

Ocena procesów osuwiskowych na podstawie wyników pomiarów inklinometrycznych

Lesław Zabuski¹



Appraisal of landslide processes based on the results of inclinometric measurements. Prz. Geol, 61: 248–256.

A b s t r a c t. The paper presents the principles of the inclinometric method in the measurements of underground displacements of slopes are described and some example results. The advantages of the method and the practical examples are shown: results of the measurements on the slopes in the flysch Carpathians and Polish Lowland – i.e. in the Beskid Niski Mts., Beskid Mały Mts. and in Koronowo near Bydgoszcz. The capabilities of the method are described in detail. These include determination of the depth of the landslide slip surface or zone, description of the slide mechanism (rotational or translational), estimation of displacement rate and its connection with the external conditions, and determination of the movement direction.

Keywords: landslide, inclinometric measurement, displacement

Ruchy osuwiskowe zboczy objawiają się w mniej lub bardziej wyraźnych przekształceniach powierzchni terenu. Zbadanie form morfologicznych daje możliwość utworzenia ogólnego obrazu procesu osuwiskowego, w tym określenia jego granic, opisanie form zewnętrznych, oceny zmian rzeźby terenu. Uzupełnienie takiego obrazu jest niemożliwe bez badań geologicznych i geotechnicznych ośrodka budującego zbocze (Zabuski i in., 1999). Te badania w wielu przypadkach pozwalają zlokalizować powierzchnię poślizgu, stanowiącą ograniczenie od dołu bryły zsuwu (koluwium), a więc także określenie masy zsuwającego się materiału, co jest ważne w przypadku potrzeby stabilizowania powstałego lub odnawiającego się osuwiska. W celu ich przeprowadzenia wykonuje się otwory badawcze, z jednoczesnym profilowaniem rdzeni wiertniczych. Materiał pobrany z rdzeni jest także przeznaczony do badań laboratoryjnych, w których określa się parametry fizyczno-mechaniczne elementów (gruntów, skał) ośrodka, budującego zbocze.

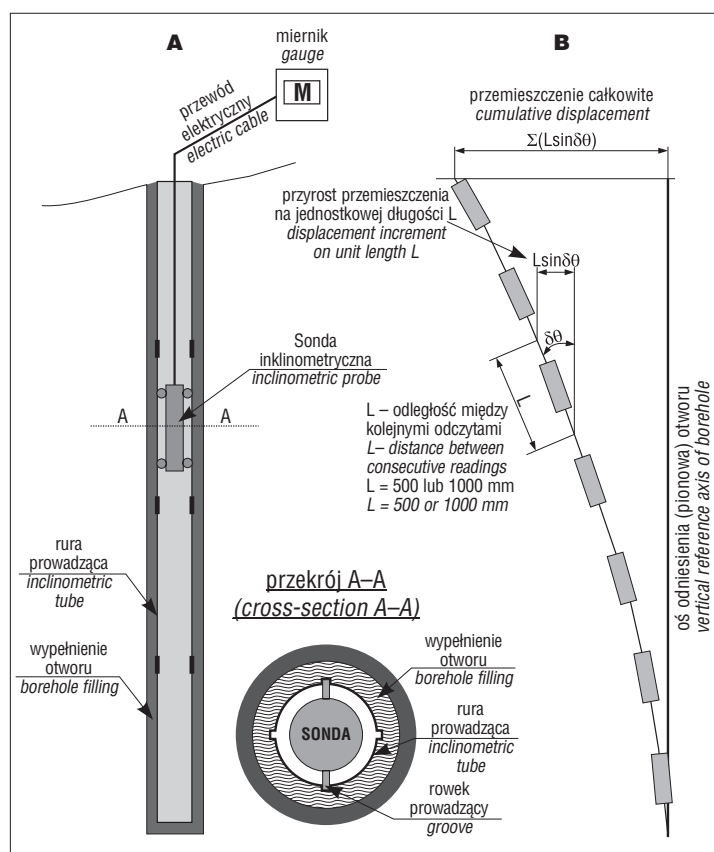
Istotne ograniczenie takiego rozpoznania wynika z faktu, iż badany jest stan zbocza w pewnym momencie, nie zaś proces osuwiskowy przebiegający w czasie i ulegający fluktuacjom w zależności od warunków zewnętrznych. Ograniczenie to powoduje, iż często nie sposób ocenić, jakie procesy zachodzą współcześnie. Dla przykładu – w wyniku profilowania geologicznego otworu badawczego o głębokości około 45 m na jednym z osuwisk w Nowym Sączu „znaleziono” osiem powierzchni poślizgu. Pomijając fakt, iż profilowanie wymaga doświadczenia i jest metodą subiektywną, nie wiadomo, wzdłuż której (ewentualnie – których) powierzchni zachodzi ruch współcześnie, a które są jedynie pozostałością ruchów wcześniejszych, obecnie ustabilizowanych (nie usuwają tej niepewności nawet badania laboratoryjne wytrzymałości gruntów i skał, pobranych z rdzeni). Te ostatnie mogą być efektem wystąpienia ruchów w przeszłości, które spowodowały przekształcenie zbocza w formę trwale stateczną. Ich skutkiem było jednak naruszenie i rozluźnienie ośrodka budującego zbocze, a tym samym osłabienie materiału w koluwium. Dlatego w obrębie osuwiska starego i stabilnego mogą zachodzić ruchy wtórne.

Jednym ze skutecznych narzędzi badania współczesnych ruchów osuwiskowych, obok np. ekstensometrów otworowych czy TDR, są pomiary przemieszczenia w głębinie metodą inklinometryczną, prowadzone w otworach badawczych. Dzięki nim można ocenić przede wszystkim aktywność ruchu wzdłuż powierzchni poślizgu, stwierdzonych (lub nie) w wyniku rozpoznania geologicznego. Oprócz tego uzyskuje się bogatą informację, dotyczącą wielu aspektów procesu osuwiskowego (Stark & Choi, 2008). Pomiary inklinometryczne stały się standardem na świecie wraz z wyprodukowaniem sondy inklinometrycznej w latach 50. XX w. (Green & Mikkelsen, 1986, 1988). W Polsce pierwsze pomiary znane autorowi prowadzono w latach 70. XX w. na osuwisku w Mogilanach, w czasie budowy „Zakopianki”. W latach 80. XX w. wykonano pierwszy w Polsce automatyczny system kontroli osuwiska na brzegu Jeziora Żywieckiego w Tresnej, w skład którego wchodziły inklinometry (Zabuski i in., 1992). W ciągu ostatnich lat stosowano tę metodę dla wielu obiektów inżynierskich, a także osuwisk (Domańska & Wichur, 2007; Wolski i in., 2007; Wanik, 2012), a na zboczach osuwiskowych w Szymbarku koło Gorlic zbudowano system wczesnego ostrzegania o zagrożeniu, oparty m.in. na wynikach pomiarów inklinometrycznych (Bednarczyk, 2011). Autor uzyskiwał wyniki, prowadząc pomiary na osuwiskach w Karpatach (Zabuski, 2004) i na Niżu Polskim (Zabuski i in., 2012). Przykładowe wyniki wraz z ich interpretacją posłużyły do opracowania niniejszego artykułu.

