



Zenon PILECKI*, Paulina HARBA**

Wstępne wyniki badania budowy i właściwości osuwiska metodą interferometrii sejsmicznej z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego

Streszczenie: Interferometria sejsmiczna jest metodą pozwalającą na wykorzystanie szumu sejsmicznego w interpretacji obrazu sejsmicznego ośrodka geologicznego. Autorzy podjęli się zadania przetestowania możliwości zastosowania tej metody do analizy budowy i właściwości osuwiska, które typowo od strony badań sejsmicznych jest realizowane za pomocą sejsmicznego profilowania refrakcyjnego i wielokanałowej analizy fal powierzchniowych MASW.

Osuwisko Just-Tęgoborze jest aktywnym osuwiskiem, które bezpośrednio zagraża zarówno budynkom mieszkalno-gospodarczym, jak i infrastrukturze drogowej. Droga przebiegająca przez teren osuwiska jest drogą krajową nr 75 o dużym natężeniu ruchu kołowego. W wyniku działania ruchów osuwiskowych ulega ona ciągłemu niszczeniu i istnieje zagrożenie ograniczenia jej przejezdności w przypadku osunięcia się dużej objętości mas skalno-gruntowych. Przez fragment osuwiska, przez który przebiega droga krajowa, przeprowadzono badania sejsmiczne innowacyjną metodą interferometrii sejsmicznej w celu rozpoznania ośrodka geologicznego. Pomiarzy metodą interferometrii sejsmicznej zostały przeprowadzone w wersji pasywnej, w której rejestrowano szum sejsmiczny pochodzący od przejeżdżających pojazdów za pomocą sejsmometrów Güralp CMG-6TD. Zapisy amplitudy pionowej składowej prędkości drgań sejsmicznych zostały poddane procedurom przetwarzania i interpretacji, w wyniku których otrzymano przekrój sejsmiczny pola prędkości fali poprzecznej. Głębokość rozpoznania ośrodka geologicznego wyniosła około 25 metrów. W wyniku analizy otrzymanego przekroju sejsmicznego i odniesienia wyników do przekroju geologiczno-inżynierskiego badanego rejonu, wydzielono trzy warstwy sejsmiczne o różnych zakresach prędkości fali poprzecznej. Warstwy leżące najbliżej powierzchni terenu o najmniejszych wartościach prędkości fali poprzecznej, można korelować z czwartorzędowymi utworami koluwalnymi gliniastymi i skalno-zwietrzelinowymi. W środkowej części profilu, w warstwie najbliżej powierzchni, zaobserwowano strefę o obniżonych wartościach prędkości fali poprzecznej, co najprawdopodobniej jest związane z wysokim zawodnieniem gruntu obserwowanym na powierzchni terenu w tej części profilu badawczego. Granica sejsmiczna z warstwą o największych prędkościach fali poprzecznej znajduje się na głębokości 10–15 metrów. Warstwa ta została skorelowana z mniej zwietrzalymi utworami fliszowymi podłoża osuwiska. Strop tej warstwy może być jedną z powierzchni poślizgu osuwiska. Planowana jest kontynuacja badań w celu śledzenia zmian w ośrodku geologicznym i czasoprzestrzennej oceny ruchu osuwiskowego.

* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, ** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków; e-mail: pilecki@min-pan.krakow.pl, paulina@min-pan.krakow.pl.

Słowa kluczowe: interferometria sejsmiczna, lokalny szum sejsmiczny, osuwisko, powierzchnia poślizgu, utwory fliszowe

Structure and properties of a landslide investigated with seismic interferometry using high-frequency seismic noise – preliminary results

Abstract: Seismic interferometry is a method in which seismic noise can be used for interpretations of seismic images of geological media. The authors made an attempt to test the possible application of the method in the investigation of structure and properties of a landslide, within seismic studies standardly examined with refraction seismic profiling and a multichannel analysis of surface wave (MASW).

The active landslide of Just-Tęgoborze directly threatens both residential and farm buildings and transport infrastructure. The landslide area covers the intensive traffic state road No. 75, constantly damaged by landslide movements and threatened with overload in the event of sliding of rock and soil masses in great volumes. The part of the landslide overlapping the state road was subjected to seismic studies aiming to examine the geological medium with the innovative method of seismic interferometry. In the taken passive measurements, seismic noise produced by the passing vehicles was recorded by the Güralp CMG-6TD seismometers. The obtained amplitudes of the vertical component of seismic vibrations velocity were processed and interpreted. As a result, a seismic cross-section of the shear wave velocity field was developed. A geological medium was explored to the depth of ca. 25 m. The seismic cross-section was analyzed and compared with the geological-engineering cross-section of the investigated area and three seismic layers of different shear wave velocity ranges, were distinguished. The layers closest to the ground surface, showing the lowest shear wave velocities, can be correlated with colluvial loamy and rock-weathering Quaternary deposits. The topmost layer of the middle part of profile includes a zone of small values of shear wave velocities, most likely resulting from high water accumulation on the ground surface of this part of the studied cross-section. The seismic boundary with the layer of highest values of shear wave velocities runs at the depth of 10–15 m. This layer was correlated with the less weathered flysch deposits of the landslide basement. The top of the layer is likely to form one of the slide surfaces in the landslide. In order to monitor changes in the geological medium and provide further temporal and spatial assessment of landslide movements, the studies are planned to be continued.

