

Streszczenie

Prowadzenie obserwacji sejsmologicznej wiąże się z rejestracją drgań translacyjnych, które stanowią podstawę dla prowadzonych badań i analiz związanych z sejsmicznością naturalną jak i indukowaną. Należy jednak podkreślić, że oprócz drgań translacyjnych w ośrodku występują jeszcze drgania skrętne, które również stanowią skutek występowania wstrząsów naturalnych (Igel i in. 2006; Igel i in. 2007; Liu i in. 2009; Schreiber i in. 2009; Wu i in. 2009; Igel i in. 2011; Brokešová i Málek, 2013; Brokešová i Málek, 2015; Salvermoser i in., 2017; Sbaa i in. 2017; Ringler i in. 2018, Perron i in. 2018) i indukowanych (Kalab i Knejzlik, 2012; Kalab i in., 2013; Zembaty i in. 2017; Fuławka i in. 2020 ; Mutke i in. 2020, Nawrocki i in. 2024). Choć jak wskazują źródła, właściwy mechanizm ich generacji nie został do tej pory jednoznacznie określony (Kozák, 2009). Badania oparte na analizie empirycznie zarejestrowanych sygnałów i tych wygenerowanych w sposób syntetyczny, ukierunkowane były głównie na studia o podłożu spektralnym oraz inżynierskim (Trifunac 2008; Falamarz-Sheikhabadi i Ghafory-Ashtiany, 2012 Basu i in. 2015; Falamarz-Sheikhabadi i Ghafory-Ashtiany 2015; Bońkowski i in. 2018; Bońkowski i in. 2019; Bońkowski i in. 2020; Guéguen i in. 2021; Guéguen i Astorga, 2021). Ich celem w kolejnym etapie powinno być zbadanie interakcji obiektu budowlanego z przypowierzchniową warstwą skalną. Efekty lokalne, definiowane przez amplifikacje i częstotliwość rezonansową ośrodka, są zjawiskiem powiązanym ze wspomnianą interakcją i dotyczą wzmocnienia amplitud drgań propagujących przez ośrodek (Finn i in. 2004). Jedną z metod pozwalających na estymację krzywej amplifikacji, jest stosunek spektrum drgań horyzontalnych do spektrum drgań pionowych (*ang. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio, HVSr*) (Nakamura, 1989). Zastosowanie niniejszej metody do wyznaczenia krzywej amplifikacji drgań skrętnych jest możliwe, jednakże dla stosunku odwrotnego do HVSr, czyli stosunku spektrum drgań pionowych do horyzontalnych. Motywuje się to propagacją: pionowych drgań skrętnych (tzw. torsji, *ang. torsion*) w płaszczyźnie równoległej względem osi horyzontalnych drgań translacyjnych, oraz horyzontalnych drgań skrętnych (tzw. kołyszące, *ang. rocking*) w płaszczyźnie równoległej względem pionowych drgań translacyjnych (Zembaty, 2009). W konsekwencji stosunek ten definiowany jest jako stosunek spektrum drgań torsyjnych do spektrum drgań kołyszących (*Torsion-to-Rocking Spectral Ratio, TRSR*) (Nawrocki i in. 2021). Zakres sygnału ujętego do analizy HVSr i TRSR, w zgodzie z rekomendacjami powinien pochodzić od grupy fal typu S (Nakamura 2000; Nakamura 2019). W oparciu o mechanizm podwójnej pary sił w ognisku wstrząsu stwierdzono, że radiacja sejsmiczna grupy fal S jest identyczna jak drgań skrętnych (Suryanto, 2006), co daje

umotywowanie estymacji parametrów uzyskanych efektów lokalnych drgań skrętnych niniejszą metodą. Warunkiem jest jednak wystąpienie mechanizmu podwójnej pary sił w ognisku analizowanego przypadku wstrząsu. Większość z zarejestrowanych wstrząsów indukowanych eksploatacją górnictwem w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) charakteryzuje się mechanizmem podwójnej pary sił (Stec 2006), co przy rzetelnym wyborze zarejestrowanych zjawisk pozwala na estymację parametrów efektów lokalnych drgań skrętnych.

W ramach niniejszej rozprawy przeprowadzono łączną analizę 210 zjawisk sejsmicznych, których ogniska zostały zarejestrowane w obszarze GZW, pod kątem zbadania:

Związków widma H/V z przypowierzchniowymi warunkami geologicznymi.

Pierwszym etapem pracy było wyznaczenie krzywych H/V dla drgań skrętnych i translacyjnych, zarejestrowanych przez dwa niezależne stanowiska. Uzyskane wyniki wykazały w pierwszym przypadku zbliżone wartości częstotliwości rezonansowej pomiędzy drganiami translacji i rotacji, natomiast w drugim przypadku wskazały rozbieżności sięgające 1.40 Hz. Za wyjaśnienie przyczyn niniejszej obserwacji uznano występowanie sieci spękań górotworu na danej głębokości, które skutkują wyższą wartością rezonansu drgań skrętnych, co pozwoliło na wyodrębnienie płycej zalegającej warstwy odpowiedzialnej za ich rezonans. Zastosowanie natomiast w kolejnym etapie wyznaczonych wartości amplifikacji do wyznaczenia modeli relacji skalowania wykazało, że korekta szczytowych wartości amplitud o wyznaczoną wartość amplifikacji obniża wartość prędkości fazowej propagacji fal SH.