METODA INKLINOMETRYCZNA

Metoda inklinometryczna polega na pomiarze za pomocą inklinometru położenia rury (kolumny) osadzonej w otworze badawczym, a tym samym kształtu otworu w momencie pomiaru (ryc. 1a). Inklinometr składa się z ruchomej sondy z rolkami prowadzącymi, służącymi do jej przesuwania w kolumnie, zainstalowanej w otworze. Sonda posiada sensor mierzący nachylenie, który generuje sygnały elektryczne i jest połączony przewodem elektrycznym z urządzeniem zasilającym i miernikiem (ryc. 1a). Urządzenie mierzy odchylenie kolumny od pionu w dowolnym punkcie na długości otworu. Zasada pomiaru polega na

¹Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk, ul. Kościarska 7, 80-328 Gdańsk; lechu@ibwpan.gda.pl.



Ryc. 1. Schemat urządzenia inklinometrycznego i zasada pomiaru
Fig. 1. Scheme of inclinometric device and measurement principle

dokonywaniu odczytów nachylenia sondy. Sondę opuszcza się do dna otworu i wykonuje się pierwszy odczyt jej nachylenia. Następnie podnosi się ją o jednostkowy odcinek, standardowo równy 50 cm lub 100 cm i dokonuje następnego odczytu. Procedurę tę powtarza się do chwili, gdy sonda znajdzie się na poziomie powierzchni terenu. Sposób obliczania przyrostów przemieszczenia na jednostkowych odcinkach oraz przemieszczenia całkowitego (skumulowanego) całego otworu pokazano na rycinie 1b.

Przemieszczenie poziome i -tego odcinka o długości L , tj. Δu_{ij} , obliczane jest ze wzoru:

$$\Delta u_{ij} = L \times [\sin(\delta\theta_{ij}) - \sin(\delta\theta_{i0})]$$

gdzie:

Δu_{ij} – przemieszczenie poziome i -tego odcinka o długości L

$\delta\theta_{ij}$ – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w j -tym pomiarze

$\delta\theta_{i0}$ – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w pomiarze zerowym (odniesienia)

L – długość odcinka, równa 50 lub 100 cm

Sumowanie wszystkich przyrostów Δu_{ij} od dołu, tj. od dna otworu do jego korony, pozwala na obliczenie przemieszczenia skumulowanego $\Sigma \Delta u_{ij}$. Dla przykładu, dla obliczenia $\Sigma \Delta u_{ij}$ odcinka o numerze k -tym (liczonym od dołu otworu) sumuje się przemieszczenia Δu_{ij} odcinków od pierwszego, najgłębszego, do k -tego. Przemieszczenie

skumulowane całego otworu, od dołu do korony, oblicza się sumując Δu_{ij} – kolejno dla wszystkich odcinków, czyli:

$$\Sigma \Delta u_{ij} = \Sigma \{ L \times [\sin(\delta\theta_{ij}) - \sin(\delta\theta_{i0})] \}$$

gdzie:

Δu_{ij} – przemieszczenie skumulowane i -tego odcinka o długości L

$\delta\theta_{ij}$ – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w j -tym pomiarze

$\delta\theta_{i0}$ – kąt nachylenia sondy zmierzony na i -tym odcinku w pomiarze zerowym (odniesienia)

L – długość odcinka, równa 50 lub 100 cm

Różnice odchylenia od pionu pomiędzy wynikami w kolejnych seriach pomiarowych, przeprowadzanych w określonych interwałach czasowych, są równoznaczne z odkształceniem i przemieszczeniem otworu.

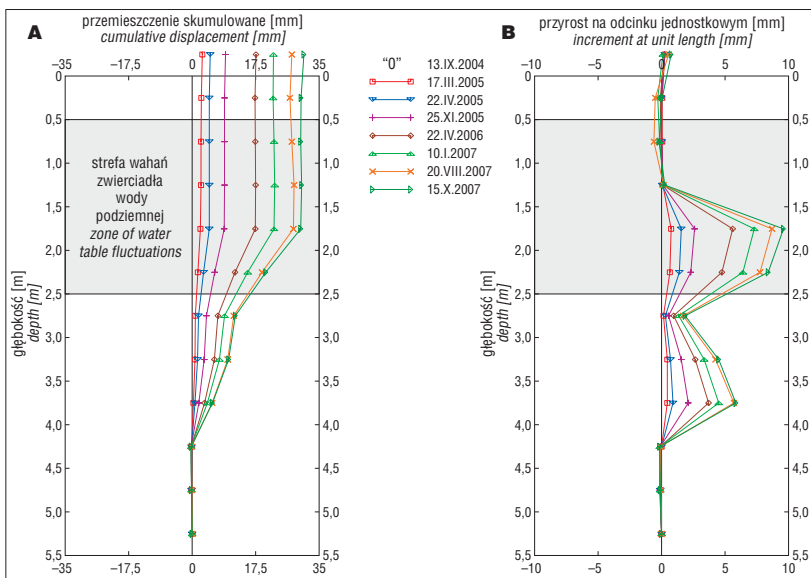
Przemieszczenie może następować w różnych kierunkach; aby wyniki kolejnych serii pomiarowych były porównywalne, orientacja sondy jest stała dzięki temu, że przesuwana jest ona wzdłuż rowków wykonanych w rurze. Podczas montażu rura jest orientowana w taki sposób, aby jedna para rowków była skierowana w przybliżeniu zgodnie z nachyleniem, druga zgodnie z rozciągłością (biegiem) zbrocza.

OCENA MECHANIZMÓW OSUWISKOWYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIARÓW

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przemieszczeń przykładowych otworów w masywach Beskidu Niskiego (rejon Gorlic), Beskidu Małego (rejon między Wadowicami i Suchą Beskidzką) oraz w Koronowie koło Bydgoszczy. Na tej podstawie dokonano analizy mechanizmów deformacji osuwiskowych zbroczy. Wyniki analizowano, biorąc pod uwagę tło geologiczne, jednak nie charakteryzowano szczegółowo osuwisk, na których te otwory są usytuowane. Celem artykułu nie jest bowiem pełny opis zjawisk osuwiskowych, lecz przede wszystkim przedstawienie zalet pomiarów przemieszczenia metodą inklinometryczną i możliwości, jakie stwarza prawidłowa interpretacja ich wyników. Wyniki pomiarów pozwalają w szczególności na:

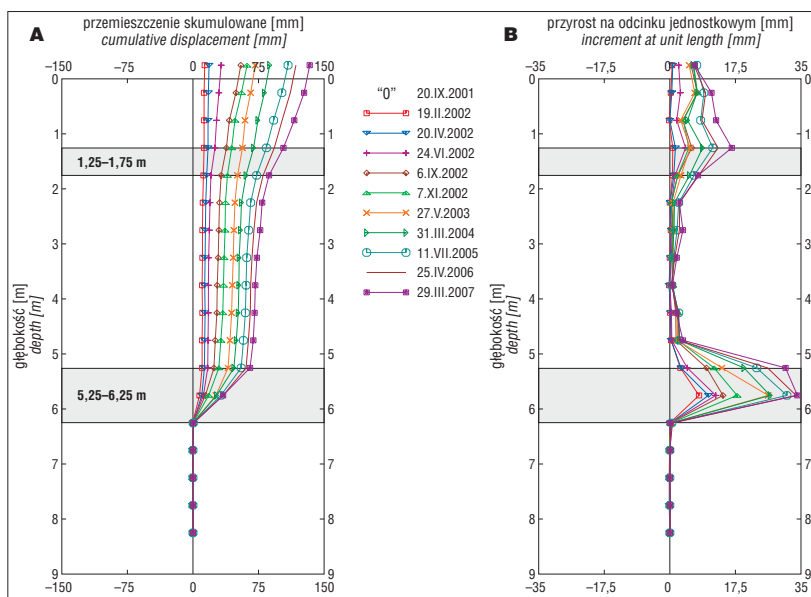
- określenie głębokości powierzchni bądź strefy poślizgu,
- przybliżoną ocenę charakteru strefy poślizgu,
- ocenę mechanizmu zsuwu (ruch rotacyjny, translacyjny itp.),
- oszacowanie prędkości zsuwu i jej związku z warunkami zewnętrznymi,
- wyznaczenie kierunku zsuwu w miejscu lokalizacji otworu,
- sygnalizowanie inicjacji ruchu osuwiskowego.

