

prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska*

Żelbetowa segmentowa obudowa tuneli

Tunele budowano już przed wiekami. Przez stulecia jako materiał obudowy wykorzystywano kamień, później cegłę i żeliwo. Wiek XX to tunele w obudowie betonowej, żelbetowej, z fibrobetonu i betonu natryskowego. Rozwój metod zmechanizowanych, w tym metody tarczowej, spowodował zastąpienie żeliwnych tubingów obudową z segmentów żelbetowych. Budowa II linii metra w Warszawie to zastosowanie takich metod budowy jak metody odkrywkowe (berlińska, ścian szczelinowych), Nowa Metoda Austriacka (nazywana na świecie metodą konwencjonalną) czy też drażenie tarczą. Przy okazji tej budowy, a także w związku z drażeniem w Warszawie tunelu technicznego pod Wisłą i realizacją tunelu drogowego pod Martwą Wisłą w Gdańsku, w Polsce zaczęto produkować prefabrykowane, żelbetowe segmenty obudowy tuneli wykonywanych różnego typu tarczami zmechanizowanymi.

Rodzaje obudów tuneli

Tunele wykonywane metodami odkrywkowymi to tunele o obudowie żelbetowej monolitycznej wylewanej na miejscu w odpowiednich deskowaniach. Jeżeli stosuje się ściany szczelinowe, to najczęściej są one wykorzystywane jako element konstrukcyjny, który razem z płytą denną i stropem tworzą tunel. Obudowy wykopów są konstrukcjami tymczasowymi (ściana berlińska, ścianka z grodziec stalowych) lub stałymi (wspomniana ściana szczelinowa). W przypadku tuneli głębokich, drażonych metodami klasycznymi, w pierwszych etapach robót wykonuje się wyrobisko. Jego stateczność zapewnia obudowa tymczasowa – drewniana lub typu NMA, czyli konwencjonalna, tzn. składająca się opcjonalnie z betonu natryskowego, łuków stalowych, siatki stalowej i kotew skalnych.

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Następnie wykonuje się obudowę stałą – żelbetową wylewaną w specjalnie projektowanych szalunkach. Widok szalowania pełnego przekroju tunelu budowanego Nową Metodą Austriacką pokazano na fotografii, na której jednocześnie (po lewej stronie), widać gotowy fragment tunelu wydrążonego tarczą zmechanizowaną w obudowie z prefabrykowanych żelbetowych segmentów.



Dwa rodzaje obudów stałych tuneli – po lewej z segmentów żelbetowych, po prawej obudowa monolityczna. Budowa linii C metra w Rzymie [Fot. A. Siemińska-Lewandowska]

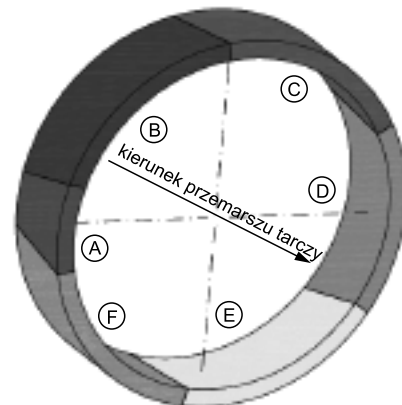
Obudowa z segmentów żelbetowych

Ten typ obudowy jest związany z metodą tarczową budowy tuneli. W każdym typie tarczy zmechanizowanej obudowa tunelu powstaje w kolejnych sekwencjach pracy: urabianie gruntu na przodku (głowicą skrawającą); przesuw tarczy (dźwigniki hydrauliczne odpychają się od wykonanej wcześniej obudowy), a po wciągnięciu tłoków lewarów hydraulicznych długości 1,5–2 m następuje montaż kolejnego pierścienia obudowy (segmenty układane są urządzeniem o nazwie erektor) oraz uszczelnienie iniekcją wypełniającą pustki między obudową tunelu a gruntem. Układanie segmentów odbywa się pod osłoną powłoki tarczy.

