

ANNA SOBOTKA, MARTA PAJĄK\*

## BADANIE MATERIAŁOCHŁONNOŚCI PALI CFA NA PODSTAWIE KOMPUTEROWYCH ZAPISÓW JAKOŚCI REALIZACJI PALI

### A STUDY ON MATERIAL CONSUMPTION IN CFA PILES ON THE BASIS OF COMPUTERIZED QUALITY MONITORING

#### Streszczenie

Jednym z rodzajów pali o dużym praktycznym zastosowaniu są pale wiercone świdrem ciągłym w systemie CFA (*Continuous Flight Auger*). Podczas realizacji tych pali mieszanka betonowa wnika w podłoże gruntowe, wskutek czego zużycie materiału jest większe niż wynika to z geometrycznych wymiarów pala. Jest to tzw. ponad-zużycie mieszanki betonowej i ma ono duży wpływ na planowanie zużycia materiału, a w efekcie na ponoszone rzeczywiste koszty robót palowych. Ponad-zużycie mieszanki betonowej jest rejestrowane w czasie realizacji pali za pomocą komputera stanowiącego wyposażenie maszyny do palowania. Wielkość ponad-zużycia zależy od warunków gruntowych, które mimo poprzedzających badań podłoża, często odbiegają od wyników badań.

*Słowa kluczowe: pale CFA, ponad-zużycie mieszanki betonowej, materiałochłonność, norma zużycia materiału*

#### Abstract

One of the types of piles with large practical application, are piles drilled in CFA (Continuous Flight Auger) system. During the implementation of these piles, there is the penetration of the concrete mix in the ground surface. As a result – a material consumption is higher than indicated by the geometric dimensions of the pile. This – so called “over-consumption” of concrete mix – has a large impact on the planning of material consumption, and hence on the actual incurred costs of pile works. Over-consumption of concrete mix is recorded at the time of implementation with a computer fitted to the piling machine. A volume of over-consumption depends on ground conditions, which, despite prior ground research, often differ from the results.

*Keywords: construction duration, construction time predictability, key performance indicators, public road projects*

\* Dr hab. inż. Anna Sobotka, dr inż. Marta Pająk, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

### Oznaczenia

$N_m$	–	norma zużycia materiału [ $\text{m}^3/\text{jednostkę}$ ]
$N_p$	–	norma podstawowa [ $\text{m}^3/\text{jednostkę}$ ]
$n_o$	–	norma odpadów [%]
$n_s$	–	norma manka i strat [%]
$N_{Pz}$	–	norma ponad-zużycia – wielkość określana na podstawie wyników badań <i>in-situ</i> [ $\text{m}^3/\text{jednostkę}$ ]
$\phi$	–	średnica wykonywanych pali [m]
$L$	–	długość wykonywanych pali [m]
$I_L$	–	stopień plastyczności charakteryzujący podłoże gruntowe, w którym wykonywane są pale.

### 1. Wstęp

Jednym z rodzajów pali o dużym praktycznym zastosowaniu są pale wiercone świdrem ciągłym w systemie CFA (z ang. *CFA – Continuous Flight Auger*). Są to pale, dla których nie ma informacji na temat norm pracochłonności ani materiałochłonności w dostępnych katalogach nakładów rzeczowych, a które są potrzebne do planowania robót palowych, kalkulacji kosztów lub też szybkiego przygotowania oferty.

Dzięki komputerowej rejestracji danych z przebiegu wykonywania pala istnieje możliwość ustalenia pracochłonności i materiałochłonności oraz określenia odpowiednich norm. Badania w tym obszarze były wykonywane w ramach pracy doktorskiej Marty Pająk [3]. W niniejszym artykule zostaną przedstawione wyniki badań dotyczące określenia materiałochłonności i norm zużycia mieszanki betonowej. Badania były wykonane na podstawie metryki 910 pali wykonywanych w gruntach spoistych, o średnicach od 0,4 do 1,0 m i długościach od 6,0 do 19,0 m. Są to typowe wymiary pali w praktyce fundamentowania palowego.

Pale CFA stosowane są najczęściej jako fundamenty głębokie dla nowo wznoszonych różnorodnych budowli, konstrukcji oporowych itp. Są to pale częściowo przemieszczeniowe, powodujące konsolidację gruntu wokół wykonywanego pala. Kolejne etapy formowania pali w systemie CFA przedstawiono na rysunku 1.

