



Projektowanie i wykonywanie pali przemieszczeniowych typu **SCREWSOL®** pod obiekty inżynieryjne

tekst: mgr inż. **OLEKSJ KUCYBAŁA**, Soletanche Polska Sp. z o.o.

Największe inwestycje infrastrukturalne ostatnich lat, takie jak np. autostrada A1 czy drogi ekspresowe S17 i S19, w dużej mierze zostały zlokalizowane na obszarach o niekorzystnych warunkach geologicznych, które powodowały konieczność zastosowania posadowienia pośredniego pod obiekty inżynieryjne.

Firma Soletanche Polska Sp. z o.o. w ostatnich latach na inwestycjach infrastrukturalnych wykonała łącznie ponad 100 tys. m.b. pali pod obiekty inżynieryjne, w optymalny sposób dostosowując technologię pali do warunków geologicznych i zapewniając w ten sposób ekonomiczne i bezpieczne posadowienie tych obiektów.

Podstawowe czynniki decydujące o doborze optymalnej technologii posadowienia to:

- możliwość przeniesienia wymaganych obciążeń przez daną technologię;
- wymagany stopień zbrojenia wybranej technologii względem opcjonalnych rozwiązań;
- techniczne możliwości wykonania danej technologii w konkretnych warunkach geologicznych z uwzględnieniem przewidywanych długości pali;
- przewidywane wydajności wykonywania pali.

Z dotychczasowych doświadczeń firmy Soletanche wynika, że w zdecydowanej większości analizowanych przypadków konieczność posadowienia obiektów inżynieryjnych w sposób pośredni wynika z zalegania bezpośrednio pod fundamentem gruntów spoistych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym,

rzadziej można spotkać sytuację, gdy w poziomie posadowienia zalegają słabe grunty organiczne lub piasek w stanie luźnym. Powyższe obserwacje potwierdzają również proporcje zastosowanych technologii posadowienia. Na 100 tys. m.b. pali wykonanych przez Soletanche pod obiekty inżynieryjne w ostatnich latach ok. 80 tys. m.b. przypada na pale przemieszczeniowe typu SCREWSOL®.

1. Opis technologii

Pale SCREWSOL® należą do generacji wierconych pali przemieszczeniowych typu FDP (*Full Displacement Piles*), które wykonywane są świdrem zaprojektowanym przez Grupę Soletanche Bachy. W trakcie wiercenia specjalny kształt świdra powoduje przemieszczanie gruntu na boki, czego efektem jest poprawa parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntu w bezpośrednim otoczeniu pala oraz znaczne ograniczenie urobku. Następnie, podczas podciągania świdra ze stałą prędkością obrotową, specjalny frez, tzw. lemiesz, znajdujący się u dołu świdra, formuje spiralę wzdłuż trzonu pala, dodatkowo zwiększając powierzchnię poboczniczy pala przy jednoczesnym ekonomicznym

zużyciu betonu. Dzięki podawaniu betonu pod ciśnieniem na etapie betonowania, grunt w jego podstawie oraz na poboczniczy zabezpieczony jest przed odprężeniem, poprawiając tym samym współpracę pala z otaczającym ośrodkiem gruntowym. Po zakończeniu betonowania w świeżą mieszankę wprowadza się odpowiedni kosz zbrojeniowy lub kształtownik stalowy.

Firma Soletanche wykonuje trzy typy pali SCREWSOL® – 330/500, 450/600, 530/700, gdzie wartości 300/450/530 oznaczają średnicę świdra, natomiast wartości 500/600/700 – średnicę spirali. W zależności od warunków geologicznych oraz wybranej średnicy pali uzyskiwane obliczeniowe nośności pali znajdują się w zakresie 500÷2500 kN. Pale SCREWSOL® wykonywane są o długościach do 20 m oraz kącie pochylenia w zakresie 0÷5°.

2. Zagadnienia projektowe

Projektowanie pali SCREWSOL® sprowadza się do powszechnie stosowanych metod i kolejności:

- analiza warunków geologicznych oraz określenie maksymalnej możliwej do wykonania technologicznie długości pali;
- określenie przewidywanych nośności pali;
- dobór liczby oraz rozmieszczenia pali pod fundamentem;
- analiza sił przekrojowych w palach oraz dobór zbrojenia.

