

ZASTOSOWANIE WYBRANYCH TECHNOLOGII USZCZELNIANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W BUDOWNICTWIE HYDROTECHNICZNYM – WIELOLETNIE DOŚWIADCZENIA PRGW

KUŚ R.¹, SŁOWIKOWSKI D.¹

¹ Przedsiębiorstwo Robót Geologiczno-Wiertniczych G. Janik R. Kuś s.j., ul. Nowopogońska 4, 41-200 Sosnowiec
e-mail : roman_k@prgw.com.pl ; d.slowikowski@prgw.com.pl

Streszczenie : Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych znalazło szerokie zastosowanie w realizacji inwestycji hydrotechnicznych. Na szeroką skalę stosowane są różnego rodzaju roboty bezwykopowe w celu uszczelnienia i wzmocnienia gruntu, wałów oraz remontów obiektów hydrotechnicznych. Najczęściej stosowane są technologie DSM (Wgłębne Mieszanie Gruntu), WIPS (Wibracyjnie Iniekowana Przesłona Szczelinowa), Iniekcja niskociśnieniowa i strumieniowa, wibroflotacja. Często stosowaną praktyką jest łączenie technologii w celu rozwiązania bardziej złożonych problemów geotechnicznych. Doświadczenia PRGW wynikające z 20 letniego wykonawstwa przesłon hydroizolacyjnych, wzbogacone doświadczeniami z powodzi 1997 oraz 2010 pozwalają na praktyczną ocenę stosowanych technologii zabezpieczeń przeciwpowodziowych. Referat przedstawia praktyczne zastosowania zróżnicowanych technologii na wybranych przykładach realizacji projektów.

Słowa kluczowe: bariery hydroizolacyjne, zabezpieczenia przeciwpowodziowe, specjalne roboty geotechniczne

Abstract: Execution of special geotechnical works are popular in hydrotechnical engineering. Very popular are various types of trenchless method dedicated to seal, consolidation and strengthen of soil, embankments and hydrotechnical engineering objects repair. The most commonly used are the DSM (Deep Soil Mixing) technologies, WIPS (Vibro Injected Thin Wall), low-pressure injection, jet-grouting and vibro-flotation. Often the practice is to combine technologies to solve complex geotechnical problems (e.g. combining DSM and high pressure injection). Experience PRGW under 20 years of performance waterproofing barrier, as well as experiences of flood in 1997 and 2010 year show practical evaluation of hydroinsulation technology. The paper show practical application of many types of technology dedicated different problems solving.

Keywords : hydroisulation barrier, flood protection, special geotechnical works

Wstęp

Negatywne doświadczenia wyniesione z powodzi w latach 1997 oraz 2010 zintensyfikowały działania naprawcze jednostek administracji publicznej powołanych do administrowania i zarządzania obiektami hydrotechnicznymi, zabezpieczeń przeciwpowodziowych oraz melioracyjnych w Polsce. Działania te prowadzone są w szerokim wachlarzu, począwszy od badań i oceny stanu istniejących budowli, poprzez remonty i modernizację tych budowli, aż po budowę nowych (nowe odcinki wałów przeciwpowodziowych, budowę nowych zbiorników retencyjnych itp.). Skala tych inwestycji jest również bardzo zróżnicowana i wynika z przyjętych priorytetów, od lokalnych krótko odcinkowych remontów poprzez średnioskalowe remonty i budowy, skończywszy na dużych regionalnych inwestycjach, jak np.: „Kompleksowe zabezpieczenie przeciwpowodziowe Żuław” czy inwestycje związane z budową Wrocławskiego Węzła Wodnego. Trudno tutaj pominąć jedną z największych inwestycji hydrotechnicznych w Polsce oraz w Europie, jaką będzie budowa Zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz.

Przeważająca większość tych inwestycji, poza typowymi robotami budowlanymi inżynierskimi wymaga wykonania uszczelnienia podłoża, a także remontowanych obiektów hydrotechnicznych.

Referat przedstawia doświadczenia z wybranych realizacji robót Przedsiębiorstwa Robót Geologiczno Wiertniczych (PRGW) w ciągu ostatnich 20 lat popartych wykonaniem ponad 1 mln m² przesłon hydroizolacyjnych.