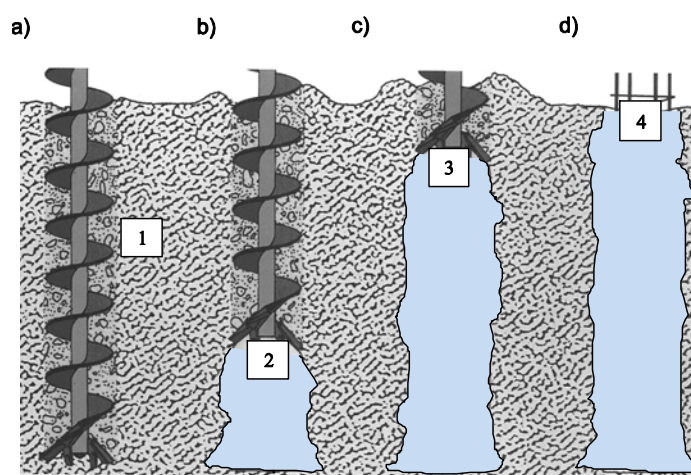
W przypadku wykonywania pali wierconych świdrem ciągłym w systemie CFA występuje dodatkowe zjawisko, które wpływa na materiałochłonność (i w konsekwencji na pracochłonność) robót, a mianowicie wnikanie mieszanki betonowej w podłoże gruntowe, wskutek czego zużycie materiału jest większe niż wynika to z geometrycznych wymiarów pala. Jest to tzw. ponad-zużycie mieszanki betonowej i ma ono duży wpływ na planowanie zużycia materiału, a w efekcie na ponoszone rzeczywiste koszty robót palowych. Ponad-zużycie mieszanki betonowej w nowoczesnej technologii palowania, jaką stanowi system pali CFA, jest rejestrowane w czasie realizacji pali za pomocą czujników i komputera stanowiącego wyposażenie maszyny do palowania.

W typowej metryce pala rejestrowana jest, oprócz innych danych (długości, ciągłości pala, średnicy, ciśnienia betonowania, czasu wiercenia itd.), informacja o:

- 1) całkowitej objętości wtłoczonej mieszanki betonowej,  $\text{m}^3$ ;
- 2) wielkości dodatkowego zużycia mieszanki betonowej tzw. ponad-zużycia, niewynikającego z parametrów geometrycznych pala, %.

Zapisy te mogą stanowić podstawę do określenia materiałochłonności palowania i opracowania norm zużycia mieszanki.

W artykule zaprezentowano wyniki badań prowadzące do opracowania norm zużycia mieszanki betonowej dla badanego zakresu pali CFA realizowanych w gruntach spoiстых (bez większych przewarstwień, w miarę jednorodnych).



Rys. 1. Etapy realizacji pali CFA: a) wiercenie świdrem ciągłym; b) betonowanie pala przez rurę rdzeniową świdra z równoczesnym podciąganiem świdra; c) zakończenie betonowania; d) wprowadzenie zbrojenia; 1 – podłoże gruntowe, 2 – świder wiertniczy, 3 – beton, 4 – zbrojenie

Fig. 1. Stages CFA piles: a) drilling by continuous auger b) concreting the pile by the core auger pipe while pulling the drill c) completion of concreting, d) the introduction of reinforcement; 1 – surface ground, 2 – auger drilling, 3 – concrete mix, 4 – reinforcement

## 2. Analiza czynników wpływających na materiałochłonność pali CFA

Obserwacja procesu wykonywania kilkuset pali CFA oraz analiza badań terenowych i dokumentów wykonawczych pali umożliwiła wskazanie czynników wpływających na materiałochłonność ich wykonywania (rys. 2). Wszystkie te czynniki powinny być uwzględnione w określonej materiałochłonności (poszukiwanej formule obliczania normy zużycia).

Tradycyjna formuła na określenie normy zużycia materiału uwzględnia podstawowe zużycie materiału, odpady oraz straty i manka materiałowe. Normę zużycia materiału określa się jako

$$N_m = \frac{100 \cdot N_p}{100 - (n_o + n_m)} \quad (1)$$

gdzie:

- $N_m$  – norma zużycia materiału, m<sup>3</sup>/jednostkę,
- $N_p$  – norma podstawowa, m<sup>3</sup>/jednostkę,
- $n_o$  – norma odpadów, %,
- $n_m$  – norma manka i strat, %.

Podczas wykonywania pali w systemie CFA praktycznie nie występują odpady ani straty lub manka. Wynika to z wysokiej jakości technologii palowania, odpowiedniej budowy maszyn używanych w realizacji pali oraz stosowanego ciśnieniowego betonowania. Dlatego też w prowadzonych badaniach przyjęto wartości zerowe dla norm odpadów oraz strat i manka. Bardzo istotne przy określaniu normy zużycia materiałów jest wskazanie wartości, tzw. ponad-zużycia betonu. Jest to zjawisko, które nie występuje w tradycyjnych technologiach (betonowanie odbywało się w rurze pala, pale formowano przez ich wbijanie itp.). W nowoczesnych systemach palowania – jakim jest system CFA – pal betonowany jest ciśnieniowo, bez osłony rurowej. Powoduje to wnikanie mieszanki betonowej w grunt otaczający formowany pal. W konsekwencji podłoże, w którym wykonywane są pale CFA jest wzmocniane (parametry wytrzymałościowe słabych warstw gruntowych ulegają znacznej poprawie) [1, 2]. Wnikanie mieszanki betonowej w podłoże gruntowe wokół pala powoduje poprawę parametrów wytrzymałościowych gruntu, ale jednocześnie skutkuje wzrostem zużycia mieszanki betonowej. W wyniku przeprowadzonych analiz terenowych i analitycznych stwierdzono, że zużycie mieszanki betonowej jest zróżnicowane w gruntach, które są charakteryzowane przez różne wartości stopnia plastyczności.

