

Zbigniew Bednarczyk

Badania geologiczno-inżynierskie karpackich osuwisk fliszowych w rejonie Gorlic (Beskid Niski)

Engineering geology investigation of Carpathian flysch landslides in the Gorlice region (Beskid Niski)

Streszczenie: W artykule przedstawiono przykładowe badania geologiczno-inżynierskie osuwisk w rejonie Gorlic. W ramach projektu „System osłony przeciwosuwiskowej” finansowanego przez pożyczkę z Europejskiego Banku Inwestycyjnego wykonano dokumentację geologiczno-inżynierską 19 osuwisk w Karpatach oraz zainstalowano system monitoringu inklinometrycznego, osiadań, poziomu, ciśnienia porowego i temperatury wód gruntowych. Osuwisko w Sękowej niedaleko Gorlic spowodowało zagrożenie dla drogi powiatowej i cechowało się bardzo płytkim występowaniem wód gruntowych. Powstało ono w obrębie trzeciorzędowych gruntów ilastych z przewarstwieniami piaskowców (oligocen). Badania obejmowały wiercenia rdzeniowe z użyciem koronki diamentowej, podwójnym aparatem rdzeniowym, średnicą 132 mm, testy laboratoryjne (podstawowe cechy fizyczne gruntu, edometryczne badania ścisłości i testy w aparacie skrzynkowym), pomiary geodezyjne GPS-RTK, profilowania georadarowe (GPR), instrumentację oraz projekt stabilizacji osuwiska. Projekt nie zawierał wykonywania monitoringu. Był on jednak na osuwisku w Sękowej (oraz na pozostałych 18 osuwiskach) prowadzony przez autora. Otrzymane wyniki pozwoliły na korektę głębokości występowania osuwiska, precyzyjne określenie powierzchni poślizgu, wielkości oraz kierunku przemieszczeń wglębnych. Najważniejszym wynikiem tych badań było stwierdzenie, że aktywna powierzchnia poślizgu występuje znacznie płycej niż początkowo stwierdzono w dokumentacji. Dane otrzymane z pomiarów inklinometrycznych, pomiarów ciśnienia porowego i piezometrycznego poziomu wód gruntowych, uzupełnione pomiarami meteorologicznymi, umożliwiły określenie zależności pomiędzy wartościami obserwowanych przemieszczeń a występującymi warunkami wodnymi i wielkościami opadów. Zostały użyte także do analiz stateczności zbocza i opracowania poprawionego projektu stabilizacji osuwiska, co umożliwiło znaczne ograniczenie kosztu prac stabilizacyjnych. Wykonywane pomiary i obserwacje dotyczyły w miarę suchego 2006 r., który z wyjątkiem rekordowych opadów w czerwcu, odbiegał, m.in. opadami, od normy wieloletniej. Z tego względu celowe jest prowadzenie dalszych pomiarów, przez wystarczająco długi okres (co najmniej 2–3 lata), co pozwoli na określenie związków między warunkami okresów bardziej wilgotnych i dynamiką wszystkich 19 osuwisk.

Słowa kluczowe: osuwiska, monitoring osuwisk, badania laboratoryjne, profilowanie GPR, analizy stateczności

Abstract: In the paper exemplar landslide geotechnical investigation in Gorlice region are presented. Inside the Landslide Counteraction Project financed by the loan from European Investment Bank, geotechnical documentation and instrumentation on 19 landslides in Carpathian Mountains were performed. Monitoring network were consist of ground movement, settlement pore pressure, groundwater level and water temperature monitoring. Sękowa Landslide, near the city of Gorlice, caused threats for public and was characterized by the shallow groundwater level. Landslide is formed in trietary flysch claystones and sandstone deposits. Investigations included 132 mm diameter core drillings, sampling, ground penetration radar scanning (GPR), laboratory tests (index, oedometer, direct shear tests), GPS-RTK profiling and landslide instrumentation. For Sękowa landslide and other landslides monitoring were not included in the project however was realized and financed by the author. Results of this investigations allowed sliding surface and observed ground movement detection. The most important finding was precise localization of the sliding zone which was found to be shallower than estimated by the drillings in geotechnical documentation. Inclinomater, water level and pore pressure monitoring allowed to were very useful for predicting the geodynamic activity and was used for landslide stabilization project. Project didn't included monitoring measurements however on the Sękowa landslide and others 18 landslides measurements were performed by the author. Results allowed landslide depth correction and precise detection of the sliding surfaces, ground movement rate and direction. The most important findings was that observed active geodynamic processes occurred shallow that it was described in geotechnical documentation. Inclinomater, pore pressure and groundwater level data together with meteorological monitoring allowed to find correlations between ground movements and groundwater conditions. Received data was included in slope stability analysis and revised landslide stabilization project what allowed for significantly reduction of counteraction costs. Monitoring measurements were during relatively dry period of the 2006 year except June when precipitation was very high. For these reasons it is recommended to perform future monitoring in enough long period of time (minimum 2–3 years) what should allow finding correlations between more humid periods and geodynamical processes on every from 19 landslides.

