

Technologia CFA

w budownictwie mostowym?

tekst: **dr inż. DARIUSZ SOBALA**, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Zakład Dróg i Mostów; Aarsleff Sp. z o.o.

Technologię pali CFA¹ (znaną w Polsce także jako FSC, a w Stanach Zjednoczonych jako ACIP) opracowano w latach 60. XX w. jako szybką i tanią alternatywę dla innych rodzajów pali, przede wszystkim pali wierconych². Bazuje ona na konstrukcji wiertła ślimakowego stosowanego w palach wierconych, rozwiniętego o centralną rurę przystosowaną do podawania mieszanki betonowej.

1. Wprowadzenie

Duży wzrost liczby zastosowań technologii pali CFA nastąpił dopiero w latach 80. XX w. w Europie Zachodniej i w Stanach Zjednoczonych, co miało bezpośredni związek ze wzrostem wartości momentu obrotowego w produkowanych ówczesnie palownikach oraz rozwojem technologii betonu w zakresie pompowności i zdolności do samozagęszczania mieszanek betonowych (tzw. beton palowy). W Polsce pierwsze pale CFA wykonano w 1995 r. [1].

Pale CFA odniosły spektakularny sukces techniczny i marketingowy. Niektórzy autorzy szacują, że stanowią one ok. 25% wszystkich pali wykonywanych na świecie w ciągu ostatnich 30 lat. Podobna sytuacja miała miejsce w Polsce, gdzie pomimo obiektywnych trudności związanych z brakiem przepisów i wytycznych dotyczących projektowania i wykonawstwa (a może właśnie dzięki temu), pale CFA w wielu obszarach budownictwa stały się synonimem pali w ogóle. Wykonywał i wykonuje je każdy wykonawca dysponujący wiertłem i palownicą, projektował je lub projektuje każdy projektant zajmujący się wzmocnieniami podłoża i posadowieniami głębokimi, pomimo braku powszechnie zaakceptowanych procedur projektowych.

Inżynierowie mostowi na tle środowiska inżynierów budownictwa wykazywali się do tej pory nadzwyczajną wstrzeźliwością w wykorzystywaniu technologii CFA. Jednak wraz ze zmianą dominującej procedury prowadzenia kontraktów publicznych na optymalizuj i buduj oraz projektuj i buduj sytuacja ta zaczęła się intensywnie zmieniać. Dwie podstawowe cechy opisujące technologię CFA (szybka i tania) i świadome lub nieświadome pominięcie silnych ograniczeń jej stosowania

powoduje, że coraz częściej powstają rozwiązania spełniające wymagania finansowe, ale niekoniecznie techniczne. Presją na stosowanie coraz tańszych rozwiązań materiałowych i technologicznych w budownictwie mostowym w Polsce nieustannie rośnie i przekraczamy wciąż nowe granice kompromisów technicznych. Dotyczy to także technologii CFA w budownictwie mostowym. Zjawisko to nie jest jednoznacznie negatywne, ponieważ każda technologia, w tym także technologia CFA, ma swój zakres zastosowań, który może być stopniowo, wraz z zdobywaniem kolejnych doświadczeń, poszerzany. Za element negatywny przy doborze technologii posadowienia z wykorzystaniem technologii CFA można uznać wciąż często obserwowany w praktyce brak znajomości jej podstawowych mechanizmów oraz konsekwencji jej nieprawidłowego zastosowania. Autor, będąc przekonany, że technologia pali (kolumn) CFA należy do grupy najtrudniejszych i najbardziej wrażliwych na jakość projektowania i wykonawstwa technologii geotechnicznych, podjął w artykule próbę wskazania jej istotnych ograniczeń, które powinny być przedmiotem uważnej analizy na etapie projektowania w obszarze budownictwa mostowego.

Dla przypomnienia – obiekty mostowe według PN-EN 1990 należą do obiektów kategorii 5, o najdłuższym przewidywanym okresie użytkowania równym 100 lat (dwa razy dłuższym niż w przypadku budynków), klasy konsekwencji zniszczenia CC2 lub CC3, oznaczającej przeciętne lub wysokie konsekwencje, podlegają poziomowi nadzoru przy projektowaniu DSL2 lub DSL3, co oznacza sprawdzenie rozwiązań projektowych co najmniej według wewnętrznych procedur pracowni lub także przez stronę trzecią, oraz najwyższemu poziomowi inspekcji w trakcie budowy IL3, oznaczającemu inspekcję zaostrzoną, prowadzoną przez stronę trzecią. Takie wymagania zobowiązują.

