

WYKŁAD 4

Budownictwo podziemne jako przedmiot obejmuje zasady projektowania, wznoszenia i konserwacji budowli podziemnych.

Jest to bardzo rozległa dziedzina, poza tym jest ona w ciągłym rozwoju. Już w roku 1995 Światowy Kongres Budownictwa Podziemnego AITES-ITA stwierdził, że o ile wiek XX był okresem z dominującą przewagą coraz to nowszych rozwiązań w zakresie konstrukcji naziemnych i budowy obiektów coraz to większej wysokości, to wiek XXI zmusi ludzkość do rozwiązywania problemów cywilizacyjnych w przestrzeni podziemnej. Można stwierdzić, że właśnie w Budownictwie Podziemnym jest nadzieja na rozwiązanie wielu problemów wielkich aglomeracji miejskich, a także na usprawnienie transportu drogowego i kolejowego w trudnym górzystym terenie.

W przedstawionym rysie historycznym pojawiły się już podstawowe pojęcia występujące w budownictwie podziemnym. Można więc podać główne klasyfikacje budowli podziemnych, metod wykonawstwa i główne charakterystyczne cechy tej odmiany budownictwa.

Za **budowlę podziemną** uważa się obiekt inżynierski usytuowany poniżej powierzchni terenu i otoczony ustabilizowanym ośrodkiem (podstawowe źródło obciążenia stanowi otaczający go ośrodek gruntowy, skalny lub wodny).

Do budowli podziemnych nie zalicza się fundamentów i podpiwniczeń budowli naziemnych, także rurociągów i kolektorów instalacji sanitarnych, energetycznych i przemysłowych, jeśli nie przebywają w nich ludzie w czasie budowy, eksploatacji lub remontu obiektu.

Wg klasyfikacji ogólnej budowle podziemne można podzielić na:

- ♦ komory – obiekty punktowe przeznaczone na magazyny, garaże, skrzyżowania arterii komunikacyjnych, zbiorniki, elektrownie i obiekty o charakterze militarnym;
- ♦ tunele – obiekty liniowe.

Oprócz tych podstawowych budowli występują również budowle pomocnicze. Są to małe obiekty liniowe: orientowane pionowo – szyby, poziomo – sztolnie.

Ze względu na funkcje można rozróżnić:

- ♦ podziemne budowle komunikacyjne i miejskie – metro, tunele, przejścia podziemne, garaże;
- ♦ podziemne budowle hydrotechniczne – obiekty dla elektrowni wodnych oraz związane z zaopatrzeniem w wodę;
- ♦ podziemne budowle górnicze – szyby do transportu urobku i ludzi, wentylacyjne, odwodnienia;
- ♦ inne – obiekty wojskowe: schrony, magazyny żywności i paliw płynnych

Ze względu na metodę wykonania:

- ♦ wykonywane metodami górniczymi;

- ♦ drążone z zastosowaniem tarczy;
- ♦ posadowione metodami odkrywkowymi;
- ♦ wykonywane metodami specjalnymi – np. zatapianie gotowych elementów.

Podział ze względu na metodę wykonania ułatwia przyporządkowanie projektowanej budowli do realnych warunków jej realizacji. Jest to jedna z ważniejszych cech budownictwa podziemnego: projekt techniczny budowli musi uwzględniać możliwość jej wykonania w konkretnych warunkach geotechnicznych.

Istnieje tutaj bezpośrednia interakcja między warunkami geotechnicznymi a możliwościami wykonawczymi i całym procesem projektowania.

Poszczególne metody wykonawstwa dzielą się dalej na kolejne rodzaje, ale dokładniej o metodach wykonywania budowli podziemnych będzie mowa na dalszych wykładach.

W dalszej części będziemy mówić o podziemnej trasie komunikacyjnej, która najczęściej prowadzona jest w formie tunelu.

Tunel – jest to budowla podziemna stanowiąca przejście podziemne dla urządzenia komunikacyjnego (np. droga kołowa lub kolejowa) lub transportowego (również hydrotechniczne), niezależnie od metody wykonania. Może być pozioma lub o niewielkich spadkach.

Podział tuneli ze względu na rodzaj przeszkody jaką pokonują:

- ♦ górskie;
- ♦ podwodne;
- ♦ miejskie.

Podział tuneli ze względu na przeznaczenie:

- ♦ komunikacyjne;
- ♦ hydrotechniczne – na potrzeby elektrowni wodnych i zaopatrzenia w wodę;
- ♦ komunalne – związane z gospodarką miejską (kanalizacja, instalacje inżynieryjne);
- ♦ przemysłowe – przeznaczone dla transportu, wentylacji i odwodnienia w kopalniach i innych zakładach przemysłowych.

Tunele komunikacyjne są najbardziej typowymi budowlami podziemnymi. W zależności od rodzaju transportu wyróżnia się tunele:

- ♦ kolejowe;
- ♦ drogowe;
- ♦ szybkiej kolei miejskiej (metra);
- ♦ ruchu pieszego (przejścia podziemne);
- ♦ żeglowne.

Jeszcze inne klasyfikacje i definicje podaje norma: *PN-S-02203:1997 Tunele komunikacyjne. Terminologia i klasyfikacja*.

Np. ze względu na położenie w terenie i rodzaj pokonywanej przeszkody tunele komunikacyjne dzieli się na:

- górskie;
- nizinne;
- podwodne.

Np. ze względu na położenie w masywie górskim tunele komunikacyjne dzieli się na:

- bazowe;
- przełączowe (podszczytowe);
- dolinne;
- pętlowe.

Górotworem nazywa się tę część masywu skalnego i gruntowego, która ulega bezpośrednim wpływom wynikającym z oddziaływania robót podziemnych.

[rys. 1.2]

W tak określonym górotworze wyróżniamy:

- ♦ **nadkład** (strop wyrobiska) – część górotworu nad budowlą podziemną, stanowiąca główne źródło jej obciążenia;
- ♦ **ociosy** – górotwór zalegający po obu stronach wyrobiska na szerokości kilku do kilkunastu jego rozpiętości, stanowiący strefę współpracy układu obudowa-górotwór;
- ♦ **spąg** – obejmujący odprężoną część górotworu pod budowlą podziemną.

Stabilizacja górotworu może następować samoczynnie albo może wymagać specjalnych zabiegów technicznych tworzących **obudowę**.

Rozróżnia się obudowy stałe i tymczasowe. Zadaniem obudowy tymczasowej jest natychmiastowe zabezpieczenie wyrobiska podziemnego przed bezpośrednim zagrożeniem. Takie bezpośrednie zagrożenie to lokalne obwały lub zawał globalny górotworu. Obudowa tego typu ma charakter konstrukcji podatnej. Obudowa stała musi ostatecznie ustabilizować cały układ, więc musi być konstrukcją dostatecznie sztywną.

Obudowa może być wykonana jako:

- ♦ klasyczna konstrukcja budowlana w postaci ciągłej lub ażurowej konstrukcji metalowej, betonowej, żelbetowej, kamiennej lub ceglanej;
- ♦ wydzielona część wzmocnionego górotworu (np. warstwa skotwionych skał);
- ♦ konstrukcja typu zespolonego złożona z elementów ustroju budowlanego i współpracującego górotworu (np. łuki stalowe zespolone z górotworem torkretem na siatce stalowej).

Kryteria wyboru koncepcji trasy tunelu komunikacyjnego

Ze względu na wysokie koszty budowy podziemnych i konieczność rozwiązywania złożonych technicznie problemów ich realizacji, decyzja o uruchomieniu inwestycji jest bardzo trudna. Tylko właściwe rozpoznanie warunków budowy oraz uzasadnienie celowości jej realizacji daje gwarancję, że budowla będzie trafnym przedsięwzięciem ekonomiczno-technicznym.

Wybór koncepcji powinien być dokonany na podstawie studiów przygotowawczych obejmujących:

- ◆ analizę ekonomiczną uzasadniającą realizację budowy;
- ◆ rozpoznanie terenu w zakresie budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i geotechnicznych;
- ◆ wszechstronne studia dotyczące zagrożeń dla budowy podziemnej i zagrożeń dla otoczenia ze strony budowy;
- ◆ studia nad ukształtowaniem i realizacją budowy podziemnej.

Studia ekonomiczne,

- mają na celu dokonanie wszechstronnej oceny czynników zarówno uzasadniających, jak i negujących potrzebę budowy obiektu podziemnego.

W projektowaniu wstępnym należy rozważyć co najmniej kilka wariantów rozwiązań planowanej budowy. Warianty te powinny uwzględniać wyraźne zróżnicowanie podstawowych elementów t.j.:

- lokalizację tunelu w zależności od rozpoznanej budowy geologicznej, przebieg jego osi podłużnej w planie i profilu;
- ukształtowanie tunelu w układzie poprzecznym;
- różne rodzaje rozwiązań konstrukcyjnych;
- możliwe metody wykonania budowy w danych warunkach terenowych.

Wybór danej koncepcji powinien być dokonywany w drodze konkursu otwartego. W wyborze optymalnego wariantu trzeba kierować się zarówno kosztami budowy i eksploatacji, jak i innymi kryteriami, które będą wynikać z ogólnego planu zagospodarowania danego terenu.

Należy przeprowadzić ocenę kosztów i ich amortyzacji. Ocenie musi być poddany cały zmieniający się odcinek trasy komunikacyjnej.

Zwykle czas amortyzacji budowy naziemnych nie przekracza 10 lat, podczas gdy koszty tuneli niektórych sieci metra zaczynają zwracać się dopiero po 30 latach eksploatacji.

Rozpatrywany wariant szlaku komunikacyjnego wpisujemy w teren i tę część między dwoma punktami A i B, która ulega zmianie wskutek wyboru określonej koncepcji, poddajemy ocenie ekonomicznej.

Czas amortyzacji określa się wzorem:

$$T = \frac{C_1 - C_2}{E_2 - E_1}$$

gdzie:

C_1 i C_2 – całkowite koszty inwestycyjne (odpowiednio) dwóch wariantów np. z tunelem i bez tunelu
 E_1 i E_2 – koszty eksploatacji tych wariantów

Całkowite koszty inwestycyjne muszą obejmować całokształt wykonywanych robót podziemnych i naziemnych, a także ich skutki w zakresie:

- robót ziemnych wraz z zabezpieczeniami stateczności i odwodnienia wykopów i nasypów;
- budowli inżynierskich, mostów, ścian oporowych, przepustów, wiaduktów itp.
- nawierzchni drogowych wraz z sygnalizacją i urządzeniami zabezpieczenia ruchu;
- wywłaszczenia i związane z nimi długotrwałe procedury prawne;
- naruszenia naturalnego środowiska, a szczególnie jego zagrożenia hałasem, spalinami, wyciekami paliw lub innych cieczy toksycznych.

Koszty eksploatacji określa się uwzględniając następujące składniki:

- koszty wynikające z natężenia ruchu, to jest z liczby pojazdów przejeżdżających przez przekrój trasy komunikacyjnej w jednostce czasu;
- koszty uzależnione od długości trasy, a także jej wzniesienia oraz liczby i krzywizny łuków;
- koszty utrzymania nawierzchni i obiektów inżynierskich oraz urządzeń zabezpieczenia ruchu;
- koszty zużycia paliwa i utrzymania pojazdów;
- koszty utrzymania ciągłości ruchu w przypadku zagrożenia opadami śniegu lub lawinami śnieżnymi czy kamiennymi;
- koszty związane z zachowaniem niezawodności drogi.

