

Andrzej KUBAŃSKI, Kazimierz SPYRA
Zakład Inżynieryjny „GEOREM”, Sosnowiec

ZASTOSOWANIE INIEKCJI STRUMIENIOWEJ W GEOINŻYNIERII

Streszczenie. Poczynając od pierwszych w Polsce wdrożeń iniekcji strumieniowej, przedstawiono przykłady zastosowań iniekcji strumieniowej do profilaktycznego wzmocnienia piasków w stropie drażonych wyrobisk górniczych, osłony wykopów budowlanych i zmiany sposobu posadowienia starego mostu. Zasygnalizowano kierunki badań nad udoskonaleniem technologii i konstrukcyjnych własności mikropali iniekcyjnych.

JET GROUTING APPLICATION IN GEOENGINEERING

Summary. Examples of jet grouting technology application in geoen지니어ing are presented in the paper. The new technology was used for preventive sand strengthening in the ceiling of bored headings, for excavation casing and for changing the method of old bridge foundation. Trends of the test for improving jet grouting technology and structural properties of micro piles are indicated in this paper.

1. Wprowadzenie

Technologia iniekcji strumieniowej ma swe korzenie w Wielkiej Brytanii. Metodę tę zastosowała po raz pierwszy w latach pięćdziesiątych brytyjska firma Cementation Ltd. tworząc przegrodę iniekcyjną w ramach projektu zapory w Pakistanie. W roku 1965 metoda trafiła do Japonii, gdzie doczekała się szerszego wdrożenia i istotnego rozwoju, a w 1970 r. została tam opatentowana. W połowie lat siedemdziesiątych technologia iniekcji strumieniowej powróciła do Europy Zachodniej i tutaj szybko się rozprzestrzeniła. Technologia ta w świecie nosi angielską nazwę „jet grouting”.

W Polsce początkowo określało się ją iniekcją ciśnieniowo- strumieniową, a obecnie nosi nazwę iniekcji strumieniowej.

Polskie wdrożenie praktyczne prowadzono niezależnie w dwóch ośrodkach naukowych. Zespół Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie prowadził prace wdrożeniowe według japońskiego schematu technologicznego, na potrzeby gospodarki wodnej. Drugi zespół pracował w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Budownictwa Górniczego BUDOKOP w Mysłowicach, przygotowując wdrożenie w wyrobiskach górniczych. Oba zespoły równocześnie w 1985 roku swe prace wdrażały na poligonie udostępnionym na trasie pierwszego, drążonego metodą górniczą, odcinka warszawskiego metra, na stadionie w rejonie stacji Politechnika. Odstonięcie w wyrobisku metra efektów naszych zastosowań potwierdziło zalety iniekcji strumieniowej. Niestety, za efektami nie poszły żadne działania organizacyjne.

Prace drugiego zespołu, którym współautor ma przyjemność kierować do chwili obecnej pomimo zmian organizacyjnych związanych z transformacją gospodarczą, przebiegają w dalszym ciągu, z ukierunkowaniem na zastosowanie w trudnych warunkach przy remontach obiektów budowlanych i w wyrobiskach podziemnych.

Specyfika przestrzenna i warunki bezpieczeństwa wyrobisk podziemnych oraz brak możliwości pozyskania sprzętu z krajów, w których iniekcja strumieniowa była wdrożona znacznie wcześniej powodowała, że zespół opracował własne rozwiązania techniczno-technologiczne oraz receptury środków wiążących.

Iniekcja strumieniowa polega na urabianiu wysokoenergetycznym strumieniem pobocznicą otworu wierconego w gruncie, z jednoczesnym wprowadzeniem zaczynu wiążącego.

W technologii tej energia iniektu niszczy naturalną strukturę gruntu dzięki zastosowaniu dużych ciśnień rzędu od 6-50 MPa. Zmieniony zostaje skład granulometryczny gruntu, a jego część zostaje wyniesiona na powierzchnię. Obracając i jednocześnie podciągając dyszę tworzy się regularną strefę gruntobetonowego pala.

Promień tego walca można określić ogólnym równaniem:

$$h = f(H, d, L, P, V)$$

gdzie: h – promień pala, a jednocześnie głębokość urabiania strugi,

H – ciśnienie hydrauliczne,

D – średnica dyszy,

L – odległość dyszy od skały,

P – wytrzymałość skały na pęknięcie,

V – prędkość poruszania się dyszy.

