

# Wpływ budowy tuneli na uwarunkowania miejskie

■ Bai Yun, Zheng Yanlong, Wydział Inżynierii Geotechnicznej, Uniwersytet Tongji, Chiny

Chiny wchodzą obecnie w okres, w którym wiele nowych obiektów infrastrukturalnych jest lub będzie budowana. W marcu 2011 r. w 12 miastach Chin oddano do użytku 48 linii MRT (szybka kolej miejska) o całkowitej długości 1417 km. Linie te są aktualnie eksploatowane. W artykule opisano krótko metody budowy tuneli, które mogą być zastosowane do budowy tego typu obiektów w miastach.

Dobra koniunktura w budownictwie, osiągnięta w tak krótkim czasie, będzie miała – w sposób ciągły lub przejściowy – nieuchronny wpływ na środowisko zarówno na etapie budowy tunelu, jak i na etapie eksploatacji. Wprowadzone środki zaradcze i nowe technologie budowy minimalizują ten wpływ. Aby zrozumieć problemy związane z budową tuneli w miastach, w artykule zaprezentowano przykład budowy tunelu Bund w Szanghaju.

## 1. Metody budowy tuneli

Stosowane obecnie metody budowy tuneli obejmują metody konwencjonalne (*Drill & Blast* – tunelowanie w skałach metodą strzałową, NATM – Nowa Metoda Austriacka), metodę TBM (włącznie z EPB i zawieszinową), metodę *Cut & Cover* (odkrywkową) oraz metodę zatapiania segmentów, czyli kesonów. Każda z nich ma swój zakres stosowania oraz zalety i wady. Na przykład, metoda C&C jest mniej czasochłonna i oszczędniejsza, ale wiąże się z większym wpływem na środowisko.

W momencie wybierania technologii budowy należy rozważyć wiele czynników, takich jak warunki geotechniczne, otaczające środowisko (budowle, drogi, budynki użyteczności publicznej), harmonogram czasowy, wymiary tunelu, zalety techniczne, koszty itp. Obecnie metoda TBM (tunelowa maszyna drążąca) staje się coraz bardziej popularna dzięki swojej niezawodności i opłacalności.

## 2. Zasadniczy wpływ budowy tuneli na uwarunkowania miejskie

### 2.1. Osiadanie i awarie obiektów

Generalnie, głównym czynnikiem przyczyniającym się do powstania krótkotrwałych osiadań powierzchni terenu nad budowanym tunelem są straty objętościowe, tzw. *volume loss*, powstałe podczas drążenia i wybierania gruntu (zarówno przebranie w górnej części przodka, jak i pustka w ogniu tarczy), podczas gdy przy długotrwałych osiadaniach powierzchni terenu dochodzi do konsolidacji gruntu w wyniku rozproszenia nadwyżki ciśnienia porowego, zmiany rozkładu naprężenia oraz obciążenia podłoża konstrukcją budynków [1]. Nieprawidłowe odwodnienie i niewłaściwa cementacja mogą również odgrywać znaczącą rolę. Osiadanie powinno być ograniczone do poziomu, który zapewnia ochronę budynków przed dalszym osiadaniem, pękaniem i pochyleniem oraz ochronę dróg i rurociągów przed przerwaniem. W innym przypadku nadmierne osiadania mogą wywołać awarię ze skutkiem śmiertelnym lub spowodować znaczne uszkodzenia budynków, dróg i rurociągów przesyłowych, co może doprowadzić do ofiar w ludziach, strat gospodarczych i opóźnień w odniesieniu do robót budowlanych.

Rycina 1 przedstawia dwa typowe przypadki katastrofy obiektów budowlanych. Pierwsza (a) pokazuje zniszczenie autostrady Nicole, spowodowane przez ścięcie łącznika podłużnicy i rozporę stalowej. W katastrofie życie straciły cztery osoby, a trzy zostały ranne. Druga rycina (b) przedstawia awarię na budowie

czwartej linii metra w Szanghaju, spowodowanej napływem wody przez zdegradowany, zmarznięty grunt na skrzyżowaniu w pobliżu rzeki Huangpu. Wypadek ten doprowadził do wystąpienia bezpośrednich strat o charakterze ekonomicznym w wysokości 150 mln RMB (1 RMB = 0,1578 USD).