Również geometria pala określana przez jego długość i średnicę ma wpływ na zużycie mieszanki betonowej do wykonania pala. To właśnie wpływy tych dwóch grup czynników (gruntowych i geometrycznych) na wartość normy zużycia materiału są poddane dalszej analizie.

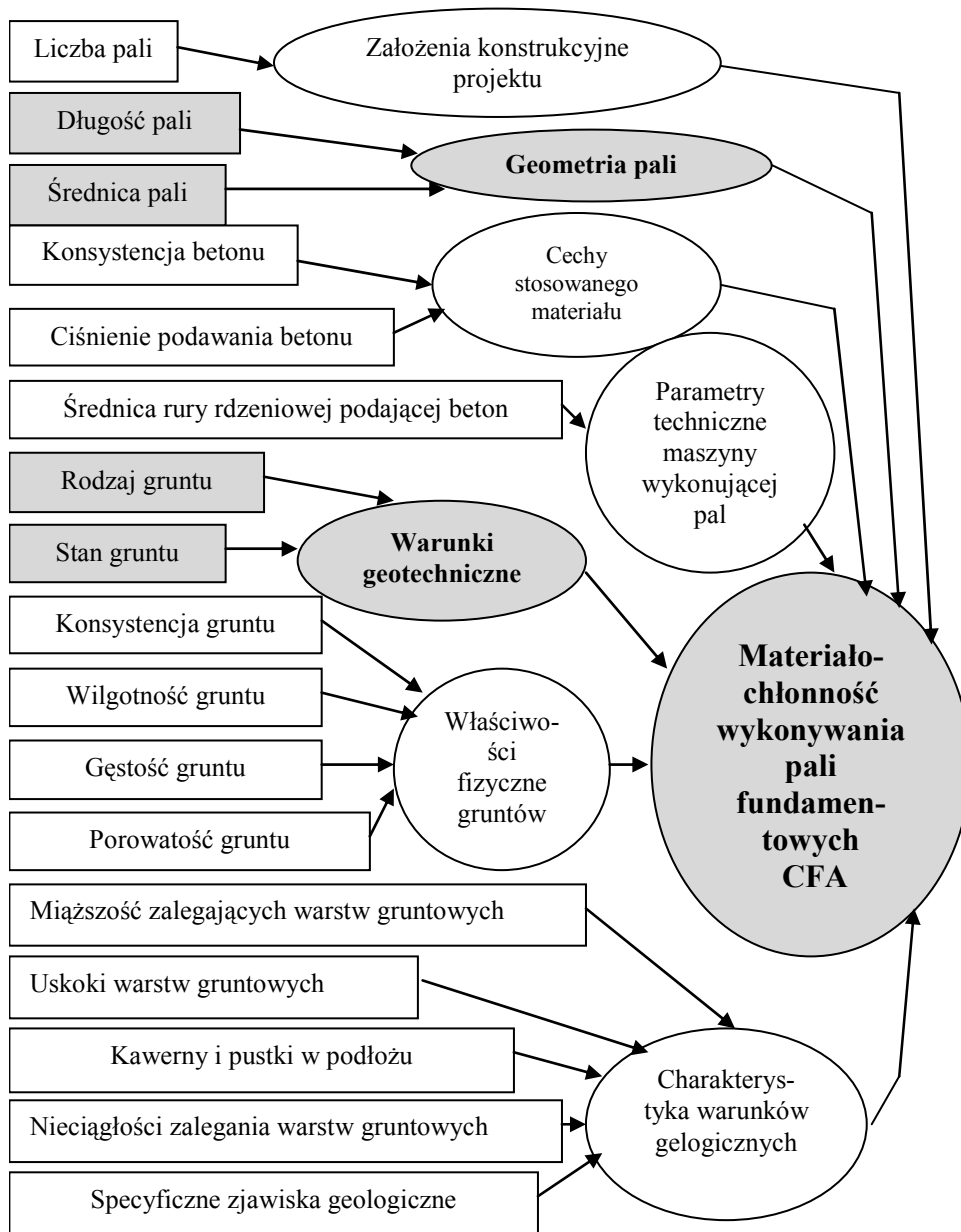
Informacje o ponad-zużyciu mieszanki betonowej są dokumentowane w postaci komputerowych metryk z realizacji każdego pala w systemie CFA. Komputerowy monitoring pozwala na wskazanie wielkości ponad-zużycia mieszanki betonowej dla kolejnych pali i jednocześnie podaje informacje o gruncie, w jakim wykonywany jest pal przez wskazywanie na każdej głębokości (odpowiadającej długości pala) wartości parametrów wykonawczych palownicy: prędkość obrotowa świdra, opór podczas wiercenia itp.).

