

GEODEZYJNY MONITORING OBIEKTÓW W REJONIE ODDZIAŁYWANIA BUDOWY TUNELI I GŁĘBOKICH WYKOPÓW – DOŚWIADCZENIA I WNIOSKI

Janina Zaczek-Peplinska, Mariusz Pasik, Paweł Popielski
Politechnika Warszawska

Streszczenie. Artykuł prezentuje wyniki badań zachowania gruntu i obiektów budowlanych w sąsiedztwie kilku inwestycji o różnym charakterze oddziaływań, takich jak: głębokie wykopy, drążenie tuneli metra tarczami mechanicznymi oraz wznoszenie budynków. Badania przeprowadzono w ścisłym centrum Warszawy. Obejmują one pomiary geodezyjne przemieszczeń i deformacji monitorowanych obiektów przy wykorzystaniu takich technik, jak: niwelacja precyzyjna, precyzyjne pomiary kątowo-liniowe oraz naziemne skanowanie laserowe. Dane uzyskane tymi metodami są podstawą kalibracji modeli numerycznych i odwrotnie – wyniki obliczeń numerycznych stanowią podstawę dla sformułowania warunków prowadzenia monitoringu obiektu i określenia oczekiwanych wartości przemieszczeń w poszczególnych fazach budowy oraz dopuszczalnych odchyłeń, traktowanych jako wartości alarmowe.

Słowa kluczowe: pomiary geodezyjne, głęboki wykop, przemieszczenia obiektów, drążenie tuneli

WSTĘP

Realizacja inwestycji budowlanych i prawidłowa eksploatacja powstałych już obiektów wymaga prowadzenia monitoringu geodezyjnego. Choć o potrzebie prowadzenia takiego monitoringu przekonani są zarówno inwestorzy, konstruktorzy, jak i wykonawcy, to niestety nadal nie jest on standardem. Zaniechanie prowadzenia monitoringu geodezyjnego podyktowane chęcią ograniczenia kosztów inwestycji często prowadzi niestety do katastrof budowlanych, których skutki finansowe wielokrotnie przekraczają zyski wynikające z zaniechania. Bardzo często zakres monitoringu, dobór metod pomiarowych, częstotliwość wykonywania pomiarów, a przede wszystkim okres prowadzenia pomiarów są dziełem przypadku. Wytyczne dotyczące ochrony zabudowy w sąsiedztwie głębokich

Adres do korespondencji – Corresponding author: Janina Zaczek-Peplinska, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii, Zakład Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, e-mail: jzaczek@gik.pw.edu.pl

wykopów wydane przez Instytut Techniki Budowlanej [Kotlicki i Wysokiński 2002] oraz instrukcje w nich zawarte nadal są przez konstruktorów i wykonawców traktowane fakultatywnie, nieobligatoryjnie. Rzadko zakres monitoringu i dobór metod pomiarowych jest wynikiem analiz opartych na naukowych podstawach. Tylko w nielicznych przypadkach pomiary wyprzedzają inwestycję i są prowadzone po jej zakończeniu. Stan ten skłania ku wnioskowi, iż należałoby dążyć do wprowadzenia obowiązku tworzenia zintegrowanych systemów monitoringu geodezyjnego, dających możliwość detekcji i oceny ryzyka zagrożeń opartych na jasnych, popartych badaniami naukowymi metodach pomiarowych dobranych do własności gruntu oraz charakteru i stanu technicznego budynków sąsiadujących z inwestycją, a także specyfiki wznoszonych obiektów budowlanych. Od 2011 roku w Politechnice Warszawskiej, w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych, we współpracy z Zakładem Budownictwa Wodnego i Hydrauliki oraz firmą geodezyjną DWG Witold Domaradzki, a od początku 2013 roku również we współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej prowadzone są prace koncepcyjne nad przygotowaniem zintegrowanego systemu wykrywania i oceny ryzyka zagrożeń spowodowanych deformacjami obiektów budowlanych, wywołanymi zmianami w ich podłożu, opartego na różnych systemach pozyskiwania i analizy danych. Dla zwiększenia niezawodności i funkcjonalności systemu planuje się go oprzeć na najpowszechniej stosowanych technikach (niwelacja precyzyjna, precyzyjne pomiary kątowno-liniowe), a także na nowoczesnych źródłach pozyskiwania danych o obiektach budowlanych i gruncie (np. na naziemnym skaningu laserowym i metodach inklinometrycznych).

CHARAKTERYSTYKA ODDZIAŁYWAŃ GŁĘBOKICH WYKOPÓW I TUNELI

W centrach miast, w gęstej zabudowie pojawiają się nowe inwestycje, zwykle o kilkukondygnacyjnej części podziemnej. Obiekty takie wywierają wpływ na zabudowę sąsiednią [Burland i in. 2004]. Równocześnie rozwój infrastruktury miejskiej łączy się z budową tuneli i stacji metra z wykorzystaniem różnych technologii oraz rozbiórką starych budynków. W środowisku zurbanizowanym zdarzają się przypadki, że oddziaływania różnych nowych inwestycji na istniejące budynki nakładają się. Przykładem tego, jak poważne w skutkach mogą być następstwa oddziaływań takich inwestycji w obszarach zurbanizowanych, może być katastrofa Europleksu w Warszawie w 1998 roku [Prószyński i Woźniak 1999] czy problemy związane z oddziaływaniem II linii Metra Warszawskiego w rejonie stacji Świętokrzyska oraz Powiśle [Siemińska-Lewandowska 2013].

Wpływ głębokich posadowień na otoczenie jest złożony i każda inwestycja wymaga oddzielnej analizy. Największy wpływ na wielkość przemieszczeń ma rodzaj i stan gruntu (parametr określający jego sztywność), w którym jest wykonywany wykop, głębokość wykopu oraz jakość, staranność i tempo wykonania robót. Czas wykonania robót jest bardzo ważnym czynnikiem. Przerwa w wykonywaniu robót zawsze powoduje zwiększenie wartości przemieszczeń w rejonie wykopu w stosunku do realizacji zgodnie z harmonogramem. W trakcie realizacji głębokiego posadowienia występują zróżnicowane (co do wartości, kierunku i zwrotu oraz zmienne w czasie) przemieszczenia ośrodka gruntowego obserwowane w rejonie wykonywania robót oraz w strefach sąsiednich.

