

Ryzyko w budownictwie tunelowym, cz. 2



tekst: **prof. dr hab. inż. ANTONI TAJDUŚ**, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

W ostatnich latach nastąpił ogromny wzrost liczby budowanych tuneli. Buduje się w różnych warunkach geologicznych, zarówno bardzo korzystnych, jak i wyjątkowo niekorzystnych, co powoduje liczne zagrożenia. Mogą one prowadzić do katastrof lub poważnych awarii. W części pierwszej artykułu („NBI” 2022, nr 1, s. 64–66) omówiono kategorie katastrof w tunelach, biorąc pod uwagę metody drążenia i skutki katastrof. Natomiast w tej części artykułu, posługując się przykładami, zostały przedstawione główne przyczyny tych katastrof.

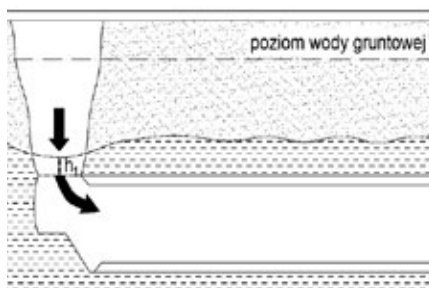
Główne przyczyny katastrof w tunelach są wynikiem [1]:

- występowania niekorzystnych warunków geologicznych, jak napotkanie stref uskokowych, często nierozpoznanych (o niskiej wytrzymałości, luźnych, zawodnionych), masywu skalnego o niskim RMR, warstw silnie odkształcalnych, pęczniących itp. – 27%;
- wpływu wody – 16%;
- niewielkiego nadkładu – 6%;
- nagłej zmiany warunków gruntowych (z dobrych na złe) – 6%;
- zniszczenia obudowy wstępnej przez późne założenie obudowy ostatecznej lub całkowitego braku obudowy – 9%;
- nierozpoznanie przeszkód na trasie tunelu, np. starych studni, konstrukcji, żerdzi wiertniczych – 3%;
- różnych innych przyczyn, jak przerwy w drążeniu, np. święta, strajki, złe wykonanie obudowy, nieodpowiednia jakość spoinowania – 13%;
- nieznanymi przyczynami – 20%.

Występowanie niekorzystnych warunków geologicznych

Najczęstszą przyczyną katastrof są nieprzewidziane warunki geologiczne, co nie znaczy, że one były nieprzewidywalne. Można było je przewidzieć, ale wykonano niedostateczne rozpoznanie.

Złe rozpoznanie warunków geologicznych powoduje brak uwzględnienia zmiany własności masywu skalnego na skutek wietrzenia. Naturalne procesy wietrzenia powodują kilkunastokrotny spadek R_c (R_c do zera). We fliszu karpackim do głębokości 10÷15 m od powierzchni masyw skalny jest całkowicie lub silnie zwietrzały (W_5 , W_4), a poniżej,



sięgając do głębokości 25÷35 m, średnio zwietrzały (W_3).

Lokalnie wietrzenie może sięgać głębiej, bo erozja w połączeniu z wodą często usuwa zwietrzały materiał skalny. Rejony z silnie zwietrzalymi skałami zwykle zawierają wodę, często pod znacznym ciśnieniem. Może to spowodować nagłe wpynięcie wody ze skałą przy drążeniu tunelu.

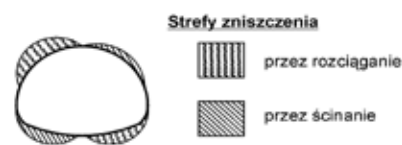
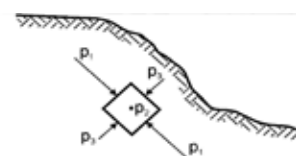
Do zawałów stropu mogą prowadzić trzy sytuacje podczas drążenia tunelu, które zasadniczo występują na małych głębokościach:

- jest wykonywany w silnie zwietrzalych, w miarę jednorodnych skałach, o niskich parametrach wytrzymałościowych (na powietrzu tworzy się zapadlisko w formie komina);
- zwietrzałe skały są zawodnione, a mniejsza warstwa ma zbyt małą grubość, aby wytrzymać obciążenie pochodzące od skał nadległych;
- uwarstwiony masyw skalny jest w różnym stopniu zwietrzały, ale generalnie nadkład ma niskie parametry wytrzymałościowe (w tym przypadku na powierzchni tworzy się zapadlisko o znacznej powierzchni).