Keywords: seismic interferometry, local seismic noise, landslide, slip surface, flysch bedrock

Wprowadzenie

W ostatnich latach intensywnie rozwija się metoda interferometrii sejsmicznej SI (ang. *Seismic Interferometry*) pozwalająca na wykorzystanie szumu sejsmicznego w interpretacji obrazu sejsmicznego ośrodka geologicznego. Metoda interferometrii sejsmicznej jest nowoczesną i dynamicznie rozwijającą się metodą sejsmiczną wykorzystywaną między innymi do badania budowy i właściwości przypowierzchniowych warstw ośrodka geologicznego (Marcak i in. 2014). Metoda może być realizowana w wersji aktywnej, w której fale sejsmiczne są sztucznie wzbudzone oraz w wersji pasywnej, w której źródłem fal jest globalny szum sejsmiczny generowany przez np. naturalne zjawiska geodynamiczne (np. trzęsienia ziemi, wulkanizm itp.) lub lokalny wytwarzany przez np. przejeżdżające pojazdy, pracę maszyn, urządzeń itp.

Podstawy fizyczne interferometrii sejsmicznej oparte są na zjawisku interferencji sygnałów sejsmicznych (Curtis i in. 2006; Schuster 2010). Polega ono na odwzorowaniu odpowiedzi impulsowej ośrodka tzw. funkcji Greena pomiędzy parą czujników za pomocą operacji korelacji wzajemnej, lub dekonwolucji sygnałów sejsmicznych zarejestrowanych na tych czujnikach (Duguid i in. 2011). W metodzie wykorzystywane są fale powierzchniowe typu Rayleigha, które charakteryzują się właściwościami dyspersyjnymi, czyli ich prędkość

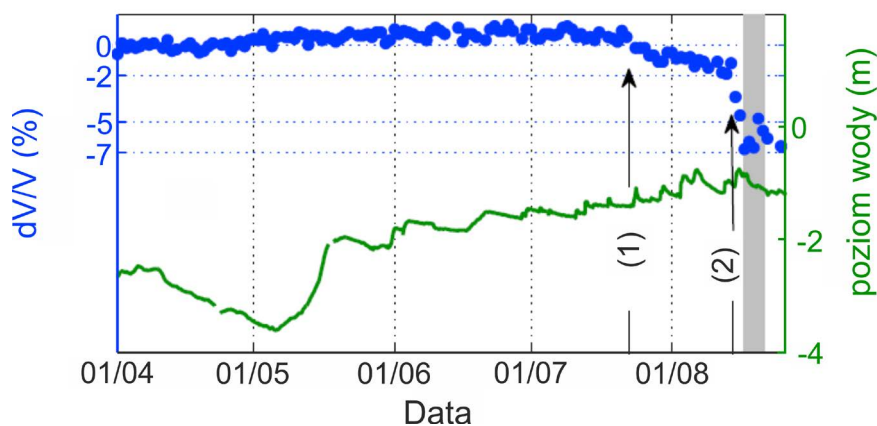
propagacji jest ściśle zależna od częstotliwości. Fale te są opisane przez krzywe dyspersji, tzn. zależności prędkości fazowej od częstotliwości fali. Prędkość propagacji fali Rayleigha jest zależna również od prędkości fali poprzecznej S, prędkości fali podłużnej P, gęstości ośrodka oraz miąższości warstw. Największy wpływ na krzywe dyspersji fali Rayleigha ma prędkość fali S (Xia i in. 1999). W wyniku przetwarzania i interpretacji w metodzie interferometrii sejsmicznej otrzymywany jest obraz zmian pola prędkości fali S. Uzyskiwany jest on w wyniku inwersji prędkości fazowej fali Rayleigha opartej na obliczeniowych metodach iteracyjnych np. metodzie Levenberga-Marquardta L-M lub metodzie algorytmu genetycznego GA (ang. *Genetic Algorithm*). Prędkość fali typu S jest czuła na zmiany właściwości ośrodka gruntowego, a w szczególności zmiany jego sztywności, które wynikają również ze zmiany zawodnienia.

Badania metodą interferometrii sejsmicznej na osuwisku Avignonet w Zachodnich Alpach we Francji, w utworach zwietrzeli gliniastej, prowadzili Renalier i in. (2010). Stwierdzili oni, że obrazowanie ośrodka metodą SI z wykorzystaniem szumu sejsmicznego daje większy zasięg głębokościowy rozpoznania (poniżej 50 m), co nie jest osiągalne typowymi metodami sejsmiki inżynierskiej. Pozwala to na śledzenie głębszych powierzchni poślizgu. Ponadto obserwowane zmiany prędkości fali poprzecznej w strefach osuwiska zmniejszały się dwu-, a nawet trzykrotnie. Spadki prędkości fali S korelowały się z pomiarami przemieszczenia prowadzonymi na powierzchni. Natomiast autorzy zauważyli nieznaczny, lecz wyraźny spadek względnej prędkości fali Rayleigha odpowiadający wzrostowi przemieszczenia pomierzonemu metodą geodezyjną w dobowych pomiarach w zakresie częstotliwości od 1,3 do 10 Hz.

Podobne badania względnej zmiany $\Delta V/V$ prędkości fali Rayleigha na podstawie korelacji wzajemnej szumu sejsmicznego rejestrowanego na osuwisku Pont Bourquin w szwajcarskich Alpach prowadzili Mainsant i in. (2012). Badania przeprowadzili oni w zakresie częstotliwości od 4 do 25 Hz, a największe zmiany obserwowali w zakresie od 10 do 12 Hz (rys. 1).

Pierwszy dwuprocentowy spadek prędkości autorzy zaobserwowali po opadach deszczu w dniu 23 lipca 2010 roku. Natomiast największy spadek względnej prędkości o ok. 7% nastąpił w okresie 4 dni po opadach deszczu w dniu 14 sierpnia 2010, poprzedzając główne ruchy osuwiskowe, do których doszło kilka dni później. Autorzy podkreślili, że obserwowane względne zmiany prędkości są zależne od lokalnych zmian właściwości reologicznych osuwiska. Są one związane m.in. z wilgotnością, plastycznością, ciśnieniem porowym i zwięzłością gruntu. Intensywne zawodnienie skutkuje zmniejszeniem sztywności gruntu, a to w efekcie powoduje zmniejszenie wartości prędkości fali poprzecznej.