W związku z powyższą specyfiką wykonywania pali wierconych świdrem ciągłym z ciśnieniowym betonowaniem konieczne jest przy określaniu normy zużycia materiałów uwzględnienie wartości ponad-zużycia mieszanki betonowej. Zatem norma zużycia materiału  $N_m$  obejmuje dwa składniki

$$N_m = N_p + N_{pz} = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot L}{4} + N_{pz} \quad (2)$$

gdzie:

- $N_p$  – norma podstawowa według projektu,
- $N_{pz}$  – norma ponad-zużycia – wielkość określana na podstawie wyników badań *in-situ*, m<sup>3</sup>/jednostkę,
- $\phi$  – średnica wykonywanych pali, m,
- $L$  – długość wykonywanych pali, m.



Rys. 2. Grupy czynników wpływających na materiałochłonność wykonywania pali CFA

Fig. 2. Groups of factors affecting the performance of pile CFA material consumption

Wartość pierwszego wyrazu tego wzoru, czyli normę podstawową, można określić na podstawie danych z projektu konstrukcyjnego palowania, tj. założeń konstrukcyjnych projektu dotyczących geometrii pali i założeń materiałowych. Natomiast wartość drugiego wyrazu zależy od stanu gruntu charakteryzującego podłoże gruntowe, w którym formowany jest pal oraz od parametrów geometrycznych pala, czyli średnicy i długości. W związku z tym należy znaleźć postać funkcji  $h$  na podstawie informacji zawartych w metrykach z realizacji pali CFA

$$N_{pz} = h(I_L, \phi, L), \quad (3)$$

gdzie:

$I_L$  – stopień plastyczności charakteryzujący podłoże gruntowe, w którym wykonywane są pale.

Pozostałe oznaczenia jak w (2).

### 3. Określenie funkcji ponad-zużycia i normy zużycia mieszanki betonowej

Badania prowadzące do określenia funkcji ponad-zużycia, a następnie całkowitej normy zużycia mieszanki betonowej do wykonania pali CFA wykonywane były według następującej kolejności:

- 1) sprawdzenie minimalnej liczebności próby badawczej,
- 2) badanie charakteru rozkładu zużycia mieszanki betonowej,
- 3) badanie istotności wpływu stanu gruntu, długości pala i jego średnicy na ponad-zużycie,
- 4) określenie funkcji regresji ponad-zużycia mieszanki betonowej względem stanu gruntów i parametrów geometrycznych pala,
- 5) obliczenie i tabelaryzacja normy materiałochłonności,
- 6) weryfikacja modelu normy materiałochłonności,
- 7) analiza wyników i wnioski.

Badane pale zostały wybrane w sposób losowy, z kilku różnych placów budów i były realizowane na przestrzeni kilku lat. W celu sprawdzenia, czy badana próba jest dostatecznie liczna wyznaczono minimalną liczebność próby. Przy poziomie współczynnika ufności 0,95 minimalna liczebność badanych prób wynosiła max 10 dla gruntów miękkoplastycznych.

Badając charakter zużycia mieszanki betonowej do realizacji poszczególnego pala, w danym zadaniu stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy, że rozkład zużycia materiału do realizacji pojedynczego pala CFA jest rozkładem normalnym. Na podstawie wykonanych obliczeń udowodniono, że wartość odchylenia standardowego  $\sigma$  stanowi mniej niż 5% wartości średniej arytmetycznej  $x$  dla wszystkich kolejnych etapów obliczeń, tj. dla wszystkich pali łącznie, dla pali wykonanych w gruntach twardopla-stycznych, plastycznych i miękkoplastycznych. Wartości średnie zużycia przyjmowano jako ilość zużywanej mieszanki w kolejnych obliczeniach.

Badanie istotności wpływu poszczególnych czynników wykonano za pomocą jedno- i dwuwymiarowej analizy regresji. Otrzymane wyniki wskazywały na potrzebę uwzględnienia wszystkich trzech czynników w funkcji regresji.

Na podstawie wyników otrzymanych z metryk komputerowych z realizacji 12 059,00 m pali CFA i z zastosowaniem oprogramowania STATISTICA określono funkcje ponad-zużycia mieszanki betonowej względem stanu gruntów (stopnia plastyczności gruntu) oraz długości i średnic formowanych pali.

Ogólna funkcja regresji wielorakiej [4], w przypadku trzech zmiennych niezależnych, przyjmuje postać

$$N_{Pz} = \gamma_1 I_L + \gamma_2 \phi + \gamma_3 L + W, \quad (4)$$

gdzie:

- $N_{Pz}$  – zmienna zależna (objaśniana),
- $I_L, \phi, L$  – zmienne niezależne,
- $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – parametry strukturalne,
- $W$  – wyraz wolny.

Dla próby obejmującej pale wykonane o średnicach  $\phi \in \{0,4, 0,6, 0,8, 1,0\}$  m i długościach  $L \in \{6, 7, \dots, 19\}$  m w gruntach o stopniu plastyczności  $I_L \in \{0,00, \dots, 1,00\}$  m analityczny model normy ponad-zużycia jest następujący

$$N_{Pz} = 5,866 I_L - 0,007 \phi - 0,139 L + 2,929 \quad (5)$$

przy:  $R = 0,94$ ;  $R^2 = 0,91$ ;  $p < 0,000 \rightarrow p < \alpha = 0,05$ , błąd standardowy estymacji wynosi 0,14.