Ryc. 1. Dwa typowe przypadki awarii spowodowanych drążeniem tunelu: a) katastrofa na autostradzie Nicole w Singapurze, b) awaria na czwartej linii metra w Szanghaju

Należy pamiętać, że nie da się uniknąć osiadania lub wypiętrzania gruntu, ale trzeba wiedzieć, jak zminimalizować ich wpływ do akceptowanego poziomu. Główną zasadą takiego oddziaływania jest zmniejszenie przemieszczeń podłoża. Lepsza kontrola w zakresie parametrów budowy, elastyczny plan zarządzania ryzykiem oraz technologia monitorowania w czasie rzeczywistym mogą pomóc osiągnąć ten cel. Obecnie monitorowanie z zastosowaniem światłowodów umożliwia wykrycie nawet najmniejszego osiadania, co pozwala uchwycić początkowy moment awarii obiektu.



Ryc. 2. Układanie światłowodów

### 2.2. Zakłócenia w ruchu drogowym

Większość tuneli buduje się po to, aby zmniejszyć kolizyjność w ruchu ulicznym. Jednak na etapie prac budowlanych realizacja tunelu może pogorszyć warunki ruchu drogowego lub nawet doprowadzić do jego zablokowania. Jest to pewien paradoks. Chociaż do budowy tunelu możliwe jest zastosowanie metod bezwypokopowych, takich jak np. metoda TBM zamiast metody C&C, budowa stacji lub szybu roboczego doprowadzi prawdopodobnie do zajęcia pewnej powierzchni drogi. Aby ułatwić budowę tunelu

i zminimalizować zakłócenia w ruchu ulicznym, niezbędne jest opracowanie odpowiednich środków zaradczych. Zwykle ruch ograniczany jest do wąskiego pasa i wprowadzana jest tymczasowa zmiana jego kierunku. Możliwe jest także zorganizowanie objazdu, o ile pozwalają na to warunki. Metoda C&C – pełna, stropowa, może również okazać się dobrym rozwiązaniem. Do budowy tunelu metodą zatapiania segmentów, biegnącego pod spławną rzeką lub kanałem, niezbędne jest także przedłożenie planu w zakresie zmiany kierunku płynięcia statków bądź wykonanie odpowiednich robót związanych z pogłębianiem dna rzeki. Przed zatapianiem elementów powinno się wcześniej o tym poinformować i włączyć ustalony sygnał dźwiękowy.

### 2.3. Odcinanie podziemnej infrastruktury technicznej

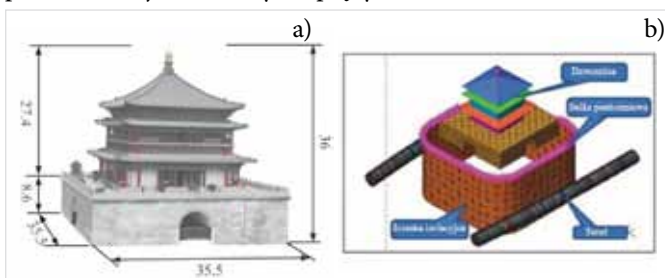
W przypadku stosowania metod odkrywkowych należy przed rozpoczęciem robót ziemnych przenieść lub zabezpieczyć istniejącą podziemną infrastrukturę techniczną. Niekompletna kontrola jej stanu lub ludzka pomyłka mogą również spowodować jej uszkodzenie. W takim przypadku trzeba zapewnić możliwość prowadzenia akcji ratowniczych, zgodnie z planem postępowania w sytuacji awaryjnej.

### 2.4. Hałas i drgania

Podczas budowy i na etapie wykonywania robót może dojść do generowania drgań i hałasu. Hałas i drgania wynikają głównie z wykonywanych czynności budowlanych, takich jak wiercenie i roboty strzelnicze, wbijanie pali w ziemię, obsługa maszyn i przejazd pociągów. Urządzenia wykorzystywane podczas robót budowlanych to również tarcza TBM, wywrotki, sprężarki, wiertarki udarowe pneumatyczne, wentylatory itp.

W celu zmniejszenia hałasu w warunkach miejskich należy zastosować środki tłumiące, tj. tymczasowe bariery akustyczne, w sąsiedztwie miejsca budowy. Większość robót powinna być także wykonywana w ciągu dnia.

Jeśli roboty są prowadzone zgodnie z obowiązującymi normami i przepisami, to zwykle drgania spowodowane drążeniem tunelu rzadko osiągają poziom, który może prowadzić do uszkodzenia budynków lub ich konstrukcji. W przypadku drążenia tunelu w sąsiedztwie historycznych budowli ze starymi fundamentami lub budynków szpitalnych wrażliwych na drgania należy zachować szczególną ostrożność i dążyć do zmniejszenia drgań. Rycina 3 przedstawia sposób ochrony 600-letniego obiektu wraz z dzwonnica w pobliżu drugiej linii metra w Xi'an. Aby zminimalizować osiadanie powierzchni terenu na etapie budowy oraz drgania na etapie eksploatacji, wykonawca zdecydował się zastosować pale wiercone, formowane w gruncie z obwodowym wieńcem, w celu odizolowania dzwownicy od podłoża. W tunelu dla zmniejszenia drgań [2, 3] zastosowano rozwiązanie w postaci pływającej płyty podtorza posadowionej na stalowych sprężynach.