Mając na uwadze dotychczasowe doświadczenia w rozwoju metody interferometrii sejsmicznej, autorzy pracy podjęli się zadania sprawdzenia przydatności metody SI do analizy budowy i właściwości przypowierzchniowego ośrodka geologicznego na obszarze osuwiska w warunkach fliszu karpackiego. Przedstawione w tej pracy badania wykonano na fragmencie aktywnego osuwiska Just-Tęgoborze. Teren badań wybrano w części osuwiska szczegółowo rozpoznanego pod kątem geologicznym (Geotech 2012). W badaniach metodą interferometrii sejsmicznej wykorzystano wysokoczęstotliwościowy, lokalny szum sejsmiczny, generowany głównie przez intensywny ruch samochodowy na przebiegającej w bezpośrednim sąsiedztwie drożdze krajowej nr 75. Badania posłużyły jednocześnie do weryfikacji własnego algorytmu SI (Marcak in. 2014) bazującego na krzywej dyspersji.



Rys. 1. Wykres względnej zmiany $\Delta V/V$ prędkości fali Rayleigha na osuwisku Pont Bourquin w szwajcarskich Alpach. Linia pionowa 1: pierwszy spadek prędkości (2%). Linia pionowa 2: największy spadek prędkości (7%). Pionowe zacieniowane pole oznacza dni, w trakcie których doszło do osunięcia się mas skalnych (Mainsant i in. 2012)

Fig. 1. Graph of relative changes in the velocity of the Rayleigh wave ($\Delta V/V$) at the Pont Bourquin landslide in the Swiss Alps. Vertical line 1: first decrease in velocity (2%). Vertical line 2: strong decrease in velocity (7%). Vertical shaded area marks the days of rock masses sliding (Mainsant et al. 2012)

W pracy autorzy omówili wybrane podstawowe zagadnienia metodyczne związane z pomiarami interferometrii sejsmicznej. Scharakteryzowali metodykę pomiarową oraz metodykę przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych. W zasadniczej części artykułu omówiono wyniki zobrazowania budowy geologicznej osuwiska Just, zwłaszcza pod kątem położenia przypuszczalnej, najpłycej położonej powierzchni poślizgu oraz występującej strefy osłabienia związanej z lokalnym zawodnieniem ośrodka.

1. Podstawowe założenia metodyki badań

1.1. Metodyka pomiarowa

Pomiary metodą SI zostały wykonane w wersji pasywnej z rejestracją szumu sejsmicznego w zakresie częstotliwości od 0,1 do 100 Hz. W rejonie badań głównym źródłem szumu były przejeżdżające drogą krajową nr 75 pojazdy, głównie samochody ciężarowe. Rejestracja odbywała się przy użyciu trójskładowych, szerokopasmowych sejsmometrów Güralp CMG-6TD (rys. 2), których czułość zapisu amplitudy prędkości drgań sejsmicznych wynosi $2 \times 1200 \text{ V/m/s}$ (tab. 1).

Pomiary wykonano w dwóch seriach, w styczniu i w marcu 2015 roku. Odległość między poszczególnymi sejsmometrami była różna i wynosiła od 5 do 20 metrów. Rejestracja szumu sejsmicznego trwała 60 minut z krokiem próbkowania równym 10 ms (tab. 2). Przykład sejsmogramu zarejestrowanego szumu sejsmicznego w okresie 30 minut wraz z jego widmem amplitudowym przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Sejsmometr CMG-6TD firmy Güralp Systems Ltd. (<http://www.guralp.com/>)

Fig. 2. CMG-6TD seismometer (Güralp Systems Ltd.; <http://www.guralp.com/>)

TABELA 1. Zestawienie najważniejszych parametrów technicznych sejsmometru CMG-6TD firmy Güralp Systems Ltd. (vide Isakow i in. 2014)

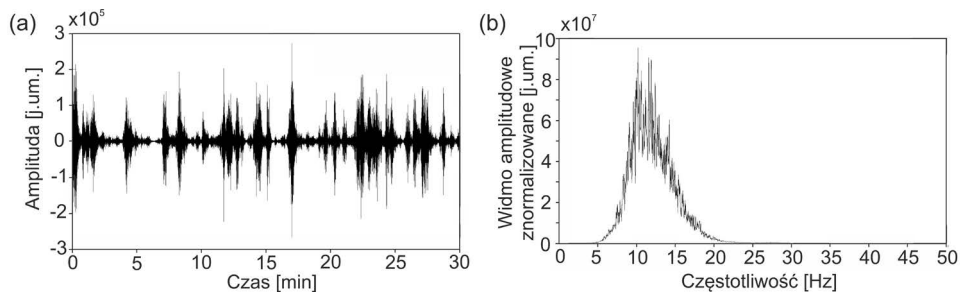
TABLE 1. Most important technical parameters of the CMG-6TD seismometer (Güralp Systems Ltd.; vide Isakow et al. 2014)

Nazwa parametru	Wartość parametru
Pasma częstotliwości	30 s – 100 Hz
Czułość	2 x 1200 V/m/s
Wyjście	± 10 V (20 V <i>peak-to-peak</i>)
Odporność międzykanałowa	> 60 dB
Liniowość	> 95 dB
Format danych	GCF przez RS232, Firewire, Ethernet lub Wi-Fi
Pamięć wewnętrzna	16 GB Flash
Pobór mocy	65mA/12V
Napięcie zasilania	10 – 36V DC
Temperatura pracy	-40 to +65°C
Wymiary	Ø154 mm x 207 mm
Masa	2,7 kg (system <4,1kg)
Obudowa	Anodyzowane aluminium

