

ADAM FREJ*

Estymacja relacji tłumienia z uwzględnieniem amplifikacji drgań dla wybranych rejonów Bytomia

Wprowadzenie

W rejonie miasta Bytomia obserwuje się szereg wstrząsów wywołanych eksploatacją górnictwą prowadzoną przez kopalnie węgla kamiennego. Efekt sejsmiczny powstały w wyniku eksploatacji rejestrowany jest na powierzchni w formie przyspieszenia drgań gruntu. Rejestracja ta prowadzona jest w sposób ciągły od 1997 roku za pomocą automatycznych trójskładowych akcelerometrów posadowionych na obszarze miasta. W oparciu o obszerny zbiór danych otrzymanych z wieloletniego okresu rejestracji podjęto próby wyznaczenia relacji tłumienia z uwzględnieniem lokalnego wpływu warstw geologicznych. Wpływ geologii obserwowany jest jako efekt amplifikacji drgań. Obserwowana amplifikacja związana jest z występowaniem, w danym miejscu w warstwie przypowierzchniowej, luźno związane utwory geologiczne o stosunkowo dużej miąższości. Estymacja parametrów relacji tłumienia w oparciu o dane dotyczące energii, amplitudy drgań oraz odległości epicentralnej obserwowanego wstrząsu ma na celu wyznaczenie nieznanych parametrów charakterystycznych dla tłumienia fali sejsmicznej w danym obszarze. W poniższej pracy podjęto próbę wyznaczenia takiej relacji z uwzględnieniem obserwowanej na poszczególnych stanowiskach amplifikacji drgań. Otrzymane wyniki obrazujące efekt amplifikacji porównano z amplifikacją wyznaczoną metodą Nakamury. Metoda ta zwana inaczej metodą HVSR opiera się na wyznaczeniu dla odpowiedniego miejsca stosunku składowej poziomej względem składowej pionowej widma przyspieszenia drgań gruntu.

* Mgr, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec; e-mail: adamfrej@interia.pl

1. Charakterystyka danych pomiarowych

W wyznaczaniu parametrów relacji tłumienia oraz analizie wielkości amplifikacji wykorzystano dane pomiarowe z rejonu objętego podziemną eksploatacją węgla kamiennego. Analizowane dane przedstawiają 10-sekundowy zapis trzech składowych przyspieszenia drgań gruntu powstały w obszarach eksploatacji górniczej (Markowski i in. 2002). Cyfrowe zapisy pochodzą z okresu od początku 1998 do końca lutego 2007 roku (rys. 1), co umożliwiło stworzenie obszernej bazy danych obrazującej charakterystykę wstrząsów z rejonu miasta Bytomia. Wykorzystane w obliczeniach dane spełniają następujący warunek odnoszący się do rejestrowanej amplitudy przyspieszeń drgań:

$$a_{XYZ} > 65 \text{ [mm/s}^2\text{]} \quad (1)$$

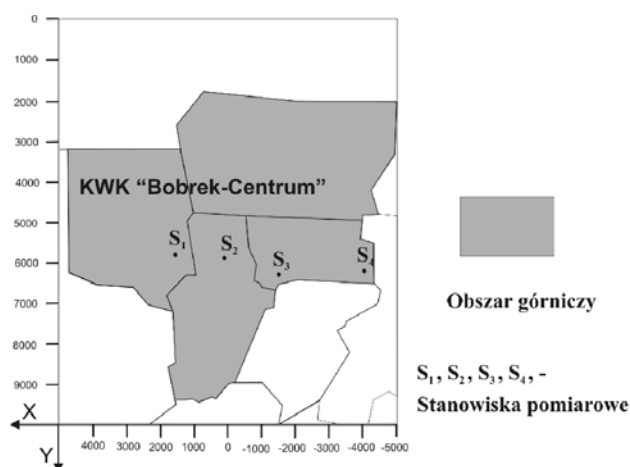
TABELA 1

Charakterystyka stanowisk pomiarowych

TABLE 1

Profile of the recording stations

Lp.	Stanowisko pomiarowe	Lokalizacja stanowiska (układ Sucha Góra)		Liczba wykorzystanych rejestracji
		X	Y	
1.	S1	5 807	1 626	277
2.	S2	5 960	4	87
3.	S3	6 300	-1 215	20
4.	S4	6 255	-4 064	48



