

Wojciech DĘBSKI

Instytut Geofizyki PAN, Warszawa

Tomografia sejsmiczna w górnictwie

Słowa kluczowe

Sejsmologia górnicza, tomografia sejsmiczna, metody inwersyjne.

Streszczenie

Prędkościowa tomografia sejsmiczna jest techniką bezinwazyjnego obrazowania budowy wewnętrznej próbek skalnych, masywu skalnego, struktur geologicznych itp. w skalach poczynając od ułamka metra do tysięcy kilometrów. Otrzymywane tą techniką przestrzenne rozkłady prędkości fal P i S są zwykle interpretowane w kontekście strukturalnej budowy badanego górotworu. Jednakże, z punktu widzenia zastosowań w górnictwie jednym z najważniejszych elementów badania tomograficznego jest próba interpretacji otrzymanego obrazu tomograficznego pod kątem stanu naprężeń w górotworze. Osiągnąć to można albo przez próbę korelacji aktywności sejsmicznej z anomaliami rozkładu prędkości albo przez interpretację anomalii prędkości pod kątem zmiennego w przestrzeni pola naprężeń. Niezależnie od wybranego podejścia dla poprawnej interpretacji tomogramów bardzo ważna jest ocena wiarygodności otrzymanych pól prędkości. Celem niniejszej pracy jest przybliżenie zasad tomografii sejsmicznej oraz wspomnianego powyżej dwójnego podejścia do praktycznej interpretacji wyników badań tomograficznych.

1. Wprowadzenie

Możliwość wystąpienia wstrząsów sejsmicznych stanowi bardzo poważne zagrożenie dla sprawnego funkcjonowania kopalni, zdrowia a nawet życia zatrudnionych górników jak również może pociągać za sobą duże straty materialne w postaci zniszczonego sprzętu górniczego, zniszczonych wyrobisk itp. Przyjąć możemy, że w większości wypadków wstrząsy sejsmiczne występują, gdy naprężenia zakumulowane w górotworze lokalnie przekraczają wytrzymałość ośrodka skalnego. W wyniku przekroczenia krytycznej wartości naprężeń następuje albo spękanie górotworu i towarzyszące mu zwykle przesunięcie się mas skalnych wzdłuż istniejących pęknięć lub uskoków albo zniszczenie (spękanie, skruszenie, itp.) skał. W obydwu przypadkach mamy do czynienia z gwałtownym uwolnieniem się energii sprężystej i emisją silnych fal sejsmicznych, które dodatkowo, zwłaszcza w obszarze bliskim źródła mogą potęgować dynamiczny efekt przekroczenia wytrzymałości górotworu. Tak więc monitorowanie stanu górotworu pod kątem jego stabilności mechanicznej oraz lokalnej akumulacji pola naprężeń ma olbrzymie znaczenie praktyczne. Równocześnie jest to

zagadnienie niezwykle ciekawe z naukowego punktu widzenia, gdyż śledzenie w czasie i przestrzeni migracji naprężeń może dostarczać niezwykle ważnych informacji o procesach nukleacji wstrząsów sejsmicznych w semi-kontrolowanych warunkach naturalnych.

Bezpośrednie pomiary stanu naprężeń górotworu mogą być prowadzone tylko w wybranych, łatwo dostępnych miejscach kopalni. Z tego względu, analiza kompleksowa pola naprężeń w wybranym obszarze i jego zmienności w czasie i przestrzeni wymaga stosowania zaawansowanych technik inwersyjnych. Pod tym pojęciem rozumiemy wszelkie metody obrazowania struktury górotworu, panujących w nim naprężeń, ich zmienności w czasie i przestrzeni, itp. na podstawie dostępnych danych pomiarowych oraz znanych technik ich przetwarzania. Jedną z zaawansowanych sejsmologicznych technik tego typu jest tomografia sejsmiczna.

Tomografia jest metodą bezinwazyjnego badania struktury wewnętrznej obiektów i jako bardzo efektywne narzędzie stosowana jest w wielu dziedzinach nauki i techniki, w tym także w sejsmologii.

