

Ryzyko w budownictwie tunelowym, cz. 1



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 górniczo-geologicznych, zarówno bardzo korzystnych, jak i wyjątkowo niekorzystnych, co powoduje liczne zagrożenia. Mogą one prowadzić do katastrof lub poważnych awarii. W części pierwszej artykułu omówiono kategorie katastrof w tunelach, biorąc pod uwagę metody ich drążenia oraz skutki zaistniałych katastrof.



lub duże awarie podczas drążenia tuneli są częstsze i ich konsekwencje są większe niż w innych gałęziach budownictwa cywilnego. W przypadku większości projektów budowlanych wykonywanych na powierzchni mamy wiedzę na temat materiału budowlanego i jego właściwości. Tunel jest budowany w masywie skalnym, który jest jego zasadniczą obudową. Ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną masywu skalnego (gruntowego), często ograniczony stopień rozpoznania (ze względu na brak czasu, środków finansowych) oraz subiektywną ocenę wyników badań prognozowane warunki geologiczne są mało wiarygodne.

Ogólnie można stwierdzić, że katastrofy lub duże awarie występujące w tunelach są wynikiem niewystarczającego rozpoznania, braku odpowiedniej wiedzy i niezbędного doświadczenia. Zwykle katastrofa w tunelu oznacza nagły, niekontrolowany zawal odcinka tunelu, części lub jego całego przekroju. Katastrofy występują zarówno przy drążeniu technikami górniczymi (np. nowa metoda austriacka budowy tuneli – NATM, norweska metoda tunelowania – NTM), jak i zmechanizowanymi – TBM, np. głowica urabiająca trafia na bardzo słabe strefy miękkiego gruntu i grzęźnie w urobku lub też tarcza cofa się, aby usunąć problemy występujące w czole przodka, a do powstałej pustki (wnęki) wpada grunt lub bloki skalne, co powoduje kolejne kłopoty. Czasami nie doszło do katastrofy w tunelu (zniszczenie obudowy), a zdarzył się wypadek i zginęli ludzie lub zostali ranni, np. na skutek wybuchów gazu w tunelach.

Budowa tunelu jest bardzo złożonym procesem. Projektant, a także osoby odpo-

Należy dołożyć wszelkich starań, aby uniknąć lub zminimalizować konsekwencje katastrof w tunelach. Jedynym skutecznym sposobem jest identyfikacja zagrożeń, ocena ryzyka ich wystąpienia, kontrola, a także wyciąganie wniosków z poprzednich negatywnych zdarzeń.

Budowa tunelu jest jednym z najbardziej ryzykownych działań. Często zdarza się, że wypadek osiąga katastrofalne rozmiary, a roszczenia w stosunku do ubezpieczyciela są ogromne [1]. Ostatnio następuje wzrost katastrof i znacznych awarii w tunelach, co może być wynikiem wielu czynników, takich jak:

- budowę tuneli prowadzi się w coraz bardziej skomplikowanych i wymagających warunkach górniczo-geologicznych;
- wykonawcy mają małe doświadczenie w tunelowaniu i często niewielką wiedzę (skończenie studiów na kierunku budow-

nictwo automatycznie nie upoważnia do projektowania lub drążenia tuneli, trzeba mieć jeszcze odpowiednią wiedzę z zakresu budownictwa podziemnego);

- zagrożenia nie są właściwie zidentyfikowane i kontrolowane;
- wykonawca jest nadmiernie pewny siebie;
- z różnych powodów chętniej zgłaszane są awarie i katastrofy;
- przy drążeniu tuneli oprócz kosztów ważny jest czas wykonania.

Wypadki w drążonych tunelach są wyjątkowo niebezpieczne. Zniszczenie obudowy, zwykle wstępnej, zawal skał stropowych lub ociosu w rejonie czoła przodka, nadmierne deformacje obudowy, wdarcie się wody (kurzawki) z czoła przodka itp. to niekontrolowane zdarzenia, które mogą prowadzić do poważnych konsekwencji. Z doświadczenia wynika, że katastrofy

wiedzialne za drążenie, oprócz klasycznej wiedzy z budownictwa powinny posiadać dodatkowo szeroką wiedzę z geologii, geotechniki, geomechaniki, materiałoznawstwa, organizacji prac, ekonomii. Zdarza się, że wiedza tych osób jest wycinkowa i niewystarczająca, aby zapewnić prawidłowe wykonanie tunelu, zagwarantować bezpieczeństwo pracowników podczas drążenia, a po oddaniu tunelu do użytku jego wieloletnią stateczność. Rozważając ryzyko związane z budową tuneli, należy zwrócić uwagę na dwa fakty. Po pierwsze, katastrof lub awarii można unikać, a jeżeli się zdarzą, należy rozpoznać ich przyczyny, wyciągnąć odpowiednie wnioski, poprawić wytyczne, przepisy dla ograniczenia tych zdarzeń w przyszłości. Po drugie, katastrofy (awarie) są niezwykle kosztowne, dlatego zapobieganie tym zdarzeniom ma ogromny sens ekonomiczny. Poza kosztami związanymi z wypadkami i kosztami napraw wysokie są też koszty ubezpieczenia.

