

Dr inż. CZESŁAW RYBAK  
Dr inż. JAROSŁAW RYBAK  
Politechnika Wroclawska  
Mgr inż. KRZYSZTOF SAHAJDA  
AARSLEFF Spółka z o. o. Warszawa

## Zagrożenia konstrukcji obiektów istniejących związane z realizacją głębokich wykopów

W niniejszym artykule opisano przypadki szkodliwych oddziaływań dynamicznych na obiekty budowlane usytuowane w bezpośrednim sąsiedztwie głębokich wykopów. W żadnej z opisanych sytuacji nie doszło do powstania katastrofy w rozumieniu prawa budowlanego, ale zjawiska, które wystąpiły, mogą do takich zdarzeń prowadzić.

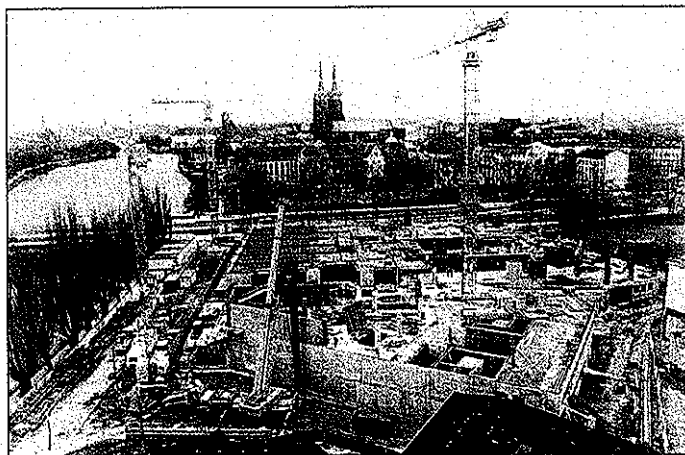
Przedstawiono niebezpieczeństwa, które powinny być brane pod uwagę na etapie projektowania zabezpieczeń głębokich wykopów oraz przy ustalaniu kolejności wykonywania robót. Dotyczy to zwłaszcza wpływu tych prac na występujące w sąsiedztwie konstrukcje współpracujące z gruntem, takie jak fundamenty bezpośrednie, fundamenty palowe, elementy infrastruktury podziemnej i same zabezpieczenia głębokich wykopów.

### Zagrożenie bezpieczeństwa żurawia posadowionego na palach

Rozważania dotyczą sytuacji, która wystąpiła podczas likwidacji zabezpieczenia wykopu po wykonaniu robót stanu zerowego. Całkowity obwód zabezpieczanego wykopu wynosił około 360 m, a głębokość od 6,0 do 7,2 m. Grodzice stalowe zabezpieczenia w postaci ścianki szczelnej zostały pogrążone w grunt za pomocą wibratora nierezonansowego na głębokość od 16,0 do 17,5 m (długość grodzic wynikała z konieczności odciążenia dopływu wody do wykopu przez dno). Ścianka była podparta jednym rzędem kotew gruntowych długości 13÷16 m i o nachyleniu 20÷25°. Warunki geologiczne sprzyjały zastosowaniu tego rozwiązania, ponieważ w podłożu gruntowym dominowały grunty sypkie w stanie średnio zagęszczonym i zagęszczonym, podścielone warstwą nieprzepuszczalną, którą stanowiła glina zwalowa w stanie twaroplastycznym. Zwierciadło wody gruntowej znajdowało się na głębokości 3,5÷4,0 m poniżej terenu. Wewnątrz wykopu zastosowano odwodnienie za pomocą 11 studni depresyjnych średnicy 300 mm, pracujących w sposób ciągły przez cały czas robót stanu zerowego.

Na długości około 220 m, licząc po obwodzie wykopu, przewidziano odzyskanie grodzic po zakończeniu robót. Wykonawcą prac związanych z całością zabezpieczenia wykopu wraz z odwodnieniem była firma AARSLEFF Spółka z o.o. z Warszawy. Projekt zabezpieczenia wykonawca wykonał we własnym zakresie. Widok placu budowy przedstawiono na rys. 1.