Rekonstrukcja tomograficzna budowy badanego obiektu oparta jest na wielokrotnym jego "prześwietlaniu" za pomocą fal sejsmicznych, rentgenowskich, akustycznych, elektromagnetycznych itp. (Nolet 1987). Fale rozchodząc się w badanym obiekcie zbierają informacje o parametrach fizycznych ośrodka wzdłuż drogi ich propagacji. Prześwietlony więc obiekt wielokrotnie przy różnych ustawieniach źródła fal i odbiornika względem badanego obszaru otrzymujemy zbiór uśrednionych wartości z których można odtworzyć przestrzenny rozkład wybranego parametru fizycznego (Nolet 1987). Rozdzielczość metody, a więc zdolność do odtworzenia położenia niejednorodności o zadanych rozmiarach zależy istotnie od konfiguracji par źródło - odbiornik, ilości wykonanych prześwietleń oraz oczywiście od jakości danych obserwacyjnych.

Rodzaj parametrów fizycznych których przestrzenny obraz możemy badać metodami tomograficznymi zależy od rodzaju fal stosowanych do prześwietlania ośrodka. W sejsmologii globalnej do badania głębokich struktur ziemi, na przykład jądra ziemi używa się fal sejsmicznych pochodzących z naturalnych trzęsień ziemi (Dziewonski, Anderson 1984). Z kolei w zakresie badań inżynierskich, na przykład w kopalniach, przy drążeniu tuneli, itp. używane są zarówno fale sejsmiczne wytwarzane przez mikro-wybuchy i wibratory jak i fale akustyczne generowane przez przetworniki piezoceramiczne (Young i in. 1989). Te ostatnie stosowane są także, ze względu na niewielką długość fali rzędu centymetrów, do obrazowania struktury próbek skalnych (Carlston i in. 1993; Dębski 1999; 2002). Zarówno fale sejsmiczne jak i fale akustyczne używane w tomografii sejsmicznej są falami mechanicznymi i mogą być wykorzystane do obrazowania rozkładu przestrzennego dwóch podstawowych parametrów fizycznych górotworu: prędkości propagacji fal sejsmicznych oraz współczynnika tłumienia fal. Te dwa parametry fizyczne są związane z dwoma podstawowymi charakterystykami odczytywanymi na potrzeby tomografii z zarejestrowanych sejsmogramów, a mianowicie czasem propagacji fali niosącym informacje o rozkładzie prędkości fal i amplitudzie fali pozwalającej ocenić ilości pochłoniętej w ośrodku energii (Gibowicz, Kijko 1994).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie podstaw tomografii sejsmicznej jej zalet i ograniczeń oraz dyskusja metod wykorzystania wyników badań tomograficznych.