1. Cel robót uszczelniających

Podstawowym celem projektowania i wykonywania robót uszczelniających jest ograniczenie filtracji wód w podłożu lub w korpusie obiektów hydrotechnicznych. W zależności od rodzaju i konstrukcji obiektu hydrotechnicznego, jego przeznaczeniu (np. obiekt stale piętrzący wodę lub przeciwpowodziowy) wymagane są zróżnicowane parametry techniczne zabezpieczenia przeciwfiltracyjnego. Podstawową formą zabezpieczeń przeciwfiltracyjnych są poziome lub pionowe przesłony hydroizolacyjne. W zależności od przeznaczenia wykonywane są jako przesłony dogłębione do naturalnej warstwy nieprzepuszczalnej (zupełne) lub zawieszone (niezupełne), wydłużające drogę filtracji wód podziemnych.

Dodatkową, ale równie ważną funkcją jaką pełnią przesłony przeciwfiltracyjne w podłożu oraz korpusie wałów i zapór ziemnych jest poprawa ich stateczności. Jest to istotne w przypadku obiektów ochrony przeciwpowodziowej, w ostatnich latach szczególnie narażonych na wezbrania rzek przekraczających ich maksymalne parametry, dla których zostały zaprojektowane.

Innym celem wykonywania prac uszczelniających, bardzo często spotykanych w przypadku remontów śluz, przepustów i zapór, jest likwidacja zjawisk sufozyjnych, powstałych w skutek wieloletniego użytkowania obiektów. Najlepiej sprawdzają się w tym przypadku technologie iniekcyjne (niskociśnieniowe), pozwalające w sposób precyzyjny dogłębić i doszczelnić podłoże pod istniejącymi obiektami.



Fig. 1 Przykład uszczelnienia i wypełnienia pustek sufozyjnych. Prace iniekcyjne prowadzone w warunkach bardzo wysokiego ciśnienia wód porowych. Kanał Gliwicki.

2. Wybrane wymagania stawiane przesłonom hydroizolacyjnym

W zależności od funkcji jaką mają pełnić przesłony oraz technologii ich wykonania stosowane są zróżnicowane wymagania co do ich parametrów użytkowych. Podstawowym parametrem jest szczelność, w praktyce określana współczynnikiem filtracji w stanie nasycenym (symbol k), którego wartość powinna kształtować się w zależności od potrzeb w przedziale $k \sim 10^{-6}$ do 10^{-9} m/sek., co odpowiada w klasyfikacji hydrogeologicznej gruntem słabo i nieprzepuszczalnym. W przypadkach szczególnych oczekiwane jest osiągnięcie niższych wartości współczynnika filtracji, ale należy zwrócić uwagę, że weryfikacja i pomiary kontrolne tak niskich wartości jest bardzo trudna. W praktyce PRGW, najniższe wartości współczynnika filtracji przesłony (rzędu 10^{-10} ÷ 10^{-11} m/sek) stwierdzone badaniami polowymi sondą norweską GeoN (badania wykonane przez IMGW OTKZ) odnotowano dla przesłony wykonanej w technologii wgłębnego mieszania gruntu (DSM) przy użyciu spoiwa wykonywanego na bazie modyfikowanych ilów (Clayfill).

Innym ważnym parametrem użytkowym przesłon wykonywanych z zawieszin twardniejących jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. Najczęściej oczekiwaną wytrzymałością dla przesłon jest 300 ÷ 500 kPa, jednak należy pamiętać, że poza wytrzymałością mechaniczną przesłony, bardzo ważną jej cechą jest współpraca z gruntem otaczającym. Tak więc parametr ten powinien być

skorelowany i tak dobrany na etapie projektowania by przesłona poprawnie współpracowała z gruntem w czasie jej funkcjonowania, a przede wszystkim by przesłona elastycznie pracowała z odkształcającym się gruntem. Jest to bardzo ważne w przypadku obciążeń maksymalnych w trakcie ekstremalnych stanów wód. Przesłona wykonana z materiału sztywnego po przekroczeniu naprężenia granicznego ulega zniszczeniu i traci swoją szczelność, natomiast przesłona wykonana z materiału o własnościach sprężysto-plastycznych, po przekroczeniu granicznego naprężenia odkształca się plastycznie nie tracąc szczelności. Przykładem takiego rodzaju przesłony są przesłony wykonywane z udziałem spoiw na bazie naturalnych ilów, odpowiednio zmodyfikowanych.