Poniżej omówiono w szczególności wymienione elementy.



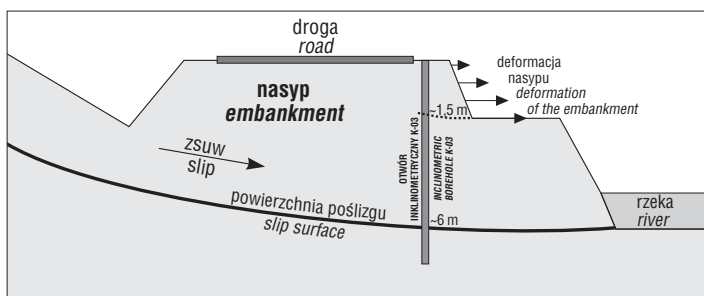
Ryc. 2. Krzywe przemieszczenia zbocza, otwór w masywie łupkowym; osuwisko w Bystrej koło Szymbarku; A – przemieszczenie skumulowane; B – przyrosty przemieszczenia

Fig. 2. Curves of the slope displacement, borehole drilled in shale massif; landslide in Bystra near Szymbark; A – cumulative displacement; B – displacement increments



Ryc. 3. Krzywe przemieszczenia zbocza, otwór w masywie łupkowym; osuwisko „Kawiory” w Szymbarku; A – przemieszczenie skumulowane; B – przyrosty przemieszczenia

Fig. 3. Curves of slope displacement, borehole drilled in shale massif; landslide "Kawiory" in Szymbark; A – cumulative displacement; B – displacement increments



Ryc. 4. Warunki terenowe i lokalizacja powierzchni poślizgu osuwiska w pobliżu otworu inklinometrycznego

Fig. 4. Configuration of the terrain and location of the landslide slip surface near the inclinometric borehole

Określenie głębokości powierzchni poślizgu

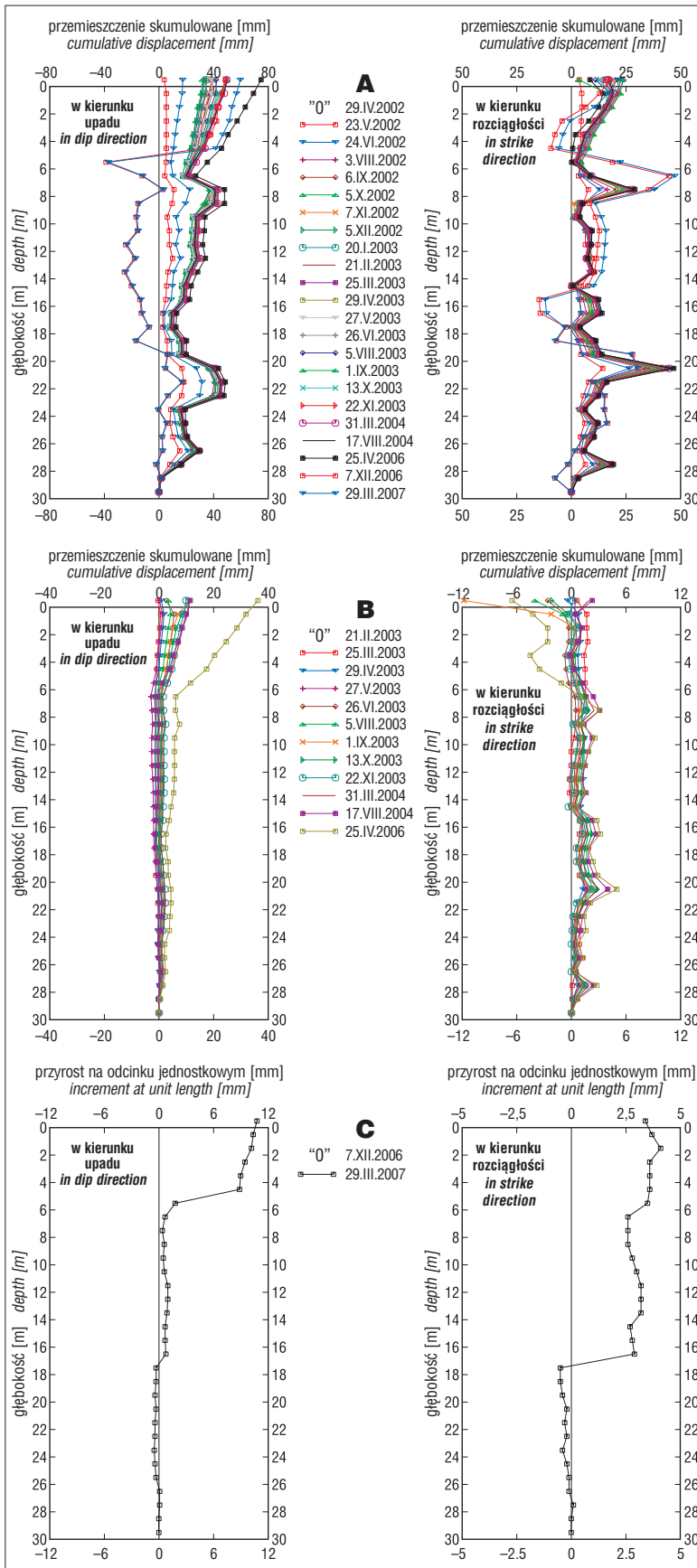
Badania w północno-zachodniej części Beskidu Niskiego (rejon Szymbarku koło Gorlic) wykazały, że na tym terenie dominują osuwiska płytkie, o zasięgu głębokościowym od 1 do 5 m. Pokrywa czwartorzędowa składa się z gruntów spoiwych, tj. glin, ilów, zaś w podłożu występują z reguły łupki ilaste, łupki pstry oraz produkty ich wietrzenia, czyli grunty spoiwe. W gruntach tych często widoczny jest rumosz piaskowca.

Typowy przykład płytkiego zsuwu przedstawiono na rycinie 2. Krzywe określające kształt otworu w kolejnych pomiarach, w odniesieniu do pomiaru zerowego, wskazują, iż maksymalna głębokość zsuwu jest równa około 4 do 4,5 m. Na głębokości 2–3 m kształtuje się płytsza powierzchnia poślizgu (ryc. 2A). Kształt krzywych przemieszczenia skumulowanego (ryc. 2A) nie zawsze pozwala w prosty sposób określić położenie strefy poślizgu. Bardziej czytelny obraz daje wykres krzywych przyrostów przemieszczenia na kolejnych odcinkach (ryc. 2B). Wynika z niego, iż największe przyrosty przemieszczenia nastąpiły na głębokości pomiędzy 4 i 4,5 m oraz 2 m i 2,5 m. Tam też lokalizowane są powierzchnie poślizgu.

Powyższy przykład jest czytelny i określenie położenia powierzchni zsuwu nie nastęrcza większych trudności. Jednak już ocena relacji pomiędzy budową geologiczną i warunkami hydrologicznymi nie jest oczywista. Wyniki opisu rdzenia z otworu wskazują, iż na głębokości odpowiadającej powyższym strefom poślizgu nie następuje zmiana rodzaju gruntu. Zauważa się natomiast, że płytsza strefa znajduje się w granicach wahań zwierciadła wody. Powoduje to naprzemienne nawadnianie i „suszenie” gruntu, czego skutkiem może być jego osłabienie i w efekcie inicjacja zsuwu. Geneza głębszego zsuwu nie jest znana.

