



Iwona STAN-KŁECZEK*, Artur MARCINIAK**

Zastosowanie MASW i sejsmiki refrakcyjnej do badania anizotropii prędkości w masywie skalnym

Streszczenie: Jedną z najbardziej charakterystycznych cech skał jest występowanie w nich spękań o różnym kształcie i wypełnieniu. Te nieciągłości powierzchni mają istotny wpływ na właściwości fizyczne skał. Efektem uprzywilejowania określonych kierunków jest anizotropia właściwości sprężystych masywu, w szczególności zaś anizotropia prędkości fal sejsmicznych, charakteryzująca się tym, że prędkość fal w kierunku prostopadłym do biegu spękań jest mniejsza niż w kierunku równoległym.

Prezentowane badania prowadzone były w kopalni dolomitu Podleśna. W celu określenia związku pomiędzy szczelinowatością a prędkością fal sejsmicznych wykorzystano metodę sejsmiki refrakcyjnej (RFR) oraz wielokanałową analizę fal powierzchniowych (MASW). Otrzymane wartości prędkości fal sejsmicznych dla azymutów 0, 30, 60, 90, 120 i 150° porównano z kierunkami systemów spękań pomierzonych kompasem geologicznym. Do opisu kierunkowych rozkładów prędkości wykorzystano również rachunek tensorowy, który pozwala na odwzorowanie anizotropii sejsmicznej. Uzyskane maksima prędkości dla fali P pomierzonej za pomocą sejsmiki refrakcyjnej, jak i wartości prędkości fali S uzyskanej metodą MASW pokazują korelację z kierunkami głównych systemów spękań pomierzonych kompasem geologicznym, co pozwala na wykorzystanie wymienionych technik do badania szczelinowatości masywów skalnych.

Słowa kluczowe: sejsmika refrakcyjna (RFR), wielokanałowa analiza fal powierzchniowych (MASW), szczelinowatość, anizotropia

The use of MASW and seismic refraction to study the anisotropy of S-wave velocity

Abstract: One of the most characteristic features of rocks is occurrence different kinds and sizes of cracks. These surface discontinuities have an important influence on the physical properties of rocks, especially on seismic wave velocity. The preferred orientation of crack systems involves the anisotropy of seismic wave velocity. It is characterized by a wave velocity that is smaller in the direction perpendicular to the crack plane than in the parallel direction. The presented study was carried out in the Triassic dolomite quarry "Podleśna" located in the

* Dr, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec; e-mail: lstan@us.edu.pl

** Uniwersytet Śląski, Sosnowiec.

South of Poland. The seismic anisotropy of rock mass was measured using the seismic refraction method (RFR) and Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW). The research was conducted along oriented seismic profiles (0° , 30° , 60° , 90° , 120° i 150°) and compared with main crack systems measured on a geological compass. Tensor calculus was also applied to describe the directional distribution of seismic wave velocity. The obtained maximal value of seismic P-wave velocity (RFR) and S-wave velocity (MASW) show very good agreement with the directions of the main crack systems which allow these methods to be used to study of fracturing.

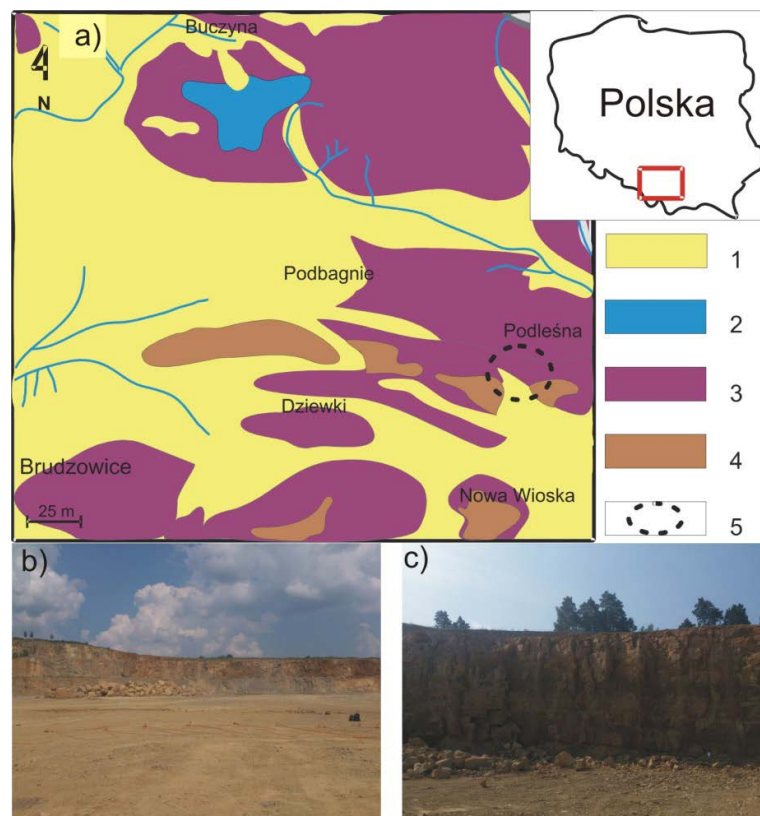
Keywords: Seismic refraction (RFR), Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW), fracturing, anisotropy