2. Proces wykonania pala CFA

Proces wykonania pala w technologii CFA (fot. 1) powinien być ciągły, płynny, szybki i powtarzalny w ramach obszaru uznanego za podobny pod względem geotechnicznym. Integralnymi elementami tego ciągłego procesu są:

- Przygotowanie:
 - A. Przygotowanie stabilnej platformy roboczej.
 - B. Dostarczenie na plac budowy wymaganej objętości mieszanki betonowej przewidzianej do wbudowania w wykonywanym palu (lub palach) z uwzględnieniem nadkładu technologicznego.
 - C. Wykonanie badania konsystencji mieszanki betonowej.
 - D. Wypełnienie mieszanką betonową rdzenia rurowego wiertła ślimakowego.

¹ Artykuł dotyczy głównie pali CFA, ale porusza też kwestię kolumn wykonywanych w tej samej technologii.

² Technologia pali CFA stanowiła podstawę rozwoju (przez zwiększenie średnicy i zmianę kształtu rury centralnej) technologii pali przemieszczeniowych formowanych w gruncie (Atlas, FDP, SDP itp.).

- **Wiercenie pala**, czyli płynne i ciągłe wwiercanie wiertła ślimakowego w podłoże gruntowe przy minimalnej ilości urobku transportowanego wzdłuż wiertła na powierzchnię terenu, aż do osiągnięcia założonej rzędnej wiercenia.
- **Betonowanie pala:**
 - A. Zatrzymanie obrotów wiertła (lub utrzymanie bardzo wolnych obrotów w kierunku wiercenia) z jednoczesnym niewielkim jego uniesieniem (150÷300 mm) i pompowaniem mieszanki betonowej z maksymalnym ciśnieniem.
 - B. Powolne unoszenie wiertła wypełnionego gruntem z jednoczesnym podawaniem pod ciśnieniem mieszanki betonowej i usuwaniem urobku z wiertła nad poziomem terenu.
- **Przygotowanie głowicy pala i pogrążanie zbrojenia:**
 - A. Usunięcie całości urobku z sąsiedztwa otworu.
 - B. Usunięcie wiertła znad otworu i usunięcie (ścięcie) nadmiaru betonu do projektowanej rzędnej głowicy pala.
 - C. Pogrążenie zbrojenia z ewentualnym wspomaganie siłą statyczną i/lub lekkim wibratorem.



Fot. 1. Wiercenie pali CFA – obiekt (MD-10) w ciągu S7 w Krakowie, fot. Aarsleff Sp. z o.o.

3. Co (nie)wiemy o palach CFA?

Obszernym i jednocześnie trudno dostępnym krajowym opracowaniem na temat technologii CFA jest raport IBDiM [1]. Jak już wcześniej wspomniano, pierwszy szeroki i powszechnie dostępny dla polskich inżynierów opis technologii CFA zamieścił w swojej monografii Gwizdała [2]. Treść wymienionych wydawnictw dopełniają referaty konferencyjne, seminaryjne i artykuły rozproszone w polskiej prasie technicznej zajmujące się z reguły zagadnieniami szczegółowymi. Warty podkreślenia jest tutaj wkład publikacyjny E. Marcinkowa i P. Rychlewskiego. Wdrożenie norm europejskich uporządkowało formalnie warunki praktycznego wykorzystania technologii CFA w projektowaniu (PN-EN 1997) i wykonawstwie (PN-EN 1536) w Polsce, jednak w małym stopniu zmieniło stan świadomości środowiska inżynierów na temat istotnych ograniczeń technologii. Do tej pory brak jest w kraju powszechnie stosowanej i akceptowanej metody projektowania pali CFA. Projektanci dokonują adaptacji metod projektowania innych rodzajów pali lub wykorzystują doświadczenia własne, które z natury rzeczy są ograniczone.

W spisie piśmiennictwa podano kilka interesujących i w większości dostępnych pozycji piśmiennictwa zagranicznego, które umożliwiają poszerzenie wiedzy na temat technologii CFA. Jedną z najczęściej cytowanych publikacji jest doskonały, lecz trudno

dostępny artykuł [4]. W 2007 r. powstał bardzo obszerny, kompletny i ogólnie dostępny raport FHWA [5]. Szeroki opis technologii CFA można znaleźć także w monografii [6] i ogólnie dostępnym artykule Brown'a [7].

