



Dr hab. inż. Zenon
PILECKI
Akademia Górniczo
– Hutnicza, Wydział
Geologii, Geofizyki
i Ochrony
Środowiska /
Instytut Gospodarki
Surowcami
Mineralnymi i
Energia PAN,
Kraków

Dr inż. Jerzy
ZIĘTEK
Akademia
Górnico-
Hutnicza,
Wydział
Geologii,
Geofizyki i
Ochrony
Środowiska
Kraków

Dr inż. Elżbieta
PILECKA
Instytut
Gospodarki
Surowcami
Mineralnymi i
Energia PAN,
Kraków

Dr inż. Jerzy
KARCZEWSKI
Akademia
Górnico-
Hutnicza,
Wydział
Geologii,
Geofizyki i
Ochrony
Środowiska
Kraków

Mgr inż. Jerzy
KŁOSIŃSKI
Instytut
Gospodarki
Surowcami
Mineralnymi i
Energia PAN,
Kraków

Rozdzielczość metod georadarowej i sejsmicznej w inżynierskim rozpoznaniu granic nieciągłości

Streszczenie

Omówiono efektywność rozpoznania granic nieciągłości w ośrodku fliszu karpackiego za pomocą profilowania georadarowego i sejsmicznego. Badania georadarowe wykonano antenami o różnych częstotliwościach w celu porównania ich rozdzielczości w warunkach pomiarowych. Badania sejsmiczne polegały na ocenie rozdzielczości rozpoznania falami typu P i S – technikami profilowania refrakcyjnego oraz MASW 1D. Uzyskane wyniki pozwoliły na opracowanie możliwie najkorzystniejszej metodyki pomiarowej w dostosowaniu do warunków geologiczno-inżynierskich.

1. Wybrane zagadnienia rozdzielczości metod falowych

Rozdzielczość rozumiemy tu jako zdolność określenia minimalnej odległości, w której mogą się znaleźć dwa obiekty o tym samym przekroju czynnym, aby jeszcze zostały odróżnione.

W metodzie georadarowej, według Annana (2001) dwa punkty są rozróżniane, wtedy i tylko wtedy, gdy na osi czasu minimum odbitego reflektu od pierwszego punktu leży przed minimum odbitego reflektu od drugiego punktu. W takiej sytuacji dochodzi się do wzoru:

$$\Delta R = \frac{v}{4 \cdot B}$$

gdzie:

- | | | |
|---|---|--------------------------------------|
| v | – | prędkość fali elektromagnetycznej, |
| B | – | szerokość pasma impulsu sondującego. |

Dla takich założeń rozdzielczość metody georadarowej zależy odwrotnie proporcjonalnie od szerokości pasma impulsu odbieranego przez antenę odbiorczą. Anteny o szerokim paśmie częstotliwościowym mają wysoką rozdzielczość, a anteny o wąskim paśmie charakteryzują się niską rozdzielczością. Istotny jest fakt, iż anteny o szerokim paśmie częstotliwościowym mają wąski impuls, a co za tym idzie niewielką średnią energię i niewielki zasięg.

W teorii anten definiuje się tzw. względną szerokość pasma, jako stosunek szerokości pasma anteny nadawczej B do częstotliwości środkowej tego pasma f_c :

$$f_r = \frac{B}{f_c} \cdot 100\%$$

Ze względów konstrukcyjnych współczesne anteny georadarowe mają względną szerokość pasma w przybliżeniu równą 100% (Annan i Cosway 1994). Względna szerokość pasma równa 100% oznacza, że szerokość pasma anteny nadawczej jest równa częstotliwości środkowej tej anteny ($f_c = B$). Zamierzając zwiększyć rozdzielczość pionową metody GPR należy zwiększyć częstotliwość emitowanego impulsu (zwiększy się także wtedy szerokość pasma B). Wychodząc z powyższych wniosków, można łatwo wyprowadzić następującą zależność:

$$\Delta R = \frac{1}{4} \cdot \lambda_c$$

gdzie:

λ_c – długość fali elektromagnetycznej odpowiadająca częstotliwości środkowej anteny.

W tabeli 1 przedstawiono zależność rozdzielczości pomiaru w ośrodku geologicznym o stałej dielektrycznej $\epsilon_r=12$ od częstotliwości anten. Obliczona długość fali jest wartością orientacyjną. Nie jest uwzględniony fakt, że rzeczywisty ośrodek geologiczny działa jak filtr dolnoprzepustowy, częstotliwość fali w nim propagującej jest niższa. Rzeczywiste wartości rozdzielczości są nieznacznie niższe.

Tab. 1. Zależność rozdzielczości pomiaru od częstotliwości zastosowanych anten ($\epsilon_r=12$)

Częstotliwość [MHz]	Długość fali [m]	Rozdzielczość [m]
50	1,7	0,45
200	0,43	0,11
400	0,22	0,05

W przypadku pomiarów sejsmiki inżynierskiej przyjmuje się, że warstwy ośrodka o różnych właściwościach akustycznych mogą być rozróżnione, gdy odległość między nimi nie przekracza jednej czwartej długości fali, czyli im większa częstotliwość, tym lepsza rozdzielczość. Jednak podobnie jak w metodzie georadarowej ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się zasięg rozpoznania ośrodka z uwagi na silniejsze tłumienie większych częstotliwości. Rozdzielczość może być poprawiona dzięki użyciu selektywnych częstotliwościowo źródeł drgań lub na etapie przetwarzania danych.