Wprowadzenie

Spękania występują w skałach powszechnie i mają znaczący wpływ na właściwości fizyczne skał co powoduje, że stają się one bardziej podatne na oddziaływania mechaniczne. Występowanie spękań ma również wpływ na propagację fali sprężystej. Widoczne jest to w zmianach wartości prędkości fali w zależności od kierunku jej rozchodzenia się względem orientacji występujących w masywie systemów spękań. W Polsce prowadzone były badania zależności między anizotropią spękań a anizotropią prędkości dla wapieni i dolomitów zalegających na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Idziak 1992) a także dla piaskowców oraz skał magmowych Polski południowej (Stan-Kłeczek 2010; Stan-Kłeczek i in. 2012). W literaturze światowej również można znaleźć przykłady badania wpływu spękań na anizotropię prędkości (Barton 2007; Vilhelm i in. 2011; Živor i in. 2011).

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań w kopalni dolomitu Podleśna zaobserwowano związek między głównymi kierunkami spękań zmierzonymi kompasem geologicznym a azymutalnymi rozkładami prędkości fali P i S wyznaczonych metodą sejsmiki refrakcyjnej (RFR) i MASW. Zauważono, że zależność tą jest widoczna dla fali P, a w mniejszym stopniu dla fali S. W przypadku fali S różnice między maksymalnymi prędkościami a głównymi systemami spękań są większe i nie wszystkie systemy spękań znajdują odzwierciedlenie w maksimach prędkości. Wykorzystano zatem metodę wielokanałowej analizy fal powierzchniowej (MASW), która bazuje na wyodrębnieniu fal poprzecznych S z zapisu fal powierzchniowych typu Rayleigha na sejsmogramie (Park i in. 1999). Związek prędkości fali typu S, z parametrami gęstości objętościowej i dynamicznym modułem Kirchoffa powodują, iż metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w pracach geoinżynierskich (Richard 2013; Shelley i in. 2014). Połączenie metody analizy fal powierzchniowych z klasycznym badaniem refrakcyjnym ośrodka pozwala na uzyskanie modelu zawierającego nie tylko parametry prędkości i miąższości poszczególnych warstw, lecz także dynamiczny moduł ścinania oraz gęstość objętościową ośrodka wraz z ich zmianami z przyrostem głębokości (Dal Moro 2014).

Celem pracy było sprawdzenie możliwości wykorzystania metody MASW do badania anizotropii prędkości fal sejsmicznych na przykładzie badań przeprowadzonych na dolomitach triasowych. Pomiar prowadzone były w kopalni dolomitu Podleśna. Złoże dolomitów triasowych i dewońskich Podleśna leży na terenie miejscowości Żeliszewice w gminie Sievierz w województwie śląskim (rys. 1). Powierzchnia złoża wynosi 60 ha. Najstarszymi warstwami w obrębie złoża są utwory dewonu. Występują one w centralnej części złoża. Żywełt charakteryzuje się bardzo twardymi dolomitami drobno- i średniokrystalicznymi o barwie ciemnoszarej. Występują również ciemnoszare dolomity rafowe z amfiborami. W dolomitach tego wieku rozpoznano liczne żyłki kwarcytowe, które przebiegają w różnych



Rys. 1. Mapa geologiczna północnej części gminy Siewierz (a) : 1 – Plejstocen, 2 – Jura, 3 – Trias, 4 – Dewon, 5 – kopalnia dolomitu „Podleśna”. Widok kamieniołomu (b) i (c).