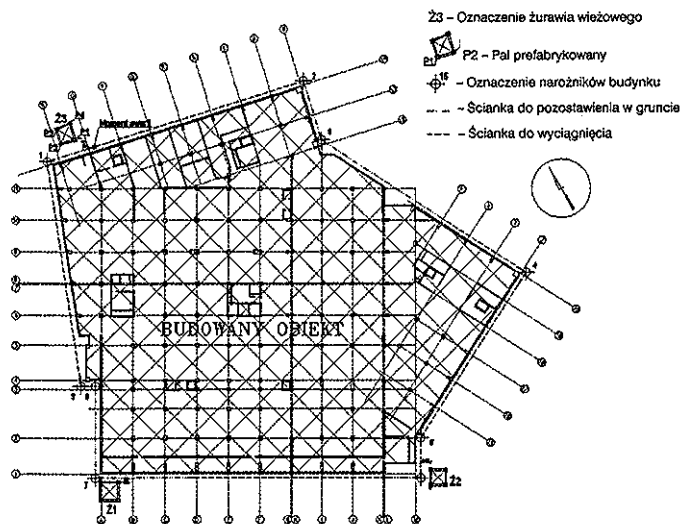
Na budowie zastosowano trzy żurawie wieżowe. Ze względu na konieczność usytuowania żurawi w jak najmniejszej odległości za ścianką, ich posadowienia wykonano w formie fundamentów palowych. Każdy żuraw oparto na czterech palach prefabrykowanych wbijanych o przekroju 30 × 30 cm. Długość pali w gruncie wynosiła 9,5 m. Wykonawcą palowania była ta sama firma, która wykonywała zabezpieczenie, a projekt palowania dostarczył generalny wykonawca obiektu. Projekt posadowienia żurawi nie był konsultowany ani z przedstawicielami firmy wykonującej zabezpieczenie, ani z autorami



Rys. 1. Widok placu budowy

jego projektu. Lokalizację żurawi, wraz ze szkicem zabezpieczenia i zaznaczeniem grodzic przeznaczonych do odzysku, pokazano na rys. 2.

Pale wbijano po osiągnięciu docelowej głębokości wykopu. Stwarzało to już na etapie ich wbijania zagrożenie w odniesieniu do konstrukcji zabezpieczającej wykop, głównie zaś kotew gruntowych (drżania związane z ich wbijaniem mogły doprowadzić do zmniejszenia ich wstępnego naciągu).



Rys. 2. Rzut obiektu wraz z lokalizacją żurawia i miejsca awarii

Awaria żurawia (znaczne odchylenie od pionu) wystąpiła w trakcie zbliżania się robót demontażowych od strony narożnika 2. w kierunku narożnika 1., w chwili, gdy front robót znajdował się w odległości około 4 m od linii pali P1 – P4 pod żurawiem oznaczonym jako Ż3. Roboty natychmiast przerwano i przeprowadzono pomiary geodezyjne. Okazało się, że wystąpiło osiadanie pali stanowiących fundament żurawia Ż3. Osiadanie pala P1, znajdującego się w najbliższym sąsiedztwie wyciąganych grodzic, wyniosło według pomiarów geodezyjnych 47 mm, pala P2, oddalonego od miejsca demontażu ścianki, wyniosło 11 mm, a osiadania pali P3 i P4, znajdujących się w linii odległej od linii ścianki – odpowiednio 0 i 5 mm.

Wzięto pod uwagę dwie możliwe hipotezy przyczyn tego zjawiska.

1. Pod wpływem drgań przekazanych na grunt podczas demontażu ścianki nastąpiło dogęszczenie warstw gruntu niespoistego w postaci pospółek średnio zagęszczonych. Warstwy te w omawianym rejonie zalegają od poziomu od 4,9 m aż do około 14,5–15,0 m poniżej pierwotnego poziomu terenu, czyli do warstwy glin zwalowych o stopniu plastyczności  $I_L = 0,00 \div 0,10$ . Stopień zagęszczenia pospółek wynosił  $I_D = 0,50 \div 0,67$ . Warstwa ta w odpowiednich warunkach, np. pod wpływem wibracji, mogła ulec dogęszczeniu. Ponieważ grodzice były wprowadzone w warstwę glin, ich wyciągnięcie wiązało się z wywieraniem oddziaływań dynamicznych (wibracji) na całą warstwę pospółki. Oznacza to, że warstwa ta, o łącznej grubości ponad 9,5 m, mogła ulec osiadaniu podczas wyciągania grodzic.