2.1. Analiza warunków geologicznych oraz określenie maksymalnej możliwej do wykonania technologicznie długości pali

W przypadku pali przemieszczeniowych dany punkt analizy jest szczególnie ważny, gdyż z reguły natrafienie na warstwę gruntów niespoistych w stanie średnio zagęszczonym o miąższości powyżej 2÷3 m istotnie obniża wydajność lub całkowicie uniemożliwia dalsze wykonanie pali przemieszczeniowych. Z praktyki wynika, że dla gruntów niespoistych rozsądną granicą jest projektowanie pali przemieszczeniowych, posadawiając stopę pali 1–1,5 m w warstwie o $q_c = 10\text{--}12$ MPa. W gruntach spoistych problemy z wykonaniem pali przemieszczeniowych mogą wystąpić przy stanie półzwartym o $q_c > 6$ MPa. Należy zaznaczyć, że możliwość wykonania pali przemieszczeniowych bezpośrednio zależy od momentu obrotowego palownicy oraz zastosowanej średnicy świdra. Powyższe wnioski dotyczą palow-

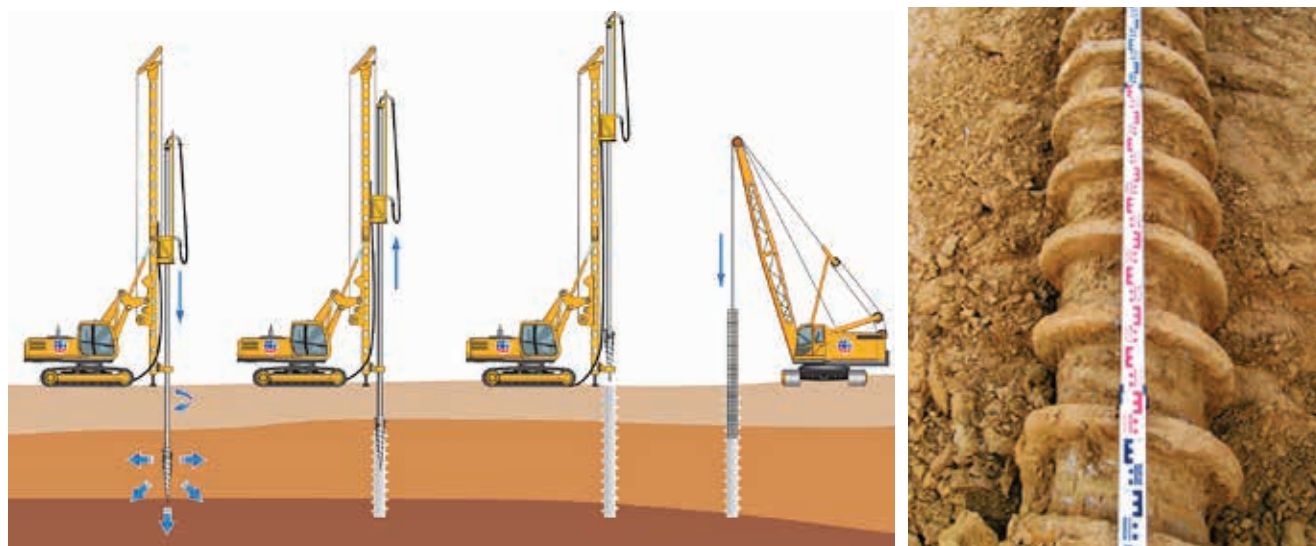
Tab. 1. Porównanie wybranych metod analizy sił przekrojowych w palach

Metoda	EAP (niemiecka metoda) [2]	LCPC (francuska metoda) [3]
Wymagane dane	Typ gruntu, q_c (CPT/CPTu), S_u	Typ gruntu, q_c (CPT/CPTu)
Sposób obliczania nośności	Wartości oporów jednostkowych dla poszczególnych zakresów osiadań pala	Liniowa zależność pomiędzy oporami jednostkowymi dla q_c
Wyniki obliczeń	Osiadania dla charakterystycznych punktów krzywej osiadania pala, nośność graniczna / obliczeniowa pala	Nośność graniczna / obliczeniowa pala
Zalety	Możliwość symulacji krzywej osiadania pala	Dobra zgodność z wynikami próbnych obciążeń pod warunkiem kalibracji współczynników technologicznych
	Dobra zgodność z wynikami próbnych obciążeń	
Wady	Duża czułość metody na parametr S_u	Brak możliwości obliczeń osiadania pali
		W gruntach spoistych konieczna kalibracja q_c pomiędzy CPT i CPTu