Key words: landslides, landslides monitoring, laboratory tests, GPR profiling, slope stability analysis

Wprowadzenie i główne elementy badań

W południowej Polsce występuje ok. 25 000 aktywnych osuwisk. Zlokalizowane są one głównie w Karpatach, na silnie nachylonych stokach górskich zbudowanych z utworów fliszowych, o zmiennych parametrach wytrzymałościowych w warunkach pełnej saturacji wodami gruntowymi. Powoduje to zmniejszenie wytrzymałości gruntów na ścinanie oraz wrażliwość na procesy geodynamiczne. Od lipca 1997 r. w wyniku katastrofalnych opadów atmosferycznych odnowiły się stare i uruchomiły nowe osuwiska na skalę dotychczas nie notowaną w Karpatach, powo-

dując jedynie w roku 2001 straty w wysokości 200 mln PLN. Zaniechanie monitoringu lub niewłaściwa interpretacja może wydatnie zwiększać koszty stabilizacji osuwisk oraz utrudniać możliwość podjęcia racjonalnych decyzji o możliwościach, zakresie i technologii prac zabezpieczających (Bednarczyk, 2004, 2005). W szeregu krajów europejskich, Japonii, USA i innych, w ostatnich latach zaobserwowano nasilenie procesów osuwiskowych, chociaż badania tych zjawisk prowadzone są od wielu lat (np. Finlay, 1997; Senneset, 1998; Larsen 2002).

W krajowej praktyce badań geologiczno-inżynierskich problem monitoringu i modelowania zjawisk geodynamicznych jest często niedoceniany, chociaż należy wymienić szereg wykonanych prac (np. Zabuski, Thiel, 1999; Rączkowski, Mrozek, 2002). W latach 2001–2006 osuwiska corocznie przyczyniały się do zniszczeń i zagrożeń dla infrastruktury, czego wynikiem jest m.in. projekt „System osłony przeciwosuwiskowej”. Wybór metod badań osuwisk zawierał techniki dostosowane do osuwisk fliszowych, które cechują się występowaniem zarówno miękkoplastycznych gruntów ilastych, bardzo związłych skał piaskowcowych, jak i rumoszy i różnego typu gruntów koluwalnych wymieszanych z fragmentami skał.

Badania tego typu osuwisk uniemożliwiają zastosowanie szeregu metod badawczych, szczególnie niektórych typów testów *in situ* (wykonywano jedynie sondowania SLVT i ścinania VT w otworze wiertniczym) oraz utrudniają wykonanie prac laboratoryjnych. Istotną rolę na etapie dokumentowania przypisano wierceniom rdzeniowym dobrej jakości, profilowaniom GPR oraz uzyskaniu wysokiej jakości próbek NNS do celów laboratoryjnych (1–5). W celu efektywnego określenia morfologii osuwisk zastosowano pomiary GPS-RTK o dokładności do 0,5–1 cm w pionie i poziomie (dwa odbiorniki, jeden ustawiony na reperze o znanych współrzędnych). Aby określić możliwość stabilizacji osuwisk i wykonać analizy stateczności odzwierciedlające warunki *in situ*, zbudowano system monitoringu z zastosowaniem ponad 250 m rur inklinometrycznych wyposażonych w specjalne przeguby zwiększające ich wytrzymałość oraz umożliwiające pomiar osiadań. System zawiera także 19 standardowych piezometrów z filtrami typu „Poltegor”, 10 pneumatycznych mierników ciśnienia porowego wód gruntowych zlokalizowanych na głębokości powierzchni poślizgu oraz dwa komputerowe rejestratory ciśnienia porowego i temperatury wody, zlokalizowane na głębokości 10 m (wykonujące 4 pomiary dziennie). Badania osuwisk zawierały wykonanie dokumentacji geologiczno-inżynierskich, w których przedstawiono lokalizację osuwisk, interpretację ich wielkości, litologii, mechanizmów powstania, warunków i parametrów geotechnicznych, zainstalowano system monitoringu oraz wykonano pomiary zerowe. Dokumentację wykonano w ramach części A projektu od maja do grudnia 2005 r. Jednak planowany monitoring, który miał być realizowany w ramach komponentu B projektu, nie znalazł się w nim na skutek decyzji administracyjnych ograniczających zakres prac (podobnie jak w przypadku pozostałych 19 osuwisk). Monitoring prowadzono jednak od stycznia do końca 2006 r. w odstępach jednomiesięcznych, a autor finansował go ze środków własnych na wszystkich 19 osuwiskach. Poniżej przedstawiono wyniki badań na osuwisku w Sękowej.

Dokumentacje geologiczno-inżynierskie

Osuwisko w Sękowej znajduje się w południowo-wschodniej Polsce na południo-wy-wschód od Gorlic. Usytuowane jest wzdłuż rzeki Męcinki i spowodowało uszkodzenia drogi powiatowej na długości ok. 50 m (ryc. 1, 2). Osuwisko powstało we fliszowych ilach i iłolupkach z przewarstwieniami średnioziarnistych piaskowców. Maksymalna szerokość osiąga 400 m, długość wynosi od 100 do 180 m. Powierzchnia poślizgu znajduje się na głębokości od 2,7 do ok. 8,0 m.