Rozpoznanie terenu

Jednak decydującym czynnikiem kształtującym również ekonomiczną efektywność budowy podziemnej jest właściwe i pełne rozpoznanie warunków jego posadowienia. Niedostateczne rozpoznanie geologiczne, hydrogeologiczne, gazowe i termiczne może spowodować katastrofę budowlaną, wstrzymanie robót podziemnych, zmianę trasy tunelu lub nawet zaniechanie jego budowy.

Wszechstronne rozpoznanie terenu wymaga:

- ogólnego rozpoznania całego rejonu w otoczeniu projektowanego obiektu,
- opracowania szczegółowych przekrojów geologicznych z uwzględnieniem warunków wodnych i geotechnicznych;

- uzupełnienia i weryfikacji wyników badań w czasie budowy obiektu.

Ogólne badania rozpoznawcze obejmują przede wszystkim już istniejące informacje o terenie: mapy geologiczne, wyniki badań pośrednich, dane dotyczące morfologii, petrografii i hydrologii rejonu. Wykonuje się także dodatkowe badania i rozpoznanie geofizyczne, wykorzystując istniejące w okolicy odsłonięcia geologiczne i rozpoznając zasoby wodne. Otrzymujemy informacje o granicach zalegania warstw skalnych bądź gruntowych, o występowaniu ewentualnych zaburzeń tektonicznych.

Analiza ekonomiczna oraz ogólne rozpoznanie warunków geologicznych i wodnych stanowią podstawę do opracowania wstępnego projektu budowli podziemnej.

Szczegółowe rozpoznanie terenu dokonują specjaliści z geologii inżynierskiej na podstawie wierceń geologicznych i badań laboratoryjnych. Wynikiem tych prac są dokładne przekroje geotechniczne uwzględniające także zaburzenia masywu, oraz fizyczne, mechaniczne i chemiczne właściwości górotworu.

W gruntach skalistych głębokość otworów badawczych powinna być większa o 20-50 m niż głębokość spodu budowli. W gruntach nieskalistych wystarczy wiercenie 10-15 m głębiej niż spód budowli.

Trzeba stworzyć dokładny obraz budowy geologicznej, a więc ustalenie występowania i układ spękań, uskoków i sfałdowań danego masywu, także przesunąć w pionie lub w poziomie wzdłuż powierzchni nieciągłości.

Kompleksowa dokumentacja geologiczno-inżynierska stanie się podstawą do wykonania projektu technicznego budowli.

Badania uzupełniające to pomiary i badania z zakresu geologii inżynierskiej i geotechniki prowadzone jednocześnie z robotami ziemnymi lub podziemnymi. Ich wyniki służą do weryfikacji projektu technicznego bądź do wyboru wariantu.

Na podstawie rozpoznania terenu prowadzi się w dalszej kolejności wszechstronne studia dotyczące **zagrożeń dla budowli podziemnej i zagrożeń dla otoczenia ze strony budowli**.

Charakterystyczną cechą górotworu jest jego warstwowa budowa i co się z tym wiąże: różnicowanie jego struktury i tekstury. Nawet w niezaburzonym geologicznie masywie istnieje potrzeba doboru optymalnej głębokości, na jakiej najkorzystniej można posadzić tunel.

Racjonalnie jest posadzić tunel w grubej warstwie o dużej wytrzymałości i małej wodoprzepuszczalności. Taki górotwór można traktować jako jednorodny o stałych właściwościach fizycznych i mechanicznych. Ułatwi nam to budowę obiektu i obniża koszty robót. Natomiast przy zróżnicowanych, poprzecinanych wyrobiskiem warstwach o małej grubości, warunki wytrzymałościowe i wodne będą znacznie trudniejsze, a koszty większe.

[rys 2.7. Galczyński]

Skomplikowana sytuacja występuje w górotworze zaburzonym tektonicznie. W pofałdowanym górotworze występuje antyklina (wzniesienie fali) i synklina (dolina fali). Na skutek zginania warstw skalnych występują w nich dodatkowe naprężenia. Górna część antykliny jest rozciągana a jej rdzeń ściskany, w synklinie mamy odwrotny układ. Ponadto w synklinie panuje dodatkowe zwiększone ciśnienie górotworu wynikające z ciężaru zsuwających się warstw skalnych.

[rys 2.8. Galczyński]

Szczegółnej uwagi wymaga lokalizacja budowli podziemnej w zboczu pofałdowanego górotworu, gdzie mogą wystąpić zagrożenia osuwiskiem. Przyczynami, które mogą spowodować osuwisko mogą być:

- duże nachylenie warstw skalnych
- lokalne osłabienia górotworu, np. wskutek nawodnienia, najczęściej po spiętrzeniu wody;
- podcięcie warstw skalnych;
- procesy przyspieszonego wietrzenia bądź naruszenia warstw skalnych, np. robotami strzałowymi.

Dodatkowe asymetryczne obciążenia mogą być spowodowane spękaniem skał.

[rys 2.11. Galczyński]

Również problemy pojawiają się w miejscach uskoków. Szczelina, wzdłuż której nastąpiło przesunięcie skał, jest zwykle rozwarta i wypełniona materiałem okruchowym, namytym lub wykryształizowanym. Uskoki tworzą zwykle rozległe pola lub strefy uskoku dochodzące do kilkudziesięciu metrów. generalnie należy unikać prowadzenia robót w takich strefach.

Często uskok jest miejscem czynnym, co stanowi duże zagrożenie zawału górotworu bądź gwałtownego wtargnięcia wód podziemnych. W przypadku przejścia tunelu przez strefę uskoku należy w sposób specjalny zabezpieczyć tunel przed nierównomiernym osiadaniem oraz zabezpieczyć prowadzenie robót podziemnych.

[rys 2.12. Galczyński]

W masywie skalnym występują również zaburzenia o charakterze punktowym, intruzje i kawerny. Są one trudne do wykrycia w czasie wierceń. Można je rozpoznać jedynie metodami geofizycznymi.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska musi też opisywać zaleganie i chemizm wód podziemnych. Wykonane analizy powinny uwzględnić zmiany stanu i wpływ wód podziemnych na otoczenie.

[rys 2.13. Galczyński]

Np. wody połączone ze zbiornikami na powierzchni terenu mogą wtargnąć do wyrobiska wskutek powiększenia drożności porów lub szczelin.

Niekorzystne jest również naruszenie reżimu wód gruntowych, gdy wodoszczelna obudowa wyrobiska przegrodzi jej naturalny przepływ. Może wystąpić wtedy niekorzystny niesymetryczny układ obciążeń działających na obudowę. Zakłócenia te mogą również okazać się niebezpieczne dla zagospodarowanego terenu na powierzchni terenu.

Mówiłem o zagrożeniach wynikających z budowy geologicznej i hydrogeologicznej górotworu. Ważne są również zagrożenia wynikające z występowania w masywie gazów szkodliwych dla otoczenia, a szczególnie dla zdrowia ludzi przebywających w zanieczyszczonym środowisku.

Gazy najczęściej występujące w górotworze:

- dwutlenek węgla (CO_2),
- tlenek węgla (CO),
- metan (CH_4),
- siarkowodór (H_2S),
- dwutlenek siarki (SO_2),
- wodór (H_2),
- azot (N).

Są to najczęściej produkty spalania substancji organicznych procesów gnilnych lub przemian chemicznych zachodzących w bardzo wysokich temperaturach. Tego typu gazy są też elementami składowymi spali, dymów bądź mieszaniny gazów powybuchowych.

Dwutlenek węgla (CO_2) jest gazem bezbarwnym i bez zapachu, najczęściej występuje w skałach magmowych i wulkanicznych lub pokładach pochodzenia organicznego jako produkt rozkładu materii biologicznej. Jest 1,5 raza cięższy od powietrza więc rozściela się na dnie wykopów i wyrobisk, co utrudnia jego wykrycie i usunięcie. Bezpośrednio nie jest szkodliwy dla zdrowia ludzi, ale utrudnia oddychanie jedynie dłuższe przebywanie w środowisku 4-6% CO_2 grozi uduszeniem, jest agresywny w stosunku do konstrukcji betonowych i stalowych.

Tlenek węgla (CO) – jest nieco lżejszy od powietrza, co umożliwia jego rozprzestrzenianie się. Jest silnie trujący. Nie ma zapachu i zabarwienia co utrudnia wykrycie jego obecności. Występuje w sąsiedztwie pokładów węgla lub ropy jako produkt spalania metanu lub pyłu węglowego.

Metan (CH_4) – gaz błotny, dwukrotnie lżejszy od powietrza, łatwo gromadzi się w górnej warstwie wyrobiska. Bezbarwny i bez zapachu, jest to gaz łatwopalny. Występuje w sąsiedztwie złóż węgla lub ropy naftowej, główny składnik gazu ziemnego. Zmieszany z powietrzem tworzy bardzo groźną mieszaninę wybuchową. Wybuchowi towarzyszy samozapalenie. W rejonie zagrożonym należy ograniczyć stosowanie narzędzi elektrycznych.

Siarkowodór (H_2S), gaz cięższy od powietrza (1,7 raza), charakterystyczny zapach zgniłych jajek. Rozpuszczalny w wodzie i często pojawia się w wyrobisku przy intensywnych jej dopływach. Należy

do gazów silnie trujących i tworzy z powietrzem mieszaninę wybuchową. Dodatkowo wywołuje procesy ropne otwartych ran, podrażnienie oczu. Silnie agresywny w odniesieniu do betonu i stali.

Dwutlenek siarki (SO_2), gaz bezbarwny o ostrym zapachu, groźne własności duszące, łatwo rozpuszcza się w wodzie. Wybitnie agresywny dla betonu i stali.

Wodór (H_2), 15 razy lżejszy od powietrza. Gaz palny, nieszkodliwy dla zdrowia

Azot (N), gaz nietrujący i niepalny ale może wywoływać duszności. Występuje w młodych skałach wulkanicznych lub jako produkt rozkładu związków organicznych pochodzenia roślinnego.

Warunki termiczne:

Ze względu na zmianę temperatury można wydzielić trzy strefy skorupy ziemskiej:

'strefa przemarzania w rejonach największych temperatur ujemnych obejmująca warstwy górotworu tuż przy powierzchni terenu;

'strefa zmiennych temperatur dodatnich;

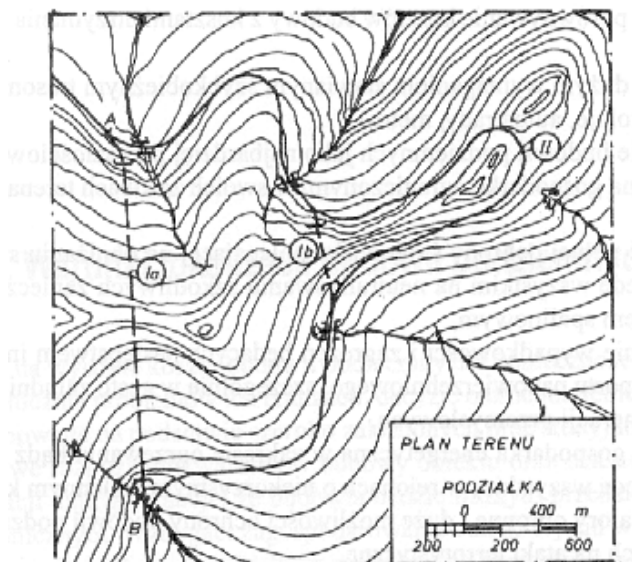
'strefa temperatur stałych wzrastających wraz z głębokością. Stopień geotermiczny (25 - 50 m/ °C)

- miara przyrostu głębokości, przy której temperatura zwiększa się o 1°C.