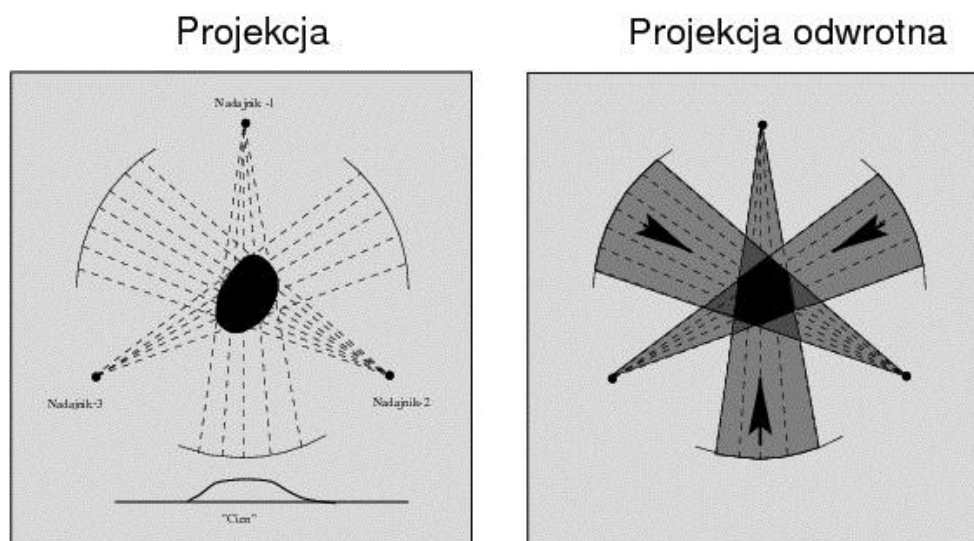
2. Tomografia sejsmiczna w kopalniach

2.1. Podstawy obrazowania tomograficznego

Technika obrazowania tomograficznego jest bezinwazyjną metodą badania przestrzennego rozkładu wybranych parametrów fizycznych wewnątrz badanego obiektu na podstawie pomiarów wykonanych na jego powierzchni. W zastosowaniach górniczych zdecydowanie najpopularniejsza jest tomografia prędkościowa która odtwarza przestrzenny rozkład anomalii prędkości fal sejsmicznych. Rekonstrukcja tomograficzna struktury górotworu oparta jest na wielokrotnym jego „prześwietlaniu” za pomocą fal sejsmicznych (Nolet 1987; Dębski 2002). Fale rozchodząc się w badanym obiekcie zbierają informacje o prędkości propagacji fal i ich tłumieniu wzdłuż drogi propagacji – promieni sejsmicznych. Prześwietliwszy badany górotwór wielokrotnie przy różnych ustawieniach źródeł fal i odbiorników względem badanego obszaru otrzymujemy zbiór uśrednionych wzdłuż dróg promieni wartości prędkości fal sejsmicznych z których można odtworzyć przestrzenny rozkład anomalii pola prędkości (Nolet 1987, Dębski 2002; 2010). Powyższa zasada zilustrowana jest na rys.1, gdzie pokazane są dwa podstawowe elementy obrazowania tomograficznego, a mianowicie:

- a) „prześwietlenie” badanego obiektu/obszaru przy pomocy fal sejsmicznych (lewy rysunek),
- b) projekcja odwrotna polegająca na „przeniesieniu” zarejestrowanych „cieni” w obszar górotworu wzdłuż promieni sejsmicznych od miejsca rejestracji aż do źródła fal.

Powyższe elementy obrazowania tomograficznego związane są z dwoma etapami prac tomograficznych. Pierwszy z nich to etap pomiarowy obejmujący wykonanie aktywnych pomiarów wykorzystując kontrolowane źródła fal sejsmicznych (strzały, wibratory, itp.) albo, w przypadku pasywnej tomografii sejsmicznej, zebranie informacji o zarejestrowanych wstrząsach ich wstępna selekcja itp. Etap projekcji odwrotnej to etap realizowany numerycznie przy użyciu programów komputerowych umożliwiających symulowanie propagacji fal sejsmicznych w górotworze i odpowiednich algorytmów inwersyjnych.



Rys. 2.1. Dwa podstawowe elementy obrazowania tomograficznego: „prześwietlenie” badanego obszaru falami sejsmicznymi (lewy rysunek) oraz inwersja (prawy rysunek) którą możemy interpretować jako projekcje odwrotną polegającą na przeniesieniu zarejestrowanych w pierwszym etapie obrazów wzdłuż promieni sejsmicznych do wnętrza obszaru. Nałożenie tak „przeniesionych” danych pomiarowych odtwarza przestrzenny rozkład parametrów górotworu.

Fig.2.1. Two basic steps of tomographic imaging: illumination of the studied structure by seismic waves and their back-projection along the seismic rays.

Etap „projekcji odwrotnej” może być realizowany poprzez bezpośrednią realizację idei przedstawionej na rys. 2.1, ale znacznie częściej jest on formułowany jako zagadnienie optymalizacyjne: poszukiwanie takiego przestrzennego rozkładu anomalii prędkości dla którego modelowane czasy propagacji fal sejsmicznych jak najlepiej odtwarzają czasy zmierzone w pierwszym etapie.

2.2. Metody tomografii sejsmicznej

W kopalniach wykazujących zwiększony poziom aktywności sejsmicznej najbardziej perspektywiczną metodą geofizyczną obrazowania stanu górotworu wydaje się być pasywna, tomografia sejsmiczna wykorzystująca wstrząsy indukowane jako źródła fal sejsmicznych „prześwietlających” górotwór. Do badań tomograficznych mogą być wykorzystane zarówno fale podłużne P jak i poprzeczne S. Jednakże należy pamiętać, że ze względu na rozmiary kopalń, dokładność wyznaczenie czasu wejścia fali S jest zwykle dużo mniejsza niż dla fali P ze względu na typowe nakładanie się przebiegu fali P na fale S. W takiej sytuacji zdecydowanie dokładniejsze wyniki będzie dawać tomografia oparta na fali P.