Fig. 1. Geological map of the Northern part of the Siewierz municipality: 1 – Pleistocene overburden, 2 – Jurassic rocks, 3 – Triassic rocks, 4 – Devonian rocks, 5 – Dolomite quarry. View of quarry (b) and (c)

kierunkach. Ich grubość waha się od 2 do 10 mm. Mineral wypełniający żyłki jest barwy białej, niekiedy żółtawej, miejscami jest także żelaziony (Pinięcka 2008).

Trias charakteryzuje się niezgodnym zaleganiem na dewonie, stratygraficznie i tektonicznie. Granica pomiędzy dewonem i triasem jest o charakterze erozyjnym. Utwory górnego wapienia muszlowego to dolomity płytowe, które otaczają utwory dewońskie od strony północnej i północno-wschodniej. Natomiast od strony południowej i zachodniej zalegają dolomity diploporowe środkowego wapienia muszlowego. Miąższości złoża wahają się od 0 do 63 m.

1. Metodyka badań

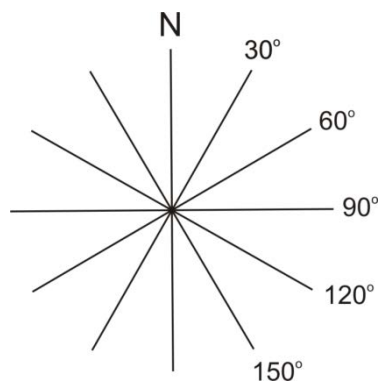
1.1. Pomiary spękań

Pomiary orientacji spękań wykonywane były kompasem geologicznym na wybranych losowo szczelinach w ścianach odsłonięć w dwóch kierunkach w przybliżeniu prostopadłych

do siebie. Zmierzono około 150 spękań, co gwarantuje powtarzalność i porównywalność wyników. Do analizy wykorzystano spękania o kącie upadu większym od 70° , co pozwoliło na potraktowanie spękań jako prawie pionowych i zredukowanie przestrzennych rozkładów orientacji spękań do rozkładów powierzchniowych. Korzystając z azymutów biegu oraz kątów upadu szczelin, sporządzono powierzchniowe diagramy orientacji spękań, dzięki którym można było wydzielić główne systemy spękań.

1.2. Sejsmika refrakcyjna (RFR)

Stanowisko pomiarowe zlokalizowane było bezpośrednio w kamieniołomie, aby wyeliminować wpływ nadkładu. Pomiary wykonywane były w ściśle określonych profilach sejsmicznych, zorientowanych promieniście co 30° zaczynając od kierunku północy (rys. 2). Miejsce pomiarowe zostało dobrane tak, aby powierzchnia była stosunkowo płaska a kąt nachylenia terenu nie przekraczał 10° .



Rys. 2. Położenie profili sejsmicznych w układzie azymutalnym

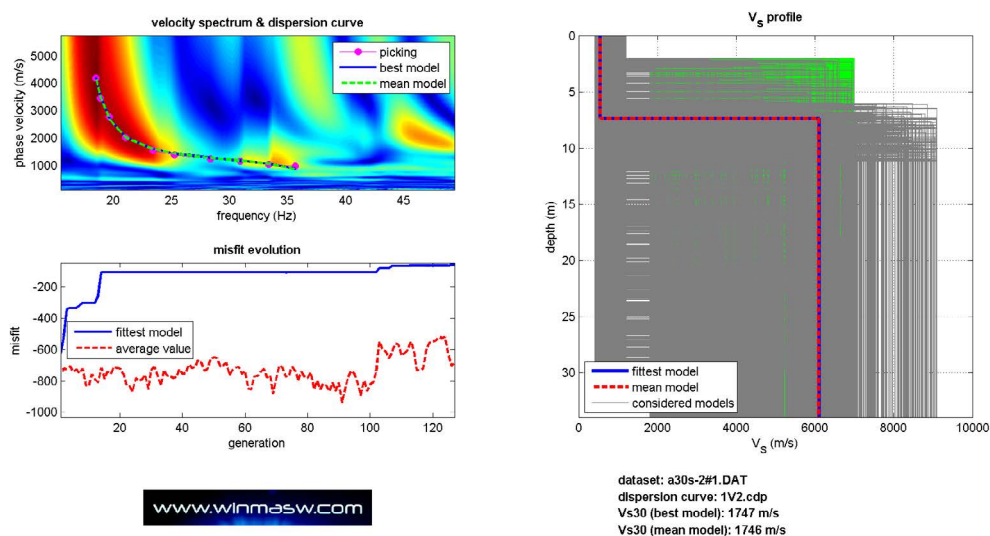
Fig. 2. Location of azimuthal seismic profile