Kategorie katastrof

W pracy [2] przeanalizowano ponad 110 katastrof w tunelach, które zdarzyły się w ciągu 60 lat, z czego 50 z tych katastrof w ostatnich 20 latach. Analizę przeprowadzono, biorąc pod uwagę metody drążenia, skutki katastrof i przyczyny katastrof.

Wpływ metod drążenia na wystąpienie katastrof lub awarii

Drążenie tuneli wykonuje się metodami konwencjonalnymi z zastosowaniem techniki górniczej – NATM, NMT, albo wykorzystując kombajny drążące pełnym przekrojem – TBM. Oczywiście między tymi metodami drążenia istnieje wiele metod mieszanych. Pojawia się pytanie, które z tych metod są bardziej ryzykowne. Wiemy, że dla danych warunków geologicznych można dobrać optymalną, najmniej ryzykowną metodę drążenia, ale nie zawsze potrafimy tego dokonać. Odpowiedź na pytanie, która metoda jest lepsza, trudno jest uzyskać po analizie zaistniałych katastrof, bowiem w danych warunkach prowadzi się drążenie wybraną wcześniej metodą. Bardzo rzadko dokonuje się zmiany metody drążenia z konwencjonalnej na zmechanizowaną lub na odwrót. W [2] podano, że ponad 50% katastrof lub dużych awarii wystąpiło podczas drążenia metodami konwencjonalnymi (NATM, NMT), blisko 30% metodami TBM, a w ok. 20% przypadków nie udało się ustalić metody drążenia tuneli. Z powyższego wynikałoby, że

drążenie metodami konwencjonalnymi jest bardziej ryzykowne. Należy jednak wziąć pod uwagę, że drążenie tymi metodami często jest prowadzone dla tuneli o znacznych szerokościach, z reguły większych niż dla TBM, co powoduje dodatkowe ryzyko, np. tuneli w Lubniu o szerokości od 17,3 do 18,3 m drążonych we fliszu karpackim nie dałoby się wykonać metodą TBM.

Analiza skutków katastrof

Katastrofy mogą spowodować następujące skutki:

Utworzenie się zapadlisk lub kraterów na powierzchni terenu – skutki w ok. 40% katastrof

Ten rodzaj katastrofy może powstać w wyniku dwóch różnych procesów: wymycia przez wody podziemne gruntu (zjawisko sufozji) i na skutek prowadzenia drążenia na małej głębokości w słabych skałach lub gruntach. Deformacje nieciągłe na powierzchni terenu pojawiają się dość szybko od wystąpienia niekorzystnego zjawiska. Zglądając w powstały krater, nie zawsze musimy widzieć kontury obudowy tunelu.

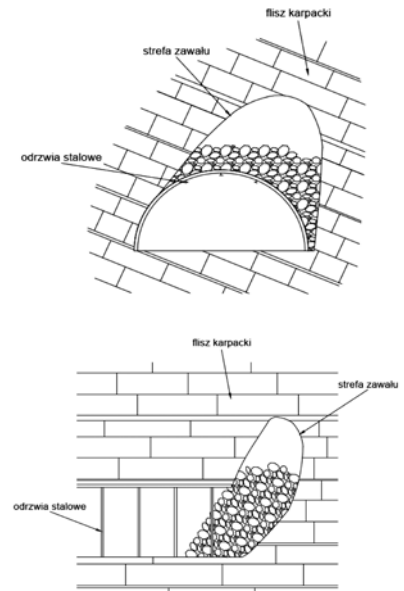


Przykład utworzenia się krateru

Zniszczenie obudowy, głównie wstępnej, zawał skał stropowych, zawał skał w rejonie czoła przodka tunelu, zniszczenie ociosów lub obwał skał – skutki w blisko 40% katastrof