Następnym elementem który należy rozważyć przy wyborze techniki tomograficznej jest wybór rodzaju danych wejściowych. Związany z tym jest wybór metody tomograficznej oraz fizycznych parametrów górotworu, które będą obrazowane. Podstawowymi wielkościami

odczytywanymi z sejsmogramów które mogą być użyte do rutynowej analizy tomograficznej są:

1. pełne pole falowe – część zapisu sejsmicznego obejmującego zapis fal P i S,
2. czas rejestracji wejścia fali P,
3. amplituda fali P,
4. czas rejestracji pierwszego maksimum fali P.

Ograniczyliśmy się przy tym tylko do fali P jako potencjalnie najłatwiejszej do użycia.

Z wyborem jednej z powyższych wielkości wiązą się następujące techniki tomograficzne (Dębski 2002).

W pierwszym przypadku (1) mamy do czynienia z najbardziej zaawansowanym podejściu opartym na inwersji pełnego pola falowego – do stworzenia obrazu stanu górotworu wykorzystuje się pełny zapis sejsmiczny. Technika ta, zwana także inwersją pola falowego jest bardzo obiecująca, lecz do chwili obecnej nie była jeszcze stosowana w warunkach polskich kopalń. Prowadzone były jedynie wstępne prace studyjne (Dębski i in. 2008; Danek, Dębski 2010) odnośnie zbadania możliwości jej stosowania w warunkach górniczych. Ze względu na złożoność metody nie polecamy jej w chwili obecnej do stosowania rutynowego .

W typowych badaniach tomograficznych (przypadek 2) wielkościami używanymi do stworzenia obrazu tomograficznego są czasy wejść (rejestracji) fal P a parametrem badanym jest prędkość fal P (Dębski 2002; Nolet 1987). Metodyka tego podejścia opiera się na związku czasu rejestracji fali oznaczanym dalej jako T^o z rozkładem prędkości opisanym wzorem:

$$T^o = T^i + \int_{ray} \frac{ds}{v} \quad (2.1)$$

gdzie:

T^i jest czasem wystąpienia wstrząsu, v jest prędkością rozchodzenia się fal (parametr poszukiwany) a całka liczona jest wzdłuż promienia sejsmicznego od źródła aż do odbiornika. W podejściu tym dużą trudnością techniczną jest precyzyjne wyznaczenie czasu wejścia fali.

Parametrem obserwacyjnym w kolejnej metodzie tomograficznej (3) jest amplituda fali P. Taki wybór prowadzi do tomografii amplitudowej (tłumieniowej) w której obrazowanym parametrem jest współczynnik tłumienia fal. Ponieważ parametr ten jest bardzo czuły na stan górotworu i jego zmiany czasowe, tomografia amplitudowa jest potencjalnie techniką umożliwiającą najlepszą ocenę stanu górotworu. Równocześnie jednak jest to technika najtrudniejsza do stosowania i stawiająca najwyższe wymagania co do jakości danych obserwacyjnych (Dębski i in. 2008).

W pracach (Dębski, R. P. Young 1999; 2002; Dębski 2002) zaproponowane nowe podejście do obrazowania tomograficznego (przypadek 4) które łączy w sobie względną prostotę tomografii prędkościowej z czułością tomografii amplitudowej. Zgodnie z tą propozycją wielkością mierzalną wykorzystywaną do obrazowania sejsmologicznego jest czas rejestracji pierwszego maksimum amplitudy. Wielkość ta jest sumą czasu propagacji fali oraz czasu narastania impulsu sygnału wejściowego. Oznaczając przez T^m czas zarejestrowania pierwszego maksimum można pokazać, że

$$T^m = T^o + T^{rt} = \int_{ray} \frac{ds}{\bar{v}} \quad (2.2)$$

gdzie:

T^{rt} jest czasem narastania impulsu fali P, T^o jest czasem rejestracji fali natomiast \bar{v} jest uogólnioną prędkością daną wzorem:

$$\bar{v} = \frac{v \cdot Q}{Q + c} \quad (2.3)$$

gdzie:

Q jest współczynnikiem dobroci dla danego typu fal, a c jest stałym współczynnikiem charakterystycznym dla wstrząsu. Wykorzystując powyższe równania można odtworzyć przestrzenny rozkład parametru \bar{v} . Podejście to pozwala uzyskać dokładniejsze i bardziej wiarygodne rozwiązanie zagadnienia tomograficznego niż otrzymywane w klasycznym podejściu opartym na inwersji czasu wejścia fal. Należy również zauważyć, że parametr \bar{v} wydaje się być bardziej czuły na stan wewnętrzny górotworu niż v (Dębski, R. P. Young 2002). Pomimo tego, że metoda ta stosowana była dotychczas jedynie w badaniach akustycznych (Dębski, R. P. Young 1999; 2002) polecamy ją jako podstawę planowanych badań tomograficznych w kopalniach.