Postać formuły do określania całkowitej normy materiałochłonności, tj. zużycia mieszanki betonowej na pal, jest następująca

$$N_m = N_p + N_{Pz} = \frac{\Pi \cdot \phi^2 \cdot L}{4} + 5,866 \cdot I_L - 0,00 \cdot \phi - 0,139 \cdot L + 2,929 \quad (6)$$

Oznaczenia jak wyżej.

W tabelach 1–4 przedstawiono wartości normy podstawowej, normy ponad-zużycia i całościową normą materiałochłonności dla pali o różnych średnicach i długościach wykonywanych w gruntach o różnych stopniach plastyczności.

W celu sprawdzenia zgodności otrzymanego modelu ponad-zużycia, a następnie formuły na określanie całkowitej normy materiałochłonności przeprowadzono badania (weryfikacje) na czterech próbach, które nie były wykorzystywane w badaniach do szacowania funkcji regresji ponad-zużycia, a które pochodzą z realizacji pali CFA w gruntach spoistych [3]. Pierwsze trzy przypadki weryfikacji dotyczą pali o wymiarach geometrycznych (długość, średnica) zawartych w przedziałach  $L \in \{6,0, 7,0, \dots, 19,0\}$  m oraz  $\phi \in \{0,4, 0,6, 0,8, 1,0\}$  m. Są to założenia zgodne z tymi, które przyjęto do budowy modelu opracowanego w pracy. Otrzymane wyniki mieszczą się w przyjętym przedziale ufności. Ostatni przypadek weryfikacji obejmuje wyniki dla pali o długości  $L = 22,00$  m i średnicy  $\phi = 1,20$  m.

Wartości tych parametrów wykraczają poza zestaw założeń przyjętych w artykule a otrzymane wyniki wykraczają poza przyjęte założenia. Zatem znaleziona funkcja do określenia ponad-zużycia jest prawdziwa tylko dla przyjętego zakresu wymiarów pali (i oczywiście gruntów spoistych).

Poniżej przytoczono wyniki weryfikacji jako przykładowe dla wybranych przypadków.

Materiałochłonność dla pali o długości  $L = 6,0$  m

$\phi$ [m] Średnica pala	$I_L$ Stopień pla- styczności	$N_p$ [m <sup>3</sup> /m] Norma podsta- wowa	$N_{Pz}$ [m <sup>3</sup> /m] Norma ponad- zużycia	$N_m$ [m <sup>3</sup> /m] Norma materiało- chłonności	$P$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie Podsta- wowe	$P_z$ [m <sup>3</sup> /pal] Ponad- zużycie	$N_{całk}$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie całkowite
0,40	[0,00–0,25]	0,1256	0,018	0,144	0,754	0,110	0,864
	(0,25–0,50]		0,027	0,153		0,161	0,915
	(0,50–0,75]		0,038	0,164		0,228	0,982
	(0,75–1,00]		0,049	0,175		0,294	1,048
0,60	[0,00–0,25]	0,2826	0,041	0,323	1,696	0,243	1,939
	(0,25–0,50]		0,061	0,343		0,363	2,059
	(0,50–0,75]		0,085	0,368		0,512	2,208
	(0,75–1,00]		0,110	0,393		0,661	2,357
0,80	[0,00–0,25]	0,5023	0,072	0,574	3,014	0,432	3,446
	(0,25–0,50]		0,107	0,609		0,644	3,658
	(0,50–0,75]		0,152	0,654		0,909	3,923
	(0,75–1,00]		0,196	0,698		1,175	4,189
1,00	[0,00–0,25]	0,7850	0,019	0,804	4,710	0,113	4,823
	(0,25–0,50]		0,028	0,813		0,168	4,878
	(0,50–0,75]		0,039	0,955		0,237	5,732
	(0,75–1,00]		0,051	0,967		0,306	5,801