Kształtowanie podziemnej trasy komunikacyjnej

Mówiliśmy, że w projektowaniu wstępnym należy rozważyć rozwiązania wariantowe planowanej budowli. Warianty te powinny uwzględniać zróżnicowanie takich elementów związanych z kształtowaniem trasy podziemnej jak:

- lokalizację tunelu w zależności od ukształtowania terenu oraz rozpoznanej budowy geologicznej;
- przebieg jego osi podłużnej w profilu i planie;
- ukształtowanie tunelu w układzie poprzecznym.



Rys. 2.1. Trasowanie szlaku komunikacyjnego: I – trasa z tunelem, II – trasa bez tunelu, A, B – porównywalne punkty szlaku

Tunel górski w terenie o bardzo dużym wzniesieniu można zaprojektować dwoma sposobami:

- ◆ przewidujemy budowę tunelu natychmiast po zbliżeniu się trasy komunikacyjnej do podnóża pasma górskiego, rozważając tzw. **tunel bazowy**.
- ◆ stosujemy maksymalnie dopuszczalne spadki (wzniesienia), dużą liczbę łuków o małych promieniach naziemnej trasy komunikacyjnej, a dopiero u szczytu przeszkody – tunel podszczytowy lub **przełączowy**;

Tunel podszczytowy jest zwykle położony wysoko w górach, co zwiększa koszty jego budowy, utrudnia eksploatację, zwiększa koszty przejazdu po skomplikowanych w planie i profilu dojazdach w terenie górzystym. Zaletą natomiast takiego tunelu będzie jego mała długość, a poza tym cała rozbudowana trasa stwarza znaczne możliwości ożywienia gospodarczego lub turystycznego rejonu.

Tunel bazowy ma zdecydowanie większą długość, może przebiegać w bardzo zróżnicowanych i złożonych warunkach geologicznych, ale trasa komunikacyjna jest maksymalnie skrócona i przebiega łagodnie w profilu i w planie, umożliwiając duże prędkości jazdy. Wybór więc nie jest jednoznaczny.

Ze względu na położenie tuneli w masywie górkim oprócz tuneli bazowych i przełączowych spotyka się tunele **dolinne** (wykonany w zboczu górkim równolegle do doliny w celu wyprostowania trasy komunikacyjnej) oraz tunele **pętlowe** (wykonany w celu pokonania znacznej różnicy wysokości, o spadku niwelety w jednym kierunku i osi w planie zbliżonej do fragmentu lub wielokrotności koła.

Przebieg osi podłużnej tunelu komunikacyjnego w profilu i planie zależy od następujących czynników:

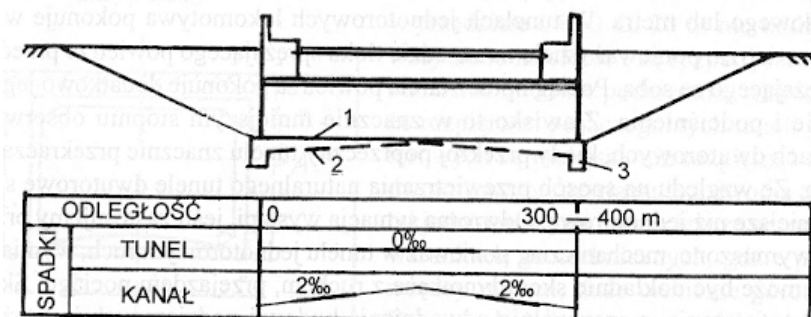
- przebiegu trasy,
- wymagań eksploatacyjnych,
- warunków geologicznych i hydrogeologicznych posadowienia budowli
- sposobów odwodnienia budowli podziemnej,
- systemów przewietrzania tunelu.

Wybierając niweletę tunelu należy dążyć do umieszczenia budowli w możliwie najkorzystniejszych utworach geologicznych. Jeśli jest to możliwe, należy umieszczać tunel powyżej poziomu wody gruntowej.

Trasa tunelu musi być zgodna z trasą drogi, jednak ze względu na trudności geologiczne mogą być rozpatrywane niewielkie odchylenia od trasy.

Oś obiektu może przebiegać w poziomie lub ze spadkami.

W poziomie projektuje się tunele krótkie do 400 m długości. Długość tuneli poziomych ograniczona jest warunkami odwodnienia spągu wyrobiska. Dla zbyt długich odcinków poziomych tunelu kanały odwadniające ze spadkami co najmniej 2‰, musiałyby mieć dużą głębokość, co mogłoby utrudniać ich oczyszczanie.



Spadki budowli podziemnych projektowane są w celu uzyskania niezbędnych efektów eksploatacyjnych, bądź prawidłowego ich odwodnienia.

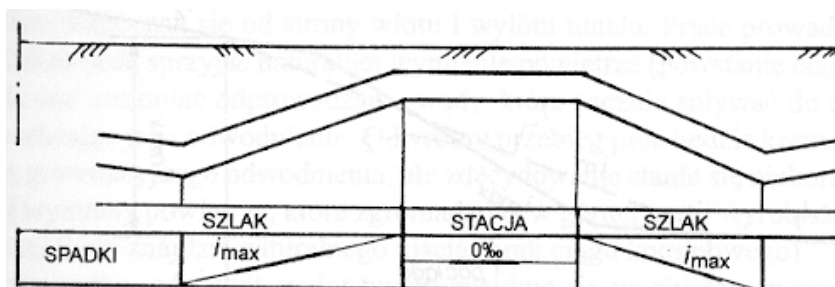
Powietrze, które jest zamknięte w tunelu stawia pojazdom dodatkowe opory. W tunelu występuje również spadek przyczepności kół pojazdów do nawierzchni, spowodowany intensywnym wyjeżdżeniem i stałym zawilgoceniem. Dlatego spadki w tunelach są o 20-30% łagodniejsze w porównaniu ze spadkami miarodajnymi odpowiadających im obiektów naziemnych. Im mniejsze spadki, tym bardziej umiarkowanie pracują silniki i mniejsza ilość spalin wypełnia tunel.

Tunele jednospadkowe wykonuje się wtedy, gdy trzeba pokonać wyraźną różnicę poziomów wlotu i wylotu tunelu. Długość tuneli jednospadkowych nie powinna przekraczać 3000 m, ponieważ w długich tunelach następuje zjawisko nadmiernego ciągu naturalnego. Profil jednospadkowy sprzyja grawitacyjnemu odprowadzeniu wody i jest korzystny ze względu na wymianę powietrza. Jednak komplikacje pojawiają się podczas drażenia wyrobiska. Prace prowadzone zgodnie ze spadkiem będą sprzyjać naturalnej wymianie powietrza (ciąg kominowy) ale woda spływa do czoła wyrobiska utrudniając odwodnienie.

Tunele podwodne i górskie są wykonywane zwykle jako dwuspadkowe. Mogą mieć profil wklęsły lub wypukły. Profil wklęsły jest korzystny z punktu widzenia przewietrzania. Profil wypukły zapewnia samoczynny odpływ wody w kierunku wylotów tunelu.

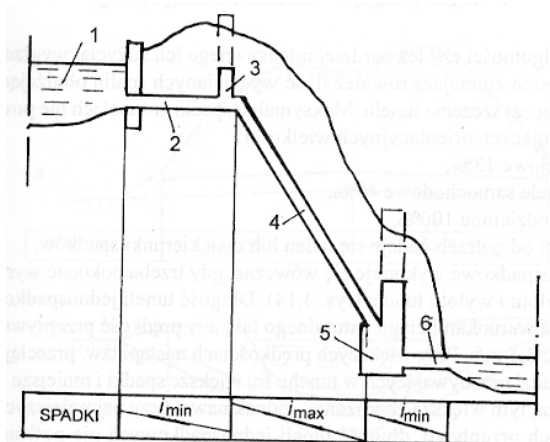
Profile wypukłe wykonuje się z minimalnym nachyleniem, a profile wklęsłe z maksymalnym nachyleniem, zwłaszcza na odcinkach wejściowych. Maksymalne spadki umożliwiają skrócenie długości tunelu.

W szybkiej kolei podziemnej spadki i wzniesienia kreowane są korzystnymi warunkami ruchu pojazdów.



Między sąsiednimi stacjami trasy nadaje się profil wklęsły z maksymalnymi spadkami i wzniesieniami przy stacjach, a minimalnymi w części środkowej. Sprzyja to rozwijaniu prędkości po wyruszeniu pojazdu ze stacji i skróceniu drogi hamowania podczas wjazdu na stację.

Spadki w tunelach hydrotechnicznych regulowane są warunkami grawitacyjnego przepływu wody oraz potrzebą uzyskania maksymalnej energii zrzutu wody na turbiny elektrowni.



Ukształtowanie tunelu w planie

Prosty rzut osi podłużnej trasy komunikacyjnej jest najbardziej korzystny pod każdym względem.

Projektując tunele należy unikać łuków, ponieważ:

- zmniejszają widoczność pojazdów,
- wymagają poszerzania przekroju poprzecznego,
- zwiększają objętość wbudowanych materiałów,
- komplikują wykonawstwo,
- zwiększają opór przepływającego przez tunel powietrza.

Na łukach tuneli kolejowych istnieje konieczność poszerzenia skrajni budowlanej, która wynika z poprzecznego nachylenia torowiska w celu wyeliminowania siły odśrodkowej, a także ze sztywności podwozia pojazdów szynowych, które wysuwają się poza normalną skrajnię budowlaną. W tunelach dwutorowych należy poszerzyć międzytorze.

Ze względu na warunki morfologiczne i geologiczne nie zawsze udaje się uniknąć łuków. Długość ich powinna być jak najmniejsza a promienie jak największe. Minimalne promienie łuków:

- $400 \div 150$ m w tunelach kolejowych,
- $200 \div 80$ m w metrze,
- $300 \div 100$ m w tunelach samochodowych.

Układ przejść podziemnych w planie poniżej skrzyżowań kształtuje się przy zastosowaniu metod optymalizacji. Celem optymalizacji powinna być minimalizacja drogi przebytej przez trzy potoki ruchu: поток pieszych przekraczających ulice równolegle, prostopadle i po przekątnej. Z analizy tej wynikają dwa podstawowe układy: pierścienia i gwiazdy.

W rozwiązaniach bardziej złożonych sieci ruchu pieszego trzeba uwzględnić kolizyjne węzły potoków (układ gwiazdy). Klasycznym przykładem są stacje metra, gdzie potoki pasażerów krzyżują się wielokrotnie, a ciągi komunikacyjne muszą być rozpatrywane nie tylko w planie ale przestrzennie.