2.3. Tomografia sejsmiczna – metodologia przetwarzania danych

Zadanie wyznaczenia przestrzennego rozkładu prędkości (lub prędkości uogólnionej) na podstawie rejestracji sejsmicznych jest typowym sejsmologicznym zadaniem odwrotnym (Tarantola 2009; Dębski 2010). Składa się ono z kilku typowych kroków:

- 1) Pierwszym elementem badania tomograficznego jest wybór i krytyczna analiza materiału obserwacyjnego pod kątem jakości danych i możliwych błędów obserwacyjnych.
- 2) Następnym krokiem jest wybór odpowiedniej parametryzacji ośrodka. Zwykle w zastosowaniach inżynierijno-technicznych wystarczająco dobrym przybliżeniem jest przyjęcie podziału badanego obszaru na regularne komórki o stałej wartości prędkości. Wybór ten musi być dokonany w oparciu o posiadany materiał obserwacyjny, a dokładniej ilości dostępnych promieni sejsmicznych.
- 3) Podstawowy elementem obrazowania tomograficznego jest inwersja danych obserwacyjnych która połączona powinna być z analizą błędów obrazowania. Analiza błędów jest bardzo istotna choć trudna do wykonania. W chwili obecnej jej przeprowadzenie wymaga użycia probabilistycznej techniki inwersyjnej (Dębski 2010) i praktycznie nie może być wykonywana rutynowo.
- 4) Ostatnim elementem jest analiza otrzymanych wyników pod kątem ich interpretacji geomechanicznej

Przeanalizujemy powyższe etapy w kolejności ich wykonywania dla zagadnienia klasycznej tomografii prędkościowej¹.

2.3.1. Analiza materiału obserwacyjnego

Dostępność danych obserwacyjnych pochodzących, czy to z pomiarów aktywnych, czy też pasywnych wyznacza granice stosowalności metody tomograficznej. Kluczowymi elementami są:

- a) liczba promieni sejsmicznych, to jest par źródło fal – odbiorniki dla których zmierzony jest czas propagacji fal (im większa tym lepiej),
- b) pokrycie badanego obszaru promieniami – im równomierniejsze tym lepiej,
- c) dokładność wyznaczenia czasu propagacji fal (im większa tym lepiej) obejmująca dokładność odczytu czasu rejestracji fali i dokładność lokalizacji wstrząsu.

Zbyt mała liczba promieni sejsmicznych użytych do tworzenia obrazów tomograficznych skutkuje zwykle zbyt gładkimi modelami rozkładu anomalii prędkości i silną zależnością otrzymanych modeli od przyjętego *a priori* modelu początkowego. Rozdzielczość przestrzenna metody rozumiana jako zdolność do rozróżnienia dwu blisko położonych obszarów o różnych prędkościach silnie zależy od ilości danych obserwacyjnych. To z kolei określa minimalny rozmiar komórek użytych do parametryzacji badanego ośrodka.

Geometryczny rozkład źródeł i geometria sieci rejestracyjnej decyduje o pokryciu badanego obszaru promieniami. Jak wskazuje praktyka (Nolet 1987; Dębski 2010) im pokrycie to jest równomierniejsze tym lepsze otrzymuje się wyniki obrazowania tomograficznego. W szczególności, może się zdarzyć, że przy zadanym pokryciu obszaru promieniami i wybranej parametryzacji przez pewne komórki nie będzie przechodził ani jeden promień. Algorytmy inwersyjne przypisują takim komórkom zwykle pewną wartość prędkości ustaloną *a priori*. O fakcie tym należy pamiętać interpretując otrzymany końcowy rozkład prędkości.

Ostatnim elementem analizy danych obserwacyjnych jest oszacowanie dokładności pomiaru czasu propagacji fal sejsmicznych. Dokładność ta wyznaczona jest przez dokładność odczytu czasu rejestracji fali oraz dokładności lokalizacji wstrząsu. Zwykle drugi czynnik jest dominujący.