Kolejnym etapem było zbadanie różnic pomiędzy zastosowaniem spektrum Fouriera i spektrum odpowiedzi w estymacji stosunku H/V. Wyniki uzyskane z porównania dwóch sposobów estymacji wykazały, że krzywa H/V wyznaczona z metody spektrum odpowiedzi przedstawia mniej pików amplifikacji, a tym samym pozwala na zawężenie liczby pików związanych z efektem lokalnym. Ponadto udowodniono wpływ rozmiaru fundamentu na otrzymywaną krzywą amplifikacji drgań skrętnych, która ze względu na tłumienie składowych pionowych ulega spłaszczeniu, a tym samym uniemożliwia analizę spektrum.

Ostatnim etapem badań były estymacje krzywych amplifikacji H/V dla każdego przypadku obrócenia kąтового sygnałów składowych horyzontalnych. Wyznaczone wykresy planarnych zmian wartości amplifikacji w zależności od kąta rotacji układu współrzędnych przedstawiały okręgi jak i elipsoidy. Oś na strukturach elipsoidalnych, wzdłuż których zachodzą największe zmiany wartości amplifikacji określa azymut kierunku efektu amplifikacji świadczący o anizotropii ośrodka skalnego, związanej z obecnością struktur nieciągłych. Efekt kierunkowej amplifikacji nie występuje w przypadku gdy, wspomniane wykresy planarne

tworzą okręgi, co zostało zaobserwowane dla pików krzywej amplifikacji drgań skrętnych. Zbieżny kierunek azymutów efektu znaczących zmian wartości amplifikacji został zaobserwowany dla pierwszego pików drgań translacyjnych i drugiego drgań skrętnych, osiągając różnicę częstotliwości rezonansowej rzędu 3.00 Hz. W konsekwencji można postawić tezę, że różne warstwy geofizyczne mogą odpowiadać za amplifikację danego typu przemieszczeń (translacyjnych/skrętnych), przy czym nie można wykluczyć, że dana warstwa geofizyczna wykaże różne wartości amplifikacji i częstotliwości rezonansowej drgań, w zależności od typu przemieszczenia.

Wyniki przeprowadzonych badań w toku niniejszej pracy dowodzą, że **drgania skrętne ulegają zjawisku efektów lokalnych, osiągając inne niż w przypadku drgań translacyjnych wartości amplifikacji jak i częstotliwości rezonansowej, co świadczy, że efekty lokalne drgań skrętnych i translacyjnych pochodzą od struktur geologicznych zalegających na różnej głębokości.**

Przeprowadzone w toku niniejszej pracy badania umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

1. Odmierna wartość częstotliwości rezonansowej drgań translacyjnych i skrętnych może być efektem występowania lokalnych nieciągłości takich jak spękania oraz uskoki.
2. Różnice w wartości częstotliwości rezonansowej pomiędzy drganiami translacyjnymi jak i skrętnymi nie muszą świadczyć o różnych głębokościach zalegania warstw geologicznych.
3. Tendencja do osiągania różnych wartości częstotliwości rezonansowej i amplifikacji przez drgania skrętne i translacyjne nie wyklucza generowania rezonansu przez tę samą warstwę geofizyczną.
4. Zastosowanie metody spektrum odpowiedzi pozwala na dokładne określenie, który z pików amplifikacji widoczny na spektrum można określić jako dominujący.
5. Zasadniczym ograniczeniem estymacji spektrum H/V dla drgań skrętnych jest tłumienie składowej pionowej, związane z rozmiarami podłoża, na którym posadowiony był czujnik.
6. Estymacja relacji skalowania z uwzględnieniem korekty o wartość wyznaczonej amplifikacji pozwala na bardziej wiarygodną estymację prędkości fazowej propagacji grup fal SH w warstwie przypowierzchniowej.
7. Relacja skalowania, która uwzględnia zerową wartość parametru b umożliwia wyznaczenie modelu z większą dokładnością niż w przypadku założenia niezerowej wartości niniejszego parametru.

8. Analiza relacji skalowania wykazała potencjalny wpływ czynników związanych z dystansem epicentralnym, energią jak i tłumieniem na mierzone wartości pików drgań skrętnych. Tym samym relacja skalowania powinna być analizowana dla danego miejsca pomiarowego oddzielnie tzn. bez uwzględniania danych z innego stanowiska nawet w przypadku zbieżnych wartości parametru V_{S30} .

Uzyskane wyniki badań stanowią wielopłaszczyznowy wkład do wiedzy teoretycznej jak i praktycznej, związany z: procedurą estymacji częstotliwości rezonansowej i amplifikacji drgań skrętnych z wykorzystaniem metody TRSR ; zależnościami pomiędzy parametrami efektów lokalnych drgań skrętnych jak i translacyjnych czy też wpływem sposobu estymacji spektrum na wyniki HVSR i TRSR. Natomiast przedstawienie mechanizmów w ośrodku skalnym, których wystąpienie wpływa na wartości parametrów efektów lokalnych drgań skrętnych oraz wskazanie modelu relacji skalowania dla pomiarów skorygowanych o wartość amplifikacji daje punkt zaczepienia względem kolejnych, zbieżnych z nurtem pracy badań naukowych.