



MAREK CAŁA

cala@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9371-455X



MATEUSZ BLAJER

blajer@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7748-470X



AGNIESZKA STOPKOWICZ

agnieszka.stopkowicz@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0001-6344-394X



ANTONI TAJDUŚ

tajdus@agh.edu.pl
ORCID: 0000-0002-9159-0549

AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza

Metody obliczeniowe stosowane podczas projektowania obudowy tuneli

Drażenie tunelu zaburza pierwotny stan naprężenia i odkształcenia ośrodka, a wytworzenie nowego stanu równowagi generuje szereg procesów przejawiających się w postaci oddziaływań ośrodka na obudowę. Zrozumienie tych procesów oraz określenie możliwych oddziaływań jest kluczowym zagadnieniem podczas doboru metod obliczeniowych. Każda z opisanych metod bazuje na różnych założeniach upraszczających i w różnym stopniu idealizuje ośrodek oraz zjawiska w nim zachodzące. Dobór metod nieadekwatnych do danych sytuacji obliczeniowych może wiązać się z niedoszacowaniem lub przeszacowaniem obciążeń działających na obudowę. Dlatego równie ważna jest znajomość założeń i ograniczeń stosowanych metod obliczeniowych.

Projektowanie obudowy tuneli różni się od projektowania konstrukcji innych obiektów bu-

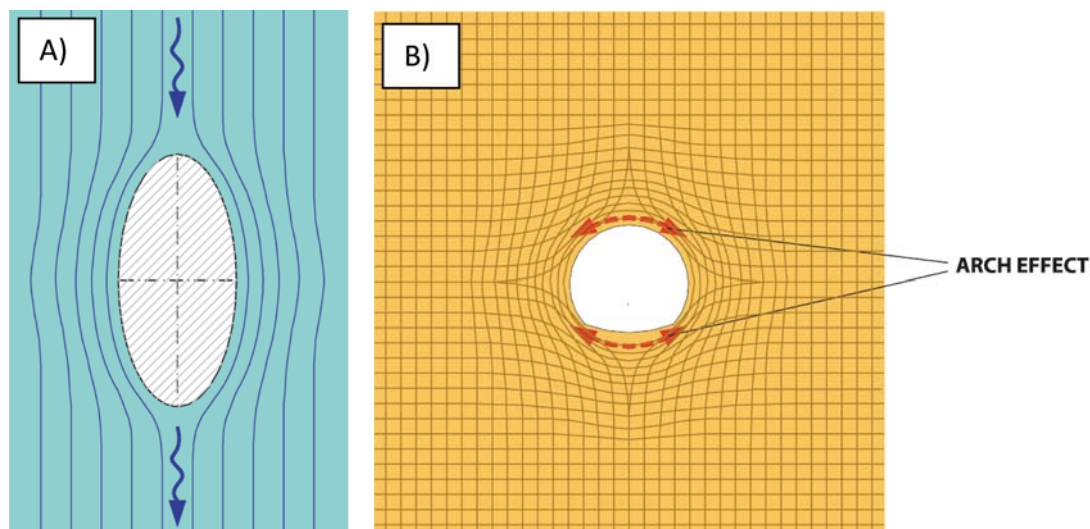
dowlanych ze względu na dużą nieprzewidywalność ośrodka, który stanowi zarówno jej obciążenie, jak i część struktury zapewniającej nośność. Nowoczesne metody budowy tuneli w swoich założeniach mają maksymalizację wykorzystania efektu samonośności ośrodka, dlatego metody obliczeniowe powinny dawać możliwość jego odwzorowania.

W artykule scharakteryzowano metody obliczeniowe, które są obecnie stosowane podczas projektowania obudowy tuneli. Pośród nich należy wymienić teorię silosów Terzaghiego, metodę kontroli konwergencji oraz płaskie i przestrzenne modele MES i MRS. Dla każdej z nich określono ograniczenia, założenia upraszczające oraz możliwości.

Opis podstawowych zjawisk i oddziaływań podczas drażenia tunelu

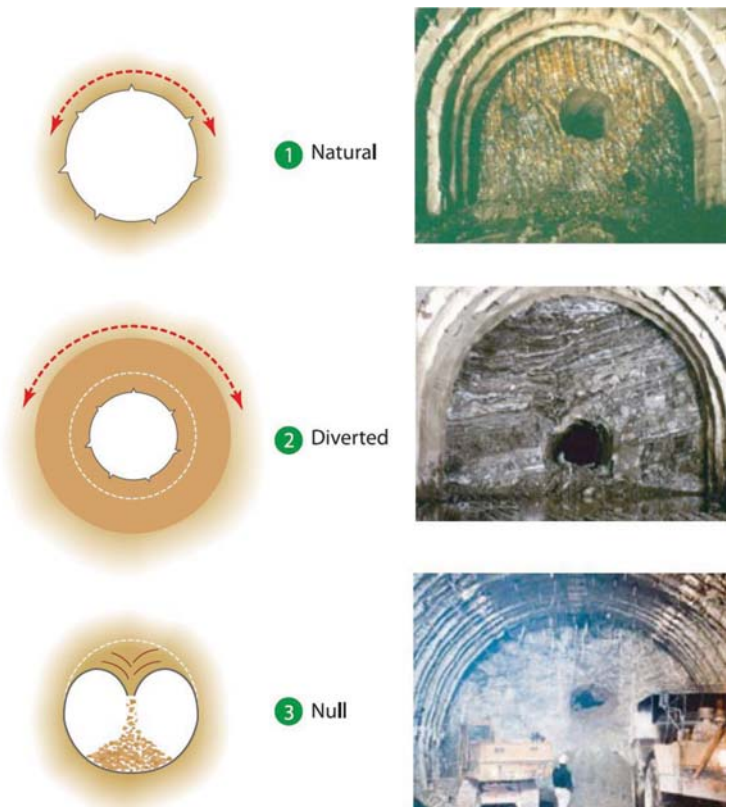
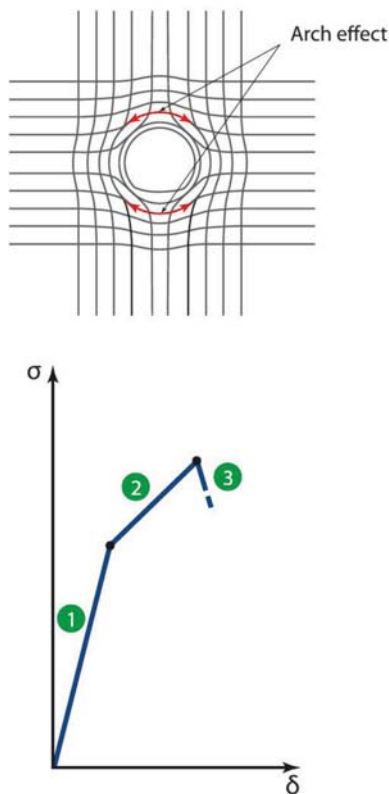
Rozwój strefy uplastycznienia/ zniszczenia wokół profilu tunelu