Wysokie naprężenia w otoczeniu tunelu

Na stan naprężenia wokół tunelu mają wpływ wartości naprężeń pierwotnych oraz

głębokość. Na małych głębokościach pierwotne naprężenia poziome mogą być większe od pionowych, co ma zasadniczy wpływ na wartość naprężeń wtórnych, zależnych także od kształtu i wymiarów tunelu. Ponadto w pobliżu nachylonej powierzchni terenu kierunki pierwotnych naprężeń głównych przebiegają równoległe do nachylonej powierzchni (większa wartość pierwotnego naprężenia) i prostopadle do nachylonej powierzchni (mniejsza wartość pierwotnego naprężenia). Aby prawidłowo określić pierwotne naprężenia, trzeba je po prostu zmierzyć, czego się zwykle nie robi.



Brak lokalizacji uskoków, stref uskokowych

Strefy uskokowe mają różne szerokości, od metra aż do kilkunastu metrów. Rozpoznanie prowadzone co ok. 100 m, a nawet więcej często nie pozwala zlokalizować wszystkich uskoków lub stref uskokowych. W strefie uskokowej występują spękane skały tworzące nieregularne bloki, brekcja, mąka skalna. Ściany skał są nierzadko pokryte minerałami, tj. grafitem i chlorynem o niskim współczynniku tarcia. Mogą występować uskoki towarzyszące. Strefy uskokowe mają niską wytrzymałość na ścinanie, co może spowodować poślizg

spękanych bloków skalnych i warstw. Przekraczanie stref uskokowych zarówno podczas drążenia za pomocą NAMT, jak i TBM jest zwykle trudne i wymaga odpowiednio wzmocnionej obudowy. W celu lokalizacji stref uskokowych zalecane jest wykonywanie otworów rdzeniowych o długości 15–20 m z czoła przodka. W tunelach drążonych TBM podczas przekraczania stref uskokowych istotnie maleje postęp drążenia (powstają opóźnienia w stosunku do harmonogramu). Najgorsza sytuacja jest wtedy, gdy w czole przodka tunelu przemieszczają się bloki skalne, które dociskają głowicę i mogą ją zablokować. Jeżeli dodatkowo pojawi się woda, a TBM ma otwarty dostęp do czoła przodka, to sytuacja w tunelu może być dramatyczna.

Brak uwzględnienia spękań i sfałdowań

Spękania mają duży wpływ na stateczność tunelu. Dzieli się je na regularne, zwykle tworzące sieci spękań, lub nieregularne, np. spękania strefy przypowierzchniowej. W masywie skalnym może występować kilka sieci spękań, tworzących układ spękań. Flisz karpacki jest silnie spękany i ma pięć rodzajów spękań: spękania uwarstwienia, ciosowe, spękania złupkowacenia, spękania strefy przypowierzchniowej i uskoki.



Przykład nieciągłości występujących w czole przodka tunelu drążonego we fliszu karpackim Małego Lubonia (Naprawa)

Duża liczba spękań występuje w sąsiedztwie osi mocno sfałdowanych skał w pobliżu uskoków. Występują także spękania niezwiązane z uskokami, powstałe z innych przyczyn. Podczas drążenia tunelu wewnątrz masywu zwykle napotyka się regularne sieci spękań, natomiast w otoczeniu portali, gdzie jest silny wpływ wietrzenia, spękania skały są nieregularne. Spękania należy uwzględnić przy projektowaniu tunelu, ponieważ znacznie obniżają wytrzymałość masywu skalnego.

