

Barbara Kawalec¹
Jacek Szaro²
Wojciech Tomaka³

Posadowienie nasypów dróg ekspresowych w słabonośnym podłożu gruntowym.

1. Wstęp.

Inwestycje budowlane w ciągu dróg krajowych realizowane są zgodnie z Programem Budowy Dróg Krajowych na lata 2014-2023 (z perspektywą do 2025 r.) Dokument ten zakłada dokończenie budowy ciągów dróg ekspresowych i autostrad oraz budowę wielu obwodnic w ciągach dróg krajowych. Realizacja tych inwestycji pozwoli na stworzenie w Kraju sieci autostrad oraz dróg ekspresowych, na co użytkownicy dróg w Polsce z niecierpliwością czekają. Korzystając z już oddanych do użytkowania odcinków autostrad i dróg ekspresowych polscy kierowcy zauważyli różnicę i odczuli komfort jaki daje możliwość poruszania się po nowoczesnych drogach szybkiego ruchu. Część z nowobudowanych odcinków dróg już przebiega i też będzie jeszcze przebiegać przez tereny gdzie występują grunty słabonośne. Nasypy dróg posadowione na gruntach słabonośnych na żelbetowych palach prefabrykowanych to między innymi odcinki następujących dróg: autostrada A2 koło Nowego Tomyśla, zachodnia obwodnica Poznania w ciągu drogi S11, dojazd do Mostu Brodowskiego w Szczecinie, obwodnica Jarosławia w ciągu DK4, droga S5 koło Gniezna i droga S6 w rejonie Węzła Kiełpino.

W artykule przedstawiono przykłady posadowienia nasypów drogowych odcinków dróg ekspresowych S5 i S6, które przebiegały nad gruntami zawierającymi warstwy słabonośne o znacznych miąższościach. Odcinki te posadowiono na żelbetowych palach prefabrykowanych zwieńczonych żelbetową płytą zlokalizowaną u podstawy nasypu. Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane to pale przemieszczeniowe pogrążane bez wydobywania urobku. Mogą być wykonywane o dowolnej długości dostosowywanej do potrzeb projektu dzięki wykorzystaniu szybkich złączy mechanicznych do łączenia prefabrykatów palowych. Pale prefabrykowane są odporne na chemiczne działanie gruntów skażonych i organicznych, zanieczyszczoną wodę gruntową i przy tym nie są zagrożone na utratę ciągłości wskutek rozplynięcia mieszanki w warstwach gruntów słabonośnych lub przemieszczenia podłoża w trakcie wykonywania wzmocnienia.

¹ mgr inż., AARSLEFF Sp. z o.o.

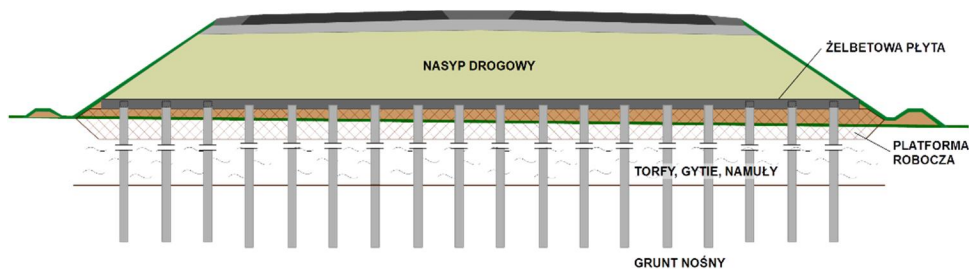
² mgr inż., AARSLEFF Sp. z o.o.

³ dr inż., AARSLEFF Sp. z o.o.

2. Posadowienie nasypów drogowych na gruntach słabonośnych

W przypadku przekroczenia przez budowaną trasę drogową terenu z gruntami słabonośnymi, w szczególności torfowiska, prace projektowe związane z posadowieniem nasypu drogowego na palach związane z opracowaniem projektów (rys. 1):

- platformy roboczej;
- próbnym obciążeniom pali i projektu samego palowania docelowego;
- żelbetowej płyty lub innej (np. z wykorzystaniem geotekstyliów) zwieńczającej pale;
- konstrukcji nasypu drogi i konstrukcji jezdni.



