



Prof. dr hab. inż. Wojciech WOLSKI
Dr inż. Andrzej FÜRSTENBERG
Dr inż. Paweł SORBJAN, p.sorbjan@mail.geoteko.com.pl
„Geoteko“ – Warszawa

WYKORZYSTANIE POMIARÓW INKLINOMETRYCZNYCH DO OCENY STANU BEZPIECZEŃSTWA BUDOWLI

INCLINOMETER MEASUREMENTS APPLIED IN STRUCTURE SAFETY EVALUATION

Streszczenie Ocena stanu budowli i zapewnienie jej bezpieczeństwa wymaga prowadzenia odpowiednio zaprogramowanego monitoringu. Dla większych obiektów głęboko posadowionych, skarp i zboczy osuwiskowych niejednokrotnie podstawowym kryterium oceny stanu bezpieczeństwa jest wielkość występujących przemieszczeń poziomych. Elementem aparatury kontrolno-pomiarowej umożliwiającym pomiar przemieszczeń poziomych nie tylko na powierzchni konstrukcji, lecz również w częściach niedostępnych dla pomiarów geodezyjnych, są inklinometry. W niniejszym referacie opisano podstawy pomiarów inklinometrycznych, stosowane urządzenia i sposoby ich instalowania oraz podano kilka przykładów zastosowania takich pomiarów. Zamieszczono przykład dotyczący oceny bezpieczeństwa ścian szczelinowych stanowiących obudowę głębokiego ok. 15m wykopu fundamentowego i stanowiących jednocześnie element konstrukcyjny podziemnej części obiektu oraz dwa przykłady pomiarów inklinometrycznych umożliwiających ocenę bezpieczeństwa budynków zlokalizowanych w rejonie skarp ziemnych.

Abstract In order to evaluate safety conditions of a structure a properly designed monitoring procedure is required. The basic safety criterion for larger structures with deep foundation, or located in the area of sliding slopes is often expressed by horizontal displacement value. The horizontal displacements may be measured by means of inclinometers both on the surface of the structure and also in its parts inaccessible for geodetic survey measurements. The paper presents the guidelines of inclinometer measurements, applied equipment and its installation. A number of examples of measurements have also been presented i.e. safety evaluation of diaphragm walls constructed as a support of approximately 15 m deep excavation cut and also as an element of underground part of the structure and 2 examples of inclinometer measurements for safety evaluation of buildings in the vicinity of earth slopes.

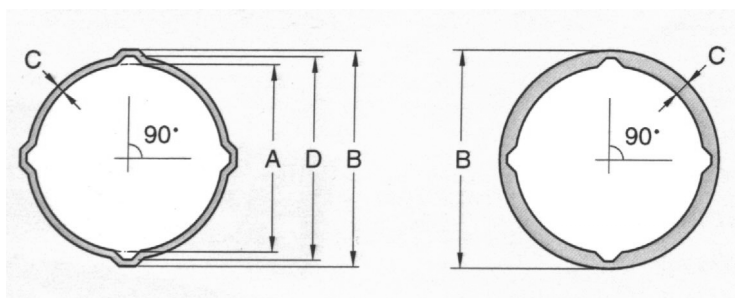
1. Wstęp

Dla zapobieżenia awariom większe obiekty budowlane powinny być odpowiednio monitorowane zarówno podczas budowy, jak i w całym okresie użytkowania. Zakres monitoringu powinien być uzależniony od warunków geotechnicznych w podłożu, wielkości obiektu i głębokości jego posadowienia, konstrukcji obiektu oraz warunków jego realizacji. Dla większości obiektów wykonywanych w typowych warunkach geotechnicznych monitoring obejmuje pomiary przemieszczeń pionowych (repery) i pomiary położenia zwierciadła wody gruntowej (piezometry). Dla obiektów budowlanych w trudniejszych