2.3.2. Parametryzacja ośrodka

Kolejnym elementem procesu obrazowania tomograficznego ośrodka jest dyskretyzacja pola prędkości w badanym obszarze. Możliwe jest zastosowanie różnych metod z których najprostszą jest podział ośrodka na hipotetyczne jednorodne bloki o ustalonej prędkości (Nolet 1987; Dębski 2010). Ten właśnie sposób, ze względu na prostotę i wystarczającą dokładność (Dębski 2010) polecamy do zastosowań w kopalniach. Używając tego podejścia zastępujemy ciągle przestrzenny rozkład prędkości przez wektor M wartości prędkości przypisanych komórkom. Standardowo, wektor ten oznaczany jest jako m (ang. model). Pytaniami na które trzeba odpowiedzieć przy takim sposobie dyskretyzacji są kwestie rozmiaru komórek i ich orientacji. O ile wybór odpowiedniej orientacji jest stosunkowo łatwy i wynika z przebiegu warstw geologicznych w kopalni, o tyle wybór rozmiaru komórek jest dużo trudniejszy.

¹ Procedura postępowanie w przypadku tomografii prędkościowej rozszerzonej, to jest tworzenia obrazów parametru \bar{v} jest identyczna za wyjątkiem innych danych wejściowych.

Przyjęcie zbyt dużych komórek będzie prowadzić do rozwiązań o małej rozdzielczości – jest ona ograniczona przez rozmiar komórki. Z kolei wybór zbyt małych komórek istotnie zwiększy błędy otrzymanego rozkładu prędkości. Optymalne rozmiary komórek mogą być określone poprzez analizę tzw. krzywej rozdzielczości zaproponowanej w pracach (Dębski 1999; 2002) i zastosowanej np. w badaniach regionalnych obszaru Górnego Śląska (Dębski 2010).

2.3.3. Procedura inwersji

Podstawową techniką inwersyjną stosowaną obecnie w obrazowaniu tomograficznym jest podejście oparte na technice optymalizacyjnej [(Nolet 1987; Dębski 2010). Jej zarys jest następujący.

W wyniku dokonania dyskretyzacji przestrzennej badany obszar podzielony zostaje na M jednorodnych komórek o stałej wartości prędkości (lub innego parametru dyskutowanego powyżej) w komórce. Zagadnienie odwrotne sprowadza się wówczas do rozwiązania zadania optymalizacyjnego:

$$\left(\left(T^m(m) - T^o \right) \right) = \min \quad (2.4)$$

gdzie:

m jest wektorem wartości prędkości przypisanych każdej z komórek a symbol $((\cdot))$ oznacza użytą normę (Dębski 2004; Tarantola 2005). Ze względu na często zdarzające się w zagadnieniach tomografii niejednoznaczności w sformułowaniu zadania zwykle uwzględnia się dodatkowy człon regularyzacyjny zapewniający oczekiwane własności rozwiązania. W efekcie mamy do rozwiązania następujące zagadnienie:

$$\left(\left(T^m(m) - T^o \right) \right) + \left(\left(m^{apr} - m \right) \right) = \min \quad (2.5)$$

przy użyciu dowolnej numerycznej techniki optymalizacyjnej, gdzie m^{apr} jest zadaniem *a priori* modelem referencyjnym (początkowym). Ze względu na możliwość istnienia wielokrotnych lokalnych minimów sugerujemy stosowanie technik optymalizacji globalnej takich jak symulowane wyżarzanie (ang. Simulated Annealing) czy algorytmy genetyczne i ich pochodne do rozwiązania powyższego zadania.

W przypadku konieczności wykonania analizy dokładności jedyną możliwą do zastosowania techniką jest inwersja probabilistyczna (Dębski 2010). Polega ona na skonstruowaniu rozkładu prawdopodobieństwa na przestrzeni wszystkich rozkładów prędkości i ocenie prawdopodobieństwa że dany rozkład jest prawdziwy. Jednakże ze względu na znaczną złożoność obliczeniową oraz duże wymagania odnośnie mocy obliczeniowej komputerów technika ta nie może być obecnie stosowana do rutynowej analizy tomograficznej.