Inną ważną cechą przesłony jest długowieczność, a przede wszystkim brak utraty szczelności i wytrzymałości na skutek cyklicznych zmian temperatury (zamarzanie) i wilgotności. Własność ta jest silnie uzależniona od rodzaju spoiwa. Spoiwa stosowane do uszczelniania i wykonywania przesłon gruntowych powinny charakteryzować się jednorodnym składem i brakiem sedymentacji. Sedymentacja spoiwa jest podstawową przyczyną braku odporności na zamarzanie w przypadku budowy przesłony w formie ścianek i rowów wypełnianych zawiesiną twardniejącą, jak również w przypadku technologii gdzie część gruntu zostaje usunięta i zastąpiona spoiwem (niektóre technologie z zastosowaniem szczelin ciągłych). Brak odporności na sedymentację spoiwa oraz brak wytrzymałości strukturalnej spoiwa w stanie ciekłym (spoiwo powinno charakteryzować się własnościami opisywanymi jako tzw. ciecz Binghama) powoduje jego „odchudzenie” w górnej części, a tym samym w trakcie twardnienia powstaje naddatek wody, która nie bierze udziału w wytworzeniu produktów hydratacji i pozostaje jako woda wolna zamknięta w strukturze przesłony. Kilukrotne cykle zmian temperatury w strefie przemarzania, potęgowane brakiem elastyczności struktury spoiwa powoduje starzenie się przesłony i jej kruszenie. Poniżej przedstawiono fotografię odsłonięcia wierzchniej warstwy takiej przesłony, po kilkuletnim cyklu zmian temperatury.



Fig. 2 Widok zniszczonej w wyniku zamarzania przesłony wykonanej w technologii WIPS z zastosowaniem spoiwa na bazie ubocznych produktów spalania.

3. Przegląd wybranych technologii uszczelniania podłoża gruntowego na podstawie doświadczenia PRGW

Uszczelnienie gruntu jak i przesłony hydroizolacyjne, w zależności od potrzeb oraz warunków gruntowych, dostępu do terenu ograniczeń przestrzennych wykonywane są w różnych technologiach. Większość z tych technologii jest znormalizowana i sklasyfikowana jako Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. W przypadkach bardziej skomplikowanych realizacji uszczelnienia wykonywane są w postaci połączonych technologii wzajemnie się uzupełniających. Rozwój metod i technologii wykonawczych z roku na rok dostarcza nowych rozwiązań, pozwalających coraz lepiej zaspokajać potrzeby rynku. Przykładem takich działań jest poprawa efektywności wykonywanych robót poprzez selektywne łączenie cech poszczególnych technologii w jeden pakiet, jak np. połączenie efektywności technologii iniekcji strumieniowej (Jet-Grouting) z efektywnością technologii głębokiego mieszania gruntu (DSM) funkcjonujące pod nazwą TOP-Jet. Poniżej przedstawiono charakterystyki i przykłady zastosowań wybranych rozwiązań technologicznych w praktyce.