warunkach np. w bliskim sąsiedztwie istniejących budynków będących często w złym stanie technicznym, jak również dla wysokich budowli ziemnych oraz na zboczach osuwiskowych istotne znaczenie przy ocenie stanu technicznego i ewentualnych zagrożeń ma ustalenie, w okresie budowy i eksploatacji wielkości przemieszczeń poziomych elementów konstrukcji lub przemieszczeń masywów ziemnych. Metody geodezyjne umożliwiają pomiar przemieszczeń poziomych na powierzchni konstrukcji lub gruntu, natomiast inklinometry pozwalają na wyznaczenie przemieszczeń poziomych i odkształceń poniżej powierzchni konstrukcji lub gruntu. Z tego względu pomiary inklinometryczne mogą dla niektórych obiektów stanowić podstawowy element monitoringu. Pomiary inklinometryczne są szczególnie wskazane do monitorowania osuwisk, aczkolwiek doświadczenia autorów wskazują również na ich wysoką przydatność do pomiarów deformacji ścian szczelinowych. W niniejszym referacie opisano stosowane w takich pomiarach urządzenia i sposób ich instalowania oraz przedstawiono kilka przykładów zastosowania inklinometrów dla oceny bezpieczeństwa obiektów.

2. Opis urządzeń pomiarowych i technologia instalacji

Inklinometr jest urządzeniem służącym do pomiaru wychyleń kątowych, co przy znanej długości sondy można łatwo przeliczyć na względne przemieszczenia poziome w gruncie lub w konstrukcjach betonowych. Pomiar wykonywany jest w kolumnie specjalnych rur wykonanych z aluminium lub tworzywa ABS. Rury posiadają rowki rozmieszczone co 90° służące do prowadzenia sondy. Na rys. 1 pokazano dwie odmiany stosowanych rur inklinometrycznych.



Rys. 1 Przekrój typowej rury inklinometrycznej wykonanej z aluminium i z ABS

Sonda typu S200SV produkcji firmy SISGEO wyposażona jest w dwa serwoakcelerometryczne przetworniki wychyleń kątowych, co pozwala na jednoczesny pomiar w dwóch płaszczyznach. Do odczytywania służy rejestrator przenośny C800U wyposażony w 64 K pamięci RAM. Rys. 2 przedstawia zestaw urządzeń do wykonywania pomiarów inklinometrycznych.

Podstawowe dane techniczne urządzenia zestawiono w tabeli 1.

Tablica 1. Dane techniczne sondy S200SV

Zakres pomiarowy	$\pm 30^\circ$
Typ	Sonda dwuosiowa
Nieliniowość i histereza	0,02% zakresu pomiarowego
Powtarzalność	0,01% zakresu pomiarowego
Zakres kompensacji temperaturowej	Od 0°C do $+50^\circ\text{C}$
Materiał	Stal nierdzewna
Średnica	28 mm
Rozstaw rolek prowadzących	500 mm



Rys. 2 Zestaw urządzeń do pomiarów inklinometrycznych – sonda SV200 i rejestrator C800U

Kolumnę rur inklinometrycznych montuje się z odcinków łącząc je specjalnymi złączkami. Łączone powierzchnie boczne smarowane są masą uszczelniającą (silikonem). Każda rura łączona jest ze złączką dwoma nitami zrywalnymi. Połączenie izolowane jest dodatkowo specjalną taśmą samoprzylepną. Dno kolumny rur zabezpieczane jest korkiem przymocowanym nitami i uszczelnionym silikonem.

Jeżeli inklinometr ma zostać umieszczony w konstrukcji betonowej np. w ścianie szczelinowej, to kolumnę rur wprowadza się do gotowego panelu zbrojenia i mocuje się do pręta zbrojeniowego opaskami samozaciskowymi w odstępach co ok. 25 cm. Pręt zbrojenia do którego jest przytwierdzona kolumna rur oraz pręty sąsiednie muszą być mocno połączone ze sobą dla zabezpieczenia kolumny rur przed uszkodzeniem. W trakcie opuszczania panelu zbrojenia do wykopu wypełnionego zawieszoną bentonitową, kolumnę rur wypełnia się sukcesywnie wodą w celu zredukowania wyporu. Wypełnienie wodą należy utrzymywać aż do zakończenia betonowania. Po związaniu betonu woda może zostać usunięta lub pozostać w rurach, bowiem urządzenia pomiarowe (sondy) są wodoszczelne. Górna część kolumny rur inklinometrycznych powinna być zabezpieczona przed uszkodzeniem trwałą obudową.