Tabela 2

Materiałochłonność wykonania dla pali o długości  $L = 12,0$  m

$\phi$ [m] Średnica pala	$I_L$ Stopień pla- styczności	$N_p$ [m <sup>3</sup> /m] Norma podsta- wowa	$N_{Pz}$ [m <sup>3</sup> /m] Norma ponad- zużycia	$N_m$ [m <sup>3</sup> /m] Norma materiało- chłonności	$P$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie podsta- wowe	$P_z$ [m <sup>3</sup> /pal] Ponad- zużycie	$N_{całk}$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie całkowite
0,40	[0,00–0,25]	0,1256	0,028	0,154	1,507	0,335	1,842
	(0,25–0,50]		0,049	0,171		0,545	2,052
	(0,50–0,75]		0,067	0,193		0,809	2,316
	(0,75–1,00]		0,089	0,215		1,075	2,582
0,60	[0,00–0,25]	0,2826	0,063	0,345	3,391	0,755	4,146
	(0,25–0,50]		0,102	0,384		1,218	4,609
	(0,50–0,75]		0,152	0,434		1,819	5,210
	(0,75–1,00]		0,201	0,484		2,417	5,808
0,80	[0,00–0,25]	0,5023	0,110	0,613	6,029	1,325	7,354
	(0,25–0,50]		0,179	0,682		2,157	8,186
	(0,50–0,75]		0,269	0,772		3,236	9,265
	(0,75–1,00]		0,358	0,861		4,297	10,326
1,00	[0,00–0,25]	0,7850	0,172	0,957	9,42	2,069	11,489
	(0,25–0,50]		0,279	1,064		3,355	12,775
	(0,50–0,75]		0,421	1,206		5,053	14,473
	(0,75–1,00]		0,559	1,345		6,711	16,131



Tabela 3

Materiałochłonność wykonania dla pali o długości  $L = 19,0$  m

$\phi$ [m] Średnica pala	$I_L$ Stopień pla- styczności	$N_p$ [m <sup>3</sup> /m] Norma podsta- wowa	$N_{Pz}$ [m <sup>3</sup> /m] Norma ponad- zużycia	$N_m$ [m <sup>3</sup> /m] Norma materiało- chłonności	$P$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie podsta- wowe	$P_z$ [m <sup>3</sup> /pal] Ponad- zużycie	$N_{całk}$ [m <sup>3</sup> /pal] Zużycie całkowite
0,40	[0,00–0,25]	0,1256	0,017	0,143	2,386	0,327	2,713
	(0,25–0,50]		0,045	0,171		0,859	3,245
	(0,50–0,75]		0,081	0,207		1,536	3,922
	(0,75–1,00]		0,115	0,248		2,188	4,574
0,60	[0,00–0,25]	0,2826	0,038	0,321	5,369	0,736	6,105
	(0,25–0,50]		0,102	0,385		1,935	7,304
	(0,50–0,75]		0,183	0,465		3,467	8,836
	(0,75–1,00]		0,261	0,544		4,954	10,323
0,80	[0,00–0,25]	0,5023	0,068	0,571	9,546	1,303	10,849
	(0,25–0,50]		0,181	0,683		3,429	12,975
	(0,50–0,75]		0,321	0,823		6,099	15,645
	(0,75–1,00]		0,461	0,963		8,753	18,299
1,00	[0,00–0,25]	0,7850	0,107	0,892	14,915	2,032	16,947
	(0,25–0,50]		0,282	1,067		5,355	20,270
	(0,50–0,75]		0,501	1,286		9,518	24,433
	(0,75–1,00]		0,719	1,505		13,669	28,584

**Przypadek I**

Budowa: Kielce. Kompleks wielorodzinnych budynków mieszkalnych  
Założenia konstrukcyjne dla pali fundamentowych CFA:

- długość  $L = 12,0$  m
- średnica  $\phi = 0,80$  m

Podłoże gruntowe stanowią grunty spoiste twardoplastyczne:

- warstwa 1. (0,00–4,00 m p.p.t.) – gliny piaszczyste o  $I_L = 0,24$
- warstwa 2. (4,00 m p.p.t. ↓) – gliny piaszczyste o  $I_L = 0,12$ .

Na podstawie danych konstrukcyjnych:  $N_p = 6,029$  m<sup>3</sup>/pal.

Na podstawie danych z metryk z tabeli 4:  $N_{Pz} = 1,348$  m<sup>3</sup>/pal;  $N_m = 7,433$  m<sup>3</sup>/pal.

Zgodnie z modelem (6):  $N_{Pz} = 1,325$  m<sup>3</sup>/pal;  $N_m = 7,354$  m<sup>3</sup>/pal.

Otrzymano przedział ufności dla przedstawionej próby

$$\left( \bar{x} - z_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{x} + z_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) = (1,3083; 1,3877) \quad (7)$$

Zatem przyjmując współczynnik ufności 0,95, dla przedstawionej próby długość przedziału ufności wynosi  $\Delta = 0,0627$  m<sup>3</sup>/pal.

Weryfikowana wartość  $N_{Pz} = 1,325$  m<sup>3</sup>/pal zawiera się w przedziale ufności.

Wyniki z metryk komputerowych dla przypadku I

Obszar badawczy	Numer pala	Wartość całkowitego zużycia mieszanki betonowej [m <sup>3</sup> /pal]	Wartość ponad- zużycia mieszanki betonowej [m <sup>3</sup> /pal]
wg dokumentacji geologicznej	wg projektu konstrukcyjnego	wg metryki komputerowej	
B – 1277	112	7,006	0,977
	117	6,958	0,929
	248	7,643	1,614
B – 238	253	7,653	1,624
	258	7,896	1,309
	264	7,492	1,463
	265	7,366	1,337
B – 269	281	7,412	1,383
	283	7,518	1,489
	286	7,381	1,352

**Przypadek IV** – dla założeń nie modelowych, tzn. długość i średnica pali wykraczają poza założenia przyjęte do budowy modelu normy materiałochłonności.