Płynięcie gruntu

Gdy grunt ma zdolność do swobodnego płynięcia, np. z luźnym piaskiem, mogą

pojawić się trudności z obudową. Płynięcie gruntu ma miejsce w warunkach nasycenia wodą, której obecność wzmocnia procesy upłynięcia, zwłaszcza gdy prowadzone jest drążenie tunelu. Przy zawartości wody poniżej całkowitego nasycenia pojawia się tymczasowa, pozorna spójność. Jednakże nawet mała ilość wody wypływająca z przodka tunelu może rozpocząć proces płynięcia gruntu i doprowadzić do pełnej destrukcji. Płynięcie gruntu może nastąpić po zawale stropu, gdy utworzy się pustka dochodząca do warstwy wodonośnej lub nieskonsolidowanej i nasyconej wodą warstwy złoża. Im czystszy piasek, tym większe ryzyko, że wypłynie z nieobudowanego stropu lub czoła przodka tunelu. Duży problem stanowią piaski drobnoziarniste podobnej wielkości oraz piaski zawierające mniej niż 7% spoiwa ilasto-gliniastego. Zwykle w wyniku płynięcia gruntu (piasku) jest duże osiadanie i tworzą się zapadliska na powierzchni terenu.

Wody podziemne

Duża ilość wód podziemnych jest głównym zagrożeniem przy drążeniu tuneli. Wypływ znacznych ilości wody ze słabego masywu skalnego zwykle powoduje powstawanie pustek wokół tunelu, co z kolei zwiększa niebezpieczeństwo płynięcia mokrego i luźnego gruntu do tunelu. Aby przewidzieć ewentualne problemy z napływem wód podziemnych podczas drążenia, należy wykonać kompleksowe badania terenu głębokimi otworami wiertniczymi. Warstwy wodonośne w pobliżu drążonego tunelu trzeba zidentyfikować, wprowadzić odpowiednie przepisy kontrolne i zabezpieczenia przed napływem wody. Na etapie planowania inwestycji i podczas projektowania musi być zrobiona prognoza występowania wód podziemnych. Ponieważ dokładna prognoza prawdopodobnej ilości napływu wody jest trudna, należy wprowadzić odpowiedni monitoring oraz zaprojektować zabezpieczenia (odwodnienie lub iniekcje masywu).

Wody podziemne wpływają również na właściwości mechaniczne masywu skalnego. Woda pod ciśnieniem w spękania tworzących bloki skalne zmniejsza normalne naprężenie efektywne między powierzchniami skał, a zatem zmniejsza tarcie oraz wytrzymałość na ścinanie. W skałach porowatych, takich jak piaskowce, występuje prawo efektywnego naprężenia, podobnie jak w ziarnistych gruntach. W obu przypadkach skutkiem istnienia wody w szczelinach lub porach

jest zmniejszenie ciśnienia i ostatecznej wytrzymałości masywu w porównaniu ze stanem bez wody. Grunty ilaste lub ilaste margle, ility i tym podobne skały pod wpływem wody ulegają rozmiękczeniu. Skały zawierające anhydryt mają tendencję do pęcznienia. Inne, tj. gips, sól, są rozpuszczane. Na wszystkie te niebezpieczeństwa obudowa tuneli musi być odpowiednio zaprojektowana, a przede wszystkim musi być wodoszczelna.

Soczewki wody z piaskiem

Badania terenowe przed rozpoczęciem drążenia zwykle nie wykrywają soczewek wody z piaskiem lub żwirem. Skutkiem ich istnienia są zawaly stropu, proces wymywania lub erozji struktury gruntu, wpływ piasku w otoczeniu czoła przodka. Dlatego podczas drążenia trzeba prowadzić wyprzedzające sondowanie i badania czoła przodka tunelu. Przykładowo, przy poszerzaniu metra w Tuluzie EPB TBM wypłynął piasek z soczewek. Nadkład składał się z suchego mułu ilastego z wbudowanymi soczewkami piasku pod ciśnieniem wody. Podczas drążenia nie było problemu w warstwie mułu ilastego przy zwiększonym ciśnieniu w komorze roboczej, ale gdy natrafiono na soczewki z piasku, doszło do zawalu czoła przodka i zaczęła sączyć się woda. Nastąpił spadek prędkości drążenia, konieczność czyszczenia TBM, trudności z transportem i zwiększone osiadania powierzchni. Dzięki zastosowaniu pianki polimerowej, tzw. antygliny, udało się ten rejon wydrążyć.

