

JERZY JANUSZ  
WOJCIECH JANUSZ  
MIECZYŚLAW KOŁODZIEJCZYK  
JAN WASILEWSKI

## INKLINOMETR IS DO POMIARU ZMIAN NACHYLEŃ I UGIĘĆ ŚCIAN SZCZELINOWYCH

*ZARYS TREŚCI: Omówiono przyczyny podjęcia prac nad inklinometrem do pomiaru zmian nachyleń i ugięć ścian szczelinowych. Omówiono sposób kalibrowania sensora pochyleń użytego do budowy inklinometru IS, konstrukcję inklinometru i jego rury nośnej, a także sposób posługiwania się inklinometrem.*

### 1. WPROWADZENIE

Podczas monitoringu geodezyjnego przemieszczeń i odkształceń ścian szczelinowych osłaniających istniejące, płytko posadowione budynki przed niekorzystnym wpływem głębokich wykopów wykonywanych w sąsiedztwie okazało się, że przemieszczenia poziome, wysokościowe i zmiany nachylenia ścian szczytowych tych budynków mogą powstawać w fazie poprzedzającej udostępnienie ścian szczelinowych do monitoringu. Wprawdzie bezpośrednio po wykonaniu ściany szczelinowej można na jej górnej powierzchni zastabilizować i obserwować znaki kontrolowane, służące do wyznaczania przemieszczeń poziomych, jednak w tej fazie prac nie jest możliwe wyznaczenie przemieszczeń niższych fragmentów ściany szczelinowej [5]. Obserwowanie przemieszczeń niższych fragmentów ściany szczelinowej staje się możliwe stopniowo, w miarę odsłaniania jej powierzchni bocznej w trakcie głębiania wykopu. Jednak ze względu na toczące się wokół prace ziemne i budowlane, występujące często zalanie dna wykopu lub pokrycie go grząskim błotem, stabilizowanie na tej powierzchni znaków kontrolowanych jest bardzo uciążliwe, co opóźnia przystępowanie do pomiarów.

Z tego powodu, w wyniku konsultacji i zachęty ze strony projektantów podjęliśmy prace nad zbudowaniem inklinometru, umożliwiającego wyznaczanie poziomych przemieszczeń, zmian nachyleń i ugięć ścian szczelinowych przy wykorzystaniu pionowo usytuowanych rur, zastabilizowanych w ścianie szczelinowej. Przy wykorzystaniu takiego przyrządu już w kilka dni po zabetonowaniu ściany możliwe jest wykonanie pomiaru wyjściowego do wyznaczenia poziomych przemieszczeń na określonych poziomach.

Zasada działania inklinometru jest zaadoptowana z techniki pomiarów przemieszczeń głębszych warstw podłoża na terenach osuwiskowych [18], jednak rozwiązanie mechaniczne rur i inklinometru muszą tu być odmienne. Chodzi mianowicie o to, że rury na osuwiskach instalowane są w wykonanych do tego celu otworach wiertniczych, natomiast rury do pomiarów ścian szczelinowych stabilizowane są „na mokro”, tj. instalowane w powiązaniu ze zbrojeniem przygotowanym na stole montażowym na powierzchni, opuszczane dźwigiem wraz ze zbrojeniem do otworu na ścianę szczelinową i zabetonowane.

Przy projektowaniu omawianego inklinometru wprowadzono zmiany konstrukcyjne w stosunku do dotychczas znanych i stosowanych inklinometrów, mające na celu uniknięcie rozpoznanych niektórych wad ich użytkowania, a zwłaszcza wady polegającej na znacznym obniżeniu dokładności wskazań na skutek zanieczyszczenia kanałów prowadzących, wykonanych w dotychczas stosowanych rurach inklinometrycznych.

Przed przystąpieniem do projektowania inklinometru IS przeanalizowano informacje dotyczące produkowanych sensorów zmian pochylenia w celu dokonania wyboru sensora, którego zastosowanie może spełnić wymagania dokładnościowe.

W wyniku tego wstępnego rozpoznania postanowiono wykorzystać sensor pochylenia RG37S amerykańskiej firmy SPECTRON.

## **2. KALIBROWANIE I OCENA DOKŁADNOŚCI SENSORA POCHYLEŃ RG37S FIRMY SPECTRON**

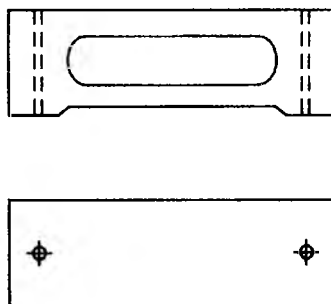
Sensory pochylenia są to czujniki reagujące na zmianę ich pochylenia, podające informację w formie zmiany sygnału wyjściowego, tj. napięcia stałego, liniowo zależnego od kąta pochylenia lub w formie impulsowej.

Sensory pochylenia stosuje się już od czasu drugiej wojny światowej. Służyły wtedy do stabilizacji lotu niemieckich rakiet V2. Po wojnie budowę tych sensorów przejął przemysł amerykański i opracował czujniki bardziej dokładne i pewne w działaniu. Pojawiło się wiele nowych rozwiązań: sensory elektrolityczne, hybrydowe, ceramiczne itd., jedno- i dwuosiowe.

Przedmiotem naszych badań był sensor pochylenia RG37S amerykańskiej firmy SPECTRON i współpracujący z nim przetwornik sygnałów MUPI-3.