Zawał stropu tunelu polega na tym, że w stropie tworzy się strefa zawału. Następuje opad spękanych skał. We fliszu karpackim może wystąpić zjawisko tzw. kominowania stropu, co oznacza, że opadają leżące coraz wyżej bloki skalne i tworzy się pionowa pustka o osi prostopadłej do uwarstwienia. Przykładem może być zawał skał stropowych podczas drążenia sztolni w Świnnej Porębie. Pokazany na rysunku zawał skał stropowych nastąpił w strefie uskokowej (RMR = 14, GSI = 10) i nie był sygnalizowany wcześniej przez pomiary przemieszczeń. Kilka metrów przed miejscem zawału przemieszczenia stropu wy-

nosiły 8,8 mm, natomiast za tym miejscem 12,8 mm. Po wykonaniu 0,5 m zabioru nastąpił zawał stropu. Powstała niesymetryczna wyrwa o osi prostopadłej do nachylenia warstw na wysokość ok. 6,5 m.



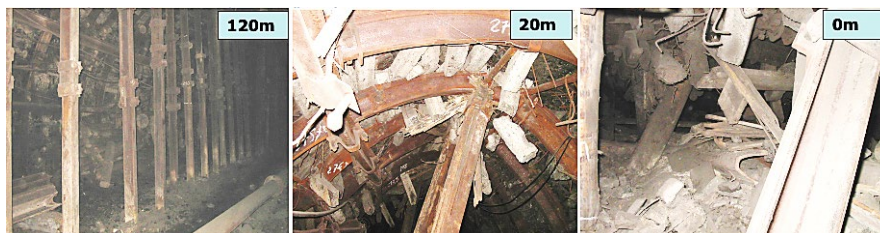
Zawał skał stropowych w strefie uskokowej

Zawał skał ociosowych tunelu – mogą wystąpić pęknięcia ścian ociosu i obwał skał ociosowych. W ten sposób zwiększa się szerokość tunelu, co z kolei może prowadzić do wystąpienia zawału stropu.

Zawał w czole przodka tunelu to zjawisko, które może zajść podczas drążenia tunelu zarówno metodami konwencjonalnymi, jak i TBM. W przypadku obwał skał lub gruntu w czole przodka urabianego TBM praktycznie nie można wykonać zdjęcia dokumentującego to zjawisko, ponieważ występuje ono przed głowicą urabiającą w czasie jej pracy, a także podczas zatrzymania się maszyny. Czasem to zjawisko ujawnia się na powierzchni terenu kilka metrów przed maszyną.

Wdarcie się wody, kurzawki, zalanie tuneli – skutki w 13% katastrof

Wdarcie się wody, kurzawki powoduje różne utrudnienia w tunelach. Dopływające wody do tunelu istotnie wpływają na jego drążenie i stateczność. W przypadku napływu wody pod ciśnieniem w rejonie czoła przodka następuje wymywanie cząstek skały (sufozja), niszczenie skały przez ścinanie powodujące uszkodzenie ociosu lub czoła przodka, a także wyboczenie cienkich warstw. Ważna jest ilość dopływającej wody, liczba i rodzaj spęknięć, w tym ich wypełnienie i czy pod wpływem wody wypełnienie to jest wymywane. Wpływająca woda często jest czynnikiem



Skutki tąpnięcia w chodniku, zmieniające się wraz z odległością od miejsca tąpnięcia

powodującym zawał skał stropowych i tworzenie się kominów w stropie, czyli zapoczątkowuje inną kategorię katastrofy, jaką jest zawał skał w otoczeniu tunelu. Czasami wypływająca woda może doprowadzić do sytuacji krytycznej, np. gdy tunel jest drążony po upadku lub jego drążenie zaczyna się od szybu. Ta awaria może wystąpić przy drążeniu TBM, np. jako opóźniający efekt drążenia tarczą.

Liczne przykłady wdarcia się wody podczas drążenia tuneli znajdziemy w różnych rejonach Chin, gdzie budownictwo inżynierskie, w tym tunelowe, rozwija się bardzo intensywnie. Oto niektóre przykłady nagłego wypływu wody przy budowie tuneli [3]:

- tunel Yuan Liang Shan – wypływ wody 71 razy, zginęło dziewięć osób, max. ciśnienie wody 4,6 MPa, max. wypływ wody 72 tys. m³/h;
- tunel Wu Long – 10-krotny wypływ wody, max. wypływ wody 300 tys. m³/h;
- tunel Bai Yun – max. wypływ kurzawki 2,5 tys. m³, zginęło dziewięć osób;
- tunel Ma Lu Jing – wypływ wody 19 razy, zginęło 15 osób;
- tunel Ye San Guan, – max. wypływ wody 100 tys. m³/h, max. wypływ kurzawki 53 tys. m³;
- tunel Da Zhi Ping – wypływ wody 14 razy, max. wypływ wody 15 tys. m³/h, szlamu 14 tys. m³;
- tunel Yun Wu Shan – wypływ wody 2 tys. m³/h;
- tunel Tong Yu – 10 razy wypływ wody, zginęło pięć osób;
- tunel Long Tan – dwukrotny wypływ wody, kurzawka ponad 9 tys. m³.