Przekrój poprzeczny tunelu

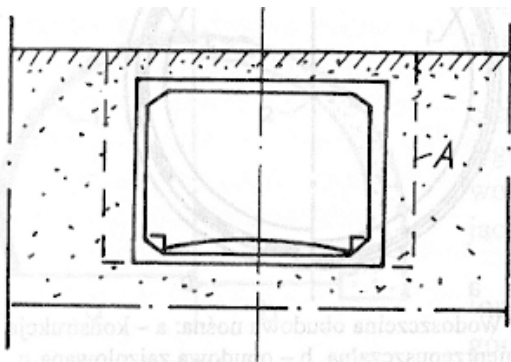
Kształtowanie układu poprzecznego tunelu jest podyktowane przede wszystkim warunkami bezpieczeństwa.

Optymalny kształt przekroju podyktowany jest:

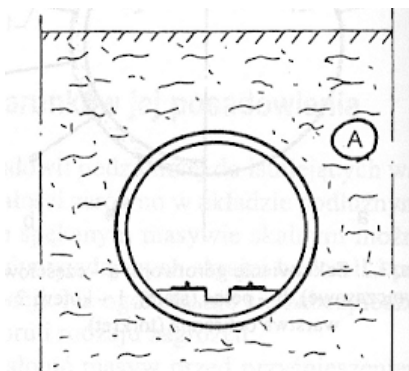
- warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi,
- metodą wykonania zależnie od przeznaczenia,
- potrzeb eksploatacyjnych.

Wyróżnia się 4 typy budowli ze względu na warunki ich posadowienia:

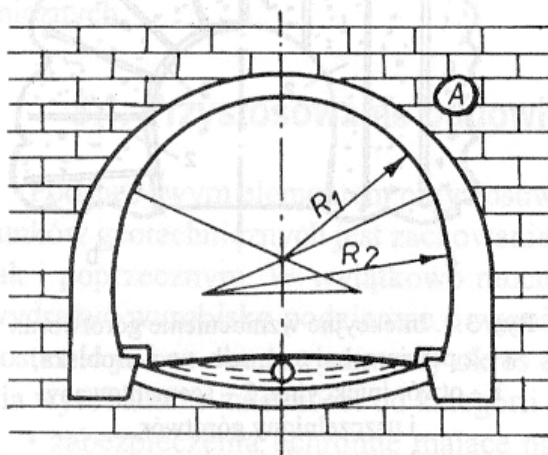
- **na małych głębokościach**, posadowione w dobrych warunkach geotechnicznych, o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego (najczęściej prostokątne);



- **na dowolnej głębokości**, w bardzo małoonośnym górotworze, obciążone hydrostatycznie, o przekroju kołowym;



- **na znacznej głębokości**, w skałach wywierających duże ciśnienie pionowe i poziome, wykonane w kształcie podkowiastego sklepienia, według linii ciśnień, z gładkim połączeniem krzywizn;



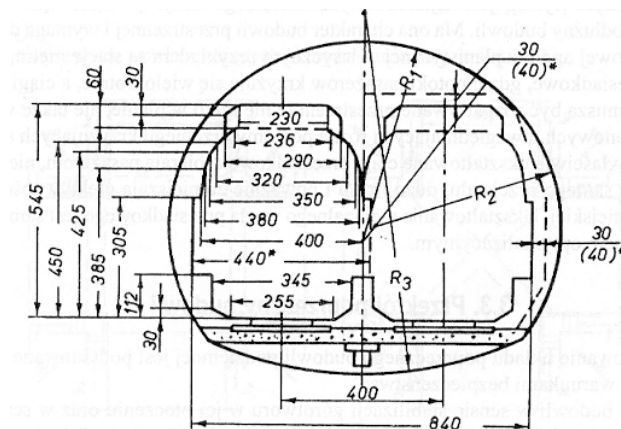
- na dużej głębokości**, w skałach wywierających głównie ciśnienie pionowe, wykonane jako sklepienia ukształtowane zgodnie z linią ciśnień, oparte na ścianach masywnych.
- Kształt budowli narzuca metodę wykonania:
- budowlę o przekroju poprzecznym prostokątnym wykonuje się metodą odkrywkową;
 - budowlę o przekroju kołowym wykonuje się metodą tarczową;
 - budowlę o przekroju w kształcie sklepienia, wykonuje się metodą górniczą.

Kształtowanie przekroju tunelu ze względu na wymagania eksploatacyjne

Warunki eksploatacyjne decydują o wewnętrznym obrysie tuneli komunikacyjnych. W obiektach tych mogą być przewidywane przestrzenie na urządzenia, sprzęt, środki transportu, a także przestrzenie na odpowiednie drogi i przejścia dla obsługi.

Wyjściowym punktem projektowania wewnętrznego obrysu tunelu komunikacyjnego jest skrajnia budowlana, ustalona normatywnie dla poszczególnych rodzajów taboru.

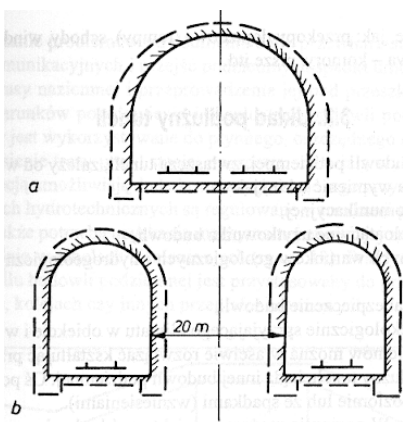
Tunele kolejowe muszą w swoim obrysie wewnętrznym pomieścić skrajnie taboru, nawierzchnie i odwodnienie.



Przepisy kolejowe oraz potrzeby eksploatacyjne tunelu wymagają pozostawienia między skrajnią budowlaną a obrysem tunelu dodatkowego luzu, który będzie wykorzystywany w czasie prac remontowych lub w sytuacjach awaryjnych. W tunelach jednorodowych 40 cm, dwutorowych 30 cm. W wolnych przestrzeniach, które wynikają z łamanego obrysu skrajni umieszcza się drobne instalacje oświetlenia, sygnalizacji, łączności itp.

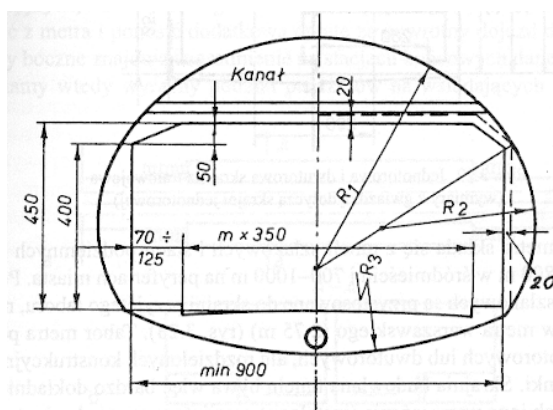
Wspominałem już o konieczności poszerzenia tunelu na łukach. Tunele o specjalnym programie eksploatacyjnych, np. Eurotunel, są projektowane wg indywidualnych skrajni i wymagań dodatkowych o charakterze strategicznym lub antyterrorystycznym.

Tabor kolejowy lub samochodowy porusza się w tunelach jednorodowych lub dwutorowych. Dwa tunele oddalone od siebie w przedziale 10-20 m nie oddziałują wzajemnie na siebie, takie rozwiązanie będzie lepsze w trudnych warunkach geotechnicznych, gdzie panuje duże ciśnienie górotworu. Wybór rozwiązania jedno- lub dwutunelowego związany jest również z zasadami eksploatacji szlaków komunikacyjnych. zwłaszcza ruchu kolejowego lub metra. W tunelach jednorodowych lokomotywa pokonuje większe opory powietrza, a więc tunel dwutorowy jest korzystniejszy ze względu na sposób przewietrzania naturalnego.

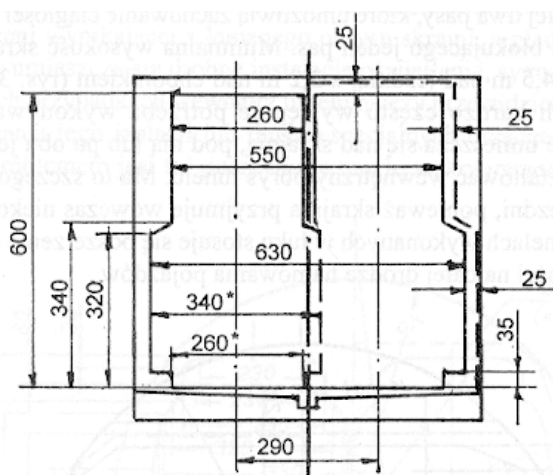


Skrajnia **tunelu samochodowego** jest na ogół dowiązywana do poboczy jezdni. Dwustronne chodniki tuneli ograniczają niebezpieczne zbliżenie się taboru samochodowego, głównie ciężarowego do ścian tunelu. Wymagany jest przynajmniej jeden chodnik o szerokości 75-125 cm. Poza tym, ze względu na bezpieczeństwo obsługi tunelu i dodatkowe wyposażenie poszerza się skrajnie budowlaną w granicach 20 cm. Podstawowa skrajnia tunelu samochodowego zależy od liczby pasów drogowych, których szerokość powinna wynosić 3,5 m. Najmniejsza dopuszczalna liczba pasów drogowych to co najmniej 2 pasy, które umożliwiają zachowanie ciągłości ruchu w przypadkach awaryjnych.

Minimalna wysokość skrajni musi wynosić 4,5 m nad jezdnią, a 2,2 m nad chodnikiem. Kanały wentylacyjne umieszcza się nad skrajnią, pod nią lub po obu jej stronach. W celu zachowania widoczności na łukach stosuje się poszerzenie.

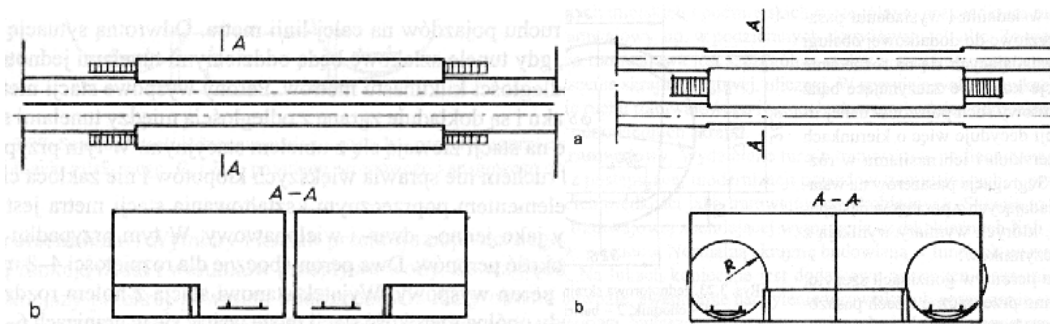


Tunele tramwajowe podlegają ciągłym zmianom, co wynika z ciągłej modernizacji pojazdów tramwajowych i wzrostu ich prędkości.



Sieć metra składa się z tuneli szlakowych i stacji podziemnych. Poprzeczne przekroje tuneli szlakowych są przystosowane do skrajni przyjętego taboru, np. szerokość wagonów metra warszawskiego to 2,75 m. Przekroje stacji metra zależą od natężenia ruchu pasażerów, usytuowania peronów i rodzaju stacji (pośrednie, węzłowe).