Do badań wykorzystano dwadzieścia cztery pionowe 10-herzowe geofony rozmieszczone co 2 m, stąd długość profilu pomiarowego wynosiła 48 m. Punkt wzbudzenia fali sejsmicznej został zlokalizowany na początku oraz końcu profilu, jak również w odległości 2 m od początku i 2 m od końca profilu. Fala sejsmiczna wzbudzana była za pomocą 8-kilogramowego młota, którym uderzano w metalową płytkę. Pomiary były rejestrowane przez 24-kanałową aparaturę P.A.S.I (Mod.16S24-N). Do analizy uzyskanych danych stosowano program Pickwin oraz Plotrefa firmy SeisImager.

1.2. Wielokanałowa analiza fal powierzchniowych (MASW)

Pomiary MASW wykonano na profilach refrakcyjnych, przy czym użyto pionowe geofony 4,5 Hz. Z zapisu sejsmicznego wynoszącego 1 sekundę, wyznaczony został fragment sejsmogramu zawierający informacje o falach powierzchniowych. Tak wyselekcjonowane

dane zostały przefiltrowane w paśmie od 0 do 50 Hz filtrem Butterwortha (Islam i in. 2012). Pozwoliło to na usunięcie wysokoczęstotliwościowych składowych zapisu, co nieznacznie poprawiło czytelność krzywej dyspersji. Tak przetworzone dane zostały przeliczone z zapisu w funkcji czasu i amplitudy na prędkość fazową i częstotliwość wykorzystując transformację typu τ - π . (Lu i in. 2013). Wyznaczone krzywe dyspersji poddano modelowaniu z wykorzystaniem algorytmu genetycznego (Dal Moro i in. 2014). Następnie obliczono prędkość fali S, a także gęstość objętościową ośrodka dla poszczególnych warstw (rys. 3).



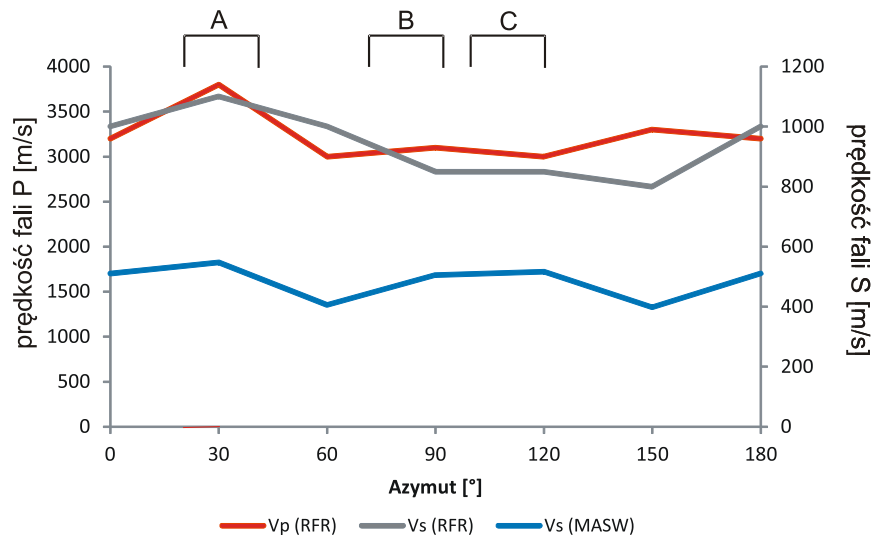
Rys. 3. Wyniki dla profilu o azymucie 30 stopni: lewa strona, rysunek u góry: krzywa dyspersji (niebieska linia – najlepsze dopasowanie modelu, linia zielona – model uśredniony), lewa strona, rysunek na dole: wykres dopasowania, prawa strona: profil głębokościowy – model obliczony (szary), model dopasowany (niebieski) oraz model uśredniony (czerwona linia przerywana)