Rysunek 1. Przekrój poprzeczny nasypu posadowionego na palach prefabrykowanych

Zwykle warunki geotechniczne dla budowanej drogi ustala się dwuetapowo: najpierw na potrzeby projektu drogi (projekt budowlany, projekt wykonawczy), a kolejny raz w trakcie budowy, na potrzeby projektu wykonawczego/technologicznego i samej realizacji posadowienia nasypu w przypadku występowania gruntów słabonośnych (np. torfowiska, terenu po zbiornikach wodnych). Dwuetapowość badań spowodowana jest brakiem możliwości wjazdu na teren przyszłej budowy i wykonania pełnego zakresu badań geotechnicznych; przed rozpoczęciem robót budowlanych teren budowy jest bardzo trudno – a nawet w ogóle niedostępny. Przeprowadzenie takich badań jest możliwe dopiero po rozpoczęciu robót budowlanych i wykonaniu platformy roboczej umożliwiającej wjazd sprzętu budowlanego w tym sprzętu do wykonania badań geotechnicznych. Dopiero wówczas można wykonać wiercenia badawcze, sondowania statyczne (CPT) i inne oraz badania laboratoryjne, których wyniki wykorzystuje się w szczegółowych projektach wykonawczych i technologicznych dla robót palowych, a po ich opracowaniu projekty zwieńczenia pali oraz konstrukcji nasypu i jezdni.

Dwuetapowy tok badań geotechnicznych oraz wyżej wymienione opracowania projektów wykonano dla posadowienia nasypu drogi S5 koło Gniezna jak i drogi S6 w rejonie Węzła Kiełpino. Dla obu odcinków analiza dostępnych technologii doprowadziła drogą eliminacji do wyboru pali prefabrykowanych jako technologii spełniającej złożone wymagania projektu i kontraktu. z wierconych technologii pali lub kolumn zrezygnowano ze względu na konieczność utylizacji skażonego urobku. Kolejnym czynnikiem preferującym pale prefabrykowane były spodziewane trudności technologiczne związane z formowaniem trzonów pali wierconych w podłożu zawierającym grunty miękkoplastyczne (miejscami nawet płynne o $I_L=1.0\pm 1.2$) o wytrzymałości na ścinanie bez odpływu $c_u < 15$ kPa. Głęboko zalegające słabonośne warstwy wyeliminowały również możliwość wykorzystania kolumn kruszywowych czy wglębnego mieszania gruntu. Projekty posadowienia nasypów (projekty palowania) dla odcinków obu dróg (S5 i S6) wykonano zgodnie z wymaganiami Eurokodów, przyjmując zgodnie z [1] nośności charakterystyczne i obliczeniowe pali.

Nośność charakterystyczną obliczono według [1] (zależność 7.8 lub 7.11):

$$R_{ck} = \min \{ (R_{cm})_{mean} / \zeta_i; (R_{cm})_{min} / \zeta_j \}, \quad (1)$$

gdzie: $(R_{cm})_{mean}$ – średnia wartość nośności granicznej, $(R_{cm})_{min}$ – minimalna wartość nośności granicznej, ζ_i, ζ_j są współczynnikami zgodnie z [1] (Tablica A10 lub A11).

Nośność obliczeniową obliczono według [1] (zależność 7.7 lub 7.10):

$$R_{cd} = R_{ck} / \gamma_t, \quad (2)$$

gdzie: γ_t – współczynnik częściowy do całkowitej nośności pali wciskanych ([1] Tablica A6).

Zasadnicze prace projektowe dla robót palowych polegały na optymalizacji rozwiązania z uwzględnieniem trzech elementów: przekrój, długość i rozstaw pali. Przyjęte rozwiązania elementów pali wpłynęły na grubość i zbrojenie płyty żelbetowej. o wyniku optymalizacji i ostatecznym rozwiązaniu zdecydowały całkowite koszty realizacji robót.

