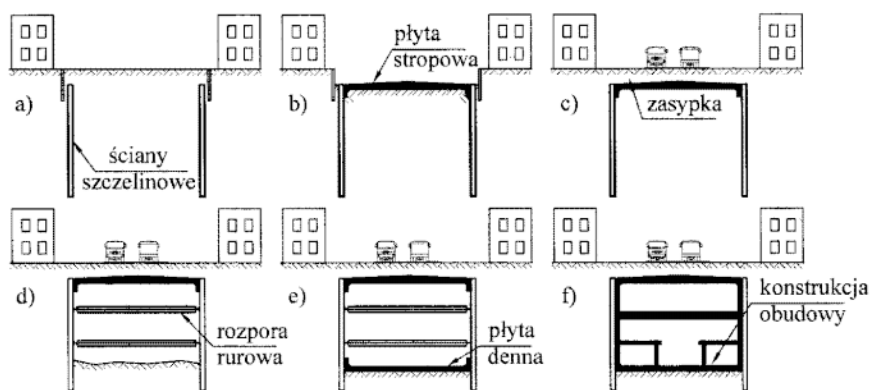
7.2.3. Wykonawstwo budowli podziemnych w wykopach wąskoprzestrzennych otwartych

Metoda ta jest stosowana wszędzie tam, gdzie sposób użytkowania terenu pozwala na dłuższy okres wyłączenia go dla potrzeb realizowanej budowli podziemnej. Ściany wykopu zabezpieczane są jedną z metod omówionych w punkcie 7.2.1. Przejmowanie parcia gruntu odbywa się według technik omówionych w punkcie 7.2.2. Przykładowy schemat realizacji stacji metra w wykopie wąskoprzestrzennym otwartym pokazano na rys. 8. Zastosowano tu ściany szczelinowe pracujące w układzie rozporowym (3 poziomy). Konstrukcja obudowy stacji jest niezależna od ścian szczelinowych przejmujących parcie gruntu.

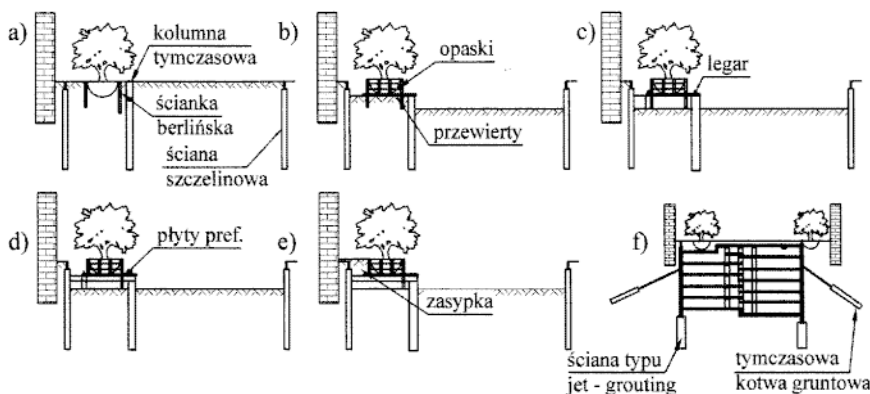
Warianty opisanej metody znane są w technice wznoszenia budowli podziemnych pod nazwami Metoda berlińska (wykorzystuje ścianki berlińskie pozostawiane w gruncie, parcie gruntu przejmowane w układzie rozporowym, szerokość wykopu odpowiada szerokości budowli, wykop może być prowizorycznie nakryte konstrukcją stropową) oraz Metoda hamburska (ścianki berlińskie wyciągane z gruntu, parcie gruntu przejmowane w układzie rozporowym, szerokość wykopu większa o 1,6 do 2,0 m od szerokości budowli) [13].

7.2.4. Realizacja budowli podziemnych w wykopach wąskoprzestrzennych zamkniętych

Ograniczenie wpływu realizacji budowli podziemnej na sposób użytkowania powierzchni terenu (np. wymóg utrzymania ruchu na istniejących nad wznoszoną budowlą podziemną ciągach komunikacyjnych) można osiągnąć dzięki zastosowaniu techniki wykopów wąskoprzestrzennych zamykanych częścią stropową już w początkowym stadium budowy (por. rys. 9). Ściany wykopów zabezpieczane są najczęściej ścianami szczelinowymi i szczelnymi (osłona górnej partii wykopu do poziomu spodu części stropowej). Alternatywnie stosowane są również ściany palisadowe omówione w punkcie 7.2.1. Parcie gruntu przejmowane jest bądź przez ściany boczne rozparte konstrukcją stropu lub,



Rys. 9. Budowa stacji metra w wykopie wąskoprzestrzennym zamkniętym.
a) wykonanie ścian szczelnych i szczelinowych, b) wykonanie płyty stropowej stacji, c) wykonanie zasypki ziemnej i konstrukcji drogi, d) wybieranie gruntu z wykopu, rozpięcie ścian rurami, e) wykonanie płyty dennej, f) wykonanie pozostałych elementów konstrukcji obudowy stacji.



