

Kazimierz GWIZDAŁA¹
Paweł WIĘCŁAWSKI²

EKOLOGIA CZY EKONOMIA? ASPEKT DECYDUJĄCY O ZASTOSOWANIU PALI PRZEMIESZCZENIOWYCH DO POSADOWIENIA OBIEKTÓW MOSTOWYCH

1. Wstęp

Wykonanie fundamentu w każdym przypadku stanowi ingerencję w środowisko i naturalne podłoża gruntowego. W okresie, kiedy istotną uwagę zwracamy na szeroko rozumianą ekologię należy dążyć do zastosowania technologii, która będzie przyjazna dla otoczenia i w minimalnym stopniu będzie oddziaływała na środowisko naturalne .

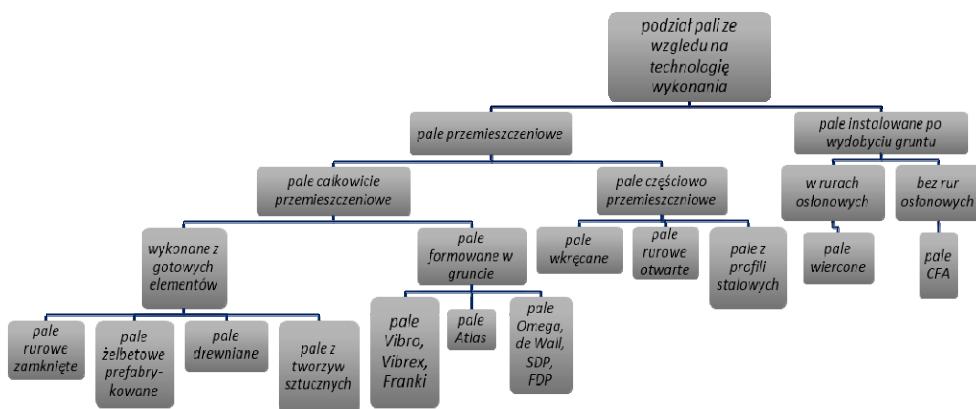
Szczególne znaczenie mają rozwiązania dla fundamentów głębokich. Stosowanie fundamentów głębokich najczęściej związane jest z występowaniem nawodnionych gruntów słabonośnych o dużej odkształcalności. Wydobywanie, przemieszczanie i składowanie gruntów tego rodzaju stwarza duże trudności z technicznego, ekologicznego i ekonomicznego punktu widzenia.

Technologie ekologiczne powinny uwzględnić między innymi:

- przemieszczanie gruntu na boki w czasie wykonawstwa,
- brak wydobywania gruntu na powierzchnię, dotyczy to głównie nawodnionych gruntów organicznych, gruntów nasypowych, antropogenicznych, gruntów zanieczyszczonych,
- znaczące ograniczenie transportu gruntów słabonośnych i nawodnionych,
- technologie pali pozbawione drgań, wstrząsów, wibracji, hałasu,
- właściwe dobranie rozwiązań technicznych powinno zapewnić duże tempo robót,
- należy stosować rozwiązania efektywne, zapewniające poprawę warunków gruntowych, zwiększenie nośności oraz redukcję osiadań z zapewnieniem bezpieczeństwa i ekonomii rozwiązania,
- realizacje fundamentów w zakresie „metody obserwacyjnej”, spełniającej kryteria ekonomiczne dla inwestora oraz w skali całej gospodarki [3].

¹ prof. dr hab. inż., Wydział Inżynierii Lądowego i Środowiska Politechniki Gdańskiej

² dr inż., Wydział Inżynierii Lądowego i Środowiska Politechniki Gdańskiej



Rysunek 1. Podział pali ze względu na technologię wykonania [13].

Klasyczny podział fundamentów palowych obejmuje :

- pale gotowe, prefabrykowane, przygotowane wcześniej, wprowadzane w podłoże za pomocą różnych technik, np. pale drewniane, żelbetowe, stalowe, z tworzyw sztucznych,
- pale wykonywane w gruncie, np. wiercone, wbijane z rurą wyciąganą, wkręcane bez stosowania rury osłonowej.