3. Nasyp drogowy w ciągu drogi ekspresowej S5

Odcinek drogi S5 w km od 11+035.00 do 11+148.13 wykonała firma BUDIMEX S.A. Zaprojektowany został przez firmę AECOM z Poznania, natomiast projekt wykonawczo-technologiczny posadowienia nasypu opracowały pracownie projektowe firm GT Projekt i AARSLEFF. Droga na tym odcinku przebiega nad torfowiskiem.

3.1. Warunki geotechniczne.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono w podłożu grunty słabonośne w postaci torfów, gytii, namulów zalegających do maksymalnie 16.5m pod poziomem terenu. Grunty te zawierają 4÷84% części organicznych, są w stanie plastycznym do miękkoplastycznego o oporze stożka sondy CPT $q_c=0.05\div0.5$ MPa. Grunty nośne do posadowienia pali to twardoplastyczne gliny pylaste ($I_L=0.15$) – do maksymalnie 15.3m pod poziomem terenu (p.p.t.), piaski gliniaste i gliny piaszczyste twardoplastyczne ($I_L=0.00\div0.25$) do max. 24.0 m p.p.t. i najgłębiej położone twardoplastyczne ility neogeńskie ($I_L=0.0\div0.2$) stwierdzone do głębokości 27.8m p.p.t. Badania laboratoryjne gruntów zalegających w podłożu wykazały ich skażenie metalami ciężkimi, a woda gruntowa wykazała agresywność względem betonu - środowisko zaklasyfikowano do klasy ekspozycji XA3. Ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych w trakcie przeprowadzonych badań terenowych stwierdzono na głębokościach ok. 0,0 ÷ 2,0 m p.p.t.

Pierwotnie zakładano wymianę gruntów słabonośnych pod nasypem. Jednak uwzględniając skażenie gruntów i konieczność ich utylizacji w przypadku wymiany podjęto decyzję (Inwestor wraz z zespołem projektantów z firm AECOM i GT Projekt) o posadowieniu nasypu drogi ekspresowej na wzmocnionym podłożu.

Po uwzględnieniu wszystkich czynników wpływających na wybór technologii wzmocnienia pojęto decyzję o posadowieniu nasypu na żelbetowych palach prefabrykowanych wykonanych z betonu klasy C40/50.

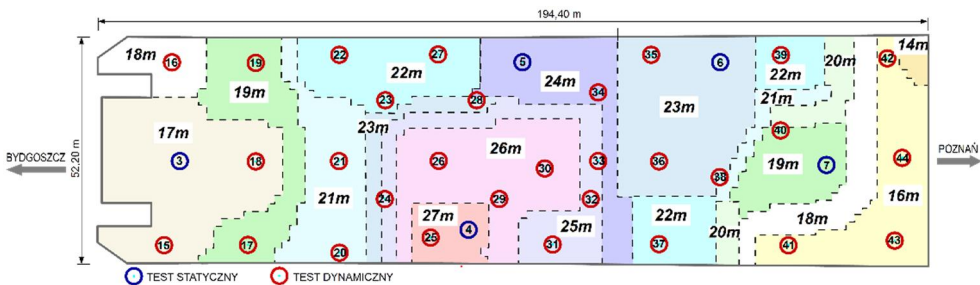
3.2. Projekt posadowienia nasypu

Wzmocnienia podłoża odcinka drogi S5 zostało podzielone na dwa obszary: odcinek długości 113.15m; tzw. „część bydgoska” i odcinek długości 197.87m; tzw. „część poznańska”, rozdzielone budowanym mostem MS-11 (posadowionym również na żelbetowych palach prefabrykowanych).