TABELA 2. Zestawienie parametrów pomiaru metodą interferometrii sejsmicznej na terenie osuwiska Just-Tęgoborze

TABLE 2. Parameters of seismic interferometry measurements taken at the Just-Tęgoborze landslide

Nazwa parametru	Opis
Rodzaj źródła	źródło pasywne
Liczba sejsmometrów	11
Odległość między sejsmometrami	różna (5–20 m)
Krok próbkowania	10 ms
Czas rejestracji	60 min
Długość profilu	95 m



Rys. 3. Przykład sejsmogramu zarejestrowanego szumu sejsmicznego w okresie 30 minut (a) wraz z jego widmem amplitudowym (b) na osuwisku Just-Tęgoborze

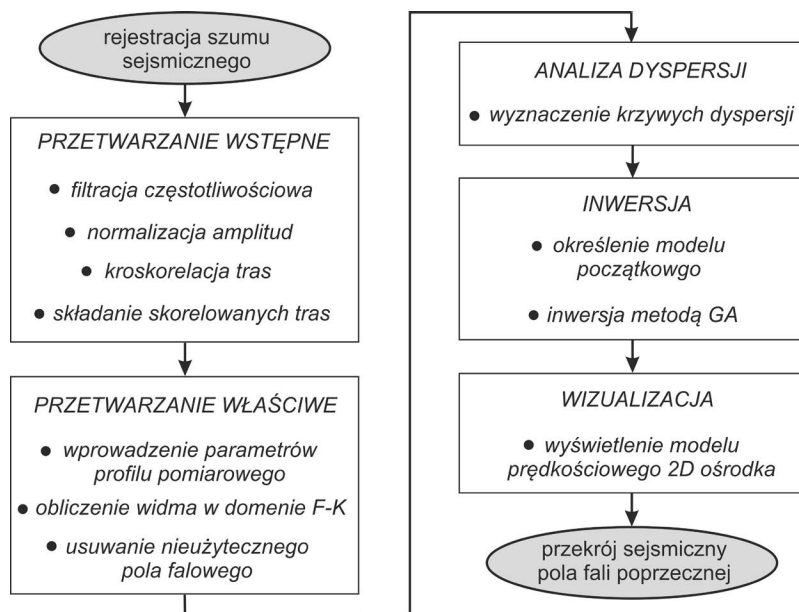
Fig. 3. Example of a seismogram showing seismic noise (a) and its amplitude spectrum (b) recorded within 30 min at the Just-Tęgoborze landslide

1.2. Metodyka przetwarzania i interpretacji danych

Procedury przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych zostały wykonane w programie Matlab oraz Geogiga Seismic Pro. Schemat procedury przedstawiono na rysunku 4.

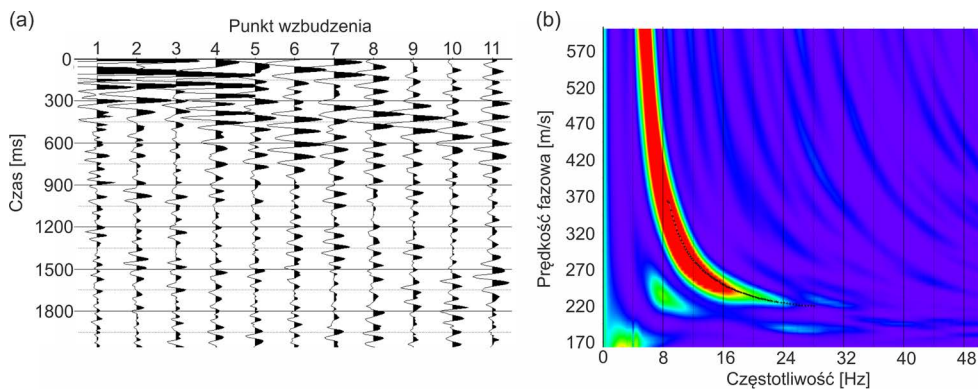
Uzyskane w wyniku rejestracji szumu sejsmicznego zapisy pionowej amplitudy prędkości drgań sejsmicznych zostały poddane filtracji częstotliwościowej w celu wygładzenia ich widma amplitudowego w zakresie od 7 do 35 Hz. Następnie amplitudy zostały znormalizowane i w ten sposób przygotowane dane poddano kroskorelacji. Po obliczeniu i złożeniu korelogramów zastosowano przetwarzanie właściwe. Obejmowało ono wprowadzenie parametrów profilu pomiarowego, obliczenie widma w domenie f-k (częstotliwość – liczba falowa), a także usunięcie nieużytecznej części pola falowego w domenie x-t (odległość – czas), które wykonane zostało w celu poprawienia rozdzielczości obrazu dyspersji, a tym samym łatwiejszej analizy krzywych dyspersji (rys. 5).

W ramach interpretacji wykonano inwersję krzywych dyspersji w celu wyznaczenia zmiany prędkości fali poprzecznej wraz z głębokością. W procedurze inwersji określono parametry modelu początkowego w postaci miąższości i prędkości kolejnych warstw sejsmicznych, a następnie metodą algorytmu genetycznego GA obliczono model prędkościowy ośrodka 2D. Efektem końcowym jest przekrój sejsmiczny pola prędkości fali poprzecznej.