2. Pod wpływem opisanych wyżej drgań przekazywanych na ośrodek gruntowy w trakcie wyciągania grodzic, dokładnie w czasie ich oddziaływania na grunt, nastąpiło chwilowe upłynnienie warstwy gruntu niespoistego (zjawisko wibrolepkości gruntu opisane w [6]), które powoduje zmniejszenie sił tarcia między cząsteczkami gruntu. Zjawisko to może również prowa-

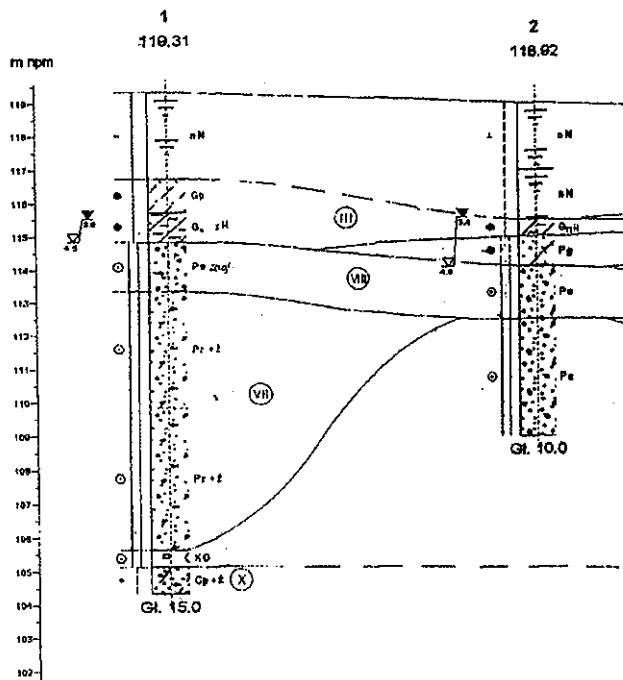
dzić do zmniejszenia nośności pala i w konsekwencji jego osiadania.

Na rysunku 3. przedstawiono fragment przekroju geologicznego, który ilustruje warunki gruntowo-wodne w najbliższym sąsiedztwie żurawia Ż3. Biorąc pod uwagę okoliczności zdarzenia oceniono, że przyczyną osiadania pali było zjawisko opisane wyżej w p. 2. Potwierdzają to następujące argumenty:

– ze względu na fakt, że cała warstwa VIII i IX znajduje się pod wodą, jest mało prawdopodobne, iż główną przyczyną osiadania pala było dogęszczenie gruntu, gdyż grunty nawodnione zagęszczają się niezbyt dobrze,

– dogęszczenie gruntu nie jest zjawiskiem ściśle lokalnym i powinno objąć nieco większy obszar; przeczy temu fakt niewielkich osiadań pozostałych pali,

– awaria miała przebieg nagły, a wyniki pomiarów wykonywanych co kilka godzin w ciągu kilku dni nie potwierdziły dodatkowych osiadań.



Rys. 3. Fragment przekroju geologicznego w sąsiedztwie żurawia Ż3

Zjawisko podane jako wyjaśnienie przyczyn awarii jest powszechne i obserwuje się je także w trakcie trzęsień ziemi, gdzie jego efektem jest gwałtowne osiadanie budowli posadowionych na gruntach niespoistych. Osiadanie takie może wynieść nawet kilkadziesiąt centymetrów. Jego występowanie w warunkach opisanej budowy miało przebieg i skutki bardzo podobne jak w przypadku procesu wyczerpania nośności gruntu pod podstawą lub wzdłuż poboczniczy pala, obserwowanego w końcowej fazie wielu próbnych statycznych obciążeń pali. W wypadku upłynnienia gruntu pod wpływem wibracji mechanizm jest nieco inny, ponieważ podczas przeciążenia polega na wyczerpaniu nośności gruntu o pewnej ustalonej (zwykle znacznej) wartości. Na poboczniczy wynika to ze ścięcia gruntu, a pod podstawą – z powstania stref uplastycznienia. Rzadko wyczerpanie nośności wzdłuż poboczniczy i pod podstawą występuje jednocześnie. W sytuacji upłynnienia gruntu pod wpływem drgań zachodzi zjawisko ograniczenia lub wręcz zaniknięcia jego nośności wskutek redukcji tarcia pomiędzy ziarnami gruntu.