Oddziaływania głębokich posadowień na otaczające środowisko można podzielić na dwie grupy: fizyczne (wynikające z mechaniki ośrodka i procesu jego odciążania oraz obciążania), zwane dalej naturalnymi, oraz technologiczne (wynikające z uwarunkowań realizacji, związane z przyjętymi rozwiązaniami oraz starannością wykonania). Efektem wymienionych oddziaływań są mierzalne przemieszczenia. Zauważa się, że przemieszczenia pionowe są spowodowane w większym stopniu przez oddziaływania naturalne, a przemieszczenia poziome wynikają głównie z przyczyn technologicznych. Oddziaływania naturalne są skutkiem zmian stanu naprężenia w podłożu podczas realizacji wykopu i obiektu, wynikających kolejno z odciążenia podłoża w trakcie wykonywania wykopu, obciążenia wtórnego oraz obciążenia dodatkowego.

Zasięg strefy oddziaływania oraz wartości przemieszczeń wynikających z odciążenia podłoża zależą od rodzaju podłoża, parametrów geotechnicznych oraz ciężaru gruntu, który zostanie usunięty z wykopu, a więc również głębokości i powierzchni wykopu. W trakcie realizacji głębokich wykopów występują dodatnie przemieszczenia pionowe (wypiętrzenia) przede wszystkim dna wykopu, ścian obudowy, ale również powierzchni terenu oraz obiektów wokół wykopu. Przemieszczenia wynikające z odciążenia mają istotny udział w wartościach ostatecznych przemieszczeń pionowych i z tego względu, poprzez redukcję końcowych osiadań, mają wpływ na bezpieczeństwo sąsiednich obiektów i ewentualne roszczenia ich właścicieli.

Zakres i rozmiar oddziaływań technologicznych zależy od wpływu przyjętych rozwiązań na zmiany stanu naprężenia ośrodka gruntowego. Są to przede wszystkim: rodzaj i sposób wykonania obudowy, zmiany stanu naprężenia podczas głębienia szczelin, w których zostaną wykonane ściany szczelinowe, obciążenia dynamiczne w trakcie wykonywania ściany, rodzaj podparcia lub zakotwienia obudowy (wstępne sprężenie lub rozparcie), sposób i czas głębienia wykopu, wpływ odwodnienia wykopu (sposób obniżania zwierciadła wody gruntowej), wzmacnianie podłoża pod obiektami sąsiednimi i czynnik ludzki.

Głębokie wykopy wymagają zazwyczaj wykonania odwodnienia. Zakres odwodnienia zależy od zastosowanej obudowy wykopu i od warunków hydrogeologicznych w podłożu, takich jak liczba poziomów wodonośnych czy występowanie wód pod ciśnieniem. Każde obniżenie poziomu wody gruntowej wywołuje zmianę stanu naprężenia w podłożu. Jeżeli zmiany poziomu wody mieszczą się w granicach naturalnych wahań sezonowych, to nie mają istotnego wpływu na wartości osiadań. W przypadku obniżenia zwierciadła wody gruntowej, znacznie przekraczającego wahania naturalne, mogą wystąpić dodatkowe osiadania oraz nasilenie konsolidacji filtracyjnej.

Między przemieszczeniami poziomymi i pionowymi istnieje pewna współzależność. Przykładowo ugięcie obudowy wykopu w trakcie jego głębienia zmniejsza wypiętrzenie terenu wokół głębokiego posadowienia. Tym samym powoduje większe osiadania całkowite w końcowych fazach realizacji obiektu.

Tunelowanie za pomocą tarcz zmechanizowanych (np. budowa tuneli metra) najczęściej odbywa się w niejednorodnym podłożu składającym się z warstw o różnych właściwościach fizycznych i głębokościach posadowienia. Zmiana ich położenia powoduje zaburzenie istniejącego rozkładu naprężeń, które może doprowadzić do zmian warunków pracy podłoża. Efektem procesu tunelowania jest widoczna deformacja warstwy powierzchniowej terenu, nosząca nazwę niecki osiadania. Związane są z nią nie tylko prze-

mieszczenia pionowe, powstające głównie na skutek wspomnianych wcześniej zjawisk, ale także przesunięcia poziome podłoża [Kuszyk i Siemińska-Lewandowska 2009].

Obecnie, ze względu na ilość i zakres realizowanych inwestycji, doskonałym obszarem do prowadzenia badań w zakresie oddziaływania głębokich wykopów i tuneli jest centrum Warszawy z dynamicznie rozwijającym się głęboko posadowionym budownictwem wysokościowym oraz realizowaną II linią Metra Warszawskiego. Określenie wzajemnych oddziaływań pomiędzy realizowanym obiektem budowlanym a sąsiednią zabudową lub infrastrukturą podziemną bywa konieczne nie tylko w procesie projektowania, ale również na etapie uzyskania pozwolenia na budowę. W przypadku skomplikowanej budowy geologicznej i hydrogeologicznej podłoża przy analizie głębokiego posadowienia obiektu, zakładającej współpracę obudowy wykopu, płyty dennej i innych elementów konstrukcyjnych, podstawową metodą prognozowania wzajemnych oddziaływań jest modelowanie numeryczne [Popielski 2012]. Stworzony model można skalibrować po pierwszej fazie realizacji inwestycji za pomocą analizy wstecz (*back analysis*) na podstawie danych z monitoringu geodezyjnego [Zaczek-Peplinska i Popielski 2012]. Parametry zweryfikowane na jednym obiekcie mogą być wykorzystane przy obliczeniach dotyczących obiektów znajdujących się w niewielkiej odległości w podobnych warunkach geologicznych. Weryfikacja opracowanego modelu numerycznego wykonana na podstawie pomiarów rzeczywistych przemieszczeń obiektu stanowi najważniejsze potwierdzenie adekwatności modelu odtwarzającego realny harmonogram realizacji oraz wynikającego z przyjęcia poprawnych obciążeń i parametrów materiałowych. Służy to zdobywaniu doświadczeń doskonalących procedury weryfikacji parametrów (zakres małych odkształceń) lub modyfikacji wyznaczonych dla innego zakresu odkształceń.

Zaniechanie weryfikacji modelu – przy dostępności pomiarów przemieszczeń – jest „błędem w sztuce”, który często pojawia się przy wykorzystaniu symulacji numerycznych. W obliczeniach numerycznych wyznaczone przemieszczenia są podstawą do określenia naprężeń oraz innych wartości wyznaczanych w wyniku symulacji. Brak weryfikacji modelu pod kątem zgodności przemieszczeń obliczonych i rzeczywistych uniemożliwia potwierdzenie poprawności wartości sił wewnętrznych przyjętych do wymiarowania konstrukcji. Wyniki obliczeń numerycznych powinny stanowić podstawę dla sformułowania warunków prowadzenia monitoringu obiektu wraz z określeniem oczekiwanych wartości przemieszczeń w poszczególnych fazach budowy oraz dopuszczalnych odchyłeń traktowanych jako wartości alarmowe. Ma to szczególne znaczenie przy realizacji obiektów w środowisku zurbanizowanym.