W niektórych przypadkach lokalizacja powierzchni poślizgu wynika z lokalnego ukształtowania terenu. Taki przykład pokazano na rycinie 3, zaś schematyczny przekrój przez zbocze w miejscu umieszczenia otworu na rycinie 4.

Głębsza strefa zsuwu wynika po części z obecności na tej głębokości słabych gruntów, tj. ilu i ilowca z rumoszem piaskowca (na głębokości 6–6,5 m w rumoszu widoczne są ślady złustowań, świadczące o istnieniu powierzchni poślizgu). Ponadto wychodnia powierzchni poślizgu znajduje się na poziomie rzeki, któremu odpowiada głębokość stwierdzona w pomiarach (por. ryc. 3). Nieregularność krzywych przemieszczenia na głębokości około 1,5 m nie oznacza



Ryc. 5. Krzywe przemieszczenia zbocza, osuwisko „Kawior” w Szymbarku; **A** – przemieszczenie skumulowane – 29.IV.2002–7.XII.2006; **B** – przemieszczenie skumulowane – 21.II.2003–25.IV.2006; **C** – przyrosty przemieszczenia – 7.XII.2006–29.III.2007

Fig. 5. Curves of slope displacement; landslide "Kawior" in Szymbark; **A** – cumulative displacement – 29.IV.2002–7.XII.2006; **B** – cumulative displacement – 21.II.2003–25.IV.2006; **C** – displacement increments 7.XII.2006–29.III.2007

zsuwu, lecz wynika z powolnego deformowania się nasypu wskutek ruchu kołowego po biegnącej po nim drodze.

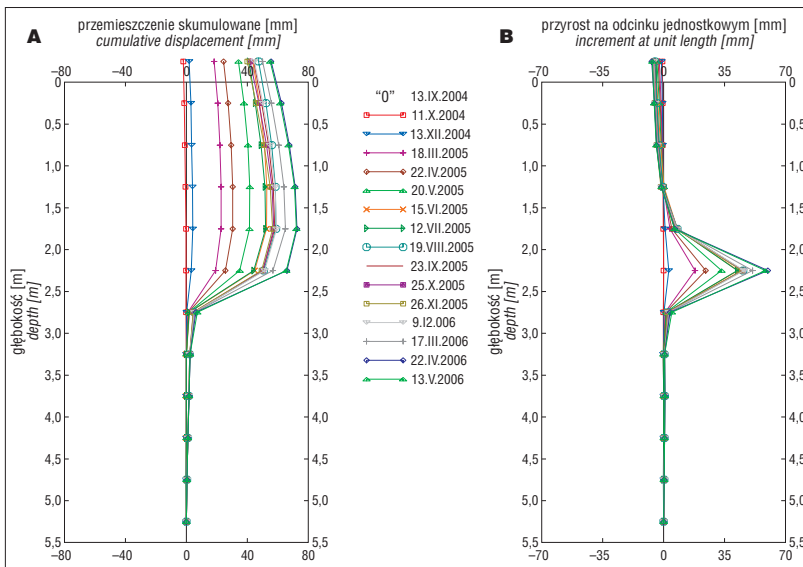
W pewnych przypadkach, nawet po wielu seriach pomiarowych, nie można jednoznacznie określić położenia powierzchni poślizgu, choć deformacje otworu – objawiające się nieregularnościami krzywych i stosunkowo dużym przemieszczeniem skumulowanym – są ewidentne. Taką sytuację pokazano na rycinie 5. Na górnym wykresie (ryc. 5A) zamieszczono krzywe z wszystkich serii pomiarowych, począwszy od pomiaru zerowego, wykonanego w kwietniu 2002 r. Wykres ten jest nieczytelny z punktu widzenia możliwości wyznaczenia położenia ewentualnej powierzchni poślizgu. Po odrzuceniu krzywych z pierwszych dziewięciu serii pomiarowych i wyznaczeniu nowego pomiaru odniesienia (luty 2003), ujawnia się wyraźny przyrost przemieszczenia na głębokości około 7 m (ryc. 5B). Natomiast krzywe przyrostów przemieszczenia z dwóch ostatnich pomiarów, wykonanych w grudniu 2006 r. i w marcu 2007 r. (ryc. 5C) pokazały dwie powierzchnie – ponownie na głębokości około 7 oraz 17 m.

Przyczyny mało czytelnego obrazu przemieszczenia mogą mieć dwójaką naturę. Mogą one wynikać z niedokładnego wykonania i wypełnienia otworu badawczego, szczególnie przestrzeni pomiędzy ścianami otworu i zewnętrzną ścianą rury inklinometrycznej. Przyczyna może jednak tkwić w zmieniających się w czasie mechanizmach deformacji zbocza.

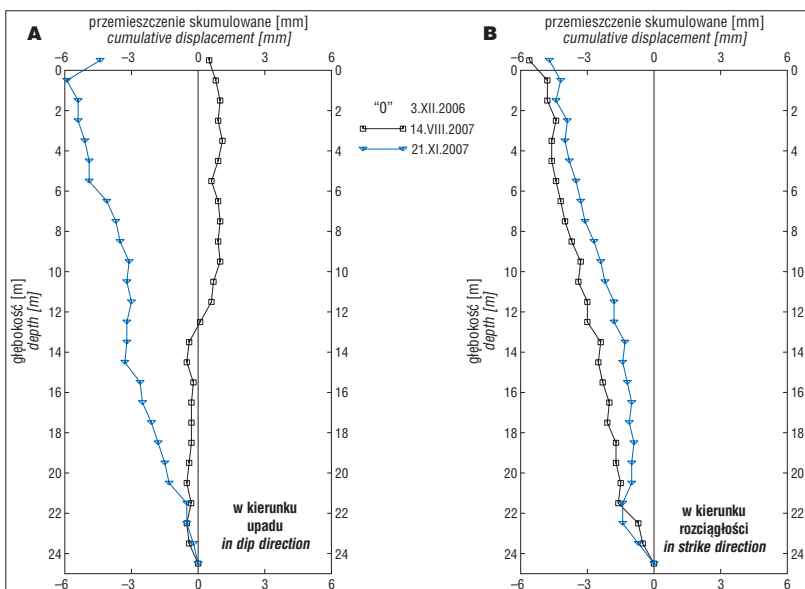
Podsumowując, można zauważyć, że w większości przypadków zsuwy zachodziły na niewielkich głębokościach. Świadczą o tym nie tylko opisane przykłady, lecz również wyniki pomiarów prowadzonych przez autora w kilkudziesięciu otworach na kilkunastu osuwiskach, przede wszystkim w Karpatach fliuszowych. Jednak pomimo to nie należy tego wniosku generalizować, bowiem w ostatniej dekadzie powstało lub odnowiło się wiele głębokich osuwisk (np. w Porąbce, Lachowicach, Kłodnem). Można jedynie postawić hipotezę, że na kształtowanie współczesnej rzeźby Karpat zsuwy płytkie wpływają w znaczącym stopniu.