Posadowienie obiektów mostowych i dróg realizowane jest bardzo często w skomplikowanych warunkach geotechnicznych. Trasy autostrad, dróg ekspresowych i obwodnic miast prowadzi się przez obszary gdzie występują grunty uwarstwione o bardzo zróżnicowanej wytrzymałości i odkształcalności. Projektowanie obiektów inżynierskich i dróg w takich warunkach wymaga zastosowania specjalistycznych technologii i nowoczesnych metod obliczeniowych. W referacie przedstawiono rozwiązania posadowienia obiektów mostowych na palach przemieszczeniowych, które spełniają w znacznym stopniu kryteria ekonomicznej gospodarki, ale również wykazują minimalną ingerencję w środowisko. Należy również wskazać, że są dobrą alternatywą dla pali wierconych stosowanych powszechnie, do posadowienia mostów, wiaduktów i estakad, w latach '90 w Polsce.

2. Pale wiercone wielkośrednicowe jako posadowienie obiektów mostowych

Pale wiercone wielkośrednicowe wykonuje się o średnicach od 1,0 m do 1,8 m i długości od 10 m do 40 m. W zależności od warunków gruntowych wykonuje się:

- pale wiercone bez rury osłonowej,
- pale wiercone w zawieszynie bentonitowej,
- pale wiercone w rurze osłonowej.

W Polsce wykonano wiele obiektów mostowych, gdzie posadowienie na palach wielkośrednicowych zastosowano prawidłowo a rozwiązania konstrukcyjne fundamentów zapewniają bezpieczeństwo obiektu i umiarkowane przemieszczenia.

Podstawy pali mogą być walcowe lub poszerzone. Rozwiercanie podstaw w większości przypadków pogarsza warunki współpracy z podłożem, powoduje odprężenie gruntu w obrębie podstawy oraz wysklepienia w strefie poszerzonej [8].



Głównymi parametrami w procesie wzmocnienia podstawy pali są: ciśnienie iniekcji; przemieszczenie głowicy pala, objętość iniektu i czas iniekcji. Proces wykonywania iniekcji powinien być monitorowany w sposób ciągły, aby umożliwić weryfikację: nośności podstawy i poboczniczy pala, technologii wykonania oraz ewentualnych błędów procesu [2, 6, 8, 12].

Zastosowanie iniekcji umożliwiło realizację dużych obiektów mostowych i zapewniła bezpieczną współpracę fundamentu z podłożem oraz właściwą eksploatację obiektów. Takie rozwiązanie zastosowano m.in. do mostu przez Brdę w Bydgoszczy, gdzie zastosowano pale o średnicy 1200mm, długości 17 m pod przyczółkami, 12,5 m pod podporami oraz system iniekcji KGGiBM PG. Kolejnym przykładem jest Most Jana Pawła II na Martwą Wisłę, w ciągu trasy Sucharskiego w Gdańsku. Fundamenty wszystkich podpór zaprojektowano jako masywne bloki żelbetowe, posadowione na palach wierconych o średnicy 1800 mm i 1500 mm o długości od 26 m do 30 m. Pod podstawami pali zaprojektowano komory iniekcyjne do przyspieszania mobilizacji oporów gruntu pod podstawami i zmniejszania osiadań. Ze względu na specyficzną konstrukcję mostu część podpór wraz z palami pracuje na siły wyciągające.



Rysunek 3. a) Most Jana Pawła II nad Martwą Wisłą w Gdańsku (Fot. Tadeusz Brzozowski); b) Most nad Brdą w Bydgoszczy (Fot. Marcin Zmysłowski - MZ TV).

Podobnych realizacji jest bardzo dużo. Uzasadnieniem słuszności zastosowania pali wierconych wielkośrednicowych jest konieczność przeniesienia znacznych obciążeń od konstrukcji. Prawidłowa technologia wykonania pali, ale przede wszystkim iniekcji po podstawami jest skomplikowana, wymaga doświadczenia i precyzji, aby fundament mógł pracować zgodnie z oczekiwaniami.

