

Iniekcja kompensacyjna jako skuteczna metoda ochrony infrastruktury naziemnej podczas drążenia tuneli metodą TBM



tekst: **ARTUR GASZEWSKI**, dyrektor naczelny, członek zarządu, Keller Polska Sp. z o.o.
zdjęcia i rysunki: **KELLER POLSKA Sp. z o.o.**



W ostatnich latach jesteśmy świadkami szybkiego rozwoju infrastruktury transportowej, w tym również podziemnej. Obecnie w kraju realizowanych jest kilka inwestycji, które wymagają budowy tuneli. Większość z nich powstaje przy użyciu maszyn TBM. Drążenie tuneli wiąże się z ryzykiem osiadania gruntu, co na obszarach silnie zurbanizowanych może zagrażać istniejącej infrastrukturze. Iniekcja kompensacyjna to technika umożliwiająca aktywne przeciwdziałanie deformacjom terenu przez iniekcję zaczynu cementowego w grunt. W artykule przedstawiono mechanizm działania tej techniki, konfiguracje systemów iniekcyjnych, profile deformacji gruntu oraz przykłady zastosowań.

1. Wprowadzenie

Obecnie w Polsce realizowane są dwie inwestycje tunelowe w ścisłej zabudowie miejskiej: tunel kolejowy w ramach modernizacji łódzkiego węzła kolejowego oraz metro w Warszawie. Trwają przygotowania do drążenia drugiego tunelu kolejowego w Łodzi, budowanego w ramach połączenia kolejowego dużej prędkości między Warszawą, Łodzią, Wrocławiem i Poznaniem. Drążenie tunelu metodą TBM powoduje lokalne zmiany w strukturze gruntu, które mogą prowadzić do jego osiadania, a w konsekwencji powodować uszkodzenia budynków, sieci uzbrojenia terenu i nawierzchni. Iniekcja kompensacyjna, stosowana jako metoda prewencyjna lub korekcyjna, umożliwia zmniejszenie deformacji gruntu.

Jednym z głównych mechanizmów powodujących deformacje terenu na powierzchni jest rozluźnienie gruntu na skutek wydobywania większej ilości gruntu niż teoretyczna objętość tunelu. Parametr, który opisuje to zjawisko, nosi nazwę współczynnika straty objętości (ang. volume loss). Na wielkość współczynnika ma wpływ średnica tarczy, rodzaj używanej tarczy, warunki gruntowe, niejednorod-

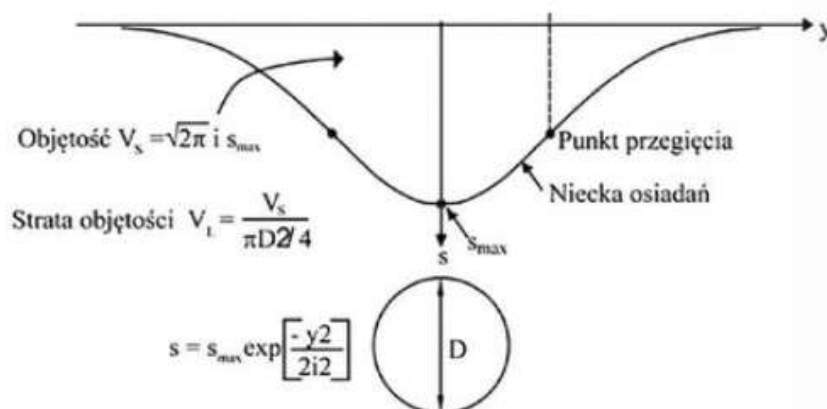
ność warstw, prędkość wiercenia, dokładność instalacji obudowy, jakość iniekcji za tubingami. Współczynnik straty objętości ma decydujący wpływ na kształt i wielkość powstających deformacji i osiadanie terenu. Może ono przyjmować formę niecki osiadania. Przykładowy kształt niecki osiadania wraz z definicją współczynnika straty objętości V_L pokazano na rycinie 1.

Im większa średnica tarczy maszyny TBM, tym większa strata objętości i głębsza niecka osiadania. Deformacje gruntu mogą prowadzić do uszkodzeń konstrukcji naziemnych, zakłóceń w działaniu infrastruktury

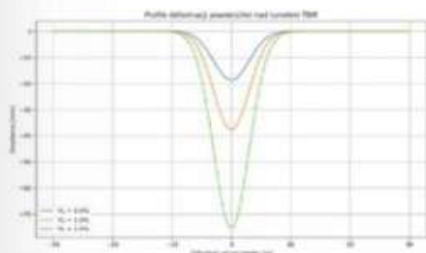
technicznej, a w przypadku znacznych nierównomiernych osiadań nawet do katastrofy budowlanej. Stąd niezwykle ważne staje się już na etapie projektowania tunelu oszacowanie spodziewanych deformacji oraz sposobu zabezpieczenia infrastruktury naziemnej. W warunkach miejskich, aby zmniejszyć ryzyko, zaleca się budować tunele dwunawowe wiercone tarczami o mniejszej średnicy.

2. Profile deformacji gruntu

Na rycinie 2 przedstawiono typowe profile osiadania gruntu nad tunelem w zależ-



Ryc. 1. Kształt niecki osiadania, współczynnik straty objętości V_L



Ryc. 2. Profile deformacji gruntu

ności od wartości współczynnika straty objętości. Dla terenów mocno zurbanizowanych zaleca się uzyskanie V_t poniżej 0,5%, co pozwala znacznie zmniejszyć deformację terenu, a tym samym ograniczyć ryzyko uszkodzenia budynku.