Ocena charakteru powierzchni (strefy) poślizgu

Zsuw może następować wzdłuż „powierzchni dyskretnej”, np. wzdłuż cienkiego prze warstwienia bardzo słabego gruntu, wzdłuż kontaktu dwóch warstw lub też może obejmować strefę słabego gruntu, o miąższości kilkudziesięciu centymetrów lub większej. Z uwagi na to, że długość odcinka pomiędzy dwoma kolejnymi odczytami przemieszczenia w otwo-



Ryc. 6. Krzywe przeszczenia zbrocza, osuwisko „Stróżówka” koło Szymbarku; **A** – przeszczenie skumulowane; **B** – przyrosty przeszczenia
Fig. 6. Curves of slope displacement, landslide "Stróżówka" in Szymbark; **A** – cumulative displacement; **B** – displacement increments



Ryc. 7. Krzywe przeszczenia zbrocza, osuwisko w Świnnej Porębie; **A** – przeszczenie skumulowane; **B** – przyrosty przeszczenia
Fig. 7. Curves of slope displacement, landslide in Świnna Poręba; **A** – cumulative displacement; **B** – displacement increments

rze wynosi 50 cm lub 100 cm, nie można na podstawie wyników pomiarów bezpośrednio określić, jaki charakter ma powierzchnia czy też strefa poślizgu. Możliwa jest jednak ocena przybliżona. Jej podstawą jest kształt krzywych przyrostów przeszczenia na odcinkach jednostkowych oraz – w skrajnych przypadkach – wielkość przeszczenia, przy którym otwór ulega ścięciu. Przez „ścięcie” rozumie się duże odkształcenie (skrzywienie) otworu, przy którym nie można wprowadzić do niego sondy inklinometrycznej, której długość wynosi 80 cm. Nieznaczna krzywiżna objawia się dużymi przyrostami przeszczenia na kilku sąsiadujących odcinkach, a przeszczenie, przy którym otwór ulega ścięciu, jest stosunkowo duże. Obraz

zsuwu w słabszej warstwie jest widoczny w przypadku otworu na osuwisku „Kawior” w Szymbarku koło Gorlic (por. ryc. 3), gdzie zwiększone przyrosty występują na odcinku jednego metra. Pozwala to sądzić, że strefa zsuwu obejmuje warstwę o miąższości co najmniej kilkudziesięciu centymetrów. Przykład cienkiej strefy ścięcia (prawdopodobnie powierzchni „dyskretnej”) pokazano na rycinie 6. W tym przypadku znaczny przyrost przeszczenia nastąpił na odcinku 50 cm i już przy przeszczeniu 60–70 mm wprowadzenie sondy do silnie skrzywionego otworu było niemożliwe.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku analiza struktury geologicznej masywu, określonej dzięki kartowaniu rdzeni, nie daje podstaw do wyciągania wniosków o cechach strefy (powierzchni) poślizgu. Metoda inklinometryczna umożliwia taką ocenę, choć jedynie przybliżoną.

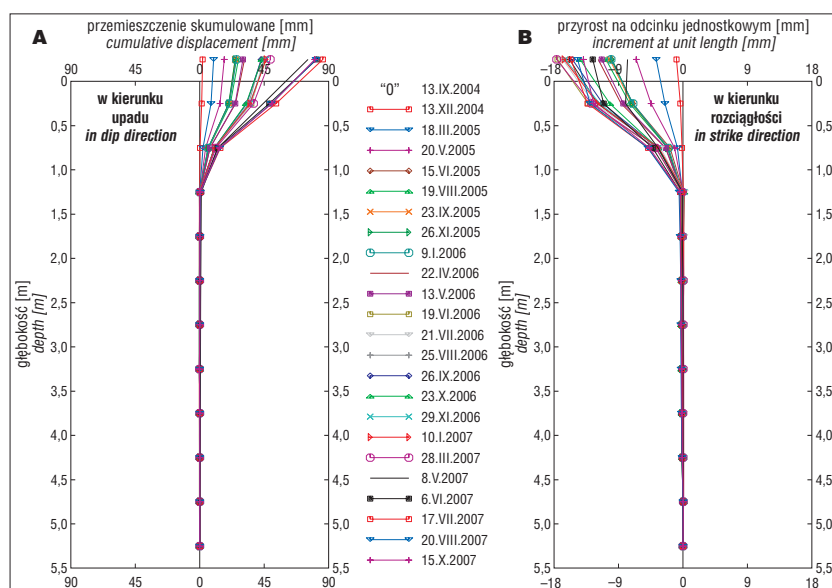
Mechanizm zsuwu

Przez „mechanizm zsuwu” rozumie się tutaj charakter ruchu osuwiskowego, w wyniku którego powierzchnia poślizgu osuwiska ma określony kształt w przekroju poprzecznym. Zsuw może mieć charakter rotacyjny, translacyjny lub też złożony (tj. rotacyjno-translacyjny). Jego ocenę umożliwia w niektórych przypadkach analiza kształtu krzywych z pomiarów inklinometrycznych.

Krzywe na rycinach 2, 3, 5 wskazują, iż ruch ma charakter translacyjny. Pakiet skalny lub gruntowy w miejscu usytuowania otworu porusza się po powierzchni zbliżonej do płaszczyzny. Krzywe na rycinie 6 wskazują natomiast na niewielką rotację, czego objawem są przeszczenia większe na głębokości około 2 m niż na powierzchni terenu. Na rycinie 7 przedstawiono inny przykład, który również świadczy o możliwości rotacji, tj. o cylindrycznym (w przybliżeniu) kształcie powierzchni poślizgu.

Niekiedy obserwuje się proces przeszczenia na zbroczu bez wyraźnej powierzchni poślizgu. W tym przypadku przyrosty przeszczenia uwidoczniają się na pewnej głębokości i im bliżej powierzchni terenu, tym są większe. Znajduje to również odzwierciedlenie w kształcie krzywych przeszczenia (ryc. 8). W takich przypadkach obserwuje się zgodne z nachyleniem stoku odchylenie obiektów na powierzchni zbrocza (ryc. 9).

Wyjaśnienie genezy kształtu krzywych w trzech powyższych przypadkach przedstawiono schematycznie na rycinie 10. Trzeba zwrócić uwagę, iż w przypadku B mogło nastąpić także przesunięcie (translacja) na poziomie powierzchni poślizgu, bez zmiany nachylenia otworu, zatem jego „wykrycie” poprzez pomiar inklinometryczny nie jest



Ryc. 8. Krzywe przemieszczenia zbrocza, osuwisko „Stróżówka” koło Szymbarku; **A** – przemieszczenie skumulowane; **B** – przyrosty przemieszczenia

Fig. 8. Curves of slope displacement, landslide "Stróżówka" in Szymbark; **A** – cumulative displacement; **B** – displacement increments

Ruch osuwiskowy odbywa się z niewielką prędkością, sporadycznie zanika, jednak nie pojawiają się gwałtowne, skokowe przyrosty przemieszczenia (Zabuski i in., 2004). Na rycinie 12 przedstawiono typowy przykład takiego ruchu. Zwraca uwagę fakt, iż przyrosty przemieszczenia zachodzą przede wszystkim w okresie wiosennym, w czasie większych opadów, którym z reguły towarzyszy topnienie śniegu. Dodatkowym czynnikiem, który może mieć wpływ na intensyfikację ruchów w tym okresie, jest słabo jeszcze rozwinięta roślinność, czego skutkiem jest brak transpiracji wody przez rośliny i jej przesączenie się do warstw głębszych. W okresach od czerwca do lutego lub marca przyrosty przemieszczenia są bardzo małe, niekiedy wręcz zerowe, a nawet ujemne. Jednakże również w okresach letnich rejestrowano wiele osuwisk, których powstanie wiązało się często z powodzią bądź deszczami o charakterze nawalnym.