3. Prefabrykowane żelbetowe pale wbijane

Obecnie coraz częściej stosuje się pale przemieszczeniowe, patrz Rysunek 1. Prefabrykowane żelbetowe pale wbijane są znane i stosowane, w różnych rodzajach budownictwa w Polsce, od wielu lat. O ich stosowaniu decydują następujące zalety:

- szybkość wykonania, od 200 do 350 m pali dziennie za pomocą jednej palownicy,
- znaczna długość pali, przy zastosowaniu pali łączonych do 45 m,
- łatwość dostosowania aktualnej długości do lokalnych warunków gruntowych,
- możliwość bieżącej kontroli poprzez pomiar wępu i weryfikację zagłębienia w podłoże,
- możliwość bieżącej kontroli za pomocą wzorów dynamicznych i badań dynamicznych.

Szerokie zastosowanie pali prefabrykowanych możliwe jest dzięki szerokiemu zakresowi przekrojów poprzecznych, odpowiednio od 20×20 cm do 45×45 cm co 5 cm oraz zróżnicowanej długości [6, 8].



3.1. Most przez Wisłę w ciągu drogi ekspresowa S-7



Rysunek 4. Most przez Wisłę w ciągu drogi S-7.

W projekcie wykonawczym posadowienie wszystkich podpór przewidziano na palach wierconych wielkośrednicowych w rurach osłonowych o średnicy 1200 mm i długości od 19.0 m do 23.0 m. Pod podstawami pali przewidziano wykonanie iniekcji cementowej w komorze wg patentu Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej. W rozwiązaniu zamiennym, przedstawionym w projektach technologicznych, przewidziano posadowienie podpór lądowych oraz nurtowych mostu na palach żelbetowych prefabrykowanych wbijanych o przekroju 40×40 cm.

Proces instalowania tego rodzaju pali w gruncie jest sprawniejszy i umożliwiający kontrolę wykonawstwa każdego pala. Na podstawie pomiarów wępudu i badań dynamicznych PDA można korygować długości pali i na bieżąco optymalizować projekt posadowienia. Podczas wykonywania pali wbijanych następuje poprawa parametrów gruntowych poprzez dogęszczenie i zwiększenie początkowego stanu naprężenia w gruncie. Dzięki czemu pale mają lepszą charakterystykę obciążenia – osiadanie Q-s i większą nośność niż np. pale wiercone o takich samych parametrach geometrycznych.

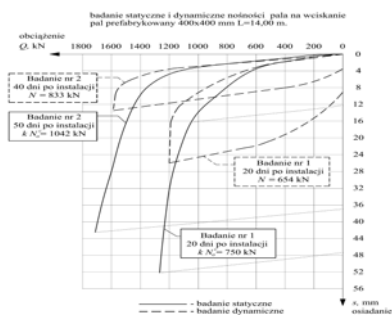
Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane należą do technologii przemieszczeniowych i są coraz częściej z powodzeniem stosowane w posadowieniu obiektów mostowych w tym również dużych mostów przez rzeki. Pale przemieszczeniowe, w tym pale wbijane, mogą jednak stwarzać trudności w trakcie wykonywania. Trudności te mogą polegać na nieosiąganiu wymaganych głębokości wprowadzenia pali w warstwy nośne i pojawiają się w zagęszczonych gruntach niespoistych lub w zwartych gruntach spoistych oraz przy jednocześnie małych rozstawach pali. Do pokonywania tego rodzaju trudności niezbędne jest duże doświadczenie wykonawcy oraz wysokiej jakości sprzęt i prefabrykaty palowe. Opisane trudności są szczególnie niekorzystne w przypadku posadowień mostów, gdzie wymagane jest odpowiednie zagłębienie pali w warstwach gruntów nośnych ze względu na znaczne siły poziome przekazywane na fundamenty palowe oraz niebezpieczeństwo rozmycia dna rzeki przez nurt wody.

3.2. Estakada w ciągu Południowej Obwodnicy Gdańska

Posadowienie zrealizowano na palach prefabrykowanych o wymiarach przekroju poprzecznego 40x40cm i długościach całkowitych prefabrykatów od 7.0 ÷ 27.0 m w zależności od umiejscowienia podpory i warunków gruntowych. W sumie wykonano 6772 sztuk pali o łącznej długości 130712 m. Na podstawie analizy wyników próbných obciążeń statycznych i dynamicznych pali testowych stwierdzono, że ponad 90% podpór, przenosi obciążenia projektowe bez zastrzeżeń. Wartości współczynnika stanowiącego stosunek



wartości nośności z uwzględnieniem tarcia negatywnego do wartości obciążenia projektowanego wynoszą od $1.01 \div 2.92$. W nielicznych przypadkach zaobserwowano niewielki deficyt nośności pali. Jednak zastosowanie metody obserwacyjnej umożliwiło modyfikację planów palowania.