3.1 Iniekcja niskociśnieniowa

Najdłużej stosowaną technologią przez PRGW jest iniekcja niskociśnieniowa, w literaturze międzynarodowej określana jako compaction grouting oraz permeation grouting. Jest to tym samym najlepiej zweryfikowana przez nas technologia, która oparła się z powodzeniem dwóm powodziom w roku 1997 oraz 2010. W odróżnieniu od iniekcji strumieniowej, polega ona na wprowadzeniu do gruntu poprzez specjalnie wykonany otwór wiertniczy spoiwa twardniejącego. W zależności od warunków gruntowych oraz uwarunkowań konstrukcyjno projektowych iniekcja prowadzona jest z określonym wydatkiem chwilowym spoiwa oraz ciśnieniem roboczym nie przekraczającym 3-5 MPa. Wydatek chwilowy jak i ciśnienie iniekcji powinny być dokładnie zoptymalizowane w celu uzyskania jak największego zasięgu iniekcji z otworu. Przy czym należy zwrócić uwagę, że istotną rolę w zasięgu iniekcji odgrywają parametry gruntowe. Jest to najlepsza metoda do wypełniania i doszczelniania zjawisk sufozyjnych jak i efektów bytowania zwierząt. W skrajnych przypadkach zasięg doszczelnienia rozluźnionego sufozyjnie gruntu sięga ponad 100m. W technologii tej wykonywane są także ciągłe przestrzennie poziome i pionowe przesłony hydroizolacyjne poprzez wykonywanie rzędowo serii otworów iniekcyjnych o rozstawie zapewniającym ciągłe wysycenie gruntu spoiwem. Ograniczeniem tej metody jest rodzaj spoiwa, które w stanie płynnym powinno charakteryzować się określonymi parametrami reologicznymi, a przede wszystkim udziałem co najmniej 80% frakcji poniżej 5 μ m.

Wśród wielu realizacji przykładem może być wykonanie doszczelnienia podłoża gruntowego pod zaporę zbiornika Kuźnica Wąreżyńska. Iniekcja wykonana spoiwem na bazie modyfikowanych ilów.



Fig. 3 Wykonanie pionowej przesłony jako uszczelnienie gruntu pod korpusem zapory zbiornika Kuźnica Wąreżyńska. Iniekcja wykonana spoiwem na bazie modyfikowanych ilów.

Innym ciekawym zastosowaniem technologii iniekccyjnej było wykonanie poziomej przesłony hydroizolacyjnej dla potrzeb zabezpieczenia wykopu budowlanego pod wieżowiec Prosta Tower w centrum Warszawy (wykop o max. gł. 17,6m). Celem zabudowanej przesłony na głębokości 30m w obrysie ścianki szczelinowej było ograniczenie dopływu wody do wykopu, zapewnienie stateczności dna wkopu ze względu na wypór wody oraz ograniczenie zasięgu odwodnienia do granic nieruchomości. Iniekcja wykonana była serią ponad 700 otworów pokrywających całą powierzchnię projektowanego wykopu. W efekcie uzyskano ograniczenie dopływu wody do wykopu o ponad 90% (3m³/h z wkopu o powierzchni ponad 800m² przy obniżeniu zwierciadła wody o 13m), całkowity brak obniżenia zwierciadła wód poza wykopem oraz stabilne i suche dno wykopu.

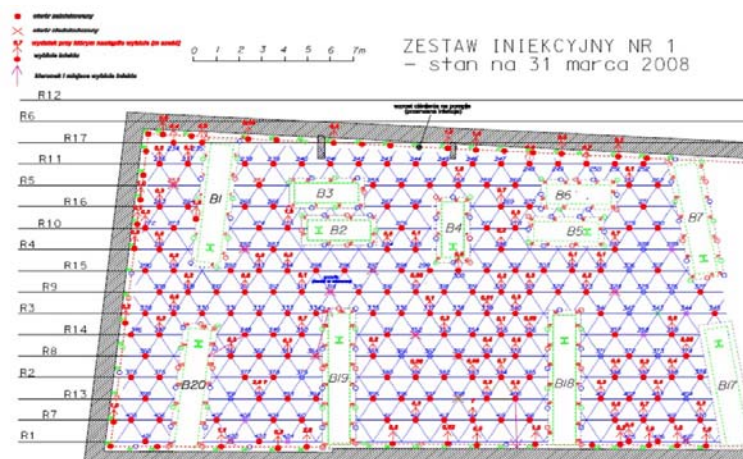


Fig. 4 Schemat powykonalawczy sieci otworów iniekcyjnych – pozioma przesłona hydroizolacyjna dla wieżowca Prosta Tower. Mapa przedstawia stan zaawansowania robót oraz podstawowe informacje o wydatku zainiekowanego spoiwa oraz obserwacjach prowadzonych w trakcie iniekcji.