W warunkach omawianej budowy podjęto natychmiastowe środki zaradcze:

– zaniechano jakichkolwiek robót związanych z demontażem ścianki szczelnej aż do czasu przeprowadzenia pomiarów geodezyjnych oraz wyjaśnienia przyczyn awarii,

– wykonano pomiar geodezyjny w celu określenia osiadań pali,

– przywrócono żuraw do pozycji pionowej za pomocą śrub rektyfikacyjnych,

– przeprowadzono w odstępach kilkugodzinnych kolejne pomiary w celu stwierdzenia, czy osiadania pali nie mają charakteru postępującego.

Wyniki okazały się zadowalające, tzn. osiadania pali nie zwiększały się mimo podjęcia pracy żurawia. Środki bezpieczeństwa dotyczące dalszych prac demontażowych ścianki szczelnej polegały na tym, aby zaniechać wyciągania kolejnych grodzic z użyciem wibratora w odległości 6÷8 m od któregośkolwiek z pali stanowiących fundament żurawia, a w trakcie zbliżania się nawet na tę odległość prowadzić ciągle pomiary geodezyjne osiadań pali.

Z analizy opisanej awarii nasuwa się kilka uwag i zaleceń dla projektantów mających do czynienia z podobnymi sytuacjami:

– w omawianym wypadku, zakładając, że usytuowania żurawi były podyktowane koniecznością, było możliwe doprowadzenie pali do warstwy glin i zaprojektowanie o takiej długości, aby cała wymagana nośność była uzyskiwana w tej właśnie warstwie (grunty spoiste, a szczególnie grunty spoiste o małej wilgotności, nie ulegają upłynnieniu pod wpływem drgań); wiązałoby to się z nieco większym kosztem palowania,

– drugim możliwym rozwiązaniem było dopuszczenie jedynie statycznego wyciągania grodzic w sąsiedztwie żurawi,

– w razie innych warunków gruntowych, w których spełnienie podanych wymagań nie byłoby możliwe, należałoby zakazać wyciągania grodzic w pewnej, zależnej od warunków na danej budowie, odległości od któregośkolwiek spośród pali pod żurawiami,

– zagrożenia związane z występowaniem drgań mogą być intensyfikowane w przypadku występowania w obrębie podłoża stref rozluźnionych (warstwy takie wystąpiły w warunkach tej budowy, co obserwowano w trakcie naciągania kotew gruntowych); stref takich jednak nie zarejestrowano w trakcie wbijania pali pod dźwig; występowanie stref rozluźnionych gruntu niespoistego ma istotne znaczenie w projektowaniu zakotwień i w prognozowaniu osiadań obiektów w sąsiedztwie, a nie wpływa zazwyczaj istotnie na siły parcia na ścianę.

### **Awaria kolektora**

Zdarzenie miało miejsce na budowie opisanej wyżej. Przewodzenie budowy projektowanych obiektów wymagało przeloczenia kolektora kanalizacyjnego. Roboty te musiały być wykonane przed wykonaniem obudowy zabezpieczającej głęboki wykop. Trasa nowego kolektora przebiega w pobliżu ściany zabezpieczającej wykop, w obrębie klina odłamu przy parciu czynnym działającym na ścianę. Poziom posadowienia studni kolektora znajdował się poniżej zwierciadła wody gruntowej. Roboty ziemne i fundamentowe tej studni wykonywano więc przy obniżonym zwierciadle wody gruntowej. Wodę gruntową pompowano bezpośrednio z wykopu. Według projektu kolektor powinien być układany w nasypie budowlanym, którego minimalny wskaźnik zagęszczenia powinien wynosić nie mniej niż  $I_D = 0,97$ . Po wykonaniu kolektora przystąpiono do zabezpieczenia wykopu. Grodzice stalowe pogrążano (według założeń projektu) metodą wwbrowywania, z zastosowaniem bezrezonansowego wibratora PVE40. Częstotliwości robocze wibratora znajdowały się poza częstotliwościami rezonansowymi gruntu i typowych obiektów budowlanych.