Przy czym

$$H = \frac{h}{d_1}$$

gdzie: d_1 – średnica krateru.

Spośród wyżej wymienionych wielkości najistotniejszymi dla szczelinowania skał luźnych strumieniem cieczy są: średnica dyszy, ciśnienie tłoczenia i prędkość podnoszenia dysz iniekcyjnych. W praktyce wielkości te mają następujące wartości:

- średnica dyszy (d) 1,5 do 2,5 mm,
- ciśnienie tłoczenia (p_t) 6 - 50 MPa,
- prędkość podnoszenia dyszy iniekcyjnej (V) 0,01 – 0,02 m/s.

Proces urabiania skał opisują przede wszystkim dwa parametry: głębokość urabiania h i energia urabiania E_u .

Jak wynika z przedstawionych powyżej zależności, na końcowy efekt zabiegu iniekcyjnego ma wpływ wiele czynników i zależnie od celu głównego możemy wpływać na poszczególne parametry techniczne.

W wyrobiskach podziemnych lub przy pracach remontowych fundamentów starych budowli mamy do czynienia z ograniczoną przestrzenią. Trudno wprowadzić duże maszyny o wysokiej energii, stąd wynika konieczność szukania innych rozwiązań na powiększenie promienia zasięgu iniekcji. Prace przebiegały nad zbliżeniem dyszy do poboczniczy otworu i jednoczesnym wykorzystaniem właściwości iniekcji klasycznej w celu zwiększenia promienia penetracji.

Jednym z rozwiązań jest konstrukcja iniektora z wysuwanymi pod wpływem oporu hydraulicznego dyszami, co pozwala na kilkunastocentymetrowe zwiększenie średnicy zasięgu. Innym rozwiązaniem zastosowanym z powodzeniem jest wykorzystanie odcinka świda spiralnego, na którego rdzeniu umieszczone są dysze, a świdrem wykonuje się ruchy odrotne do procesu wiercenia. Ostatnio wdrożone zostało rozwiązanie z umieszczeniem dysz również na skraju spirali świda. Kilkakrotnie zastosowano dławienie swobodnego zazwyczaj wypływu mieszaniny gruntu i iniektu z otworu, wywierając ciśnienie na pobocznicę wydrążonego strumieniem otworu. Rozwiązanie to pozwoliło na dodatkowe powiększenie promienia oddziaływania iniekcji.

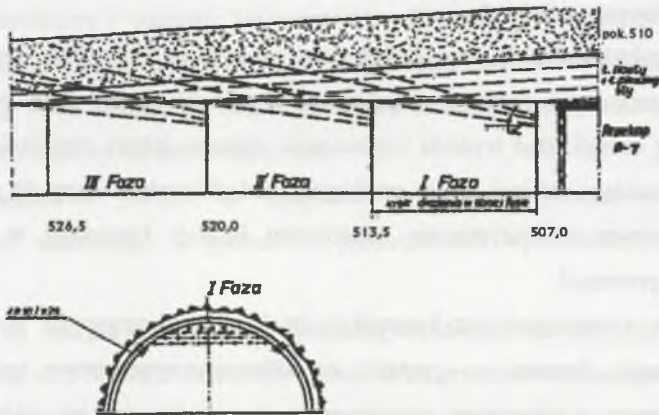
2. Przykłady zastosowania

2.1. Zabezpieczenie w wyrobiskach górniczych

W 1988 r. w wyrobiskach dwóch kopalń wdrożono jednocześnie iniekcję strumieniową, która wcześniej w 1985 r. została dwukrotnie sprawdzona na poletku doświadczalnym w trakcie drążenia warszawskiego metra.

W pierwszym przypadku, opierając się na przekrojach geologicznych i mapach górniczych, wyznaczono na trasie dwóch przekopów odcinki, na których należy zastosować w stopie i ociosach iniekcję środków wiążących w celu utrzymania stateczności piasku podsadzkowego.

Aby wytworzyć płaszcz iniekcyjny nad przodkiem, wiercono skośnie w górę 20 – 50 otworów na głębokość 10,0 m z jednoczesnym iniekowaniem strumieniowym w trakcie wyciągania przewodu. Iniekcję prowadzono ciśnieniem na dyszy iniektora 17,0 MPa przy wydatku 20 dm³/min (rys.1).