Drażenie tunelu polega na wybieraniu materiału ośrodka skalnego/gruntowego w celu wytworzenia w nim pustki i zainstalowania w niej obudowy tunelu. Działanie to powoduje zaburzenie pierwotnego stanu naprężenia i odkształcenia, a co za tym idzie w ośrodku musi wytworzyć się nowy stan równowagi. Trajektorie naprężeń pionowych i poziomych ulegają odchyleniu od swoich pierwotnych przebiegów, co w przybliżeniu przypomina linie prądu wokół filaru mostowego (rys. 1), zjawisko to nazywane jest „efektem łuku”. Istnieje



Rys. 1. A) linie prądu wokół filara mostowego, B) trajektorie naprężeń pionowych i poziomych wokół tunelu [7]

Rys. 2. Efekt łuku w ośrodku różnej jakości [7]



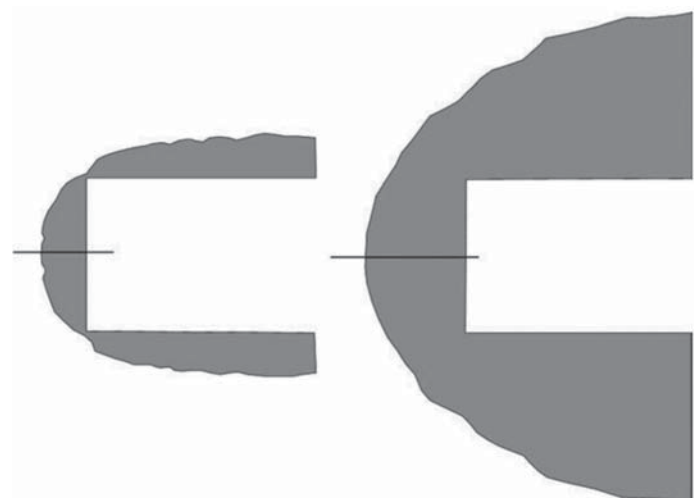
również kolejna analogia, w przypadku linii prądu prędkość przepływu wzrasta dla linii przebiegających w pobliżu filaru, natomiast w przypadku drażnienia tunelu następuje wzrost naprężeń w pobliżu wydrążonej pustki. „Efekt łuku” jest pozytywnym zjawiskiem poprawiającym stateczność wyrobiska, jednak nie zawsze występującym.

Wytworzenie się „efektu łuku”, czyli samonośnego sklepienia tunelu, zależy od takich czynników jak stosunek naprężeń poziomych do pionowych K_0 , jakość masywu skalnego oraz geometria i kształt profilu tunelu. Kształt i wymiary tunelu optymalizuje się tak, aby w jak największym stopniu wspomagać powstanie „efektu łuku”, jednak pozostałe czynniki zależą od lokalnych warunków ośrodka.

Dlatego w ogólności należy wyróżnić następujące przypadki (rys. 2):

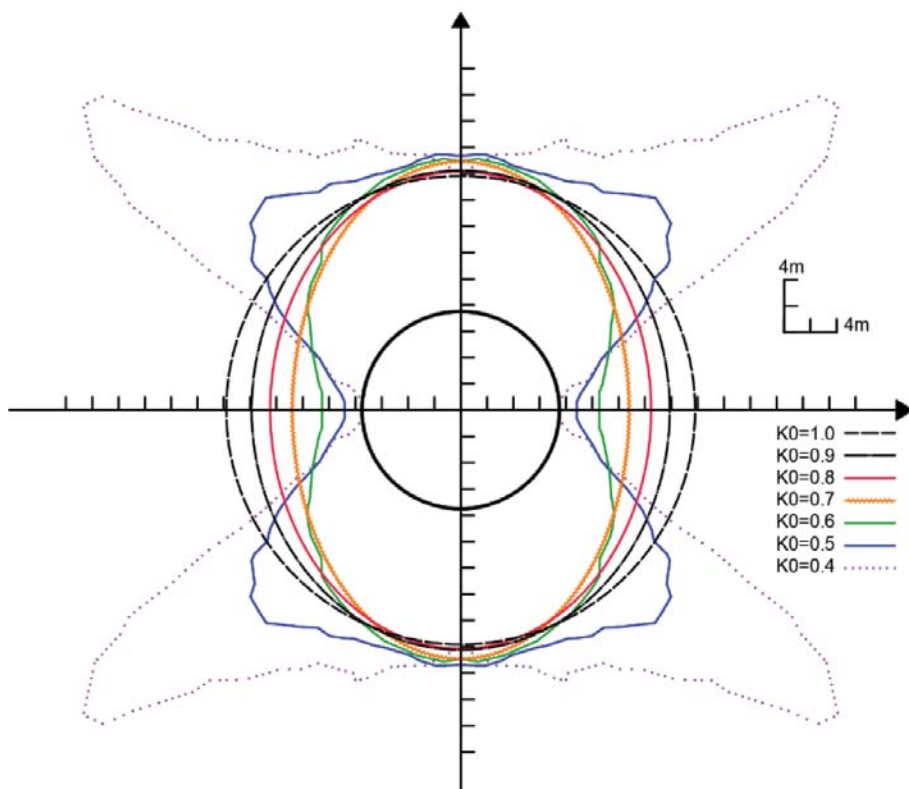
- wytworzenie „efektu łuku” bezpośrednio na konturze wyrobiska (rys. 2 – przypadek 1),
- wytworzenie „efektu łuku” w pewnej odległości od konturu wyrobiska (rys. 2 – przypadek 2), wokół profilu tunelu powstaje strefa uplastycznienia/zniszczenia,
- brak możliwości wytworzenia się „efektu łuku” ze względu na niską jakość ośrodka oraz pierwotny stan naprężenia (rys. 2 – przypadek 3).