Ryc. 9. Odchylenie drzewa od pionu zgodne z nachyleniem stoku osuwiskowego

Fig. 9. Deviation of the tree from the vertical in accordance with landslide slope inclination

możliwe, jeśli otwór jest zbyt płytki i nie przebija powierzchni poślizgu. Natomiast o występowaniu rotacji świadczy odchylenie otworu w kierunku przeciwnym do nachylenia stoku („kołyska”). Przykład pokazano na rycinie 11. Przypadek C można zaobserwować w słabych gruntach (por. ryc. 8), a także w osadowych masywach skalnych, gdy zsuw ma charakter konsekwentny.

Oszacowanie prędkości zsuwu i jej związku z warunkami zewnętrznymi

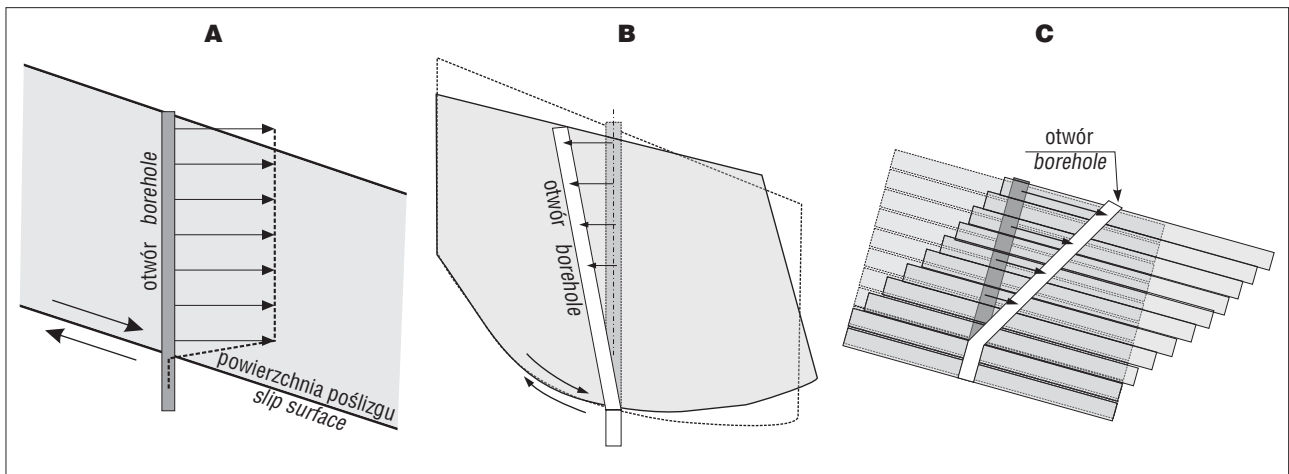
Zsuwy zachodzą z prędkością zależną głównie od warunków zewnętrznych, tj. od opadów atmosferycznych, topnienia śniegu, wegetacji roślin itp. Pomiar prowadzone przez autora wykazują, iż w większości przypadków mają one charakter, który można określić jako „quasi-ciągły”.

Wyznaczenie kierunku zsuwu

Jak wyjaśniono w rozdziale 2, sonda mierzy przemieszczenia w dwóch kierunkach, tj. w kierunku pary rowków rury inklinometrycznej, w której się porusza, oraz w kierunku do niego prostopadłym. Rurę montuje się w ten sposób, by orientacja pary rowków, w których porusza się sonda, odpowiadała kierunkowi nachylenia zbrocza; w tej sytuacji orientacja drugiej pary odpowiada rozciągłości zbrocza. Takie jednoznaczne zorientowanie jest możliwe przy prostej morfologii zbrocza. Nieregularne kształty powierzchni terenu utrudniają odpowiednie ustawienie rury. W efekcie oprócz przemieszczeń „w kierunku upadu (nachylenia)” obserwuje się stosunkowo duże przemieszczenia „w kierunku rozciągłości”, w którym teoretycznie nie istnieje nachylenie zbrocza. Jest to tylko pozornie nielogiczne. Taki przypadek może bowiem wystąpić wówczas, gdy na przykład obok otworu znajduje się zagłębienie, np. wąwóz, który jest także zorientowany w kierunku upadu. Przemieszczenie wypadkowe wynika więc z przemieszczania się masywu w obydwu kierunkach. W praktyce tego typu efekty pojawiają się często. Przykład pokazano na rycinie 13 (patrz także ryc. 7). Wielkości przemieszczenia w kierunku nachylenia zbrocza oraz w kierunku wąwozu są do siebie zbliżone. Zatem przemieszczenie wypadkowe jest w przybliżeniu zgodne z wyznaczonym wcześniej kierunkiem zsuwu.

Sygnalizowanie inicjacji ruchu osuwiskowego

W pewnych przypadkach wynik pomiaru inklinometrycznego stanowi sygnał inicjacji procesów, prowadzących do utworzenia się osuwiska w miejscu posadowienia otworu. Taki przypadek można było zaobserwować w 2011 r. na osuwisku w Koronowie koło Bydgoszczy. Sytuację objaśnia rycina 14. Otwór znajduje się w odległości około 2,5 m od skarpy głównej istniejącego osuwiska. Powstała



Ryc. 10. Rodzaje ruchów osuwiskowych; **A** – zsuw translacyjny wzdłuż powierzchni dyskretnej; **B** – zsuw rotacyjny; **C** – zsuw translacyjny „arkuszowy”

Fig. 10. Types of landslide movements; **A** – translational movement along a discrete surface; **B** – rotational slide; **C** – translational "sheet" slide

ona w okresie wiosennym 2011 r., w wyniku retrogresji (czyli rozprzestrzeniania się w górę) osuwiska, znajdującego się poniżej. Od momentu jej powstania zmienił się trend przemieszczenia otworu. Poprzednio, gdy skarpa główna była oddalona o około 5–6 m od otworu, jego przemieszczenia zachodziły w kierunku nachylenia stoku. Utworzenie się skarpy w bezpośrednim sąsiedztwie otworu spowodowało inicjację ruchu rotacyjnego (por. ryc. 10b), którego początki zaobserwowano w pomiarze w dniu 31 maja 2011 r. Mechanizm ten wskazuje, iż osuwisko ma wpływ na zachowanie się terenu leżącego wyżej, poza nim. Można przypuszczać, że w przyszłości nastąpią dalsze deformacje i osunięcie się tej strefy.

PODSUMOWANIE

W artykule opisano metodę inklinometryczną i przedstawiono zalety pomiarów inklinometrycznych w ocenie