METODYKA BADAŃ – MONITORING GEODEZYJNY ODDZIAŁYWAŃ GŁĘBOKIEGO POSADOWIENIA I TUNELI NA OBIEKTY SĄSIEDNIE

Geodezyjne pomiary przemieszczeń wchodzące w zakres monitoringu geodezyjnego z racji swego przeznaczenia muszą charakteryzować się dużą dokładnością i stosunkowo krótkim czasem pomiaru, zależnym głównie od wielkości i rodzaju mierzonej sieci kontrolnej. Z powodu utrudnień w wykonywaniu pomiarów w terenie zurbanizowanym o gęstej zabudowie (ruch uliczny kołowy i pieszy, zmienne warunki oświetlenia, często utrudniony dostęp do badanych punktów) stosowane metody pomiarowe i sprzęt powinny

charakteryzować się dużą precyzją i niezawodnością. Poprawne wyznaczenie przemieszczeń zagrożonych obiektów budowlanych jest podstawą ustalania zmian konstrukcji oraz opracowania zabezpieczeń pozwalających na uniknięcie katastrofy budowlanej.

Dobór metod pomiarowych stosowanych do wyznaczania przemieszczeń obiektów budowlanych zależy od trzech podstawowych czynników [Bryś i Przewłocki 1998]:

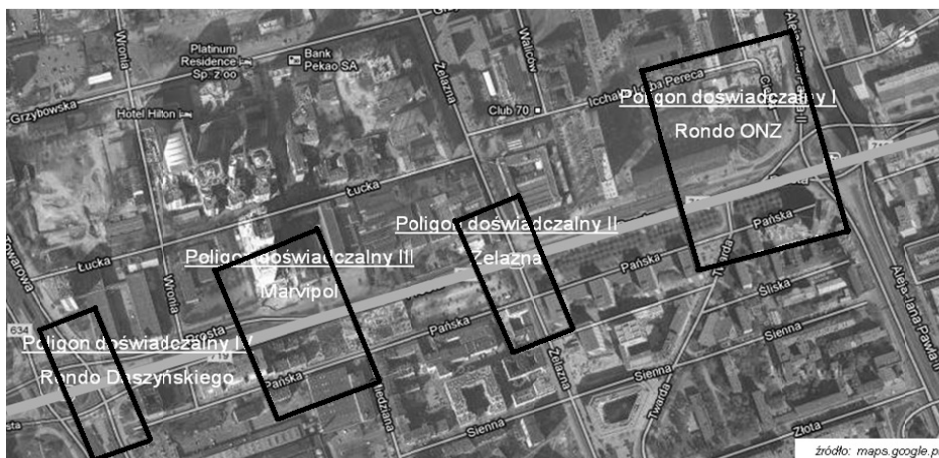
- szybkości zmian zachodzących na badanym obiekcie,
- rodzaju wyznaczanych przemieszczeń: poziome (dwie składowe w płaszczyźnie poziomej i czas), pionowe (jedna składowa w linii pionu i czas), przestrzenne (trzy składowe przestrzenne: x , y , z i czas), lub przy innym podziale: względne (odniesione do punktów położonych na badanym obiekcie), bezwzględne (odniesione do stałych punktów zlokalizowanych poza zasięgiem oddziaływań),
- wymaganych dokładności wyznaczanych wielkości przemieszczeń badanych punktów.

Projekt monitoringu geodezyjnego powinien powstawać na podstawie prognozowanych wielkości i szybkości zachodzących zmian, ściśle powiązanych z etapowaniem prac w trakcie realizacji głębokiego posadowienia czy tunelu. Jeśli zmiany są powolne i związane z osiągnięciem odpowiednich głębokości wykopu lub przejścia tunelu przez kolejne odcinki, to można założyć, że podczas wykonywania jednego cyklu pomiarowego na badanym obiekcie nie zachodzą zmiany większe niż dokładność wykonywanego pomiaru. Przy takim założeniu można realizować pomiary sieci geodezyjnej obejmującej badany obiekt i jego otoczenie. Aby sprostać temu wymaganiu na poligonach doświadczalnych, opisywanych w niniejszym artykule, sieci zostały tak zaprojektowane, żeby pomiar przy dobrych warunkach pogodowych trwał nie dłużej niż jeden dzień.

W latach 2011–2012 Zakład Geodezji Inżynieryjnej i Pomiarów Szczegółowych (Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii) prowadził doświadczalne pomiary terenowe na kilku poligonach badawczych (rys. 1) zlokalizowanych w centrum Warszawy, wzdłuż budowanej II linii Metra Warszawskiego, w rejonach:

- ronda Daszyńskiego (poligon IV „Rondo Daszyńskiego”) i sąsiadującego odcinka ulicy Prostej (poligon III „Marvipol”) – oddziaływanie budowy II linii Metra Warszawskiego oraz realizacji głębokiego posadowienia wysokościowca Warsaw Spire,
- skrzyżowania ulic Prostej i Żelaznej (poligon II „Żelazna”) – oddziaływanie budowy tuneli II linii Metra Warszawskiego: zaobserwowano rozwój niecki osiadania spowodowanej budową pierwszego tunelu, jej stabilizację, a następnie nałożenie oddziaływań w trakcie wykonywania kolejnego tunelu metra,
- ronda ONZ (poligon I „Rondo ONZ”) – oddziaływanie realizacji głębokiego posadowienia wysokościowca Atrium South II oraz budowa stacji metra „Rondo ONZ”.

W dalszej części niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych na poligonach „Rondo ONZ” i „Żelazna”, prezentujące odpowiednio oddziaływanie głębokiego posadowienia oraz tunelu metra. Punkty kontrolowane zastabilizowano na elewacjach i elementach konstrukcyjnych obiektów sąsiadujących z realizowaną inwestycją za pomocą reperów, precyzyjnych folii refleksyjnych oraz pryzmatów inżynierskich (poligon „Rondo ONZ”) oraz w postaci prętów metalowych umieszczonych w krawężnikach jezdni (poligon „Żelazna”). Ich położenie było obserwowane w kolejnych cyklach pomiarowych, w odniesieniu do punktów odniesienia poza zasięgiem oddziaływania inwestycji, zlokalizowanych na obiektach stabilnych. Punkty odniesienia zostały założone



Rys. 1. Poligony doświadczalne wzdłuż II linii Metra Warszawskiego

Fig. 1. Experiment areas along the second underground line in Warsaw

w trakcie przygotowywania monitoringu wyprzedzającego prowadzonego przed rozpoczęciem inwestycji.