2. Wyniki testów

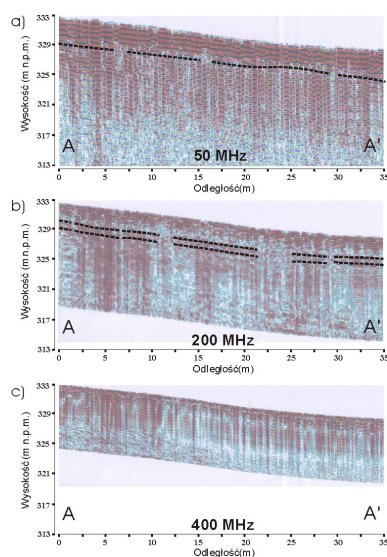
Warunki geologiczne

Pomiary wykonano na osuwisku w utworach fliszu karpackiego. Osuwisko miało charakter konsekwentno-strukturalny, skalno-zwietrzelinowy i złożony ze względu na rozwinięte w kilku kierunkach powierzchnie poślizgu. Koluwia składają się z nadkładu czwartorzędowego wykształconego w postaci glin zwietrzelinowych i fragmentów skał zwietrzelinowych i brekcji tektonicznej. W podłożu występują warstwy inoceramowe o przewadze łożysk i łupków pstrych nad osadami piaskowcowo-mułowcowymi. Pomiary wykonano w warunkach stosunkowo dużej wilgotności ośrodka.

Wyniki pomiarów georadarowych

Pomiary georadarowe wykonano za pomocą aparatury RAMAC antenami nieekranowanymi 50MHz, 200MHz i 400 MHz. Parametry pomiarowe dobrano w ten sposób, aby uzyskać możliwie duży zasięg głębokościowy dla każdej anteny (dotyczy to głównie anten o częstotliwościach 200 i 400MHz). Materiał pomiarowy poddano przetwarzaniu obejmującemu standardowe procedury.

Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano za pomocą anten o częstotliwości 200 MHz. Na echogramie widoczna jest granica na głębokości 3,5-4m ppt (rys. 2.1). Jej przebieg jest niemal równoległy do powierzchni terenu. Na echogramie obserwuje się silny podwójny refleks w odległości około 85 cm od siebie. Na echogramie zarejestrowanym przy pomocy anteny 50 MHz granica ta jest widoczna na głębokości 4m ppt. Granica ta odpowiada kontaktowi między nadkładem czwartorzędowym a zwietrzałym podłożem trzeciorzędowym. Na echogramie zarejestrowanym anteną 400 MHz granica ta jest praktycznie niewidoczna.



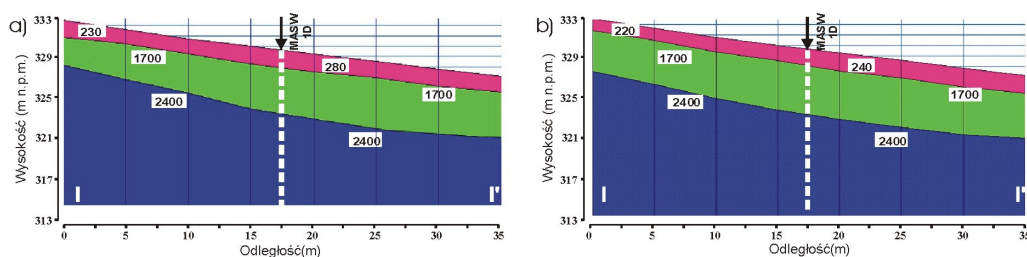
Rys. 2.1. Wyniki pomiarów georadarowych wykonanych trzema antenami o częstotliwości 50 Hz (a) 200 Hz (b) i 400 Hz (c) na profilu A-B na terenie osuwiska w utworach fliszu karpackiego (Pilecki i inni 2007)

Na echogramach zarejestrowanych przy pomocy anten o częstotliwości 50 i 200 MHz widoczne są płaszczyzny poślizgu osuwiska. Zaznaczają się one jako przerwania ciągłości horyzontów refleksyjnych przebiegające niezgodnie do tych horyzontów.