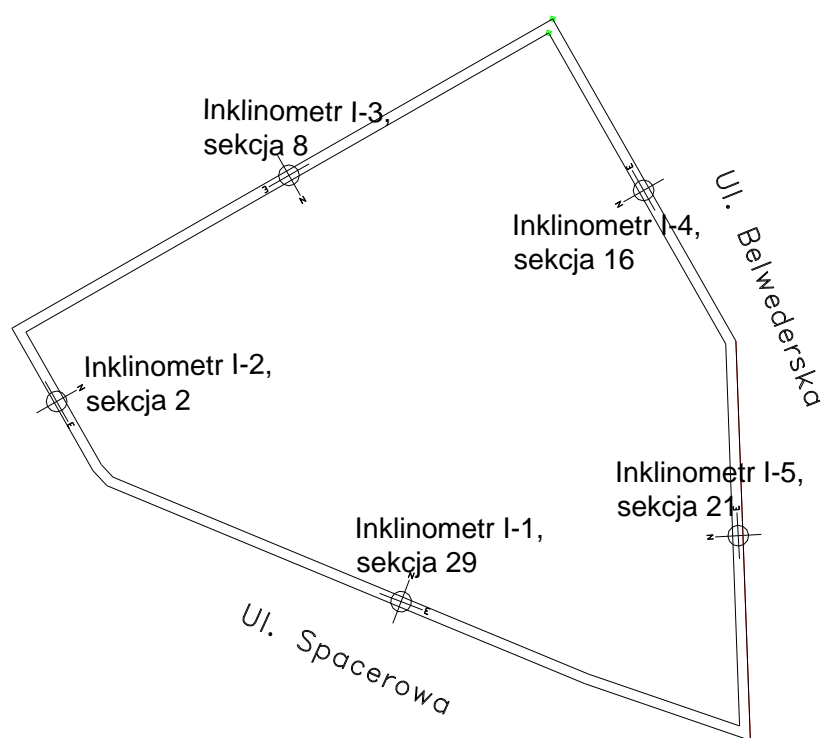
Po zainstalowaniu obudowy wykonuje się pomiar głębokości inklinometru oraz tzw. pomiar zerowy tzn. wyjściowe położenie rur inklinometrycznych w stosunku do pionu. Na ogół pomiary wykonuje się względem dna inklinometru, a odpowiedni program sumuje odchylenia od pionu poszczególnych odcinków rur wyznaczonych na podstawie kąta pomiędzy osią sondy a pionem. Porównanie wyznaczonych w ten sposób odchyżeń w kolejnych pomiarach z pomiarem zerowym umożliwia ustalenie przemieszczeń w poszczególnych poziomach na całej długości inklinometru. Pomiary wykonywane w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach pozwalają wyznaczyć wektory przemieszczeń poziomych. W celu zminimalizowania błędów pomiarowych pomiar wykonuje się dwukrotnie z obroceniem sondy o 180° .

Jeżeli inklinometr instalowany jest w gruncie np. dla monitorowania zsuwu skarpy, to kolumna rur umieszczana jest w otworze wiertniczym o odpowiedniej średnicy i głębokości. Przestrzeń pomiędzy rurą inklinometryczną a rurą wiertniczą wypełniana jest specjalnym zaczynem zapewniającym, po wyciągnięciu rur wiertniczych połączenie pomiędzy rurą inklinometryczną a ścianką otworu. Przy dostatecznie głębokim inklinometrze, którego dno

znajduje się poniżej strefy objętej ruchami (powierzchni poślizgu) wyznaczone przemieszczenia są przemieszczeniami bezwzględnymi.