Na wymienionych poligonach prowadzono monitoring geodezyjny metodami: niwelacji precyzyjnej, pomiarów kątowych i liniowych oraz naziemnego skaningu laserowego. Na poligonie „Rondo ONZ” terminy wykonania kolejnych cykli pomiarowych wynikały z realizacji harmonogramu wykonania poszczególnych etapów wykopu i konstrukcji, z kolei na poligonie „Żelazna” terminy pomiarów dostosowano do czasu przejścia tarcz drążących tunel.

Podstawą uzyskania przemieszczeń dla wszystkich cykli pomiarowych są wysokości i współrzędne płaskie wyznaczone dla każdego cyklu w procesie niezależnego wyrównania swobodnego. Obliczenia zrealizowano odrębnie dla sieci wysokościowej (sieci niwelacji precyzyjnej) i sieci płaskiej (precyzyjnej sieci kątowno-liniowej).

WYNIKI BADAŃ

Przemieszczenia obiektów na poligonie doświadczalnym „Rondo ONZ” spowodowane realizacją głębokiego posadowienia

Poniżej przedstawiono analizę zaobserwowanych wielkości przemieszczeń pionowych i poziomych punktów kontrolnych poligonu „Rondo ONZ” rozmieszczonych na budynkach Ciepła 3, Pereca 1A i Prosta 12/14, będących głównie w strefie oddziaływania realizacji głębokiego posadowienia wysokościowca Atrium South II oraz w mniejszym stopniu budowy stacji metra. Analiza obejmuje okres głębienia wykopu pierwszej inwestycji do poziomu płyty fundamentowej.

Analiza oddziaływań inwestycji obejmuje 4 cykle pomiarowe dla sieci wysokościowej i poziomej. Pomiaru niwelacji precyzyjnej przeprowadzono w dniach: 10–14.12.2011 r. (cykl 1), 19.03.2012 r. (cykl 2), 24.04.2012 r. (cykl 3) i 22–24.05.2012 r. (cykl 4).

Z kolei precyzyjne pomiary kąto- liniowe wykonano w dniach: 27.12.2011 r. (cykl 1), 19–22.03.2012 r. (cykl 2), 24–25.04.2012 r. (cykl 3) i 22–24.05.2012 r. (cykl 4). Skanowanie laserowe wykonano w czasie trwania cykli 2 i 4.

Niwelację precyzyjną wykonano niwelatorem kodowym Leica DNA03, natomiast pomiary kąto- liniowe wykonano tachimetrami Leica TCRP 1201+ i TCRP1202. W procesie wyrównań obu sieci określono następujące przeciętne (dla wszystkich cykli) błędy pomiaru: błąd średni przewyższenia na jedno stanowisko równy 0,09 mm oraz błędy średnie pomiaru kierunku i odległości odpowiednio na poziomie 1,5" i 1,5 mm. Skanowanie laserowe wykonano instrumentem Z+F Imager 5010.

Dla poprawnej analizy przydatne jest określenie zakresu i zaawansowania prac ziemnych w trakcie realizacji pozostałych cykli pomiarowych. Pomiary dla cyklu 2 wykonano w trakcie drążenia ścianek szczelinowych o głębokości 25,0 m wzdłuż północnej ściany kamienicy w odległości około 4,0 m od lica ściany budynku Ciepła 3. W momencie trwania cyklu 3 wykonano już ścianki szczelinowe i rozpoczęło się głębienie wykopu do poziomu –1 (4,50 m poniżej poziomu terenu). Z kolei realizacja cyklu 4 przypada na początkowy okres głębienia wykopu do poziomu –3 (11,40 m poniżej poziomu terenu), po wykonaniu wykopu i stropu na poziomie –1.

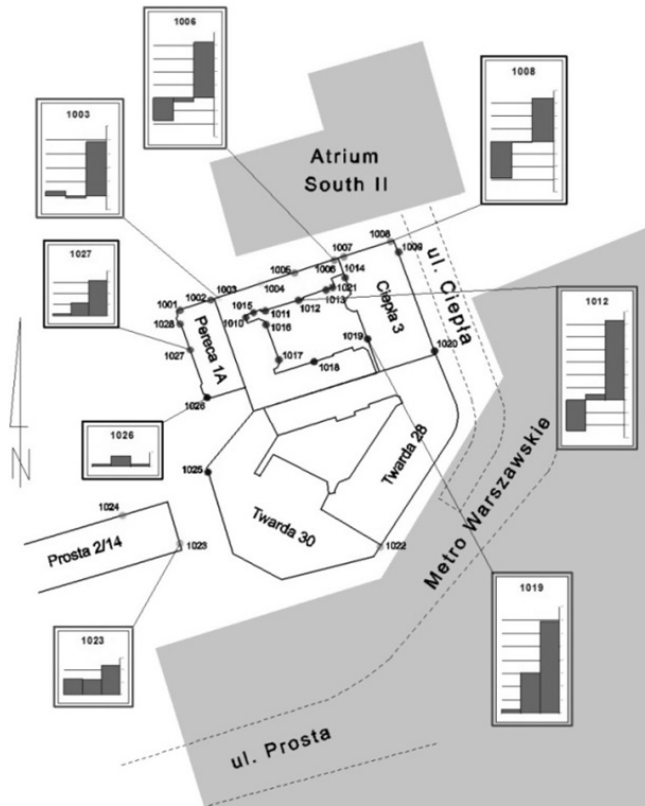
Analiza wyznaczonych przemieszczeń pionowych

Analiza wielkości przemieszczeń pionowych punktów kontrolowanych dla cykli 2, 3 i 4 (odniesionych do wyjściowego cyklu 1) pokazuje istotne oddziaływanie głębokiego posadowienia inwestycji Atrium South II. Główną przyczyną oddziaływania jest odciążenie podłoża spowodowanego głębieniem wykopu, skutkujące wypiętrzaniem obiektów wokół wykopu. Rysunek 2 przedstawia rozmieszczenie oraz przemieszczenia wybranych reperów kontrolowanych. Na rysunku tym można wyodrębnić kilka stref oddziaływania (reprezentowanych poszczególnymi wykresami słupkowymi), których zasięg zależy głównie od odległości względem obszaru prac ziemnych tej inwestycji. Wykresy słupkowe pokazują wielkości pionowych przemieszczeń względnych (kolejno od lewej do prawej strony dla cykli 2, 3 i 4). Na wykresach tych umieszczono linie poziome w interwale 0,2 mm. Dla oceny istotności tych przemieszczeń należy zauważyć, że przeciętna wartość błędu przemieszczenia pionowego dla wszystkich cykli wynosi 0,26 mm.