Sensor RG37S należy do grupy sensorów elektrolitycznych. Jest przeznaczony do pracy w warunkach statycznych. Dopuszczalna wibracja podłoża podczas pracy - 10 do 500 Hz o natężeniu 2g, dopuszczalny wstrząs 20g w czasie 11ms, gdzie g jest przyspieszeniem siły ciężkości. Zakres temperatur pracy: od -25 do +70 C°. Sensor umieszczony jest w specjalnej obudowie o wymiarach 51x16x16mm (rys. 1), która chroni go przed uszkodzeniami mechanicznymi. Zakres pracy sensora RG37S wynosi 10 gradów. Przetwornik sygnałów MUPI-3 zawiera układ elektroniczny, który ustala warunki pracy sensora elektrolitycznego. Jest zasilany bipolarnym napięciem stałym w zakresie od 11 do 16 V. Sensor pobudzany jest napięciem zmiennym o przebiegu prostokątnym i o częstotliwości 1 KHz. Demodulator na wyjściu układu przekształca sygnał pomiarowy w sygnał napięcia stałego, proporcjonalny do mierzonego kąta pochylenia. Dodatkowo MUPI-3 jest wyposażony w czujnik temperatury montowany przeważnie bezpośrednio na sensorze nachyleń. Sygnał z czujnika temperatury wpływa na zmianę współczynnika wzmocnienia, minimalizując wpływ zmian temperatury na wynik pomiaru. Wpływ ten dzięki zastosowaniu sensora temperatury jest około piętnastokrotnie mniejszy. Istnieje możliwość zmiany nachylenia przebiegu sygnału wyjściowego w funkcji zmian kąta pochylenia sensora. I tak, jeżeli do pomiarów pochylenia nie wykorzystuje się pełnego zakresu pracy sensora RG37S, tj,  $10^8$ , to można ten zakres ograniczyć włączając do układu MUPI-3 dodatkowy rezystor  $R_2$ . Nachylenie sygnału wyjściowego określa się:

$$G = \frac{100 [k\Omega]}{R_2 [k\Omega]} + 1 \quad (1)$$



Rys. 1

Mając sensor nastawiony na zakres  $\pm 5^8$ , można przejść na zakres  $\pm 2,5^8$  lub  $\pm 1^8$ , uzyskując przy zmniejszonym zakresie zwiększoną dokładność. W każdym zakresie maksymalne wartości sygnału wyjściowego wynoszą  $\pm 7$  Volt DC. Wskazania sensora, odpowiadające jego pochyleniu, wyrażone są w woltach. Napięcie to może być zmierzone woltomierzem cyfrowym lub zarejestrowane przez rejestrator polowy.

Według deklaracji producenta zależność pomiędzy zmianami pochylenia, mieszczącymi się w odpowiednim zakresie pomiarowym, a wskazaniami woltomierza jest liniowa. Zależność tę można opisać wzorem:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta V}{k} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta\varepsilon$  - zmiana kąta nachylenia sensora [grad],  
 $\Delta V$  - zmiana odczytu woltomierza [Volt],  
 $k$  - współczynnik kalibracji, którego wartość dla każdego egzemplarza sensora podlega wyznaczeniom na egzaminatorze pochyień.

Wyznaczenie współczynnika kalibracji  $k$  następuje poprzez wpasowanie linii prostej w zbiór punktów o współrzędnych  $(\varepsilon, V)$ , przy spełnieniu warunku  $[v] = \min$ . Dzięki temu, wraz z wyznaczeniem współczynnika kalibracji  $k$ , można obliczyć błąd  $m_o = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}}$ , określający dokładność wskazania pochylenia sensora, wyrażony w voltach, lub  $m_o = \pm \frac{1}{k} \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}}$  w gradach.

Kalibrowanie sensora jest to wyznaczenie wartości współczynnika  $k$  oraz oznaczenie granic zakresu pracy, w którym istnieje liniowa zależność pomiędzy zmianami kąta pochylenia sensora a jego odpowiedzią w formie zmiany napięcia. Badania takie wykonuje się przy użyciu egzaminatora libelli lub innego przyrządu o podobnej zasadzie działania, mającego większy zakres od zakresu działania badanego sensora. Kalibrowanie omawianego sensora przeprowadzono wykorzystując teodolit Wild T2 z układem kompensatora. Sensor przymocowano jednoznacznie do lunety teodolitu w taki sposób, aby oś optyczna teodolitu i oś podłużna sensora były do siebie równoległe. Zmieniając pochylenia lunety o pewne stałe interwały odczytywano odpowiadające im wskazania sensora w voltach.

Położenie środka zakresu sensora odpowiada tylko w przybliżeniu poziomej pozycji jego obudowy. Faktyczny zakres liniowości może się różnić od deklarowanego przez producenta. Z tych powodów proces kalibrowania sensora musi przebiegać dwustopniowo. W pierwszym przybliżeniu wykonuje się kalibrację wstępną. Na podstawie odczytów  $(\varepsilon, V)$  w zakresie dwukrotnie większym od zakresu deklarowanego przez producenta, otaczającym poziomą pozycję podstawy sensora, wyznacza się przybliżoną wartość  $k_o$  współczynnika  $k$  oraz odchyłki  $v$ . W celu wyznaczenia obszaru liniowości, jak również jego środka, należy na podstawie wyników kalibracji wstępnej utworzyć wykres zależności  $\varepsilon$  od  $V$ , który przy obu skrajach nie będzie prostoliniowy. Na tym wykresie należy ustalić skrajne wartości kątów

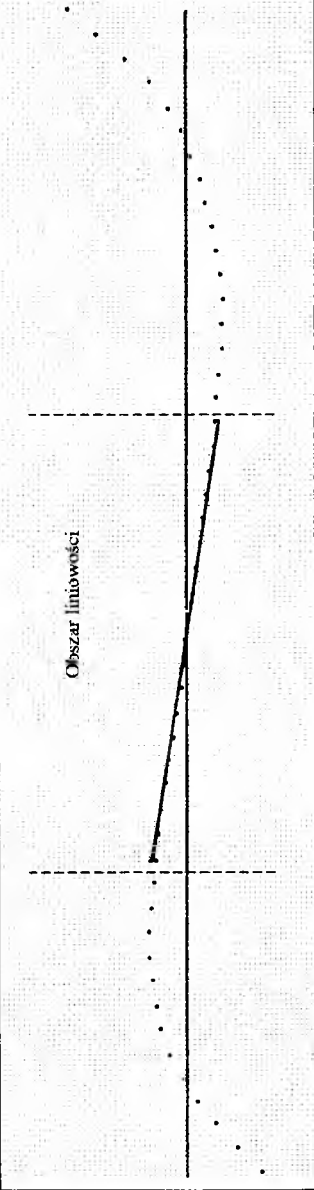
$\varepsilon_p$  i  $\varepsilon_k$ , ograniczające w widoczny sposób obszar prostoliniowości. Można oczekiwać, że ich różnica powinna być zbliżona do deklarowanej przez firmę szerokości wybranego zakresu. W drugim przybliżeniu, na podstawie wpasowania linii prostej w zbiór punktów o współrzędnych  $(\varepsilon, V)$ , zaobserwowanych w obszarze od  $\varepsilon_p$  do  $\varepsilon_k$ , należy obliczyć wartość współczynnika kalibracji  $k$  oraz błąd  $m_o$ .