W trakcie pogrążania grodzic prowadzono ciągle obserwacje oddziaływania prowadzonych robót na otoczenie. Mierzono prędkości drgań rejestrowanych na sąsiednich obiektach. Nie stwierdzono długotrwałych przekroczeń prędkości drgań uznawanych za szkodliwe w odniesieniu do otoczenia.

Mimo podjętych środków ostrożności stwierdzono nierównomierne osiadania studni i rozszczelnienie kolektora. Wykonane badania dotyczące stopnia zagęszczenia gruntów rodzimych, podsypek pod kolektor i zasypów kolektora wykazały duże zróżnicowanie stopnia zagęszczenia, zarówno gruntów rodzimych, jak i nasypowych (od stanu luźnego o  $I_D = 0,28$  do średnio zagęszczonego o  $I_D = 0,53$ ). Z uzyskanych informacji wynikało, że posadowienie studni wykonano poniżej zwierciadła wody gruntowej z zastosowaniem pompowania wody bezpośrednio z wykopu, co zawsze wiąże się z rozluźnieniem gruntu rodzimego w podłożu. Przyczyny wystąpienia osiadania studni i kolektora były zatem złożone. Składały się na nie:

– luźny, na granicy średnio zagęszczonego, stan gruntów rodzimych,

– średnio zagęszczone, na granicy luźnego (nieodpowiadający założeniom projektowym) stan nasypów budowlanych w otoczeniu kolektora,

– fakt prowadzenia wszystkich robót (przekładka kolektora, pogrążanie grodzic) w sąsiedztwie skarpy wstępnego wykopu, co sprzyjało mechanizmowi przemieszczania się gruntu w kierunku wykopu,

– fakt występowania oddziaływania dynamicznego na podłożu w trakcie pogrążania grodzic, co mogło być bezpośrednią przyczyną osiadań kolektora i studni wskutek dogęszczenia słabo zagęszczonych warstw gruntu.

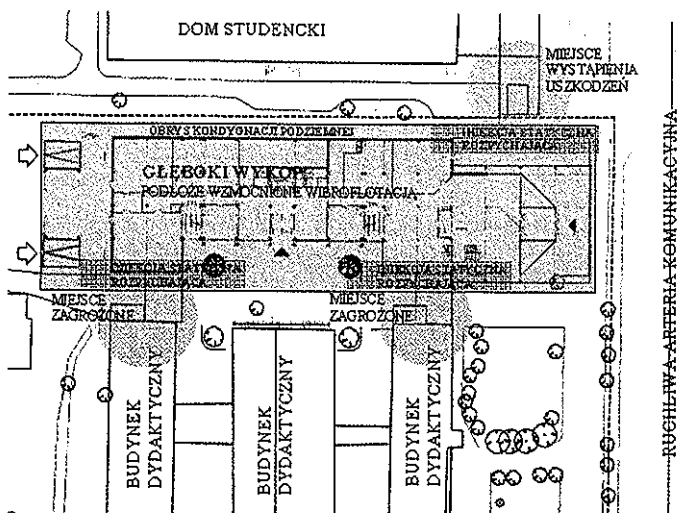
Mimo zachowania reżimów technologicznych dotyczących pogrążania ścianek szczelnych bezrezonansową metodą wibracyjną, wpływ drgań spowodował przyspieszenie i zintensyfikowanie zjawisk związanych z osiadaniami i przemieszczeniami poziomymi. Przemieszczenia mas ziemnych nastąpiły w obrębie luźnych (i dodatkowo rozluźnionych pompowaniem wody) gruntów rodzimych oraz nasypów budowlanych w stanie średnio zagęszczonym (lokalnie na granicy luźnego).