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów iniekcyjnych w trakcie drążenia przekopów
Fig. 1. Spacing of bore-holes during cross-cutting

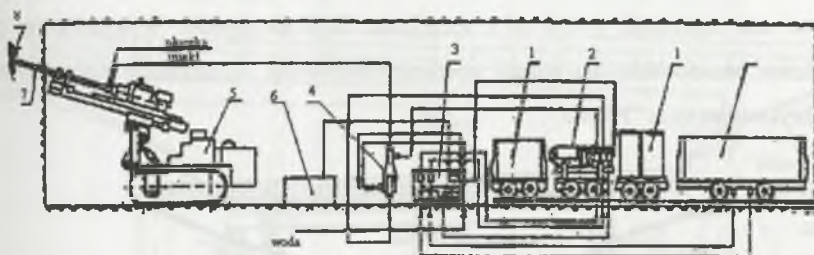
Jako scalającego cząstki mineralne iniektu użyto mieszaniny krzemianu – sodowego o podwyższonym module i koagulantu W-6 występującego w postaci wodnej emulsji. Czas wiązania tej kompozycji nie przekraczał 20 min.

Po związaniu i utwardzeniu scalonego iniekcyjnie materiału podsadzkowego przebadane próby charakteryzowały się następującymi wartościami:

- wytrzymałość na ściskanie R_c – 1,7 MPa,
- wytrzymałość na rozciąganie R_r – 0,46 MPa,
- ciężar objętościowy - 1,86 g/cm³.

Grubość płaszczu iniekcyjnego nad drażonym przekopem ustalono na jeden metr przy założeniu drażenia przekopu kombajnem. Drażono jednak z zastosowaniem materiałów wybuchowych o kroku zabioru 2,0 m. Dwa razy nastąpiło przerwanie płaszczu iniekcyjnego, kiedy to wysypała się ograniczona ilość gruntu nie powodująca większych perturbacji.

Dla sprawnego i bezpiecznego wdrożenia zabiegu iniekcji strumieniowej wykonano ciąg technologiczny, którym realizowano wszystkie niezbędne operacje wiertniczo-iniekcyjne, jak również utylizację zrzutów (rys. 2).



Rys. 2. Ciąg technologiczny do iniekcji strumieniowej w wyrobiskach korytarzowych

1 – iniekcyjny ciąg technologiczny, 2 – wóz pompowy, 3 – pulpit sterowniczy, 4 – mieszalnik przepływowy, 5 – samojezdne urządzenie wiertniczo-iniekcyjne, 6 – zbiornik wody, 7 – przewód wiertniczy, 8 – łącznik iniekcyjny

Fig. 2. Technical line for jet grouting in dog headings

1 - jet grouting technical line, 2 - pump wagon, 3 - console, 4 - flow mixer, 5 - self propelled boring-injection system, 6 - water tank, 7 - boring line (pipe), 8 - injection link

Drugi z przykładów zastosowania iniekcji wykonano w celu zmodyfikowania zalegających w stropie skrzyżowania wyrobisk, piasków podsadzkowych o miąższości 12,0 m suchych i podgrzanych. Niewielki otwór w obudowie stropu powodował wysypywanie piasku do wyrobiska. Cały rejon przebudowywanego skrzyżowania pozwalał na wykonywanie tej czynności ze średnim postępem 0,1 m /dobę.

Iniekcję strumieniową prowadzono w sposób przedstawiony w poprzednim przykładzie. Czas, kiedy można było bezpiecznie prowadzić prace, wynosił 2 – 4 godzin/dobę. Wykonana iniekcja poprzez 263 otwory przy zużyciu 101 000 dm³ krzemianu sodowego pozwoliła na przebudowę skrzyżowania do wymiarów obudowy V-25/8 przy postępie 1,0 m /dobę.

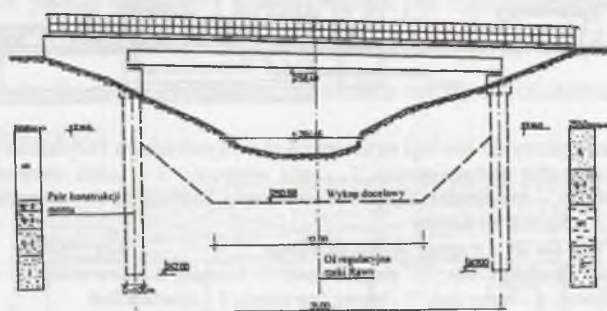
2.2. Zabezpieczenie wykopów budowlanych

Od kilkunastu lat prowadzone są prace związane z przebudową koryta płynącej przez Katowice rzeki Rawy. W omawianej sytuacji należało wykonać wykop dla nowego koryta pod mostem drogowym.