W ramach dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla poznania geologii i warunków geotechnicznych osuwiska wykonano siedem otworów, łącznie 65 m wierceń rdzeniowych koronką diamentową średnicy 132 mm. Umożliwiły one wykonanie przekrojów i wydzielenie warstw geotechnicznych (ryc. 3) oraz dostarczyły próbki dla testów laboratoryjnych. Wyniki wierceń wykorzystano do wyskalowania sześciu przekrojów georadarowych (Ramac-GPR) antenami o częstotliwości 100 i 250 MHz, na długości 1260 m (ryc. 4). Profilowania georadarowe okazały się bardzo efektywną metodą badań osuwisk i znalazły potwierdzenie w wynikach monitoringu. Wyniki wierceń pozwoliły stwierdzić, że grunty koluwalne zalegają do głębokości ok. 4–8 m. Badania laboratoryjne w ramach dokumentacji objęły wyko-



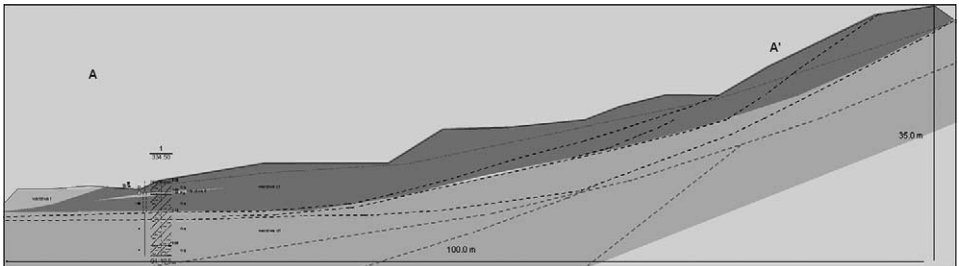
Ryc. 1. Osuwisko w Sękowej, które przecina droga powiatowa

Fig. 1. Sękowa landslide crossed by the public road



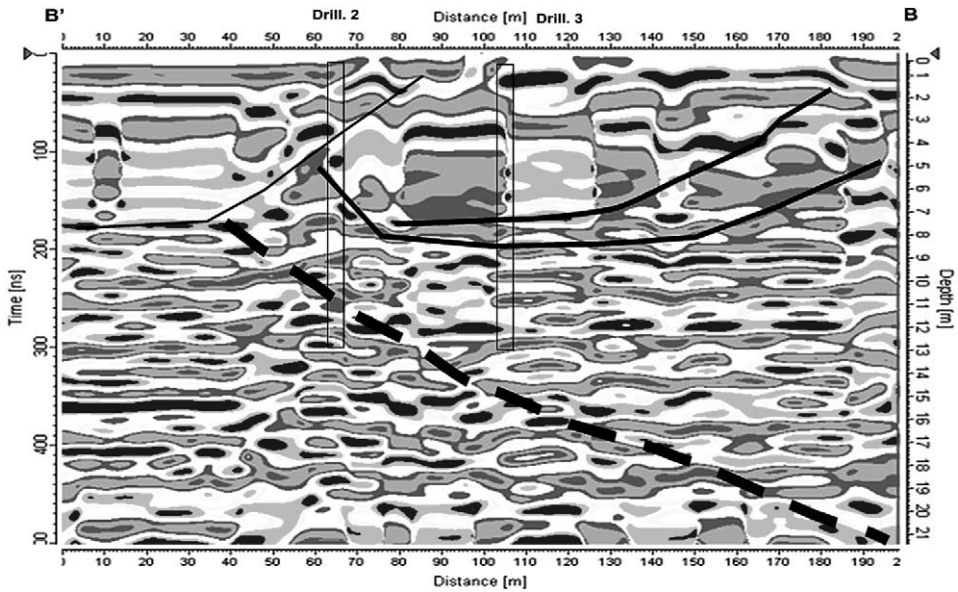
Ryc. 2. Osuwisko w Sękowej procesy geodynamiczne

Fig. 2. Sękowa landslide, geodynamical processes



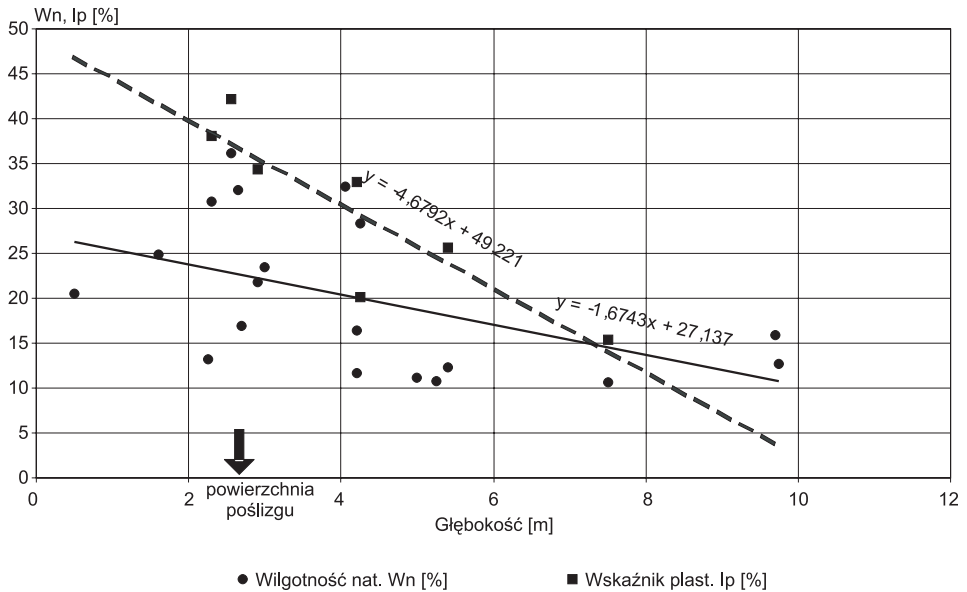
Ryc. 3. Przekrój geotechniczny przez osuwisko w Sękowej

