

Analiza wpływu wbijania pali na przemieszczenia rozpartej obudowy wykopu z grodziec

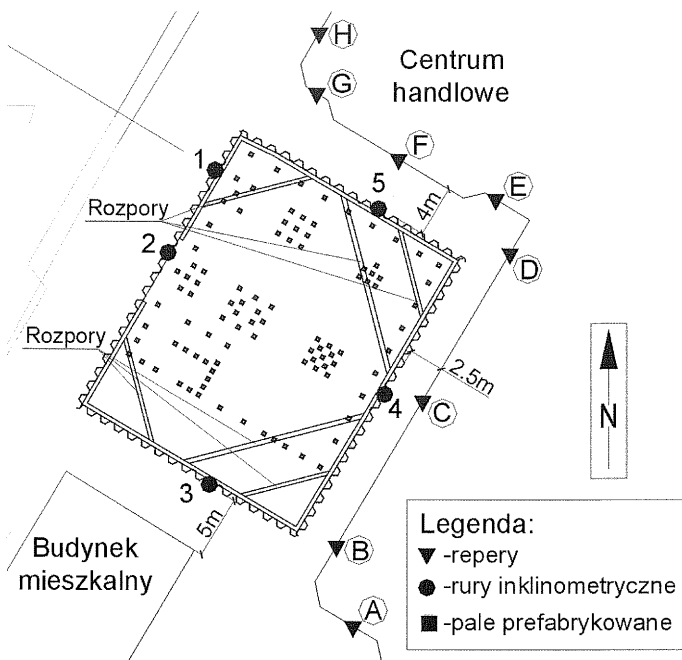
**Mgr inż. Monika Konarska, mgr inż. Krzysztof Sahajda
Aarsleff Sp. z o.o.**

U zbiegu ulic Kopernika i Mazurskiej w Olsztynie zaprojektowano budynek biurowy mający cztery kondygnacje nadziemne i jedną podziemną [1]. Obiekt zlokalizowano bezpośrednio przy istniejącym centrum handlowym oraz przy budynku mieszkalnym. Poziom płyty fundamentowej przewidziano w obrębie warstwy gruntów organicznych. Przed autorami artykułu postawiono zadanie zaprojektowania zabezpieczenia wykopu, wewnątrz którego wykonane będą pale wbijane. Ze względu na bliską odległość budynku centrum handlowego oraz mało precyzyjne informacje na temat sposobu jego posadowienia, autorzy zdecydowali się na zastosowanie metody obserwacyjnej. W czasie wykonywania robót ziemnych oraz palowych prowadzono okresowy pomiar osiadania istniejącego budynku centrum handlowego oraz przemieszczeń poziomych obudowy

wykopu. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów oraz opisano ich praktyczne konsekwencje.

CHARAKTERYSTYKA ZADANIA INŻYNIERSKIEGO

Projektowany wykop o wymiarach w planie około $19,30\text{ m} \times 24,50\text{ m}$ zlokalizowano na działce o rzędnych terenu w przedziale $130,90\text{ m n.p.m.} \div 131,40\text{ m n.p.m.}$ Wzdłuż wschodniej krawędzi wykopu (w odległości około $2,50\text{ m}$, a wzdłuż północnej krawędzi w odległości około $4,00\text{ m}$ od lica zabezpieczenia) przebiegała ściana istniejącego budynku centrum handlowego (rys. 1). Autorzy artykułu dysponowali informacją, że posadowienie istniejącego budynku przewidziano na

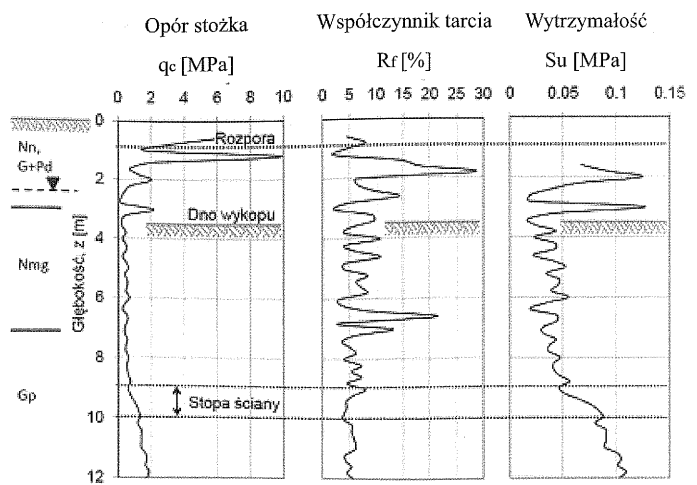


Rys. 1. Lokalizacja zabudowy w rejonie projektowanego budynku oraz punkty pomiarowe

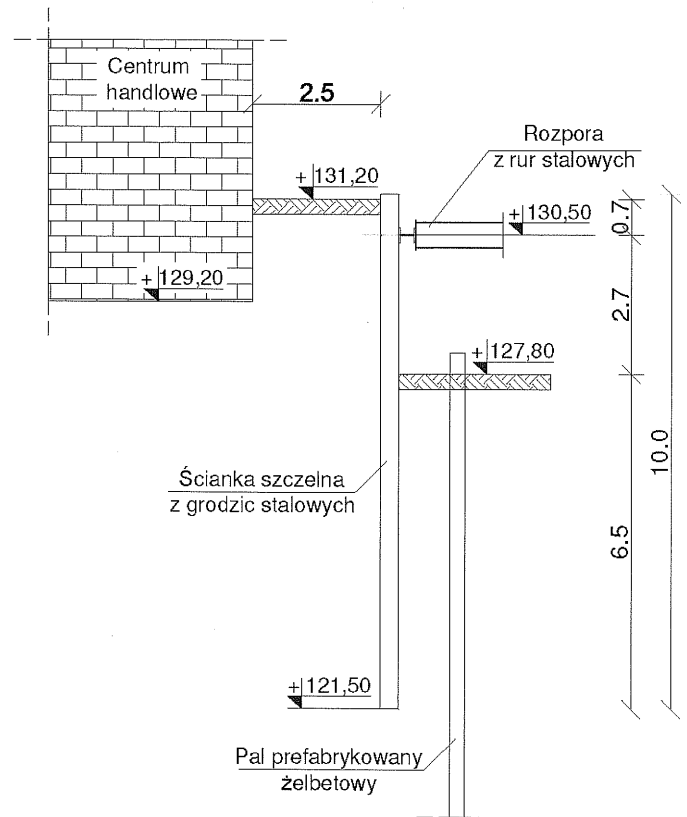
ławach i stopach opartych na podłożu wzmocnionym za pomocą kolumn żwirowych. Brak było szczegółowych danych na temat rozmieszczenia i głębokości kolumn. Wzdłuż południowej krawędzi wykopu w odległości około 5,00 m od lica zabezpieczenia przebiegała ściana istniejącego budynku mieszkalnego (rys. 1). Ze względu na znaczną odległość robót palowych od ścian tego obiektu we wszystkich dalszych analizach został on pominięty.

CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW GRUNTOWO-WODNYCH

Warunki gruntowo-wodne podłoża rozpoznano na podstawie wyników 9 wierceń i 4 sondowań statycznych CPT, wykonanych w linii projektowanej obudowy wykopu lub w jej sąsiedztwie [2]. Od poziomu terenu do rzędnej 127,00 m n.p.m. ÷ 128,00 m n.p.m., tzn. do głębokości 3,00 m ÷ 4,40 m, nawiercono nasypy niebudowlane (grunty piaszczysto-gliniaste z domieszką części organicznych i gruzu). Poniżej nasypów, do głębokości 4,50 m ÷ 6,50 m stwierdzono występowanie namulów w stanie miękkoplastycznym, podścielonych glinami w stanie plastycznym z zawartością części organicznych. Utwory te w dokumentacji geotechnicznej [2] określono jako deluwialno-aluwialne. Poziom stropu gruntów nośnych w postaci morenowych glin piaszczystych udokumentowano na głębokości 7,00 m ÷ 10,00 m poniżej terenu. W soczewkach piasków w obrębie gruntów organicznych nawiercono wodę o zwierciadle napiętym, stabilizującym się na rzędnej około 129,00 m n.p.m., a więc około 2,00 m ÷ 2,50 m poniżej poziomu terenu. Pomimo wydzielenia w dokumentacji geotechnicznej [2] i [13] namulów i glin w stanie plastycznym jako dwóch oddzielnych warstw, sondowania statyczne wykazały ich podobną wytrzymałość i stan (rys. 2). Wzrost wytrzymałości gruntów spoistych był zauważalny dopiero na głębokości około 9,50 m, gdzie znajdował się strop gruntów morenowych.



Rys. 2. Wyniki sondowania CPT5 w obrębie wykopu w rejonie punktu pomiarowego Nr 5



Rys. 3. Przekrój przez ściankę rozpartą

OPIS ROZWIĄZANIA PROJEKTOWEGO

Zaproponowano zabezpieczenie wykopu ścianką szczelną z grodzic stalowych typu U o długości $L = 9,00 \text{ m} \div 10,00 \text{ m}$ i wskaźniku wytrzymałości przekroju na zginanie $W_x = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$ oraz $W_x = 2000 \text{ cm}^3/\text{m}$ ze stali klasy S355GP. Na fragmencie zachodniej krawędzi wykopu zaprojektowano ściankę wspornikową utwierdzoną w gruncie, a na pozostałej części obwodu ściankę utwierdzoną w gruncie, górą rozpartą. Przewidziano posadowienie nowo projektowanego budynku na płycie fundamentowej opartej na palach prefabrykowanych o przekroju kwadratowym $0,25 \times 0,25 \text{ m}$ i $0,30 \times 0,30 \text{ m}$

(rys. 1). Przekrój pionowy przez ściankę szczelną na odcinku położonym najbliżej istniejącego budynku centrum handlowego przedstawiono na rys. 3.

KOLEJNOŚĆ WYKONYWANYCH ROBÓT FUNDAMENTOWYCH

Realizację robót rozpoczęto na przełomie września i października 2008 roku. Po zainstalowaniu grodzic wykonano wykop wstępny o głębokości $1,10 \text{ m} \div 1,40 \text{ m}$ i przystąpiono do robót palowych. Za pomocą przedłużki pale wbito około $1,50 \text{ m}$ poniżej dna wykopu wstępnego, po czym wykonano rozparcie ściany w narożnikach, a następnie wykop do rzędnej docelowej $127,80 \text{ m n.p.m.}$ Po przeprowadzeniu próbnych obciążeń pali wykonano płytę fundamentową tak, aby stanowiła ona podparcie ścianki szczelnej na odcinkach, które przebiegały wzdłuż istniejących ścian centrum handlowego. Po uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości betonu zdemontowano rozparcie i rozpoczęto wykonanie ścian oraz stropów kolejnych kondygnacji.

UZASADNIENIE ZASTOSOWANIA METODY OBSERWACYJNEJ PRZY PROWADZENIU ROBÓT FUNDAMENTOWYCH

Korzystając z własnych doświadczeń, autorzy artykułu uważali, że instalacja pali będzie krytyczną fazą robót dla bezpieczeństwa budynku centrum handlowego. Z danych w literaturze wynika, że wbijanie pali w grunty spoiste odbywa się w warunkach bez odplywu, a więc bez zmiany objętości gruntu [12]. W efekcie grunt z przestrzeni zajmowanej przez pale ulega w całości wyparciu, czemu towarzyszą przemieszczenia boczne gruntu oraz podniesienie powierzchni terenu [6]. W przypadku opisywanej inwestycji istniała obawa, że wypieranie gruntu w kierunku poziomym może spowodować przemieszczenie ścianki szczelnej, co wiązałoby się z uniesieniem fundamentów budynku centrum handlowego. Drugim ze zjawisk, które mogło mieć znaczenie dla bezpieczeństwa sąsiedztwa w trakcie wbijania pali w grunty spoiste, jest wzrost ciśnienia wody w porach gruntu. Z badań Felleniusa i Samsona [5] wynika, że chwilowe nadwyżki ciśnienia mogą przekraczać całkowite naprężenie pionowe w gruncie. Oznaczałoby to, że składowa pionowa naprężenia efektywnego spada do zera. Nie jest jasne, w jakim stopniu wytrzymałość różnych rodzajów gruntu spoistego wynika z tarcia wewnętrznego, niemniej można oczekiwać, że w gruntach o znacznym udziale tarcia wytrzymałość może ulec poważnej redukcji. Fellenius i Samson [5] podsumowali własne pomiary przeprowadzone po wbiciu w grunt spoisty grupy 13 pali, stwierdzając 15% redukcję wytrzymałości gruntu na ścinanie wewnątrz grupy. Z kolei pomiary wykonane poza obrysem grupy w odległości zaledwie $0,70 \text{ m}$ od najbliższego pala wykazały brak utraty wytrzymałości. Towarzyszące badaniu wytrzymałości na ścinanie pomiary ciśnienia wody w porach gruntu wskazywały, że zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz grupy ciśnienie to wzrosło do wartości przekraczającej całkowity ciężar nadkładu gruntowego. Wynik ten wskazuje, że tarcie wewnętrzne nie było dominującym składnikiem wytrzymałości gruntu. Jednak w gruntach o znacznej zawartości frakcji piaszczystej lub pyłastej, tj. pył, piasek gliniasty i glina, problem ten powinien być

brany pod uwagę. Ze względu na występowanie na opisywanej w artykule inwestycji glin piaszczystych rozważano problem wpływu nadwyżek ciśnienia wody w porach gruntu na nośność gruntu pod istniejącymi fundamentami. Ostatecznie w świetle danych z literatury uznano, że spadek wytrzymałości gruntów spoistych nie stwarza zagrożenia dla fundamentów budynku centrum handlowego.