2.4. Interpretacja geomechaniczna

Ostatnim elementem obrazowania tomograficznego jest analiza otrzymanych wyników pod kątem interpretacji stanu górotworu oraz ewentualnych zmian zachodzących w okresach czasu pomiędzy kolejnymi badaniami tomograficznymi. Istnieją zasadniczo dwa podejścia do interpretacji otrzymanych wyników. Pierwsze z nich oparte jest na korelacji rejestrowanej sejsmiczności z otrzymanym przestrzennym rozkładem prędkości fal sejsmicznych jak na przykład w pracy (Dębski 2010). W tym podejściu tym zakłada się, że wewnętrzne pola naprężeń wpływają na parametry mechaniczne górotworu wyrażone przez np. współczynniki Lamégo które definiują wartość prędkości fal sejsmicznych. Przestrzenne zmiany prędkości odpowiadają wówczas zmiennemu polu naprężeń. Niestety interpretacja taka nie jest jednoznaczna, gdyż nie uwzględnia faktu że anomalie pola prędkości mogą też być spowodowane przez inne czynniki, a zwłaszcza przez zmienne w przestrzeni parametry litologiczne górotworu takie jak np. spękanie, zmiany porowatości, nasycenia wodą, itp. Jednakże podejście takie może służyć do badań porównawczych stanu górotworu w różnych okresach czasu. Należy wówczas pamiętać jedynie o możliwym wpływie zmiennej konfiguracji promieni sejsmicznych, ich ilości i przebiegu na dokładność obrazowania.

Druga z możliwych metod interpretacji otrzymanych wyników tomograficznych stawia sobie za cel bezpośrednie określenie („wyliczenie”) parametrów litologicznych górotworu w oparciu o otrzymane bezwzględne wartości prędkości. W podejściu tym stosuje się różne relacje empiryczne jak (np. dyskutowane w pracach (Best i in. 1994; Vanorio i in. 2002)) wyznaczone dla różnych rodzajów skał. Podejście to, choć koncepcyjnie bardzo proste obarczone jest wieloma niepewnościami w szczególności związanym ze zwykle dosyć nieprecyzyjnym określeniem bezwzględnych wartości prędkości metodą tomograficzną.

4. Podsumowanie

Tomografia sejsmiczna jest nowoczesną techniką geofizyczną będącą w stanie opisać przestrzenny rozkład prędkości fal sejsmicznych lub innego fizycznego parametru w badanym górotworze dostarczając dodatkowych w stosunku do mapy sejsmiczności informacji o stanie górotworu.

W niniejszej pracy opisane zostały podstawowe zasady tomografii sejsmicznej oraz metodyka badania tomograficznego. Złożoność metody, duże wymagania co do danych obserwacyjnych oraz duża liczba parametrów ustalanych *a priori* powodują, że poprawna interpretacja wyników badań tomograficznych jest trudna, wymaga dużego doświadczenia i nie może być na obecnym etapie wykonywana automatycznie. Z drugiej jednakże strony, technika ta oferuje potencjalnie bardzo duże możliwości oceny stanu górotworu. Spodziewać się można, że w połączeniu z innymi technikami geofizycznymi, takimi jak np. analiza transferu naprężeń Coulomba oraz analiza niestacjonarnego hazardu sejsmicznego może znacząco przyczynić się do poprawy ilościowej oceny stanu zagrożenia sejsmicznego, wskazując na rejony o zwiększonym stopniu zagrożenia tąpnięciami oraz zmienność tego zagrożenia w czasie. Takie wykorzystanie metody tomograficznej wymaga jednakże dalszych intensywnych badań metodologicznych w tym analiz różnych sposobów interpretacji obrazów tomograficznych.

Podziękowanie

Niniejsza praca została częściowo sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach grantu nr. 2011/01/B/ST10/07305.