Budowa: Kujawy–Barcin. Cementownia Lafarge

Założenia konstrukcyjne dla pali fundamentowych CFA:

- długość  $L = 22,0$  m
- średnica  $\phi = 1,20$  m
- Podłoże gruntowe stanowią grunty spoiste plastyczne:
- warstwa 1. (0,00–4,10 m p.p.t.) – piaski pylaste o  $I_L = 0,40$
- warstwa 2. (4,10–8,00 m p.p.t.) – gliny piaszczyste o  $I_L = 0,34$
- warstwa 3. (8,00–9,20 m p.p.t.) – piaski pylaste o  $I_L = 0,30$
- warstwa 4. (9,20 m p.p.t. ↓) – gliny piaszczyste o  $I_L = 0,28$ .

Na podstawie danych konstrukcyjnych:  $N_p = 24,869$  m<sup>3</sup>/pal.

Na podstawie danych z tabeli 5:  $N_{pz} = 5,160$  m<sup>3</sup>/pal;  $N_m = 30,629$  m<sup>3</sup>/pal.

Zgodnie z (6):  $N_{pz} = 6,389$  m<sup>3</sup>/pal;  $N_m = 31,258$  m<sup>3</sup>/pal.

Otrzymano przedział ufności dla przedstawionej próby

$$\left( \bar{x} - z_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{x} + z_{\alpha} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) = (4,981; 15,339) \quad (8)$$

Zatem przyjmując współczynnik ufności 0,95, dla przedstawionej próby długość przedziału ufności wynosi  $\Delta = 0,358$  m<sup>3</sup>/pal.

Weryfikowana wartość  $N_{pz} = 6,389$  m<sup>3</sup>/pal nie zawiera się w przedziale ufności.

Wyniki z metryk komputerowych dla przykładu IV

Obszar badawczy	Numer pala	Wartość całkowitego zużycia mieszanki betonowej [m <sup>3</sup> /pal]	Wartość ponad- zużycia mieszanki betonowej [m <sup>3</sup> /pal]
wg dokumentacji geologicznej	wg projektu konstrukcyjnego	wg metryki komputerowej	
SP – 02	140	30,320	5,190
	142	31,234	5,340
	143	31,270	5,455
	147	31,459	5,230
	148	30,109	5,080
	151	29,897	5,020
	152	29,574	5,040
	153	30,843	5,089
	156	30,672	5,094
	158	30,912	5,070

Dla weryfikowanych przypadków, obejmujących próby z badanej populacji, ale nie ujętych w próbach, na podstawie których szacowano funkcje regresji ponad-zużycia mieszanki betonowej względem badanych parametrów, wartości ponad-zużycia zawierają się w obliczonych przedziałach ufności. Na tej podstawie przyjmuje się, że z prawdopodobieństwem 0,95 przedstawiony model może być wykorzystywany w obliczeniach normy zużycia materiałów dla pali wykonanych w gruntach spoistych w zakresie średnic od 0,4 do 1,0 m i długości od 6,0 do 19,0 m. Wyniki dla przypadku dotyczącego pali o długości i średnicy wykraczających poza przyjęte do budowy modelu (funkcji regresji ponad-zużycia mieszanki) założenia wskazują, że dla współczynnika ufności 0,95 wyniki modelu nie pokrywają wartości oczekiwanej.

Możliwość bardziej dokładnego zaplanowania (oszacowania) zapotrzebowania na mieszankę betonową, dzięki zaproponowanej metodzie określania materiałochłonności wykonania pali, niesie za sobą wymierne korzyści na etapie ofertowania robót, przy ustalaniu kosztów robót. Dla oferty przetargowej na wykonanie zadania palowego, w której zysk szacowany jest na poziomie kilku procent, może się okazać, że w wyniku nieuwzględnienia lub uwzględnienia zbyt małej wartości prawdziwej normy zużycia mieszanki betonowej, koszty ponad-zużycia wchłoną wartość niedosłego zysku, lub przekroczą tę wartość.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Dzięki rozwojowi wiedzy i techniki otwartych rynków istnieje możliwość stosowania nowoczesnych technologii i systemów budowania. Ich efektywne stosowanie wymaga wiedzy z zakresu planowania i organizowania robót z wykorzystaniem nowych technologii. Dla wielu nowych technologii, jak na przykład wykonywania pali w systemie CFA, brakuje szeroko dostępnych danych na temat materiałochłonności i pracochłonności robót, które

potrzebne są do planowania robót, organizowania pracy, a przede wszystkim szacowania kosztów przy sporządzaniu ofert. Dlatego też autorzy artykułu podjęli się badań opracowania norm zużycia mieszanki betonowej dla wykonywania pali CFA, wykorzystując informacje z badań *in-situ* zawartych w metrykach komputerowych wykonanych pali. Stworzono formułę do określania normy zużycia materiału (materiałochłonności) do wykonania pali CFA w gruntach spoistych, dla pali o długości od 6 do 19 m i średnicy od 0,6 do 1,0 m.