Perony mogą być usytuowane po zewnętrznej stronie torów zwane bocznymi lub między nimi jako tzw. perony wyspowe.

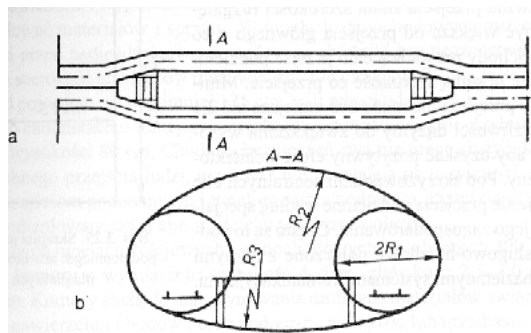


Częściej stosowane są perony wyspowe, ponieważ są bardziej funkcjonalne, obydwa perony mają wspólne urządzenia i są wspólnie obsługiwane, a pasażerowie mogą łatwo skorygować pomyłki wybierając zły kierunek jazdy.

Perony boczne wymagają oddzielnych urządzeń eksploatacyjnych i są oddzielnymi jednostkami. Perony boczne znajdują uzasadnienie na stacjach końcowych.

Tabor metra porusza się w tunelach jednotorowych lub dwutorowych, ale rozdzielonych konstrukcyjnie na dwa niezależne kierunki. Gdy szlak komunikacyjny zlokalizowany jest w jednym tunelu dwukierunkowym, wówczas stacja z peronami bocznymi nie narusza przebiegu szlaku. W razie potrzeby łatwo w tym przypadku przedłużyć taką stację.

Natomiast wkomponowanie peronów wyspowych w szlak zlokalizowany w jednym tunelu wymaga budowy odcinków przejściowych przed i za stacją.



Odwrotną sytuację będziemy mieli w przypadku szlaku poprowadzonego w dwu tunelach rozstawionych w odległości kilkunastu metrów. W takim wypadku perony wyspowe nie naruszają przebiegu szlaku i wydłużenie stacji nie sprawia kłopotów.

Ze względu na układ konstrukcyjny tuneli rozróżniamy stacje jedno-, dwu- i wielonawowe. Środkowe przęsło stacji trójnawowej obejmuje holl rozdzielczy, w którym następuje przemieszczanie się pasażerów. Wewnętrzny obrys stacji związany jest z jej ukształtowaniem architektoniczno-plastycznym. Wnętrze stacji powinno wywoływać wrażenie przestrzenności, lekkości i jasności.

Wymiary i kształt przekroju poprzecznego **tunelu hydrotechnicznego** są funkcją ilości i warunków przepływu wody. Ze względów hydraulicznych przekrój powinien mieć możliwie mały obwód, a więc przekrój kołowy lub zbliżony do kołowego.

WYKŁAD 5

Projektowanie podziemnych obiektów komunikacyjnych.

Zasady obliczeń statycznych tuneli i stateczności tuneli

Budownictwo Podziemne jest dziedziną bardziej interdyscyplinarnym niż inne działy budownictwa. W wyniku różnorodności zadań w całym procesie planowania i projektowania uczestniczą: geolodzy, inżynierowie geotechnicy, inżynierowie budowlani i górnicy, mechanicy, elektrycy i elektrotechnicy, geodeci, a także klienci i przyszli wykonawcy, a także prawnicy.

Oni wszyscy muszą ze sobą współpracować zarówno w fazie projektowania, jak i realizacji budowy w celu osiągnięcia wysokiej jakości rozwiązania, tak z punktu widzenia budowlanego, jak i użytkowego.

✓ *geologia;*

✓ *geotechnika;*

✓ *technologie budownictwa podziemnego, np. tunelowanie zmechanizowane;*

✓ *projektowanie elementów konstrukcyjnych obudowy z uwzględnieniem długoterminowych właściwości stosowanych materiałów;*

✓ *zawieranie umów i prawo.*

Organizacja the International Tunnelling Association utworzyła międzynarodowe grupy robocze, które pracują nad poszczególnymi tematami gromadząc i przedstawiając w raportach wyniki swojej pracy dotyczące dziedzin naukowych, technicznych, planowania, statystyki, prawa, administracji, ekonomii, i spraw społecznych.

Wszystkie te prace można znaleźć na stronie internetowej:

<http://www.ita-aits.org>.

Tematem jednego z opracowań były również „Ogólne zasady projektowania tuneli”.

Guidelines for the Design of Tunnels

Chociaż specjaliści poszczególnych dziedzin są odpowiedzialni za swoją specyficzną część procesu projektowania i planowania, to ostateczna decyzja dotycząca rozwiązań konstrukcyjnych i inwestycyjnych musi być podejmowana wspólnie przy uwzględnieniu interakcji poszczególnych elementów. Jest to podstawowy warunek, by ten podziemny obiekt został zaprojektowany w sposób optymalny pod względem konstrukcyjnym, finansowym i z zapewnieniem bezpiecznego wykonawstwa i eksploatacji.

Punktem wyjścia w procesie projektowania są zagadnienia z dziedziny geologii, hydrogeologii i topografii. Te dziedziny, a szczególnie geologia dostarczają kluczowych informacji dla dalszego przebiegu inwestycji. Podstawowe dokumenty wymagane na tym etapie projektowania to:

- dokumentacja geologiczna przedstawiająca wyniki badań geologicznych i geofizycznych (rodzaj, układ, kierunek, głębokość występowania warstw geologicznych, występowanie ewentualnych pustych przestrzeni w górotworze, jam, kawern itp.
- dokumentacja hydrogeologiczna (informacje na temat warunków hydrogeologicznych i hydrologicznych)

Kolejne informacje już bardziej szczegółowe podają specjaliści z zakresu geotechniki, mechaniki gruntów i skał. Na podstawie wykonanych badań określa się właściwości fizyczne i mechaniczne górotworu: stan naprężeń, wytrzymałość, lokalizacje uskoków i warunki gruntowo-wodne. Dane te podawane są w postaci:

- dokumentacja geotechniczna, która powstaje na podstawie badań terenowych i pobranych próbek do badań laboratoryjnych, obejmująca interpretację wyników badań terenowych i laboratoryjnych z uwzględnieniem procesu wykonania tunelu (ścieżki naprężeń), podaje charakterystykę i klasyfikację występujących gruntów i skał.

Następne analizy dotyczą już ukształtowania podziemnej trasy komunikacyjnej, a więc na podstawie dokumentacji geologicznych i geotechnicznych oraz w oparciu o ubiegłe doświadczenia, wstępne oceny i obliczenia ustala się przebieg oraz ukształtowanie tunelu w przekroju poprzecznym, a także dokonuje się wyboru metody wykonania z ustaleniem rodzaju potrzebnych maszyn. Także przewiduje się metody odwodnienia wyrobiska i dokonuje się wyboru elementów konstrukcyjnych obudowy:

- ukształtowanie trasy podziemnej w planie i przekroju;
- wybór elementów konstrukcyjnych, drenażu i odwodnienia w trakcie budowy i eksploatacji;
- wybór metody wykonania i jej opis w zależności od rozpatrywanych przekrojów poprzecznych;
- program bieżącego monitoringu *in-situ* tunelu za pomocą pomiarów terenowych.

Następne zadania należą do projektantów konstruktorów, ale w powiązaniu ze specjalistami innych dziedzin przede wszystkim geotechnikami, których głównym zadaniem na tym etapie jest ocena i modelowanie mechanicznej współpracy obudowy z górotworem. W tej fazie wykonuje się:

- dokumentacja projektowa obejmująca obliczenia statyczne uwzględniające mechaniczne modele współpracy obudowy z otaczającym górotworem.

Obliczenia te muszą uwzględniać poszczególne fazy wykonawstwa, metody zabezpieczenia wyrobiska, jego obudowę: kotwienie, shotcret i ostateczną obudowę stałą.

Na tej podstawie sporządza się finalną dokumentację projektową dla części konstrukcyjnej obejmującą także różne szczegóły konstrukcyjne.

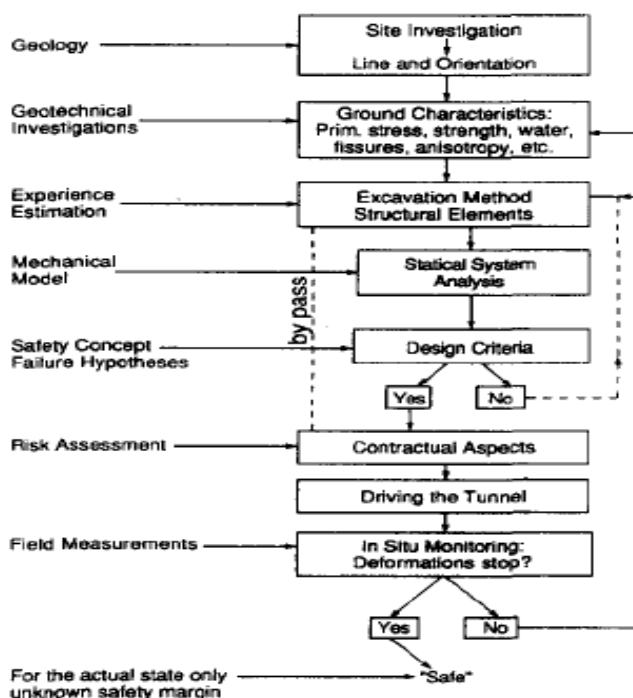
W dokumentacji tej powinien znaleźć się również:

- projekt odwodnienia lub zabezpieczenia przed wodą.
- program bieżącego monitoringu *in-situ* tunelu za pomocą pomiarów terenowych.

Na podstawie prowadzonego monitoringu dokonuje się bieżącej analizy stanu naprężeń i odkształceń (dla tuneli bez obudów, z pojedynczą lub podwójną obudową) i wymiarowanie obudowy tunelu dla poszczególnych faz konstruowania.

Tworzy się raport z badań i pomiarów w trakcie oraz po wydrążeniu tunelu, dokonuje się ich interpretacji z uwzględnieniem oddziaływania podłoża i zasad bezpieczeństwa tunelu.

Sporządza się również dokumentację na temat problemów, które miały miejsce w trakcie drążenia oraz użytych pomiarów, np. wzmocnienie podłoża lub zmiana rodzaju obudowy na podstawie wyników pomiarów terenowych.



Proces projektowania konstrukcji tunelu można przedstawić na powyższym schemacie. Po wykonaniu pierwszym trzech kroków, gdy mamy wstępnie przyjętą koncepcję ukształtowania budowli, rozpoznane warunki geotechniczne oraz wybrane wstępnie metody drążenia oraz stosowane materiały i rodzaje obudowy, należy przyjąć lub nawet opracować model mechaniczny, który będzie odzwierciedlał współpracę konstrukcji obudowy z otaczającym ośrodkiem.

W poszczególnych fazach wykonawstwa, dla poszczególnych rodzajów obudów (wstępna, końcowa) może być potrzebny inny model, jak również dla różnych warunków geotechnicznych.

Stosując te modele wykonuje się obliczenia statyczne i porównuje się otrzymane wyniki z przyjętymi kryteriami, które mają zapewnić bezpieczną budowę i eksploatację budowli.