3. Przykłady zastosowania pomiarów inklinometrycznych do oceny bezpieczeństwa obiektów

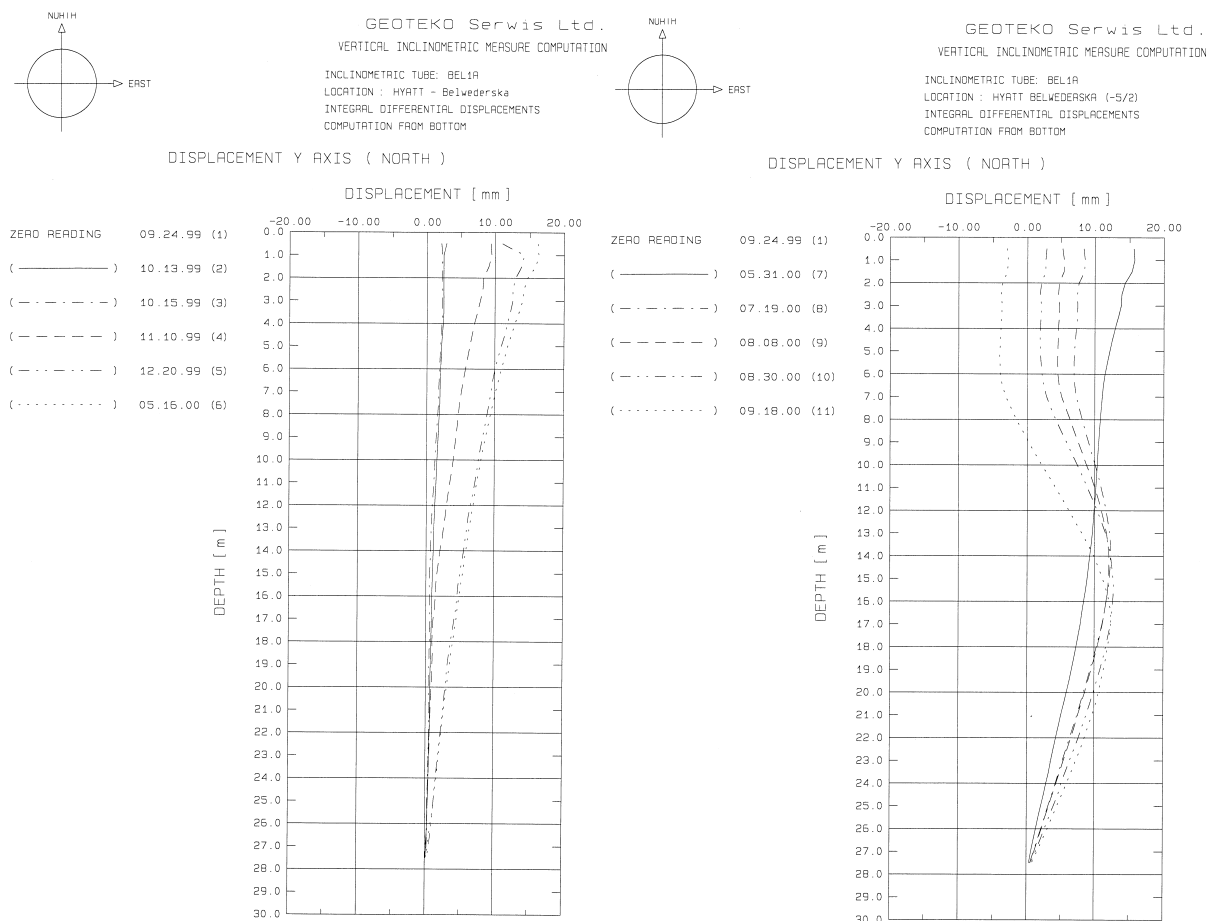
Obiekt hotelowy Hyatt w Warszawie zlokalizowany u zbiegu ulic Belwederskiej i Spacerowej posiada pięć kondygnacji podziemnych i sześć nadziemnych. Poziom posadowienia budynku ok. 15 m p.p.t. natomiast ściany szczelinowe zagłębiono na 29.0 m. Zasadniczą warstwę podłoża stanowią ility plioceńskie zalegające poniżej głębokości ok. 7-9 m, pokryte warstwą piasków rzecznych i antropogenicznych nasypów. Część podziemna budynku była realizowana w obudowie ścianami szczelinowymi przy rozpieraniu ścian kolejnymi stropami w miarę głębienia wykopu. Stropy podparte są słupami opartymi na palach. Trudne warunki geotechniczne, bardzo głębokie posadowienie i skomplikowana konstrukcja obiektu wymusiły zastosowanie już podczas budowy monitoringu znacznie wykraczającego ponad typowy stosowany w budownictwie ogólnym.