Do wypiętrzającego oddziaływania wykopu dochodzi różnicowanie w zachowaniu punktów kontrolowanych, pochodzące od różnych osiadań w trakcie fazy drążenia ścianek szczelinowych (cykl 2).

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że działanie wypiętrzające wykopu ma jednak zdecydowanie większą intensywność (do około +1,5 mm) i zasięg w porównaniu z oddziaływaniem głębienia ścianek szczelinowych (do około –0,6 mm) ograniczonym do bezpośredniego sąsiedztwa inwestycji.

Strefa reprezentowana przez punkty 1018, 1019 i 1020 to strefa łącznego oddziaływania inwestycji Atrium South II oraz budowy stacji Metra Warszawskiego, w której obszarze obserwuje się największe wypiętrzania. Z kolei strefa reprezentowana przez punkty 1022, 1023 i 1024 to strefa wyłącznego oddziaływania drugiej z inwestycji.



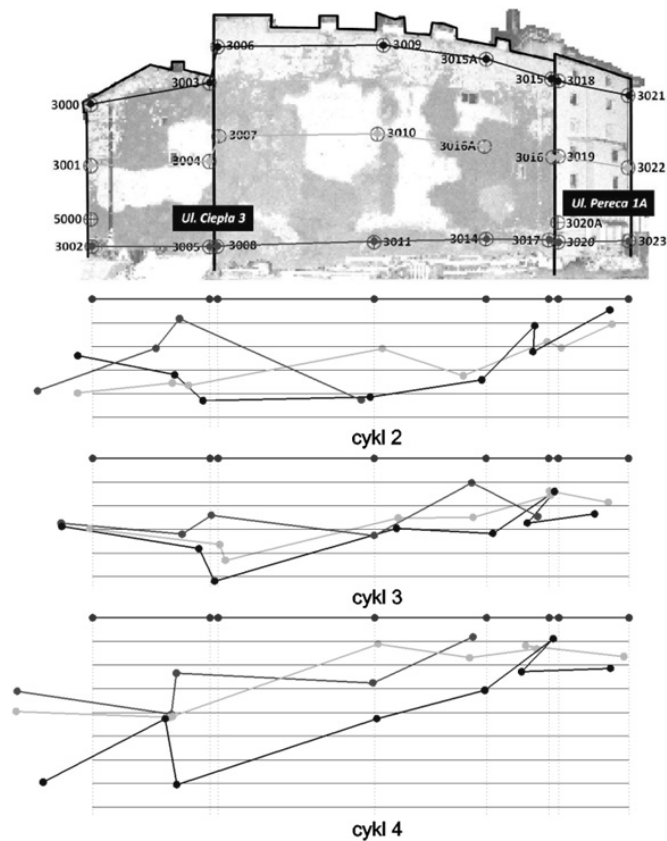
Rys. 2. Wykresy przemieszczeń pionowych dla reperów kontrolowanych poligonu „Rondo ONZ” [Popielski i in. 2012]

Fig. 2. Charts of the vertical displacements for benchmarks controlled within the experimental area „Rondo ONZ” [Popielski et al. 2012]

Analiza wyznaczonych przemieszczeń poziomych

Rysunek 3 przedstawia przemieszczenia poziome punktów kontrolowanych na ścianach północnych budynków Ciepła 3 i Perca 1A, zlokalizowanych w sąsiedztwie głębokiego posadowienia budynku Atrium South II. Punkty zlokalizowane w liniach pionowych 3000-3002, 3003-3005, 3006-3008, 3009-3011 znajdują się bezpośrednio nad krawędzią wykopu (rys. 2). Wielkości przemieszczeń przedstawiono niezależnie dla trzech poziomów posadowienia w postaci wykresów w różnych odcieniach szarości. Przemieszczenia odniesiono do wyjściowego cyklu 1. Dla zwiększenia czytelności przemieszczeń w kierunku prostopadłym do ściany umieszczono poziome linie w interwale milimetrym, równoległe do trendu reprezentującego cykl 1.

Analiza wykresów (rys. 3) wykazuje, że prace ziemne związane z głębokim posadowieniem znacząco oddziałują tylko na punkty kontrolowane na budynku Ciepła 3 (po lewej stronie), będące w bezpośrednim sąsiedztwie inwestycji. Wyraźnie można zauważyć przemieszczenia zorientowane w kierunku obszaru prac ziemnych.



Rys. 3. Lokalizacja i wykresy względnych przemieszczeń punktów kontrolowanych na ścianach północnych budynków Ciepła 3 i Pereca 1A. Interwał linii poziomych na wykresie – 1,0 mm [Popielski i in. 2012]

Fig. 3. Localization and charts of displacements of controlled points observed on the northern walls of Ciepła 3 and Pereca 1A buildings. Interval of the vertical lines on the charts equal 1,0 mm [Popielski et al. 2012]

Ciekawych wniosków dostarcza konfrontacja wielkości przemieszczeń z rodzajem prac ziemnych i ich zaawansowaniem. Trendy dla cyklu 2, trwającego w czasie głębienia szczelin ścian szczelinowych, pokazują duże zróżnicowanie przemieszczeń na różnych poziomach dochodzących nawet do około 4 mm, z zauważalną tendencją odchylenia się najwyższego poziomu w kierunku wykopu, którego położenie względem analizowanych ścian pokazuje rysunek 2. Wykresy dla cyklu 3, realizowanego już po wykonaniu ścianek szczelinowych i w trakcie głębienia wykopu do poziomu –1, wykazują podobne trendy jak w cyklu poprzednim, jednak charakteryzujące się większą zgodnością na różnych poziomach. Wykresy dla cyklu 4, mierzonego po wykonaniu stropu na poziomie –1 i w trakcie drążenia wykopu do poziomu –3, sygnalizują już duży stopień oddziaływania (przemieszczenia nawet do około 7 mm), szczególnie na najwyższy poziom wykazujący już wyraźne odchylenie górnej części ściany w stosunku do jej niższych partii.

Dla oceny istotności wielkości przemieszczeń należy dodać, że przeciętna wartość błędu średniego przemieszczenia poziomego dla analizowanych punktów (dla wszystkich cykli) wynosi 1,3 mm.