Rys. 10. Sekwencja robót w obrębie drzewa podczas wykonywania konstrukcji parkingu podziemnego pod placem Baudoyer w Paryżu [14].
a) wykonanie ścian szczelinowych, kolumn tymczasowych oraz ścianek berlińskich dookoła systemu korzeniowego drzewa, b) wybranie gruntu, założenie opasek na ściankach berlińskich, zainstalowanie rur pod skrzynią z korzeniami, c) założenie legarów, usunięcie gruntu pod skrzynią, założenie kabli sprężających, d) umieszczenie płyt prefabrykowanych i ich sprężenie, e) usunięcie legarów, wypełnienie gruntem przestrzeni obok skrzyni i pod skrzynią, f) usunięcie gruntu do poziomu płyty dennej, założenie tymczasowych kotew gruntowych, wykonanie konstrukcji monolitycznej parkingu od dna wykopu w kierunku powierzchni gruntu, usunięcie kolumn tymczasowych i z wolnienie kotew.

przy większych głębokościach, wielopoziomowymi układami rozpór lub kotew gruntowych (por. 7.2.2.). Transport urabianego gruntu z tunelu odbywa się od jego czoła lub w kierunku pionowym przez pozostawiane w płycie stropowej okna.

Opisana metoda w technice tunelowania znana jest pod nazwą Metody mediolańskiej (Icos-Veder). W wersji pierwotnej wykorzystywała ściany szczelinowe lub palisady z pali wierconych (Benoto) jako obudowy ścian wykopów [13]. Metoda ta była zastosowana w Krakowie przy budowie odcinka tunelu dla szybkiego tramwaju pod ulicą Lubomirskiego.

8. Metody ochrony zieleni miejskiej

Budowa nowych obiektów komunikacyjnej infrastruktury podziemnej w miastach zazwyczaj koliduje z terenami zielonymi lub szpalerami drzew rosnących wzdłuż krawędzi ulic i placów. Problem ten jest szczególnie delikatny w tych miastach, gdzie nasycenie zielenią jest małe, a istniejąca zieleń przedstawia dużą wartość. Taka sytuacja występuje między innymi w Krakowie. Budowa nowych obiektów komunikacyjnych w rejonie ronda Mogińskiego połączona z jego całkowitą przebudową (obniżenie poziomu terenu o około 6 m

w obrębie węzła oraz włączenie tramwaju do istniejącego już tunelu pod ul. Lubomirskiego) nie mogą spowodować naruszenia stanu roślinności znajdującej się w pobliskim Ogrodzie Botanicznym (zmiana stosunków wodnych w gruncie). Podobnie budowa parkingów i tuneli pod placami i ulicami w obrębie Starego Miasta nie może istotnie wpłynąć na stan istniejącej zieleni, w tym krakowskich Plant.

Przedstawione problemy znalazły już poprawne rozwiązania w tych krajach, gdzie komunikacyjne obiekty podziemne wznosi się od ponad stu lat. Na rysunku 10 przedstawiono metodę [10], [14], która pozwala z powodzeniem zachować rosnące drzewa bezpośrednio nad stropem budowanego parkingu podziemnego (Paryż, Plac Baudoyer, 1995 r.). Mini ścianki berlińskie obejmują układ korzeniowy drzewa (promień sfery $R=2$ m), tworząc skrzynię, która w trakcie kolejnych faz jest podbudowana górną płytą stropową podziemnego parkingu. Taki sposób budowy jest godny polecenia wykonawcom krakowskich parkingów podziemnych, których budowa ma rozpocząć się w nadchodzącym 2003 r.

Ryzyko trwałego obniżenia zwierciadła wody w gruntach w otoczeniu wznoszonej budowli podziemnej można wyeliminować poprzez wykonanie wodoszczelnych ekranów w ośrodku gruntowym. Ekran taki może stanowić wodoszczelna ściana szczelinowa wykonana techniką klasyczną, przepona wodoszczelna powstała w wyniku iniekcji zaprawy ilowo-cementowej do szczeliny powstającej w trakcie wyciągania dwuteownika z rurką iniekcyjną, wcześniej wprowadzonego do gruntu [10], ściana wykonana techniką „jet grouting” [11] lub inna. Takie rozwiązania stanowią skuteczną ochronę sąsiadujących z budowanym obiektem podziemnym terenów zieleni miejskiej.