3.1. Informacje ogólne

Typowe pale CFA wykonuje się wiertłami ślimakowymi o średnicach zewnętrznych od 400 do 1200 mm [8]. Typowe maksymalne długości pali CFA, które stosunkowo łatwo wykonać, są ograniczone do ok. 20 m, możliwe do wykonania i wykonywane są pale CFA o długościach do ok. 25 m, a za trudne do wykonania można uznać pale o długościach do 30 m lub większych. Są to pale zaliczane do grupy pali wierconych, urobkowych, bezprzemieszczeniowych lub wywołujących małe przemieszczenia gruntu w trakcie wykonania. Przepisy niemieckie [8] za pale CFA uznają te wykonane wiertłem o stosunku średnicy rury wewnętrznej do średnicy wiercenia mniejszym niż 0,4 (pale przemieszczeniowe formowane w gruncie mają ten stosunek większy niż 0,6). Technologię CFA charakteryzuje niski poziom wibracji oraz stosunkowo niski poziom emisji hałasu. Jest uznawana za przyjazną dla otoczenia (brak istotnych przemieszczeń gruntu) i środowiska, ze wszystkimi ograniczeniami charakterystycznymi dla pali formowanych w gruncie, np. w zakresie kontaktu świeżej mieszanki z gruntem i wodą gruntową oraz koniecznością utylizacji urobku zanieczyszczonego w różnym stopniu. Technologia w praktyce uniemożliwia kontrolę profilu gruntowego w trakcie wykonania pala (z wyjątkiem oporów wiercenia) i dlatego jej zastosowanie powinno poprzedzać dokładne rozpoznanie warunków gruntowych, także na potrzeby technologiczne.

Typowy zakres osiągniętych nośności charakterystycznych pali CFA to 0,5÷2,0 MN [8]. W praktyce, w sprzyjających warunkach, możliwe jest uzyskanie nośności granicznych dochodzących do 7,5 MN [6].

Wykorzystaniu technologii CFA na pewno sprzyja konieczność szybkiej realizacji robót, bardzo dobrze przygotowana platforma robocza, jednorodne warunki gruntowe, krótkie, obciążone siłą wciskającą i mało odpowiedzialne pale oraz duże zakresy robót (np. fundamenty obiektów komercyjnych lub wzmocnienia pod nasypami). Pale CFA w formie różnego rodzaju palisad są powszechnie wykorzystywane do zabezpieczeń wykopów o głębokości do kilkunastu metrów, szczególnie tych realizowanych w ścisłej zabudowie miejskiej, oraz osuwisk.

W sprzyjających warunkach gruntowych i lokalizacyjnych dla pali o mniejszych średnicach i długości ograniczonej do 20 m wydajność robót palowych w technologii CFA może sięgać 300–450 m na dzień roboczy.

Aby zapewnić możliwość szybkiego wiercenia na znaczne głębokości bez wydobywania urobku, potrzebna jest ciężka palownica, wyposażona w wiertnicę o dużym momencie obrotowym. Szczególnie w przypadku długich pali decydują możliwości palownicy, która w krytycznym momencie musi podnieść na znaczną wysokość ciężkie wiertło wypełnione gruntem.

3.2. Przygotowanie do wykonania pala CFA

Przygotowanie do wiercenia pala CFA jest jednym z kluczowych etapów robót. Wykorzystanie podstawowych zalet technologii CFA, polegających na ciągłości i szybkości procesu wykonania pala, zależy w znacznym stopniu od właściwego

przygotowania platformy roboczej i zaplanowania kolejności robót, dostarczenia na budowę wymaganej ilości mieszanki betonowej o określonych właściwościach oraz zbrojenia o odpowiednio dobranej konstrukcji. Błędy organizacyjne popełnione na etapie przygotowania (np. opóźnienia w dostawie lub wbudowaniu mieszanki betonowej) nie tylko zmniejszają wydajności i zwiększają koszty, ale w istotny sposób mogą wpływać na nośność i jakość wykonanych pali. Każda przerwa lub wydłużenie procesu wykonania pala, od rozpoczęcia wiercenia do pograżania zbrojenia, jest niekorzystna.

3.3. Mieszanka betonowa

Do pali CFA stosuje się mieszanki betonowe charakteryzujące się $w/c < 0,6$ oraz opadem stożka (kontrolowanym na budowie) równym ok. 150 mm. Należy stosować mieszanki palowe, tzn. z dodatkiem plastyfikatorów, dodatków ograniczających skurcz lub wręcz powodujących pęcznienie, o dobrej pompowalności, odporności na rozsegregowanie składników oraz zdolności do samozagęszczania. Stosowane w palach CFA klasy betonu to zwykle C20/25, C25/30 lub C30/37 o minimalnej zawartości cementu na poziomie 325 kg/m^3 w warunkach suchych i 375 kg/m^3 w gruntach nawodnionych. Bez potrzeby nie należy zwiększać klasy betonu.