Rys. 4. Schemat przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych zarejestrowanych na osuwisku Just-Tęgorborze metodą interferometrii sejsmicznej

Fig. 4. Procedure of processing and interpreting seismic data recorded at the Just-Tęgorborze landslide by means of seismic interferometry



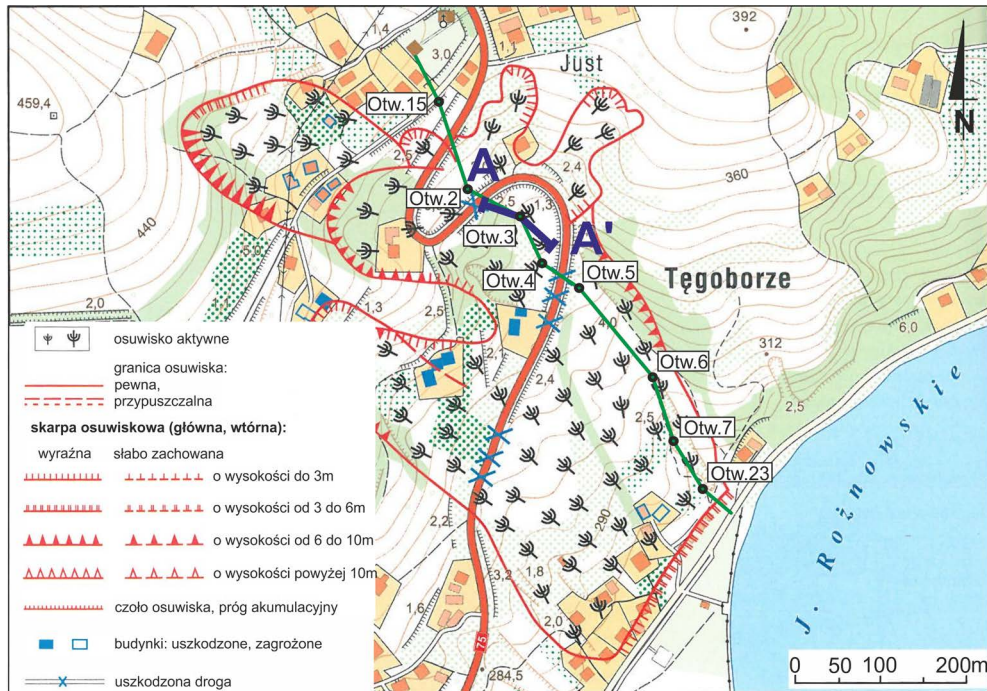
Rys. 5. Przykład korelogramu zapisów szumu sejsmicznego (a) oraz krzywa dyspersji z zaznaczeniem mody podstawowej (b)

Fig. 5. Example of a correlogram showing seismic noise (a) and a dispersion curve with basic mode indicated (b)

2. Położenie i warunki geologiczne rejonu badań

Badania sejsmiczne zostały przeprowadzone na terenie aktywnego osuwiska Just-Tęgorborze. Osuwisko to znajduje się przy drodze krajowej nr 75 w miejscowości Świdnik i Tęgorborze w gminie Łososina Dolna (powiat nowosądecki, województwo małopolskie).

Osuwisko jest zlokalizowane na grzbietach Kamiennej i Jaworza w Beskidzie Wyspowym poniżej przełęczy Św. Justa, na stokach o ekspozycji południowo-wschodniej i południowej (rys. 6).