Rys. 3 Lokalizacja inklinometrów w ścianach szczelinowych budynku

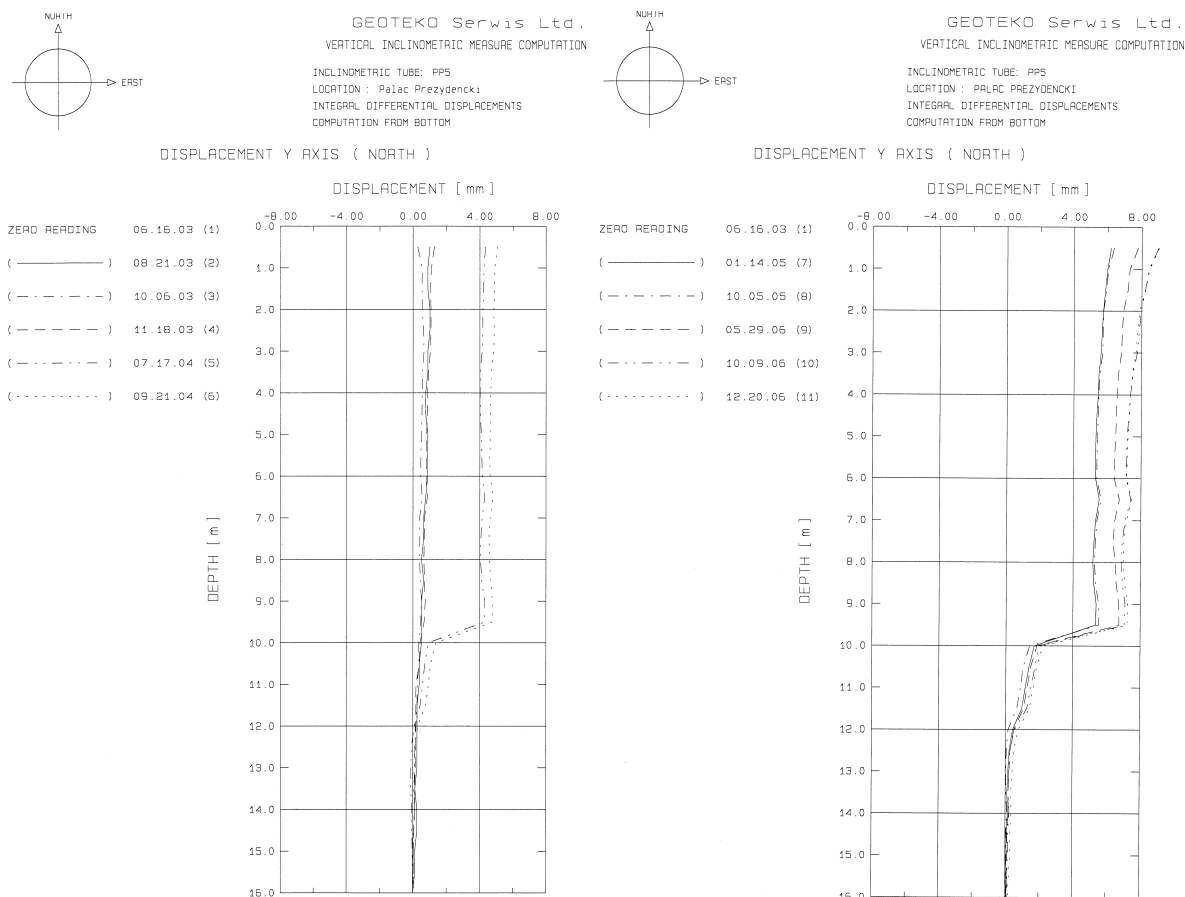
Monitoring obiektu obejmował między innymi pomiary deformacji poziomych ścian szczelinowych (rys. 3) w trakcie głębienia wykopu i odkopywania kondygnacji podziemnych oraz w krótkim okresie po zakończeniu robót fundamentowych. Deformacje ścian szczelinowych mierzone były przy wykorzystaniu pięciu inklinometrów rozmieszczonych w połowie rozpiętości każdej ściany. Na rys. 4 pokazano przemieszczenia w kierunku prostopadłym do powierzchni ściany wykazane przez jeden z inklinometrów [1]. Wielkości pomierzonych przemieszczeń są zbliżone do uzyskanych w analizach numerycznych przeprowadzonych metodą elementów skończonych na podstawie parametrów geotechnicznych wyznaczonych w obszernych badaniach przeprowadzonych dla iłłów z podłoża omawianego obiektu [2] Oprócz wyznaczenia przemieszczeń, obliczenia numeryczne