Warunki formowania betonowych trzonów pali w gruncie różnią się zasadniczo od naziemnych warunków formowania konstrukcji betonowych. Norma brytyjska BS 8400, ze względu na niekorzystne warunki formowania trzonu pala, ograniczała poziom dopuszczalnego naprężenia użytkowego do 25% wytrzymałości betonu. Eurokody w tym zakresie są zdecydowanie łagodniejsze i wymagają stosowania współczynnika materiałowego dla betonu pali o wartości o 10% większej. W palach CFA nie należy stosować tanich betonów towarowych. Czynnikiem ryzyka w odniesieniu do mieszanki betonowej i betonu w palach CFA są długie kosze zbrojeniowe, wymagające długotrwałego wibrowania. Mieszanka betonowa może ulec rozsegregowaniu, co dodatkowo zwiększa opory pograżania zbrojenia. Rozsegregowanie mieszanki w największym zakresie dotyczy górnej, najbardziej obciążonej części pala. Kontrola jakości i wytrzymałości betonu na kostkach sześciennych nie jest w stanie wykryć potencjalnych wad materiałowych betonu w palu, o ile materiał do badań nie został pobrany bezpośrednio z głowicy gotowego pala (w postaci mieszanki betonowej lub próbek rdzeniowych). Warto zdawać sobie sprawę z faktu, że prawidłowo zrealizowana procedura przygotowania próbki sześciennego betonu najczęściej nie odwzorowuje warunków układania mieszanki betonowej w palach formowanych w gruncie. Bardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się z badań próbek rdzeniowych.

3.4. Zbrojenie pala

Pale CFA mogą być niezbrojone lub zbrojone. Zbrojenie, w postaci kosza zbrojeniowego (złożonego z min. sześciu sztuk prętów głównych) lub kształtownika, pograżane jest w świeżej mieszance betonowej. W zaprawie udaje się pograżać zbrojenie o długości do 20 m. Kosze pograżane w betonie nie powinny być dłuższe niż 15 m (E. Marcinków zaleca max. 12 m [2]). Generalnie należy stosować zbrojenie o minimalnej potrzebnej długości. Nie należy projektować zbrojenia sięgającego spodu pala (min. o 0,5 m krótsze). Należy stosować

kosze zbrojeniowe spawane, z rzadką spiralą i ewentualnymi pierścieniami usztywniającymi ze zwojów pręta lub płaskownika. Średnica kosza powinna być mniejsza od średnicy wiercenia o 150 mm (otulina min. 75 mm). Zbrojenie powinno być wyposażone w promieniście rozmieszczone elementy dystansowe z płaskowników, ostatecznie ze sztywnych prętów, w rozstawie uzależnionym od sztywności zbrojenia (co ok. $1,5 \div 3,0 \text{ m}$). Na końcowym odcinku kosza zbrojeniowego pręty zwykle zagina się nieznacznie w kierunku osi pala, a w przypadku dwuteowników „zaostrza się” półki. Do pograżania zbrojenia wykorzystuje się siłę grawitacji, obciążenie statyczne masztem palownicy i/lub niewielkie wibratory. Należy unikać intensywnego wibrowania – związane jest z nim, opisane wyżej, zagrożenie rozsegregowania mieszanki betonowej.

3.4. Zalecenia dla stosowaniu technologii CFA wynikające z warunków gruntowych

Najlepsze dla stosowania pali CFA są jednorodne warunki gruntowe w profilu wiercenia. Mogą to być urabialne skały miękkie, zwietrzliny, scementowane pisaki i gliny plastyczne i twaroplastyczne. W gruntach mało spoistych (pyłach i glinach pylastych) wiercenie jest szybkie, a przez to ekonomiczne. W piaskach różnoziarnistych, także w tych z dodatkiem żwiru, szczególnie w warstwach zlokalizowanych nad poziomem wody gruntowej, wiercenie jest także stosunkowo łatwe.

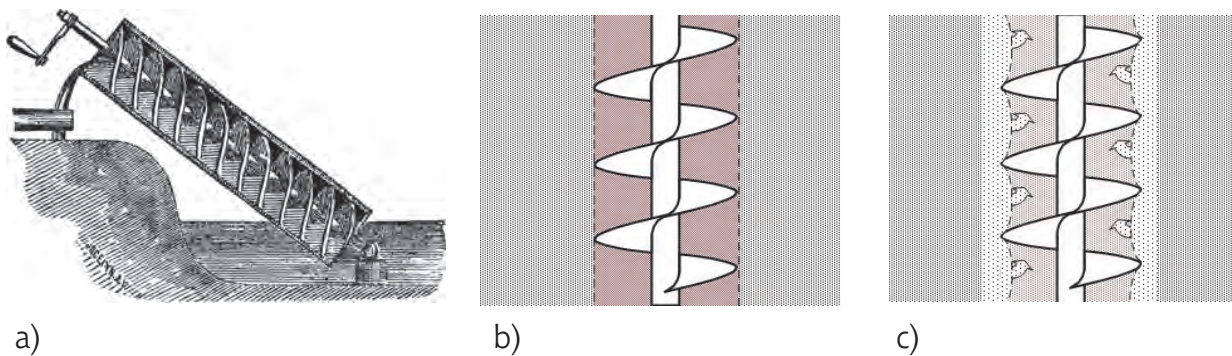
Wraz ze wzrostem skomplikowania budowy podłoża gruntowego rośnie ryzyko związane ze stosowaniem technologii CFA. Nie zaleca się wykonywania pali CFA w jednorodnych gruntach piaszczystych nawodnionych o $D_{60}/D_{10} < 1,5$, w gruntach luźnych oraz spoistych o $c_u < 15 \text{ kPa}$, o ile w próbnym obciążeniu lub na podstawie zebranych wcześniej lokalnych doświadczeń nie wykaże się przydatność technologii w takich warunkach [8]. Grunty sypkie o uziarnieniu $1,5 < D_{60}/D_{10} < 3,0$ mogą również być niestabilne w trakcie wiercenia CFA, jeśli znajdują się pod poziomem lustra wody gruntowej. Za niekorzystny uznaje się także przepływ wody w gruncie, występowanie twardych przewarstwień, kamieni i gładów oraz zmiennych warunków gruntowych, dla których nie sposób przygotować właściwej procedury wiercenia.