Zasadniczą technologią osłony obiektów - w złożonych warunkach geotechnicznych - jest stosowanie ścianek szczelnych z grodzic stalowych. Ograniczona wysokość przestrzeni pod mostem, jak również wpływ drgań wykluczyły zastosowanie ścianki stalowej. Podjęto więc decyzję wprowadzenia techniki iniekcyjnej do modyfikacji własności gruntu wokół wykopu technologicznego.

Pierwsze zastosowanie nastąpiło po mostem drogowym w ciągu ulicy Bagiennej w Katowicach.

Most ten ma szerokość 144,0 m i rozpiętość 21,0 m (rys.3). Wykonano go jako jednoprzęsłowy posadowiony na palach wielkośrednicowych. Konstrukcję nośną stanowią belki prefabrykowane typu "Płońsk".



Rys. 3. Przekrój koryta rzeki przed przebudową

Fig. 3. River-bed section before reconstruction

Wykop budowlany w celu posadowienia żelbetowej konstrukcji obudowy nowego koryta rzeki musiał być wykonany ze skarpami o nachyleniu bardziej stromym niż 1:1. Uzyskanie takiego nachylenia w miejscowych warunkach gruntowych nie jest możliwe ze względu na odśnieżenie pobocznic pali wielkośrednicowych.

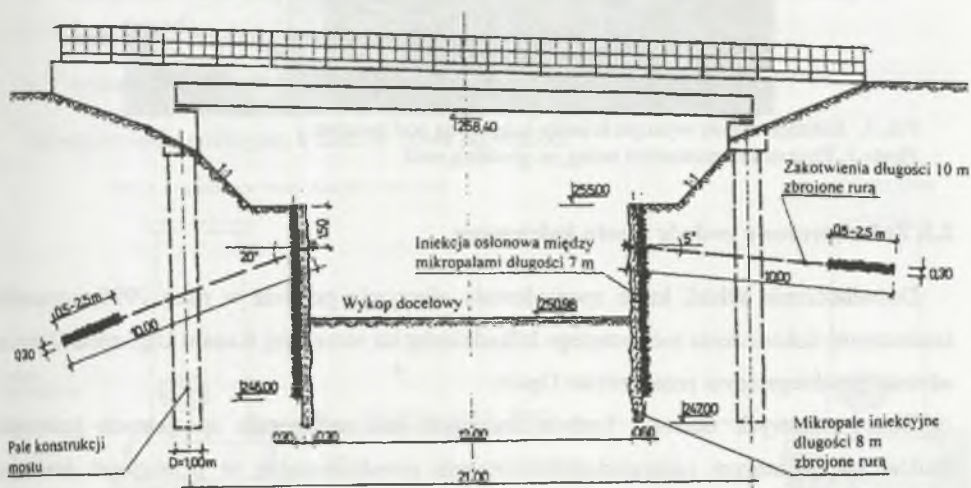
Poziom, z którego należało rozpocząć wykonywanie prac zabezpieczających, pozwalał na dysponowanie prześwitem wysokości 3,0 m pomiędzy terenem a belkami nośnymi mostu. Jediną realną alternatywą stało się zabezpieczenie wykopu budowlanego metodą iniekcyjnej modyfikacji własności gruntu, za pomocą małogabarytowego sprzętu wiertniczego.

W 1994 r. roku wykonano projekt zabezpieczenia wykopu za pomocą mikropali iniekcyjnych kształtowanych techniką iniekcji strumieniowej, z zastosowaniem zbrojenia rurowego. Jako uzupełnienie konstrukcji ścianki zaprojektowano drugi rząd otworów z iniekcją cementową bez zbrojenia.

W celu dodatkowego powiązania ścianki oporowej z gruntem poza rzędem pali nośnych mostu zaprojektowano kotwy połączone belką oporową na całej długości ścianki (rys. 4).

Zaprojektowana oporowa ścianka iniekcyjna zabezpieczała wykop o głębokości 4,5 m. Składała się z 462 mikropali iniekcyjnych długości 8,0 m oraz 451 walców iniekcyjnych rozmieszczonych pomiędzy mikropalami w odstępie osiowym 0,75 m, długości 7,0 m. Przewidziano 125 kotew gruntowych o długości 10,0 m.