W tabeli 1 podano przykładowo zaobserwowane wartości  $(\varepsilon, V)$  przy zmianach pochylenia sensora nr 1 w zakresie około 2 razy większym od deklarowanego przez producenta zakresu pomiarowego (kol. 1,2). W kolumnie 3 podano poprawki wyrównawcze kalibrowania wstępnego dokonanego na podstawie pełnego zakresu  $(\varepsilon, V)$ , zaś w kolumnie 4 wykres tych poprawek, który pokazał, że liniowość jest zachowana tylko w zakresie  $303,5^s \leq \varepsilon \leq 294,5^s$ , tj. w zakresie mniejszym niż podany przez producenta. Błąd typowego spostrzeżenia, charakteryzujący dokładność wskazań sensora w zakresie  $303,5^s \div 294,5^s$ , równy  $m_o = 0,049 \frac{mV}{m} = 31^{\circ}$ , okazał się 50-krotnie mniejszy aniżeli błąd  $m_o = 2,43 \frac{mV}{m} = 1548^{\circ}$  z wyrównania wstępnego, obarczonego wpływem braku liniowości.

Przy wykorzystaniu skalibrowanego egzemplarza sensora w pomiarach pochylenia, lub przy montażu w inklinometrze, należy go ustawić na monitorowanym obiekcie lub zamontować w urządzeniu tak, aby jego początkowemu ustawieniu na obiekcie lub w pionowo ustawionym korpusie inklinometru odpowiadała pozycja na środku stwierdzonego zakresu pomiarowego sensora, tj. w przypadku sensora według tabeli 1 kąt  $\varepsilon = 299,0^s$ , któremu odpowiada odczyt  $V = -0,58130V$ , wówczas bowiem możliwe jest dokonywanie pomiaru zmian nachylenia w zakresie  $\Delta\varepsilon = \pm 4,5^s$ .

W przypadku, gdy oczekiwane zmiany nachylenia mają określony kierunek, należy zamontować sensor w takim początkowym położeniu, by istniała możliwość jednokierunkowego zwiększenia zakresu, z równoczesną jednak możliwością pomiaru niewielkich zmian ze znakiem przeciwnym. Jeśli więc np. przewiduje się odchylenia ze znakiem  $+$ , to dobrze jest ustawić sensor w początkowym położeniu  $\varepsilon = 295,5^s$ , tj.  $V = -2,67340V$ , aby mierzyć zmiany w zakresie od  $-1^s$  do  $+8^s$ .

Tabela 1. Zakres deklarowany przez producenta 10<sup>s</sup>

Pochylenie lunety $\mathcal{E}$	Odczyt woltomierza V	Poprawka $v$	Wykres poprawek	Poprawka $v$
1	2	3	4	5
312	7,76800	-0,306		
311,5	7,37240	-0,220		
311	6,98620	-0,143		
310,5	6,61520	-0,081		
310	6,25490	-0,030		
309,5	5,91150	0,005		
309	5,57260	0,034		
308,5	5,23940	0,058		
308,	4,91320	0,075		
307,5	4,59510	0,084		
307	4,27710	0,093		
306,5	3,96000	0,101		
306	3,64860	0,103		
305,5	3,34000	0,103		
305	3,03010	0,104		
304,5	2,72480	0,100		
304	2,41980	0,096		
303,5	2,11730	0,089		
303	1,81410	0,083		
302,5	1,51726	0,071		
302	1,21530	0,063		
301,5	0,91370	0,056		
301	0,61404	0,046		
300,5	0,31701	0,034		
300	0,01699	0,025		
299,5	-0,27908	0,012		
299	-0,58130	0,005		
298,5	-0,88130	-0,004		
298	-1,17840	-0,016		
297,5	-1,47791	-0,026		
297	-1,77570	-0,037		
296,5	-2,07670	-0,045		
296	-2,37390	-0,057		
295,5	-2,67340	-0,067		
295	-2,97470	-0,075		
294,5	-3,27530	-0,083		
294	-3,57910	-0,089		
293,5	-3,88450	-0,093		
293	-4,18970	-0,097		
292,5	-4,49890	-0,097		
292	-4,81710	-0,087		
291,5	-5,13250	-0,081		
291	-5,45340	-0,070		
290,5	-5,78450	-0,048		
290	-6,12570	-0,016		
289,5	-6,47330	0,023		
289	-6,83470	0,075		
288,5	-7,20120	0,132		
288	-7,57190	0,194		
$m_o =$		$0.0957V = 2.43 \left[ \frac{mm}{m} \right] = 1548^{cc}$	$0.00186V = 0.049 \left[ \frac{mm}{m} \right] = 31^{cc}$	
		$k_o = 0.6183$	$k = 0.5986$	

W tabeli 2 podano zestawienie wyników kalibracji dwóch sensorów w trzech zakresach deklarowanych przez producenta. Widoczne jest, że wartości współczynników kalibracji  $k$  sensorów w określonych zakresach są zróżnicowane, co potwierdza słuszność zalecanego przez producenta ich zindywidualizowanego wyznaczenia. Okazuje się też, że zakres stwierdzonej liniowości może się różnić od zakresu deklarowanego. Widoczne jest, że dokładności egzemplarzy sensorów w poszczególnych zakresach mogą się nieco różnić. Błędy wskazań są mniejsze przy zakresie mniejszym.