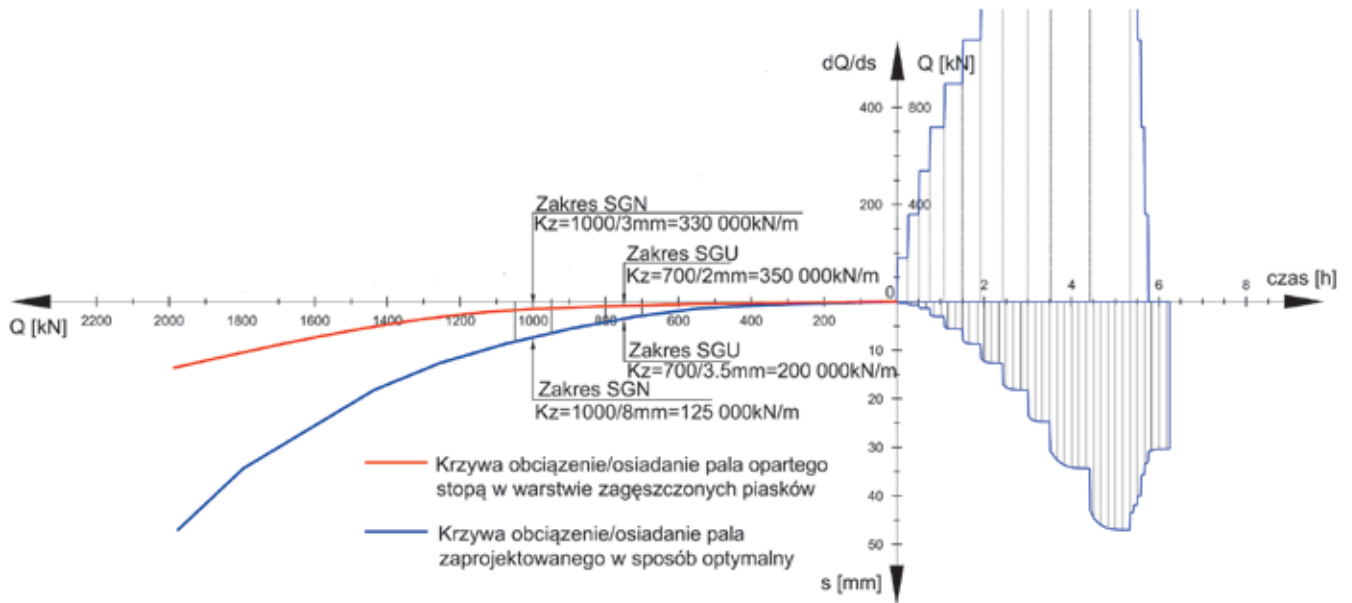
nicy o maksymalnym momencie obrotowym ok. 200 kNm oraz średnicy pali przemieszczeniowych w zakresie 400–500 mm.

2.2. Określenie przewidywanych nośności pali

Istnieje kilkanaście możliwych metod obliczania nośności pali przemieszczeniowych. Uwzględniając warunki geologiczne występujące w Polsce, najczęściej stosowane są dwie metody obliczeniowe, porównanie których przedstawiono w powyższej tabelicy.



Ryc. 1. Etapy formowania pala typu SCREWSOL®, odsonięty trzon pala typu SCREWSOL®



Ryc. 2. Szywność pali w zakresie stanów SGN/SGU

Każdą z wymienionych metod uzyskuje się dobrą zgodność obliczeń z wynikami próbnymi obciążeniami, konieczne jest jednak pewne doświadczenie w interpretacji wyników badań geologicznych oraz modyfikacja współczynników obliczeniowych danej metody w odniesieniu do danych warunków geologicznych. Bazując na sukcesywnie zdobywanych doświadczeniach w zakresie projektowania i wykonywania pali typu SCREWSOL®, w biurze projektowym Soletanche Polska często udaje się oszacować ich rzeczywistą nośność, zweryfikowaną próbnym obciążeniem, z dokładnością do 1,1–1,15 Rcd (gdzie Rcd – obliczeniowa nośność obliczona na podstawie danej metody), co w przypadku projektowania geotechnicznego stanowi bardzo dobry wynik oraz pozwala na optymalne zaprojektowanie posadowienia.