wykazały, że w żadnym przekroju ścian szczelinowych i ich rozpór siły wewnętrzne nie przekraczały nośności a potwierdzenie wielkości obliczonych przemieszczeń pomiarami inklinometrycznymi świadczy o dobrym stanie podziemnej części obiektu, zapewniającym w pełni jej bezpieczeństwo.



Rys. 4 Wyniki pomiarów inklinometru nr 1

Pałac Prezydencki w Warszawie zlokalizowany jest w pobliżu górnej krawędzi Skarpy Warszawskiej. Ponieważ pomiary przemieszczeń poziomych sieci reperów powierzchniowych w ogrodach położonych na skarpie wykazywały występowanie ruchów poziomych, dla ustalenia głębokiego zasięgu ewentualnych ruchów osuwiskowych zainstalowano między innymi 6 inklinometrów. Dwa inklinometry zlokalizowane w górnej części skarpy nieznacznie poniżej północnej ściany Pałacu wykazały ruchy wyraźnie przekraczające dokładność pomiarów i dodatkowo skoncentrowane na niewielkim odcinku. Taki przebieg wykresu wskazuje jednoznacznie na wystąpienie zlokalizowanej strefy ścięcia. Wykresy przemieszczeń (rys. 5) wykazują ruch w dół skarpy z wyraźnym przemieszczeniem względnym (ścięciem) na głębokości 9,5-10,0 m w inklinometrze I-5 oraz na głębokości 11,0-11,5 m w inklinometrze I-6 [3]. Ścięcia występują w warstwie iłów trzeciorzędowych. Dotychczasowe wielkości przemieszczeń poniżej 10 mm w okresie ponad 3 lat nie wskazują na duże zagrożenie konstrukcji Pałacu, jednakże konieczne jest prowadzenie w dalszym ciągu monitoringu; w przypadku dalszego narastania przemieszczeń może okazać się konieczne odpowiednie wzmocnienie podłoża.