Na budowie I linii metra w Warszawie wykorzystywano tzw. tarczę ręczną z otwartym przodkiem, a obudowa była wykonywana z tubingów żeliwnych uszczelnionych w stykach ołowianym

drutem. Po montażu każdego pierścienia obudowy wykonywano iniekcję uszczelniającą z zaczynu cementowego. Przy tym systemie pracy wykonywano ok. 2 m tunelu na dobę. Obecnie stosowane maszyny TBM pozwalają na uzyskiwanie ok. 15 m gotowego tunelu w ciągu doby. Szybkość prac zależy od warunków gruntowo-wodnych, sposobu prowadzenia tarczy oraz od organizacji robót związanych z dostarczaniem segmentów na przodek tarczy i ich układaniem, a także od średnicy budowanego tunelu. W 2013 r. ukończono drażenie drogowego tunelu Sparvo na autostradzie A1 pod Bolonią, którego zewnętrzna średnica wynosi 15,20 m i jest to tunel o największej na świecie średnicy jednego pierścienia obudowy, na który składa się 9 segmentów. Przewidziana jest budowa tunelu pod Nową w Petersburgu, gdzie zaprojektowano obudowę o zewnętrznej średnicy pierścienia wynoszącej 18,65 m składającej się z 13 żelbetowych segmentów.

W Warszawie średnica tuneli szlakowych II linii metra, drażonych tarczą EPB, wynosi 6,0 m. Jeden pierścień obudowy składa się z sześciu segmentów, których schemat ułożenia pokazano na rysunku 1. Jeden pierścień składa się z trzech segmentów typowych – oznaczonych literami C, D, E oraz



Rys. 1. Rzut aksonometryczny jednego pierścienia obudowy tuneli szlakowych II linii metra w Warszawie [5]

dwóch segmentów przykluczowych (B, F) i kluczowego (A) zamykającego pierścien. Każdy z segmentów ma nieco inne wymiary i zajmuje w pierścieniu określone położenie tak, aby możliwe było kształtowanie łuków pionowych i poziomych, zgodnie z zaprojektowaną trasą tunelu. Krzywizny trasy uzyskuje się przez wzajemne ułożenie względem siebie poszczególnych segmentów tzw. pierścienia typowego. Rozwinięcie powierzchni kolejnych trzech pierścieni obudowy przedstawiono na rysunku 2. Prowadzenie tarczy na łukach jest możliwe dzięki temu, że między powłoką tarczy a układaną obudową tunelu jest kilkucentymetrowy luz, w zależności od średnicy tarczy. Po ułożeniu kolejnego pierścienia obudowy przestrzeń tę wypełnia się iniekcją cementową. Tarczą nie wykonuje się tuneli, których trasa zawiera łuki poziome o promieniu mniejszym niż 300 m.

Projekt obudowy segmentowej tunelu zawiera obliczenia statyczne (wartości momentów zginających i sił) w przypadku każdej fazy pracy obudowy oraz pojedynczego segmentu. Oprócz obciążeń wynikających z parcia gruntu i wody, obciążenia użytkowego wewnątrz tunelu, szczególnie istotne są obciążenia wynikające z nacisku dźwigników hydraulicznych. Równie ważne są dodatkowe naprężenia, które powstają w pojedynczych segmentach podczas ich składowania i montażu. W projekcie wykonawczym obudowy segmentowej podawane są następujące dane:

- podział pierścienia na segmenty i ich liczba;
- średnica wewnętrzna pierścienia obudowy;
- średnica zewnętrzna pierścienia obudowy;
- grubość ścianki pierścienia obudowy odpowiadająca grubości jednego segmentu;
- nominalna długość pierścienia obudowy (L);

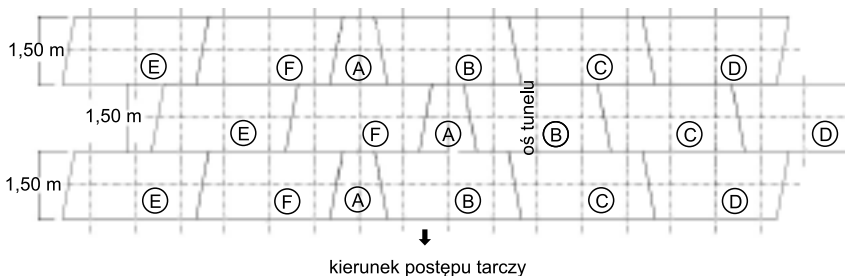
- ciężar najcieńszego pojedynczego segmentu;
- ciężar całego jednego pierścienia obudowy.