Przypadek, w którym efekt samonośnego sklepienia powstaje bezpośrednio na konturze tunelu jest rzadki i obserwuje się go tylko w ośrodku wysokiej jakości. Najczęściej występującymi przypadkami są drugi oraz trzeci. Wokół tunelu wytwarza się wtedy strefa uplastycznienia/zniszczenia, której kształt w profilu podłużnym przypomina pocisk, zjawisko to jest znane w literaturze jako *bullet shaped plastic zone* [12].



Rys. 3. Rozwój strefy uplastycznienia/zniszczenia w profilu podłużnym tunelu [12]

Rozwój strefy uplastycznienia w profilu podłużnym zależy od jakości ośrodka, a także od przemieszczeń profilu tunelu, a co za tym idzie od momentu instalacji obudowy wstępnej oraz jej podatności. Wcześnie zainstalowana oraz zbyt sztywna obudowa będzie przenosić bardzo duże obciążenia, co wiąże się z wysokimi kosztami. Z kolei zbyt późna instalacja oraz obudowa wstępna, charakteryzująca się dużą podatnością, prowadzą do rozwoju stref uplastycznienia/zniszczenia, czego efektem jest wzrost obciążeń. Dlatego dobór odpowiedniej konstrukcji i miejsca instalacji obudowy jest skomplikowanym zagadnieniem. W dalszej części artykułu przedstawiono metody obliczeniowe, dzięki którym,



Rys. 4. Kształty strefy uplastycznienia wokół kołowego profilu tunelu dla różnych wartości stosunku naprężeń poziomych do pionowych K_0

z pewnym przybliżeniem, możliwe jest określenie tych parametrów.

Równie interesujący jest rozwój strefy uplastycznienia/zniszczenia w profilu poprzecznym tunelu. Jej wielkość, tak jak w przypadku profilu podłużnego, zależy od przemieszczeń profilu tunelu oraz jakości ośrodka. Jednak kształt strefy jest ściśle związany ze stosunkiem naprężeń poziomych do pionowych K_0 , a zatem z pierwotnym stanem naprężenia (rys. 3). Najkorzystniejszym przypadkiem jest stan naprężenia, w którym wartość $K_0 = 1,0$. Powstała wtedy strefa uplastycznienia/zniszczenia ma kształt kołowy (przy założeniu kołowego kształtu profilu tunelu), a w obudowie oraz otaczającym ją ośrodku dominują naprężenia ściskające. W takim przypadku wytworzenie się „efektu łuku” jest bardzo prawdopodobne. Jednak kiedy K_0 znacznie odbiega od wartości 1,0 (tzn. jest większe lub mniejsze), obraz strefy uplastycznienia/zniszczenia coraz bardziej przypomina kształtem motyla, a na konturze wyrobiska oraz w obudowie tunelu pojawiają się naprężenia rozciągające (bardzo niekorzystne zjawisko).

Należy podkreślić, że przedstawiony powyżej opis rozwoju stref uplastycznienia/zniszczenia zakłada jednorodność, ciągłość oraz izotropowość ośrodka. Praktyka pokazuje, że są to bardzo rzadkie przypadki. Najczęściej ośrodek jest niejednorodny, a w przypadku masywów skalnych, również nieciągły i anizotropowy. Cechy te powodują, że pola naprężeń i deformacji wokół tunelu są asymetryczne i nieciągłe, co przekłada się na asymetryczne obciążenia obudowy tunelu.

Oddziaływania ośrodka skalnego/gruntowego

W zależności od warunków lokalnych, zakres oddziaływań ośrodka na wstępną i ostateczną obudowę tunelu może znacznie się różnić. Do podstawowych oddziaływań można zaliczyć:

- obciążenia związane z ciężarem materiału ośrodka (pierwotny stan naprężenia),
- parcie gruntu,
- obciążenie pochodzące od strefy zniszczenia,
- obciążenia powstałe na skutek redystrybucji naprężeń w ośrodku,
- działanie wody podziemnej/gruntowej,
- pełzanie i płynięcie masywu skalnego,
- pęcznienie utworów ośrodka,
- obciążenia dynamiczne.

Ponadto w masywach blokowych często występują obciążenia kinematyczne pochodzące od uwolnionych bloków skalnych. Szczególnie niebezpieczne mogą być oddziaływania w strefach dyslokacji tektonicznych. Pojawiają się tam duże naprężenia ści-

nające, obciążenia od zdegradowanego materiału ośrodka (brekcji tektonicznej), wraz z którym do tunelu mogą dopływać znaczne ilości wody.