### **Osiadanie fragmentu budynku w sąsiedztwie wykopu**

Rozważania dotyczą realizacji budynku dydaktyczno-naukowego z garażami podziemnymi we Wrocławiu. W trakcie projektowania przeprowadzono szczegółowe badania geotechniczne podłoża. Wyniki badań były wyjątkowo niekorzystne i wręcz zaskakujące. Stopień rozluźnienia gruntów i zasięg występowania stref rozluźnionych należało uznać za osobliwość w tym rejonie Wrocławia, trudną do przewidzenia. Z badań wynikało, że piaski średnie i drobne w stanie bardzo luźnym (stopień zagęszczenia  $I_D \leq 0,20$ ) występują na znacznej głębokości (od około 7,5 m do około 13 m). Stwierdzona najmniejsza wartość stopnia zagęszczenia wynosiła  $I_D = 0,05$ . Ze względu na bardzo małe zagęszczenie gruntów niespoistych w obrębie posadowienia projektowanego budynku i nieregularność zalegania stref bardzo luźnych uznano, że grunty te nie nadają się do bezpośredniego posadowienia, jeśli nie zostaną wzmocnione. Poziom wody gruntowej w obrębie gruntów niespoistych kształtował się na rzędnej około 3,0 m poniżej poziomu terenu.

W otoczeniu planowanej budowy występuje wiele budynków o zróżnicowanej funkcji i konstrukcji. Są to budynki mieszkalne sprzed II wojny światowej, domy studenckie (powojenne) i obiekty dydaktyczne o konstrukcji w postaci ram żelbetowych. Są one posadowione bezpośrednio, powyżej zwierciadła wody gruntowej, w strefie stropowej gruntów niespoistych w stanie średnio zagęszczonym. Posadowienie obiektu z garażem podziemnym zaprojektowano znacznie głębiej, poniżej zwierciadła wody gruntowej, w strefie gruntów luźnych i bardzo luźnych (rys. 4).

Ekspertyza dotycząca posadowienia i sposobu zabezpieczenia wykopu wskazywała na konieczność dogęszczenia gruntu w podłożu pod projektowaną płytą fundamentową (ze względu na konieczność ograniczenia różnic osiadań). Zalecono szczególną ostrożność przy wykonywaniu zabezpieczeń



Rys. 4. Rzut obiektu z zaznaczeniem miejsca awarii

wykopu, ze względu na usytuowanie ścian zabezpieczających wykop bezpośrednio przy fundamentach istniejących obiektów i znaczną różnicę poziomów posadowienia (od 1,8 do 2,5 m) obiektów istniejących i nowo projektowanego.

Zaproponowano dwie technologie pograżania ścianek szczelnych stalowych, umożliwiające ograniczenie oddziaływań dynamicznych na budynki otaczające teren budowy:

- wciskanie ścianki (co pozwala zabezpieczyć sąsiednie budynki i podłoże gruntowe przed szkodliwymi oddziaływaniami dynamicznymi oraz zapewnić odpowiedni komfort otoczeniu budowy przez eliminację uciążliwego hałasu),

- wwbrowywanie ścianki z zastosowaniem wibromłotów bezrezonansowych (poprzedzone wykonaniem prób pograżania grodzic z pomiarem wpływu drgań na otoczenie budowy), z kontrolą drgań przy wykonywaniu ścian w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących budynków.

W celu zagęszczenia gruntu, w podłożu obiektu nowo projektowanego zalecono wibroflotację. Zgodnie z podanymi wytycznymi wykonano próbne wwbrowywanie grodzic w sąsiedztwie istniejących obiektów. W trakcie robót rejestrowano amplitudy przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń drgań przekazywanych na sąsiednie obiekty. Mierzone wielkości mieściły się w granicach dopuszczalnych. Generalny wykonawca zaakceptował więc technologię wwbrowywania.

W trakcie wykonywania robót na jednym z sąsiadujących obiektów zaobserwowano poszerzenie się istniejących spękań i rys oraz powstawanie nowych. Szczegółowa analiza zaistniałej sytuacji wykazała, że jeszcze przed przystąpieniem do wykonywania zabezpieczenia wykopu fundamenty pod ścianą szczytową spękanego obiektu osiadły około 4 cm. Było to wynikiem niewłaściwego sposobu posadowienia, niewłaściwie wykonanego podłoża pod fundamenty i oddziaływań dynamicznych od intensywnego ruchu ciężkich pojazdów po znajdującej się w sąsiedztwie ruchliwej arterii komunikacyjnej. W związku ze stwierdzoną intensyfikacją osiadań podjęto decyzję o zmianie technologii zabezpieczenia wykopu w sąsiedztwie zagrożonego budynku ze ścianki szczelnej na palisadę z pali wierconych.