W przypadku warszawskiego metra dane te są następujące: średnica wewnętrzna pierścienia $D_w = 5,40$ m; średnica zewnętrzna pierścienia $D_z = 6,00$ m; grubość ścianki pierścienia $S_p = 0,30$ m; zbieżność pierścienia obudowy ± 25 mm; szerokość modułowa pierścienia $L = 1,50$ m. Liczba segmentów w pierścieniu zależy od średnicy tunelu oraz wagi pojedynczego segmentu i metody instalowania (typ podajnika – erektora). Ze względów bezpieczeństwa najczęściej stosuje się segmenty o masie nieprzekraczającej 500 kN.

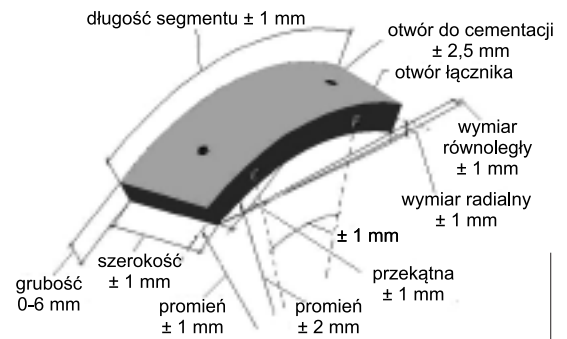
Kolejnym czynnikiem branym pod uwagę podczas projektowania obudowy są wymagania dotyczące stopnia wodoszczelności styku segmentów oraz precyzja ułożenia poszczególnych segmentów względem siebie. Z uwagi na te wymagania istotne jest zachowanie odpowiednich tolerancji wymiarowych w procesie prefabrykacji (rysunek 3). Równie ważne jest wykonanie szkieletu zbrojeniowego segmentu zgodnie z projektem. Do łączenia żelbetowej obudowy segmentowej stosuje się złącza śrubowe na stykach międzyblokowych i między pierścieniami. Bardzo ważne jest prawidłowe połączenie i uszczelnienie styków. Na obwodzie każdego segmentu umieszczone są uszczelki, których zadaniem jest zapewnienie wodoszczelności obudowy, minimalizacja sił tarcia między segmentami oraz umożliwienie korekty ustawienia elementów w pierścieniu podczas montowania segmentu kluczowego.

Najczęściej wykorzystuje się dwa rodzaje uszczelnień segmentów obudowy żelbetowej:

- ściśliwe uszczelki neoprenowe lub polipropylenowe (mające kształt zwul-

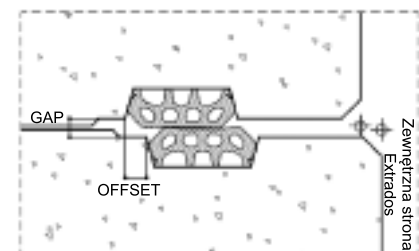


Rys. 2. Rozwinięcie powierzchni pierścieni i położenie segmentu kluczowego [4]



Rys. 3. Tolerancje wymiarowe segmentu romboidalnego [4]

kanizowanych ramek) wklejane do rowków znajdujących się na krawędziach segmentów – rysunek 4;



Rys. 4. Schemat położenia uszczelki neoprenowej na styku dwóch segmentów [6]

- uszczelki hydrofilne (pęczniejące pod wpływem wody).

Skuteczność działania uszczelki zależy od jej charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie i prawidłowego zamocowania oraz od ciśnienia wody gruntowej. Odpowiednią wodoszczelność połączeń segmentów zapewnia staranność montażu, dlatego też w projektach wykonawczych zawarte są tolerancje montażowe, których należy ściśle przestrzegać, np. przesunięcie segmentu po instalacji ≤ 10 mm; przesunięcie po zainstalowaniu przynajmniej 25 pierścieni ≤ 15 mm; dopuszczalne otwarcie szczeliny między segmentami ≤ 5 mm.