Nie oczekiwano, aby przemieszczenia ścianki powstające po zakończeniu palowania i wynikające z wykonania wykopu mogły stanowić poważne zagrożenie dla przyległego budynku centrum handlowego. W literaturze zwraca się wprawdzie uwagę na znaczące przemieszczenia obudów wykopów w gruntach słabych [3, 8], jednak w opisywanym przypadku przeciętna wytrzymałość na ścinanie s_u gruntów organicznych bezpośrednio poniżej dna wykopu wynosiła około 40 kPa . Wartość wytrzymałości na ścinanie sugeruje, że warstwę gruntów organicznych można zaliczyć do glin o średniej wytrzymałości [3]. Przy niewielkiej głębokości wykopu (około $3,20 \text{ m}$) w połączeniu z faktem rozparcia ściany szczelnej i zagłębienia spodu grodzic w grunty twardeplastyczne uzyskano z obliczeń średnie przemieszczenie poziome obudowy wynoszące 10 mm .

Zgodnie z założeniami metody obserwacyjnej [7], na etapie projektowania określono wartość graniczną osiadania reperów zastabilizowanych w konstrukcji istniejącego budynku centrum handlowego. Przyjęto maksymalne osiadanie 10 mm , przy czym 5 mm dopuszczono w fazie wbijania pali. Uznano, że wystąpienie takiego osiadania świadczy o nadmiernym wpływie robót na istniejącą konstrukcję i na wypadek jego przekroczenia brano pod uwagę rozwiązanie zastępcze, polegające na zmianie technologii pali wbijanych na pale wiercone. W Instrukcji ITB [9] podaje się dla budynków monolitycznych wartości osiadań średnio 10 mm i 30 mm jako wskazujące na przekroczenie odpowiednio stanu granicznego użyteczności i nośności. Tak więc osiadanie graniczne dopuszczone w opisywanym przypadku przyjęte było z rezerwą bezpieczeństwa.

OPIS BADAŃ I CHARAKTERYSTYKA FAZ POMIAROWYCH

Podczas robót ziemnych oraz palowych prowadzono okresową kontrolę ich oddziaływania na budynek centrum handlowego. Monitoring oddziaływań zrealizowano według przyjętego programu pomiarowego, w skład którego wchodziły pomiary:

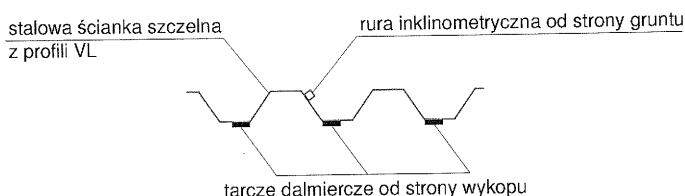
- geodezyjne osiadań budynku istniejącego centrum handlowego;
- geodezyjne przemieszczeń poziomych korony ścianki szczelnej;
- inklinometryczne odkształceń ścianki szczelnej.

Przemieszczenia obudowy wykopu mierzono w pięciu punktach rozmieszczonych na obwodzie, natomiast repery do pomiaru osiadania istniejącego obiektu zainstalowano w ośmiu punktach. Lokalizację wszystkich punktów kontrolnych pokazano na rys. 1, a w tabl. 1 przedstawiono charakterystykę faz pomiarowych.

Repery zamontowano na budynku centrum handlowego na trzy dni przed wykonaniem zerowego pomiaru osiadania. Wszystkie osiadania powstałe w trakcie robót zostały obliczone

Tabl. 1. Charakterystyka faz pomiarowych

Faza pomiarowa	Data pomiaru	Stan robót	Rodzaj pomiarów	Uwagi
0	22.09.2008	przed rozpoczęciem	osiadanie	pomiar zerowy
0*	01.10.2008 02.10.2008	po wykonaniu ścianki, brak wykopów	osiadanie, przemieszczenia poziome grodzic	pomiar zerowy przemieszczenia poziomego grodzic
1	10.10.2008	po palowaniu	osiadanie, przemieszczenia poziome grodzic	pomiar w trakcie prowadzenia robót
2	23.10.2008	pełny wykop do rzędnej 127,20 m n.p.m.	osiadanie, przemieszczenia poziome grodzic	pomiar w trakcie prowadzenia robót



Rys. 4. Punkt inklinometryczny

względem tego pomiaru z błędem średnim 0,2 mm. Celem pomiarów osiadania było określenie wpływu robót w wykopie na istniejący budynek handlowy oraz uzyskanie informacji o ewentualnym wystąpieniu stanu awaryjnego.

W sąsiedztwie każdego punktu inklinometrycznego na obudowie zainstalowano po trzy tarcze dalmiercze do badania przemieszczeń poziomych korony grodzicy (rys. 4), (wynik był uśredniany). Średni błąd pomiaru geodezyjnego został określony na poziomie 2 mm. Na potrzeby pomiarów inklinometrycznych do grodzic ścianki szczelnej od strony naziomu przyspawano rury stalowe o przekroju kwadratowym (rys. 4). Grodzica była pogrążana w gruncie wraz z rurą. Inklinometr w trakcie badania ustawiano w rurze w ten sposób, że jego główna oś pomiarowa pokrywała się z przekątną rury, co zapewniało prowadzenie instrumentu. Na podstawie specyfikacji producenta można szacować, że przy długości zastosowanych rur (9,00 m ÷ 10,00 m) uzyskano dokładność pomiaru inklinometrem wynoszącą około 2 mm.