Wyniki pomiarów sejsmicznych

Pomiary sejsmiczne przeprowadzono techniką refrakcyjną za pomocą aparatury Geode-24 oraz trójskładowych geofonów 4,5 Hz (składowa X równoległa do kierunku profilu, składowa Y prostopadła do kierunku profilu). Fale sejsmiczną wzbudzano za pomocą uderzenia 4 kg młotem. Punkty wzbudzania położone były między każdym czujnikiem. Zastosowano 8-krotne składanie sygnału. Na etapie przetwarzania i interpretacji rejestrację przefiltrowano w zakresie do 150 Hz. Obliczenia modelu prędkościowego i głębokościowego ośrodka dokonano metodą czasu wzajemnego (reciprocal traveltimes method). Korekty modelu dokonano metodą analizy odwrotnej. Rejestracje sejsmiczne zostały także wykorzystane do analizy techniką MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

W przypadku profilowania refrakcyjnego fali typu P na podstawie dotychczasowych doświadczeń przyjęto trójwarstwowy model ośrodka. Wyniki pomiarów opracowanych dla różnych składowych rejestracji przedstawiono w postaci refrakcyjnego przekroju prędkościowo - głębokościowego (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Wyniki profilowania refrakcyjnego: składowa pionowa Z (a); składowa pozioma X – poprzeczna do linii profilu (b)

Generalnie, obserwuje się podobny charakter przekrojów głębokościowych dla składowej pionowej i poziomej poprzecznej do linii profilu fali P. Natomiast zauważalne są niewielkie różnice w grubościach wyinterpretowanych warstw. W przypadku składowej poziomej równoległej do linii profilu rejestracje nie pozwalały na poprawną identyfikację fal refrakcyjnych.

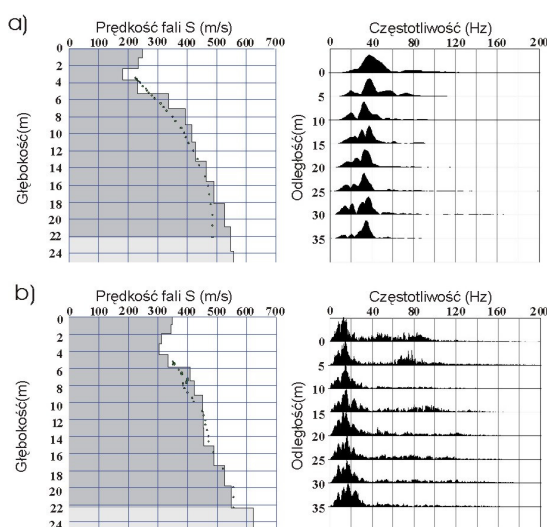
Wyniki analizy MASW przedstawiono na rysunku 2.3. Większa rozdzielczość fali typu S pozwala na wyraźne wskazanie strefy osłabienia na głębokości około 3-4 m. Wynik ten potwierdza wskazania metody georadarowej. Na znormalizowanych zapisach widm częstotliwościowych obserwuje się stosunkowo dobrą propagację fal w zakresie od 30 do 50 Hz dla punktów wzbudzenia w sąsiedztwie czujników.

3. Podsumowanie

Projektując pomiary metodą georadarową i sejsmiczną dokonujemy optymalnego wyboru między zasięgiem rozpoznania a jego rozdzielczością. Metodyka pomiarowa powinna być opracowana na podstawie możliwie pełnej informacji geologiczno-inżynierskiej. W przeprowadzonych testach w warunkach fliszu karpackiego najkorzystniejsze wyniki

rozpoznania nieciągłości uzyskano dla anteny 200 MHz, przy czym interesujące są również elementy rozpoznania dokonane za pomocą anteny 50 MHz.

W metodzie sejsmicznej rozdzielczość fal jest niższa, lecz zasięg rozpoznania przy odpowiednim schemacie pomiarowym i doborze energii źródła jest zdecydowanie większy w porównaniu do metody georadarowej. Dla sejsmiki „młotkowej” zasięg rozpoznania w warunkach fliszu karpackiego nie przekracza 20-30 m. Profilowanie refrakcyjne w połączeniu z techniką MASW 1D wydaje się być rozwiązaniem optymalnym w warunkach fliszu karpackiego. Dla osiągnięcia najkorzystniejszych wyników należałoby przyjąć odległość między geofonami od 2 do 3 m z punktami wzbudzania między czujnikami. Odsunięcie PS-u dla techniki młotkowej pogarsza jakość rozpoznania.



Rys. 2.3. Wyniki analizy MASW dla odsunięcia PS 5m (a) i odsunięcia PS 70 m (b) (Pilecki i inni 2007)

Literatura

- [1] Annan A.P. 2001: Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, Sensors & Software.
- [2] Doerksen K. 2002: Improved Optical Positioning For Gpr Based Structure Mapping, Proc. of the Ninth International Conference on GPR, Santa Barbara, USA.
- [3] Pilecki Z., Ziętek J., Karczewski, Pilecka E., Kłosiński J. 2007: The effectiveness of recognizing of failure surface of the Carpathian flysch landslide using wave methods, Mat. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 3-5 September 2007, Istambul.

Resolution of GPR and seismic method in engineering recognition of discontinuities

The effectiveness of discontinuities recognition with the help of GPR and seismic methods in Carpathian flysch has been described. GPR surveys carried out by antennas of different frequency in the aim of comparison of their resolution in measurements conditions

Seismic surveys were directed on resolution comparing of P-wave and S-wave using refraction profiling and 1D MASW technique. Obtained results 1D let to choose the optimal methodology having account geological engineering conditions in the investigation site.