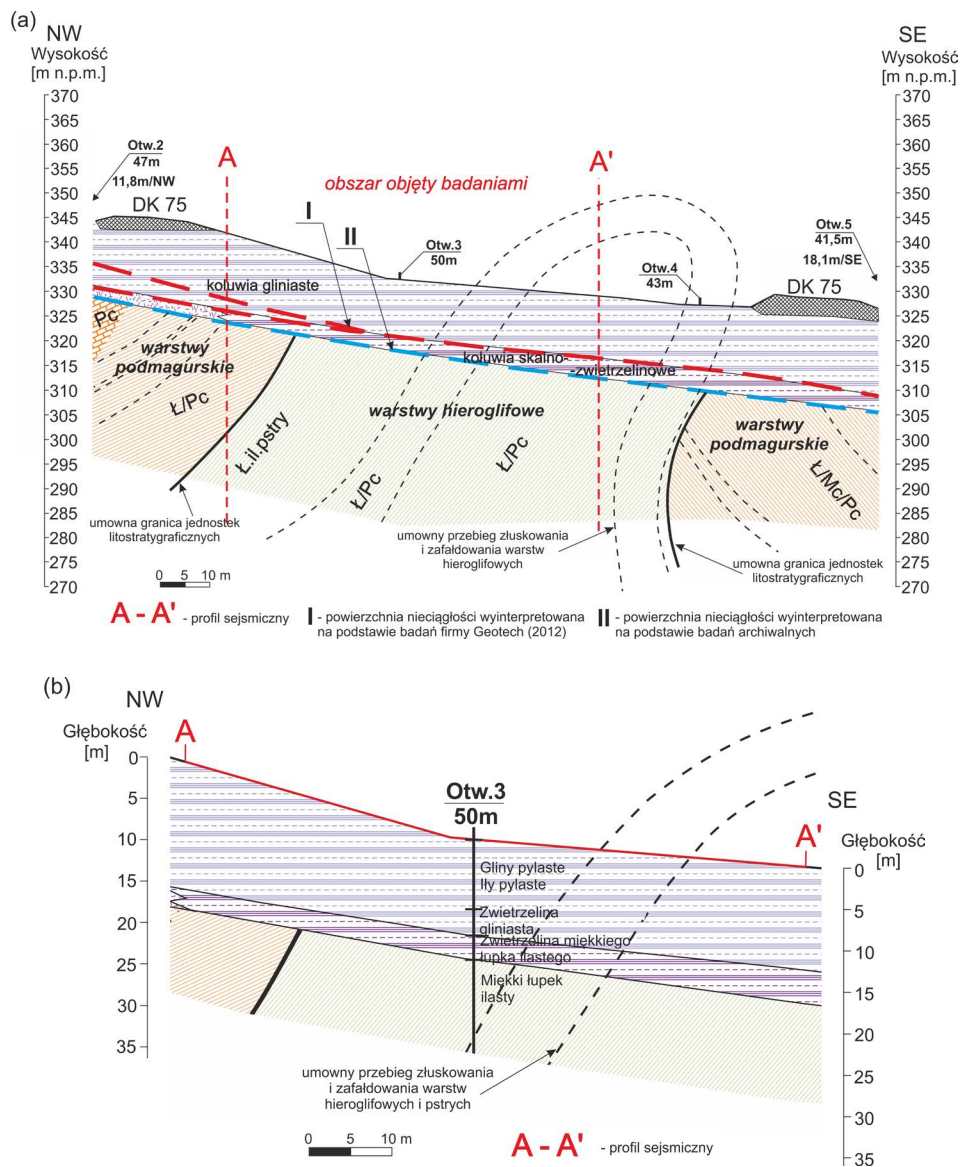


Rys. 6. Szkic osuwiska Just-Tęgoborze z zaznaczonym przebiegiem przekroju geologicznego i lokalizacją otworów wiertniczych oraz profilem sejsmicznym A-A' na podkładzie mapy topograficznej (na podstawie: Chowaniec i Wójcik red. 2012)

Fig. 6. Sketch of the Just-Tęgoborze landslide location, including a geological cross-section with wells indicated and the seismic profile A-A' developed with seismic interferometry, on a base topographic map (on the basis of Chowaniec, Wójcik, ed. 2012)

Teren osuwiskowy Just-Tęgoborze położony jest w obrębie płaszczyny magurskiej na terenie Karpat fliszowych. W podłożu badanego fragmentu osuwiska występują warstwy podmagurskie i hieroglify wykształcone w postaci serii łupkowej niekiedy z wkładkami utworów piaskowcowych (rys. 7). Utwory te są zaburzone tektonicznie. Na podstawie analizy rdzeni wiertniczych, w części stropowej serii łupkowej kąt upadu warstw wynosi 60° w kierunku północnym. Na utworach fliszowych leżą niezgodnie czwartorzędowe, miękkie koluwia skalno-zwietrzelinowe, które przykryte są przez średnio zwięzłe i bardzo spoiste koluwia gliniaste (Geotech 2012). Azymut ruchu osuwiska wynosi 130° , natomiast średnie nachylenie osuwiska to $11,8^\circ$ (Chowaniec i Wójcik red. 2012).

Według opracowania Geotechu (2012) na obszarze osuwiska wydzielono kilka powierzchni poślizgu. Główna powierzchnia przebiega na zróżnicowanej głębokości 3,0–15,8 m i jest odpowiedzialna za bezpośrednie zniszczenia na drodze krajowej nr 75. Ponadto wydzielono również głębszą, starszą powierzchnię poślizgu rozwiniętą na głębokości



Rys. 7. Rzut profilu sejsmicznego A-A' na fragmencie przekroju geologiczno-inżynierskiego (a) oraz uszczegółowiony fragment tego przekroju dla obszaru objętego badaniami (b) (na podstawie: Geotech 2012)

Fig. 7. Projection of seismic profile A-A' on part of the geological-engineering cross-section (a) and a detailed part of cross-section of the studied area (b) (on the basis of Geotech 2012)

15,0–30,0 m. Przypuszczalnie istnieją także powierzchnie poślizgu na większej głębokości. Na podstawie wykonanych prac geologicznych można wnioskować, że główną przyczyną powstania osuwiska Just są uwarunkowania tektoniczne, a w szczególności nasunięcie jednostki magurskiej na jednostki przedmagurskie oraz towarzyszące temu uskoki.