Fig. 3. Results for 30 azimuth profile: left-top: dispersion curves (dotted – chosen, blue – best model, dashed green – mean model), left-down: plot of misfit evolution during calculations, right: calculated considered models (gray), fittest model (blue) and mean model (dashed red)

2. Wyniki i ich analiza

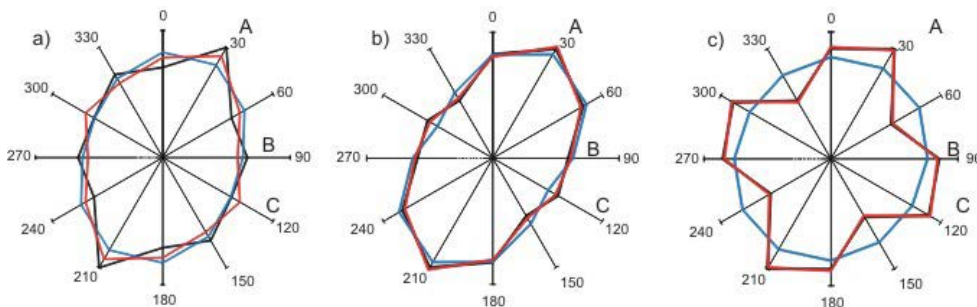
Na podstawie pomiarów parametrów orientacji spękań dla badanego odsłonięcia wyodrębniono trzy systemy spękań: A (przedział wartości kątów 20–40°), B (przedział wartości kątów 70–90°) i C (przedział wartości kątów 100–120°). Na podstawie badań refrakcyjnych przyjęto ośrodek dwuwarstwowy. W warstwie pierwszej, o miąższości 5–7 m, prędkość fali P wynosi około 1200 m/s. W warstwie drugiej prędkość fali P wynosi około 3500 m/s. Do analizy azymutalnego rozkładu prędkości fali P i S zostały wykorzystane wartości prędkości dla warstwy drugiej (rys. 4). Na lewej osi rysunku 4 znajduje się zakres prędkości dla fali P, a na prawej dla fali S.

Na rysunku 4 i 5 zostały również przedstawione wartości prędkości dla fali S uzyskane metodą MASW. Wartości prędkości są rzędu 550m/s i odpowiadają wartościom prędkości



Rys. 4. Porównanie azymutalnego rozkładu prędkości dla fali P (RFR) oraz S (RFR i MASW) z głównymi systemami spękań (A, B, C)

Fig. 4. The comparison of azimuthal distribution for P-wave velocity (RFR) and S (RFR and MASW) with the main crack systems (A, B, C)



Rys. 5. Związek pomiędzy azymutem profilu a prędkością fali P (RFR) (a), związek pomiędzy azymutem profilu a prędkością fali S (RFR)(b), związek pomiędzy azymutem profilu a prędkością fali S uzyskaną metodą MASW (c): kwadrat prędkości (linia czarna), rozkład prędkości oparty o tensor II-rzędu (linia niebieska), i tensor IV-rzędu (linia czerwona). A, B, C – główne systemy spękań

Fig. 5. Relationships between the azimuth of seismic profile and P-wave (RFR)(panel a), relation between the azimuth of the seismic profile and the S-wave (RFR) (panel b) and relation between the azimuth of the seismic profile and the S-wave (MASW) (panel c): squared velocity (black line), velocity distribution based on the tensor of rank two (blue line), and the tensor of rank four (red line). A, B, C – the main crack systems

fali S (RFR) dla warstwy pierwszej. Uzyskane wartości prędkości fali P (RFR), S (RFR i MASW) jak również dynamiczny współczynnik Poissona oraz dynamiczny moduł sprężystości poprzecznej zebrane zostały w tabeli 1. W tabeli zamieszczone zostały również wartości gęstości znajdujące się w przedziale od 2580 do 2640 kg/m³ oraz moduł sprężystości

TABELA 1. Wartości prędkości fali P i S uzyskane metodą RFR oraz prędkość fali S oraz wartości dynamicznych parametrów uzyskane metodą MASW

TABLE 1. The P- and S-wave velocities from RFR and the result of S-wave velocity from MASW