Tabela 2

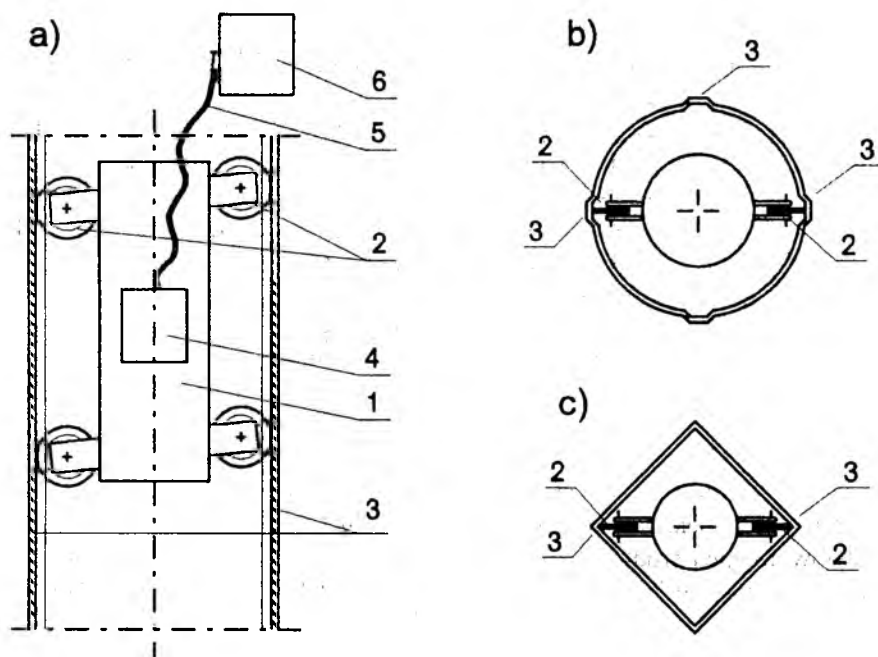
Sensor nr	Zakres deklarowany ZD	Zakres stwierdzony ZS		$k$	Odczyt na środku zakresu	$m_o$		$\frac{m_o}{ZD}$
		[grad]	$[\frac{mm}{m}]$			$[\frac{mm}{m}]$	[cc]	
1	$\pm 1,0$	$\pm 0,7$	$\pm 11$	5,4259	1,79	0,027	17	1,7
2		$\pm 1,0$	$\pm 15$	5,8751	-0,55	0,018	12	1,2
1	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	$\pm 55$	1,1808	-0,56	0,042	27	1,1
2		$\pm 1,8$	$\pm 28$	1,2109	0,82	0,041	26	1,0
1	$\pm 5,0$	$\pm 4,5$	$\pm 70$	0,5986	-0,58	0,049	31	0,6
2		$\pm 3,0$	$\pm 47$	0,6368	0,91	0,059	38	0,8

Informacją szczególnie istotną, wynikającą z kalibrowania każdego egzemplarza sensora, jest zindywidualizowana wartość odczytu woltomierza, odpowiadająca środkowi zakresu liniowości. Skalibrowany sensor może być użyty wprost do badań zmian nachylenia obiektu w miejscu przytwierdzenia go, bądź też może być użyty jako podstawowy element przyrządu służącego do pomiaru zmian nachyleń, np. inklinometru lub pochyłomierza nasadkowego.

## 2. INKLINOMETR IS KONSTRUKCJI IGIK

Do pomiaru poziomych przemieszczeń głębszych warstw podłoża, np. na osuwiskach, stosowane są inklinometry w formie sond opuszczanych na linie do wnętrza rur osadzonych w otworach wywierconych w podłożu. Sonda (1) na rysunku 2a, porusza się po specjalnych kanałach wykonanych w wewnętrznej powierzchni rury (3) o przekroju kołowym – rysunek 2b, lub rury o przekroju kwadratowym – rysunek 2c, przy wykorzystaniu dwóch par

kółek (2). Korpus sondy wyposażony jest w sensor nachyleń (4) połączony kablem (5) ze stacją pomiarowo-odczytową (6) na powierzchni terenu. Zasada pracy sondy polega na tym, że opuszcza się ją do rury kolejno na głębokości różniące się o odległość pionową między kółkami i na każdym z poziomów mierzy się jej odchylenie od pionu. Aby uniknąć błędów wynikających z ewentualnych zmian kształtu sondy, każdy pomiar wykonuje się w dwóch przeciwstawnych jej położeniach w rurze, tj. rewersyjnie. Zmiany nachylenia rury wynikające z przemieszczeń poziomych wyznacza się jako różnice wyników kolejnych pomiarów na tych samych poziomach rury. Sumując zmiany nachylenia wyznaczone na kolejnych poziomach, jesteśmy w stanie tworzyć wykresy ugięć rury, wynikające ze zróżnicowanych przemieszczeń poziomych.



Rys. 2

Sondy produkowane przez znane firmy, np. Grotzl Baumesstechnik, SIS GEO [12], mają z reguły długość 0,5 m, a ich rury są wyposażone w prowadnice w formie kanałów wykonanych w wewnętrznej powierzchni rury – rysunek 2b. Stosuje się też rury o przekroju kwadratowym – rysunek 2c. Według danych fabrycznych, sondy te wyposażone są w sensory serwo-accelerometryczne umożliwiające wyznaczenie zmian nachylenia z błędem



0,05mm/0,5m. Jednak podstawowym warunkiem osiągnięcia tej dokładności jest brak zanieczyszczeń kanałów prowadzących wykonanych w rurze.