Literatura

- [1] *Nolet G.*, Seismic Tomography., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1987.
- [2] *Dziewonski A., D. Anderson*, Seismic Tomography, Scientific Am., 251, 60-68, 1984.
- [3] *Young R.P., A.D. Hutchins, J. McGaughey, J. Towers, D. Jansen, M. Bostock*, Geotomographic Imaging in the Study of Mining Induced Sismicity, Pure Appl. Geophys.,129 (3-4):571-596, 1989
- [4] *Jansen D.P., S.R. Carlston, R. P. Young, D.A. Hutchins*, Ultrasonic Imaging and Acoustic Emission Monitoring of Thermally Induced Microcracks in Lac du Bonnet Granite, J. Geophys. Res. 98 (B-12), 22231—22243, 1993
- [5] *Dębski W., R.P. Young*, Tomographic imaging of thermally induced fractures in granite using Bayesian inversion, Pure Appl. Geophys. 159 (1-3), 277-307, 2002.
- [6] *Dębski W.*, Wstępne wyniki tomografii akustycznej próbki granitu pochodzącej z Underground Research Laboratory (Canada). Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-22(310):331–337, 1999.
- [7] *Gibowicz S. J., A. Kijko*, An Introduction to Mining Seismology. San Diego: Academic Press, 1994.
- [8] *Dębski W.*, Imaging rock structure using acoustic waves: methods and algorithms, in T. Yanagidani , H. Ogasawara H., M. Ando, editors, Seismogenic Process Monitoring, Balkema, 2002,pp. 309-326.
- [9] *Dębski W.*: Probabilistic inverse theory. Adv Geophys 52:1-102, DOI 10.1016/S0065-2687(10)52001-6, 2010.
- [10] *Dębski W., Ł. Rudziński*, Pasywna tomografia sejsmiczna obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2010,pp. 80-87.
- [11] *Tarantola A.*, Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. Philadelphia: SIAM, 2005.
- [12] *Dębski W.*, Application of Monte Carlo techniques for solving selected seismological inverse problems, Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., 2004,vol. B-34,pp. 1-207.,
- [13] *Danek T., Dębski W.*, GPU Accelerated Wave Form Inversion Using Monte Carlo Sampling, Lecture Notes on Computer Science, 2010, Para 2010 State of the art in Scientific and Parallel Computing,
- [14] *Dębski W., T. Danek, A. Pieta, A. Leśniak*, Waveform inversion through the MC sampling, Expanded Abstract, 2008, ESC 2008 31st General AssemblyW.
- [15] *Dębski W.*, Study of the image reconstruction accuracy of active amplitude tomography, Rockburst and Seismicity in Mines , Balkema, 1997,pp. 141—144.
- [16] *Dębski W., R. P. Young*, Enhanced Velocity Tomography: Practical Method of combining velocity and attenuation parameters, Geophys. Res. Lett., 1999,vol. 26,pp. 3253—3256.
- [17] *Best, A.I., C. McCann, J. Sothcott*, The relationships between the velocities, Geophys. Prosp., 1994,vol. 42,pp. 151—178.
- [18] *Klimentos T., C. McCann*, Relationship among compressional wave attenuation, Geophysics, 1990,vol. 55,pp. 998—1014.
- [19] *Murphy W. F.*, Acoustic measures at partial gas saturation in tight sandstones.,Geophys. Res., 1984,vol. 89,pp. 11549—11559.
- [20] *Oconnell R., B. Budiansky*, Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, J. Geophys. Res., 1974,vol. 79,pp. 5412-26.
- [21] *Vanorio T., M. Prasad, D. Patella, A. Nur*, Ultrasonic velocity measurement in volcanic rocks: correlation with microtexture, Geophys. J. Int., 2002,vol. 149,pp. 22-36.

- [22] Dębski W., Seismic Tomography by Monte Carlo Sampling, Pure. Appl. Geophys. 2010, vol. 167, pp. 131-152.

Seismic tomography in mining applications

Key words

Mining seismology, seismic tomography, inverse methods.

Summary

Seismic velocity tomography is the non-destructive technique of imaging internal structure of rock samples, rock-mass, geological structures, etc. at scales ranging from centymeters up to thousands of kilometers.

The images of the spatial distributions of P and S waves velocity anomalies are usually interpreted in terms of an internal structure of imaged body. However, from the mining applications point of view the most important element of tomographic inversion is an interpretation of the tomographic image in the context of the internal stress build up process, mainly spatial stress distribution. It can be achieved either by correlation seismic activity with velocity heterogeneities or by an interpretation of the retrieved velocity in terms of lithological parameters. No matter which approach is used the reliable interpretation of tomograms requires an estimation of the inversion uncertainties. In this paper the fundamentals of seismic tomography are presented and two approaches to interpretation of tomographic images are shortly discussed.

Przekazano: 30 marca 2012 r.