2.3. Dobór liczby oraz rozmieszczenia pali pod fundamentem

Najprostszą, a zarazem najczęściej wykorzystywaną metodą określania rozkładu sił na pale jest metoda sztywnego oczepu. Daje ona dobre wyniki dla prostego kształtu fundamentu. W przypadku skomplikowanych kształtów fundamentów z szeroką odsadzką lub fundamentów o znacznej długości oraz smukłych przyczółków, gdzie istotną rolę zaczyna odgrywać sztywność przestrzenna obiektu, metoda ta daje mało wiarygodne, a czasami błędne wyniki rozkładu sił na pale.

Alternatywę dla metody sztywnego oczepu stanowią obliczenia MES w powszechnie używanych do tego celu programach (Sofistik, Robot, ABC itd.). Zaletą obliczeń MES jest możliwość uwzględnienia sztywności fundamentu oraz usztywniających ścian, co często istotnie zmienia rozkład sił na pale.

W przypadku analizy MES pojawia się kilka dodatkowych zagadnień, które należy uwzględnić w obliczeniach w miarę poprawny sposób.

2.3.1. Szywność pionowa pali Kz

Często spotykaną sytuacją zarówno w projektach posadowienia obiektów inżynierskich, jak i obiektów kubaturowych jest przyjmowanie sztywności pionowej pali jako stałej wartości, niezależnie od kombinacji obciążeń oraz analizowanego stanu SGN lub SGU.

W rzeczywistości sztywność pali nie jest wartością stałą i zależy od wzajemnego stosunku obciążenie / osiadanie, które w przypadku optymalnie zaprojektowanego pala istotnie różni się dla stanu SGN i SGU. Wyjątek stanowią pale mocno przewymiarowane lub oparte stopą w warstwie zagęszczonych gruntów niespoistych, w których zakres osiadań dla obciążeń charakterystycznych i obliczeniowych znajduje się w początkowym obszarze liniowej zmienności sztywności. Najłatwiej jest przedstawić to zjawisko na krzywej próbnego obciążenia statycznego.

W praktyce w przypadku optymalnie zaprojektowanego pala przemieszczeniowego sztywność pionową dla stanu SGN z wystarczającą dokładnością na potrzeby inżynierskie można przyjmować na poziomie 120–150 tys. kN/m. Z punktu widzenia rozkładu sił na pale, przyjęcie błędnej sztywności nawet w zakresie ± 100 tys. kN/m nie stanowi problemu ze względu na wystarczające zapasy bezpieczeństwa nośności pali względem zmian w rozkładzie sił na pale. Błędnie przyjęta sztywność pali generuje głównie błędne wartości sił przekrojowych w oczepie pali, co w wybranych przypadkach może stanowić przyczynę zarysowań oczepów. Przyjęcie zawyżonej sztywności pali skutkuje niedoszacowaniem momentów zginających w przęsłach pomiędzy palami, natomiast przyjęcie zaniżonej wartości generuje większe momenty nad palami.

2.3.2. Połączenie pali z oczepem

Ciekawym zagadnieniem, które pojawia się przy modelowaniu pali metodą MES, jest sposób połączenia głowicy pali z oczepem. Możliwe są trzy warianty modelowania