Według prospektu firmy SIS GEO, przy dokładności 0,05mm/0,5m pomiaru nachylenia inklinometru, błąd całkowity poziomego przemieszczenia wierzchołka rury o długości 30m w stosunku do jej dolnego końca wynosi 4mm. Oznacza to, że firma oszacowała błąd sumy przemieszczeń cząstkowych, odpowiadających odcinkom o długości 0,5m, jako sumę błędów zwiększoną o 1mm, nie stosując przyjętej zasady, że błąd sumy składników nie obciążonych wpływami systematycznymi jest równy pierwiastkowi z sumy kwadratów błędów cząstkowych. Świadczy to, że przewidywano występowanie systematycznego wpływu, być może wynikającego np. z zanieczyszczeń rury.

Wyniki badania w warunkach terenowych mogą świadczyć o tym, że błąd systematyczny przyjmuje duże wartości, wpływając dodatkowo na dużą zmienność „miejsca zera przyrządu” [18]. Skłania to do skrupulatnego rozważenia wpływu czynników zakłócających wyniki pomiarów i do podjęcia prób ich ograniczenia lub wyeliminowania.

Możliwość wyznaczenia zmian nachyleń metodą inklinometryczną nie ogranicza się do badania przemieszczeń głębszych warstw podłoża gruntowego, ale dotyczy również głęboko posadowionych fundamentów różnych obiektów, np. korpusów żelbetowych zapór wodnych, murów oporowych, ścian szczelinowych. Ugięcia ścian szczelinowych mogą być szczególnie efektywnie badane przy użyciu inklinometru w fazie ich odsłaniania i kotwienia. W IGiK opracowano inklinometr przystosowany do tych celów. W fazie opracowywania tego inklinometru rozważono możliwe sposoby ograniczenia wpływu zanieczyszczeń wewnętrznej powierzchni rury i elementów prowadzących.

Postanowiono w rezultacie:

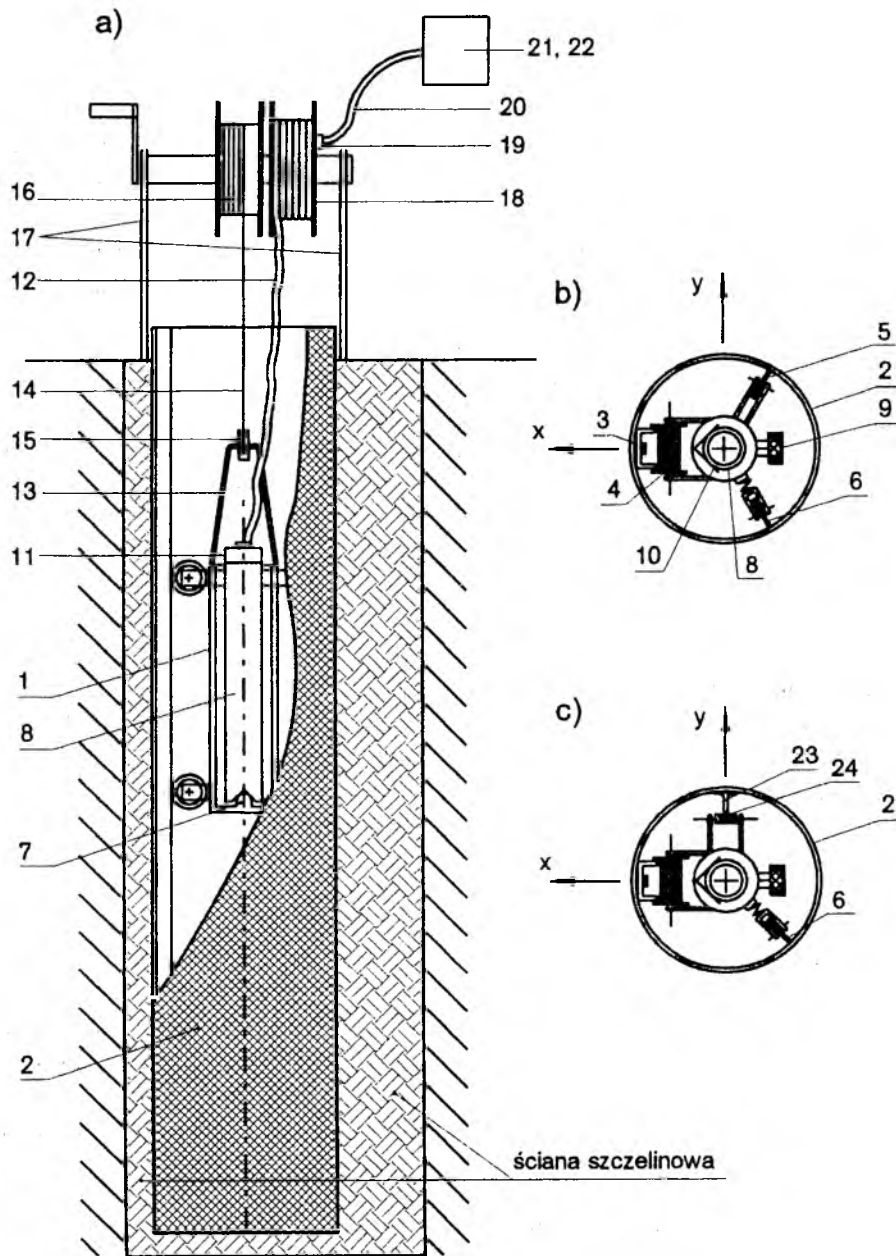
- opracować inklinometr trzykrotnie dłuższy od dotychczas stosowanych, aby ograniczyć liczbę odcinków składających się na cały profil ugięcia rury i zmniejszyć błąd jednostkowy odchylenia przyrządu od pionu z powodu zanieczyszczeń przewodnic w rurze;
- zastosować elementy prowadzące w formie mniej narażonej na zanieczyszczenia i łatwiejszej do czyszczenia niż kanały w wewnętrznej powierzchni rury;
- zastosować specjalny wycior, służący do oczyszczania rury przed pomiarem.