Tabl. 2. Wyniki pomiarów osiadania budynku centrum handlowego

Data pomiaru	Osiedzenia reperu, s [mm] ^(*)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
02.10.08	0,0	0,0	0,2	0,6	-0,2	0,2	0,6	0,1
10.10.08	0,2	0,3	1,2	1,0	0,4	0,8	1,0	0,7
23.10.08	-0,2	-0,4	-0,5	-0,3	-0,6	0,1	0,3	-0,2

(*) wartości ze znakiem „-” oznaczają przemieszczenia pionowe w kierunku „↑”

WYNIKI POMIARÓW OSIADAŃ BUDYNKU CENTRUM HANDLOWEGO

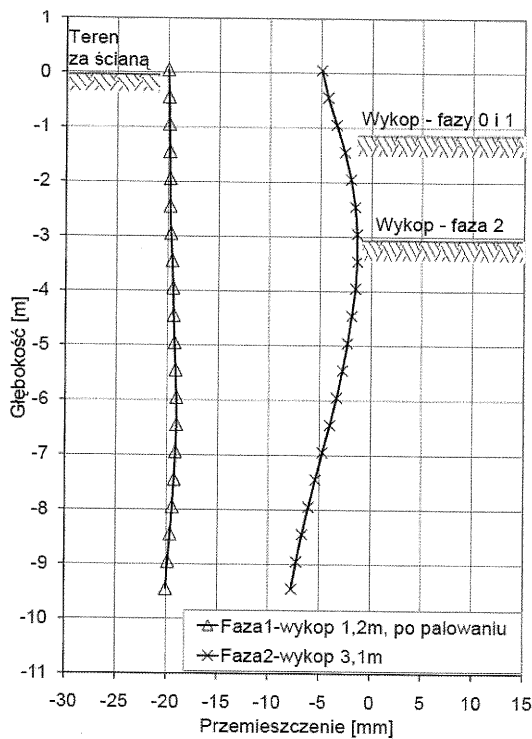
Zestawienie wyników pomiarów osiadania budynku centrum handlowego zamieszczono w tabl. 2. Wartości osiadania, które wystąpiły w badanym okresie wskazują na brak wpływu robót fundamentowych oraz ziemnych na istniejący budynek. Ze względu na pomijalne z inżynierskiego punktu widzenia wartości osiadania – ich szczegółowa analiza została pominięta.

WYNIKI POMIARÓW PRZEMIESZCZEŃ POZIOMYCH OBUDOWY

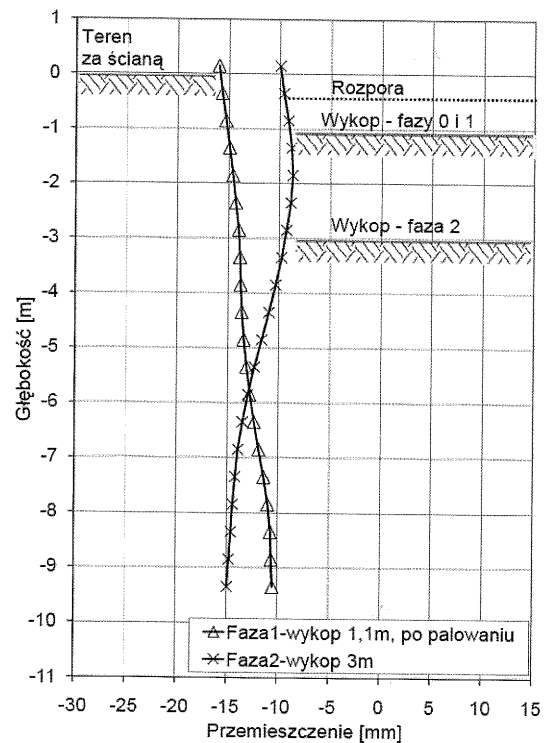
Punkt pomiarowy 2, ścianka wspornikowa

Punkt pomiarowy 2 zlokalizowany był na odcinku ścianki wspornikowo utwierdzonej w gruncie. Długość profili stalowych w gruncie wynosiła 9,70 m. Pale o przekroju 0,30 × 0,30 m, zagłębione 2,00 m ÷ 4,00 m poniżej spodu grodzicy zostały wbite w pasie 1,20 m ÷ 3,00 m przed licem ściany szczelnej (rys. 1). Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych obudowy pokazano na rys. 5.

Z rysunku widać, że wbicie pali spowodowało niemal równoległe przemieszczenie ścianki o około 20 mm w kierunku naziomu. Po wykonaniu wykopu do projektowanej głębokości około 3,10 m ścianka uległa przemieszczeniu w kierunku wykopu o 13 mm ÷ 18 mm. Wynika stąd, że nie powróciła ona do położenia sprzed rozpoczęcia palowania.



Rys. 5. Przeszczenia ścianki w punkcie pomiarowym 2



Rys. 6. Przeszczenia ścianki w punkcie pomiarowym 1

Punkt pomiarowy 1, ścianka rozparta w jednym poziomie

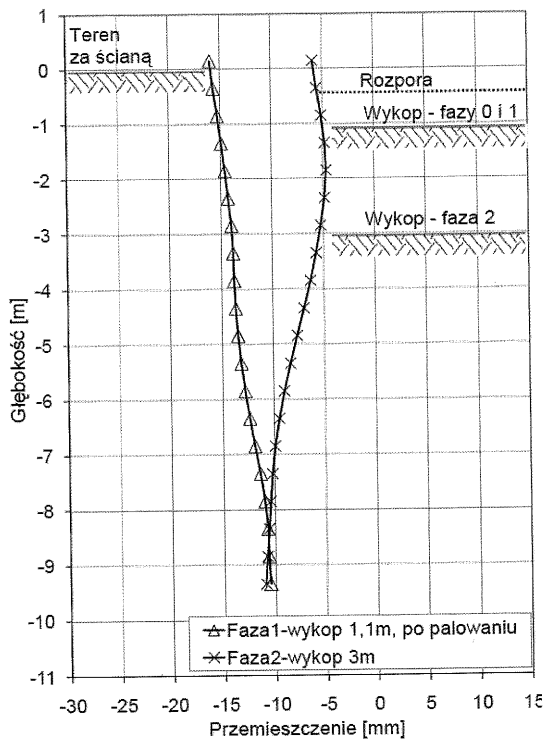
Punkt pomiarowy 1 zlokalizowano na odcinku, gdzie zastosowano ściankę o zagłębieniu w gruncie około 9,80 m, rozpartą 0,50 m poniżej terenu. Pale o przekroju 0,30 x 0,30 m, zagłębione 2,00 m ÷ 4,00 m poniżej stopy ściany zostały wbite w pasie 1,20 m ÷ 3,00 m przed licem ściany (rys. 1). Pomiary po zakończeniu palowania wskazują na przeszczenie ścianki w kierunku naziomu średnio 14 mm (rys. 6). W odróżnieniu od sąsiedniego punktu 2, ścianka uległa tutaj pochyleniu w kierunku naziomu, gdzie przeszczenie osiągnęło maksymalną wartość około 16 mm. Nieco mniejszy niż w punkcie 2 ruch ściany w kierunku naziomu, jak również jego odmienny charakter może wynikać z bezpośredniego sąsiedztwa narożnika wykopu działającego usztywniająco [3, 10].