Analiza wyników skanowania laserowego

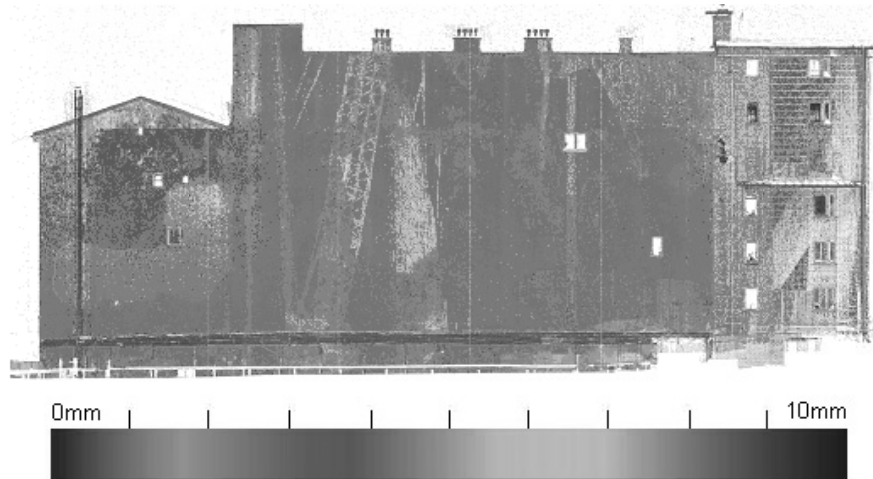
Naziemne skanowanie laserowe pozwala na wykonywanie kompleksowych opracowań i analiz, jakie nie były dotąd dostępne dla żadnej z technik pomiarowych i co najważniejsze – bez sygnalizowania punktów charakterystycznych monitorowanych obiektów. Sporządzanie opracowań prawie dowolnego fragmentu obiektu, bez konieczności wykonywania dodatkowych prac terenowych, umożliwia sposób rejestracji danych, w którego wyniku otrzymywana jest quasi-ciągła chmura punktów reprezentujących geometrię skanowanych obiektów. Szczególnie istotną zaletą metody skaningu laserowego jest szybkość rejestracji ogromnej liczby danych. Dzięki temu istnieje możliwość uzyskiwania dowolnych widoków, rzutów i przekrojów oraz wykonywania analiz dla dowolnego miejsca budowli w miarę pojawiania się takich potrzeb, a także łatwość powtarzania pomiarów, ich porównywania i prezentacji wyników.

Aby jednak wyniki skanowania można było porównywać z rezultatami pomiarów wykonanych innymi technikami lub je uzupełnić, albo porównać zobrazowania w postaci skanów wykonane w pewnym odstępie czasowym, należy je oprzeć na zewnętrznym układzie odniesienia zlokalizowanym poza strefą wpływu monitorowanej inwestycji. Takie odniesienie wykonano dla obu cykli skaningu laserowego. W tym celu metodami klasycznymi wyznaczono trójwymiarowe pozycje skanera i tarcz celowniczych zarejestrowanych na skanach, które posłużyły do ich orientacji. Następnie poprzez transformacje skanów – na podstawie tak określonych punktów łącznych – uzyskano trójwymiarowe chmury punktów, których pozycje są wyrażone w zewnętrznym bezwzględny układzie współrzędnych. Do tego celu zastosowano oprogramowanie ASCAN firmy AstraGis.

Tak opracowane chmury punktów pozwalają na szeroki wachlarz analiz przestrzennych, z których najbardziej spektakularna jest możliwość uzyskania rozbieżności w geometrii chmur obrazujących monitorowany obiekt w różnym czasie. Rysunek 4 prezentuje mapę hipsometryczną wielkości przemieszczeń ścian północnych budynków Ciepła 3 i Pereca 1A w kierunku prostopadłym, uzyskanych poprzez porównanie cyklu 2 i 4. Należy dodać, że opracowania z zastosowaniem skaningu nie wymagają sygnalizacji na badanym obiekcie, co w porównaniu z innymi metodami jest niezaprzeczalnym walorem.

Dla celów analizy dokładności tak uzyskanych chmur punktów określono pozycje trójwymiarowe zarejestrowanych na skanach folii refleksyjnych wykorzystywanych w wyznaczaniu przemieszczeń poziomych za pomocą precyzyjnych pomiarów kątowoliniowych. Następnie na podstawie tych pozycji wyznaczono wielkości przemieszczeń w odniesieniu do wyjściowego cyklu 1 zrealizowanego wyłącznie metodami klasycznymi. Wielkości przemieszczeń poziomych punktów kontrolnych (w milimetrach) na ścianach północnych budynków Ciepła 3 i Pereca 1A dla cyklu 2 i 4, uzyskanych metodami klasycznymi (linia ciągła) i za pomocą skaningu laserowego (linia przerywana), przedstawia rysunek 5. Rysunek prezentuje wykresy kolejno od poziomu górnego do dolnego.

Dla dwóch najniższych poziomów maksymalne rozbieżności przemieszczeń poziomych dla obu metod osiągają wartość 4 mm, przy przeciętnej wartości około 2 mm.



Rys. 4. Mapa hipsometryczna wielkości przemieszczeń ścian północnych budynków Ciepła 3 i Pereca 1A w kierunku prostopadłym do skanowanej powierzchni

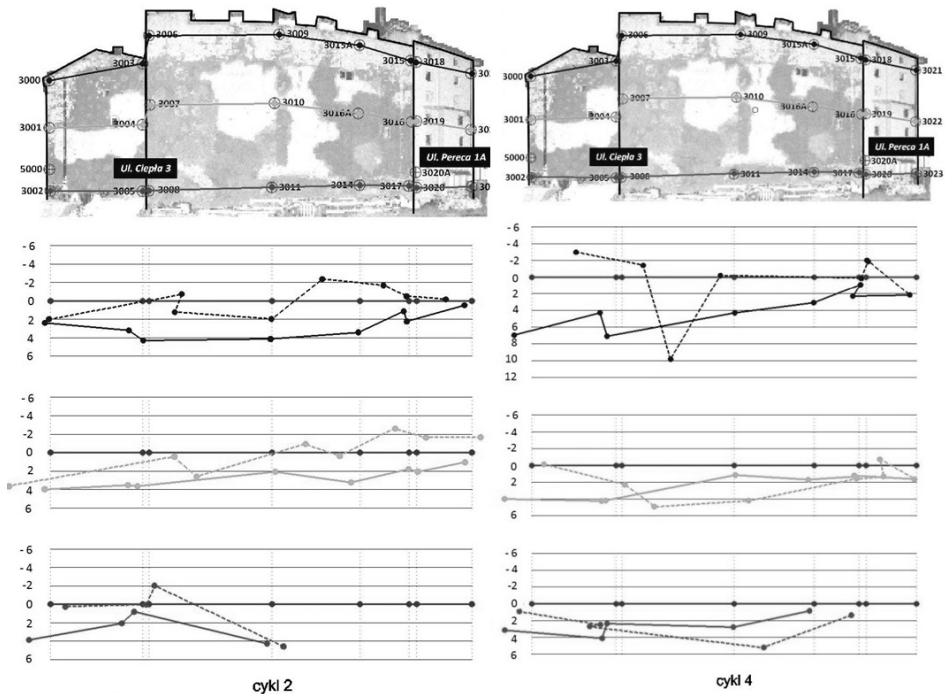
Fig. 4. Hipsometric map of displacement values of the northern walls of Ciepła 3 and Pereca 1A buildings in a direction perpendicular to the scanned surface