Tab. 2. Porównanie wybranych metod analizy sił przekrojowych w palach

Typ analizy	Zalety	Wady
MES (Plaxis, Midas, Z-soil)	Możliwość otrzymania optymalnego rozwiązania	Wysoka czułość wyników na jakość wprowadzanych parametrów obliczeniowych
	Możliwość uwzględnienia interakcji nasyp – przyczółek	W przypadku zaawansowanych modeli gruntu konieczność wykonania rozszerzonych badań geologicznych w celu uzyskania niezbędnych parametrów gruntowych
	Możliwość zastosowania różnych modeli materiałowych gruntu	Brak możliwości analizy oraz zadania w modelu wszystkich kombinacji obliczeniowych
		Duża czasochłonność wykonania modelu obliczeniowego oraz w przypadku większych obiektów i zaawansowanych modeli gruntu długi czas wykonywania obliczeń
Metoda uogólniona wg [4] (Robot, Sofistik, Axis)	Proste i przejrzyste zasady tworzenia modelu obliczeniowego	Duża pracochłonność w przypadku ręcznych obliczeń
	Możliwość uzyskania niezbędnych parametrów gruntowych nawet przy podstawowych badaniach geologicznych	
	Metoda sprawdzona wieloletnią praktyką, dająca wyniki po stronie bezpiecznej	
	Możliwość wykonania obliczeń większością programów MES przeznaczonych do analizy statyki konstrukcji prętowych	
	Wyniki bardzo zbliżone do analizy MES modelem materiałowym gruntu M-C	

– połączenie przegubowe, połączenie sztywne oraz połączenie sprężyste. Przyjmując poszczególne warianty połączenia, często otrzymuje się różny stopień oraz zakres zbrojenia pali.

W projektach obiektów inżynierskich spotkać można każdy z wymienionych sposobów modelowania połączenia pala i z reguły jest to wyłącznie decyzja projektanta, który typ połączenia zostanie zastosowany. Rzeczywisty mechanizm zamocowania głowicy pala w oczepie przy poprawnym zakotwieniu zbrojenia będzie się znajdował w zakresie pomiędzy połączeniem przegubowym i utwierdzeniem. W skrajnym przypadku przeciążenia pala może wystąpić połączenie przegubowe. Pomimo rzetelnego rozpoznania dostępnych publikacji krajowych i zagranicznych autorowi niniejszego opracowania nie są znane publikacje lub wyniki badań modelowych danego zagadnienia, które umożliwiłyby przyjmowanie w wiarygodny sposób parametrów sprężystego zamocowania pali w oczepie. W związku z powyższym przy analizie obiektów inżynierskich rozsądne wydaje się zastosowanie podejścia, które często jest wymagane przy analizie turbin wiatrowych w zakresie analizy stanu SGN pali, a mianowicie wykonanie analizy zginania w palach dla dwóch skrajnych przypadków – połączenia przegubowego oraz sztywnego zamocowania pali w oczepie. Po przeprowadzeniu analizy dla obu typów zamocowań zbrojenie dobiera się, wykonując obwiednie dla obu typów połączenia w zakresie wartości oraz zakresu zginania. Z reguły przyjmując połączenie z palami utwierdzonymi w oczepie, otrzymuje się nieco większe wartości zginania w palach niż przy połączeniu przegubowym, chociaż w dużej mierze zależy to od warunków geologicznych oraz stosunku obciążeń pionowych i poziomych. Zakres występowania maksymalnego zginania otrzymuje się natomiast przy połączeniu przegubowym.

W przypadku pali przemieszczeniowych typu SCREWSOL®, tak jak i pozostałych typów pali, w których zbrojenie umieszczane jest po wybetonowaniu pali, często ilość zbrojenia jest dobierana ściśle do obwiedni momentów zginających, dlatego opisane wyżej podejście obliczeniowe wydaje się uzasadnione również w przypadku obiektów inżynierskich.

2.4. Analiza sił przekrojowych w palach

W celu optymalnego zaprojektowania posadowienia obiektów inżynierskich bezwzględnie wymagana jest analiza zginania w palach. Niejednokrotnie spotkać można projekty obiektów inżynierskich, gdzie koszt zbrojenia pali w rozwiązaniu podstawowym stanowi do 40–50% wartości wykonania całego posadowienia. W przypadku pali SCREWSOL® z optymalnie dobranym zbrojeniem, jego koszt w większości przypadków oscyluje w granicach 20–25% kosztów posadowienia, co przy większych obiektach stanowi istotną pozycję kosztową.

Najczęściej stosowane są dwie metody analizy zginania w palach:

- analiza metodą MES programami dedykowanymi na potrzeby analizy geotechnicznej (Plaxis, Midas, Z-soil) z modelowaniem siatki MES odwzorowującej pracę gruntu z możliwością zastosowań mniej (Mohr-Coulomb) lub bardziej zaawansowanych (HS, HSS) modeli materiałowych gruntu;
- analiza metodą uogólnioną według [4].