3.5. Wiercenie pala

W wierceniu pali CFA wykorzystywany jest mechanizm maszyny prostej w postaci śruby (pompy) Archimedesa³ (rys. 1a). Mechanizm ten, wymyślony w starożytności do nawadniania pól (pionowego transportu wody), jest niezawodny i wykorzystywany do dzisiaj. W palach CFA wykorzystywany jest do transportu urobku (rys. 1b). Jego wysoka skuteczność niestety niesie ze sobą również liczne zagrożenia. W trakcie wiercenia pala CFA ściany otworu utrzymywane są w równowadze przez grunt utrzymywany (i w niewielkim zakresie transportowany w górę) na łopatach wiertła ślimakowego (rys. 1b).

Przy wkręcaniu świda grunt prędkość pograżania i prędkość obrotowa muszą być tak dobrane, aby minimalizować objętość wydobywanego urobku i w ten sposób zapewnić wypełnienie wiertła gruntem i stabilność ścian formowanego otworu (rys. 1b). Objętość urobku wyniesionego na powierzchnię terenu w trakcie wiercenia powinna być co najwyżej równa

³ Wynalazek Babilończyków przypisany niesłusznie Archimedesowi.



Rys. 1. Śruba Archimedes: a) idea (pl.wikipedia.org), b) wykorzystanie w prawidłowym wierceniu CFA (za [4]), c) mechanizm zasysania i pompowania gruntu z pobocznic przy zbyt dużej prędkości obrotowej wiertła (za [4])

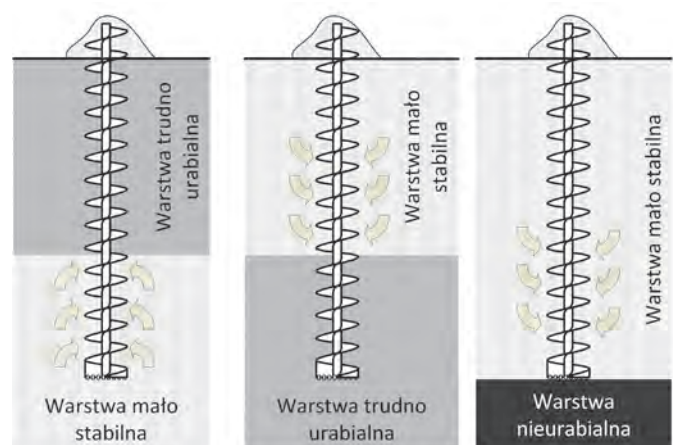
objętości wiertła. Jeżeli prędkość obrotowa jest zbyt wysoka, a wzdłuż pobocznic zalega mało stabilny grunt spoisty lub luźny grunt piaszczysty, jednorodny pod względem uziarnienia, dodatkowo nawodniony lub z wodą pod ciśnieniem, obracające się i niewypełniane całkowicie gruntem wiertło tworzy podciśnienie, co nieuchronnie prowadzi do trwałego uszkodzenia pobocznic (rozluźnienia, zmiany parametrów gruntu) oraz nadmiernego transportu gruntu (rys. 1c) i zwiększenia zużycia betonu w trakcie betonowania. Zachowanie prawidłowych parametrów wiercenia jest stosunkowo łatwe w mało skomplikowanych, jednorodnych warunkach gruntowych, szczególnie w gruntach spoistych o średniej wytrzymałości ($c_u > 15$ kPa). Duże zagrożenie „pompowaniem” gruntu występuje w przypadku próby formowania pali stopowych lub w podłożu gruntowym uwarstwowionym (złożonym naprzemiennie z warstw gruntów spoistych i niespoistych) przy każdorazowym przejściu z warstwy spoistej do niespoistej. Obecność wody gruntowej, a szczególnie wody gruntowej pod ciśnieniem uwięzionej w warstwach gruntów niespoistych, znacznie zwiększa ryzyko „pompowania” gruntu z pobocznic. Wystąpienie „pompowania” może ograniczyć nośność pobocznic o 30% [6].