Rysunek 5. Estakada WE-1 w ciągu Południowej Obwodnicy Gdańska i wyniki próbnych obciążeń pala [5].

Wprowadzenie zmian do projektu w postaci wydłużenia pali konstrukcyjnych oraz/lub zaprojektowaniu dodatkowych pali w środkowych rzędach posadowienia podpór zapewniło bezpieczną pracę pali w przenoszeniu obciążeń. W wielu przypadkach zaobserwowano wzrost nośności pali z czasem, w stosunku do nośności początkowej. Przyrosty nośności w czasie weryfikowano próbnymi obciążeniami statycznymi i badaniami dynamicznymi. Średni przyrost nośności pali w czasie rzeczywistym wynosi około 60% średnio po 45 dniach. Dla całego obiektu wahał się od 20% do 85%, a przerwy między badaniami nośności pali wynosiły od 7 do 85 dni [5, 7].

4. Pale Vibro i Franki

Pale Vibro, Vibro-Fundex, Vibrex należą do pali w pełni przemieszczeniowych wykonywanych w gruncie, bez wydobywania gruntu na powierzchnię. Najczęściej stosowane średnice trzonu to 457 mm oraz 508 mm, średnica traconej podstawy stalowej jest większa i wynosi od 500 mm do 700 mm. Powiększona średnica buta stalowego powoduje, że otrzymujemy od razu pal o poszerzonej podstawie. Wyciągnięcie rury wibratorem powoduje zagęszczenie betonu oraz dobre zespolenie trzonu pala z podłożem. Pale Vibro-Fundex charakteryzują się bardzo korzystną charakterystyką tzn. dużą nośnością przy małych osiadaniach. Zastosowanie młotów hydraulicznych znacznie zredukowało drgania przekazywane poprzez podłoże na konstrukcje. Pale tego rodzaju wykonywano np. w Gdańsku zamiennie za pale wielkośrednicowe z iniekcją pod podstawę w gęsto zabudowanym terenie, w odległości kilku metrów od krawędzi nabrzeża oraz istniejących obiektów [6, 8, 13].

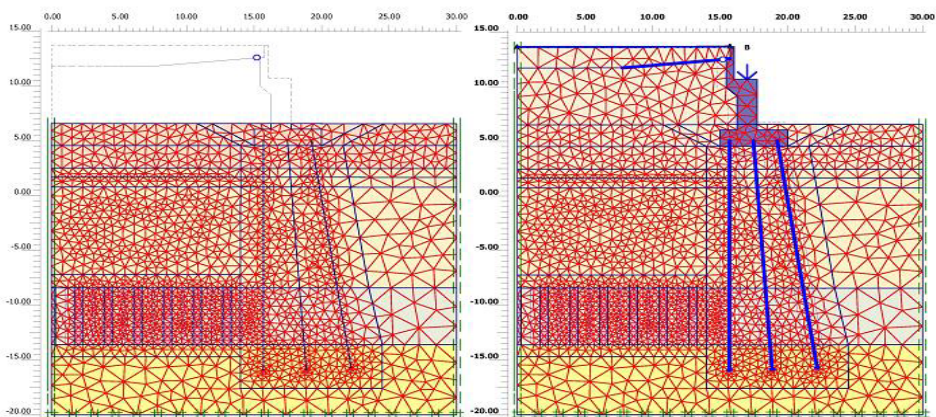
Pale wykonywane w technologii Franki należą do jednych z najstarszych technik fundamentowania głębokiego. Technologia stosowana jest z dużym powodzeniem również dzisiaj. Średnica rury stalowej wynosi najczęściej od 500 mm do 600 mm, długość od 12 m do 20 m. Wbijanie rury stalowej, wewnątrz z korkiem z suchego betonu, wykonuje się za pomocą bijaka wolnospadowego. Wybijanie korka ubijakiem powoduje formowanie powiększonej podstawy, a sukcesywnie podnoszenie rury stalowej za pomocą wyciągarki z jednoczesnym uzupełnianiem betonu - formowanie pobocznic dobrze zespolonej z otaczającym gruntem [8].