Inklinometr ten, pokazany schematycznie na rysunku 3a, składa się z korpusu (1), do którego przytwierdzone są przy dolnym i górnym końcu dwa zespoły jezdne służące do przemieszczania go w zastabilizowanej rurze. Zespoły te wykonane są w dwóch wersjach: dostosowanej do pomiaru jednej składowej  $\varepsilon_x$  nachylenia (rys. 3b) i do wyznaczenia dwóch składowych

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$  wzajemnie prostopadłych (rys. 3c). Wersja według rysunku 3b jest przeznaczona do badania zmian nachylenia i ugięć ścian szczelinowych, które z założenia następują na kierunku prostopadłym do ściany, tj. wzdłuż osi  $x$ . Zgodnie z rysunkiem 3b, rura (2), w której umieszcza się sondę, zaopatrzona jest w prowadnicę w formie ceownika aluminiowego (3), zaś zespół jezdny sondy wykonany jest w formie kółka (4) toczącego się po jednej grani ceownika, kółka (5) na stałej osi oraz kółka (6) na osi przemieszczanej wzdłuż promienia rury, zaopatrzonego w sprężynę odpierającą od osi rury. Kółka (5) i (6) toczące się po wewnętrznej powierzchni rury mają zadanie wywoływać stały silny docisk powierzchni toczonej kółka (4) do grani ceownika (3). Kółko (4) jest zaopatrzone w dwa pierścienie prowadzące, które obejmują ceownik (3), dzięki czemu wózek może się obracać wokół osi rury (2) tylko w granicach luzu między ceownikiem a powierzchniami wewnętrznymi tych pierścieni.

Takie rozwiązanie zespołów jezdnych wydaje się korzystniejsze, niż kółka toczące się w kanałach wykonanych w rurze (por. rys. 2), bowiem grań ceownika, po której toczy się powierzchnia walcowa kółka (4) jest łatwiejsza do oczyszczenia niż kanały w rurze, a ponadto zanieczyszczenia typu „drobiny piachu” są z niej na ogół strącane lub wyciskane na boki pod wpływem nacisku toczonego się kółka (4).

W dolnej części korpusu (1) znajduje się reper (7), na którym ustawiony jest walcowy trzpień (8) dociskany przy górnym końcu korpusu śrubą (9) do dwóch płytek (10), możliwy do obracania wokół osi pionowej i unieruchamiania co  $90^\circ$ . Na trzpieniu przytwierdzony jest sensor zmian nachylenia RG 37S (11). Do sensora (11) doprowadzony jest z powierzchni ziemi ekranowany, wielożyłowy, niskonapięciowy kabel transmisyjno-zasilający (12). Korpus (1) zaopatrzone jest w jarzmo (13). Do przemieszczania sondy w rurze służy linka stalowa (14) zakończona karabińczykiem (15), który zakłada się na jarzmo (13). Linka ta umocowana jest na bloczku (16), który ustawia się na górnej powierzchni ściany szczelinowej, korzystając ze stojaka (17). Druga, równoległa część bloczka (18) służy do nawijania kabla (12). Ponieważ kabel nie może podlegać naciąganiu, obie części bloczka połączone z kołowrotkiem są jednak rozłączne, co umożliwia luzowanie kabla. Do bloczka przytwierdzone jest gniazdo (19) kończące kabel (12). Krótki kabel (20) podłączony do gniazda (19) transmituje do przetwornika (21) i woltomierza (22) sygnały pojawiające się w tym gnieździe. Przetwornik (21) zasilany jest z akumulatora lub prostownika prądu sieciowego. Zgodnie z rysunkiem 3c, do rury (2) przytwierdzony jest dodatkowo teownik (23), zaś zamiast kółka (5) według rysunku 3b zastosowane jest kółko (24), a kółko (6) znajduje się na kierunku dwusiecznym w stosunku do osi  $xy$ .



Rys. 3

### 2.1. Montaż rury w ścianie szczelinowej

Rura (2) na rysunku 3, z PCV, o średnicy wewnętrznej  $\Phi = 150\text{mm}$  wykonana jest z odcinków o długości 1,5m i łączona kołnierzami wykonanymi z półmetrowych odcinków tej samej rury, rozciętych wzdłuż tworzącej. Przed nałożeniem kołnierza należy dwa odcinki rury zestawić na styk tak, aby odcinki ceownika (3), licowały się - przy użyciu wmontowanych w ceownik wkładek łącznikowych, a następnie odcinki rur otaczające styk pokryć warstwą kleju silikonowego. Po nasunięciu rozprężonego kołnierza, zaciśnięciu i przyklejeniu go, należy miejsca łączenia dokładnie pokryć warstwą uszczelniającą. Po połączeniu odcinków rur w kolumnę o długości większej o 30 cm od wysokości ściany szczelinowej należy ją wsunąć w wykonane zbrojenie przyszłej ściany i przywiązać tak, aby przekrój rury przechodzący przez oś ceownika był prostopadły do powierzchni przyszłej ściany szczelinowej. Dolny koniec rury należy przedtem zaślepić, przyklejając denko i pokrywając je warstwą uszczelniającą, zaś wierzchołek rury zamknąć kołpakiem z uszczelką gumową (rys 4).

Do wykopanego otworu na ściankę szczelinową opuszcza się dźwigiem zbrojenie z przywiązaną kolumną rur i zabetonowuje, dbając o to, aby kołpak dobrze chronił wnętrze rury przed zalaniem i zanieczyszczeniem. Na rysunku 4a pokazano kolumnę rur przytwierdzoną do zbrojenia leżącego na stanowisku montażowym, a na rysunku 4b pokazano górną część rury wystającą ponad górną powierzchnię wykonanej ściany szczelinowej i leżący obok kołpak.