Badania wykazały, że materiałochłonność pali zależy przede wszystkim od stanu gruntu (scharakteryzowanego w artykule stopniem plastyczności), w którym formowany jest pał, a następnie średnicy i długości pali.

W gruntach twaroplastycznych ponad-zużycie mieszanki betonowej jest najmniejsze; w gruntach plastycznych wartości są średnie, natomiast największe ponad-zużycie występuje przy wykonywaniu pali w gruntach miękkoplastycznych. Takie wyniki można tłumaczyć tym, że stan gruntu spoistego, o którym decyduje wartość stopnia plastyczności gruntu charakteryzuje jego konsystencja związana z wilgotnością podłoża. Im większa jest zawartość wody w porach gruntów (tj. im większe są wartości stopnia plastyczności), tym proces konsolidacji (czyli wyciskania wody z porów gruntu) jest intensywniejszy. Dlatego też przy dużych wartościach stopnia plastyczności zasięg strefy odkształcenia konsolidacyjnego jest większy i to powoduje większe wnikanie mieszanki betonowej w grunt wokół formowanego pala (tzn. większe wartości ponad-zużycia mieszanki betonowej). Tak więc wpływ wartości stopnia plastyczności gruntu  $I_L$  jest bardzo istotny na objętość mieszanki betonowej, która jest wykorzystywana w czasie realizacji pali.

Badania materiałochłonności wykazują zależność od wartości średnicy pala – im większa jest średnica formowanego pala, tym mniejsza jest wartość normy ponad-zużycia. Tłumaczyć to należy tym, że stopień przemieszczenia gruntu otaczającego pał jest tym większy, im większa jest średnica centralnej rury świdra podającej mieszankę betonową. Średnice te są tym większe, im większe są średnice wykonywanych pali, tak więc opory właczania mieszanki betonowej w otaczający pał grunt są tym większe, im większa jest średnica formowanego pala, a w konsekwencji tym mniejsze jest ponad-zużycie mieszanki betonowej. Drugim powodem większych wartości ponad-zużycia mieszanki betonowej dla pali o mniejszych średnicach może być specyfika pracy operatora palownicy, który w zależności od swoich umiejętności i doświadczenia może dla małych średnic pali stosować większe wartości ciśnienia podawania mieszanki betonowej niż jest to niezbędne, tym samym powodując wzrost ponad-zużycia.

Obserwuje się też zmniejszenie się ponad-zużycia mieszanki betonowej, gdy długość pala wzrasta.

Otrzymane wyniki z badań materiałochłonności można wykorzystać podczas projektowania konstrukcyjnego. Dane o geometrii projektowanych pali stanowią element projektu konstrukcyjnego. Ponieważ jednak istnieje możliwość doboru parametrów geometrycznych pali, to z wyników badań zużycia materiału wynika, że rozwiązaniem bardziej ekonomicznym jest zaprojektowanie pali o większych średnicach (np.  $\phi = 1,00$  m zamiast  $\phi = 0,80$  m). Prowadzi to do mniejszego ponad-zużycia mieszanki betonowej, co bezpośrednio obniża koszty realizacji. Ponadto wykonanie mniejszej liczby pali o większych średnicach stwarza szansę na skrócenie czasu realizacji zadania palowego.

Na wybór długości projektowanych pali projektant-konstruktor ma mniejszy wpływ. Poziom podstawy pala, a więc i długość pala jest uzależniona od warunków gruntowych, tzn. poziomu zalegania warstwy nośnej. Wyjątek stanowią tzw. pale zawieszane, które nie

są zagłębiane w warstwach nośnych, a o ich nośności decyduje jedynie opór wzdłuż pobocznic pila. Minimalne zagłębienie pali w warstwy gruntu nośnego jest ściśle określone warunkami normowymi, więc istniejące możliwości pozwalają na projektowanie pali dłuższych niż wynika to z normy. Jeżeli warunki konstrukcyjne (wielkość, rodzaj, schemat działania obciążeń itd.) umożliwiają zastąpienie mniejszej liczby krótszych pali przez większą liczbę dłuższych pali, to na podstawie analizy przedstawionej w artykule jest to bardziej ekonomiczne.

*Artykuł opracowano w ramach pracy badawczej statutowej nr 11.11.100.197 (AGH w Krakowie)*

#### Literatura

- [1] Al-Douri R.H., Poulos H.G., *Predicted and Observed Cyclic Performance of Piles in Calcereous Sand*, Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 1-16.
- [2] Mandolini A., *Design practice of bored piles in group and in piled raft concepts. Design of piled raft foundations: Practice and development*, 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium, 2-4.06.2003, Printed by Millpress, Rotterdam 2003 r.
- [3] Pająk M., *Analiza pracochłonności i materiałochłonności pali wierconych świdrem ciągłym*, praca doktorska pod kierunkiem Anny Sobotki, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Płock 2009.
- [4] Sobczyk M., *Statystyka*, Wyd. PWN, Warszawa 2007.