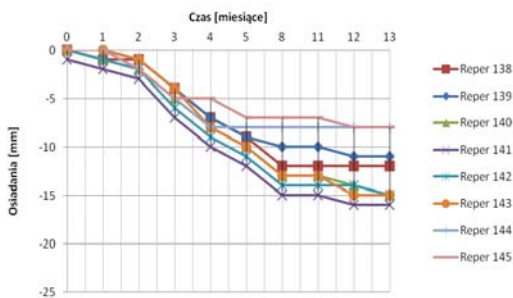
Istnieje możliwość stosowania technologii zmodyfikowanych, w których dodatkowo wykonuje się dogęszczenie, powiększenie podstawy, wzmocnienie żwirem, wykorzystuje się młot hydrauliczny zamiast ubijaka [8].

4.1. Wiadukt WD-7 w ciągu Trasy Sucharskiego w Gdańsku

Wiadukt WD-7 wykonano w ciągu umożliwiającym bezkolizyjny transport do terminalu kontenerowego Z-5 i Portu Północnego w Gdańsku. Całkowita długość wiaduku wynosi 192,5m. Pierwotny projekt zakładał wykonanie posadowienia w technologii pali wielkośrednicowych wierconych o średnicy 1500mm i długości do 28 m. Ostatecznie fundamenty wykonano jako pale Vibro-Fundex o średnicy trzonu 508mm. W celu zapewnienia wymaganej nośności liczba pali została zwiększona do 78 sztuk, lecz zastosowano długości od 16,0 m do 18,5 m. Dodatkowo wzmocniono warstwy gruntów słabonośnych stosując wgłębne kolumny betonowe [9]. Przyjęcie nowego rozwiązania umożliwiło redukcję osiadań, na skutek obciążenia przyczółków po wcześniejszym wykonaniu nasypów najazdowych. Przeciążenie wywołało tarcie negatywne, redukując jego wpływ na późniejsze osiadania fundamentu. Wielkość osiadań w najbardziej obciążonym obszarze została zredukowana o ponad 30%.



Rysunek 7. Model zastosowany w obliczeniach wpływu osiadania nasypu dojazdowego na przyczółek wiaduku. Układ początkowy po wykonaniu kolumn wgłębnych i nasypu do rzędnej 6,6 m n.p.m. oraz układ ostateczny po wykonaniu i obciążeniu nawierzchni drogowej i przyczółka [9].



Rysunek 8. Wiadukt WD-7 i WD-8 na Trasie Sucharskiego w Gdańsku oraz wykres osiadań podpory P10 w czasie.



Na podstawie analiz stwierdzono, że prognozowane osiadania nasypu w fazie użytkowej są niskie i są związane również z osiadaniami samego przyczółka. Próbnego obciążenia statyczne i dynamiczne potwierdziły bardzo dobrą nośność pali Vibro-Fundex. Rzeczywiste pomiary osiadań, za pomocą metod geodezyjnych, wykazały prawidłową pracę całego przyczółka, patrz Rysunek 8.

4.2. Most autostradowy przez Wisłę w Grudziądzu

Całkowita długość obiektu wynosi 1955 m i składa się z dwóch podpór nurtowych oraz trzydziestu pięciu podpór lądowych na terenach zalewowych rzeki Wisły. Estakada północna składa się z 21 przęsła. Przęsła skrajne mają rozpiętość 38.4 m, a 19 przęsła pośrednich – 48.0 m. Estakada południowa składa się z 12 przęsła. Posadowienie podpór estakad stanowią fundamenty na palach Vibro lub Franki. Możliwość wykonania tych rodzajów pali oraz ich nośności zostały ocenione na podstawie pilotujących prób wbijania pali i próbnych obciążeń statycznych. Posadowienie podpór mostu głównego zaprojektowano na palach wierconych o średnicy 1500 mm. Pod każdym z tych fundamentów wykonano po 36 pali o długości około 25 m.