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk pomiarowych

Fig. 1. Location of the recording stations

$$a_{XYZ} \equiv \sqrt{a_{NS}^2 + a_{EW}^2 + a_Z^2} \quad (2)$$

gdzie:

- a_{XYZ} – średnie maksymalne przyspieszenie drgań gruntu,
- a_{NS} – maksymalne przyspieszenie drgań gruntu dla składowej NS ,
- a_{EW} – maksymalne przyspieszenie drgań gruntu dla składowej EW ,
- a_Z – maksymalne przyspieszenie drgań gruntu dla składowej Z ,

Wytypowane stanowiska pomiarowe zlokalizowane są na utworach czwartorzędowych o zmiennej miąższości sięgającej około 25 metrów reprezentowanych głównie przez piaski i gliny. Warstwy czwartorzędowe w rejonie w wytypowanych rejonach znajdują się bezpośrednio powyżej utworów triasu lub karbonu. Jednak dokładna budowa geologiczna w miejscach rejestracji nie jest znana.

2. Estymacja relacji tłumienia

Określenie parametrów tłumienia fali sejsmicznej odbywa się poprzez rozwiązanie jednego z trzech prezentowanych równań obrazujących tłumienie drgań.

$$\log a = \alpha + \beta \log E + \gamma \log R \quad (3)$$

$$\log a = \alpha + \beta \log E + \gamma R \quad (4)$$

$$\log a = \alpha + \beta \log E + \gamma \log R + \phi R \quad (5)$$

gdzie:

- a – amplituda przyspieszeń drgań gruntu [mm/s^2],
- E – energia wstrząsu [J],
- R – odległość epicentralna wstrząsu [m],
- $\alpha, \beta, \gamma, \phi$ – współczynniki relacji tłumienia.

W badanym rejonie niejednokrotnie wyznaczano parametry tłumienia (np.: Kornowski, Kurzeja 2006), jednak nie podjęto próby wyznaczenia takiej relacji z uwzględnieniem odpowiedzi podłoża. Powyższe równania, z których korzystano przy wcześniejszych analizach warunków tłumienia nie uwzględniają bardzo ważnego wpływu budowy geologicznej na efekt tłumienia fali sejsmicznej. W celu dokładniejszego rozpatrzenia procesu stopniowego wygaszania fali wraz z odległością należy prezentowane równania wzbogacić o dodatkowy czynnik. W pracy podjęto próbę wyznaczenia relacji tłumienia w oparciu

o metodę zaproponowaną przez Olszewską i Lasockiego (2006). Metoda ta w obliczeniach relacji tłumienia uwzględnia dodatkowo parametr amplifikacji drgań górotworu. Wykorzystana zależność przedstawia się następująco:

$$\log a_{(x,y)} = \alpha + \beta \log E + \gamma R + \delta_{(x,y)} \quad (6)$$

gdzie:

- a – wartość szczytowa poziomej bądź pionowej składowej przyspieszeń drgań gruntu [mm/s^2],
- (x,y) – położenie stacji rejestrującej,
- E – energia wstrząsu [J],
- R – odległość epicentralna wstrząsu [m],
- α, β, γ – współczynniki relacji tłumienia,
- δ – logarytmiczny współczynnik amplifikacji.

W celu poprawnego rozwiązania powyższej relacji przyjęto dla stanowiska S_1 względny współczynnik amplifikacji równy 1,0. Wprowadzenie względnego współczynnika dla wybranej stacji umożliwia wyliczenie parametrów relacji tłumienia a następnie określenie względnych wielkości amplifikacji dla pozostałych stanowisk.