Kolejnym zjawiskiem, które może powodować znaczne i asymetryczne oddziaływania na obudowę tunelu są procesy osuwiskowe, często występujące w rejonach portali.

Przed przystąpieniem do projektowania obudowy tunelu należy określić możliwość występowania poszczególnych typów oddziaływań i zjawisk, w celu dobrania odpowiednich sytuacji obliczeniowych. Bardzo ważne jest również określenie zmienności oddziaływań na obudowę w zależności od postępu drażenia oraz określenie krytycznych faz drażenia, dla których należy wykonać analizy. Warto podkreślić, że niektóre z wymienionych oddziaływań i procesów nie mogą być bezpośrednio uwzględnione w modelach obliczeniowych ze względu na problemy z ich ilościowym opisem.

Ogólne założenia podczas projektowania obudowy tunelu

Projektowanie obudowy tunelu różni się od projektowania innego typu obiektów budowlanych ze względu na to, że ośrodek, w którym znajduje się konstrukcja, stanowi zarówno obciążenie, jak i część struktury mającej zapewnić odpowiednie wymagania co do nośności, trwałości i użyteczności tunelu. Można zatem stwierdzić, że opory i oddziaływania definiowane w myśl Eurokodu 0, w tym przypadku są ze sobą powiązane. Dodatkowym utrudnieniem jest to, że parametry ośrodka, a co za tym idzie również oddziaływania,

są trudne do jednoznacznego określenia (niejednorodność, anizotropia, nieciągłości ośrodka) oraz zmienne w czasie (postęp drążenia, reologia). Dlatego ustalenie adekwatnych wartości oddziaływań i/lub efektów oddziaływań wymaga rozpatrzenia różnych sytuacji obliczeniowych, wykorzystania odpowiednich metod obliczeniowych oraz doświadczeń zdobytych podczas budowy podobnych obiektów. Proces ten stanowi duże wyzwanie dla projektantów [13, 14].

Współczesne metody drążenia tuneli można podzielić na zmechanizowane (z użyciem różnych typów maszyn TBM) oraz konwencjonalne (urabianie z wykorzystaniem materiałów wybuchowych, koparek i innych). Różnią się one czynnikami takimi jak np. sposób urabiania, podział drążenia na etapy, typowe kształty przekroju czy stosowanie różnych typów obudowy. Jednak ich cechą wspólną jest dążenie do jak największego wykorzystania samonośności ośrodka (szerzej opisano to w [9]). W tym celu należy ograniczyć negatywny wpływ urabiania na jakość ośrodka (szczególnie ważne podczas stosowania materiałów wybuchowych) oraz odpowiednio mobilizować ośrodek do przenoszenia obciążeń. Jest to możliwe jedynie przy ciągłym monitorowaniu odpowiedzi ośrodka na drążenie i instalację obudowy. Dzięki zastosowaniu monitoringu (przemieszczenia konturu, konwergencje, obciążenia, przemieszczenia powierzchni terenu i inne), a także ciągłej ocenie jakości ośrodka w przodku, istnieje możliwość doboru odpowiedniego typu i momentu instalacji obudowy. Szereg wymagań dla obudowy wstępnej i ostatecznej opisano w [9].

W procesie projektowania kluczowym zagadnieniem jest właściwe określenie sytuacji obliczeniowych, oddziaływań, efektów oddziaływań oraz ich zmienności w zależności od faz drążenia. Wymiarowanie natomiast odbywa się na podstawie obowiązujących norm dla konstrukcji betonowych, stalowych i innych:

- PN-EN 1990, Eurokod, Podstawy projektowania konstrukcji (PKN, 2004),
- PN-EN 1992, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu (PKN, 2008),
- PN-EN 1993, Eurokod 3, Projektowanie konstrukcji stalowych (PKN, 2006),
- PN-EN 1994, Eurokod 4, Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych (PKN, 2004),
- PN-EN 1997, Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne (PKN, 2008),
- PN-EN 1998, Eurokod 8, Projektowanie konstrukcji poddanych oddziaływaniom sejsmicznym (PKN, 2004).

Metody obliczeniowe stosowane podczas projektowania obudowy tunelu

Metody wykorzystywane podczas projektowania obudowy tunelu można podzielić na trzy grupy. Pierwsza grupa obejmuje metody, które nie uwzględniają współpracy obudowy z ośrodkiem skalnym/gruntowym. W założeniu strefa zniszczenia rozwija się tu bez uwzględnienia aktywnego działania obudowy oraz trójwymiarowego efektu drążenia. Można wymienić tu np. metody Protodiakonowa, Cymba-riewicza, Sautustowicza czy Terzagiego, szerzej opisano

je w [7, 9]. Są to metody semianalityczne pozwalające na określenie oddziaływań na obudowę. Uzyskiwane dzięki nim rozwiązania są ściśle, jednak założenia odnośnie kształtu i rozmiarów strefy zniszczenia wokół profilu tunelu są założeniami empirycznymi. Z uwagi na brak uwzględnienia współpracy obudowy z ośrodkiem, obecnie traktuje się je jako metody historyczne, ponieważ zazwyczaj prowadzą do przewymiarowania konstrukcji. Obecnie, w przypadku płytkich tuneli, których miąższość nadkładu nie przekracza dwóch szerokości przekroju poprzecznego, nadal stosowana jest teoria silosów Terzagiego. Podczas stosowania przedmiotowych metod określenie efektów oddziaływań w postaci sił przekrojowych bądź naprężeń wymaga wykonania dodatkowych obliczeń. Najczęściej stosuje się tu metody numeryczne np. model belki na podłożu sprężystym.