Fig. 3. Sękowa landslide geotechnical cross-section



Ryc. 4. Wyniki profilowania georadarowego na osuwisku w Sękowej
 Fig. 4. Sękowa landslide GPR scanning results

nanie 19 zestawów testów podstawowych parametrów fizycznych gruntów (wilgotność naturalna, gęstość objętościowa, gęstość objętościowa szkieletu ziarnowego, granica płynności, granica plastyczności, zawartość części organicznych), pięć



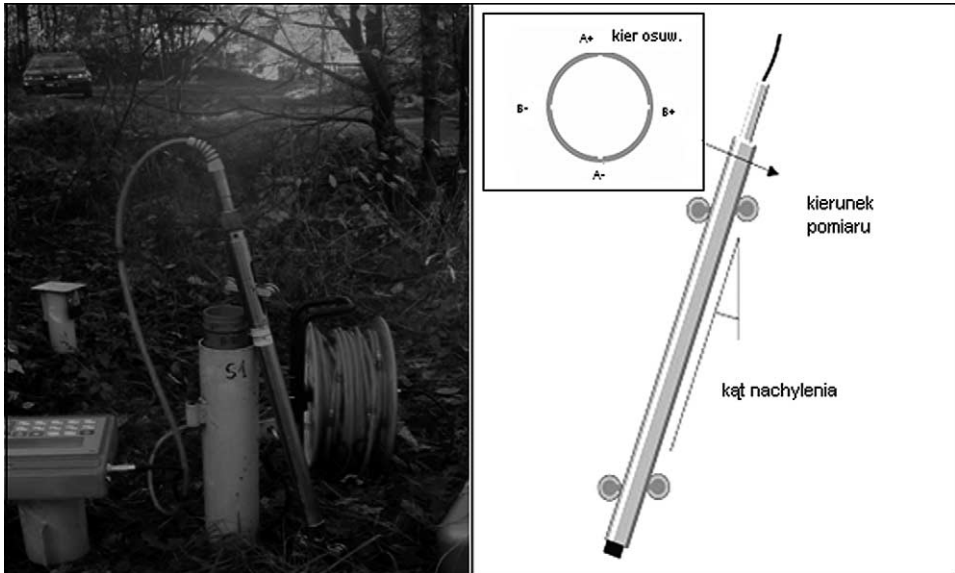
Ryc. 5. Zmiany wilgotności naturalnej i wskaźnika plastyczności gruntów wraz z głębokością
 Fig. 5. Changes of soil moisture and plasticity index with depth

badan w aparacie skrzynkowym typu AB oraz trzy badania edometryczne. Grunty, których użyto do badań, reprezentowały gliny pylaste, ily pylaste miejscami z przewarstwieniami iłolupków. Badania wykazały, że koluwalne grunty ilaste są w stanie miękkoplastycznym $I_L = 0,5$, posiadają bardzo wysoką wilgotność naturalną 30–35%, niskie wartości kąta tarcia wewnętrznego ($\varphi_u^{(n)} = 6,50^\circ$) i spójności ($c_u^{(n)} = 11,0$ kPa), a edometryczny moduł ścisłości pierwotnej wynosi 11 000 kPa. Najwyższe wartości wilgotności naturalnej i stopnia plastyczności występowały w próbkach gruntów pobranych z głębokości 2,0 m p.p.t. (ryc. 5).