3. Charakterystyka metody Nakamury

Określenie wielkości amplifikacji drgań w miejscu rejestracji nastąpiło z wykorzystaniem metody Nakamury. Nazwa tej metody pochodzi od japońskiego sejsmologa, który zaproponował założenia dla tej metody (Nakamura 1989, 2000). W celu określenia wielkości amplifikacji drgań wyznacza się iloraz składowej poziomej (H) względem składowej pionowej widma przyspieszenia drgań gruntu (V). W związku z przyjętym założeniem metoda ta zwana jest również metodą HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Szukany stosunek składowych można zapisać jako następująca zależność:

$$\frac{H}{V} = \frac{A_H \cdot G_H \cdot R_H}{A_V \cdot G_V \cdot R_V} \quad (7)$$

gdzie:

- A_H, A_V – współczynniki amplifikacji składowej poziomej i pionowej pionowo padającej fali wglębnej,
- G_H, G_V – widma składowej poziomej i pionowej przyspieszenia drgań twardego podłoża,
- R_H, R_V – widma składowej poziomej i pionowej fali powierzchniowej Rayleigha.

W wyniku takiej analizy otrzymujemy zależność stosunku H/V względem częstotliwości. Wyznaczenie amplifikacji następuje w skutek określenia dominującego pików występującego w obserwowanej zależności. Maksimum pików dostarcza informacji o poziomie amplifikacji natomiast częstotliwość, przy której obserwujemy pik odpowiada częstotliwości rezonansowej warstwy przypowierzchniowej.

Zakres analizowanego obszaru poprawnego wyznaczania amplifikacji drgań wciąż jest badany. Przyjmuje się jednak, iż w granicach do 10 Hz otrzymuje się prawidłowe wyniki, co związane jest to z faktem, iż przy niskich częstotliwościach obserwuje się bardzo mały wpływ fali Rayleigha (Tsuboi i in. 2001). Dlatego też analiza następuje jedynie w obrębie niskich częstotliwości. Typowy wynik prowadzonej analizy z użyciem metody HVSR daje jeden dominujący pik, co odpowiada prostej budowie geologicznej. W przypadku, gdy mamy do czynienia z skomplikowaną budową geologiczną w analizie obserwuje się dodatkowe piki.

4. Wyniki

W procesie rozwiązywania zależności relacji tłumienia w obliczeniach wykorzystano amplitudę składowej poziomej. Wybór taki podjęto w związku z założeniem metody Nakamury mówiącym, iż pionowa składowa fali wglębnej nie jest wzmacniana w obrębie częstotliwości charakterystycznych dla silnego wzmacniania składowej poziomej. Umożliwiło to w końcowym kroku analizy skorelowanie wyników obliczeń pomiędzy dwoma odrębnymi metodami (relacja tłumienia z uwzględnieniem amplifikacji oraz metoda Nakamury). W wyniku analizy otrzymano następująca postać relacji tłumienia:

$$\log a = 1,395 + 0,142 \log E - 0,0001R + \delta_i \quad (8)$$

gdzie:

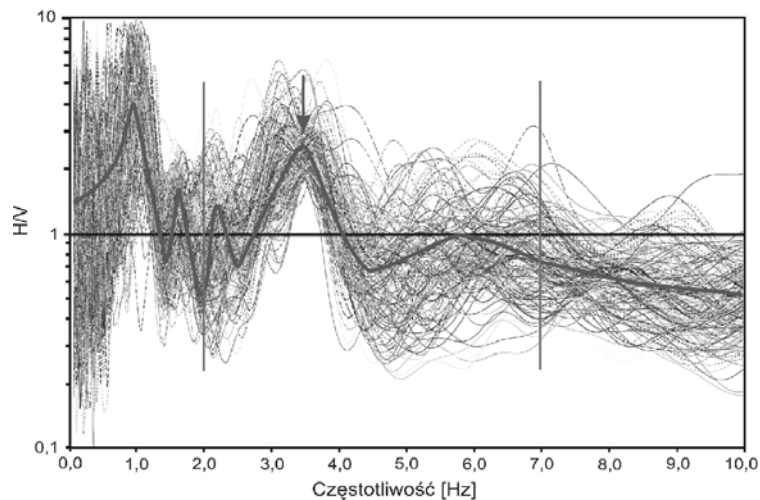
δ_i – logarytmiczny współczynnik amplifikacji dla i -tej stacji ($i = 1, 2, 3, 4$).