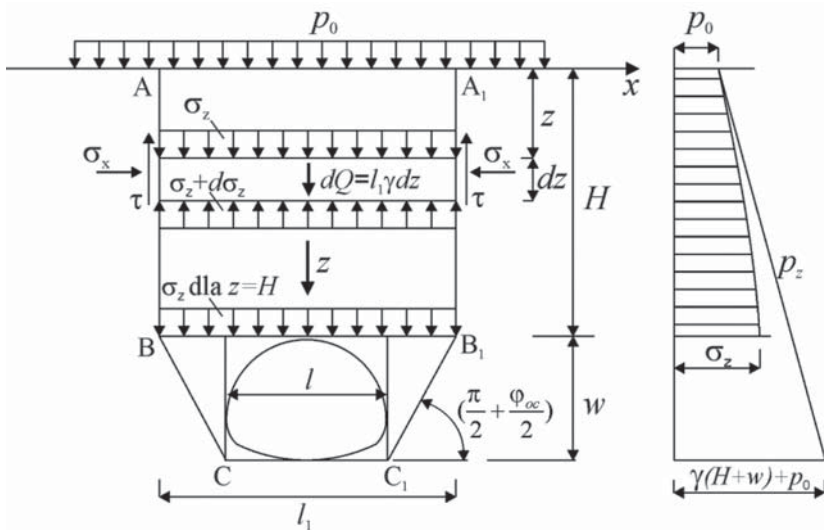
Do drugiej grupy zalicza się metody uwzględniające współpracę pomiędzy obudową a ośrodkiem skalnym/gruntowym, odwzorowujące trójwymiarowy efekt drążenia tunelu. Są to metody analityczne lub seminumeryczne, bazujące na różnych modelach ośrodka oraz różnych założeniach co do sposobu obliczania obciążenia i deformacji konturu tunelu. Najczęściej pozwalają one jedynie na określenie oddziaływań, ponieważ przy złożonej konstrukcji obudowy wymagana jest dodatkowa analiza numeryczna (np. model belki na podłożu sprężystym). Metody te przyjmują szereg założeń upraszczających, należy do nich zaliczyć jednorodność, izotropowość ośrodka, hydrostatyczny stan naprężenia oraz kołowy kształt profilu tunelu.

Obecnie najczęściej stosowane są metody grupy trzeciej, należy do nich zaliczyć płaskie oraz przestrzenne metody numeryczne. Pozwalają one na pośrednie lub bezpośrednie uwzględnienie trójwymiarowego efektu drążenia tunelu, dostarczają zaawansowanych modeli ośrodka oraz dają możliwość analizy konstrukcji o złożonym kształcie. Dodatkowo, w przedmiotowej grupie metod istnieje możliwość odwzorowania niejednorodności oraz anizotropii ośrodka. Są to metody traktujące ośrodek jako ciągły, dlatego możliwość odwzorowania nieciągłości ośrodka jest w nich ograniczona.

Jeżeli istnieje konieczność analizy zachowania ośrodka nieciągłego, np. blokowego masywu skalnego, zazwyczaj stosuje się metodę elementów odrębnych lub analizę stochastyczną bazującą na teorii bloków [4].

Metoda silosów Terzagiego

Teoria silosów Terzagiego [10] zaliczana jest do teorii semianalitycznych, ponieważ charakter działającego obciążenia jest tu z góry ustalony, jednak jego wartość ustala się analitycznie na podstawie parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Teoria ta jest stosowana w warunkach, w których wytworzenie samonośnego sklepienia jest niemożliwe. Przyjęto, że warunki takie panują w płytkich tunelach, gdy miąższość nadkładu nie przekracza dwóch szerokości profilu tunelu. Na niedużych głębokościach, nawet relatywnie małe przemieszczenia na konturze tunelu mogą prowadzić do utworzenia się stref ścięcia rozciągających się od konturu tunelu do powierzchni. W takim przypadku obudowa tunelu obciążona jest pełnym nadkładem, a efekt łuku nie występuje (rys. 5).



Rys. 5. Schemat obliczeniowy metody Terzagiego [9]

Objaśnienia do rysunku 5:

- l_1 – szerokość bloku oddziałującego na strop wyrobiska,
- l – szerokość wyrobiska,
- H – miąższość nadkładu (głębokość),
- w – wysokość wyrobiska,
- z – współrzędna głębokości,
- σ_x – naprężenia poziome,
- σ_z – naprężenia pionowe,
- $d\sigma_z$ – przyrost naprężeń pionowych,
- dz – przyrost głębokości,
- τ – wytrzymałość na ścinanie określona warunkiem Coulomba-Mohra (uwzględnia kąt tarcia i kohezję skał stropowych),
- γ – ciężar skał stropowych,
- Q – obciążenie pionowe (siła skupiona),
- dQ – przyrost obciążenia pionowego (siły skupionej),
- p_0 – obciążenie powierzchni terenu,
- ϕ_{oc} – kąt tarcia utworów zalegających w ociosie,
- ϕ_{st} – kąt tarcia utworów zalegających w stropie.

Wartość obciążenia pionowego p_v na głębokości H oblicza się na podstawie równania 1:

$$p_v = \frac{l_1 \cdot \gamma - 2 \cdot c}{2 \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg}(\phi_{st})} \left[1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg}(\phi_{st})}{l_1} \cdot H\right) \right] + p_0 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg}(\phi_{st})}{l_1} \cdot H\right) \quad (1)$$

gdzie: l – stosunek naprężeń poziomych do pionowych, c – kohezja skał stropowych.