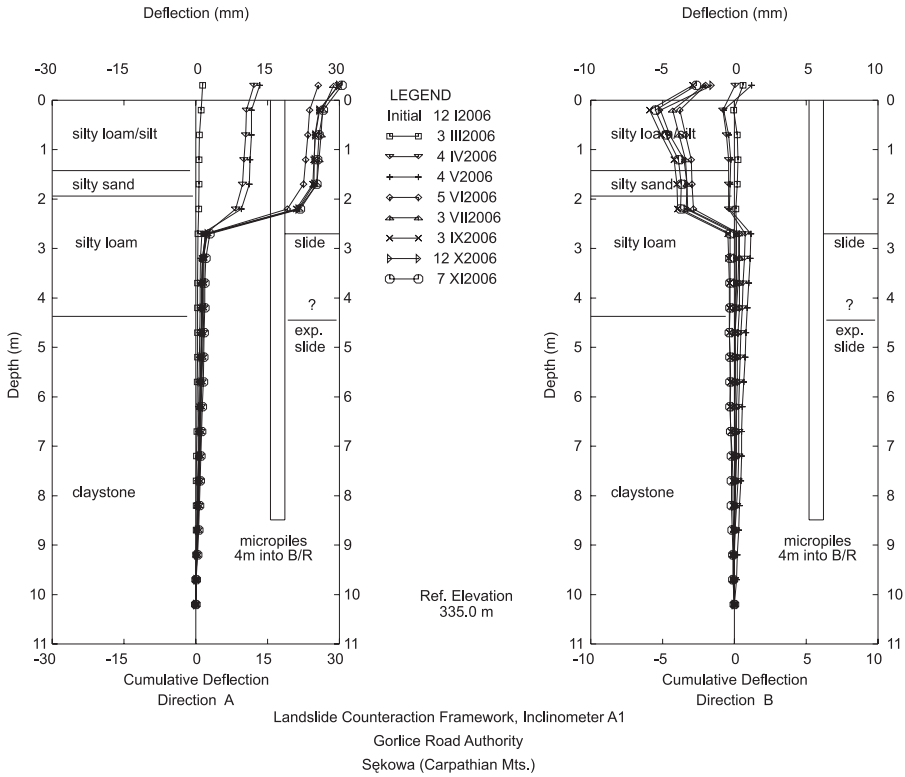
Monitoring przemieszczeń wgłębnych

Pomiary przemieszczeń wgłębnych wykonywano w rurach inklinometrycznych z ABS o średnicy 70 mm. Dokonywano ich co 30 dni, pomiędzy styczniem i wrześniem 2006 r. Mierzono kąt nachylenia w dwóch prostopadłych płaszczyznach A i B, w odstępach co 0,5 m (ryc. 6, 7, 8). Pomiary powtarzano dwukrotnie w celu wykluczenia błędnych wartości. Kolejne badania wykazały zmiany nachylenia rur inklinometrycznych, które potwierdziły występowanie ruchów osuwiskowych. Zmierzone nachylenia przeliczone na wielkości występujących przemieszczeń są zaprezentowane na rycinach 7 i 8.

Pomiary monitoringowe wykazały, że największe przemieszczenia wystąpiły pomiędzy majem a czerwcem 2006 r. Wyniosły one 12 mm na głębokości 2,7 m p.p.t. (ryc. 8). Także 50% naprężeń ścinających zaobserwowano w tym okresie. Największe wartości przemieszczeń stwierdzono pomiędzy powierzchnią terenu

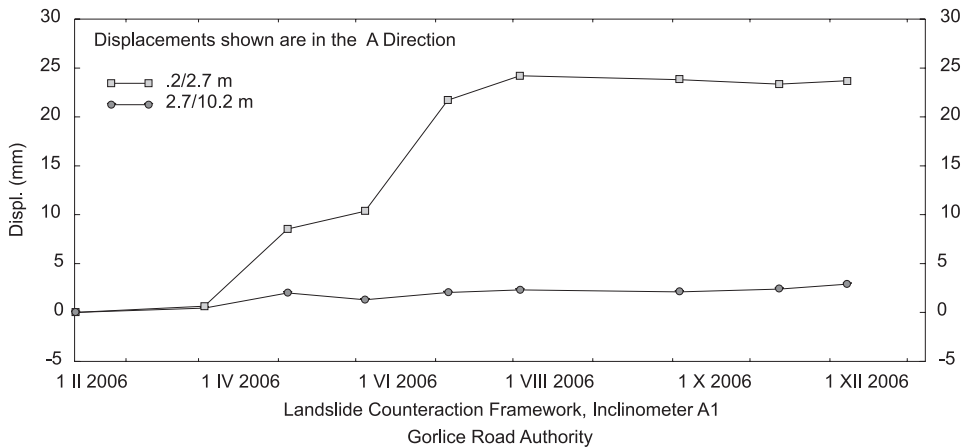


Ryc. 6. Monitoring przemieszczeń wgłębnych na osuwisku w Sękowej
Fig. 6. Mass movement monitoring on the Sękowa landslide



Ryc. 7. Wyniki pomiarów inklinometrycznych – sumaryczne przemieszczenia gruntu w kierunku A i B

Fig. 7. Results of inclinometer measurements – cumulative ground movements in A and B directions



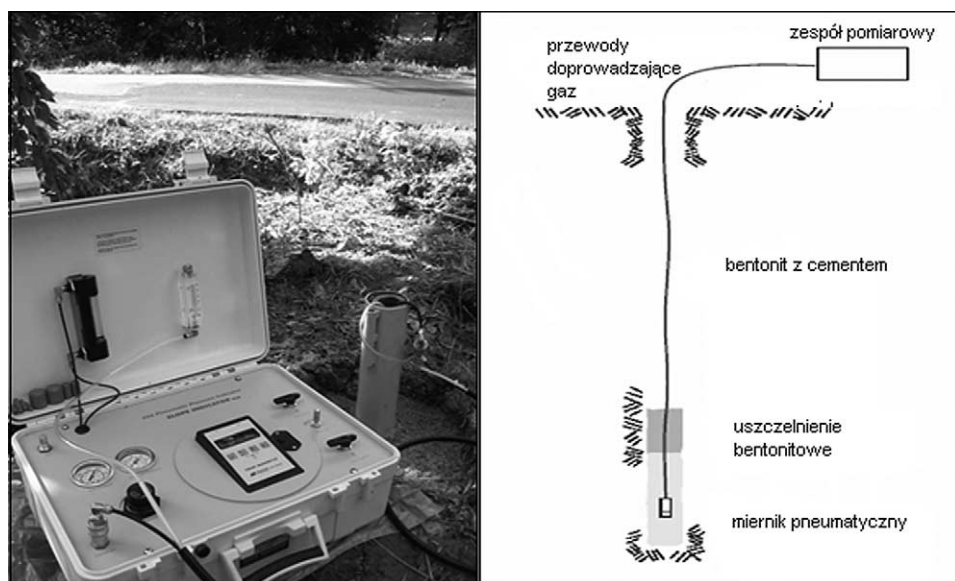
Ryc. 8. Interpretacja pomiarów przemieszczeń wgłębnych, wykres przemieszczeń w czasie
Fig. 8. Interpretation of mass movements' measurements, displacement/time plots

a głębokością 2,70 m pod drogą powiatową. Sumaryczne przemieszczenia w kierunku A (zgodnym z kier. osuw.) w okresie styczeń–wrzesień wyniosły 25,0 mm, natomiast w kierunku B – 5,0 mm.