Wykonanie wykopu do pełnej głębokości około 3,00 m spowodowało przeszczenie ścianki w kierunku wykopu 6 mm w koronie. Wynikające z pomiarów cofnięcie spodu grodzicy w kierunku naziomu 4 mm jest niezrozumiałe. Należałoby oczekiwać, że wykonanie wykopu i postępujące w czasie rozpraszanie nadwyżek ciśnienia wody w porach gruntu (powstałego między innymi w wyniku wbicia pali) spowoduje konsolidację gruntu i przeszczenie obudowy w kierunku wykopu. W skrajnym przypadku można przypuszczać, że spód obudowy pozostaje nieruchomy ze względu na jej zagłębienie w twardoplastyczne gliny. Możliwe więc, że uzyskany wynik związany jest z nałożeniem się błędów pomiarów geodezyjnych i inklinometrycznych. Wykres skorygowany o wartość przeszczenia wynoszącą 4 mm na całej wysokości ściany przedstawiono na rys. 7.

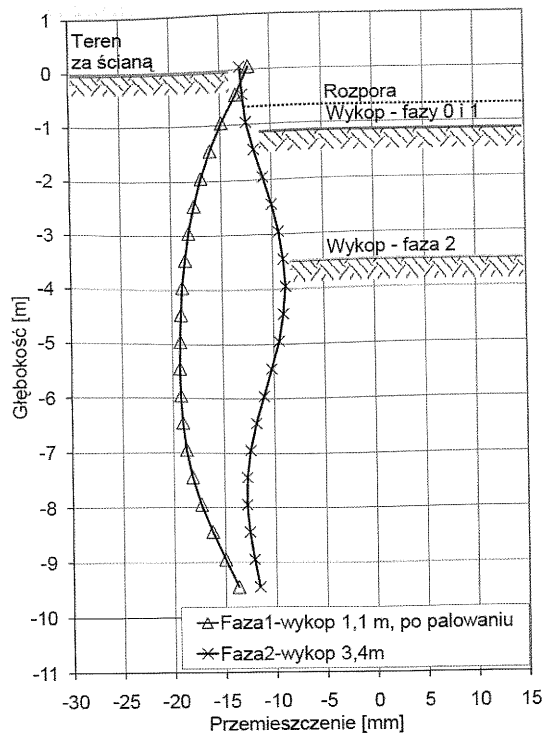
Punkt pomiarowy 3, ścianka rozparta w jednym poziomie, istniejący budynek mieszkalny około 5 m za ścianką

Pale prefabrykowane żelbetowe wbite w odległości około 5,00 m przed licem ściany. Grodzice miały długość w gruncie 9,80 m. Po zakończeniu palowania ścianka szczelna przeszcściła się w kierunku naziomu średnio 17 mm (rys. 8). Schemat przeszczenia odpowiada przesunięciu równoległemu z ugięciem ściany środkiem w kierunku naziomu. Maksymalne przeszczenie obudowy w środku jej wysokości wynosi około 19 mm. Różnica w schemacie przeszczenia w tej fazie robót w stosunku do punktu 1 może wynikać z różnicy parametrów wytrzymałościowych gruntu, widocznych w wynikach sondowań CPT. Sondowanie CPT3 zlokalizowane w rejonie punktu 3 wykazało wytrzymałość przypowierzchniowych warstw gruntu znacznie wyższą niż sondowanie CPT2 miarodajne dla punktu 2 (rys. 9). Z profilu sondowania widać, że w zakresie głębokości 0,60 m ÷ 1,60 m średni opór stożka q_c był w sondowaniu CPT3 prawie dwukrotnie wyższy niż w CPT2. Względnie szybka mobilizacja oporu w gruntach o wyższej wytrzymałości [14] mogła stanowić w tym przypadku ograniczenie przeszczenia ścianki w kierunku naziomu.

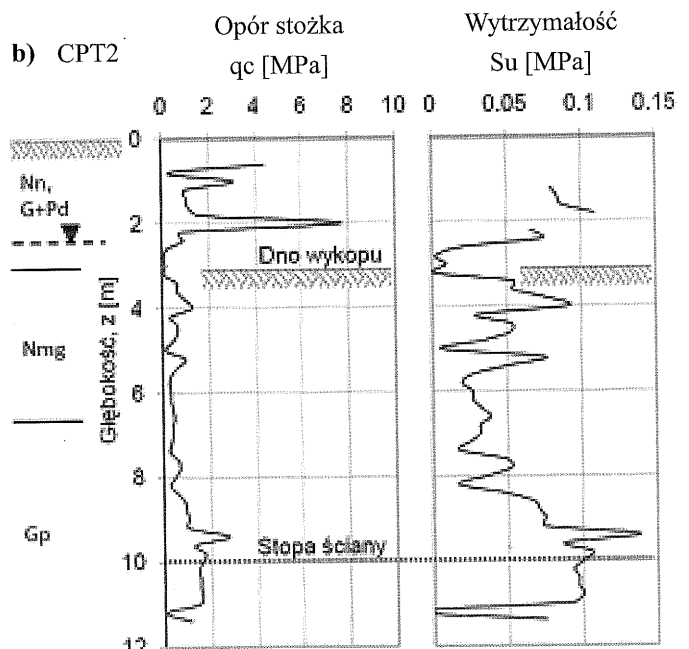
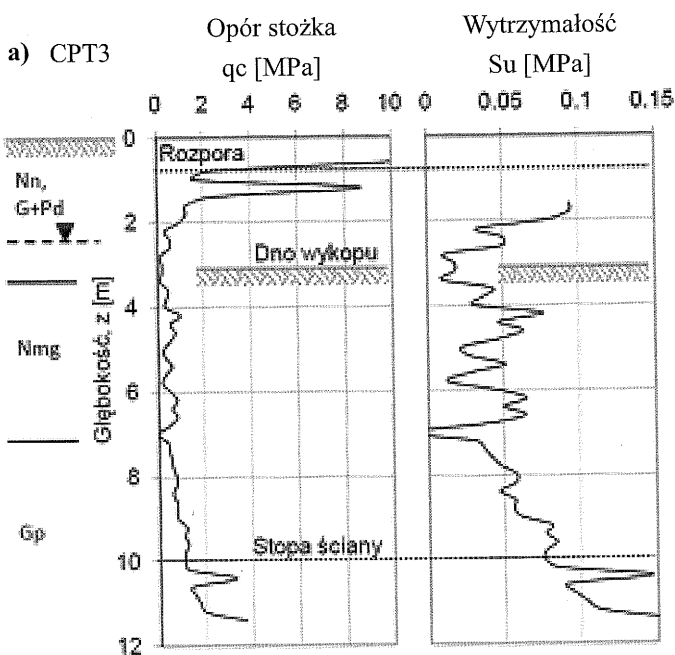
Po wykonaniu wykopu do projektowanej głębokości 3,40 m przeszczenie obudowy początkowo wzrasta z głębokością i osiąga maksimum około 10 mm w poziomie dna wykopu, a następnie maleje aż do spodu grodzicy, gdzie wynosi około 2 mm w stosunku do fazy po wykonaniu palowania. W punkcie 3, podobnie jak w punktach pomiarowych 1 i 2, po wykonaniu wykopu do projektowanej głębokości – ścianka nie powróciła do położenia sprzed wbijania pali.