Należy podkreślić, że zastosowanie rury z PCV jest możliwe w przypadku ścian o niedużej wysokości, rzędu 5m. Wynika to z faktu, że zbrojenie wraz z przytwierdzoną do niego rurą jest opuszczane do przygotowanego na ścianę wykopu wypełnionego bentonitem, tj. środkiem rozpierającym w stanie płynnym, mającym ciężar właściwy  $1,03\text{G/cm}^3$ . Przy wzroście wysokości słupa tego płynnego środka ciśnienie zewnętrzne działające na powierzchnię rury wzrasta, grożąc jej zgnieciem. Pewnym środkiem zabezpieczającym rurę z PCV przed zgnieciem przez bentonit mogłoby być stopniowe napełnianie jej wodą w miarę opuszczania zbrojenia. Okazuje się jednak, że nie jest to skuteczne, bowiem w kolejnej fazie prac, tj. przy betonowaniu ściany, może nastąpić zgniecenie rury z PCV przez słup nie związanej jeszcze masy betonu o ciężarze właściwym większym niż ciężar właściwy bentonitu i wody.

Z tych powodów, przy większych wysokościach ściany szczelinowej i długościach rury prowadzącej inklinometr, trzeba posłużyć się rurą stalową zamiast rury z PCV lub też zastosować rurę osłonową z hermetycznym dnem, do której należy wstawić rurę z PCV i przyprzeć do wewnętrznej powierzchni rury osłonowej za pomocą kołków dystansowych. Przestrzeń między stalową



*Rys. 4a*





*Rys. 4b*





rurą osłonową a umieszczoną wewnątrz rurą z PCV należy wówczas zabezpieczyć przed dostępem wody, aby uniknąć pęknięcia rury z PCV w okresie mrozów, pod wpływem jej zamarzania. Sposób taki zastosowano z powodzeniem przy montażu rur inklinometru na jednej z budów w Warszawie.

## 2.2. Posługiwanie się inklinometrem

Inklinometr ustawia się w rurze kolejno na poziomach różniących się wysokością od poprzedniego o 1,5m, tj. o różnicę rozstawu zespołów jezdnych inklinometru. W tym celu konieczne jest wykonanie co 1,5m oznaczeń na lince, co można zrobić przez oklejenie jej wąskimi paskami taśmy hydraulicznej. Miejsca te należy oznaczyć tak, aby inklinometr był ustawiany kółkami w miejscach przytwierdzenia ceownika do rury, odległych od górnego krańca każdego odcinka o 10cm. Aby wykonać pomiar w I położeniu sensora należy obrócić trzpień (8) do pozycji, przy której sensor jest równoległy do osi x, a następnie opuszczać inklinometr co 1,5m, aż do najniższego poziomu, wykonując na każdym z tych poziomów odczyty woltomierza. Po wyciągnięciu inklinometru na najwyższy poziom należy zwolnić nakrętkę (9), obrócić trzpień (8) o 180° - do położenia II, i dokręcić nakrętkę, a następnie wykonać odczyty woltomierza przy inklinometrze opuszczanym do rury na te same poziomy. Opuszczanie inklinometru na wymagane poziomy wykonuje się przez zgrywanie wskaźników naklejonych na lince z listewką ułożoną poziomo na górnej krawędzi rury.

W tabeli 3 pokazano przykład zapisu odczytów i obliczenia poziomych przemieszczeń (zmian nachylenia). Pomiary wykonano przy użyciu sensora nr 1 ustawionego na zakres  $\pm 3,5^s$ , dla którego  $k = 1,1808$  (por. tab. 2)

Tabela 3

Poziom	Pomiar pierwszy				Pomiar ponowny				Zmiany		
	odczyty V		$\frac{V_I - V_{II}}{2}$	$\frac{V_I + V_{II}}{2}$	odczyty V		$\frac{V_I - V_{II}}{2}$	$\frac{V_I + V_{II}}{2}$	$\Delta V$ [Volt]	$\Delta P$ [mm]	$\frac{\Delta P}{l}$ [ $\frac{mm}{m}$ ]
	I poł.	II poł.			I poł.	II poł.					
	1	2	3	4	1a	2a	3a	4a	5	6	7
1	-0,650	0,060	-0,355	-0,295	-0,653	0,068	-0,360	-0,292	-0,005	-0,10	-0,067
2	0,482	-1,086	0,784	-0,302	0,487	-1,093	0,790	-0,303	0,006	0,12	0,080
3	0,822	-1,444	1,133	-0,311	0,807	-1,442	1,124	-0,318	-0,009	-0,18	-0,120

W kolumnie 1 zawarto wyrażone w woltach odczyty w *I* położeniu inklinometru na poziomach 1,2,3 (poziom 1 jest najwyższy), zaś w kolumnie 2 odczyty w *II* położeniu. W kolumnach 1a, 2a zawarte są ponowne odczyty wykonane przy drugim pomiarze. W kolumnie 5 zawarte są różnice wartości wykazanych w kolumnach 3a i 3, wyrażające w woltach zmianę nachylenia między stanem przy pomiarze ponownym a stanem przy pomiarze pierwszym. W kolumnie 6 zawarto przemieszczenia poziome  $\Delta P$  górnego krańca inklinometru względem dolnego krańca, wyrażone w milimetrach, obliczane z wzoru

$$\Delta P = \frac{\Delta V \cdot l}{k \cdot \rho^g} = \frac{\Delta V \cdot 1500}{1,1808 \cdot 63,6620} = 19,95 \cdot \Delta V [\text{mm}]$$

gdzie: *l* – długość inklinometru.

W kolumnie 7 zawarto zmiany nachylenia wyrażone w [mm/m]

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{\Delta V \cdot 1000}{k \cdot \rho^g} = 13,3 \cdot \Delta V [\text{mm} / \text{m}]$$

Zestawione w kolumnach 4 i 4a wartości  $\frac{V_1 + V_2}{2}$  mają znaczenie kontrolne i służą do ustalenia, czy „miejsce zera” przyrządu nie ulega nadmiernym zmianom, co mogłyby świadczyć o jego uszkodzeniu.