Dla poszczególnych stanowisk wartość parametru δ równa jest odpowiednio: $S_1 - 0,16$, $S_2 - 0,05$, $S_3 - -0,09$, $S_4 - 0,00$. Prezentowane wielkości amplifikacji są wielkościami względnymi i są odniesione do założonej na poziomie 1,0 ($10^0 = 1$) amplifikacji dla stanowiska S_1 . Ponadto są one prezentowane jako wykładnik liczby 10, co ma związek z układem równania relacji tłumienia, w której to występują logarytmy poszczególnych zmiennych. W efekcie przeprowadzenia działania 10^{δ_i} na otrzymanych wielkościach δ_i dostajemy względną amplifikację miejsca pomiaru równą: $S_1 - 1,44$, $S_2 - 1,12$, $S_3 - 0,80$, $S_4 - 1,00$. Taka prezentacja wyników umożliwi porównanie wyznaczonych poziomów amplifikacji z amplifikacją wyznaczoną inną metodą.

Korzystając z metody Nakamury wyznaczono współczynniki amplifikacji drgań dla poszczególnych stanowisk. Szacowania wielkości amplifikacji dokonano za pomocą wyz-

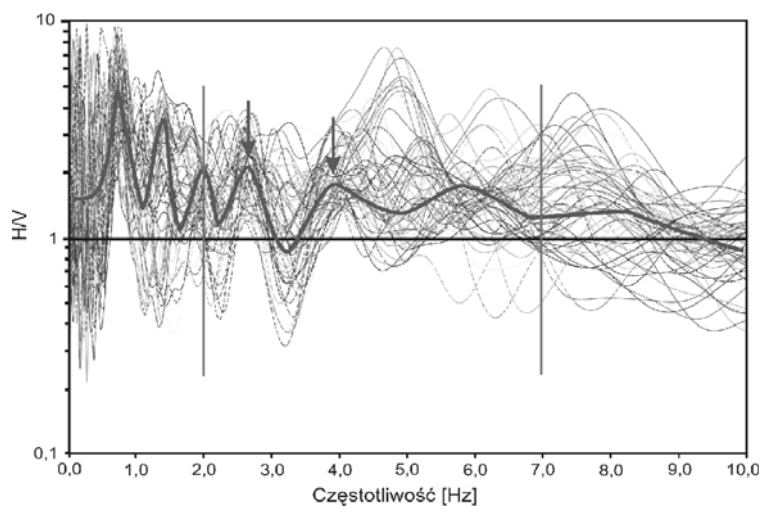
naczenia maksimum dominującego pik z zależności H/V względem częstotliwości. Dominujący pik wyznaczano z zależności H/V przedstawiającej medianę (pogrubiona linia) wszystkich obliczonych stosunków dla poszczególnych miejsc rejestracji.

Analizując zależności H/V względem częstotliwości dla stacji S_1 (rys. 3) określono położenie dominującego pik w okolicach częstotliwości równej 3,5 Hz. Wielkość amplifikacji dla tego stanowiska określono na poziomie 2,5. Częstotliwością rezonansową dla tego stanowiska jest częstotliwość, przy której wystąpił dominujący pik, czyli 3,5 Hz.