Nachylenie terenu nad tunelem, istnienie osuwisk

Podczas drążenia tuneli na małej głębokości należy brać pod uwagę powstanie niestateczności ze względu na nachylenie powierzchni terenu oraz właściwości gruntu leżącego nad drążonym tunelem. Na powierzchni w rejonie drążonego tunelu mogą występować nieaktywne osuwiska, które podczas drążenia tunelu na skutek zmian stanu naprężenia i odkształcenia oraz zmian w przepływie wód gruntowych mogą się uaktywnić. Z taką sytuacją mieliśmy do czynienia w Świnnej Porębie, przy południowym wlocie do tuneli w Naprawie, a ostatnio w tunelach drążonych w Węgierskiej Górze. Znaczne nachylenie zbocza w rejonie portali może doprowadzić do wystąpienia niekorzystnych zjawisk, jakimi są ześlizgnięcie się gruntu, lawiny

śnieżne, przepływy błota i spadanie kamieni. To może być również przyczyną zawalenia się tunelu w pobliżu portali, które zostaną uszkodzone lub zniszczone w wyniku tych procesów.

Wpływ przeszkód na trasie drążonego tunelu

Na trasie drążonego tunelu może się znajdować szereg nierozpoznanych przeszkód, tj. dawne wyrobiska górnicze (chodniki, komory, szybiki, szyby), stare studnie, różne konstrukcje podziemne, rurociągi, żerdzie wiertnicze itp. Mają one wpływ na postęp drążenia, możliwość uszkodzenia maszyn do drążenia, ale także na wzrost deformacji powierzchni i czasami powstanie deformacji nieciągłych.

Z taką sytuacją miano do czynienia podczas budowy w ateńskim metrze stacji Omonia (dł. 110 m, szer. 16,5 m, wys. 13,5 m, $H = 15$ m). Za pomocą dwóch bliźniaczych tuneli z filarem centralnym likwidowanym na końcu wykonywano pomiar osiadania tunelu. Zmierzone duże osiadanie (50–60 mm) we wschodniej części stacji. Osiadania te były wynikiem aktywacji niewykrytych starożytnych studni sięgających do spągu tunelu. W celu ograniczenia ich wpływu wykonywano iniekcje z czoła tunelu oraz z powierzchni. W kilku przypadkach studnie te spowodowały deformacje nieciągłe na powierzchni terenu i zniszczenia w budynkach.

Różne inne przyczyny

Wśród innych przyczyn powstania katastrof tuneli najczęstsze są błędy popełnione na etapie planowania i projektowania tuneli. Błędy te można pogrupować następująco:

- Źle przeprowadzone rozpoznanie. Na badania przeznaczono zbyt małe środki finansowe i (lub) badania zostały wykonane przez osoby o niedużym doświadczeniu. Na zbieranie danych geologicznych i badanie terenu dla projektu drążenia tunelu musi być wystarczająco długi czas.
- Nieprawidłowa ocena parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu skalnego (głównie bardzo słabego) za pomocą klasyfikacji RMR i GSI.
- W projekcie tunelu błędnie dobrano metodę drążenia, typy obudowy wstępnej odpowiadające jakości masywu skalnego, prędkość drążenia, moment założenia obudowy ostatecznej. Wyraźnie było widać, że projektant nie ma większego doświadczenia w projekto-

waniu drążenia tuneli. Jeżeli projektant zorientował się, że rozpoznanie warunków geologicznych i geotechnicznych jest niedostateczne, powinien zlecić wykonanie dodatkowego rozpoznania.

- Zaprojektowano obudowy (wstępną i ostateczną) na inne obciążenia, niż występują na trasie drążonego tunelu lub przyjęto uproszczone schematy obciążeń. Gdy w rejonie drążenia tuneli występują bardzo trudne warunki geotechniczne, projekt obudowy należy wykonać na podstawie obliczeń numerycznych (trójwymiarowych) dla każdej fazy drążenia tunelu.
- Tunele były posadowione zbyt blisko powierzchni terenu (mały nadkład). Na powierzchni uaktywniały się osuwiska, właściwości masywu skalnego (gruntowego) były bardzo niskie. Należało zwiększyć głębokość posadowienia tuneli (co czasami wiąże się ze wzrostem długości tunelu). Z reguły na większej głębokości parametry odkształceniowe i wytrzymałościowe są wyższe, a to pozwala projektować obudowy wstępną i ostateczną o mniejszej wytrzymałości.
- Błędnie dobrano wartości odkształceń (przemieszczeń) granicznych (dopuszczalnych, ostrzegawczych, krytycznych).
- W trakcie drążenia tuneli (tuneli) nie należy wykonywać w sąsiedztwie innych budowli podziemnych.
- Wiele błędów jest wynikiem braku właściwych kwalifikacji personelu i odpowiedzialności oraz predyspozycji do wykonywania zawodu geoinżyniera.