Pale Vibro wykonano przy użyciu rury osłonowej o średnicy 508 mm, średnicy podstawy stalowej 560 mm, i długości 25.4 m. Ze względu na wystarczająco duże opory wbijania pale Vibro wykonano bez wtórnego dobijania rury osłonowej. Średni czas wykonania jednego pala wynosił około 1,5 – 2 godzin.

Pale Franki wykonano przy użyciu rury osłonowej o średnicy 560 mm. Przed wbijaniem rury, w miejscu lokalizacji pala wykonano podwiercenie za pomocą świdra ciągłego, do głębokości 15 -18 m. Następnie wbito rurę z korkiem z suchego betonu za pomocą klasycznego bijaka wolnospadowego. Pale wykonano o długości 23,0 m i 23,5 m. Średni czas wykonania jednego pala wynosił około 3 godzin.

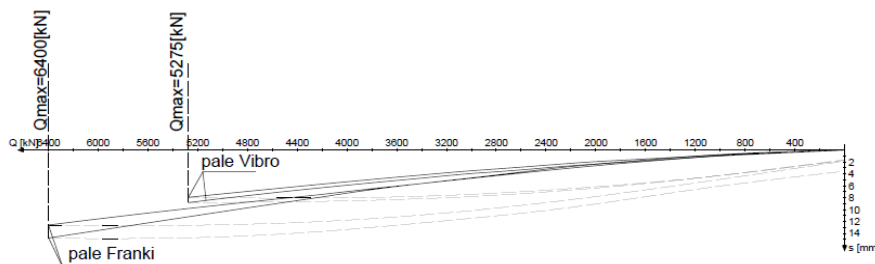
Po analizie wyników próbnych obciążeń pali stwierdzono, że zarówno pale Vibro, jak i pale Franki wykazały bardzo dobrą pracę w podłożu gruntowym. Otrzymano bardzo wysokie nośności pali.



Rysunek 8. Budowa mostu przez Wisłę w ciągu autostrady A-1 w Grudziądzu.

Większa nośność pali Franki wynika z kryterium interpretacji. Ogólnie lepsze parametry współpracy z podłożem gruntowym wykazały pale Vibro – mniejsze osiadania przy jednakowych wartościach obciążeń. Małe wartości osiadań trwałych wskazują dodatkowo, że w prawie całym zakresie próbnych obciążeń współpraca pali z podłożem gruntowym znajdowała się w fazie sprężystej.





Rysunek 7. Krzywe osiadania pali Vibro i Franki mostu przez Wisłę w ciągu autostrady A-1 w Grudziądzu.

6. Podsumowanie

Współczesne technologie wykonania pali pozwalają na racjonalne i ekonomiczne wykorzystanie warunków podłoża gruntowego. Od strony technicznej i ekonomicznej posadowienie na palach przemieszczeniowych jest korzystniejsze [3, 4, 5, 7]. Wpływają na to następujące aspekty:

- doświadczenia projektowe i wykonawcze pokazują, iż możliwe jest zastosowanie tej technologii palowania dla obiektów mostowych, czego przykładem jest najdłuższa estakada w Polsce w ciągu południowej obwodnicy Gdańska, estakady dojazdowe mostu przez Wisłę w Grudziądzu w ciągu autostrady A-1 oraz wiele innych.
- zastosowanie tej technologii pozwala na większą kontrolę procesu wykonywania robót palowych niż w przypadku pali wierconych.
- w strefach gruntów luźnych i średnio zagęszczonych wbijanie pali poprawia warunki zagęszczenia co przekłada się na korzystniejsze charakterystyki obciążenie-osiadanie.
- w zagęszczonych piaskach technologie te mogą stwarzać problemy z osiągnięciem żądanej głębokości posadowienia w miarę dogęszczania się podłoża w obrysie fundamentu, należy wówczas zastosować właściwą kolejność i odpowiednią technikę wbijania pali.
- bezpośrednio po wbiciu pali można przystąpić do kolejnych robót, bez oczekiwania na wiązanie betonu, co ogólnie przyspiesza roboty fundamentowe.
- technologia pali przemieszczeniowych nie wymaga wydobywania, składowania lub wywozu gruntu z urobku, co jest uciążliwe w przypadku pali wierconych i gruntów słabonośnych (szczególnie w terenach zabudowanych).
- duże tempo wykonywania pali przemieszczeniowych jest czynnikiem skracającym czas realizacji projektu.
- metodę obserwacyjną zastosowano w ostatnich latach przy budowie estakad i wiaduktów. Zaobserwowano w wielu przypadkach wzrost nośności pali z czasem (również w gruntach piaszczystych), w stosunku do nośności początkowej co stanowił podstawę do projektowania fundamentów na żelbetowych prefabrykowanych palach wbijanych w sposób optymalny.