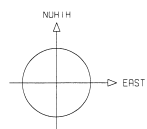


Rys. 5 Wyniki pomiarów inklinometru nr 5

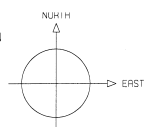
11 piętrowy budynek mieszkalny przy ul. Smoleńskiego 27A, o konstrukcji płytowej zrealizowano na przełomie lat 1960/1970. Budynek położony jest bardzo blisko górnej krawędzi Skarpy Warszawskiej – szczytowa ściana budynku zlokalizowana jest w odległości 4-6 m od górnej krawędzi skarpy. Wysokość skarpy w rejonie budynku dochodzi do ok. 7 m. Podłoże budynku budują słabo zagęszczone piaski; przeważa warstwa o stopniu zagęszczenia $I_D < 0,4$.

Poniżej dolnej krawędzi skarpy przewidziano budowę dwóch podpiwniczonych budynków mieszkalnych. Ze względu na odciążenie podłoża przy wykonywaniu wykopów oraz podcięcie skarpy jak również możliwość zastosowania sprzętu budowlanego wywołującego drgania podłoża, zachodziła obawa wystąpienia niebezpiecznych odkształceń w podłożu istniejącego budynku i zagrożenia jego stateczności.

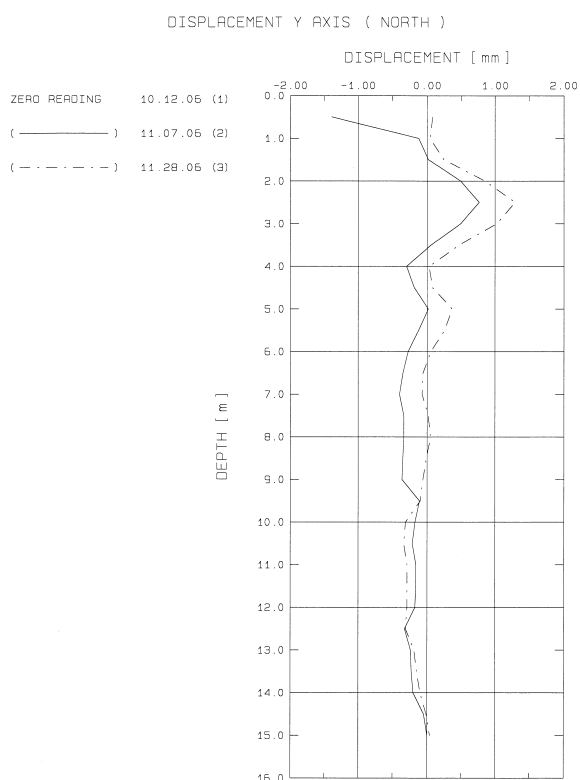
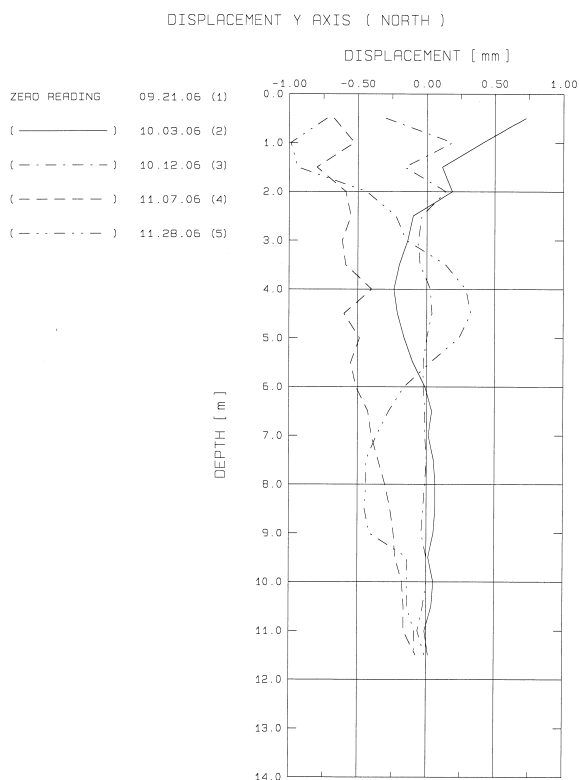
Dla monitorowania ewentualnego wpływu realizowanych robót budowlanych na istniejący budynek, zainstalowano przy górnej krawędzi skarpy 2 inklinometry. Na rys. 6 podano wyniki pomiarów inklinometrów w kierunku osi prostopadłej do krawędzi skarpy, wykonanych w okresie realizacji wykopu i podziemnej części budynku [4]. Mierzone wielkości przemieszczeń poziomych mieszczą się w zakresie dokładności pomiaru, który dla zastosowanych urządzeń pomiarowych wynosi $\pm 1,33$ mm dla inklinometru o długości 10 m. Wyniki pomiarów świadczą zatem o braku ruchów poziomych w podłożu i zagrożenia istniejącego budynku w trakcie wykonywanych robót budowlanych.