Rys. 7. Skorygowane przemieszczenia ścianki w punkcie pomiarowym 1



Rys. 8. Przesunięcia i odkształcenia ścianki w punkcie pomiarowym 3



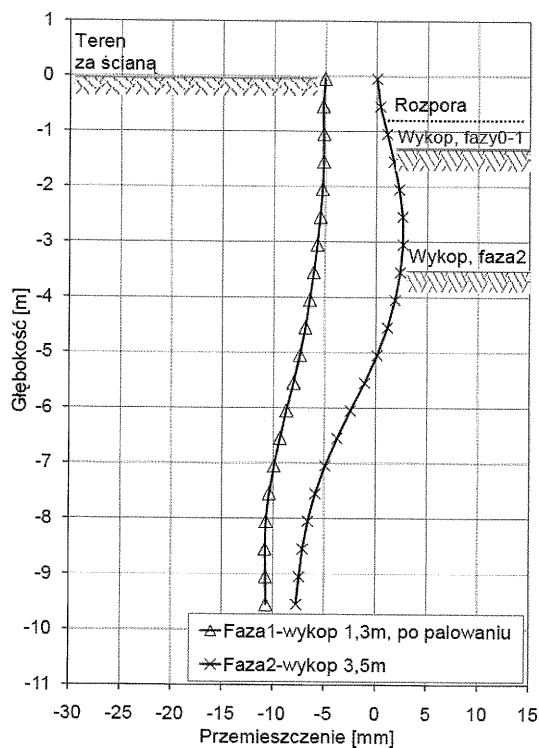
Rys. 9. Wyniki sondowań CPT3 i CPT2 w rejonie punktów pomiarowych 3 (a) i 2 (b)

Punkty pomiarowe 4 i 5, ścianka rozparta w jednym poziomie, istniejący budynek centrum handlowego

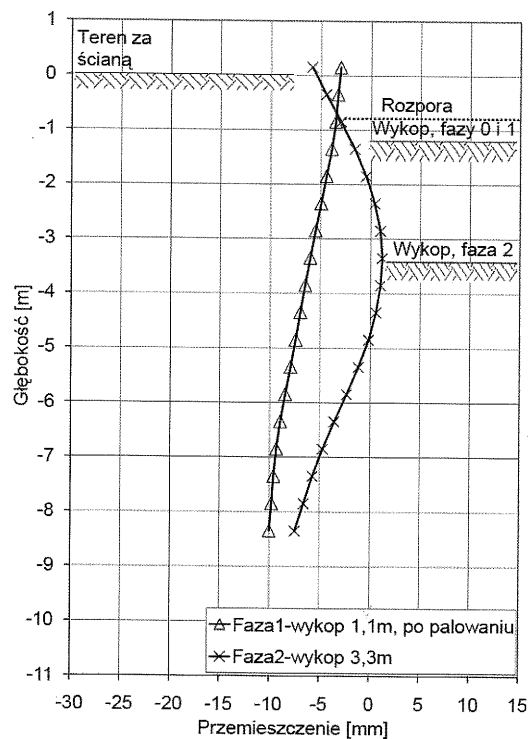
Punkty pomiarowe 4 i 5 były położone na dwu krawędziach wzajemnie prostopadłych. Elementem wspólnym dla obu przekrojów było występowanie za ścianką 3-kondygnacyjnego budynku centrum handlowego. Długości grodzic w gruncie w punktach 4 i 5 wynosiły odpowiednio 9,80 m i 8,80 m. Najbliższe obudowy wykopu pale wbite w odległości około

1,10 m przed licem ściany (rys. 1). Wyniki pomiarów przeprowadzonych po zakończeniu palowania są w obu przekrojach zbliżone i wykazują, że obudowa przemieściła się w kierunku naziomu średnio $7 \div 8$ mm.

Z pomiarów wykonanych po zakończeniu robót ziemnych wynika, że ścianka przemieściła się $6 \text{ mm} \div 7 \text{ mm}$ w kierunku wykopu. Charakter przemieszczenia jest w obu przypadkach nieco inny, gdyż obudowa w rejonie punktu 4 przemieściła się w poziomie rozparcia 10 mm w kierunku wykopu, a w punkcie



Rys. 10. Przesunięcia i odkształcenia ścianki w punkcie pomiarowym 4



Rys. 11. Przesunięcia i odkształcenia ścianki w punkcie pomiarowym 5

5 jedynie około 4 mm. Ściankę szczelną przy punktach pomiarowych 4 i 5 podparto w jednym poziomie za pomocą rozpór rurowych. W obu przypadkach punkty pomiarowe były zlokalizowane w przybliżeniu w środku rozpiętości pomiędzy punktami podparcia ścianki, więc ugięcie oczepu stalowego nie jest prawdopodobnie przyczyną opisanej różnicy przemieszczeń. Różnica ta jest jednak na tyle mała, że można zrezygnować ze szczegółowego wyjaśnienia jej przyczyn i przypisać czynnikiem ogólnym, np. naturalnej zmienności warunków gruntowych.

ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Pomierzone wartości przemieszczeń we wszystkich punktach pomiarowych zestawiono w tabl. 3. Przesunięcia, które wystąpiły po wykonaniu wykopu do rzędnej docelowej, podano w odniesieniu do stanu po zakończeniu palowania. Przyjęto, że w tej postaci można je traktować jako całkowite przemieszczenie, które wystąpiłoby od chwili instalacji ściany, gdyby wewnątrz wykopu nie wykonano palowania.

Po wbiciu pali wartości i rozkłady przemieszczeń ściany były zróżnicowane w poszczególnych punktach pomiarowych. Jest to odzwierciedlenie zmienności warunków gruntowych, w tym różnego zagłębienia grodzic w warstwy gruntów twaroplastycznych. Największa wartość średnia i jednocześnie największe lokalne maksimum przemieszczenia wywołane wbiciem pali uzyskano na zachodniej krawędzi wykopu w punkcie pomiarowym 2 (rys. 5). W przybliżeniu można przyjąć, że przemieszczenie średnie było równe maksymalnemu i wynosiło około 20 mm. W pozostałych przypadkach średnie przemieszczenie mieściło się w zakresie 7 mm ÷ 17 mm.