Rys. 2. Stosunki składowych widm akcelerometrycznych dla stanowiska S_1

Fig. 2. Spectral ratios of ground accelerations from S_1 station

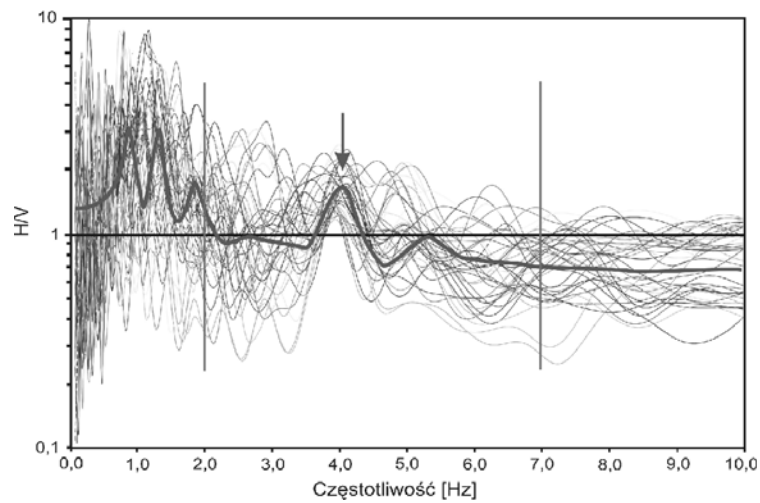


Rys. 3. Stosunki składowych widm akcelerometrycznych dla stanowiska S_2

Fig. 3. Spectral ratios of ground accelerations from S_2 station

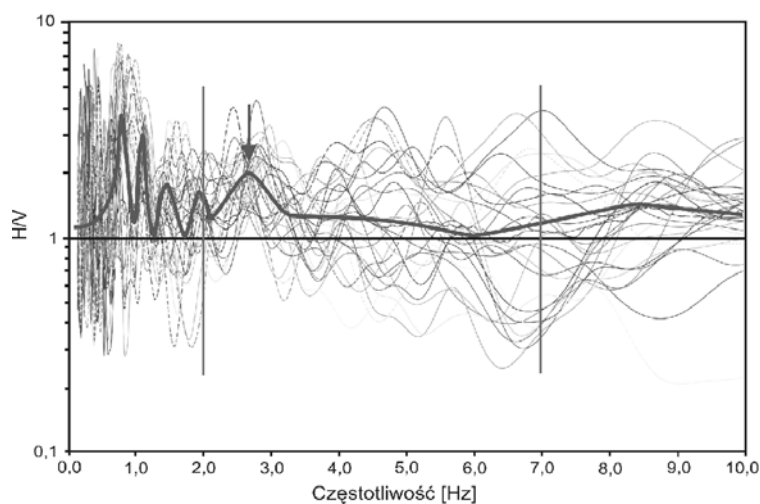
Dla stanowiska S_2 określono maksimum głównego pik na poziomie 2,1. Częstotliwość rezonansowa dla tegoż rejonu wynosi 2,6 Hz. Zauważyć należy jednak, iż w tym wypadku występuję jeszcze jeden pik, który może świadczyć o skomplikowanej budowie geologicznej. Maksimum drugiego pik określono na poziomie 1,8 w okolicach częstotliwości 3,9 Hz.

Maksimum pik amplifikacji dla stanowiska S_3 występuje w okolicach częstotliwości 4,0 Hz, a jego wartość wynosi 1,6. Położenie maksimum pik dostarcza informacji zarówno o częstotliwości rezonansowej warstwy przypowierzchniowej jak i o poziomie amplifikacji.



Rys. 4. Stosunki składowych widm akcelerometrycznych dla stanowiska S_3

Fig. 4. Spectral ratios of ground accelerations from S_3 station



Rys. 5. Stosunki składowych widm akcelerometrycznych dla stanowiska S_4

Fig. 5. Spectral ratios of ground accelerations from S_4 station

Z wyznaczonego stosunku H/V dla stanowiska S₄ można wyznaczyć dominujący pik dla częstotliwości równej około 2,65 Hz. Częstotliwość to jest w tym miejscu dominującą częstotliwością rezonansową warstwy przypowierzchniowej. Pik osiąga maksimum na poziomie wartości równej 2,0 co odpowiada poziomowi amplifikacji drgań powstałemu w wyniku przejścia fali sejsmicznej przez warstwy geologiczne w tym miejscu.

Wszystkie określone współczynniki amplifikacji metodą Nakamury pokazują, iż metoda ta sprawdza się do określania odpowiedzi podłoża oraz jest cennym uzupełnieniem dotychczasowych badań amplifikacji drgań w rejonie GZW (Stec 2001).

Poniżej zaprezentowano porównanie wyznaczonych parametrów amplifikacji drgań metodą relacji tłumienia oraz metodą Nakamury. Porównanie wyznaczonych amplifikacji możliwe było przy założeniu, iż dla stanowiska S₄ wartości określonej amplifikacji z metody Nakamury równej 2,0 odpowiada względna wartość 1,00. Prezentowane poniżej wyznaczone wartości są do siebie zbliżone.