Azymut [°]	0	30	60	90	120	150
VP (RFR) [m/s]	3 200	3 800	3 000	3 100	3 000	3 300
VS (RFR) [m/s]	1 000	1 100	1 000	850	850	800
VS (MASW) [m/s]	510	547	405	505	516	398
Gęstość objętościowa [kg/m ³] (wartość aproksymowana)	2 700	2 640	2 580	2 620	2 580	2 630
Moduł sprężystości poprzecznej[MPa] (wartość aproksymowana)	533	628	330	530	554	315
Współczynnik Poissona:	0,32	0,29	0,30	0,28	0,31	0,29
Vs30 [m/s]	1 720	1 746	1 553	1 633	1 338	1 453

poprzecznej wynoszący od 315 do 629 MPa. Wartości współczynnika Poissona mieszczą się w przedziale od 0,28 do 0,32. Parametr Vs30 m/s, który odpowiada średniej prędkości fali S do głębokości 30 m wynosi od 1338 do 1746 m/s.

Otrzymany azymutalny rozkład prędkości fali P charakteryzuje się występowaniem jednego wyraźnego maksimum prędkości odpowiadającego zmierzonemu systemowi spękań A. Wartości prędkości odpowiadające systemom B i C nie są już tak duże, a zatem anizotropia jest mniej widoczna. Azymutalny rozkład prędkości fali S otrzymany metodą sejsmiki refrakcyjnej odzwierciedla anizotropię w bardzo małym stopniu, co może być spowodowane zastosowaniem do badań geofonów pionowych. Zdecydowanie lepiej odzwierciedla główne kierunki spękań prędkość fali S otrzymana metodą MASW.

Interesującym narzędziem, które pozwala na przedstawienie anizotropii właściwości fizycznych skał, takich jak prędkość fal sejsmicznych, jest rachunek tensorowy (Idziak i Stan-Kleczek 2006) opisujący kierunkowy rozkład tych parametrów. Wyniki pomiarów prędkości fal sejsmicznych posłużyły do obliczenia tensorów prędkości. Z powodu braku wartości prędkości fal w masywie niespękanym jako czynnik normalizujący przyjęto otrzymane wartości prędkości maksymalnej fali P i S. Obliczenia tensorów prędkości zostały wykonane programem Statistica. Do obliczeń wykorzystano estymację nieliniową rozwiązywaną metodą Gaussa–Newtona. Otrzymane rozkłady zostały przedstawione na rysunku 2.

Tensor prędkości drugiego rzędu określa ogólne cechy anizotropii sprężystej masywu skalnego. Tensor prędkości czwartego rzędu pozwala na uszczegółowienie informacji o rozkładach spękań, uzupełniając ogólne charakterystyki anizotropii masywu, uzyskane z tensorów drugiego rzędu.

Po obliczeniu składowych tensora drugiego i czwartego rzędu wyznaczono ich wartości i kierunki własne. Na ich podstawie określano stopień anizotropii masywu oraz osie maksymalnej i minimalnej prędkości. Składowe tensora czwartego rzędu pozwoliły na obliczenie kierunków lokalnych maksimum prędkości, wskazujących kierunki spękań w masywie skalnym. Wartości własne, azymuty osi tensora, wartości średnie oraz współczynniki anizotropii tensora prędkości II rzędu zostały zebrane w tabeli 2.

TABELA 2. Charakterystyczne wartości tensora prędkości II-rzędu

TABLE 2. Characteristic parameters of the velocity tensor

Tensor prędkości	Wartości własne tensora		Azymut osi tensora		Wartość średnia	Współczynnik anizotropii
	max	min	oś dłuższa	oś krótsza		
VP (RFR)	0,851	0,607	18°	288°	0,729	0,167
VS (RFR)	0,952	0,506	33°	303°	0,729	0,306
VS (MASW)	0,824	0,739	30°	300°	0,782	0,055

Uzyskane wyniki pokazują, że można zauważyć empiryczną zależność pomiędzy orientacją tensorów a głównymi systemami spękań. Oś dłuższa tensora prędkości fali P (RFR) wskazuje system A, krótsza oś tensora wskazuje wypadkowy kierunek dla systemu B i C, chociaż kierunek ten nie jest wyraźnie zaznaczony (rys. 5a i b). Podobną sytuację można zaobserwować dla fali S (RFR). Znacznie lepsze wyniki otrzymano dla fali S metodą MASW, gdzie dłuższa oś tensora wyraźnie wskazuje kierunek A, a krótsza stanowi wypadkową kierunku B i C (rys. 5).