3. Mechanizm działania iniekcji kompensacyjnej

Jedną z najskuteczniejszych metod zmniejszenia niecki osiadania jest iniekcja kompensacyjna. Metoda ta polega na wtłaczaniu zaczynu (zazwyczaj cementowego, bentonitowego lub żywicznego) do gruntu przez rury iniekcyjne. Zaczyn wypełnia szczeliny i pustki, a jego objętość kompensuje utratę masy gruntu. W zależności od ciśnienia i rodzaju gruntu iniekt może tworzyć bulwy lub szczeliny. Na rycinie 3 pokazano typowy schemat iniekcji.



Ryc. 3. Typowy schemat iniekcji kompensacyjnej

W pierwszej kolejności wykonuje się pionowy szyb, z którego instaluje się rury iniekcyjne w jednym lub dwóch poziomych rzędach. Poziom przewodów iniekcyjnych dostosowuje się do warunków gruntowych i głębokości naziemu nad tunelem. Sam proces iniekcji jest podzielony na trzy etapy:

- iniekcję wstępną, którą wykonuje się przed drążeniem tunelu. Ma ona na celu wypełnienie pustek, uszczelnienie szczelin i poprawę struktury gruntu. Służy także do sprawdzenia reakcji gruntu na iniekcję oraz zasięgu iniekcji;
- iniekcję aktywną, prowadzoną w trakcie drążenia tunelu. Na podstawie danych z wcześniej zainstalowanego systemu monitoringu przemieszczeń obiektów infrastruktury naziemnej przekazywanych w czasie rzeczywistym stosuje się

punktowe iniekcje, dostosowane do rejestrowanych osiadań budynków;

- iniekcję wtórną, wykonywaną po przejściu tarczy TBM, umożliwiającą korektę osiadań wygenerowanych w dłuższym czasie. Umożliwia precyzyjne podnoszenie lub stabilizację obiektów (ryc. 4 i 5).



Ryc. 4. Instalacja poziomych rur iniekcyjnych



Ryc. 5. Pompowanie iniektu do rur iniekcyjnych

4. Projektowanie systemu iniekcyjnego

4.1. Lokalizacja szybu

Szyb iniekcyjny powinien być zlokalizowany między tunelem a chronionymi obiektami. Dno szybu znajduje się powy-

żej TBM, a jego średnica zależy od liczby rur iniekcyjnych. Na rycinie 6 pokazano przykład rozmieszczenia szybu i rur. W tym przypadku szyb zlokalizowano nad tunelem.

4.2. Przewody iniekcyjne

- zalecane rury stalowe,

4.3. Parametry iniekcji

- ciśnienie: 0,5–50 b,
- zaczyn: cementowy z dodatkami bentonitu lub mikrowypełniaczy,
- kontrola: monitoring geodezyjny i czujniki przemieszczeń.

5. Zalety i ograniczenia

Zalety:

- precyzyjna kontrola deformacji,
- możliwość działania w czasie rzeczywistym,
- minimalna ingerencja w otoczenie.

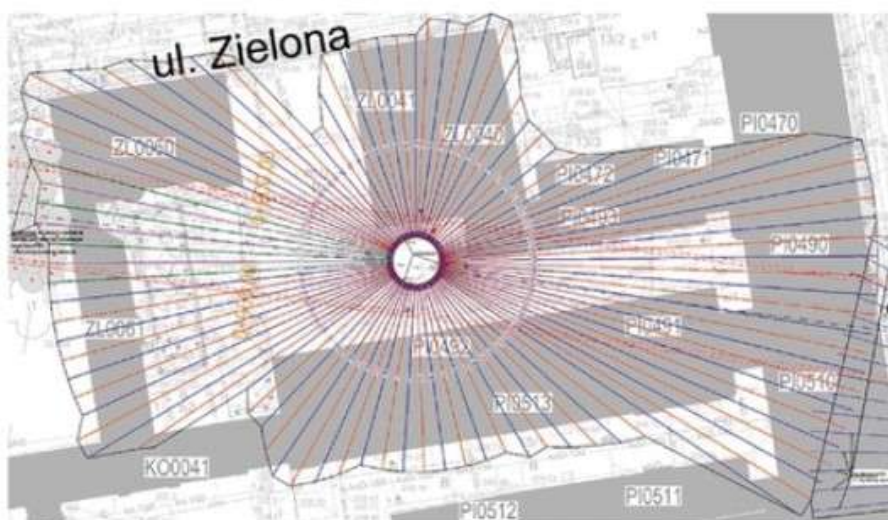
Ograniczenia:

- wysokie koszty,
- wymaga zaawansowanego monitoringu,
- ograniczona skuteczność w gruntach przepuszczalnych.

6. Wnioski

Iniekcja kompensacyjna to zaawansowana technika geotechniczna, która znacząco zwiększa bezpieczeństwo tunelowania w warunkach miejskich. Jej skuteczność zależy od właściwego zaprojektowania systemu, monitoringu oraz doświadczenia zespołu realizującego. W dobie intensywnej urbanizacji metoda ta staje się standardem w projektach tunelowych.

www.keller.com.pl



Ryc. 6. Przykładowy szyb i rozmieszczenie rur iniekcyjnych