Interesujące jest porównanie wyników pomiarów w punktach 2 i 3. W rejonie punktu 2 wbijanie pali spowodowało

średnie przemieszczenie obudowy o 20 mm, zaś w punkcie 3 o 17 mm. Obie wartości są porównywalne, mimo że w rejonie punktu 2 najbliższe pale wbijane były w odległości 1,20 m od ściany, zaś w punkcie 3 w odległości aż 5,00 m. Wskazuje to, że w rozpatrywanym zakresie odległość palowania nie wpłynęła zasadniczo na wartość pomierzonego przemieszczenia grodzic.

Po wykonaniu pełnego wykopu do rzędnej 127,20 m n.p.m. największe przemieszczenie obudowy w kierunku wykopu stwierdzono na zachodniej krawędzi obudowy, gdzie ściankę zaprojektowano jako wspornikową utwierdzoną w gruncie. Rozkład przemieszczenia odpowiada przesunięciu poziomemu z wygięciem środkiem w kierunku wykopu, co jest nietypowe dla obudowy wspornikowej. Prawdopodobnym wyjaśnieniem jest fakt, że oczep stalowy rozparcia północno-zachodniego narożnika wykopu kończył się w odległości około 1,40 m od punktu 2 (rys. 1). Mogło to spowodować częściowe podparcie odcinka ściany, gdzie znajdował się punkt pomiarowy 2. Wy tłumaczenie to wydaje się wiarygodne w świetle porównania wyników pomiaru w punkcie 2 z wynikiem uzyskanym w punkcie 1, zlokalizowanym w odległości około 5,00 m na odcinku z rozparciem.

Średnia wartość przemieszczenia w pozostałych przekrojach zlokalizowanych na odcinkach rozpartych jest podobna i wynosi około 6 mm w kierunku wykopu. Również w rozkładzie przemieszczenia nie stwierdzono znaczących rozbieżności.

Hagerty i Peck [6] opisują efekt wbijania pali w niewielkiej odległości za istniejącą dalbą, gdzie dno zbiornika od strony wody występowało na głębokości 15 m. Pale były wbijane w ility o stopniu plastyczności $I_L \sim 0,55$. W pierwszej kolejności wbito pale najbliższe przegrody, a następnie front robót oddalał się w kierunku ładu. Zakładano, że taki sposób prowadzenia robót zmniejszy odkształcenia dalby dzięki stworzeniu ograniczenia

Tabl. 3. Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych grodzic

Punkt pomiarowy nr	Faza 1 wbijanie pali		Faza 2 pełny wykop do rzędnej 127,20 m n.p.m. ^(*)	
	przemieszczenie średnie s_{sr} [mm]	przemieszczenie maksymalne s_{max} [mm]	przemieszczenie średnie s_{sr} [mm]	przemieszczenie maksymalne s_{max} [mm]
1	14	16	6	10
2	20	20	15	18
3	17	19	6	10
4	8	11	6	8
5	7	10	5	8

(*) Wartości podane względem pomiarów w fazie 1

dla wypierania gruntu przez pale wbite w pierwszym etapie. Hagerty i Peck szacują, że – ze względu na dużą swobodę odkształceń przegrody od strony zbiornika – cały grunt wyparty z obszaru palowania przemieścił się w stronę nabrzeża, a więc przyjęta kolejność robót nie spełniła swojego zadania i wbite pale nie stworzyły ograniczenia dla wypierania gruntu.

Ci sami autorzy przytaczają pomiary z kilku innych budow, na których pale były wbijane w grunty spoiste. Hagerty i Peck uogólnili swoje obserwacje w przypadkach, w których pale były wbijane w grunty o niskiej wrażliwości, a prowadzenie robót palowych przesunęło się od jednego końca budowy do drugiego w sposób regularny. Stwierdzili oni, że w takiej sytuacji około połowa objętości gruntu wypartego przez pale powoduje podniesienie terenu w obszarze ograniczonym obrysem pali, zaś druga połowa na zewnątrz tego obszaru.

Zgodnie z zaproponowaną przez Hagerty i Pecka procedurą można oszacować podniesienie terenu wewnątrz omawianego w niniejszym artykule wykopu oraz objętość gruntu, który powinien ulec przemieszczeniu poza jego obręb. Ta druga wartość powinna mieć związek ze średnim przemieszczeniem ściany w kierunku naziomu. Wewnątrz wykopu wbito w grunt 99 pali żelbetowych o przekroju $0,25 \times 0,25$ m i $0,30 \times 0,30$ m o łącznej długości 1169 m. Całkowita objętość materiału wprowadzonego w grunt wynosi w tym przypadku około 87 m^3 . Przyjęto założenie, że – w odróżnieniu od oryginalnej propozycji Hagerty i Pecka – obszar gruntu poddany bezpośredniemu oddziaływaniu wbijanych pali obejmuje cały wykop wewnątrz ściany szczelnej, zamiast obszaru ograniczonego obrysem pali. Daje to powierzchnię około 470 m^2 , dla której – przyjmując wpływ połowy objętości pali na zachowanie terenu wewnątrz wykopu – uzyskuje się wartość średnią uniesienia około 93 mm. Całkowita powierzchnia ściany szczelnej wynosiła 870 m^2 . Dzieląc połowę objętości pali przez tę wartość, uzyskuje się przemieszczenie średnie ściany w kierunku naziomu wynoszące 50 mm, co jest wartością znacząco większą niż około 13 mm oszacowane na podstawie wyników pomiarów.

W świetle takiej rozbieżności konieczne są pewne modyfikacje w propozycji Hagerty i Pecka [6]. Należy zauważyć, że podsumowali oni pomiary przemieszczeń gruntu w otwartym terenie, co nie odpowiada warunkom na omawianej inwestycji. Grunt wewnątrz wykopu miał znacząco większą swobodę przemieszczeń w kierunku pionowym niż ten za ścianką szczelną. Związane jest to z występowaniem za obudową wykopu budynków i z faktem wzbudzania odporu za ścianką przy jej przemieszczaniu w stronę naziomu. Należy więc zakładać, że

więcej niż 50% objętości pali spowodowało podniesienie terenu wewnątrz wykopu, a mniej niż 50% przełożyło się na przemieszczenie ściany. Oprócz tego prawie 35% długości pali znajdowało się poniżej stopy grodzic i prawdopodobnie wypieranie gruntu na boki w tej strefie nie wpływało w znaczący sposób na przemieszczenia ścianki szczelnej, a jedynie spowodowało przemieszczenia pionowe terenu poza wykopem. Uwzględniając powyższe, zakłada się, że około 75% objętości pali spowodowało unoszenie dna wykopu, zaś pozostałe 25% spowodowało przemieszczenie poziome gruntu. Z tych 25% tylko około 2/3 występuje powyżej stóp grodzic. Średnie przemieszczenie grodzicy uzyskane przy takich założeniach wynosi 17 mm, co jest bliskie średniej pomierzonej wartości 13 mm.