Na podstawie wyników dodatkowych badań podłoża (sondowania CPT wykonane po rozpoczęciu robót budowlanych) przyjęto w projekcie posadowienia żelbetowe pale prefabrykowane o przekroju 300x300mm, rozstawione w siatce 1.8x1.8m, wykonane z betonu C40/50 i zbrojone prętami 8#12mm ze stali o $f_y=500\text{MPa}$. Długości pali dostosowano do warunków gruntowych oraz obliczonych obciążeń. Głowice wszystkich pali rozkuto na długości 0.35m a zbrojenie pali zakotwiono w płycie. Kluczowym, dla realizacji zadania w przewidywanym terminie, było odpowiednio wczesne zaprojektowanie i zamówienie w zakładzie prefabrykacji pali o docelowych długościach. Odpowiednio wczesna produkcja prefabrykatów umożliwiła ciągłą, nieprzerwaną realizację robót palowych. Stąd podjęto decyzję o wstępnym doborze długości pali na podstawie wyników badań geotechnicznych, a długości docelowe pali potwierdzono na podstawie wyników badań nośności pali określonych metodą dynamiczną.

Wstępnie nośność i wymaganą długość pali zastosowanych do próbnych obciążeń przyjęto na podstawie sondowań CPT wykorzystując do obliczeń nośności pali w gruncie metodę francuską (Michael Bustamante). Wyniki obliczeń były podstawą doboru i zlecenia produkcji pali testowych. Ostatecznie długości pali docelowych określono na podstawie wyników próbnych obciążeń, które opracowano dla wybranych obszarów robót palowych zgodnie z wymaganiami [1] według zależności (1) i (2).

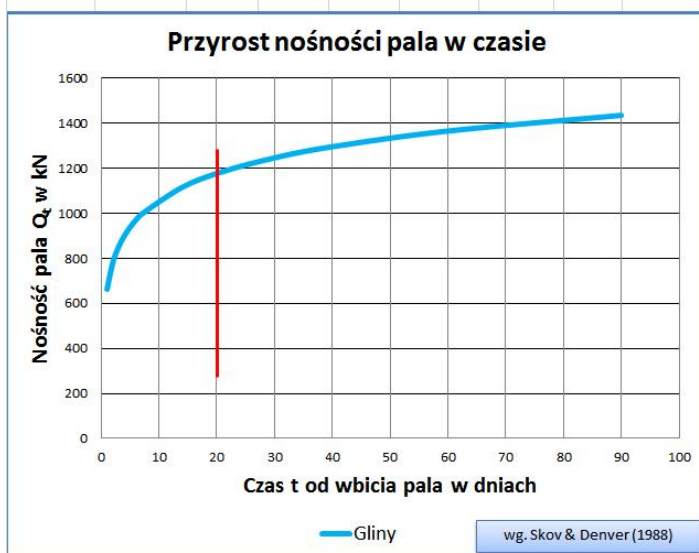
W tym celu do projektu posadowienia opracowano i zrealizowano specjalny program badań pali. Zaprojektowano i wykonano łącznie blisko 230 próbnych obciążeń (rys. 2)



Rysunek 2. S5. Schemat palowania i lokalizacja próbnych obciążeń – „strona poznańska”

stosując metodę dynamiczną (212 próbnych obciążeń) przy dużych odkształceniach (była to zasadnicza liczba próbnych obciążeń) oraz metodę statyczną (15 próbnych obciążeń) na wciskanie i wyciąganie – były to badania kalibrujące dla metody dynamicznej. Pale testowe wbito i przebadano przed palowaniem zasadniczym. w ramach specjalnego programu badań próbne obciążenia dynamiczne wykonywano po jednym dniu a następnie powtarzano je w różnym czasie od momentu pograżenia pala ustalając wpływ czasu na przyrost nośności pali (rys. 3), co wykorzystano w projektowaniu (ostatecznym doborze) długości pali docelowych.

Budowa	Fundament/podpora:	Numer pala:	Metoda wyznaczania nośności pala:	Wyznaczona nośność pala Q_{t1}	Czas t_1 od wbicia do badania nośności Q_{t1}
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[dni]
S5 Gniezno	Bydgoszcz	TD11	CASE	661	1



Rysunek 3. S5. Przyrost nośności pala w czasie. Pal nr TD11, strona bydgoska.