W trakcie wiercenia CFA w gruntach spoistych o wysokiej wytrzymałości (np. polodowcowych), o ile urabianie gruntu jest w ogóle możliwe, może dojść do polerowania pobocznic w wyniku nadmiernej liczby obrotów i prędkości obrotowej wiertła. Gładka powierzchnia otworu to gładka i zredukowana powierzchnia pobocznic, co negatywnie wpływa na nośność i sztywność pala.

W przypadku napotkania przeszkody w gruncie stosunkowo wiotkie wiertło zatrzymuje się lub odchyła od osi wiercenia. W pierwszym przypadku nie pozostaje nic innego, jak wykręcić je starannie z gruntu bez wydobywania urobku i zmienić lokalizację pala. W drugim przypadku pal może być przesunięty w planie i zakrzywiony po głębokości. Oprócz zwiększonego ryzyka wybożenia pala pod obciążeniem powoduje to zwykle dodatkowe problemy z pograżaniem zbrojenia, szczególnie zbrojenia sztywne z kształtowników. Technologia CFA nie nadaje się generalnie do wiercenia w gruntach zawierających kamienie i głązy oraz w skałach, poza skałami miękkimi. Z reguły nie nadaje się także do wykorzystania w miękkich skałach wapiennych ze względu na możliwość trwałej degradacji struktury skały w wyniku obrotowego urabiania w obecności wody.

W trudnych warunkach gruntowych możliwe jest prawidłowe wykonanie wiercenia CFA. Ryzyko pompowania gruntu można zmniejszyć, stosując zaawansowane systemy elektronicznego monitoringu. Współcześnie takie systemy, na zasadzie podobnej do działania automatycznej skrzyni biegów, wspomagają decyzje operatora i samodzielnie dobierają parametry procesu wiercenia do wykorzystywanej technologii, konstrukcji wiertła i zmieniających się warunków gruntowych. W normalnym trybie pracy uniemożliwiają także operatorowi podejmowanie błędnych decyzji. Nic jednak nie zastąpi bardzo dobrego rozpoznania podłoża, uważnego inżyniera oraz doświadczonego operatora.

Innym sposobem ograniczenia ryzyka wykonawczego w trakcie wstawiania wiertła jest zastosowanie palownicy z układem dwóch przeciwbieżnych napędów, co umożliwia wykorzystanie wiertła CFA z rurą osłonową (CCFA) (fot. 3). Takie wiercenie w większym stopniu odwzorowuje i twórczo rozwija pierwotną ideę śruby Archimedes. Jest również szybkie, likwiduje ryzyko zasysania gruntu z pobocznic i zwiększa możliwość przewiercania przeszkód zalegających w gruncie. Ryzyko pompowania gruntu występuje w zasadzie jedynie na końcu wiertła. Wykonane z wykorzystaniem sztywnej rury otwory są proste. Problemem jest, ograniczony do przedziału 300–500 mm, zakres dostępnych średnic wiercenia, ograniczona głębokość wiercenia (zwykle do ok. 20 m) oraz zupełny brak możliwości kontrolowania profilu gruntowego



Rys. 2. Schematyczne układy warstw sprzyjające „pompowaniu” gruntu wiertłem ślimakowym na powierzchni terenu

(poza oporami wiercenia). Pobocznica tak uformowanych pali jest z reguły mniej rozwinięta (gładka).

Rura wewnętrzna, stanowiąca w trakcie wiercenia trzon świdra ślimakowego, używana jest później do betonowania pala, zatem w trakcie wiercenia musi być drożna (wypełniona mieszanką betonową) i zabezpieczona przez zatkanie urobkiem.

3.6. Betonowanie pala

Betonowanie można rozpocząć w momencie zakończenia wiercenia i wymaga niewielkiego uniesienia wiertła. W zależności od konstrukcji wiertła potrzebne jest uniesienie rzędu 150÷300 mm przy jednoczesnym intensywnym pompowaniu mieszanki betonowej. Przy osiągniętej na stabilnych platformach tolerancji położenia wiertła w pionie rzędu kilkudziesięciu milimetrów proces ten wydaje się w pełni kontrolowalny. Uniesienie wiertła umożliwi przepływ mieszanki betonowej i wypełnienie powstałej przestrzeni. Opis ten jest jednak niepełny. W zależności od warunków gruntowo-wodnych na poziomie spodu formowanego pala w trakcie unoszenia wiertła występuje, w mniejszym lub większym stopniu, zjawisko zasysania gruntu wokół stopy (fot. 2), czemu może towarzyszyć jego rozluźnienie. Im większy udział nośności stopy w nośności pala, tym ryzyko rośnie. Podobnie jak w przypadku pobocznicy, bardziej ryzykowne są grunty niespoiste, drobne, równoziarniste, nawodnione lub z wodą gruntową pod ciśnieniem. Małe ryzyko w opisywanym przypadku występuje w gruntach spoiwych o dużej wytrzymałości, o ile roboty prowadzone są wystarczająco szybko.