9. Uwagi końcowe

Przedstawione w pracy techniki i metody wznoszenia komunikacyjnych budowli podziemnych nie wyczerpują wszystkich możliwości jakie współcześnie są wdrożone i dostępne. Ograniczono się do tych sposo-

bów i technologii, które, zdaniem autorów, uwzględniają potrzeby i uwarunkowania występujące w Krakowie. Wiele spośród przedstawionych technologii jest z powodzeniem stosowanych już w Polsce, chociaż nie na taką skalę jak w innych, przodujących w tym zakresie krajach. Skokowy wzrost liczby samochodów w Polsce w ostatnich latach prawdopodobnie wymusi intensywny rozwój komunikacyjnej infrastruktury podziemnej w obrębie miast i poza nimi, w ciągu szybkich tras drogowych i kolejowych. ■

Artykuł powstał na podstawie wystąpienia przygotowanego na seminarium Politechniki Krakowskiej i SITK pod tytułem „Problemy podziemnej komunikacji miejskiej w Krakowie”, Kraków, 26 listopada 2002.

Autorzy



Dr hab. inż. Cezary Madryas - Profesor PW. Kierownik Zakładu Inżynierii Miejskiej Politechniki Wrocławskiej. Autor i współautor ponad 70 publikacji naukowych i technicznych, dwóch skryptów i jednej monografii oraz około trzystu ekspertyz, orzeczeń i opracowań technicznych. Wielki propagator i entuzjasta technik i technologii bezwykopowych.



Dr inż. Karol Ryż
Ukończył studia na Wydziale Budownictwa Lądowego Politechniki Krakowskiej (PK) w 1977r. (specjalność Teoria Konstrukcji). Stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie mostownictwa uzyskał w 1991r. w Instytucie Dróg, Kolei i Mostów PK. Od 1977r. jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Katedrze Budowy Mostów i Tuneli PK, obecnie na stanowisku adiunkta. Od 1992r. dyrektor Przedsiębiorstwa Usług Inżynierskich PROKOM S.C. Specjalizuje się w dziedzinie mostownictwa oraz komunikacyjnych budowli podziemnych (projektowanie, budowa, utrzymanie, diagnostyka, badania, remonty, wzmocnienia).

Literatura:

1. Stamatello H.: Tunele i miejskie budowle podziemne, Arkady, Warszawa, 1970.
2. Gollegger J.: Klasyfikacja górotworu i organizacja drażenia w nowoczesnych metodach urabiania. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Planowanie, projektowanie i realizacja komunikacyjnych budowli podziemnych”, Politechnika Krakowska, WIL, Katedra Budowy Mostów i Tuneli, Kraków, 2002, s.109-130.
3. www.dr-sauer.com.
4. Materiały DAUB: Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines, Tunnel, 5/97, p.20-35.
5. Materiały JSCE: Newsletter, No 5, march 2001.
6. ineto1.kajima.co.jp-news-digest_feb1999-techplz-tech.htm.
7. Madryas C.: Mikrotunelowanie w budowie podziemnej infrastruktury komunalnej, Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Planowanie, projektowanie i realizacja komunikacyjnych budowli podziemnych”, Politechnika Krakowska, WIL, Katedra Budowy Mostów i Tuneli, Kraków, 2002, s.87-108.
8. Kędracki M.: Zbadanie zakresu stosowania sztucznych stropów nad tunelami wykonywanymi metodą przecisku, Maszynopis niepublikowany, Politechnika Łódzka, Łódź, 2001.
9. Kuliczkowski A., Madryas C.: Tunele wieloprzewodowe, Skrypt, Politechnika Świetokrzyska, Kielce, 2002.
10. Materiały Soletanche-Bachy i Soletanche Polska.
11. Materiały Zakładu Konsultacyjno-Badawczego „Geocomp” Sp. z o.o.
12. Ryż K. i Zespół P.U.I. „PROKOM”s.c.: Projekt tunelu pod układem torowym w/c ul. Wrocławskiej w Krakowie, Kraków, 2001.
13. Kuczyński J.: Miejskie budowle sanitarne i podziemne, PWN, Warszawa, 1980.
14. www.soletanche-bachy.com