Przyjęta na podstawie obliczeń statycznych konstrukcja tunelu podlega dalszej analizie aspektów związanych z wzajemnymi umowami między inwestorem a wykonawcą. Jeśli ta analiza wypadnie na niekorzyść przyjętej koncepcji to konieczna jest jej zmiana dotycząca metody wykonania lub/i przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych.

Monitoring przemieszczeń budowli może być dokonany dopiero po rozpoczęciu prac tunelowych. Pomiary te wraz z dodatkowymi bieżącymi badaniami terenowymi mogą wskazywać na konieczność zmiany koncepcji, modelu lub wykonania dodatkowych, dokładniejszych badań podłoża.

Tak aby otrzymane wyniki na podstawie obliczeń statycznych były zbliżone do rzeczywistego zachowania konstrukcji, kontrolowanego przez bieżące pomiary przemieszczeń.

Taka iteracyjna procedura (metoda obserwacyjna) jest charakterystyczna dla projektowania konstrukcji zagłębionych w naturalnym podłożu, gdzie dużą rolę odgrywają własności mechaniczne i wytrzymałościowe ośrodka górotworu. Należy przy tym pamiętać o interakcyjnym charakterze wszystkich czynników mających wpływ na zachowanie się konstrukcji. Niedokładność jednych parametrów wpływa bezpośrednio na dokładności w dalszym etapie projektowania. Na przykład nie nam nie da wykorzystanie nawet najbardziej skomplikowanych procedur matematycznych do rozwiązania problemu z precyzyjnie zdefiniowanym modelem mechanicznym, jeśli nie będziemy dysponować dokładnym i dostatecznym rozpoznaniem podłoża z parametrami koniecznymi do opisu modelu współpracy konstrukcji z ośrodkiem górotworu.

Konstrukcje budowli podziemnych są ustrojami przestrzennymi, ale na ogół nie zmieniają w istotny sposób swoich kształtów i wymiarów w układzie podłużnym. Zasada ta szczególnie dotyczy tuneli. Także obciążenia nie zmieniają się lub zmieniają się bardzo wolno wzdłuż obudowy tunelu. Proces wykonywania tunelu rozpatruje się jako problem trójwymiarowy tylko u czoła tunelu (na przodku), gdzie zachodzi zmiana w przestrzennym rozkładzie naprężeń. Ale już w pewnej odległości od czoła tunelu, stan naprężenia wokół wyrobiska można rozpatrywać jako zagadnienie płaskie (dwuwymiarowe).

Dlatego tunele traktujemy jako układy płaskie reprezentowane przez przekroje poprzeczne. Podczas obliczania rozpatrujemy odcinki o jednostkowych długościach, najczęściej 1-metrowych wzdłuż podłużnej osi tunelu.

Obliczenia obejmują wyznaczenie wypadkowych sił wewnętrznych w obudowie i sprawdzenie jej nośności w najbardziej charakterystycznych przekrojach, zwykle w przekrojach o największym wyciężeniu konstrukcji.

Wymiarowanie konstrukcji podziemnych musi poprzedzać znajomość ich obciążeń. W projektowaniu budowli naziemnych obciążenia podawane są w normach, wytycznych lub przez przyszłych użytkowników. W projektowaniu budowli podziemnych podstawowe obciążenia często musi ustalić sam projektant. Z norm można dobrać tylko odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa.

Na obciążenie podstawowe składa się ciężar własny konstrukcji, oddziaływanie górotworu i naziomu jako ciśnienie pionowe, boczne i spągowe, a także oddziaływanie pojazdów, urządzeń lub wyposażenia budowli.

Obciążenia przekazywane od naziomu zależą przede wszystkim od głębokości posadowienia budowli. Przy małym nadkładzie, do jednego metra, charakter obciążenia będzie odpowiadał charakterowi obciążenia naziomu, a więc mogą to być zarówno obciążenia statyczne, jak i dynamiczne, skupione lub rozłożone.

Dopiero przy nadkładzie powyżej 1 m wszystkie obciążenia można traktować jako zastępcze obciążenia statyczne, równomiernie rozłożone w zasięgu naziomu. Zagłębienie budowli podziemnej poniżej strefy przemarzania uwalnia ją także od wpływów termicznych.

W typowych schematach obliczeniowych można przyjąć, że obudowy tunelu znajdują się w niezaburzonym górotworze na głębokości przekraczającej 1 m pod powierzchnią terenu. Teren jest płasko wyrównany, a nadkład nad jej stropem zmienia się bardzo nieznacznie.

Obciążenia budowli posadowionych płytko, wykonywane metodami odkrywkowymi:

- obciążenie stałe lub zmienne w całości długotrwałe, spowodowane ciężarem nawierzchni, ciężarem gruntu, ciężarem własnym budowli oraz parciem i wyporem wody gruntowej;
- obciążenie zmienne, wynikające z obciążenia naziomu oraz obciążeń technologicznych (użytkowych) budowli

Współpraca konstrukcji z górotworem.

Projektowanie tuneli musi uwzględniać wzajemne oddziaływanie na siebie między górotworem otaczającym tunel a jego obudową. Dlatego obudowa musi być w ścisłym kontakcie z otaczającym gruntem. Aby wykorzystać naturalną wytrzymałość górotworu, powinien on być pozostawiony w stanie nienaruszonym, w takim stopniu jak to tylko będzie możliwe. Powstające odkształcenia w gruncie wskutek odprężenia powodują zmniejszenie pierwotnych naprężeń w górotworze a zwiększają naprężenia w obudowie. Naprężenia te zależą od sztywności obudowy a także od jej kształtu. Większe odkształcenia powodują powstanie zjawiska przesklepienia.

Rysunek przedstawia różne schematy konstrukcyjne stosowane w analizach w płaskim stanie odkształcenia.

W gruntach podatnych, podparcie dla odprężającego się górotworu stanowi względnie sztywna obudowa.

W przypadku (1) i (2) przyjmuje się, że ciśnienie górotworu działające w przekroju poprzecznym jest równe naprężeniu pierwotnemu nienaruszonego górotworu. Zakłada się, że ostatecznie, po kilku latach od zakończenia budowy tunelu, stan naprężeń w podłożu powróci niemal do tego samego stanu, jaki występował przed pracami tunelarskimi. Temu procesowi będą sprzyjały zmiany w poziomie wód gruntowych i dynamiczne oddziaływanie ruchu drogowego.

W przypadku (1), dla tuneli płytko posadowionych i w gruntach miękkich (słabych), jako obciążenie traktuje się cały nadkład gruntu znajdujący się wokół wyrobiska. Dla przekrojów kołowych reakcja podłoża modelowana jest za pomocą podpór sprężystych usytuowanych radialnie lub stycznie. W przypadku (2), dla średnio sztywnych gruntów, sztywność jest uwzględniana przez zastosowanie dwuwymiarowego modelu ośrodka ciągłego i założenie całkowitego kontaktu między obudową a podłożem. Tak jak w przypadku (1), proces odprężenia górotworu jest pomijany. Przemieszczenia skierowane do wewnątrz budowli powoduje zmniejszenie ciśnienia na obudowę.

W przypadku (3) zakłada się, że pewne odprężenie górotworu jest spowodowane przez odkształcenie, które zachodzi między elementami obudowy. W średnio twardych skałach lub w gruntach bardzo spoistych, podłoże może być dostatecznie mocne do przeniesienia obciążeń w pewnych niepodpartych częściach na przodku tunelu. Dla tuneli o względnie dużych obciążeniach nadkładu ($h < H$) uwzględnia się redukcję ciśnienia działającego na część stropową.

W przypadku (4), ciśnienie górotworu działające na obudowę jest wyznaczane na podstawie empirycznych rozwiązań, które stworzono w oparciu o poprzednie doświadczenia w tym samym podłożu i dla tej samej technologii drążenia, na podstawie obserwacji i pomiarów *in-situ*, na podstawie interpretacji zdobytych danych i informacji oraz na podstawie aktualnych doskonałeń stosowanego modelu.

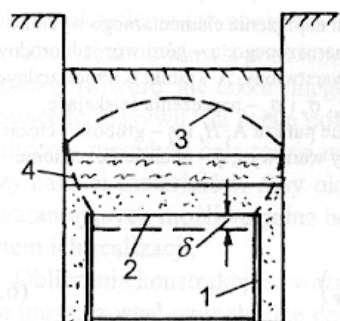
Obciążenie gruntem tuneli głębokich można obliczać z wykorzystaniem różnych wzorów teoretycznych. Niektóre z tych wzorów określają wysokość H_p bryły gruntu. Bryła ta ograniczona jest linią w kształcie paraboli lub elipsy.

Wielkość ciśnienia górotworu zależy nie tylko od jego charakterystyki ale także od rodzaju zastosowanej obudowy, czyli od całego układu obudowa-górotwór.

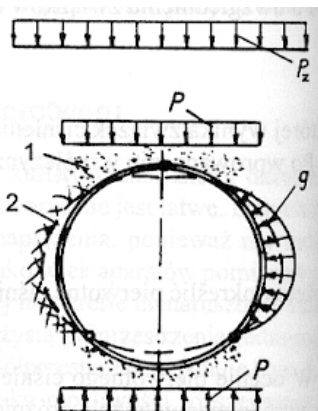
Rozważmy dwa przypadki naruszenia pierwotnego stanu naprężenia górotworu spowodowanego robotami podziemnymi:

- całkowite naruszenie nadkładu wskutek wykonywania budowli podziemnej metodą odkrywkową na małej głębokości;
- częściowe naruszenie górotworu na skutek wydrążenia wyrobiska metodą podziemną na dużej głębokości

W pierwszym przypadku rozpatruje się obudowę skrzynkową z podatnym stropem i sztywnymi ścianami, w drugim trójprzegubową obudowę kołową.



Rys. 6.2. Zasięg naruszenia nadkładu w wykopie: 1 – sztywna obudowa ścian, 2 – podatny strop obudowy, 3 – proces zasklepiania zasypywanego wykopu, 4 – powierzchnia redukcji ciśnienia pierwotnego (ścięcie warstw zasypki), δ – przemieszczenie stropu w procesie zasypki



Rys. 6.3. Lokalne naruszenie górotworu w otoczeniu trójprzegubowej obudowy kołowej, 1 – strefa rozluźnienia, 2 – strefa zagęszczenia, p_z – ciśnienie pierwotne, p – ciśnienie odprężonego (rozluźnionego) górotworu, g – odpór górotworu

Stopień ostatecznego naruszenia górotworu zależy głównie od wielkości przemieszczenia gruntu w stronę wnętrza wyrobiska i jest ściśle uzależniony od podatności obudowy.

Rzeczywiste pionowe obciążenie na tych obudów będzie uzależnione od przemieszczenia stropu obudowy a w przypadku metody bezwykopowej dodatkowo od wielkości odprężenia rozluźniającego się nadkładu. Układ taki będzie więc statycznie niewyznaczalnym ustrojem, gdzie potrzebna jest wzajemna relacja układu obudowa-górotwór.