Fot. 2. Stawianie baniek na zimno doskonale ilustruje ryzyko związane z formowaniem stopy pala CFA (www.storczyk.nl)

Ten etap procesu wykonania pala CFA uznawany jest za krytyczny. Tomlinson i Woodward [6] zalecają przyjmowanie na etapie projektowania zredukowanej powierzchni stopy lub stosowanie konserwatywnych wartości oporów pod stopą pala CFA.

Dla zabezpieczenia przed zanieczyszczeniem mieszanki betonowej układanej od dna otworu, wiertło powinno być unoszone bez obrotu lub, w przypadku konieczności zerwania sił adhezji, z powolnym obrotem w kierunku wiercenia. Niektórzy autorzy, po wstępnym uniesieniu wiertła i wypełnieniu dolnego fragmentu trzonu pala beto-

nem, zalecają jego ponowne wwiercenie wiertła na rzędą projektowaną w mieszankę betonową. Celem tego zabiegu ma być wypełnienie dolnego odcinka betonem i zabezpieczenie układanej mieszanki przed zanieczyszczeniem oraz likwidacja skutków ewentualnego rozluźnienia dna. Propozycja wypełnienia dolnego odcinka wiertła betonem jest uzasadniona. Można to jednak zrobić bez opuszczania wiertła, odpowiednio zwiększając ciśnienie mieszanki betonowej i wykonując nim pojedyncze, powolne obroty. Ponowne wwiercanie lepiej jednak zastąpić dociśnięciem wiertła z maksymalną siłą przed rozpoczęciem jego powolnego podnoszenia.

Urobek powinien być usuwany w trakcie ponoszenia wiertła na bieżąco. Wykorzystuje się do tego celu specjalne urządzenia lub usuwa urobek z łopat wiertła ręcznie. Pozostawienie wiertła wypełnionego gruntem i podnoszenie go na wysokość od kilku do kilkudziesięciu metrów stanowi realne zagrożenie bezpieczeństwa pracowników ze względu na możliwość spadania dużych brył gruntu ze znacznej wysokości. Podobne zagrożenie, w mniejszym stopniu, występuje przy wierceniu CCFA, w którym nadmiar urobku wyrzucany jest przez górną część wiertła i wymaga specjalnego systemu odbioru (fot. 3) lub wyznaczenia szerokich stref bezpieczeństwa.



Fot. 3. Palownica z osprzętem CCFA wyposażona w układ odbierający urobek (www.van-elle.co.uk)

4. Monitoring procesu palowania

Jednym z podstawowych warunków wykorzystania technologii CFA w odpowiedzialnych fundamentach palowych obiektów mostowych jest prowadzenie ciągłego, najlepiej w pełni zautomatyzowanego i systematycznie kalibrowanego monitoringu procesu palowania, obejmującego na etapie wiercenia pogrążenie wiertła i jego prędkość obrotową, a na etapie betonowania uniesienie wiertła, objętość i ciśnienie wtłaczania mieszanki betonowej.

Wyniki pomiarów należy porównywać z uzyskanymi dla pozostałych pali i z palem wzorcowym, poddanym próbnemu obciążeniu. Tak prowadzona analiza metryk pali, wraz z wynikami badań kontrolnych, jest podstawą do oceny poprawności wykonania i przydatności użytkowej pala.

5. Badania pali

Jednym z podstawowych badań pali CFA, oprócz badań nośności, powinno być badanie ciągłości. Badając ciągłość pali, zwykle w pierwszej kolejności stosuje się badania przesiewowe, obejmujące 20% pali wskazanych na podstawie analizy metryk lub wybranych losowo. Jeżeli w wyniku przeprowadzonych badań uzyska się wynik negatywny, badania wykonuje się na wszystkich palach. Niektóre instytucje, np. ICE [6], wymagają z zasady badania ciągłości wszystkich pali CFA, wskazując w ten sposób na istotne ryzyko przerwania ich ciągłości związane z technologią wykonania.