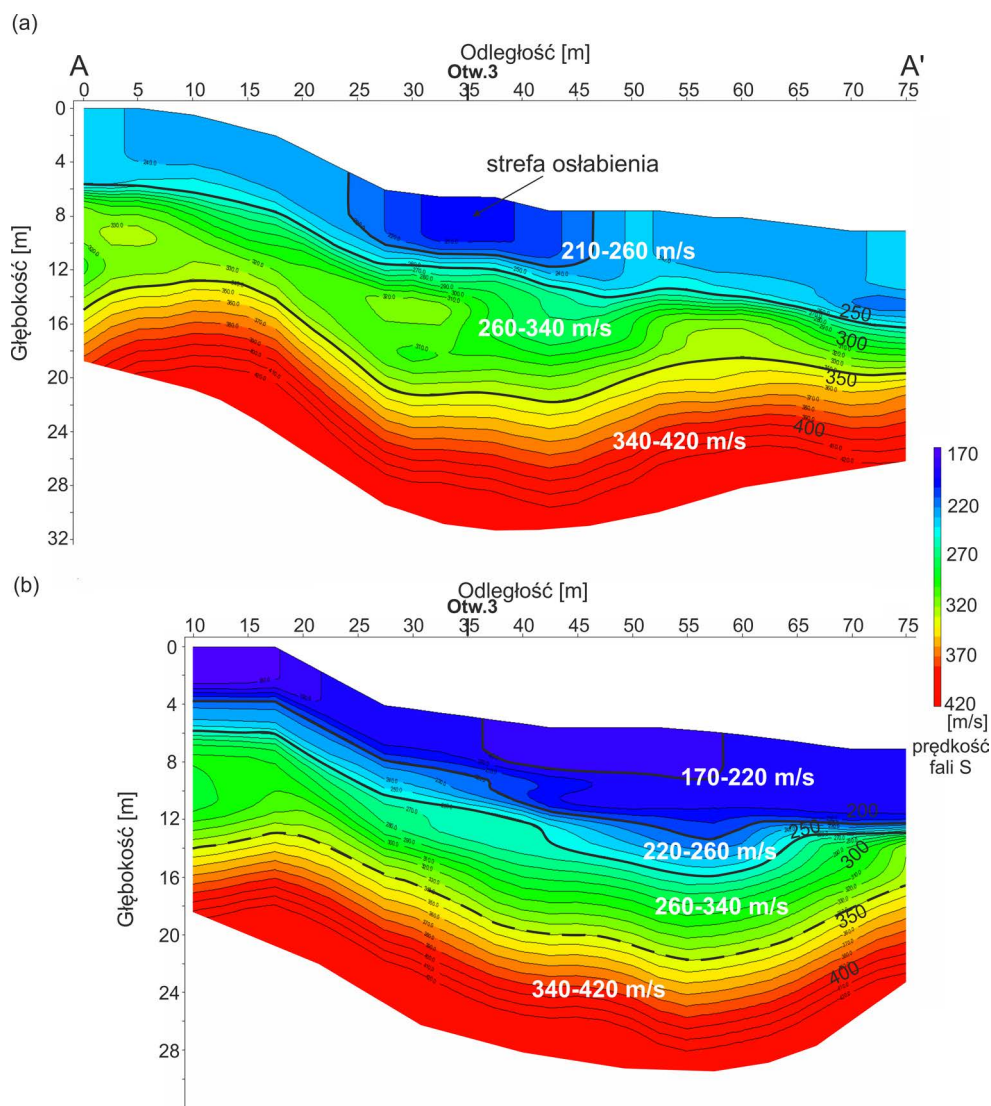
Osuwisko jest aktywne od ponad pięćdziesięciu lat, co dokumentowane jest regularnym niszczeniem drogi krajowej nr 75. Na drodze tej obserwowane jest bardzo duże natężenie ruchu kołowego. W wyniku działania ruchów osuwiskowych pojawiają się nierówności i spękania nawierzchni asfaltowej, zapadanie się lub przesunięcia nasypów drogowych w kierunku zrzutu osuwiska oraz miejscami zaciskanie się rowów odwadniających. Powierzchnia terenu w rejonie badań jest nierówna: w górnej części znajduje się stroma skarpa, a w dolnej jest wypłaszczona. U podnóża skarpy, w sąsiedztwie otworu nr 3, zaobserwowano duże zawodnienie gruntu.

3. Wyniki badań i ich analiza

Przekrój sejsmiczny opracowany na podstawie I serii pomiarowej w okresie zimowym o mniejszym zawodnieniu ośrodka, o długości 75 metrów, przedstawiono na rysunku 8a.

Głębokość rozpoznania ośrodka geologicznego wyniosła około 25 metrów. Na przekroju tym zaznaczają się wyraźnie trzy warstwy o zróżnicowanych prędkościach fali typu S. W strefie przypowierzchniowej, o najmniejszych prędkościach w przedziale wartości 210–260 m/s, znajduje się również lokalne minimum w części środkowej. Strefa ta związana jest najprawdopodobniej z większym zawodnieniem ośrodka, o czym świadczą zaobserwowane sączenia wody podczas wykonywania otworu wiertniczego nr 3 oraz stwierdzone zawilgocenie powierzchni terenu w trakcie realizacji pomiarów. Warstwa pierwsza charakteryzuje się praktycznie stałą miąższością wynoszącą około 5 m na całej długości profilu. Kolejna, środkowa warstwa charakteryzuje się prędkością fali typu S w przedziale wartości 260–340 m/s. Jej miąższość jest zmienna i przeważnie wynosi około 8–10 metrów, a miejscami maleje do 5 metrów na 70–75 m profilu. W środkowej części profilu, poniżej strefy osłabienia w warstwie pierwszej, miąższość warstwy drugiej jest największa, tworząc formę w kształcie niecki. Najgłębiej położona warstwa charakteryzuje się wartościami prędkości fali poprzecznej z przedziału 340–420 m/s. Strop tej strefy na profilu sejsmicznym występuje na głębokości 10–15 metrów. Niecka zaznaczona w drugiej warstwie występuje w strefie słabszego masywu skalnego w warstwie trzeciej, głównie łupków ilastych pstrych. W otoczeniu występuje mocniejszy masyw łupkowo-piaskowcowy (rys. 7). Granica stropu trzeciej warstwy przypuszczalnie jest powierzchnią poślizgu. Przekrój sejsmiczny opracowany na podstawie II serii pomiarowej, w okresie silnych roztopów wiosennych, charakteryzuje się istotnym zmniejszeniem prędkości fali typu S oraz zmianą przebiegu dotychczasowych granic sejsmicznych (rys. 8b). Dla wyraźniejszego podkreślenia różnic zaznaczono granice warstw według poziomic wyinterpretowanych na rysunku 8a. Strefa osłabienia w pierwszej warstwie przypowierzchniowej powiększyła się w kierunku spadku powierzchni terenu. Analogiczny efekt można zaobserwować w warstwie drugiej i trzeciej, przy czym zasięg zmian wpływu dodatkowego zawodnienia zmniejsza się z głębokością. W efekcie można zauważyć, że niecka w stropie warstwy trzeciej znacząco się wydłużyła w kierunku spadku powierzchni terenu.