Realizacja zaprojektowanych prac trwała od listopada 1994 r. do kwietnia 1995 r.



Rys. 4. Przekrój obudowy wykopu
Fig.4. Section of excavation casing

Kotwy gruntowe wykonano wiertnicą, a buławę o długości około 3,0 m kształtowano dyszami iniekcyjnymi.

Głowice kotwi gruntowych połączono belką oporową 1,5 m poniżej poziomu wiercenia mikropali. Całkowita długość ścianki dla obydwu brzegów rzeki wyniosła 337,0 m przy głębokości wykopu 4,5 m. Sprawdzenie rozwiązania na jednym obiekcie pozwoliło po licznych usprawnieniach na ochronę stateczności jeszcze dwóch mostów w okresie do połowy 1999 r.



Fot. 1. Zabezpieczenie wykopu ścianką iniekcijną pod mostem
Photo 1. Excavation protection using jet grouting wall

2.3. Zabezpieczenie podpór mostu kolejowego

Doświadczenie szkód, które spowodowała olbrzymia powódź w roku 1996, wymusiło konieczność dokończenia rozpoczętego kilkadziesiąt lat wcześniej Kanału Ulgi rzeki Odry na odcinku przebiegającym przez miasto Opole.

Budowa nowych budowli hydrotechnicznych nie nastęczała specjalnych trudności. Problemem, z którym najprawdopodobniej nie poradzili sobie w przeszłości ówczesni gospodarze Opola, było przejście korytem Kanału Ulgi pod mostem kolejowym na ruchliwym szlaku Gliwice – Wrocław. Most został zbudowany w końcu dziewiętnastego wieku na przyczółkach i ośmiu filarach posadowionych na ruszcie drewnianym.

Konstrukcję nośną mostu o długości 132,0 m stanowią swobodnie podparte przęsła blachownicowe, oparte na dwóch przyczółkach i ośmiu filarach.

Podłoże fundamentowe stanowią przede wszystkim piaski średnie, pospółki, zwietrzlina gliniasta i margle. Rzędna posadowienia wynosi około 149,60 m, natomiast konieczna rzędna pogłębionego dna nowego koryta Kanału Ulgi 147,40 m.

Projektowany wykop nowego kanału spowodowałby odślonięcie gruntu zalegającego pod stopami przyczółków i filarów, co zagrażałoby jego posadowieniu.

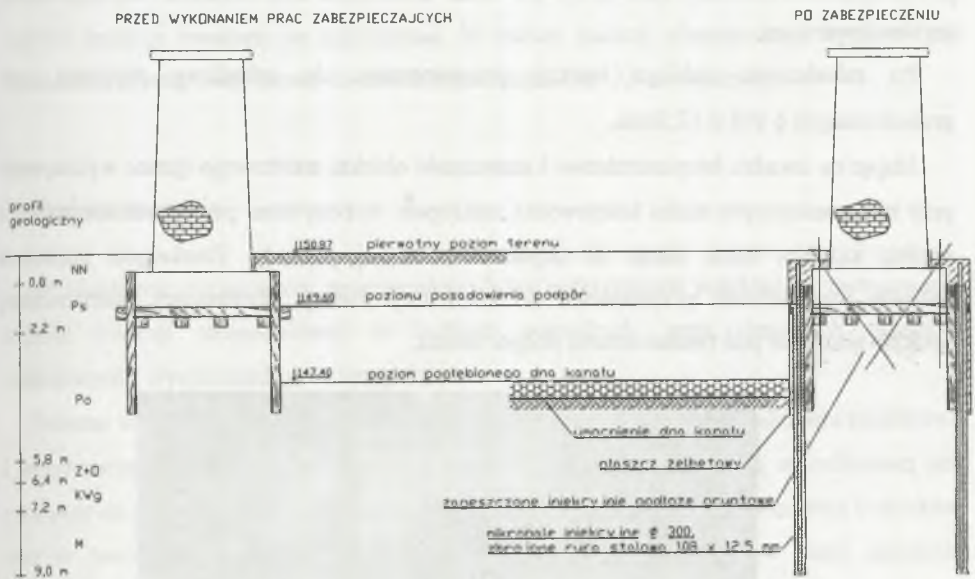
Rozpatrywano kilka różnych rozwiązań przeprowadzenia pogłębienia, łącznie z wyburzeniem mostu i zbudowaniem nowego, ale one jednak nie wytrzymały analizy kosztów bezpośrednich i społecznych.