GEOTEKO Serwis Ltd.
VERTICAL INCLINOMETRIC MEASURE COMPUTATION
INCLINOMETRIC TUBE: SM-1
LOCATION: SM Skarpa Marymoncka
INTEGRAL DIFFERENTIAL DISPLACEMENTS
COMPUTATION FROM BOTTOM



GEOTEKO Serwis Ltd.
VERTICAL INCLINOMETRIC MEASURE COMPUTATION
INCLINOMETRIC TUBE: SM-2
LOCATION: SM Skarpa Marymoncka
INTEGRAL DIFFERENTIAL DISPLACEMENTS
COMPUTATION FROM BOTTOM



Rys. 6 Wyniki pomiarów inklinometru nr 1 i 2

4. Podsumowanie

Inklinometry umożliwiają pomiar przemieszczeń poziomych konstrukcji lub masywu ziemnego na całej długości zainstalowanej kolumny rur. Dla niektórych obiektów taki pomiar jest podstawowym elementem monitoringu zapewniającego bezpieczną budowę i eksploatację. Zamieszczone przykłady wskazują na celowość instalowania inklinometrów w elementach konstrukcji silnie obciążonych siłami poziomymi takich jak np. ściany szczelinowe, oraz w przypadku budowy zlokalizowanych w pobliżu skarp zagrożonych ruchami osuwiskowymi. Należy zwrócić uwagę, że pomiary inklinometryczne są w ostatnich latach również stosowane w budowłach hydrotechnicznych jak np. wysokie zapory ziemne, w których wielkość przemieszczeń poziomych jest jednym z podstawowych kryteriów oceny stanu technicznego.

Zaletą pomiarów inklinometrycznych jest umożliwienie wczesnego ostrzeżenia o ewentualnych anomaliach, co stanowi sygnał do podjęcia odpowiednich zabiegów zabezpieczających. Inklinometry mogą też stanowić element ciągłego monitorowania obiektów budowlanych lub skarp, co uzyskuje się poprzez zastosowanie stałej sondy (lub lepiej kilku sond) umieszczonej w rurze inklinometrycznej i podłączonej do systemu zbierania danych. Takie rozwiązanie umożliwia łatwe wywoływanie alarmów dla uprzednio zdefiniowanych progów alarmowych.

Literatura

1. Sorbjan P., Skutnik Z., Wolski W. Posadowienie budynku hotelu Hyatt w Warszawie. Monitoring XIII Konferencja Naukowa. Kraków 2001, „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”.
2. Truty A., Urbański A. Posadowienie budynku hotelu Hyatt w Warszawie. Numeryczna weryfikacja przyjętych rozwiązań. XIII Konferencja Naukowa Kraków 2001, „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”.
3. Sprawozdania z okresowych pomiarów inklinometrów zainstalowanych w skarpie ogrodów Pałacu Prezydenckiego w Warszawie. Geoteko Serwis Sp. z o.o. Warszawa 2003-2006.
4. Sprawozdania z pomiaru inklinometru przy budynku Smoleńskiego 27A w Warszawie. Geoteko Serwis Sp. z o.o. Warszawa, listopad 2006.