Próbné obciążenia wykonane po długim czasie (min 30 dni po pogrążeniu pala) pozytywnie zweryfikowały przyjętą procedurę projektowania i dobrane długości docelowe pali.

Wykonanie przed palowaniem docelowym dużej liczby próbných obciążeń (w różnych terminach od wbicia testowanych pali) pozwoliło z odpowiednim wyprzedzeniem zaprojektować długości docelowe celem zamówienia i wytworzenia pali w zakładzie prefabrykacji. Tym samym uniknięto ryzyka przestojów na budowie związanych z oczekiwaniem na dostawę prefabrykatów na budowę.

4. Nasyp drogowy w ciągu drogi ekspresowej S6

Odcinek drogi S6 od końca obwodnicy miejscowości Płoty do Węzła „Kiełpino” (z węzłem) wykonała firma BUDIMEX S.A. Zaprojektowany został przez firmę Egis Polska Inżynieria z Wrocławia, natomiast projekt wykonawczy posadowienia nasypu w km od 81+930.00 do 82+600.00 opracowały pracownie projektowe firm Egis Polska Inżynieria i AARSLEFF. Droga na tym odcinku przebiega nad torfowiskiem, w którym grunty organiczne zalegają do ok. 11 m pod powierzchnią terenu.

4.1. Warunki geotechniczne.

W obszarze obejmującym wzmocnienie występują osady organiczne utworzone w zastoiskowym zbiorniku wodnym. Osady te stanowią gytie oraz lokalnie muły jeziorne, które w zależności od zawartości części organicznych, sklasyfikowano jako namuły gliniaste lub pyły humusowe. Powyżej, wskutek zarastania zbiornika, utworzyły się torfy. Miąższość osadów organicznych sięga maksymalnie do 11.2 m p.p.t.

Osady organiczne tworzyły się na podłożu mineralnym składającym się z gruntów piaszczystych, przewarstwionych miejscami wkładkami glin zastoiskowych.

Grunty organiczne zawierają 2÷91% części organicznych, są w stanie plastycznym do miękkoplastycznego ($I_L=0.7\div 1.2$) o oporze stożka sondy CPT $q_c=0.05\div 0.30\text{MPa}$. Wytrzymałość na ścinanie bez drenażu (s_u) wynosi 0.2÷5.0kPa.

Grunty nośne, które wykorzystano do posadowienia pali to piaski drobne i pylaste, średniozagęszczone ($I_D=0.35\div 0.70$).

Woda gruntowa wykazała słabą agresywność względem betonu a środowisko zaklasyfikowano do klasy ekspozycji XA1. Ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych stwierdzono na głębokościach ok. 0.0 ÷ 0.6 m p.p.t.

W przypadku odcinka drogi S6 stwierdzono, że najkorzystniejszym do posadowienia nasypu będzie wykorzystanie wbijanych żelbetowych pali prefabrykowanych wykonanych z betonu klasy C35/45.

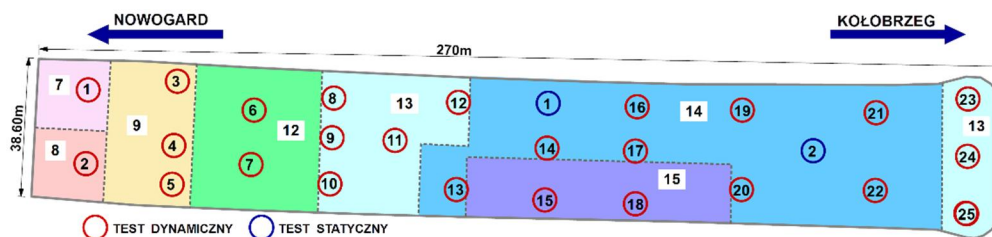
4.2. Projekt posadowienia nasypu

Podobnie jak w przypadku odcinka drogi S5, wzmocnienie podłoża odcinka drogi S6 podzielono na dwa obszary rozdzielone budowanym mostem MD-50 (posadowionym również na żelbetowych palach prefabrykowanych): odciek drogi długości 269.00m określany w projekcie jako „płyta 1L” oraz odciek drogi długości 269.00÷364.00m (różne długości po lewej i prawej stronie drogi) określany w projekcie jako „płyta 1P”.