Trwałość segmentowej obudowy żelbetowej zależy od trwałości materiałów, z których jest wykonana, a więc betonu i stali zbrojenia. Głównym czynnikiem powodującym ewentualną degradację obudowy jest korozja wewnętrznej powierzchni pierścienia obudowy, gdyż zewnętrzna powierzchnia jest zabezpieczona warstwą iniektu. Korozja ta wynika z działania wielu szkodliwych czynników, takich jak wysoka lub niska temperatura, wilgotność, substancje chemiczne (np. sól drogowa lub w przypadku tuneli technicznych – ścieki, chemikalia), gazy ze spalin samochodowych

i wibracje. Z kolei korozja zbrojenia może występować w obiektach budowlanych w środowisku silnie zanieczyszczonym chemikaliami lub w tunelach kolejowych oraz metra, gdzie występują tzw. prądy błędzące. W takich przypadkach może być wskazane zwiększenie otuliny zbrojenia lub zastosowanie zbrojenia z kompozytów polimerowych.

Zgodnie z zaleceniami norm europejskich dobór parametrów mieszanki betonowej rozpoczyna się od ustalenia klasy ekspozycji w zależności od warunków środowiskowych wg normy PN-EN 1992-1-1. Następnie ustala się klasę konstrukcji i dobiera minimalne otulenie wymagane ze względu na trwałość stali zbrojeniowej. Kolejny krok to dobór rodzaju kruszywa i jego wymiar. Biorąc pod uwagę fakt, że segmenty obudowy są elementami mocno zbrojonymi, należy tak dobrać wymiar kruszywa, aby zapewnić prawidłowe otulenie stali mieszanką betonową. Konsystencja mieszanki betonowej musi być także prawidłowo dobrana, aby uniemożliwić segregację kruszywa w formie podczas wibrowania. Ten fragment procesu kształtowania segmentów jest bardzo ważny. Wibrowanie musi być dokładnie wyskalowane, aby umożliwiło uzyskanie jednorodnej struktury mieszanki i zapewniło gładką powierzchnię zewnętrzną elementu. Ilość wody i domieszek stosowanych do produkcji mieszanki betonowej może ulec zmianie w zależności od stanu kruszywa oraz warunków wytwarzania, tj. temperatury i wilgotności. Odpowiedni dobór parametrów mieszanki betonowej pozwala uzyskać prawidłowy rozwój wytrzymałości betonu.

Należy podkreślić, że w przypadku produkcji prefabrykatów obudowy tunelu, segmenty są poddawane obciążeniom zewnętrznym nawet po kilkunastu godzinach od ułożenia betonu w formie. Oprócz spraw technicznych, ważną rolę w uzyskaniu właściwego produktu odgrywa dobre oczyszczenie form do wytwarzania segmentów i zastosowanie odpowiedniego oleju do usuwania segmentu z formy.

Oddzielnym zagadnieniem jest ochrona przeciwpożarowa. Przy doborze materiałów konstrukcyjnych należy zwrócić uwagę na ich wytrzymałość w przypadku pożaru. Ten parametr może być czynnikiem decydującym o doborze domieszek lub dodatków do mie-

szanki betonowej. Przykładowe parametry betonu i mieszanki betonowej użytych jako materiał segmentów obudowy metra warszawskiego są następujące:

- wytrzymałość na ściskanie (próbka walcowa) $f_{ck} = 40$ MPa;
- wytrzymałość na ściskanie (próbka sześcienna) $f_{ck} = 50$ MPa;
- wytrzymałość na rozciąganie $f_{ctk} = 3,5$ MPa;
- moduł sieczny $E_{cm} = 35000$ MPa;
- klasa wytrzymałości na ściskanie C40/50;
- klasa ekspozycji XC2-XC4;
- maksymalny nominalny wymiar kruszywa 16 mm;
- klasa konsystencji wg opadu stożka S3 – S4;
- zawartość cementu 420 kg/m³;
- współczynnik w/c 0,40.