3.2 Wgłębne mieszanie gruntu- DSM

Inną szeroko stosowaną w Polsce technologią jest wgłębne mieszanie gruntu. Rozróżniane jest mieszanie mokre (spoiwo podawane jest w formie zawiesiny wodnej) lub suche. Najczęściej stosowane jest w kraju mieszanie na mokro. Polega ona na mechanicznym zwierceniu gruntu bez wydobywania urobku na powierzchnię przy równoczesnym iniekowaniu spoiwa. W zależności od rodzaju gruntu, prędkości obrotowej mieszadła, a także prędkości pogrążania i wyciągania mieszadła wykonywany jest jeden lub dwa cykle pogrążania mieszadła, aż do uzyskania odpowiedniej homogeniczności mieszanki spoiwa z gruntem. Standardowe zużycie spoiwa wynosi około 20-27% objętości modyfikowanego gruntu. Przesłona powstaje w wyniku zabudowy palisady zachodzących na siebie kolumn. W praktyce wykonywane są w tej technologii przesłony do głębokości kilkunastu metrów. Na większych głębokościach należy liczyć się ze znacznymi trudnościami z wierceniem. Metoda jest ponadto bardzo wrażliwa na przeszkody występujące w gruncie jak głazy narzutowe, bruk morenowy, rzeczny itp.



Fig. 5 Wykonanie palisady DSM. Prawy wał Wisły w rejonie Niepołomic. Urządzenie Bauer RG16.



Fig. 6. Odsłonięcie palisady DSM. Prawy wał Warty. Kostrzyń n.Odrą.

3.3 Wibracyjnie iniekowana przesłona szczelinowa – WIPS

Innym typem przesłon hydroizolacyjnych stosowanych w hydrotechnice są przesłony powstające poprzez wypełnienie spoiwem szczeliny w gruncie. Szczeliny wykonywane są w formie rowów kopanych koparką lub w sposób ciągły urządzeniem o nazwie trencher. Odmianą tej metody są wąskie szczeliny o szerokości 15-20 cm wykonywane poprzez wwibrowanie do gruntu odpowiedniego kształtownika wyposażonego w zestaw dysz do podawania spoiwa. Wypełnianie spoiwem szczeliny wykonywane jest w trakcie wyciągania kształtownika do góry, co w połączeniu z odpowiednimi parametrami reologicznymi i tiksotropowymi spoiwa (spoiwo powinno posiadać cechy tzw. cieczy Binghamowskiej) zapobiega zaciskaniu się szczeliny. Ciągła przesłona w tej technologii powstaje poprzez wykonanie kolejnych zachodzących na siebie sztychów. Zaletą tej metody jest brak mieszania się spoiwa z gruntem i wodami porowymi co pozwala na stosowanie tej metody w gruntach o znacznym udziale substancji organicznej utrudniającej proces twardnienia spoiwa. W praktyce w tej metodzie wykonywane są przesłony do głębokości kilkunastu metrów. Jeżeli zachodzi konieczność wykonania głębszej przesłony w praktyce stosowane jest połączenie technologii WIPS z technologią iniekcji niskociśnieniowej. Do głębokości kilkunastu metrów wykonywana jest ciągła przesłona szczelinowa, a poniżej przesłona iniekcyjna, z uwzględnieniem odpowiedniej zakładki gwarantującej szczelność. Takie rozwiązanie stosowane było na wielu odcinkach modernizowanych wałów Wisły w woj. małopolskim, gdzie pozytywnie przeszło test powodzi 2010 r.



Fig. 7 Wykonanie przesłony w technologii WIPS poprzez kolejne wwibrowanie kształtownika połączone z iniekcją spoiwa od dołu ku górze.