Przerwy w pracach lub nierytmiczne drążenie

Z obserwacji i analizy katastrof wynika, że wielokrotnie występowały one wkrótce po wznowieniu prac po przestoju, np. wakacyjnym, świątecznym, czy po awarii maszyn lub urządzeń. Dotyczy to szczególnie zawałów stropu. Mogą być dwie przyczyny wystąpienia tych zawałów. Pierwsza związana jest z obudową wykonaną z betonu natryskowego. Po przerwie mamy starszą, utwardzoną obudowę z betonu natryskowego i świeżą, nowo nałożoną. Między nimi występują znaczne różnice w sztywności. Ze względu na wyższą sztywność starszej obudowy obciążenia koncentrują się na jej powierzchni, a znacznie mniejsze na nowo założonej. Przy większym otwarciu starsza obudowa nie wytrzyma. Drugą przyczyną wynika z faktu, że wznowienie pracy powoduje gwałtowne zmiany w stanie naprężenia i odkształcenia.

Przykłady katastrof

Hangzhou (Chiny)

15 października 2008 r. w mieście Hangzhou w Chinach nastąpiło zawalenie się drążonego tunelu, co spowodowało powstanie na powierzchni dużego zapadliska. Miesiąc (niektóre źródła podają trzy miesiące) przed katastrofą zauważono na powierzchni spękania powstające bezpośrednio nad sekcją, która później uległa zawaleniu. Nie wyciągnięto z tego wniosków. W wyniku tej katastrofy ośmiu robotników straciło życie, a 13 uznano za zaginionych.

Kolonia (Niemcy)

3 marca 2009 r. w Kolonii zawalił się drążony tunel, a na powierzchni powstało duże zapadlisko. W wyniku tej katastrofy zginęły dwie osoby, zawalił się budynek archiwum miasta z okresu średniowiecza i utracono historyczne dokumenty (najstarsze z 922 r.). Z raportów wynika, że w 2007 i 2008 r. pojawiły się spękania ścian i spągu piwnic w budynku archiwum, które uznano za mało istotne i nie objęto ich monitoringiem. Katastrofa nastąpiła w rejonie skrzyżowania tuneli, w odległości ok. 500 m od rzeki Ren. Badania geologiczne wykazały, że w tym rejonie poziom wód gruntowych jest wysoki (8–10 m p.p.t.) i zależy od poziomu wody w rzece. Obserwowano, że po odwilżach w piwnicach domów pojawia się woda, mimo istnienia ścian szczelinowych.

Zawalenie się tunelu pomiędzy Tokio a Nagoją

W tunelu leżącym na trasie łączącej Tokio z Nagoją zawalił się fragment betonowego stropu (obudowy ostatecznej) na odcinku 60 m. W trakcie zdarzenia w tunelu znajdowało się wiele samochodów. W katastrofie zginęło co najmniej 10 osób. Drogi wjazdowe do tunelu w obu kierunkach zostały zamknięte. Tunel Sasago liczy 4,7 km długości i jest położony ok. 80 km na zachód od stolicy Japonii.

Literatura

- [1] Seidenfuss T.: Collapses in Tunnelling. Master Thesis. Lousanne 2006 (online). Dostępny w Internecie: <https://www.scribd.com/document/369445627/Collapses-in-tunnelling-pdf> (dostęp 11 stycznia 2022).



Czytaj więcej



foto. Joanna Dubielewska



AGH

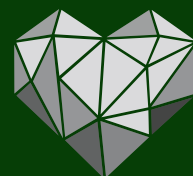
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE

WIEDZA

PASJA

WIĘŻ

#studiujwAGH



Skonstruowany przez zespół AGH Space Systems łazik marsjański.
Międzynarodowe zawody University Rover Challenge na pustyni w Utah (USA) w 2019 r.

www.agh.edu.pl