Ryc. 3. Zabezpieczenie dzwownicy: a) dzwonnica Xi'an, b) szkic układu

### 2.5. Wpływ na środowisko

Zrozumiałe jest, że tunel ma mniejszy wpływ na środowisko, florę i faunę niż prace prowadzone na powierzchni terenu, gdyż

jest on ograniczony do stacji i placu budowy. Jednak budowa tuneli może również wywierać pewien negatywny wpływ. Na przykład przy tunelach wykonywanych metodą zatapiania elementów, pogłębianie rzeki będzie powodowało mieszanie gruntu dennego, wytworzenie zmętnienia lub powstanie zawiesin na powierzchni. Należy ocenić wpływ danej budowy na migrację ryb w rzece oraz okresy tarła i określić środki zapobiegawcze lub ograniczające oddziaływanie budowy. Urządzenia do pogłębiania rzeki powinny być tak dobrane, aby ograniczyć powstawanie zawiesin w wodzie i utrzymać je na dopuszczalnym poziomie [4]. W przypadku drążenia tunelu tarczą zawieszinową usuwanie urobku i zanieczyszczeń spowodowanych przez stosowanie środków chemicznych również wzbudza obawy.



Ryc. 4. Ochrona chińskich białych delfinów

## 3. Studium przypadku

Bulwar Bund jest charakterystycznym miejscem w Szanghaju, położonym na brzegu rzeki Huangpu, gdzie można zobaczyć ponad 50 zabytkowych budynków wzniesionych w różnych stylach architektonicznych. Tak jak w innych miastach, ulica Bund stała się tak zatłoczona, że ograniczyło to ruch turystów. Aby zlikwidować wąskie gardło w ruchu drogowym, władze lokalne Szanghaju w 2008 r. zdecydowały się zbudować tunel pod istniejącą drogą. Tunel ten składa się z dwóch części. Część północna została zbudowana za pomocą maszyny EPB o średnicy 14,27 m, a południowa z wykorzystaniem metody C&C. W niniejszym opracowaniu skupimy się na części północnej. Budowa dużego tunelu w tak wrażliwym środowisku stawiała duże wymagania techniczne. Najważniejszym wyzwaniem była ochrona 100-letniego mostu Waibaidu, drugiej linii metra oraz zabytkowych budowli, jak też optymalizacja konstrukcji tarczy TBM EPB.



Ryc. 5. Plan budowy tunelu Bund

### 3.1. Optymalizacja metod budowy [5]

Budowa tarczą tak płytkiego tunelu z małym nadkładem gruntu jest bardzo dużym wyzwaniem. Właściwa optymalizacja metod





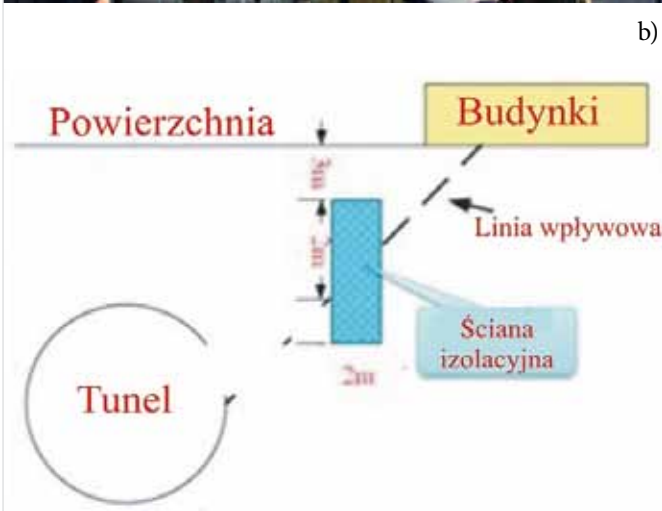
Fundamenty wykonano jako żelbetowy ruszt posadowiony na drewnianych palach. Stan tych fundamentów trudno jest ocenić. Aby zmniejszyć wpływ robót tunelowych, tzn. nierównomierne osiadanie i przechylenie fundamentów oraz zniszczenie części naziemnej, niezbędne było podjęcie środków zaradczych. Biorąc pod uwagę odległości pomiędzy budynkami i tunelem, podzielono je na trzy rodzaje:

- wyjątkowo blisko tunelu ( $d < 5$  m), np. hotel Pujiang
- bardzo blisko tunelu ( $5 \text{ m} < d < 10$  m), np. rezydencja Shanghai
- blisko tunelu ( $d > 10$  m), np. budynek Bank of China.