Zdecydowano się na rozwiązanie znane z geoinżynierii, polegające na wzmocnieniu podłoża gruntowego mikropalami iniekcijnymi oraz iniekcją zaczynów wiążących bezpośrednio pod stopy fundamentów.

Zakres prac obejmował wykonanie następujących robót:

- zabezpieczenie filarów i przyczółków mostu poprzez wykonanie szczelnej palisady z mikropali ϕ 300 mm wokół podpór, kształtowanych metodą iniekcji strumieniowej „jet grouting”;
- wzmocnienie gruntu pod stopami fundamentowymi, przy zastosowaniu iniekcji cementowej;
- osadzenie kotew prętowych w celu powiązania zbrojenia wieńca żelbetowego;
- wykonanie wieńca – opaski żelbetowej wieńczącej pale;
- wykonanie płaszcza żelbetowego w części nadziemnej palisady.

Zabezpieczeniu podlegało 8 filarów i dwa przyczółki.



Rys. 5. Przekrój koryta kanału przed i po budowie

Fig. 5. Channel-bed section before and after reconstruction

Sporządzona na podstawie odkrywek inwentaryzacja posadowienia obiektu mostowego pozwoliła na ustalenie technicznych warunków prowadzenia robót iniekcyjnych.

Na filarach zamontowano punkty wysokościowe (repery) w ilości 3 szt. na każdym z filarów oraz dokonano bazowego pomiaru geodezyjnego.

Wiercenie prowadzono przy użyciu wiertnic typu MWG-1. Otwory służące formowaniu mikropali wiercono do docelowej głębokości przy założeniu zagłębienia ich w podłożu marglistym na odcinku 1,0 m. W trakcie wiercenia napotymano liczne przeszkody w postaci

drewnianych rusztów i rygli, stanowiących elementy konstrukcyjne palisady drewnianej oraz stalowych elementów łączących.

Po osiągnięciu żądanej głębokości otworu przystępowano do zabiegu formowania mikropali. Właściwy proces formowania buław mikropali iniekcyjnych odbywał się strumieniem o dużej energii kinetycznej z dysz na przewodzie wiertniczym.

Operację formowania mikropali prowadzono z dna otworu do jego wierzchu, przy szybkości podnoszenia dysz monitora około 1,0 m/min i obrotach około 10 n/min.

Ciśnienie iniekcji mierzone na króćcu tłocznym pompy kształtowało się na poziomie 12 MPa.

Tworzywo wiążące stanowił zaczyn cementowy o gęstości kontrolowanej wagą Baroida $\rho = 1,55 \pm 1,60 \text{ g/cm}^3$, sporządzany z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R w mieszalniku szybkoobrotowym.

Po zakończeniu zabiegu iniekcji przystępowano do zabudowy zbrojenia z rur grubościennych $\phi 108 \times 12,5 \text{ mm}$.

Mając na uwadze bezpieczeństwo i stateczność obiektu mostowego (prace wykonywano przy nieograniczonym ruchu kolejowym), mikropale wykonywano po 2-3 szt. na przemian wzdłuż każdego boku, dążąc do uzyskania szczelnej palisady. Zamknięcie pierścienia palisady warunkowało przystąpienie do klasycznej iniekcji cementowej, wzmacniającej podłoże gruntowe pod fundamentami podpór mostu.



Fot. 2. Mikropale pod podporą mostu
Photo 2. Micro piles under bridge support

Wzmocnienie gruntu pod stopami polegało na:

- wierceniu otworów ϕ 43 mm przez stopy fundamentowe, na przemian otwory pionowe i pod kątem 25° do pionu, w rozstawie co 1,0 m;
- wykonaniu zabiegu iniekcji przy wykorzystaniu uszczelniaczy otworowych.