Podsumowanie

Pomierzony kierunek systemu spękań A koreluje się z kierunkiem maksymalnej prędkości refrakcyjnej fali P. Zależność ta jest słabo widoczna dla refrakcyjnej fali S. Korzystniejsze wyniki dla fali S osiągnięto w wyniku zastosowania metody MASW. Anizotropia prędkości fal sejsmicznych jest również dobrze widoczna dla tensora prędkości.

Prezentowane wyniki pokazują, że jeżeli dwa systemy spękań są prawie równoległe (system B i C), kierunki tensora prędkości drugiego i czwartego rzędu tworzą wypadkową tych systemów, a interpretacja sejsmiczna jest znacznie trudniejsza niż w przypadku występowania dwóch prostopadłych do siebie systemów spękań. W sytuacji, gdy tensor prędkości wykazuje słabą anizotropię trudno wnioskować na temat istniejących w odsłonięciu systemach spękań

Komplementarne zastosowanie metod MASW i sejsmiki refrakcyjnej pozwala na udołkowanie wartości prędkości fali S, ale również dodatkowych parametrów fizycznych ośrodka. Daje to możliwość pozyskania dodatkowych informacji o masywie skalnym.

Literatura

- Barton, N. 2007. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. *Taylor & Francis Group, Londyn, UK.*
- Dal Moro i in. 2007 – Dal Moro, G., Pipan, M. i Gabrielli, P. 2007. Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and Marginal Posterior Probability Density estimation, *Journal of Applied Geophysics*, v 61 (1), s. 39–55.
- Dal Moro, G. 2014. *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*. 1st Edition, Elsevier.
- Idziak, A. 1992. *Anizotropia prędkości fal sejsmicznych i jej związek z orientacją systemów spękań masywów skalnych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.

- Idziak, A. i Stan-Kłeczek, I. 2006. Physical properties of fractured rock mass determined by geophysical methods. [W:] C.F. Leung & Y.X. Zhou (eds), *Rock Mechanics in Underground Construction: 301*. Singapore: World Scientific.
- Islam i in. 2012 – Islam, T., Chik, Z. i Mustafa, M.M. 2012. Noise reduction technique applied to the Multichannel Analysis of Surface Waves. *Acta Geologica Sinica* v. 86, s. 1306–1311.
- Lu, J.Q., Li, S.Y. i Li, W. 2013. Surface Wave Dispersion Imaging Using Improved τ -p Transform Approach. *Applied Mechanics and Materials* v. 353–356, s. 1196–1202.
- Park i in. 1999 – Park, C.B, Milner, R.D., Xia J. i Ivanov, J.M. 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge* v. 18, s. 1392–1296.
- Piniecka, J. 2008. *Dodatek nr 2 do dokumentacji geologicznej złoża dolomitów „Podleśna” w kategorii B+C1+ C2*.
- Richard, A. 2013. Wind farm site characterisation using MASW survey. *Near Surface Geosciences*.
- Shelley i in. 2014 – Shelley, E.O., Mussio, V., Rodriguez, M. i Chang, J.G.A. 2014. Evaluation of soil liquefaction from surface analysis. *Geofisica Internacional* v. 54, s. 95–109.
- Stan-Kłeczek, I. 2010. *Wpływ spękań na anizotropię prędkości fal sejsmicznych w wybranych masywach skalnych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Stan-Kłeczek i in. 2012 – Stan-Kłeczek, I., Sutkowska, K., Stan, D. i Zolich, M. 2012. The study of the relationship between cracks and seismic parameters of rocks. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* v. 9 no. 2 (166), s. 137–142.
- Vilhelm i in. 2011 – Vilhelm, J., Rudajev, V. i Živor, R. 2011. Assessment of Fracture Properties from P-Wave Velocity Distribution. [W:] A.F. Idziak and R. Dubiel (eds.) *Geophysics in Mining and Environmental Protection. Geoplanet: Earth and Planetary Sciences* 2, s. 109–116.
- Živor i in. 2011 – Živor, R., Vilhelm, J., Rudajev, V. i Lokajicek, T. 2011. Measurement of P- and S- Wave Velocities in a Rock Massif and its Use in Estimation Elastic Moduli. *Acta Geodynamica and Geomaterialia* 8, 2, s. 157–167.