Literatura

- [1] BARCZ S., LISOWSKI T., Doświadczenia z zastosowania pali wierconych z poszerzoną podstawą na budowie mostu drogowego przez Wisłę w ciągu drogi ekspresowej S-2. Seminarium IBDiM i PZWFS, Warszawa, 7 marca 2019, s. 37-46.
- [2] GWIZDAŁA K., PINKOWSKI A., 2007, Wpływ iniekcji pod podstawą na osiadanie pali wierconych w piaskach. Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8/2007, s. 379-381.



- [3] GWIZDAŁA K., Ekologiczne aspekty projektowania fundamentów palowych. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. T. 1, Problemy budownictwa na terenach ekologicznie cennych / pr. zbior. pod red. M. Broniewicza, J. A. Prusiel / Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. - Białystok : Wydaw. Politech. Białost., 2007
- [4] GWIZDAŁA K., KRASIŃSKI A., Zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w podłożu uwarstwionym na przykładzie realizacji obiektu w warunkach gruntowych delty Wisły. Inżynieria i Budownictwo, 3/2009.
- [5] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Influence of time on the bearing capacity of precast piles. Studia Geotechnica et Mechanica. -Vol. XXXV, nr. 4, 2013, s.65-74
- [6] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Polish experience in the assessment of pile bearing capacity and settlement of the pile foundation. Baltic Piling Days, Estonia, Talin, 3 - 5 wrzesień 2012
- [7] GWIZDAŁA K., WIĘCŁAWSKI P.; Racjonalne projektowanie podpór wiaduktów drogowych. Mosty nr 1 2013, s.20-22
- [8] GWIZDAŁA K., Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. PWN, 2011.
- [9] GWIZDAŁA K., CUDNY M., Opinia geotechniczna dotycząca wzmocnienia podłoża kolumnami wgłębnymi (MMC) pod nasypami najazdów na przyczółki wiaduktów WD7 i WD8 w osi nr 10, Trasa Sucharskiego, Zadanie II, odcinek Węzeł Wosia Budzysza – Węzeł Ku Ujściu, Gdańsk, 2011.
- [10] JAROMINIAK A.: Zwiększanie nośności pali wielkośrednicowych i słupów szczelinowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/2004.
- [11] SZYMANKIEWICZ C.: Iniekcyjne naprężanie podstaw pali wierconych i baret. Seminarium Fundamenty Palowe i Specjalne. Warszawa 2004.
- [12] TEJCHMAN A., GWIZDAŁA K., 2000, Badanie nośności pali wielkośrednicowych pod pylonem mostu podwieszonoego przez Martwą Wisłę w Gdańsku. Inżynieria i Budownictwo, nr 12. s. 662–664.
- [13] WIĘCŁAWSKI P., Metodyka szacowania osiadań pali Vibro na podstawie wyników badań statycznych CPT. Monografia. Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2016.

ECOLOGY OR ECONOMICS? THE ASPECT DETERMINING THE USE OF DISPLACEMENT PILES FOR THE FOUNDATIONS OF BRIDGE STRUCTURES

Summary

In recent years, large diameter drilled piles have rarely been made due to: equipment required; transport of the excavated material; large quantities of steel. Engineering structures: on the A-1 motorway, on the S-7 road and the Gdańsk ring road, built on prefabricated piles. The foundations of the largest bridges on the A-1 motorway were built on Vibro and Franki piles.

Attention should be paid to fully displacement piles, characterized by high load capacity and simple technology, which are used in the foundations of road structures. Amongst all these, this technology can be called ecological and economic. These aspects may change the scope of its application in the near future.