Ostatecznie osiadania ściany zwiększyły się do około 7 cm. Zaistniała konieczność wzmocnienia fundamentów zagrożonego budynku mikropalami i iniekcją cementacyjną pod podstawy osiadających fundamentów. Jednocześnie ograniczono zakres stosowania w obrębie wykonanego wykopu metody wibroflotacji i w rejonie zagrożonego budynku zastosowano iniekcję statyczną impregnacyjno-dogęszczającą. Trzeba dodać, osiadania budynku zachodziły także po wstrzymaniu wwbrowywania grodzic, co było spowodowane pracą walca wibracyjnego na przebudowywanej w sąsiedztwie ulicy.

## Podsumowanie

W przypadku stosowania metod dynamicznych pograżania ścianek szczelnych i pali w sąsiedztwie istniejących obiektów pomiar amplitud przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń rejestrowanych na obiekcie może być niewystarczający w prognozowaniu ich zachowania. Szczególnie dotyczy to przypadków występowania gruntów niespoistych. Zjawisko wibrolepkości gruntów, wykorzystywane w dynamicznym pograżaniu ścianek szczelnych i pali, okazuje się niebezpieczne w odniesieniu do konstrukcji współpracujących z gruntem. W celu uniknięcia negatywnych skutków wpływów dynamicznych należy przewidzieć właściwą kolejność wykonywania robót, np.:

- wbicie pali przed wwbrowywaniem grodzic, a zwłaszcza przed wykonaniem kotwienia ściany,

- wzmocnienie posadowień zagrożonych obiektów w sąsiedztwie wykopu przed przystąpieniem do wwbrowywania, kotwienia i głębenia wykopu,

- w trakcie robót należy prowadzić systematyczne obserwacje, w tym pomiary przemieszczeń, obiektów istniejących w sąsiedztwie,

- przed przystąpieniem do robót należy dokonać oceny stanu technicznego obiektów istniejących w bezpośrednim sąsiedztwie i zarejestrować stwierdzone uszkodzenia, a także wykonać niezbędne pomiary geodezyjne; niekiedy może zaistnieć potrzeba zabezpieczenia tych obiektów.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] *Weissenbach A.*: German Society for Geotechnics: Recommendations on Excavations. Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- [2] *Broms B. B., Stille H.*: Failure of anchored sheet pile walls. „J. Geotechnical Engineering Division ASCE”, 102 (1976).
- [3] *Fernandes M. A., Cardoso A. J. S., Trigo J. F. C., Marques J. M. M. C.*: Bearing capacity failure of tied-back walls – a complex case of soil wall interaction. „Computers and Geotechnics”, 15 (1993).
- [4] *Puller M.*: Deep excavations. A practical manual. Thomas Telford Publishing, 1996.
- [5] *Whitman R. V.*: Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. „Journal of Geotechnical Engineering”, Vol. 110, No. 2/1984.
- [6] *Kisiel I.*: Dynamika fundamentów pod maszyny. PWN, Warszawa 1957.
- [7] *Kłosiński B.*: Projektowanie obudów głębokich wykopów. Materiały z seminarium „Głębokie wykopki na terenach wielkomiejskich”, IBDiM i IDiM PW, Warszawa 2002.
- [8] *Kłosiński B., Jaworska K.*: Wytyczne projektowania ścian szczelinowych. IBDiM, Warszawa 1991.
- [9] *Wysokiński L., Kotlicki W.*: Zagrożenie awarią budynków usytuowanych w sąsiedztwie głębokich wykopów. X konferencja naukowo-techniczna „Awary budowlane”, Szczecin 2001.
- [10] *Jarominiak A.*: Lekkie konstrukcje oporowe. WKŁ, Warszawa 1998.
- [11] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych.
- [12] *Cytowicz N. A.*: Mechanika gruntów. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1958.