Wartości minimalnego i maksymalnego obciążenia poziomego $p_{u\min}$ oraz $p_{u\max}$ określono na podstawie następujących wzorów 2 oraz 3:

$$p_{u\min} = p_v \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi_{oc}}{2}\right) \quad (2)$$

$$p_{u\max} = (\gamma \cdot w + p_v) \cdot \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi_{oc}}{2}\right) \quad (3)$$

Wielkość l_1 obliczono na podstawie wzoru 4:

$$l_1 = l + 2 \cdot w \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\phi_{oc}}{2}\right) \quad (4)$$

Należy zaznaczyć, że przedstawiona metoda pozwala określić oddziaływania na obudowę, natomiast efekty oddziaływań należy obliczyć przy użyciu innych metod. Obciążenia obliczone na podstawie tej metody są symetryczne, pomija ona zatem wiele istotnych cech ośrodka takich jak niejednorodność, anizotropia czy nachylenie warstw skalnych. Dodatkowo podczas obliczania efektów oddziaływań redystrybucja naprężeń następuje jedynie w obudowie bez uwzględnienia ośrodka.

Metoda kontroli konwergencji

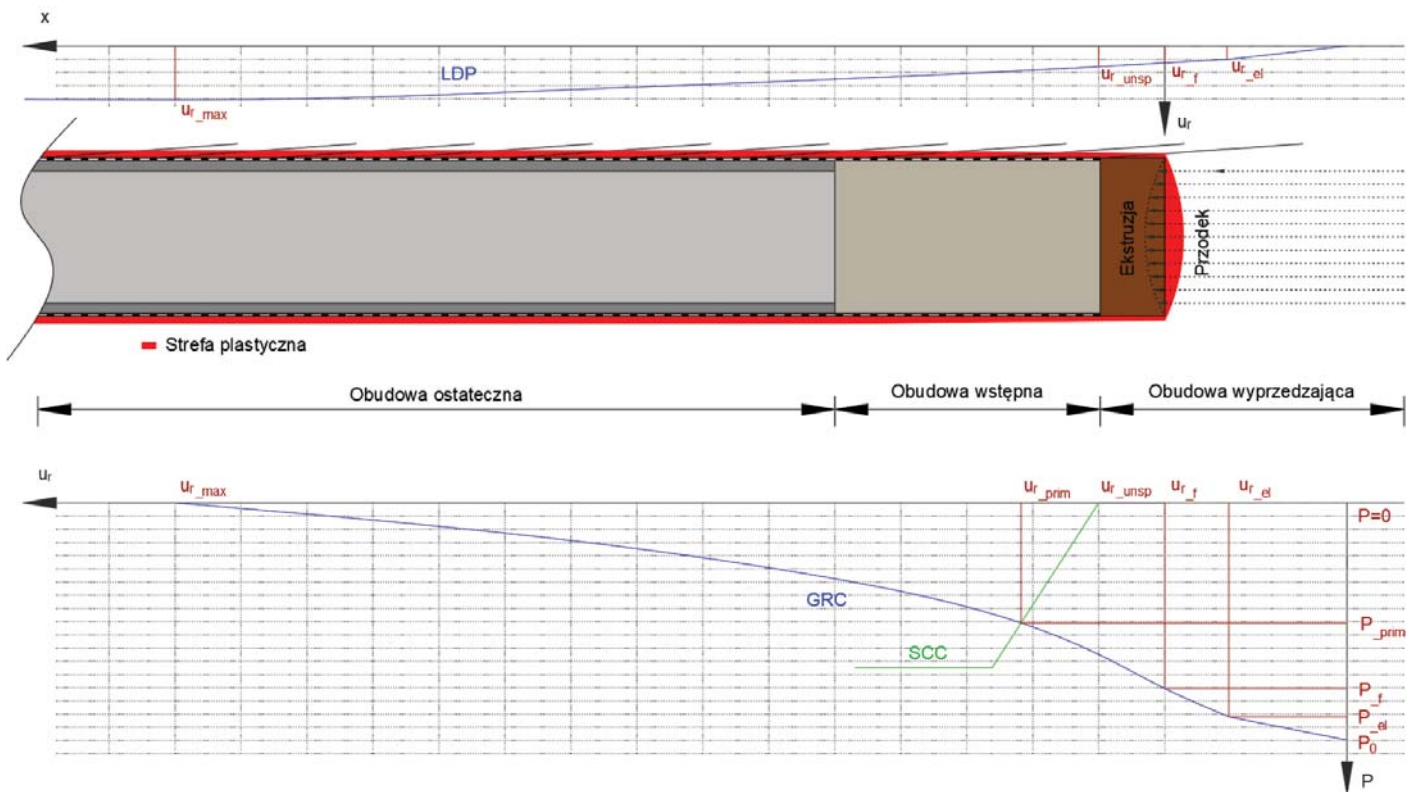
Metoda kontroli konwergencji została stworzona w celu uwzględnienia współpracy obudowy z ośrodkiem oraz odwzorowania trójwymiarowego efektu drażenia tunelu w modelu płaskim. Z obserwacji prowadzonych podczas drażenia tuneli wynika, że ośrodek zaczyna deformować się już w pewnej odległości przed czołem przodka. Podłużny profil deformacji opisywany jest charakterystyką LDP (*Longitudinal Deformation Profile*). Wynika z niego, że w dużej odległości przed przodkiem deformacje zachodzą w zakresie sprężystym, jednak w strefie przodka, najczęściej znajdują się już w zakresie plastycznym. W literaturze można znaleźć różne metody określania profilu LDP, najczęściej stosowane to:

- metoda Paneta [8],
- metoda Vlachopoulou i Diederichsa [12],
- metoda Cherna, Shiao i Yu [2],
- metoda Unlu i Gerceka [11].