Tąpnięcia – skutki w 2% katastrof

Tąpnięcie to zjawisko nagłe, dynamiczne, w wyniku którego część tunelu ulega zawaleniu. Zjawisku temu towarzyszą drgania skały, efekty akustyczne, podmuch powietrza. Aby nastąpiło tąpnięcie w danym rejonie, muszą być spełnione trzy warunki: skumulowanie dużej ilości energii w tym rejonie (znacznie większej niż potrzebna do zniszczenia skały), jej zniszczenie, gwałtowne wyładowanie nadmiaru energii. Dwa czynniki decydują

o wystąpieniu tąpnięcia: własności skał oraz stan naprężenia. Tąpnięcia zdarzają się, gdy w masywie skalnym o właściwościach kruchych występują wysokie naprężenia. Na zdjęciach pokazano skutki tąpnięcia w chodniku, zmieniające się wraz z odległością od miejsca tąpnięcia.

Tąpnięcia w wyrobiskach górniczych są dobrze znane. Poznano mechanizm i opracowano metody zapobiegania ich wystąpieniu, ale ciągle zdarzają się nagłe tąpnięcia, w których giną ludzie i są duże szkody materialne. Wydawało się, że tąpnięcia nie powinny występować w otoczeniu tuneli, które z reguły drążone są na mniejszych głębokościach. Tymczasem okazuje się, że tąpnięcia zdarzają się w tunelach na głębokościach znacznie mniejszych niż w kopalniach. Podczas drążenia tuneli tąpnięcia odnotowywano już na głębokości 300 m [4]. W kopalniach tąpnięcia najczęściej występują na głębokościach poniżej 600 m. Na zwiększony stan naprężenia w otoczeniu tuneli w porównaniu z wyrobiskami górniczymi wpływ ma znacznie większy przekrój poprzeczny (ok. od 5 do 7 razy) oraz tektonika (fałdy, uskoki).

Zawalenie się portalu – skutki w 5% katastrof

Zawalenie się portalu może prowadzić do wyjątkowo tragicznych skutków. Z tego względu ten element tunelu wymaga szczególnej uwagi przy projektowaniu i wykonawstwie i musi mieć wzmocnioną konstrukcję. Przy projektowaniu portalu należy wziąć pod uwagę:

- morfologię terenu,
- warunki geologiczne występujące w otoczeniu portalu i nadkładzie,
- własności masywu skalnego lub gruntowego,
- stateczność zboczy w rejonie portalu (możliwość osuwiska),
- wody powierzchniowe (strumyki, rzeki, kanały odwadniające) i podziemne w rejonie portalu,
- istniejącą zabudowę powierzchni terenu w otoczeniu portalu,
- kierunek drążenia tunelu (np. w stosunku do nachylenia warstw),

- inne ograniczenia występujące w otoczeniu portalu,
- aspekty bezpieczeństwa (lawiny, spadanie bloków skalnych i kamieni).

Niezwykle ważne jest, aby portal był umiejscowiony w nietkniętej skale z małą grubością słabego gruntu, niezwiertzałej lub mało zwiertzałej. Minimalna grubość nakładu nad wylotem do tunelu powinna wynosić od 1 do 2 wysokości tunelu. Przy projektowaniu portalu należy przyjąć wyższy współczynnik bezpieczeństwa (np. 4) niż dla budowy tunelu (2,5).



Wyprofilowane skarpy przed rozpoczęciem drążenia tuneli w Naprawie oraz wykonywanie portalu południowego

Literatura

- [1] Gallaher R.: *New Tunnel Code in Practice*. Allianz Global Corporate & Specialty, Munich 2005.
- [2] 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).
- [3] Shi X.F., Wang B.F., Li M., Zhang L.H.: *Numerical analysis of interactive tunnel construction with small interval*. In: *Transit Development in Rock Mechanics. Recognition, Thinking and Innovation*. Ed. by M. Cai, Y. Gengshe, J. Wang. CRC Press, 2014.
- [4] Haramy K.Y.: *Underground structures in rockburst zones*. In: *Underground Structures, Design and Instrumentation*. Ed. by R.S. Sinha. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam 1989.





AGH

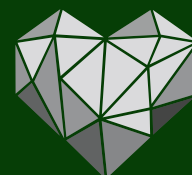
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA
W KRAKOWIE

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