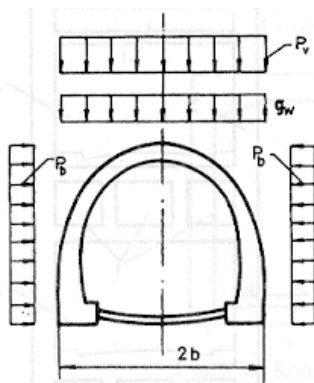
Etapy wykonania metodą odkrywkową obejmują wykonanie wykopu, obudowy i zasypanie budowli. Wraz z odkształceniem stropu osiada także część zalegającego nad nim nadkładu. Rozwija się proces zaklinowywania i zasklepiania formowanego nadkładu. Następuje redukcja oddziaływania górotworu na strop obudowy. Część ciężaru górotworu zostanie przekazana na ściany (ociosy). Wypadkowa wzrastającego rozporu stanie się źródłem dodatkowego obciążenia obudowy, ponieważ spowoduje wzrost tarcia i oporu górotworu na ścinanie na powierzchniach jego poślizgu.

W metodzie podziemnej górotwór rozluźnia się i odpręża zarówno w czasie drażenia górotworu, jak i wskutek odkształcenia obudowy. Odkształcalna obudowa zacznie się przemieszczać pod wpływem obciążenia nadkładem, uruchamiając proces jego odprężenia.

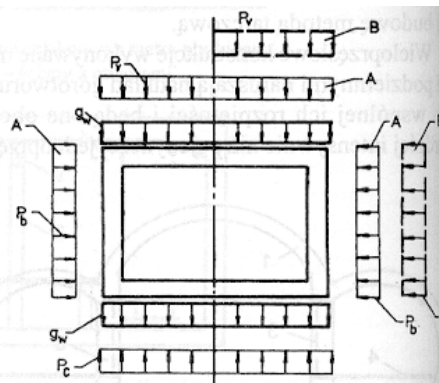
Charakter obciążenia zależy też od metody wykonania tunelu. Można przyjąć, że budowle wykonane metodami podziemnymi obciążone są tylko symetrycznie i równomiernie rozłożonym ciśnieniem górotworu. Natomiast budowle wykonywane metodami odkrywkowymi są zwykle zasypywane jednostronnie i muszą być rozpatrywane zarówno w układzie obciążeń symetrycznych, jak i asymetrycznych.

Przy wcześniej wymienionych założeniach wyróżnia się wielkości pionowe, boczne i spągowe ciśnienia górotworu. Ciśnienie pionowe jest to ciśnienie działające na strop wyrobiska, ciśnienie boczne jest to oddziaływanie ociosów oraz ciśnienie spągowe występujące w spągu wyrobiska.

- symetryczne pionowe i ewentualnie boczne obciążenie budowli wykonywanych metodami podziemnymi,

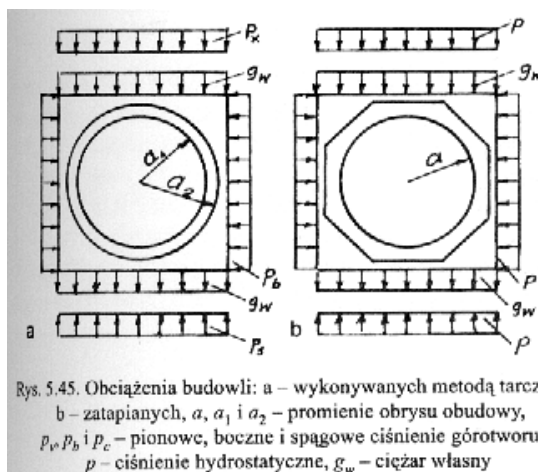


Rys. 5.43. Schemat obciążeń budowli wykonywanych metodami podziemnymi:
 b – połowa rozpiętości wyrobiska,
 p_v i p_b – pionowe i boczne ciśnienie górotworu, g_w – ciężar własny

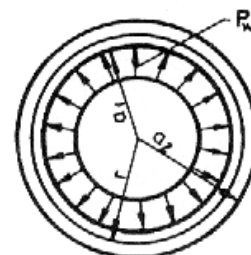


Rys. 5.44. Kombinacja obciążeń budowli wykonywanych metodami odkrywkowymi: A – schemat obciążeń symetrycznych, B – schemat obciążeń jednostronnych,
 p_v , p_b i p_c – ciśnienie pionowe, boczne i spągowe, g_w – ciężar własny konstrukcji

- symetryczne i asymetryczne obciążenie pionowe, boczne i spągowe budowli wykonywanych metodami odkrywkowymi,
- wszechstronne obciążenie symetryczne budowli posadowionych w górotworze nawodnionym,



Rys. 5.45. Obciążenia budowli: a – wykonywanych metodą tarczową, b – zatapianych, a_1 i a_2 – promienie obrysu obudowy,
 p_v , p_b i p_c – pionowe, boczne i spągowe ciśnienie górotworu, p – ciśnienie hydrostatyczne, g_w – ciężar własny



Rys. 5.46. Obciążenie hydrotechnicznego tunelu ciśnieniowego: a_1 i a_2 – obrys obudowy, r – współrzędna przekroju, p_w – ciśnienie wody

- obciążenie wewnętrznym ciśnieniem wody tuneli naporowych.

Obliczenia statyczne tuneli

Wymiarowanie elementów konstrukcyjnych nie odbiega od typowych obliczeń wytrzymałościowych, natomiast wyznaczenie sił wewnętrznych w obudowie tunelu jest zadaniem specyficznym, które wymaga uwzględnienia dodatkowych czynników wynikających z faktu współpracy budowlę z otaczającym ją górotworem.

Praca obudowy zależy od takich czynników jak:

- kształt obudowy,
- rodzaj zastosowanego materiału,
- charakter górotworu i jego ciśnienie,
- sztywność i przebieg przemieszczeń konstrukcji.

Obliczenia statyczne obejmują dwie fazy:

Faza I:

- ustalenie schematu statycznego tunelu, w którym uwzględnia się współpracę z ośrodkiem gruntowym – jest to punkt wyjściowy obliczeń statycznych,
- przyjęcie cech sprężystych, co wynika z doboru materiału i koncepcji konstrukcji tunelu,
- ustalenie parametrów geotechnicznych i podatności ośrodka gruntowego otaczającego tunel.

Faza II – dotyczy rozwiązania przyjętego schematu statycznego za pomocą wybranej metody obliczania. Metoda obliczeń dobierana jest do projektowanej konstrukcji tunelu.

W obliczeniach wykorzystujemy metody statyki budowli, zwłaszcza statyki konstrukcji prętowych, wprowadzając odpowiednie elementy współpracy obudowy z górotworem.

Jednym z elementów współpracy obudowy z górotworem jest sprężyste podparcie konstrukcji spoczywającej na podłożu oraz ściśle przylegającej do ociosów wyrobiska.

W zależności od charakteru reakcji między obudową a górotworem wyróżnia się 4 rodzaje podpór sprężystych:

- podpora obciążona siłą osiową i przemieszczana równomiernie jako stempel sztywny – podpora I rodzaju

Reakcję górotworu określa się z liniowej teorii podatności podłoża według Winklera.

Np. podpora I rodzaju ulegnie przemieszczeniu i wywoła odpór równoważący obciążenie podpory: $R = A_0 \cdot C \cdot u$,

gdzie:

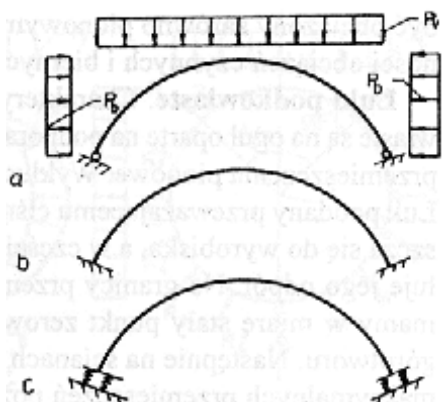
A_0 - powierzchnia podstawy podpory (powierzchnia, która wywiera odpór)

C - współczynnik Winklera [kN/m^3],

u – przemieszczenie,

R - obciążenie podpory, reakcja.

- podpora sztywna nieodkształcalna obciążona mimośrodowo, czyli siłą osiową i momentem, ulegająca przemieszczeniu i obrotowi – podpora II rodzaju,
- podpora masywna w postaci nieodkształcalnej ściany, przyczółka oporowego, obciążona poziomą i pionową składową sił wypadkowych oraz momentem obrotowym – podpora III rodzaju,
- podpora odkształcalna, najczęściej jako naroże płyty na podłożu sprężystym, obciążona siłą lub momentem ściany lub słupa współpracującego z płytą – podpora IV rodzaju.



Rys. 7.1. Schematy statyczne łuków (sklepien) płaskich: a) podpartego przegubowo, b) utwierdzonego, c) sprężyste podpartego, p_v i p_b – pionowe i boczne ciśnienie górotworu

Charakterystyką obliczeniową tych podpór jest podatność, sztywność lub zastępczy element konstrukcyjny. Odpowiednio sformułowane macierze tych charakterystyk są wykorzystywane w obliczeniach statycznych metodą sił, przemieszczeń lub elementów skończonych.

Wśród najczęściej spotykanych schematów statycznych tuneli można wymienić:

- łuki płaskie oparte na skałach,
- łuki płaskie oparte na ścianach sztywnych,
- łuki na ścianach odkształcalnych,
- łuki podkowiaste i kołowe o dużych strzałkach,
- pierścienie kołowe, eliptyczne oraz zespolone z

łuków stropowych i spągowych,

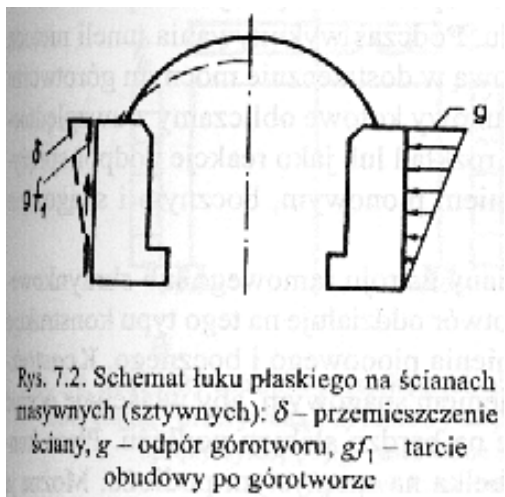
- ustroje ramowe i skrzynkowe,
- ustroje zespolone.

Większość występujących schematów to ustroje wielokrotnie statycznie niewyznaczalne. Szczególnie schematy, w których uwzględnia się odpór górotworu zależny od przemieszczenia obudowy, co skutkuje nieskończeniem dużą liczbą niewiadomych. Takie zagadnienia należy rozwiązywać w sposób iteracyjny. Problemem jest także krzywoliniowość obrysu konstrukcji, o zmiennej grubości przekroju poprzecznego. Te względy zmuszają do niezbędnych uproszczeń umożliwiających wykonanie obliczeń statycznych.

Łuki płaskie oparte na skałach są to obudowy podtrzymujące stropy wyrobisk wykonywanych w mocnych, nienaruszonych skałach. Najczęściej są one osadzone na płasko we wnękach nad ociosami, jako łuki podparte sprężystością. W szczególnych przypadkach mogą być wyprofilowane jako łuki przegubowo podparte lub wskutek ich zakotwienia, jako łuki utwierdzone.