Podłużny profil deformacji należy połączyć z krzywą reakcji masywu skalnego GRC (*Ground Reaction Curve*), która charakteryzuje zależność pomiędzy przemieszczeniem konturu tunelu oraz naprężeniem radialnym, przeciwdziałającym tym przemieszczeniom. Początkowo (przy zerowych przemieszczeniach) naprężenia radialne przyjmują wartość naprężeń pierwotnych. Następnie wraz z redukcją wartości naprężeń wzrastają przemieszczenia konturu tunelu. Dzięki połączeniu obu charakterystyk można określić, jakie przemieszczenia konturu tunelu występują w danej odległości od przodka oraz jaka jest wartość odprężenia masywu skalnego. W literaturze można znaleźć kilka sposobów określania charakterystyk GRC bazujących na różnych modelach ośrodka:

- Coulomba-Mohra [3],
- Hoeka-Browna [1],
- strain-softening [6].

Aby określić obciążenie działające na obudowę należy połączyć GRC z charakterystyką obudowy SCC (*Support Characteristic Curve*). Miejsce wstawienia charakterystyki SCC określa się na podstawie LDP, natomiast wartość obciążenia obudowy wynika z miejsca przecięcia charakterystyki GRC oraz SCC (punkt współpracy obudowy z masywem skalnym – rys. 6).



Rys. 6. Schemat charakteryzujący metodę kontroli konwergencji (opracowanie własne)

Podobnie jak w przypadku teorii Terzagiego, metoda kontroli konwergencji bazuje na szeregu założeń upraszczających, są to: jednorodny, izotropowy ośrodek, hydrostatyczny stan naprężenia oraz kołowy kształt tunelu. Obciążenie określone przedmiotową metodą jest symetryczne i radialnie skierowane do wnętrza tunelu. W celu określenia efektów oddziaływań należy wykonać dodatkowe obliczenia.

Rozwinięciem metody kontroli konwergencji są płaskie modele numeryczne, które częściowo redukują ograniczenia pierwotnej wersji metody kontroli konwergencji.

Metody numeryczne

Obecnie najczęściej stosowanymi metodami obliczeniowymi, wykorzystywanymi podczas projektowania obudowy tunelu są płaskie modele numeryczne. Dają one bardzo duże możliwości przy niewielkiej czasochłonności obliczeń.

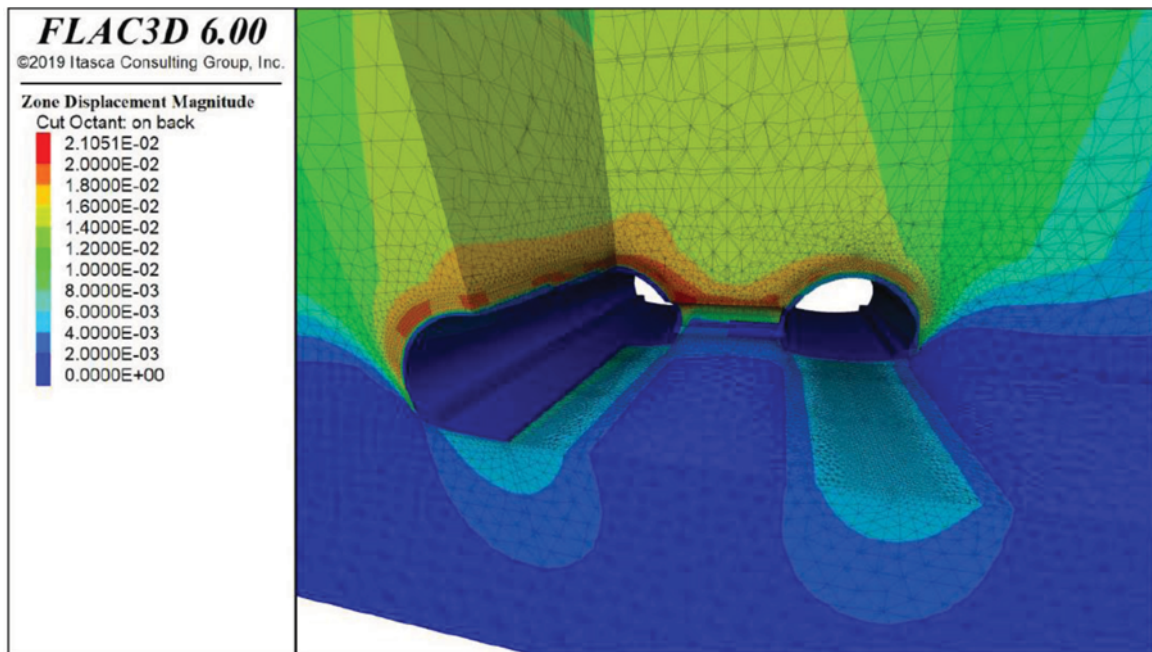
Płaskie modele metody elementów skończonych (MES) oraz metody różnic skończonych (MRS) dają możliwość odwzorowania ośrodka za pomocą zaawansowanych modeli konstytutywnych, pozwalają uwzględnić niejednorodność i anizotropię ośrodka oraz złożoną geologię i geometrię przekroju tunelu. Podstawowym problemem płaskich modeli MES oraz MRS jest odwzorowanie trójwymiarowego efektu drążenia, ponieważ w tym zakresie nadal wykorzystywane są metody Paneta, Vlachopoulosa i Diederichsa, Cherna, Shiao i Yu oraz Unlu i Gerceka. Oznacza to, że określenie poziomu odprężenia ośrodka w momencie instalacji obudowy tunelu wiąże się z wykorzystaniem profilu LDP, który bazuje na szeregu założeń upraszczających. Profil GRC wy-

kreśla się na podstawie symulacji numerycznych, natomiast współpracę obudowy z ośrodkiem uwzględnia się poprzez wstawienie do modelu symulujących ją elementów strukturalnych. W przypadku tej metody oddziaływania są trudne do oszacowania, wynikiem obliczeń są efekty oddziaływań w obudowie. Projektowanie z wykorzystaniem tej metody pozwala na uwzględnienie redystrybucji naprężeń w obudowie oraz ośrodka, co w większym stopniu odwzorowuje rzeczywistość.