Na podstawie wyników dodatkowych badań podłoża (sondowania CPT) wyznaczono nośność i wymaganą długość pali. Obliczenia nośności pali przeprowadzono zgodnie z zasadami normy EC7 na podstawie wartości q_c (oporów stożka sondy) z sondowań CPT.

Do posadowienia nasypu przyjęto żelbetowe pale prefabrykowane o przekroju 400x400mm rozstawione celem optymalizacji w różnych siatkach: 2.4x2.4m, 2.2x2.2m, 2.1x2.1m, 2.0x2.0m (w zależności od wysokości nasypu). Pale zaprojektowano jako wykonane z betonu C35/45, zbrojone prętami 8#12mm i 12#12mm ze stali o $f_y=500\text{MPa}$. Długości pali dostosowano do warunków gruntowych oraz obliczonych obciążeń. w projekcie przewidziano dla trzech skrajnych rzędów pali rozkucie głowic na długości ok. 0.25m, na poziomie 0.05m powyżej projektowanego spodu płyty a zbrojenie pali kotwione w płycie. Dla pozostałych pali nie przewidziano rozkuwania głowic a wierzech pała zaprojektowano na poziomie 0.05m powyżej spodu płyty.

Na potrzeby projektu wykonano łącznie 75 próbnych obciążeń (rys. 4) stosując metodę dynamiczną (71 próbnych obciążeń) przy dużych odkształceniach oraz metodę statyczną (4 próbne obciążenia) na wciskanie (były to badania kalibrujące dla metody dynamicznej). Pale testowe wbito i przebadano przed palowaniem zasadniczym (rys. 5) a próbne obciążenia wykonano po minimum 30 dniach od pograżenia pała testowego.



Rysunek 4. S6. Schemat palowania i lokalizacja próbnych obciążeń – „płyta 1L”



Rysunek 5. S6. Wbite pale do próbnym obciążeni.

5. Wykonanie robót

Roboty palowe zarówno dla odcinka drogi S5 jak i S6 w zasadzie były pracami standardowymi. Jednak, szczególnie dla drogi S5 wyzwaniem stanowiła wielkość fundamentu,



Rysunek 6. S5. Roboty palowe. Na budowie pale magazynowane na platformie roboczej.

wymagany krótki czas realizacji robót palowych i zorganizowanie na czas dostaw prefabrykatów pali o docelowej długości odpowiedniej dla poszczególnych obszarów palowania. Stąd wynikała nieco inna, opisana powyżej metodyka projektowania posadowienia dla odcinków obu dróg:

- dla drogi S5 koło Gniezna zaprojektowano docelowe długości pali na podstawie próbnych obciążeń wykonanych jeden dzień po wbiciu pala, testy wykonane w terminie późniejszym potwierdziły poprawność przyjętego rozwiązania;
- dla drogi S6 koło Węzła Kiełpino zaprojektowano docelowe długości pali na podstawie próbnych obciążeń wykonanych minimum 30 dni po wbiciu pala.

Wskutek właściwego przygotowania robót palowych (platforma robocza, kafary i inne maszyny, dostawa prefabrykatów) w trakcie samego palowania (rys. 6) nie odnotowano żadnych istotnych problemów.