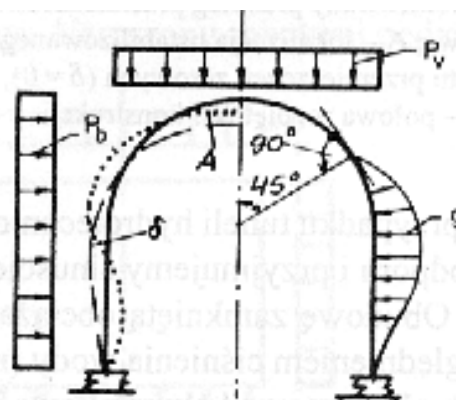
Łuki płaskie spoczywające na sztywnych ścianach pracują jako ustrój sprężyste podparty. Ściany nie ulegają odkształceniu, a jedynie przemieszczeniu. Obracająca się ściana, pod wpływem rozporu łuku, współpracują z górotworem, wywołując liniowo zmienny odpór odpowiadający przemieszczeniom ścian. Ściany mogą również przemieszczać się pionowo zachowując

równomierność osiadań. W takim przypadku występuje dodatkowo tarcie ścian po górotworze, które jest funkcją docisku, czyli odporu górotworu.



Łuki płaskie na ścianach odkształcalnych, gdy sztywność łuków zbliżona jest do sztywności ścian. Traktujemy taki układ jak jeden ustrój konstrukcyjny i obliczamy wspólnie.

Rozpierane ściany ulegają odkształceniu, co wywołuje nieliniowy rozkład odporu o zmiennej intensywności. Schemat obliczeniowy nie jest jednoznaczny i dochodzimy do niego w procesie obliczeń iteracyjnych.

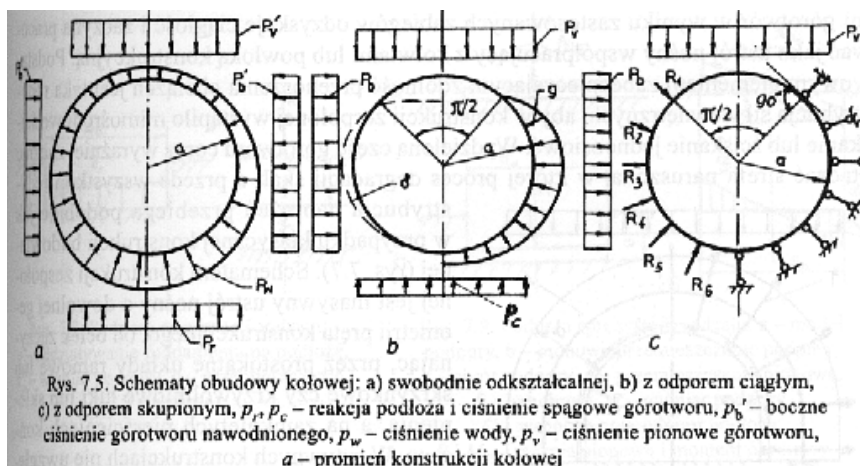


Rys. 7.3. Łuk płaski na ścianach podatnych: P_v i P_b – pionowe i boczne ciśnienie górotworu, g – odpór górotworu, δ – przemieszczenie obudowy, A – nieustabilizowany przebieg przemieszczenia jako funkcja sztywności układu obudowa–górotwór

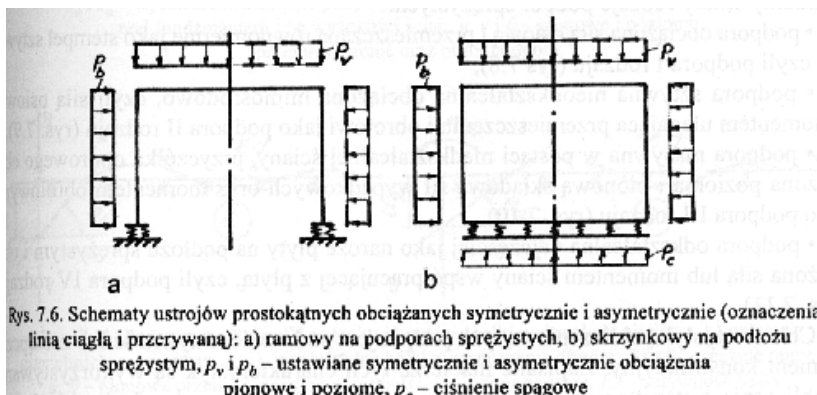
Łuki podkowiaste, charakterystyczne dla budownictwa podziemnego. Są zwykle oparte na podporach sprężystych umożliwiających obrót i równomierne przemieszczanie pionowe. W tym układzie wyklucza się poziome przemieszczenia fundamentów łuku. Przeważające jest ciśnienie pionowe, które przemieszcza łuk do wyrobiska, a w częściach przyścianowych w kierunku górotworu, wywołując krzywoliniowy odpór. W celu uwzględnienia odporu, można przyjąć przybliżony jego rozkład ciągły, opisany krzywą paraboliczną lub trygonometryczną, albo jako reakcje podpór sprężystych.

Pierścień obudowy zamkniętej: kołowy, eliptyczny lub inny – wykonywany na ogół w słabym górotworze i często takie ustroje są rozpatrywane jako konstrukcje swobodnie odkształcalne bez uwzględnienia odporu. Odpór pomija się aby zwiększyć bezpieczeństwo obliczeń poprzez popełnienie jakiegoś większego błędu. W przypadku tuneli kołowych wykonywanych metodą tarczową w

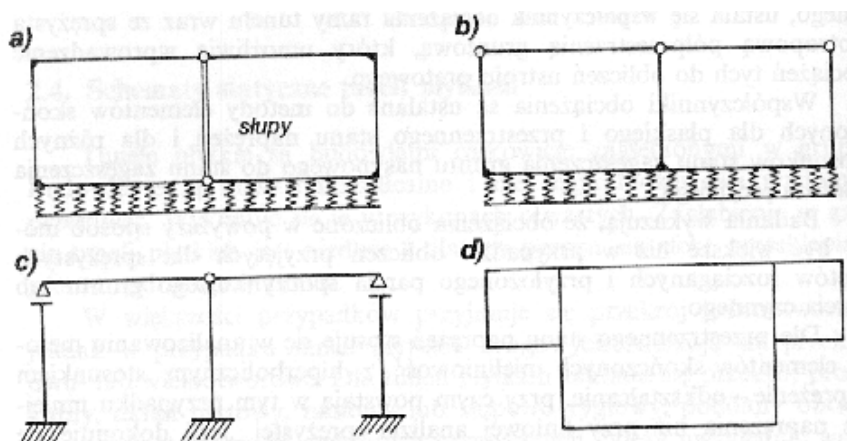
dostatecznie mocnym górotworze i w przypadku tuneli hydrotechnicznych, przyjmuje się sinusoidalny rozkład odporu lub uwzględniamy go poprzez reakcje podpór sprężystych. Obudowę zamkniętą obciążamy ciśnieniem pionowym, bocznym i spagowym. z uwzględnieniem ciśnienia wody.



Ustroje ramowe i skrzynkowe. Strop i ściany ustroju ramowego lub skrzynkowego przemieszczają się w stronę wyrobiska. Górotwór oddziałuje na tego typu konstrukcje jedynie jako obciążenie czynne w postaci ciśnienia pionowego i bocznego. Konstrukcje skrzynkowe obciążone są także ciśnieniem spagowym w celu właściwej oceny osiadania konstrukcji.

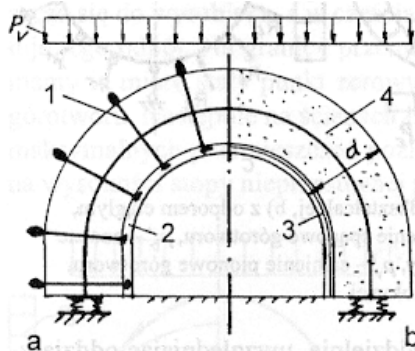


Płyta dolna ustroju skrzynkowego jest rozpatrywana jako belka na sprężystym podłożu. Można ją rozpatrywać jako element całej konstrukcji lub oddzielnie, uwzględniając oddziaływanie górnej części jako ramy na podporach sprężystych. Typowe schematy obejmują ustroje jednonawowe i jedno-poziomowe ale mogą występować również inne: dwu- i wielonawowe, lub dwu- i wielopoziomowe.



Konstrukcje ramowe i skrzynkowe obciążone są symetrycznymi i asymetrycznymi kombinacjami ciśnienia ze względu na możliwość ich wystąpienia w trakcie jednostronnego zasypywania lub

odsłonięcia konstrukcji w czasie wykonywania innych wykopów. Obliczenia wytrzymałościowe wykonuje się uwzględniając etapowość prowadzenia prac wykonawczych, przy uwzględnieniu obwiedni sił wewnętrznych.



Rys. 7.7. Schemat masywnej obudowy z materiału miejscowego: a) obudowa kotwiona, b) obudowa iniekcyjna, 1 – kotew, 2 – warstwa osłonowa (torkret), 3 – obudowa tymczasowa, 4 – górotwór scementowany iniekcjinie, d – grubość obudowy

Ustroje zespolone – są konstrukcjami nośnymi tworzonymi z górotworu in situ w wyniku takich zabiegów jak kotwienie, torkret czy narzut betonowy lub iniekcja masywu skalnego lub gruntowego.

W wyniku tych zabiegów, naruszony górotwór odzyskuje ciągłość i zaczyna pracować jako ustrój nośny współpracujący z kotwiami lub powłoką konstrukcyjną. Schematem konstrukcyjnym ustroju zespolonego jest masywny ustrój nośny o dowolnej geometrii. W sztywnych konstrukcjach nie uwzględnia się odporu, a ich obciążeniem jest ciśnienie pionowe, boczne i spągowe. Zależnie od tych obciążeń dobiera się parametry obudowy: układ, długość i naciąg kotwi, liczba i grubość nakładanych warstw torkretu lub narzutu betonowego, zasięg płaszcza iniekcyjnego itp.

Projektując konstrukcje tunelu, oprócz obliczeń wytrzymałościowych poszczególnych elementów konstrukcyjnych, należy rozważyć także problem stateczności ogólnej. I tak na przykład, badając stateczność tunelu w kształcie pierścienia zamkniętego ocenia się wartość obwodowej siły krytycznej albo zewnętrznego ciśnienia krytycznego.

Dla warunków wyidealizowanych, przy równomiernym ściskaniu tunelu kołowego, krytyczne ciśnienie wyznacza się ze wzoru:

$$q_{kr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{g}{R} \right)^3 \text{ w którym:}$$

E – współczynnik sprężystości materiału pierścienia,

ν - współczynnik Poissona materiału pierścienia,

g - grubość ściany pierścienia,

R - promień pierścienia.

Jeśli model w układzie płaskim jest niewystarczający, tak jak w przypadku komór czy obiektów podziemnych o bardziej skomplikowanych kształtach, przy bezpośrednich badaniach na przodku tunelu, może być konieczne zastosowanie modelu trójwymiarowego. Trójwymiarowy model można sobie wyobrazić jako obiekt składający się z nieciągłej obudowy (teoria bloków) lub jako ośrodek ciągły z dyskretnym podziałem.