3.4 Jet-grouting

Jedną z technologii związaną z użyciem znacznej energii jest iniekcja strumieniowa. Istnieje kilka odmian tej technologii występującej pod nazwą: 1) mono jet, 2) duble jet oraz 3) triple jet. W budownictwie hydrotechnicznym praktycznie znajduje zastosowanie tylko odmiana pojedyncza i to w ograniczonym zakresie ciśnień roboczych strumienia. Technologia duble i triple, polegające na wspomaganiu strumienia spoiwa dodatkowym strumieniem sprężonego powietrza lub sprężonego powietrza i wody, praktycznie nie są stosowane. Jest to spowodowane ich dużą ingerencją w środowisko gruntowe i ryzyko powstania niepożądanych zjawisk jak rozmycie lub rozluźnienie (głównie wałów lub zapór ziemnych). Metoda ta związana jest także z wprowadzeniem do gruntu znacznej energii strumienia spoiwa, którego zadaniem jest zniszczenie naturalnej struktury gruntu, częściowe jego wymieszanie i wyniesienie na powierzchnię. Skuteczność metody jest wprost proporcjonalna do ciśnienia roboczego strumienia. W geotechnice stosowane są ciśnienia 400 barów i więcej, jednak stosowanie takich ciśnień roboczych dla obiektów hydrotechnicznych jest ryzykowne. W praktyce projektowej przyjęto jako graniczne ciśnienie robocze 200 bar, jednak w praktyce wykonawczej nawet takie ciśnienie może spowodować nadmierną ingerencję. Obserwowano zjawiska „rozcięcia” skarpy wału w trakcie wykonywania przesłon w technologii jet grouting przy ciśnieniu poniżej 200 bar. Ze względu na te ograniczenia oraz duży koszt tej metody jest ona stosowana akcesorycznie jako uzupełnienie innych technologii, w miejscach trudno dostępnych.

3.5 TOP-Jet – połączenie wglębnego mieszania gruntu i iniekcji strumieniowej

Znacznie większa funkcjonalność obserwowana jest w przypadku połączenia technologii DSM oraz iniekcji strumieniowej. Połączenie mechanicznego mieszania gruntu ze spoiwem z zaletami mieszania hydraulicznego strumieniem spoiwa pod wysokim ciśnieniem daje bardzo dobre efekty. Technologia ta została po raz pierwszy zastosowana przez PRGW w grudniu 2011 roku na remontowanym odcinku wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie miejscowości Szczucin w woj. małopolskim. Metoda TOP-Jet pozwala na wykonanie kolumn o średnicach znacznie przekraczających zasięg mieszadła mechanicznego tworząc wokół strefę buforową dodatkowo wymieszanego gruntu. Dla przykładu kolumna wykonana mieszadłem o średnicy 800mm przy zastosowaniu dodatkowego strumienia spoiwa pod ciśnieniem 80-90 bar, pozwalała na wytworzenie homogenicznej kolumny o średnicy ~900-950 mm, znacznie skracając czas jej formowania (kolumna o dł. 10m formowana była około 7-9 min przy prędkości obrotowej mieszadła 60 obr./min). Palisada wykonana w tej technologii charakteryzuje się bardzo dobrym wskaźnikiem wymieszania oraz znacznie większą szerokością przesłony w stosunku do klasycznej technologii DSM. Bardzo pożądanym efektem metody jest powstawanie dobrze wymieszanej ze spoiwem strefy buforowej poza zasięgiem mieszadła mechanicznego, co pozwala na szczelne i bezinwazyjne dowiązanie przesłony do dowolnych elementów betonowych, wcześniej wykonanych przesłon czy też innych elementów konstrukcyjnych istniejących w gruncie.



Fig. 8 TOP-Jet. Połączenie klasycznego wglębnego mieszania (widoczne mieszadło) z urabianiem gruntu strumieniem spoiwa.



Fig. 9 Wykonanie kolumny TOP-Jet. Na fotografii zaznaczono zasięg mieszania mechanicznego grantu oraz znacznie większy zasięg mieszania strumieniem spoiwa.



Fig. 10 Odsłonięcie przesłony w formie palisady kolumn TOP-Jet. Widoczne charakterystyczne bruzdy na pobocznicach jako efekt urabiania gruntu strumieniem.

Wnioski

Zaawansowanie technologiczne, duży wachlarz dostępnych technologii w połączeniu z odpowiednimi parametrami technologicznymi spoiw pozwala na skuteczne i precyzyjne wykonywanie robót uszczelniających.

Wprowadzanie na rynek spoiw wykonywanych na bazie surowców naturalnych wpisuje się w politykę UE, w szczególności w zakresie wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych do których produkcji zastosowano technologie o niskiej emisji gazów cieplarnianych (Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Europy Nr 305/2011 z dnia 09.03.2011) .