Modelowanie pracy ścianki w okresie po wykonaniu pali wydaje się niezasadne ze względu na skomplikowany charakter przestrzenny i czasowy zmian właściwości gruntów w efekcie prowadzenia robót palowych. Niektóre z tych zmian można scharakteryzować opisowo:

1. W trakcie wbijania pali w gruncie zostały wzbudzone znaczne nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu [4, 5]. Przymuszalnie nastąpił spadek wytrzymałości warstw gruntów plastycznych i miękkoplastycznych, spowodowany obniżeniem naprężenia efektywnego.
2. Odwrotne działanie miało wprowadzenie w grunt elementów żelbetowych, które mogły stanowić „zbrojenie” bryły gruntu przed ścianką szczelną.
3. Wraz z upływem czasu będzie następowało rozproszenie nadwyżek ciśnienia wody w porach gruntu, któremu towarzyszyć będzie konsolidacja gruntów spoistych. Można spodziewać się przyrostu wytrzymałości glin plastycznych i miękkoplastycznych w czasie [5], być może powyżej wartości początkowej. Wzrostowi wytrzymałości gruntu będzie towarzyszył przyrost jego sztywności [11].

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono i opisano wyniki pomiarów przemieszczeń obudowy wykopu, wewnątrz którego wbito pale.

Wbijanie pali w grunty plastyczne w pobliżu istniejącego budynku stwarzało niebezpieczeństwo jego uszkodzenia, co skłoniło autorów artykułu do zastosowania metody obserwacyjnej. Takie podejście w warunkach dużej niepewności co do założeń projektowych wydawało się rozwiązaniem najbezpieczniejszym. Założenie to zostało potwierdzone w trakcie robót.

Wyniki pomiarów ilustrują duże zróżnicowanie przemieszczenia ścianki szczelnej w wyniku robót palowych w poszczególnych punktach na obwodzie wykopu. Wbijanie pali spowodowało przemieszczenie obudowy w kierunku naziomu średnio o 13 mm. Porównanie tej wartości z przemieszczeniami wyznaczonymi na podstawie wskazań z literatury sugeruje, że na ruch ścianki wpłynęło około 20 ÷ 25% gruntu wypartego z obszaru palowania. Pozostała część wywołała prawdopodobnie przemieszczenia pionowe powierzchni terenu wewnątrz wykopu oraz uległa wyparciu pod stopą grodzic, nie przekładając się na ich przemieszczenie.

Wartości przemieszczeń obudowy wykopu na etapie wykonania robót ziemnych są znacznie mniej zróżnicowane na obwodzie niż przemieszczenia wywołane wbijaniem pali. Mniejsze są też ich wartości. Z pomiarów wynika, że po wykonaniu wykopu do rzędnej docelowej ścianka nie powróciła do położenia sprzed fazy wbijania pali.

Wyniki pomiarów wykazały niewielkie wartości osiadania budynku centrum handlowego zarówno na etapie wbijania pali, jak i po wykonaniu wykopu do docelowej głębokości około 3,5 m. Pomiarów potwierdziły, że wykonanie robót nie spowodowało zagrożenia dla bezpieczeństwa konstrukcji istniejącego obiektu.

Wpływ palowania na pracę obudowy wykopu prawdopodobnie nie ogranicza się do pali przemieszczeniowych. Pale wiercone również zmieniają strukturę i wytrzymałość gruntu wokół trzonu, co w przypadku ich wykonania w strefie odporowej może wpływać na przemieszczenia poziome konstrukcji oporowej. Metoda obserwacyjna jest w takich warunkach jednym z najbezpieczniejszych sposobów realizacji robót.

LITERATURA

1. Budynek biurowy przy ulicy Kopernika w Olsztynie. Projekt zabezpieczenia wykopu ścianką szczelną. Aarsleff Sp. z o.o., ul. Lambady 6, 02-830 Warszawa, wrzesień 2008.
2. Dokumentacja geotechniczna dla projektu budowlanego budynku mieszkalno-usługowego przy ul. Kopernika w Olsztynie. Zakład Geologiczny „Geol”, ul. Barcza 31/6, 10-685 Olsztyn. Olsztyn, czerwiec 2008.
3. EAB 2003. Recommendations on Excavations. German Society for Geotechnics. Ernst & Sohn, Berlin 2003.

4. Eigenbrod K. D., Issigonis T.: Pore-water pressures in soft to firm clay during driving of piles into underlying dense sand. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 1995.
5. Fellenius B. H., Samson L.: Testing of drivability of concrete piles and disturbance to sensitive clay. *Canadian Geotechnical Journal* 13, 1976.
6. Hagerty D. J., Peck R. B.: Heave and lateral movements due to pile driving. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM11, 1971.
7. Kłosiński B.: Wpływ głębokich wykopów na odkształcenia przyległych obiektów budowlanych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11/2010.
8. Moormann Ch.: Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 1, 2004.
9. Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów. ITB, Walery Kotlicki, Lech Wysokiński, wtyczne nr 376/2002, Warszawa 2002.
10. Ou C-Y., Shiao B-Y.: Analysis of the corner effect on excavation behaviors. *Canadian Geotechnical Journal* 35, 1998.
11. Randolph M. F., Carter J. P., Wroth C. P.: Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation. *Geotechnique* 29, No. 4, 1979.
12. Sanglerat G., Sanglerat T. R.: Two hundred and twenty driven cast-in-place piles. *Piling: European practice and worldwide trends*. Thomas Telford, London 1992.
13. Uzupełniające badania podłoża pod budynek przy ul. Kopernika w Olsztynie, sondowania CPT. Geoteko Sp. z o. o., ul. Wałbrzyska 3/5, 02-739 Warszawa. Warszawa, lipiec 2008.
14. Weissenbach, A.: *Baugruben. Teil 2, Berechnungsgrundlagen*. Ernst & Sohn, Berlin 1975.

STRESZCZENIE: Wyniki pomiarów przemieszczeń ścian szczelnych zabezpieczenia wykopu budynku biurowego w Olsztynie. Monitoring oddziaływania robót palowych na otoczenie oraz monitoring odkształceń obudowy wykopu. Wyniki i analiza porównawcza pomiarów inklinometrycznych i pomiarów geodezyjnych przemieszczenia poziomego korony ściany szczelnej i osiadania istniejącego budynku w charakterystycznych fazach prac.

Analysis of pile driving impact on the displacements of sheet pile casing.

The results of displacement measurements of sheet pile walls retaining the excavation under the office building in Olsztyn. Monitoring of the impact of piling works on the surroundings and the deformation of the excavation casing. The analysis of the inclinometric and geodetic measurements of the horizontal displacement of sheet pile wall top as well as settlement of neighboring building in subsequent construction phases.