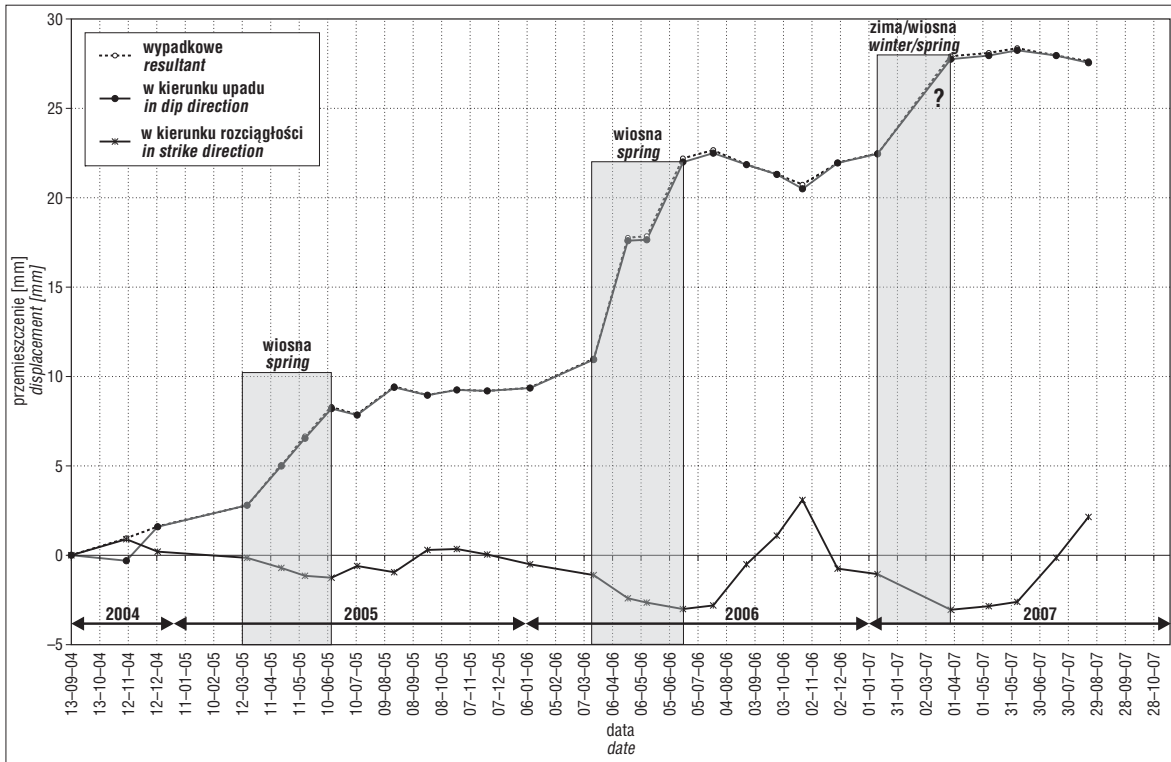
Ryc. 11. Odchylenie słupa od pionu przeciwne do nachylenia stoku osuwiskowego

Fig. 11. Deviation of the pole from the vertical opposite to the landslide slope inclination

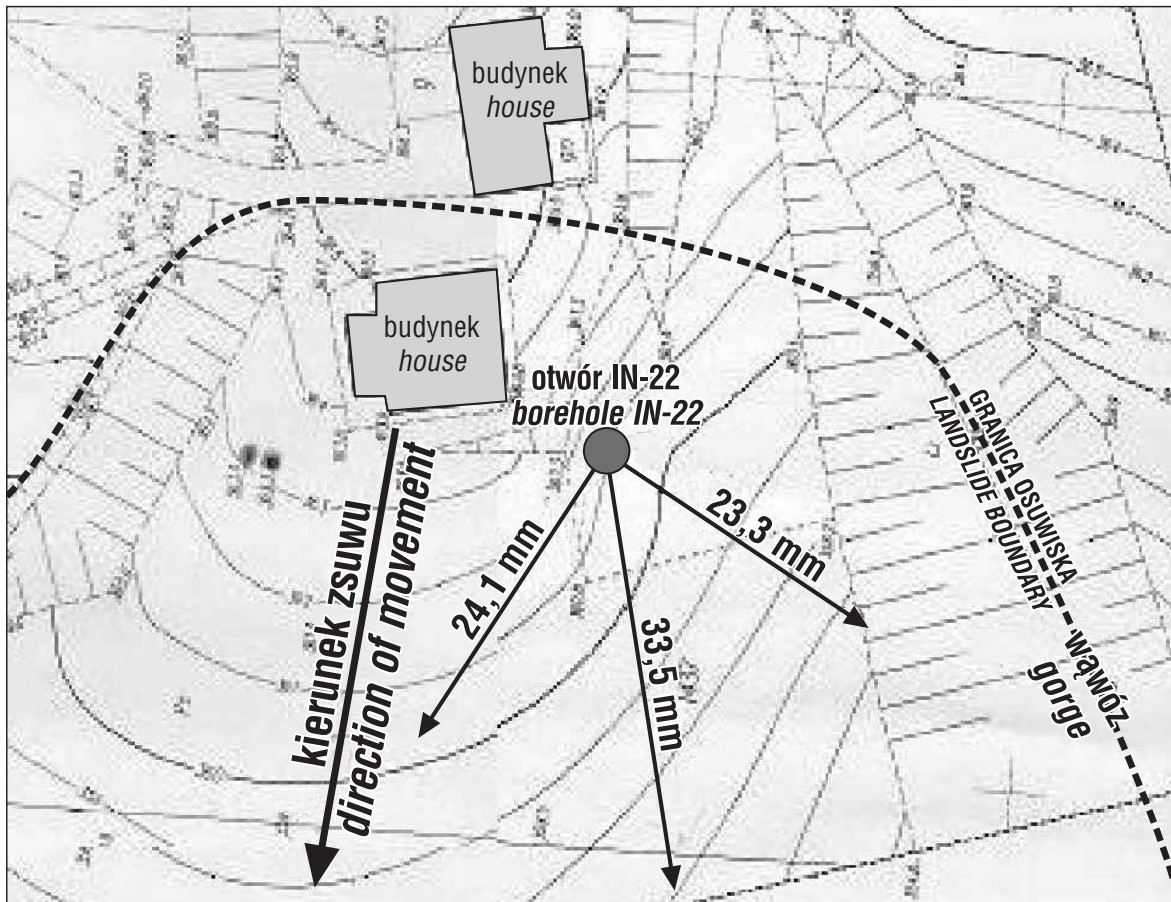
procesów deformacji zboczy. Możliwości metody zilustrowano przykładami wyników pomiarów w otworach na terenie Beskidów – Niskiego i Małego oraz w Koronowie koło Bydgoszczy. Podkreślono ważną rolę poprawnej i starannej interpretacji wyników, która w szeregu niejednoznacznych przypadków jest trudna.

Duże znaczenie dla uzyskiwania prawidłowych wyników ma właściwe wykonanie otworu i instalacji kolumny inklinometrycznej. Przy niedostatecznym wypełnieniu otworu brak jest skutecznego połączenia kolumny z otaczającym ośrodkiem. Wówczas wyniki mogą nie być wiarygodne, szczególnie w początkowych seriach pomiarowych, dopóki nie zajdzie ścisły kontakt kolumny z przemieszczającym się, rozluźnionym masywem.