Dla hotelu Pujiang, cieszącego się 150-letnią historią, maksymalna odległość wynosiła 4,5 m, a minimalna 1,7 m. W celu zminimalizowania oddziaływania wykonano palisadę z pali wierconych. Następnie, aby zmniejszyć osiadanie, wykonano iniekcję pod fundamentami z zaczynu cementowego (ryc. 13). Uzyskano świetne rezultaty, bowiem maksymalne osiadanie wyniosło zaledwie 6 mm.



a)



b)

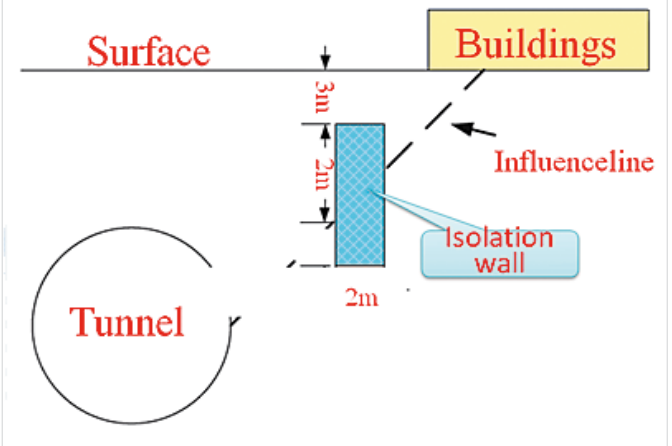
Ryc. 13. Zabezpieczenie hotelu Pujiang: a) hotel Pujiang, b) środki zapobiegawcze

Dla drugiego typu budynków, zgodnie z tym, co pokazano na rycinie 14, w celu ograniczenia rozwoju niecki osiadań wykonano iniekcję cementową. Stwierdzono, że najlepszy efekt daje iniekcja od głębokości 3 m poniżej powierzchni aż do głębokości 2 m poniżej linii wpływu. Wyniki wykazały, że chociaż wytrzymałość ściany wykonanej metodami iniekcyjnymi nie była duża, to jednak pozwoliła na zmniejszenie osiadań nawet o połowę.

Dla trzeciego typu budynków nie podjęto żadnych dodatkowych środków. Ograniczono tam prędkość ruchu i czas postoju pojazdów.



b)



Ryc. 14. Zabezpieczenie rezydencji Shanghai: a) rezydencja Shanghai, b) środki zaradcze

#### 4. Wnioski

W artykule omówiono wpływ robót związanych z drążeniem tuneli na środowisko z uwzględnieniem różnych metod budowy. Studium przypadku budowy tunelu Bund pokazało, jak wiele trudu zadali sobie inżynierowie w Szanghaju, aby ograniczyć wpływ budowy tunelu na wrażliwe środowisko. W dzisiejszych czasach realizacja tunelu w zabudowie miejskiej wzbudza więcej obaw niż dawniej. Inwestorzy, projektanci i wykonawcy nie powinni szczędzić wysiłków w celu zmniejszenia wpływu prac związanych z drążeniem tunelu na środowisko. Jednocześnie stwierdza się, że istnieje w tej dziedzinie duża potrzeba rozwoju i wdrażania innowacyjnych technologii.

#### Literatura

- [1] Liao S.-M., Fan Y.-Y.: *Deep Settlement Patterns for Evaluating Environmental Impact of Shield Tunneling in Soft Ground*. ITA-AITES World Tunnel Congress and 37<sup>th</sup> General Assembly, May 21–26, 2011, Helsinki, Finland.
- [2] Lei Y.-S.: *Research on Protective Measures of City Wall and Bell Tower Due to Underneath Crossing Xi'an Metro Line No. 2*. "Rock and Soil Mechanics" 2010 (Jan.), pp. 223–229 (w języku chińskim).
- [3] *China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd.* Beijing Jiaotong University. Appraisal Report on the vibration and settlement impact induced by the construction of Metro Line 2 of Xi'an Metro on the Bell Tower [R], 2008.
- [4] *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*.
- [5] Yun B. et al.: *The Research on Construction Technology of Large-diameter EPB-shield Used in Shallow Soil and Protecting Technology of The Surrounding*, 2010 (w języku chińskim).