## LITERATURA

1. Ajdukiewicz A. [1996]: *Kotwy sprężone jako tymczasowe wzmocnienia budynków i podłóży w przejściowych stanach obciążenia*. Inżynieria i Budownictwo nr 4
2. Dąbrowski T. [1998]: *Monitorowanie przemieszczeń skarpy Płockiej*. Konf. n-t „Przemieszczenia skarpy Płockiej”, Płock 22.05.1998
3. Donten K., Sadowski A. [1998]: *Analiza pracy ścian szczelinowych w świetle Polskich Norm*. Konferencja naukowo-techniczna Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998
4. Janusz J. [1999]: *Wyznaczanie parametrów krzywizn ugięcia fundamentów*. Prace Instytutu Geodezji i Kartografii z. 98
5. Janusz J., Janusz W. [1998]: *Problemy geodezyjnej kontroli bezpieczeństwa budynków znajdujących się w strefie wpływu głębokich wykopów*. Prace IGiK, t. XLV, z. 96

6. Janusz W. [1974]: *Geometryczna interpretacja wyników pomiarów przemieszczeń i osiadań budynków*. Materiały szkoleniowe – Geoprojekt '74
7. Janusz W. [1981]: *Obsługa geodezyjna zabezpieczenia ścian głębokich wykopów*. Przegląd Geodezyjny nr 9-10
8. Lazzarini T. i in. [1977]: *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. Warszawa: PPWK
9. Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K. [1998]: *O wpływie wykonywania wykopów głębokich na zabudowę sąsiednią*. Inżynieria i Budownictwo nr 1
10. Michalak H., Pęski S., Pyrak S., Szulborski K. [1998]: *O diagnostyce zabudowy usytuowanej w sąsiedztwie wykopów głębokich*. Inżynieria i Budownictwo nr 6
11. Polska Norma PN-81/B-03020 “*Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statystyczne i projektowanie*”
12. Prospekt firmy SISGEO. Mediolan 1997
13. Prószyński W., Woźniak M. [1998]: *Geodezyjny monitoring przemieszczeń obudowy wykopu i obiektów sąsiadujących*. Doświadczenia z obiektu EUROPLEX w Warszawie. Konf. naukowo-techniczna Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998
14. Sobolewskij J. A. i zespół [1995]: *Obudowa wykopu stacji metra w Mińsku*. Inżynieria i Budownictwo nr 11
15. Szulborski K. [1998]: *Konstrukcyjne i realizacyjne przyczyny katastrofy obudowy wykopu budynku EUROPLEX w Warszawie*. Konf. naukowo-techniczna Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998
16. The Magazine of Leica Geosystems. Reporter 39 (biuletyn firmy)
17. Wierzbicki S., Kłosiński B., Juszcak J. [1992]: *Zastosowanie ścian szczelinowych do obudowy wykonanej w sąsiedztwie obiektu istniejącego*. Inżynieria i Budownictwo nr 6
18. Wolski B. [1996]: *Inklinometryczna metoda pomiaru przemieszczeń poziomych podłoża gruntowego w świetle badań polowych i doświadczalnych*. Przegląd Geodezyjny nr 5
19. Wysokiński L. [1998]: *Geotechniczne przyczyny katastrofy obudowy wykopu przy ulicy Chocimskiej w Warszawie*. Konferencja naukowo-techniczna Urzędu Wojewódzkiego w Warszawie, 30.09.1998

Recenzował: prof. dr hab. inż. Adam Żurowski

*JERZY JANUSZ  
WOJCIECH JANUSZ  
MIECZYŚLAW KOŁODZIEJCZYK  
JAN WASILEWSKI*

## IS INCLINOMETER FOR MEASURING CHANGES OF INCLINATION AND DEFLECTION OF SLIT WALLS

### S u m m a r y

Modern buildings with several underground storeys - parking lots are built with the use of so-called slit walls. Deflections and changes of inclination of these walls are monitored during digging by geodetic methods. Monitoring process is needed for evaluating safety of constructing works, as well as for estimating safety of buildings and underground infrastructure in the surroundings.

It was found, that monitoring with the use of traditional methods is difficult, due to obscured visibility and due to damages of fixed reference points. Therefore, inclinometer hauled down to the pipes, which are stabilized vertically in the slit wall, was elaborated. Using this inclinometer, profiles of deflection and changes of inclination of slit wall are measured. These measurements are done in reference to the bottom of pipe, which is fixed at the base of wall, 10 - 25 meters below ground level. IS inclinometer enables to determine horizontal displacements of top of the wall in relation to its base with the error of 0.3 - 0.5 mm.

Method of calibration of inclination sensor used for constructing IS inclinometer was discussed, as well as construction of inclinometer, installation of bearing pipe in slit wall and way of using the constructed instrument was described.

Translation: Zbigniew Bochenek

*ЕЖИ ЯНУШ  
ВОЙЦЕХ ЯНУШ  
МЕЧИСЛАВ КОЛОДЗЕЙЧИК  
ЯН ВАСИЛЕВСКИ*

## ИНКЛИНОМЕР IS ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАКЛОНА И ПРОГИБА ЗАЗОРНЫХ СТЕН

### Резюме

Сооружение современных зданий с несколькими подземными этажами, предназначенными для гаражей, совершается с помощью применения, так называемых, зазорных стен, прогибы и изменения наклона (крена) которых во время углубления котлована прослеживаются геодезическими методами. Мониторинг необходим для оценки состояния безопасности проведения строительных работ и для оценки состояния безопасности зданий и подземной инфраструктуры в окружении стройки.

Установлено, что мониторинг классическими методами наталкивается на большие затруднения по поводу заслона видимости и разрушения пунктов относимости. Поэтому разработано инклинометр, опускаемый в трубы, закреплённые вертикально в зазорной стене. С помощью применения этого инклинометра определяются профили прогиба и изменения крена зазорной стены относительно дна трубы, находящегося на уровне основы стены, на глубине 10-25 м ниже уровня местности. Инклинометр IS даёт возможность определять горизонтальные смещения верхушки стены относительно её основания с ошибкой 0,3-0,5 мм.

Изложен способ калибровки сенсора уклонов, применённого для создания инклинометра IS, конструкция инклинометра, способ монтажа несущей трубы в зазорной стене, а также способ пользования инклинометром.

Перевод: Ружа Толстикова