Monitoring ciśnienia porowego i piezometrycznego poziomu wód gruntowych

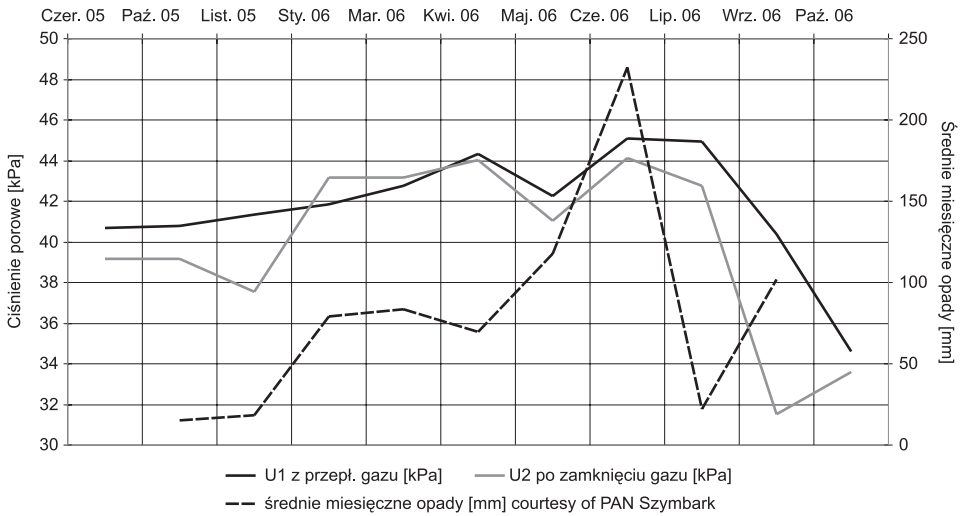
Na osuwisku zainstalowano dwa typy piezometrów: standardowy wyposażony w filtr na głębokości 5,0 m p.p.t. oraz piezometr wyposażony w pneumatyczny miernik ciśnienia porowego (ryc. 9). Pomiary ciśnienia porowego in-situ i poziomu wód gruntowych umożliwiły wykonanie obliczeń stateczności w warunkach efektywnych. Miernik ciśnienia porowego został umieszczony w otworze wiertniczym, na głębokości przypuszczalnej powierzchni poślizgu, wewnątrz filtru wykonanego z piasku gruboziarnistego, i od góry uszczelniony bentonitowo-cementowym korkiem.

Sprężony gaz wykorzystywany do pomiarów był tłoczony do czujnika za pomocą specjalnych przewodów i kiedy jego ciśnienie wyrównało się z ciśnieniem porowym wody, rejestrowano dane wskazywane przez miernik cyfrowy. Wykonywano dwa standardowe typy pomiarów z przepływem gazu oraz po zamknięciu jego dopływu pomiędzy czerwcem 2005 i wrześniem 2006 r. Największe wartości ciśnienia porowego zaobserwowano w okresie pomiędzy kwietniem a czerwcem



Ryc. 9. Pneumatyczny miernik do pomiaru ciśnienia porowego wody w gruncie osuwisku w Sękowej, schemat instalacji

Fig. 9. Pneumatic ground water pore pressure transducer on the Sękowa landslide, installation scheme



Ryc. 10. Monitoring ciśnienia porowego w strefie powierzchni poślizgu w stosunku do średnich opadów miesięcznych

Fig. 10. Pore water pressures monitoring in relation to the mean monthly precipitation

2006 r. (ryc. 10), co odpowiada największym średnim miesięcznym wielkościom opadów mierzonych przez Stację Naukową PAN w Szymbarku, zlokalizowaną w odległości ok. 8 km od osuwiska (dane dzięki uprzejmości IGiZP PAN). Poziom zwierciadła wód gruntowych był kontrolowany także w piezometrze zlokalizowanym w środkowej części osuwiska. Otrzymane wyniki (ryc. 11) wykazały, że najpłytsze poziomy zwierciadła wód gruntowych zaobserwowano na wiosnę i je-



Ryc. 11. Pomiary poziomu wód gruntowych w stosunku do średnich opadów miesięcznych

Fig. 11. Groundwater level measurements compared with mean monthly precipitation

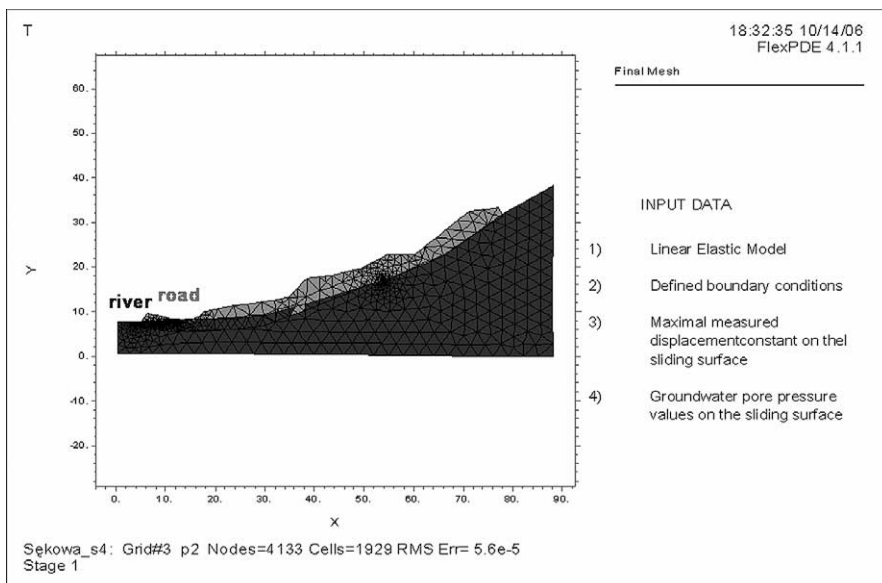
sień 2006, chociaż dla rekordowych opadów w czerwcu 2006 r. nie stwierdzono tak dobrej korelacji z wartościami ciśnienia porowego (ryc. 10).