Analiza metodą MES zginania w palach często jest przydatna w przypadku skomplikowanych zagadnień, gdzie występują grunty słabe, organiczne, o dużej miąższości. W powyższej

sytuacji zwykle zachodzi konieczność analizy wpływu wzmocnienia nasypu na dojazdach na posadowienie przyczółków. Z wykonywanych analiz wstecznych wynika, że analiza zginania w palach metodą uogólnioną daje bardzo zbliżone wyniki sił przekrojowych do analizy MES z zastosowaniem modelu MC. Wykonując analizę zginania pali MESem z zastosowaniem bardziej zaawansowanych modeli materiałowych gruntów, często otrzymuje się wyniki sił przekrojowych o ok. 15–20% korzystniejsze niż w przypadku analizy metodą uogólnioną, co w przeliczeniu na ilość zbrojenia daje znikome oszczędności.

Uwzględniając stosunek oszczędności w zbrojeniu pali, generowany przez dokładną analizę zginania metodą MES do nakładu pracy oraz czasu, który należy poświęcić na przeprowadzenie rzetelnych obliczeń, w zdecydowanej większości przypadków korzystniejszym rozwiązaniem pozostaje analiza metodą uogólnioną.

3. Zagadnienia wykonawcze

3.1. Rozmieszczenie pali

W przypadku pali przemieszczeniowych wykonywanych na mokro istotne znaczenie przy doborze układu pali mają minimalne odległości pomiędzy palami. Z reguły w celu ograniczenia wzajemnego oddziaływania pali przyjmuje się minimalną odległość pomiędzy palami $3D$ (gdzie D oznacza średnicę pala). Dla pali typu SCREWSOL® minimalna zalecana odległość w osiach pali wynosi 2 m dla średnicy świdra 450÷500 mm.

W celu wykonania pali wykonywanych na mokro, niezależnie, czy są to pale wiercone, czy przemieszczeniowe, zachodzi konieczność wykonania platformy roboczej. Grubość platformy roboczej poza jej wymaganą nośnością wynika również z minimalnej długości zakotwienia prętów zbrojenia pali, średnice których znajdują się w przedziale 16÷32 mm, co daje wymagane długości zakotwienia w przedziale 64÷128 cm. Uwzględniając prześwit podwozia palownicy względem platformy roboczej na poziomie 20 cm, wymagana grubość platformy roboczej ze względu na możliwość osadzenia zbrojenia wynosi 50÷100 cm.

Tolerancje wykonawcze pali typu SCREWSOL® przyjmuje się zgodnie z normą PN-EN 12699 [1]. Powyższa norma określa dokładność wykonania pali na łądzie na ± 10 cm względem projektowanej pozycji w poziomie platformy roboczej. W przypadku pali wykonywanych jako pionowe z reguły nie ma problemów ze spełnieniem wymaganych tolerancji. Niejednokrotnie na przyczółkach mostowych w celu ograniczenia przemieszczeń poziomych oraz momentów zginających w palach stosuje się pochylone pale. W tym przypadku istnieje duże ryzyko przekroczenia wymaganej tolerancji ± 10 cm. Powyższa sytuacja wynika z faktu, że często platformę roboczą stanowi warstwa zagęszczonego tłucznia oraz to, że docelowa pozycja pala znajduje się 50÷100 cm poniżej punkt przyłożenia świdra na platformie. Uwzględniając powyższe, odległość osi pochylonych pali skrajnych od krawędzi fundamentu zaleca się przyjmować w zakresie 20 cm + 20 cm (tolerancja) $+0,5 \cdot D$, gdzie D to średnica pala.