Segmenty obudowy tunelu są zbrojone szkieletem zbrojeniowym. Elementy główne powinny być wykonane ze stalowych prętów żebrowanych dobranych na podstawie wyników obliczeń statycznych. Na wewnętrznej stronie segmentu muszą zostać zainstalowane specjalne strzemiona, które pomogą przenieść lokalny nacisk spowodowany działaniem erektora. Na bocznych krawędziach szkielet powinien być uzupełniony o dodatkowe zbrojenie, które zwiększy nośność segmentu na docisk, aby mógł przenieść siły wywołane działaniem siłowników hydraulicznych podczas postępu tarczy drążącej.

Przykładowe dane techniczne materiału zbrojenia: stal S 500s; charakterystyczna granica plastyczności $f_{yk} = 500$ MPa; moduł sprężystości $E_s = 200$ GPa; otulina zbrojenia 50 mm.

W celu uniknięcia błędów montażowych i pomyłek wynikających z błędów ludzkiego należy ujednoczyć zbrojenie na całej długości tunelu. W przypadku bardzo różnych parametrów gruntowych na trasie tunelu dopuszcza się zastosowanie kilku rodzajów szkieletów zbrojeniowych. Należy wtedy dokładnie opisać każdy segment, aby wykluczyć błąd w montażu.

Montaż obudowy segmentowej

Montaż segmentów obudowy odbywa się bezpośrednio po wydrążeniu odcinka tunelu o odpowiedniej długości. Układanie obudowy zawsze rozpoczyna się od tego samego typu elementu i kończy montażem segmentu

zamkowego (kluczowego). Na budowie warszawskiego metra segmenty nie są podawane na przodek tunelu przenośnikiem taśmowym, lecz transportowane specjalnymi samochodami, tzw. Multicarami. Pod osłoną tarczy znajduje się specjalne urządzenie nazywane podajnikiem, które rozładuje segmenty, układając je w odpowiedniej kolejności na taśmie transportowej. Długość taśmy wynosi ok. 10 m. W centralnej części płaszcza, przy samym przodku tarczy, zamontowany jest podnośnik pneumatyczny (erektor), który służy do montażu elementów obudowy. Erektor wykonuje cztery ruchy: dwa obrotowe wzdłuż osi centralnej, które umożliwiają prawidłowe ułożenie w budowywanego segmentu, a następnie dwa ruchy obrotowe w jedną lub drugą stronę, które umożliwiają ustawienie segmentu w miejscu jego przeznaczenia. Udźwig erektora jest przystosowany do ciężaru podnoszonych elementów oraz potrzeb wynikających z operacji manewrowych. Po zakończeniu montażu jednego pierścienia obudowy tunelu kolejne etapy pracy tarczy powtarzają się. Jednocześnie z drążeniem następnego odcinka tunelu wykonywana jest iniekcja pierwotna za obudowę tunelu. Jest to jeden z ważniejszych etapów budowy tunelu tarczową. Iniekcja uszczelnia przestrzeń między obudową tunelu a gruntem i zapobiega przemieszczeniom podłoża wokół tunelu, a w konsekwencji osiadanii powierzchni terenu nad tunelem drążonym tarczą.

Podsumowanie

Segmentowa obudowa żelbetowa ma wiele zalet. Dzięki szybkiemu systemowi montażu zapewnia natychmiastowe (po wykonaniu), zabezpieczenie wyrobiska i stanowi jednocześnie stałą obudowę tunelu. Obudowa ta ze względu na kołowy kształt jest zdolna do przenoszenia dużego ciśnienia hydrostatycznego działającego od zewnątrz (tunele budowane w gruntach nawodnionych) i od wewnątrz (tunele spełniające funkcje ciśnieniowych sztolni hydrotechnicznych). Jest to obudowa szczelna, współpracująca z podłożem dzięki systemowi uszczelniek oraz iniekcji uszczelniającej wykonywanej bezpośrednio po montażu każdego pierścienia obudowy.

(dokończenie na str. 50)