TABELA 2

Porównanie wyznaczonych współczynników amplifikacji

TABLE 2

Comparison of amplification factors

Lp.	Stanowisko pomiarowe	Względne współczynniki amplifikacji	
		relacji tłumienia	metody Nakamury
1.	S ₁	1,44	1,25
2.	S ₂	1,12	1,05
3.	S ₃	0,80	0,80
4.	S ₄	1,00	1,00

Względne współczynniki amplifikacji określone za pomocą dwóch odmiennych metod korelują się ze sobą w zadowalającym stopniu (tab. 2). Można przyjąć, iż wyniki otrzymane za pomocą relacji tłumienia lepiej obrazują zmiany charakteru fali poprzez przejście jej przez warstwy geologiczne nadkładu. Związane jest to z faktem, iż wyniki współczynnika amplifikacji otrzymane metodą Nakamury mogą być obarczone niepewnością związaną z adaptacją metody do analizy zjawisk o małej odległości epicentralnej. Ponadto określenie wielkości amplifikacji za pomocą metody Nakamury w wypadku, gdy mamy do czynienia ze skomplikowaną budową geologiczną nie jest precyzyjne. Analizując wytypowane obszary mamy do czynienia ze skomplikowaną budową geologiczną prawdopodobnie dla stanowiska S₂, o czym może świadczyć większa liczba występujących pików na rysunku 4. Dlatego też należy uwzględnić, iż wyniki otrzymane tą metodą mogą być niedoszacowane.

Wnioski

1. W rejonie Bytomia występuje amplifikacja drgań, prawdopodobnie związana z budową geologiczną warstwy przypowierzchniowej.
2. Estymacja parametrów relacji tłumienia z uwzględnieniem wpływu podłoża daje interesujące rezultaty przedstawiające zanikanie amplitudy fali sejsmicznej wraz z rozprzestrzenianiem się od epicentrum.
3. Metoda Nakamury daje w trakcie prostej analizy parametry obrazujące wzmocnienie drgań gruntu dla rejonu Bytomia. Metoda ta może sprawdzać się jako uzupełnienie innych metod określania współczynnika amplifikacji.
4. Wyznaczona z relacji tłumienia względna wielkość amplifikacji drgań w sposób zadowalający koreluje z amplifikacją wyznaczoną metodą Nakamury. Można jednak założyć, iż wyniki otrzymane z relacji tłumienia są bardziej wiarygodne.

LITERATURA

- Stec K., (red), 2001 – Geologiczne przyczyny wzmocnienia drgań w nadkładzie serii węglowej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Kornowski J., Kurzeja J., 2006 – Ocena błędu warunkowej prognozy a_{max} określonej na podstawie relacji tłumienia. Warsztaty Górnicze 2006 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, 12–14 czerwca 2006, 167–191.
- Markowski E., Kornowski J., Zuberek W.M., 2002 – Podsumowanie i analiza wyników powierzchniowych obserwacji przyspieszeń pochodzących od wstrząsów górniczych z zakładów górniczych zrzeszonych w Bytomskiej Spółce Węglowej S.A. za okres 1998–2000. Sosnowiec.
- Nakamura Y., 1989 – Method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. QR RTRI, 30, 25–33.
- Nakamura Y., 2000 – Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. Proceedings 12WCEE.
- Olszewska D., Lasocki S., 2006 – Relacja tłumienia wartości szczytowej przyspieszenia drgań gruntu z uwzględnieniem amplifikacji dla wybranych rejonów obszaru LGOM. Warsztaty Górnicze 2006 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, 12–14 czerwca 2006, 293–307.
- Tsuboi S., Saito M., Ishihara Y., 2001 – Verification of horizontal-to-vertical spectral-ratio technique for estimation of site response using borehole seismographs. Bull. Seismol. Soc. Am. 91, 499–510.