Jest to znakomite osiągnięcie, zważywszy na to, że podobnego rzędu jest maksymalna wartość błędu średniego położenia punktów łącznych, będących podstawą transformacji skanów. Ponadto jest to wartość nieco przekraczająca przeciętną wartość błędu średniego przemieszczeń uzyskanych metodami klasycznymi. Dla poziomu najwyższego rozbieżności osiągają poziom dwukrotnie większy, co może być spowodowane dużymi kątami pionowymi padania wiązki laserowej na monitorowane obiekty.

Rozbieżności między przemieszczeniami pionowymi dla obu metod (skanowanie laserowe i niwelacja precyzyjna) sięgnęły 1 cm, stąd rezultaty tej analizy nie będą prezentowane. Metodyka wyznaczania przemieszczeń pionowych na podstawie wyników naziemnego skanowania laserowego jest obecnie opracowywana w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych, a testowane rozwiązania mają podnieść dokładność wyników pozyskanych tą metodą.

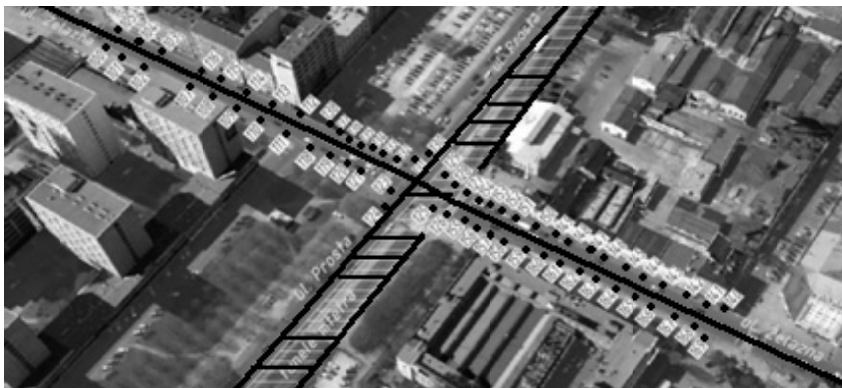
Rozwój niecki osiadania na poligonie doświadczalnym „Żelazna” spowodowanej oddziaływaniem tuneli metra

Drażenie tunelu centralnego odcinka II linii metra rozpoczęto ze stacji C09 Rondo Daszyńskiego w kierunku stacji C10 Rondo ONZ. Poligon doświadczalny zlokalizowano na skrzyżowaniu ulic Prostej i Żelaznej, która jest prostopadła do realizowanego odcinka C9-C10 i przecina go mniej więcej w połowie długości. Powstawanie niecki osiadania sprawdzano poprzez wykonanie niwelacji precyzyjnej wzdłuż ulicy Żelaznej, między punktami zastabilizowanymi w krawężnikach jezdni, co umożliwiło opracowanie dwóch profili poprzecznych tworzącej się niecki osiadania. Zrealizowano trzy pomiary okresowe: w czerwcu, lipcu i we wrześniu 2012 roku. W pobliżu drążonego tunelu gwoździe rozmieszczono co 5 m, a w pozostałej części badanego odcinka ulicy – co 10 m (rys. 6). Większe zagęszczenie punktów w okolicy skrzyżowania ulic Prostej i Żelaznej wynika



Rys. 5. Porównanie przemieszczeń poziomych punktów kontrolowanych na ścianach północnych budynków Ciepla 3 i Pereca 1A uzyskanych metodami klasycznymi (linia ciągła) i za pomocą skaningu laserowego (linia przerywana)

Fig. 5. Comparison of vertical displacements of controlled points on the northern walls Ciepla 3 and Pereca 1A buildings obtained by classical methods (straight line) and with aid of the laser scanning (drop line)



Rys. 6. Szkic rozmieszczenia reperów kontrolowanych wzdłuż ulicy Żelaznej [Waś i in. 2012]

Fig. 6. Sketch of localization of controlled benchmarks along Żelazna street [Waś i in. 2012]

z możliwości powstania na tym obszarze niecki osiadania i konieczności odpowiedniego jej zdyskretyzowania. Pomiaru przemieszczeń pionowych wykonano techniką niwelacji precyzyjnej.

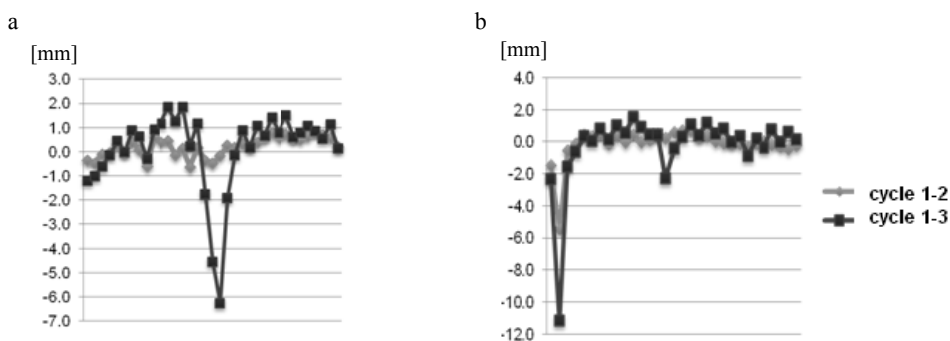
W tabeli 1 przedstawiono pozycje tarcz TBM „Anna” i „Maria” w poszczególnych cyklach pomiarowych, a na rysunku 7 – wykresy przemieszczeń pionowych obu profili obrazujących rozwój niecki osiadania.