Na budowie wykorzystano szereg zalet pali prefabrykowanych, między innymi:

- czysty plac budowy - brak zanieczyszczeń wydobywanym urobkiem (rys. 7),
- możliwość rozkuwania lub/i wykonywania wykopów między palami oraz kontynuacja innych robót budowlanych bezpośrednio po pogrążeniu pali (rys. 8),
- pale wykonywane jako gotowe prefabrykaty o wysokiej jakości w kontrolowanych warunkach wytwórni prefabrykatów,
- brak ograniczeń długości pali wynikający z możliwości szybkiego łączenia pojedynczych prefabrykatów za pomocą szybkich złączy mechanicznych,



Rysunek 7. S6. Roboty palowe. Czysty plac budowy.



Rysunek 8. S5. Rozkute głowice pali.

- w przypadku stwierdzenia takiej konieczności łatwa korekta długości pali (uwzględniając stan magazynowy zakładu prefabrykacji oraz wykorzystanie systemu złączy mechanicznych),
- łatwość wykonania znacznej liczby badań dynamicznych,
- możliwość szacowania nośności pali już w trakcie ich wykonywania na podstawie wzorów dynamicznych oraz określanie docelowej nośności pali na podstawie porównania i analizy: wyników badań podłoża, wstępów i wzorów dynamicznych, badań dynamicznych i statycznych,

6. Podsumowanie

Wykonawca robót palowych (AARSLEFF sp z o.o.) przy ścisłej współpracy z

- dla drogi S5; projektantami AEKOM i GT Projekt, Wykonawcą Firmą BUDIMEX,
- dla drogi S6; projektantami Egis Polska Inżynieria, Wykonawcą Firmą BUDIMEX,

zaprojektował i wykonał roboty palowe o dużym zakresie (rys. 9):

- dla drogi S5: blisko 5200szt pali prefabrykowanych o przekroju 300x300mm o długości całkowitej prefabrykatów dochodzącej do maksimum 27m i łącznej długości ok 12000 mb;
- dla drogi S6: blisko 4460szt pali prefabrykowanych o przekroju 400x400mm o długości całkowitej prefabrykatów do 15.0m i łącznej długości ok 57500mb.

Na obu odcinkach, pomimo nieco innego podejścia projektowego wynikającego z różnych warunków gruntowych i różnych terminów wykonania próbnych obciążeń, wykonano roboty palowe w terminach zgodnych z wymaganiami Głównego Wykonawcy i Inwestora uzyskując fundamenty nasypów zdolne do przeniesienia projektowanych obciążeń.

Zakończenie wzmocnienia podłoża zgodnie z oczekiwanymi założeniami można uznać za sukces robót palowych. Roboty palowe umożliwiły realizację kolejnych kluczowych etapów budowy. Sukces robót palowych był możliwy dzięki budowanemu przez długie lata



Rysunek 9. S6. Roboty budowlane po zakończeniu palowania.

doświadczeniu i potencjałowi Firmy wykonawczej, specjalizującej się w realizacji robót palowych w technologii wbijanych żelbetowych pali prefabrykowanych.

7. Literatura

- [1] PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowania geotechniczne.
- [2] GT Projekt, AARSLEFF. Projekt wykonawczo-technologiczny. Tom I: Posadowienie nasypu drogowego - pale prefabrykowane. Swadzim, maj 2016.
- [3] Egis Polska Inżynieria, AARSLEFF. Projekt wykonawczy. Projekt drogowy. Projekt wzmocnień podłoża gruntowego. Wrocław, styczeń 2017.
- [4] Sobala D. Tomaka W. Maksim P. Sobolewski J. Wysoki nasyp drogi ekspresowej S5 k. Gniezna posadowiony w torfowisku na żelbetowych palach prefabrykowanych wbijanych. Mosty 5/2016 s. 56-60.

Foundation of Expressway Embankments in Low-bearing Soil

Summary

Construction investments in Poland's national roads have been implemented under the National Road Construction Program for 2014-2023, aimed at completion of expressways and motorways systems and construction of a great number of by-passes within national roads. Some of those newly constructed road sections run through areas with low-bearing soil and thus they are locally founded on precast reinforced concrete piles. The article provides examples of such a foundation solution for embankments of Expressway S5 sections near Gniezno and National Road S6 near the Kiełpino Junction.