Medium iniekcyjne stanowił zaczyn cementowy o parametrach jak dla formowania mikropali. Iniekcja prowadzona była pojedynczo w poszczególnych otworach. Pozostałe otwory iniekcyjne stanowiły wentyle bezpieczeństwa i jednocześnie pozwalały na kontrolę rozchodu zaczynu cementowego. Iniekcję wykonywano w 12-godzinnych odstępach czasowych pozwalających na wstępne związanie cementu. Ostatnim etapem przeprowadzanych zabiegów iniekcyjnych było dotłoczenie zaczynu cementowego do poszczególnych otworów pod ciśnieniem max. 0,5 MPa. Przy wzroście ciśnienia do tej wartości iniekcję uważano za zakończoną. W trakcie iniekcji obserwowano wypływ spod fundamentu czystej wody nawet do chwili wtłoczenia około $3,0 \text{ m}^3$ zaczynu.

3. Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono kilka praktycznych przykładów zastosowania techniki iniekcji strumieniowej w trudnych warunkach, przy remontach obiektów budowlanych i wyrobiskach podziemnych.

Zebrane na podstawie realizacji kilkuset tematów iniekcyjnych doświadczenia projektowe i wykonawcze potwierdziły, że sposób kształtowania mikropali iniekcją strumieniową jest przydatny do wykonywania obudowy wykopów technologicznych, zabezpieczenia budynków oraz w pracach hydrotechnicznych. Osiągnięte efekty potwierdziły w pełni założenia projektowe, a spokojna realizacja zabiegów iniekcyjnych dla różnych obiektów nie spowodowała żadnych konfliktów interesów zainteresowanych stron.

Bieżące prace projektowe i wykonawcze powodują powstawanie licznych wątpliwości, które można rozwiązać tylko w trakcie prac naukowo-doświadczalnych. Prace prowadzone na poligonie zakładu zmierzają do stworzenia modelu obliczeniowego wymiarowania pali strumieniowo-iniekcyjnych. Określenia zależności nośności pala od czynników technologicznych zabiegu, takich jak: średnica otworu wiertniczego, ciśnienie iniekcji, prędkość formowania pala, zbrojenie (liczba i średnica prętów), którymi w zależności od potrzeb mogą sterować projektant i wykonawca.

LITERATURA

1. Bakoš M.: Horizontálná trysková injektaž ako špeciálne stavebné opatrenie používané pri výstavbe tunelov, Konferencja, The Rudiment of Modern Technology of Construction, High Tatras, Slovakia, 1997, 78-80.
2. Bzówka J., Spyra K.: Wpływ różnych czynników na nośność pali jet-grouting, XLVI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PziTB, Krynica, t. 3, 2000, 19-26.
3. Kubański A., Leszczyński J.: Iniekcynna modyfikacja podłoża gruntowego pod obiektami inżynieryjnymi, Konferencja Naukowo-Techniczna Powódź' 97, Wisła 1998.
4. Miłkowski W.: Metoda iniekcji ciśnieniowo-strumieniowej, Konferencja: „Iniekcyjne uszczelnianie i wzmacnianie gruntów i skał”, Jadwisin' 80, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1980.
5. Bzówka J., Kubański A., Pieczyrak J.: Wpływ zbrojenia na nośność mikropali formowanych techniką ciśnieniowo-strumieniową. XLIII Konferencja Naukowa „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”. Geotechnika t. VIII, Poznań-Krynica 1997.
6. Kubański A.: Techniczno-organizacyjne uwarunkowania zabiegów iniekcyjnych. Symposium na temat „Budowa tuneli metra w Warszawie metodą podziemną przy zastosowaniu tarczy”. Mysłówice 1986 .
7. Kubański A., Lelonek M.: Aktualny stan i kierunki rozwoju metod, środków i sprzętu do prowadzenia zabiegów iniekcyjnych w górotworze. Konferencja Naukowo-Techniczna „Budownictwo górnicze i podziemne w nowych warunkach gospodarowania”. Kokotek k. Lublińca 1991.
8. Kubański A.: Iniekcynna profilaktyka geotechniczna. Międzynarodowa Konferencja „IV Szkoła Geomechaniki” cz. I, Gliwice – Ustroń 1999.
9. Kubański A.: Obudowa wykopu z mikropali iniekcyjnych pod pogłębiane koryto rzeki Rawy w Katowicach. Inżynieria i Budownictwo 1997, nr 12, 631-633.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Bohdan ZADROGA

Abstract

In the paper the examples of application in geoen지니어ing jet grouting technology are presented. The new technology was used for preventive sand strengthening in the ceiling of bored headings, for excavation casing and for changing foundation method of old bridge. In this paper the trends of the test for improving jet grouting technology and structural properties of micro piles are indicated.