Rozwinięciem płaskich modeli MES oraz MRS są modele przestrzenne (rys. 7), dają one bardzo duże możliwości w zakresie odwzorowania geologii, geometrii oraz technologii drążenia. Istnieje możliwość pełnego odwzorowania kolejnych faz drążenia, dlatego nie trzeba stosować profili LDP. Modele przestrzenne dają możliwość symulowania obudowy wyprzedzającej np. parasola mikropalowego czy kotew na czole przodka oraz podziału drążenia (np. wyprzedzenie w kalocie). Dodatkowo pozwalają na określenie stateczności przodka, co w przypadku płaskich modeli jest niemożliwe.

Niestety symulacje procesu drążenia z wykorzystaniem przestrzennych modeli MES oraz MRS wiążą się z dużą czasochłonnością. Odwzorowanie geologii, geometrii oraz dobór parametrów modelu są znacznie bardziej skomplikowanym procesem niż w przypadku modeli płaskich. Obliczenia wymagają znacznie większej ilości pamięci RAM oraz szybkich procesorów, z tego względu modele przestrzenne wykorzystywane są jedynie w najbardziej skomplikowanych sytuacjach, w których odwzorowanie zachodzących zjawisk tego wymaga.

Rys. 7. Mapa przemieszczeń całkowitych w rejonie przejścia awaryjnego [5]



Podsumowanie

W artykule scharakteryzowano zjawiska zachodzące podczas drążenia tunelu oraz oddziaływania ośrodka na obudowę. Przedstawiono również najważniejsze założenia odnośnie projektowania obudowy tunelu, a także opisano aktualnie stosowane metody obliczeniowe.

Obecnie najczęściej wykorzystywanymi metodami obliczeniowymi w procesie projektowania obudowy tuneli są płaskie modele MES oraz MRS. Dysponują one szerokimi możliwościami odnośnie odwzorowania ośrodka oraz konstrukcji obudowy. Cechuje je również stosunkowo krótki czas obliczeń. Wadą tych metod jest sposób symulowania przestrzennego efektu drążenia, ponieważ w tym celu wykorzystują metody analityczne (LDP) ograniczone wieloma założeniami upraszczającymi. Ponadto płaskie modele MES i MRS nie dają możliwości symulowania obudowy wyprzedzającej oraz weryfikacji stateczności przodka.

Szersze możliwości dają przestrzenne modele MES oraz MRS, które pozwalają na symulację złożonych procesów drążenia, uwzględnianie obudowy wyprzedzającej oraz weryfikację stateczności przodka. Metody te są jednak skomplikowane i czasochłonne, dlatego używa się ich do projektowania złożonych zagadnień, takich jak skrzyżowania, przejścia awaryjne, weryfikacja stateczności portali z uwzględnieniem procesu drążenia oraz symulowanie drążenia z uwzględnieniem obudowy wyprzedzającej.

Optymalnym podejściem jest stosowanie płaskich modeli MES i MRS w połączeniu z ich przestrzennym rozwinięciem dla złożonych zagadnień. Prawidłowy dobór odpowiednich metod obliczeniowych w dużej mierze zależy od wiedzy, „wycucia inżynierskiego” i doświadczenia projektanta.

Bibliografia

[1] Carranza-Torres C., C. Fairhurst, 1999, *The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy*

the Hoek-Brown failure criterion, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36 (6): 777–809.

[2] Chern J.C., F.Y. Shiao, C.W. Yu, 1998, *An empirical safety criterion for tunnel construction*, w Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, 222–27, Taipei.

[3] Fama M. E. D., 1993, *Numerical modeling of yield zones in weak rock*, Comprehensive rock engineering, T. 2. Oxford: Pergamon.

[4] Jakubowski J., 2011, *The Stochastic Block Stability Simulation Method and Other Probabilistic Extensions of Block Theory*, Archives of Mining Sciences 56 (2): 223–38.

[5] Kowalczuk Ł., *Przestrzenna analiza numeryczna dla oceny stateczności wybranych odcinków tuneli na przykładzie obiektu Rabka – Lubień*, Praca dyplomowa pod kierunkiem: prof. dr hab. inż. Marek Cała, 2019, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami AGH, Kraków.

[6] Lee Youn Kyou, S. Pietruszczak, 2008, *A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass*, Tunnelling and Underground Space Technology 23 (5): 588–99.

[7] Lunardi P., 2008, *Design and Construction of Tunnels*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

[8] Panet M., 1995, *Calcul des Tunnels par la Methode de Convergence-Confinement*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chausse es, 178.

[9] Tajduś A., Cała M., Tajduś K., 2012, *Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli*, Wydawnictwo AGH, Kraków.

[10] Terzaghi K., 1951, *Mecanique theorique des sols*, Paris.

[11] Unlu T., H. Gercek, 2003, *Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel*, Tunnelling and Underground Space Technology 18 (5): 547–53.

[12] Vlachopoulos N., Diederichs M. S., 2009, *Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels*, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 42 p. 131–146.

[13] Cała M., Tajduś A., Stopkowicz A., Kolano M., Blajer M. 2019a – *Rozpoznanie masywu fliszowego i klasyfikacja jego jakości*, „MOSTY” 3–4/19, s. 89.

[14] Cała M., Tajduś A., Stopkowicz A., Kolano M., Blajer M. 2019b – *Współczesne metody drążenia tuneli – wybrane problemy w zakresie doboru obudowy*. „MOSTY” 5/19, s. 42.