W odniesieniu do przekroju geologicznego badanego rejonu (rys. 7) można zauważyć, że dwie pierwsze, przypowierzchniowe warstwy sejsmiczne odpowiadają utworom koluwalnym gliniastym i skalno-zwietrzelinowym. Pojawiającą się na głębokości około 10–15 metrów granicę sejsmiczną warstwy trzeciej można korelować ze stropem mniej zwietrzałych



Rys. 8. Przekroje sejsmiczne pola prędkości fali poprzecznej na osuwisku Just-Tęgorborze opracowane metodą interferometrii sejsmicznej: pomiar w dniu 23.01.2015 r. (a), pomiar w dniu 09.03.2015 r. (b)

Fig. 8. Seismic profiles of shear wave velocity field at the Just-Tęgorborze landslide analyzed by means of seismic interferometry; measurement taken on January 23, 2015 (a), measurement taken on March 9, 2015 (b)

miękkich skał serii łupkowej i łupkowo-piaskowcowej. Skały te tworzą podłoże fliszowe osuwiska mniej naruszone przez ruchy osuwiskowe. Granica sejsmiczna stropu tych utworów może być wstępnie określona jako powierzchnia poślizgu osuwiska (rys. 7a). Niepokorny kształt tej granicy w części środkowej przekroju sejsmicznego można tłumaczyć głębszą erozją występującą w tym miejscu miękkich pstrych łupków ilastych. Utwory koluwalne w obrębie tej niecki mogą być jednocześnie lokalnie zawodnione.

Podsumowanie

Wyniki badań fragmentu osuwiska Just-Tęgoborze metodą interferometrii sejsmicznej z wykorzystaniem lokalnego szumu sejsmicznego pokazały, że istnieje możliwość zobrażenia budowy i właściwości ośrodka. Ponadto wyniki te wyraźnie pokazują zmiany w ośrodku, jakie zachodzą w różnym stanie zawodnienia ośrodka. Pomiary wykonano w okresie względnie suchym, w styczniu i w okresie silnego zawodnienia w czasie roztopów wiosennych w marcu. Wyniki uzyskane metodą interferometrii sejsmicznej uwiadcniają, jak intensywne zawodnienie spowodowało zmniejszenie sztywności ośrodka. Wyniki te wskazują również na położenie i rozwój takiej strefy osłabienia. Są to cenne dane dla projektanta różnego rodzaju zabezpieczeń osuwiska.

Położenie wyinterpretowanych granic sejsmicznych, zwłaszcza w okresie suchym, można skorelować z granicami litologicznymi pokazanymi na przekroju geologiczno-inżynierskim (rys. 7). Podobnie można przyjąć, że przypuszczalny przebieg powierzchni poślizgu pokrywa się z granicą mniej zwietrzałego podłoża skalnego pokazaną na przekroju sejsmicznym.

Wyniki badań przedstawione w tej pracy są pierwszą częścią szerszej zaplanowanego programu badań, podobnego do zakresu przedstawionego w pracach Renaliera i in. (2010) i Mainsanta i in. (2012). Aktualny etap badań jest istotny z tego powodu, że dowodzi możliwości zobrażenia budowy i właściwości ośrodka, a także położenia przypuszczalnej powierzchni poślizgu. Dalsze badania będą kontynuowane pod kątem czasoprzestrzennej analizy ruchu osuwiskowego, w warunkach bardziej rozbudowanej geometrii profili pomiarowych.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr PBS1/A2/13/2013 o akronimie LOFRES uzyskanego w ramach I konkursu Programu Badań Stosowanych dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Chowaniec, J. i Wójcik, A. red. 2012. *Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas – przewodnik*. Wydawnictwo Kartograficzne Compass, Kraków, s. 89–91.
- Curtis A. i in. 2006 – Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R. i Wapenaar, K. 2006. Seismic interferometry – Turning noise into signal. *The Leading Edge* 25, s. 1082–1092.
- Duguid C. i in. 2011 – Duguid, C., Halliday, D. i Curtis, A. 2011. Source-receiver interferometry for seismic wavefiled construction and ground-roll removal. *The Leading Edge* 30, s. 838–843.
- Geotech Sp. z o.o., 2012 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla opracowania systemu zabezpieczenia strefy osuwiskowej nr MPL0051, w ciągu drogi krajowej nr 75, km od 51+900 do 52+700 w miejscowości Tęgoborze-Just.
<http://www.guralp.com/>
- Isakow Z. i in. 2014 – Isakow, Z., Pilecki, Z. i Sierodzki, P. 2014. Nowoczesny system LOFRES niskoczęstotliwościowej sejsmiki pasywnej. *Przegląd Górniczy* 7, s. 92–96.
- Mainsant G. i in. 2012 – Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., Jongmans, D., Michoud, C., Jaboyedoff, M. 2012. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research* vol. 117, F01030.
- Marcak H. i in. 2014 – Marcak, H., Pilecki, Z. i Czarny, R. 2014. *Interferometria sejsmiczna w zagadnieniach górniczych*. Kraków, Wyd. IGSMiE PAN.

- Marcak H. i in. 2014 – Marcak, H., Pilecki, Z., Isakow, Z. i Czarny, R. 2014. Możliwości wykorzystania interferometrii sejsmicznej w górnictwie. *Przegląd Górniczy* 7, s. 74–83.
- Renalier F. i in. 2010 – Renalier, F., Bièvre, G., Jongmans, D., Campillo, M. i Bard, P.-Y. 2010. Clayey landslide investigations using active and passive V_s measurements. *Advances in Near-Surface Seismology and Ground-Penetrating Radar*, Geophys. dev. Ser., vol. 15, red. R.D. Miller, J.H. Bradford, K. Holliger, rozdział 24, Soc. of Explor. Geophys., Tulsa, Okla, s. 397–414.
- Schuster, G. 2010. *Seismic Interferometry*. Cambridge University Press, New York.
- Xia J. i in. 1999 – Xia, J., Miller, R.D. i Park, Ch.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics* vol. 64, no. 3, s. 691–700.