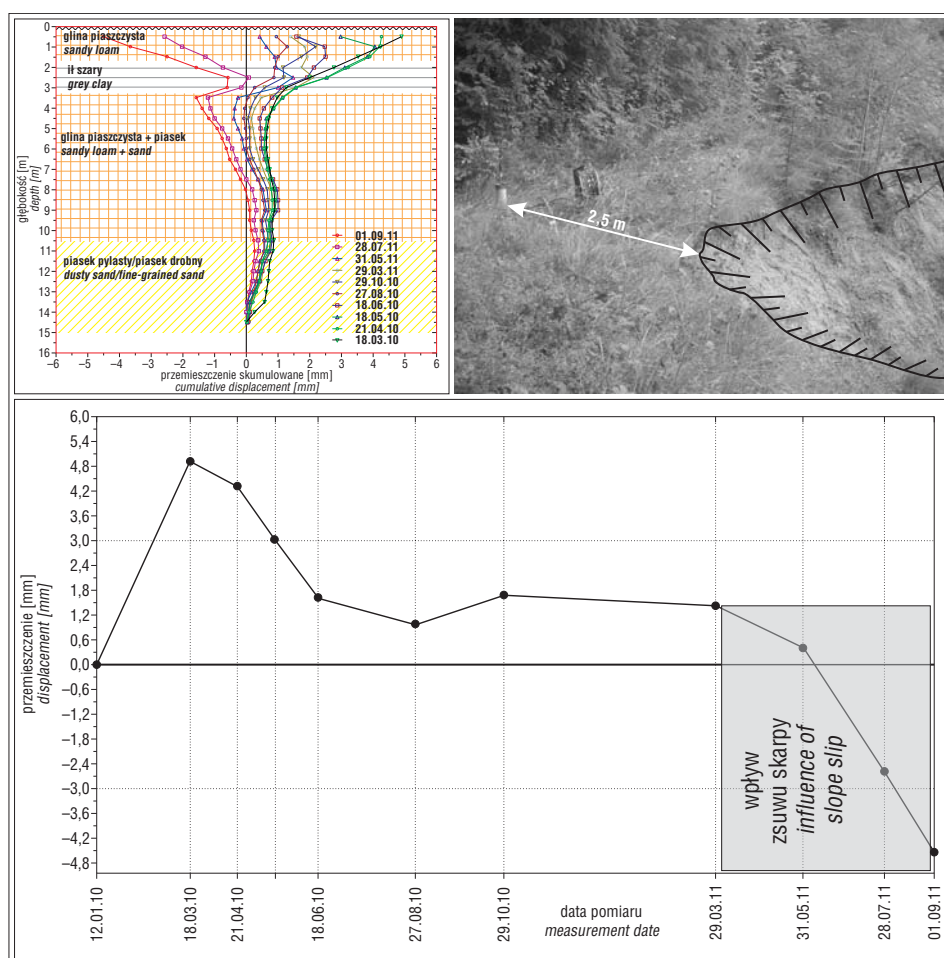
Zasadnicza wada pomiarów inklinometrycznych wynika z faktu, że dla uzyskania wyników w postaci przemieszczeń konieczny jest czas pomiędzy pomiarem odniesienia (zerowym) i kolejnymi pomiarami. Niekiedy poprawne wyniki uzyskuje się po długim czasie; jak pokazuje przykład na rycinie 5, nawet po wielu miesiącach. Istnieje wprawdzie możliwość zainstalowania sond inklinometrycznych „na stałe” w otworach i wykonywanie ciągłych, automatycznych pomiarów. Jest to jednak rozwiązanie kosztowne i można je stosować na obiektach o dużym znaczeniu (np. na przyczółkach zapór, autostradach). Niezależnie od tego, zalety metody zdecydowanie przeważają nad wadami. Dlatego wskazane jest dalsze popularyzowanie pomiarów inklinometrycznych jako metody, pozwalającej na prawidłową ocenę procesów deformacji. Jest to tym ważniejsze, że potrzebę taką dostrzeżono w Ministerstwie Środowiska, wydając rozporządzenie „w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi” (Dziennik Ustaw z dnia 20.06.2007), w którym „dla terenów, na których wystąpiły ruchy masowe ziemi oraz dla terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi mogącymi spowodować bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzi, infrastruktury technicznej lub komunikacyjnej prowadzi się obserwacje, zwane monitoringiem”. Dotyczy to również pomiarów inklinometrycznych.



Ryc. 12. Przesunięcie otworu w funkcji czasu, osuwisko w Bystrej koło Gorlic
 Fig. 12. Displacement of the borehole in function of time, landslide in Bystra near Szymbark



Ryc. 13. Wyznaczenie wielkości i kierunku wypadkowego przemieszczenia otworu, osuwisko w Bielance koło Szymbarku
 Fig. 13. Determination of the resultant direction of borehole displacement, landslide in Bielanka near Szymbark



Ryc. 14. Sygnalizowanie inicjacji osuwiska w miejscu posadowienia otworu inklinometrycznego
Fig. 14. Signaling of the landslide movement initiation in place of the location of inclinometric borehole

Wyniki przedstawione w artykule autor uzyskał prowadząc badania osuwisk w ramach projektu Unii Europejskiej pt. „Assesment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas (2001–2004)” oraz trzech projektów krajowych, finansowanych przez Ministerstwo Nauki, KBN oraz NCBiR, realizowanych w latach 2003–2012.

LITERATURA

- BEDNARCZYK Z. 2011 – Pierwszy w Polsce system wczesnego ostrzegania o zagrożeniu osuwiskowym w czasie rzeczywistym na przykładzie wybranych lokalizacji w Beskidzie Niskim, *Biul. PiG*, 446 (1): 9–18.
- BORGATTI L., CORSINI A., MARCATO G., RONCHETTI F. & ZABUSKI L. 2008 – Appraise the structural mitigation of landslide risk via numerical modelling: a case study from the northern Apennines (Italy), *GEORISK*. Taylor & Francis Gr., 2 (3): 141–160.
- DOMAŃSKA P. & WICHUR A. 2007 – Możliwości wykorzystania pomiarów inklinometrycznych do oceny stateczności skarp. *Górn. i Geoinż.*, 31: 97–103.
- GRABOWSKI D., MARCINIEC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A. & ZIMNAL Z. 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000, *PIG*, Warszawa., s. 92.
- GREEN G.E. & MIKKELSEN P.E. 1986 – Measurement of ground movement with inclinometers, *Proc. 4th Int. Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and In Situ Measurements*, Singapore: 235–246.
- GREEN G.E. & MIKKELSEN P.E. 1988 – Deformation measurements with inclinometers, *Transportation Research Record 1169*, TRB Washington: 1–15.
- MARCATO G., FUJISAWA K., MANTOVANI M., PASUTO A., SILVANO S., TAGLIAVINI F. & ZABUSKI L. 2007 – Evaluation of Seismic Effect on the Landslide Deposit of Monte Salta (Eastern Italian Alps) Using Distinct Element Method. *Nat. Hazards Earth Syst. Sc.*, 7: 695–701.
- MARCATO G., MANTOVANI M., PASUTO A., SILVANO S., TAGLIAVINI F., ZABUSKI L. & ZANNONI A. 2006 – Site Investigations and Modelling at La Maina Landslide (Carnian Alps, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sc.*, 6: 33–39.
- STARK T.D. & CHOI H. 2008 – Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5: 339–350.
- WANIK K. 2012 – Zastosowanie monitoringu inklinometrycznego w realizacji inżynierskich obiektów budowlanych. *Inż. Morska i Geotech.*, 4: 393–400.
- WOLSKI W., FUERSTENBERG A., SORBJAN P. 2007 – Wykorzystanie pomiarów inklinometrycznych do oceny stanu bezpieczeństwa budowli, *Materiały XXIII. Konferencji Naukowo-Technicznej „Awarie Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje: 519–526.
- ZABUSKI L. 2004 – Prediction of the slope movements on the base of inclinometric measurements and numerical calculations. *PGI Spec. Papers*, 15: 29–37.
- ZABUSKI L., GIL E. & BOCHENEK W. 2004 – Interdependence between groundwater level and displacement of the landslide slope. *PGI Spec. Papers*, 15: 39–42.
- ZABUSKI L., ŚWIDZIŃSKI W. & KULCZYKOWSKI M. 2012 – Identyfikacja i monitorowanie procesów osuwiskowych w dolinie Brdy w Koronowie koło Bydgoszczy, *Inż. Morska i Geotech.*, 6: 691–700.
- ZABUSKI L., THIEL K. & BOBER L. 1999 – Osuwiska z fliszu Karpat polskich, *Geologia – Modelowanie – Obliczenia stateczności*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, s. 171.
- ZABUSKI L., THIEL K. & IWAŃCZAK J. 1992 – Projektowanie i wykonanie automatycznych systemów kontroli zbroczy na przykładzie zbrocza osuwiskowego w Tresnej, *Wydawnictwo Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, Biblioteka Naukowa Hydrotechnika nr 13*, Gdańsk, s. 52.

Praca wpłynęła do redakcji 11.06.2012 r.
 Po recenzji akceptowano do druku 9.10.2012 r.