3.2. Kolejność wykonywania pali

Uwzględniając specyfikę obiektów inżynierskich, rozstawy pali przeważnie znajdują się w zakresie 2÷3 m. Przy takim zakresie rozstawów, biorąc pod uwagę fakt, że pale przemies-

zczeniowe głównie są wykonywane w gruntach spoistych w stanie plastycznym do twaroplastycznego, w przypadku wykonywania ich jeden po drugim zachodzi niebezpieczeństwo przepchnięcia świeżo uformowanego trzonu pala, powodując przewężenie w przekroju pala. Przy wykonywaniu pali wierconych CFA również istnieje poważne zagrożenie, wykonując pale jeden po drugim. W trakcie wiercenia pala CFA w bezpośrednim sąsiedztwie świeżo wykonanego pala istnieje ryzyko przebicia betonu do pala wierconego. Zjawisko to jest o tyle niebezpieczne, że może spowodować obniżenie poziomu betonu w wykonanym palu, powodując pustki w ich trzonach, które na etapie betonowania są niemożliwe do wykrycia. W celu wyeliminowania powyższego ryzyka z reguły w ciągu jednej zmiany wykonuje się co drugi pal oddalony od poprzednio wykonanego o min. 4 m oraz uzupełnia się pominięte pale po ok. 24 godzinach. Powyższą procedurę należy uwzględnić przy planowaniu robót, gdyż w sposób istotny zmniejsza ona wydajność oraz bezpośrednio przekłada się na koszty wykonania posadowienia.

3.3. Kosze zbrojeniowe

W trudnych warunkach geologicznych – przy występowaniu warstw gruntów organicznych na dużej głębokości, przewarstwionych warstwami gruntów nośnych – zachodzi potrzeba stosowania dłuższych koszy zbrojeniowych, niż wynika to z rozkładu sił przekrojowych w palach. W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę na zapewnienie odpowiedniej sztywności kosza w celu umożliwienia jego instalacji w palu. Firma Soletanche niejednokrotnie wykonywała projekty z długościami pali powyżej 20 m zbrojonych koszami o długości do 25 m. Przy tak długich koszach ich sztywność ma kluczowe znaczenie w aspekcie możliwości ich pograżenia. Dla koszy zbrojeniowych o długościach przekraczających 14 m jako zbrojenie główne zaleca się stosować pręty o średnicy min. 20 mm oraz zagęszczony rozstaw spirali min. do 15 cm na całej długości.

4. Podsumowanie

Technologia pali przemieszczeniowych typu SCREWSOL® stanowi konkurencyjne rozwiązanie względem innych technologii wierconych, umożliwiając wykorzystanie w maksymalny sposób nośności pali w gruntach spoistych. Korzystny stosunek uzyskiwanej nośności do zużycia materiału oraz wysokie wydajności powodują, że technologia ta jest z powodzeniem stosowana jako posadowienie obiektów inżynierskich.

Literatura

- [1] PN-EN 12699 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe* (czerwiec 2003).
- [2] Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle” der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle”*. Ernst & Sohn, Berlin 2007.
- [3] Second European Symposium on Penetration Testing *Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT*. M. Bustamante & L. Ganeseli, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France. Amsterdam, 24–27 May 1982.
- [4] Kosecki M.: *Statyka ustrojów palowych, zasady obliczania metodą uogólnioną*. Szczecin 1988.





TRENCHMIX®

Zastosowanie:

- ▶ wzmacnianie gruntu
- ▶ przegrody przeciwfiltracyjne
- ▶ ściany oporowe
- ▶ stabilizacja i zestalanie gruntu

TRENCHMIX® jest technologią opracowaną wspólnie przez Soletanche Bachy oraz producenta specjalistycznego sprzętu do prac drenażowych i odwodnieniowych Mastenbroek.

Polega na wprowadzeniu **mieszadła łańcuchowego**, które **niszczy strukturę gruntu** w podłożu, oraz wymieszaniu jego cząstek ze spoiwem hydraulicznym podawanym w formie zawiesiny.

Uzyskujemy **jednorodną przesłonę** o wyższych właściwościach wytrzymałościowych i przeciwfiltracyjnych niż występujące naturalnie.

Build on us

Oddział Warszawa
ul. Powązkowska 44c
01-797 Warszawa

office@soletanche.pl

Oddział Gdańsk
ul. Orzechowa 5, II piętro
80-175 Gdańsk

gdańsk@soletanche.pl

Oddział Kraków
ul. Wielicka 250
30-663 Kraków

kraków@soletanche.pl

Oddział Wrocław
ul. Żmigrodzka 244
51-131 Wrocław

wrocław@soletanche.pl

www.soletanche.pl

Postaw na nas



SOLETANCHE