Projekt stabilizacji osuwiska

Projekt stabilizacji osuwiska nie zawiera pomiarów monitoringowych oraz analiz stateczności zbocza. Zaproponowane prace stabilizacyjne obejmowały budowę systemu rowów drenażowych odprowadzających wody spływowe i opadowe poza obręb osuwiska. Prace stabilizacyjne powinny się rozpocząć od budowy systemu odwodnienia osuwiska. Ponad drogą zaprojektowano budowę przypory z mikropali o średnicy 300 mm do głębokości 8,5 m. Mają być one umieszczone w trzech rzędach i połączone specjalnym rusztem żelbetowym. Po wykonaniu ww. zabezpieczeń możliwa będzie wymiana korpusu drogowego oraz budowa muru z koszy gabionowych wzdłuż rzeki (200 m × 3 m). Mur ten ma być posadowiony na fundamencie z mikropali (2 rzędy, pierwszy nachylony pod kątem 22°, zapuszczone w zwięzłe iłolupki do głębokości 3 m). Zaplanowano, że w trakcie i po zakończeniu prac stabilizacyjnych wykonywane będą kontrolne pomiary monitoringowe.

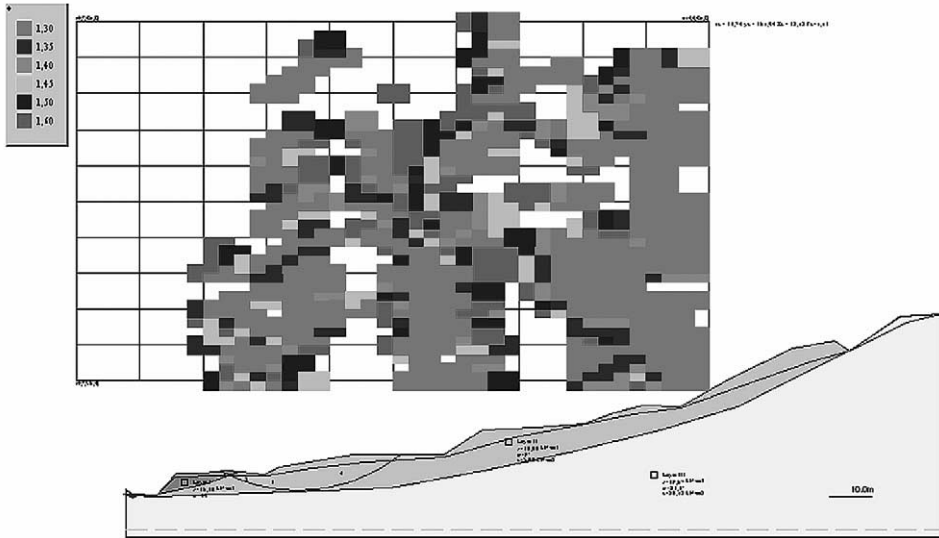
Analizy stateczności

Analizy stateczności wykonywane były klasycznymi metodami Janbu, Morgensterna-Price'a i Bishopa oraz metodą elementów skończonych FEM (ryc. 12). Analizy

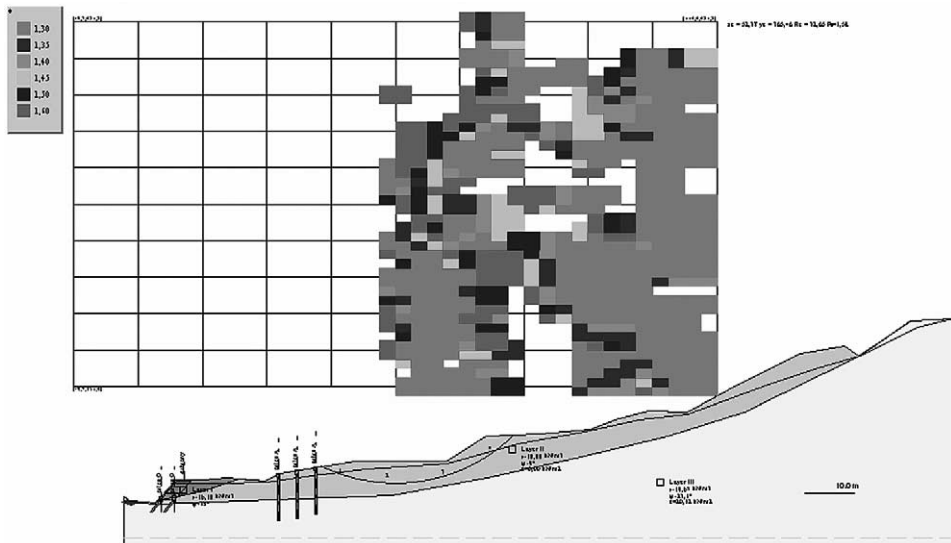


Ryc. 12. Obliczenia stateczności metodą elementów skończonych, stan końcowy
Fig. 12. Slope stability analysis FEM Method – final mesh

te zawierają wyniki pomiarów monitoringowych przemieszczeń wglębnych i warunków wodnych. Obliczenia wykonane metodą elementów skończonych poka-