Tabela 1. Harmonogram prac pomiarowych [www.budowametra.pl]

Table 1. The measurement schedule [www.budowametra.pl]

Data pomiaru Measurement date	Postęp prac tarcz drążących Progres Tunnel Boring Machine (TBM) Rondo Daszyńskiego → Rondo ONZ	
	TBM 1 „Anna”	TBM 2 „Maria”
23–25.06.2012	120 m	50 m
24–25.07.2012	500 m (sąsiedztwo ul. Żelaznej) (next to Żelazna St.)	200 m
7.09.2012	> 900 m (koniec pracy 31.08) (end of work 31.08)	> 900 m (koniec pracy 3.09) (end of work 3.09)

Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, że punkty znajdujące się nad osią tunelu lub w niedalekiej od niego odległości przemieściły się istotnie, tworząc nieckę osiadania. Zjawisko to jest zgodne z przewidywaniami, ponieważ znając teoretyczny model tworzenia się niecki, spodziewano się jej powstania. Ponieważ profile ulicy Żelaznej zostały odpowiednio zdyskretyzowane, więc otrzymany kształt niecki osiadania jest zbliżony do rzeczywistego. Na rysunku 7 daje się również zauważyć nieznaczne wypiętrzenia w strefie rozciągań po zewnętrznych stronach przebiegu tunelu.



Rys. 7. Przemieszczenia punktów kontrolowanych profili: a – profil zachodni (od strony Ronda ONZ), b – profil wschodni (od strony Ronda Daszyńskiego)

Fig. 7. Displacement of controlled profile points: a – the west profile (site of Rondo ONZ), b – the eastern profile (site of Rondo Daszyńskiego)

PODSUMOWANIE

Obserwowana od wielu lat tendencja tworzenia w pełni zautomatyzowanych systemów monitoringu strukturalnego, działających w czasie rzeczywistym, jest z punktu widzenia kompleksowości informacji pozytywnym objawem. Jednak w wielu przypadkach niemożliwe jest osiągnięcie przez te systemy dokładności otrzymanych klasycznymi metodami realizowanymi w interwałach czasowych. Tendencja tworzenia zintegrowanych systemów monitoringu jest realizacją idei tworzenia interdyscyplinarnych zespołów posiadających komplementarne kompetencje.

Spośród metod będących w kręgu zainteresowania geodezji w ostatnich latach największy rozwój z powodu swojej uniwersalności notuje skaning laserowy. Przytoczone w niniejszym artykule wyniki analizy dokładności przemieszczeń poziomych uzyskanych metodą naziemnego skaningu laserowego pozwalają konkurować tej metodzie z klasycznym pomiarem kątowno-liniowym. Z kolei wydaje się, że jeszcze długo w zakresie wyznaczania przemieszczeń pionowych skaning laserowy nie ma szans dorównać precyzyjnej niwelacji geometrycznej, stanowiącej nadal podstawową i na razie niezastąpioną metodę oceny ryzyka związanego z realizacją inwestycji budowlanych. Na etapie koncepcyjnym prowadzone są w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych prace nad wykorzystaniem czujników inklinometrycznych w systemach monitoringu geodezyjnego.

Przedstawione metody monitoringu geodezyjnego dostarczają danych nie tylko do oceny ryzyka oddziaływań inwestycji, lecz stanowią także cenną informację użyteczną w procesie kalibracji modeli numerycznych tych oddziaływań. Z kolei wyniki obliczeń numerycznych stanowią podstawę do poprawnego i skutecznego prowadzenia monitoringu geodezyjnego. Ta symbioza jest podstawą nowoczesnej, wiarygodnej i bezpiecznej obsługi inwestycji budowlanych oraz badania ich oddziaływania na otoczenie.

Podziękowania

Autorzy referatu dziękują za pomoc w pozyskaniu i opracowaniu danych pracownikom Zakładu Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych (Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska), szczególnie mgr. inż. Arturowi Adamkowi oraz mgr inż. Marii Kołakowskiej, mgr inż. Annie Adamek i mgr. inż. Sławomirowi Łapińskiemu.

PIŚMIENNICTWO

- Bryś H., Przewłocki S., 1998. Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Burland J.B., Baster J., Bell B.C. i in., 2004. Design and construction of deep basement including cut and cover structures. The Institution of Structural Engineers, London.
- Kotlicki W., Wysokiński L., 2002. Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów. Instrukcja ITB nr 376/2002, Warszawa.
- Kuszyk R., Siemińska-Lewandowska A., 2009. Ocena rozwoju niecki osiadań nad tunelem drążonym tarczą zmechanizowaną. *Górnictwo i Geoinżynieria* 3/1, 229–237.

- Popielski P., 2012. Oddziaływanie głębokich posadowień na otoczenie w środowisku zurbanizowanym. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Środowisko 61, OWPW, Warszawa.
- Popielski P., Zaczek-Peplinska J., Pasik M., 2012. Metody izmierzenia dla powierki czysliennych modeli wzaimidiejstwa grunta i sooruzenia. Żiliszczojstroitelstwo 11, 2–7.
- Prószyński W., Woźniak M., 1999. Geodezyjny monitoring przemieszczeń obudowy wykopu i obiektów sąsiadujących. (Doświadczenia z obiektu EUROPLEX w Warszawie). Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Siemińska-Lewandowska A., 2013. Nowe wyzwania przy projektowaniu obiektów II linii metra w Warszawie. XII Seminarium IBDIM – Geotechnika dla inżynierów „Głębokie wykopy 2013”, Warszawa.
- Waś E., Żuralska A., 2012. Badanie tworzenia się niecki osiadania w okresie drażenia tuneli metra. Praca dyplomowa inżynierska. Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Zaczek-Peplinska J., Popielski P., 2012. Utilisation of Geodetic Monitoring for Verification of the Numerical Model of Impact of a Building under Construction on Surrounding Structures. Proceedings of FIG Working Week 2012, Roma.

GEODETIC MONITORING OF OBJECTS IN THE AREA OF IMPACT CONSTRUCTION OF TUNNELS AND DEEP EXCAVATIONS – EXPERIENCES AND CONCLUSIONS

Abstract. The paper presents research sites and results of analysis of behaviour of the ground and structures located within close neighbourhood of several investment units, characterised by diversified impacts, including: deep excavations, mining the underground railway tunnels using tunnel boring machines and construction of buildings. Monitored site is located within inner centre of Warsaw. Performed analysis covers geodetic surveys of displacements and deformations of particular objects, using such techniques, as: precise levelling, precise angular and linear surveys and terrestrial laser scanning. Data obtained by these methods are basis for calibration of numerical models, and vice versa – the results of numerical calculations are basis to determine a method of monitoring the object and determine the expected values of displacements in the different phases of realization of the investment and determine permissible deviations, which are considered as the alarm values.

Key words: geodetic surveys, deep excavation, objects displacements, mining tunnels

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013