ESTYMACJA RELACJI TŁUMIENIA Z UWZGLĘDNIENIEM AMPLIFIKACJI DRGAŃ DLA WYBRANYCH REJONÓW BYTOMIA

Słowa kluczowe

Relacja tłumienia, amplifikacja drgań, metoda HVSR, efekty lokalne

Streszczenie

Praca przedstawia próbę wyznaczenia parametrów tłumienia uwzględniając wielkość amplifikacji w miejscu rejestracji. Analiza została przeprowadzona bazując na zbiorze 432 danych z czterech stacji rejestrujących

przyspieszenia drgań gruntu, zainstalowanych w mieście Bytom. Dane te zawierają informacje o odległości epicentralnej, energii wstrząsu w źródle oraz amplitudzie przyspieszeń drgań gruntu. Analizowane dane przedstawiają cyfrowe zapisy trzech składowych przyspieszenia drgań gruntu pochodzących z okresu od początku 1998 do końca 2007 roku. Zarejestrowane dane związane są ze skutkami prowadzenia eksploatacji górniczej w niewielkich odległościach epicentralnych. Występujące w rejonie Bytomia utwory czwartorzędowe znajdują się bezpośrednio powyżej utworów triasu lub karbonu. Miąższość formacji czwartorzędowych zmienia się znacząco w różnych rejonach miasta. Warstwy nadkładu zbudowane są głównie z piasków i glin. Wielkość amplifikacji drgań można wiązać ściśle z efektami lokalnymi, dlatego też wyznaczono współczynnika wzmocnienia drgań gruntu w oparciu o relację tłumienia z uwzględnieniem tego czynnika. Otrzymane wyniki zostały skorelowane z rezultatami analizy metodą Nakamury. Technika Nakamura daje wiarygodne wyniki wielkości amplifikacji dla obszaru częstotliwości od 2 Hz do 10 Hz. Wyniki metody Nakamury zostały odniesione do oszacowanej amplifikacji dla stanowiska S_1 . Analiza wskazuje, iż relacja tłumienia z uwzględnieniem wpływu podłoża daje bardziej wiarygodne rezultaty niż metoda Nakamury. Jednak wszystkie otrzymane wyniki mogą dostarczać cennych informacji i być cennym uzupełnieniem wcześniejszych badań prowadzonych w rejonie GZW. Sama metoda Nakamury może sprawdzać się jako uzupełnienie innych metod wyznaczania amplifikacji drgań gruntu. Wszystkie wyniki wskazują na występowanie amplifikacji drgań w rejonie miasta Bytom i są ściśle związane z miejscem prowadzonej analizy.

THE ESTIMATION OF ATTENUATION RELATIONS WITH THE AMPLIFICATION OF VIBRATION FOR CHOSEN BYTOM REGIONS

Key words

Attenuation relation, amplification of vibration, HVSR technique, local effects

Abstract

This paper shows the attempts of calculation of the parameters of attenuation taking into consideration the size of amplification in the place where the recorders were located. The analysis was carried out basing on 432 data from four acceleration stations installed in Bytom city, included epicenter distance, source energy and amplitude of accelerations of vibration. Analyzed data present digital record of three components of acceleration vibration of the ground surface coming from the period 1998–2004. This registered data was a result of the mining tremors in low epicentral distances from the regions of mining exploitation. In the Bytom area locally occur quaternary layers deposited above triassic or the carboniferous formation. The thickness of quaternary formation changes significantly in many different regions of the city. Geological structure is mainly formed by sands and clays. The size of amplification can be related to the site effects so the results were calculated from the attenuation relation, which implicates amplification factor. The attenuation relation with amplification factor gives reliable results of amplification. The obtained results were correlated with results from Nakamura technique. The Nakamura technique gives reasonable results of the size of amplification for frequency range between about 2 and 10 Hz. These results were transformed to the estimated amplification for the S_1 station. The attenuation relation with the influence of geological structure of the cover gives more reliable results than Nakamura technique. However all the obtained results can provide important information to previous researches conducted in GZW region. The Nakamura method can be also useful as complement of the other methods of estimation the amplification of ground vibration. All the results show that there are local effects in Bytom city, which are closely connected to the place of measurement.