Badania nośności wykonuje się metodą statyczną i/lub metodą dynamiczną. Przy ustalaniu terminu badań należy brać pod uwagę aktualną wytrzymałość betonu pala, pozwalającą na wykonanie badań. W przypadku badań dynamicznych głowica pala zwykle wymaga dodatkowego przygotowania (zbrojenia lub formowania dodatkowej głowicy). Prędkość rozchodzenia się fali odkształceń w palu poddanemu badaniom dynamicznym zależy m.in. od wilgotności i aktualnej sztywności betonu pala. Uwzględnienie rzeczywistych parametrów materiału pala jest kluczowe dla uzyskania wiarygodnych wyników badania dynamicznego pala.

W skomplikowanych warunkach gruntowych wykonanie pali do badań i same badania należy traktować jak badania przydatności, wzorczące proces wykonania pali w technologii CFA w lokalnych warunkach budowy. W przypadku zaobserwowania w trakcie wykonania robót palowych i/lub analizy metryk istotnych odchyłeń sposobu wykonania poszczególnych pali roboczych od sposobu wykonania zbadanego wcześniej pala wzorcowego, uzasadnione może być wykonanie dodatkowych badań kontrolnych powykonawczych na wytypowanych palach. Wszystkie badania nośności pali powinny być poprzedzone dokładnym rozpoznaniem podłoża w rejonie robót palowych.

6. Podsumowanie

Technologia CFA należy do najtrudniejszych i najbardziej wrażliwych na warunki gruntowe, jakość projektowania i wykonania (tzw. czynnik ludzki). Pale CFA, jak każdy rodzaj pala, mają swój specyficzny zakres stosowania. W przypadku budownictwa mostowego oczywistym zakresem stosowania pali CFA są wszelkiego rodzaju palisady (konstrukcje oporowe), fundamenty mniej odpowiedzialnych konstrukcji

(np. ekranów akustycznych), wzmocnienia podłoża pod nasypami i strefy buforowe między wzmocnieniami (palami) wykonywanymi w technologiach przemieszczeniowych (np. w strefie wzmocnienia podłoża za przyczółkami obiektów mostowych). Ze względu na opisaną w artykule wysoką wrażliwość technologii jej wykorzystanie w odpowiedzialnych fundamentach obiektów mostowych powinno zostać poprzedzone szczegółową analizą warunków gruntowych, dostępnego zestawu sprzętowego i doświadczenia ekipy wykonującej i projektującej roboty palowe. Zapewne wynik takiej analizy będzie z reguły pozytywny dla technologii CFA w przypadku krótkich pali, prostych, jednorodnych warunków gruntowych, szczególnie gruntów spoistych plastycznych i twaroplastycznych. W przypadku złożonych i zmiennych warunków gruntowych odradza się wykorzystanie technologii CFA w fundamentowaniu mostów bez uprzedniego przeprowadzenia badań przydatności i zapewnienia możliwości prowadzenia ciągłego, zautomatyzowanego monitoringu robót palowych.

Uzgodnienia wymaga także sposób (metoda) projektowania pali CFA w kraju – najlepiej w postaci nowej normy palowej, zgodnej z wymaganiami Eurokodu 7 (PN-EN 1997).

Literatura

- [1] Gajewska B., Grzegorzewicz K., Kłosiński B., Rafalski L., Rychlewski P.: *Analiza wpływu procesu technologicznego pali formowanych świdrem ciągłym FSC na ich nośność osiową*. IBDiM. Warszawa 2005.
- [2] Gwizdała K.: *Fundamenty palowe*. T. 1. *Technologie i obliczenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2010.
- [3] Fleming W.G.K.: *The understanding of continuous flight auger piling, its. Monitoring and control*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering 1995, No. 113, pp. 157–165.
- [4] Brown D.A., Steven P.E., Dapp D., Thompson W.R., Lazarte C.A.: *Design and construction of continuous flight auger piles*. Geotechnical Engineering Circular No. 8. Final Version. Federal Highway Administration. Washington D.C. 2007.
- [5] Tomlinson M., Woodward J.: *Pile design and construction practice*. Ed. 5. Taylor and Francis. London 2009.
- [6] Brown D.A.: *Practical considerations in the selection and use of continuous flight auger and drilled displacement piles*. Geotechnical Special Publication No. 132. ASCE, 2005, pp. 1–11.
- [7] DGGT. *Recommendations on Piling (EA-Pfähle)*. Ernst & Sohn. Berlin 2014.
- [8] Fleming W.G.K., Weltman A.J., Randolph M.F., Elson W.K.: *Piling Engineering*. Blackie. London 1994.
- [9] PN-EN 1990 *Podstawy projektowania konstrukcji*.
- [10] PN-EN 1536 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale wiercone*.
- [11] PN-EN 1997 *Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne*.
- [12] Prezzi M.: *Overview of construction and design of auger cast-in-place and drilled displacement piles*. Purdue University, 2009.
- [13] *Geotechnical Engineering Handbook*. Vol. 3. *Elements and structures*. Ed. U. Smlotczyk. Ernst & Sohn. Berlin 2013.