Ryc. 13. Analiza stateczności metodą Bishopa, stan przed zabezpieczeniem
 Fig. 13. Slope stability analysis with Bishop Method before counteraction



Ryc. 14. Analiza stateczności metodą Bishopa, stan po zabezpieczeniu
 Fig. 14. Slope stability analysis with Bishop method after proposed counteraction

zują, że osuwisko jest nadal bardzo aktywne i może zniszczyć drogę. Zaproponowany sposób stabilizacji został sprawdzony za pomocą klasycznych metod obliczeniowych opartych na relatywnym wskaźniku stateczności F_s . Otrzymane przed wykonaniem prac stabilizacyjnych wartości współczynnika F_s były nieznacznie powyżej wartości $F_s = 1,0$. Z użyciem metody Bishopa otrzymana wartość F_s wynosiła 1,13 przed rozpoczęciem prac stabilizacyjnych i 1,58 po (ryc. 13, 14).

Podsumowanie i wnioski

1. Projekt zawierał ponad 500 m wierceń rdzeniowych, testy in situ, badania laboratoryjne, 20 km profilowań GPR. Zainstalowano 250 m rur inklinometrycznych, 19 piezometrów, 10 pneumatycznych oraz dwa komputerowe rejestratory ciśnienia porowego i temperatury wód gruntowych.
2. Przykładowe badania osuwiska Sękowa wykazały, że zastosowane metody umożliwiły określenie budowy geologicznej, dynamiki i czynników wpływających na rozwój procesów osuwiskowych.
3. Osuwisko w Sękowej budują głównie grunty ilaste o bardzo niskich wartościach parametrów wytrzymałościowych oraz bardzo wysokiej wilgotności naturalnej, co oprócz nachylenia stoku odgrywa zasadniczą rolę w rozwoju procesów geodynamicznych. Iły pylaste znajdujące się na głębokości ok. 3,0 m, w obrębie powierzchni poślizgu posiadają wysoki stopień plastyczności $IL = 0,5$, bardzo wysoką wilgotność naturalną (30%), niski kąt tarcia wewnętrznego $\varphi_u^{(n)} = 6,50$ i spójność $C_u^{(n)} = 11$ kPa. Powierzchnia poślizgu w dolnej części osuwiska znajduje się na głębokości 2,70 m poniżej drogi powiatowej, a sumaryczne przemieszczenia pomiędzy styczniem a wrześniem 2006 r. wyniosły 27,0 mm.
4. Wielkości relatywnego współczynnika stateczności F_s wynosiła 1,13. Po zaproponowanych pracach stabilizacyjnych w dolnej części osuwiska oraz zastosowaniu systemu drenaży wartość F_s wzrosła do 1,58, co wskazuje, że częściowa stabilizacja osuwiska w dolnej części wydaje się możliwa.
5. Instrumentacja osuwiska wraz z wykonanymi pomiarami monitoringowymi oraz analizami stateczności pozwoliła na opracowanie nowego projektu stabilizacji jego dolnej części oraz na zmniejszenie kosztów o około 20%, jednakże ze względu na aktywność osuwiska stabilizacja powinna rozpocząć się po wykonaniu odwodnienia, być prowadzona w okresie suchym i podlegać monitoringowi.
6. Badania dotyczyły w miarę suchego 2006 r., który z wyjątkiem rekordowych opadów w czerwcu odbiegał, m.in. opadami, od normy wieloletniej. Z tego względu celowe jest prowadzenie dalszego monitoringu w odstępach 30-dniowych, które pozwoli na określenie związków między warunkami okresów bardziej wilgotnych i dynamiką osuwisk.

Literatura

- Bednarczyk Z., 2004. Wybrane aspekty badań procesów osuwiskowych. Materiały 62 Konferencji Polskiej Akademii Nauk „Warsztaty Górnicze” Bełchatów: „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, s. 611–623.
- Bednarczyk Z., 2004. Landslide investigations by static sounding with pore pressure measurements (CPTU), ground penetration radar techniques (GPR) and other chosen methods. Proceedings of the Conference Risks Caused by the Geodynamic Phenomena in Europe, Centre of Excellence Research on Abiotic Environment (REA), PGI Spec. Pap 15: 19–28.
- Bednarczyk Z., Sandven R., 2004. Comparison of CPTU and laboratory tests interpretation for Polish and Norwegian clays. International Site Characterization Conference ISC-2 organized by International Society For Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). Millpress, Rotterdam, s. 1791–1799.
- Finlay P.J., Fell R., Maguire P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal* 34: 811–824.
- Larsen J.O., 2002. Some aspects of physical weather related slope processes. PhD thesis 2002:19 NTNU. Department of geotechnical engineering, Trondheim, Norway.
- Rączkowski W., Mrozek T., 2002. Activating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20th century. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 36: 91–111.
- Senneset K., 1998. Natural and Man-Made Hazards: Landslides, Stability analysis, case histories. NTNU Bull 34, Trondheim.
- Zabuski L., Thiel K., Bober L., 1999. *Osuwiska we fliszu Karpat Polskich*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk.

