



Mariusz KUDYK*, Zenon PILECKI**

Moduł deformacji utworów fliszu karpackiego na trasie tunelu „Emilia” w Beskidzie Żywieckim

Streszczenie: Praca omawia wyniki pomiarów terenowych modułu deformacji utworów fliszu karpackiego na trasie tunelu „Emilia” w miejscowości Laliki w Beskidzie Żywieckim. Pomiary modułu deformacji wykonano na etapie projektowania i realizacji tunelu. Pomiary te przeprowadzono różnymi metodami: dylatometryczną, presjometryczną, klasyfikacji geomechanicznej oraz sejsmiczną. Wyniki pomiarów były podobne dla metod punktowych dylatometrycznej i presjometrycznej. Moduł deformacji określony metodą sejsmiczną za pomocą empirycznej zależności Bartona (1996) oraz metodą klasyfikacji geomechanicznej RMR z wykorzystaniem empirycznej zależności Serafima i Pereiry (1983) był kilkakrotnie większy. Na podstawie wyników pomiarów punktowych oszacowano przedziały zmienności modułu deformacji dla górotworów łupkowo-piaskowcowego i piaskowcowo-łupkowego fliszu karpackiego. Podkreślono zalety i ograniczenia metod wyznaczania modułu deformacji. Wskazano na konieczność realizacji pomiarów w strefach nienaruszonych wykonaniem wyrobiska lub procesem wiertzenia. Wskazano na potrzebę opracowania bardziej porównywalnych zależności empirycznych dla metody sejsmicznej i klasyfikacji geomechanicznej w warunkach ośrodka słabego, silnie zniszczonego tektonicznie o strukturze fliszu.

Słowa kluczowe: moduł deformacji, flisz karpacki, tunel komunikacyjny, metoda presjometryczna, metoda dylatometryczna, metoda sejsmiczna, klasyfikacja geomechaniczna

Deformation modulus of Carpathian flysch in the route of Emilia tunnel in Żywiecki Beskid

Abstract: The work describes the results of deformation modulus tests in Carpathian flysch in the route of Emilia tunnel in Laliki located in Beskid Żywiecki mountains. Deformation modulus tests were completed in the stage of planning and constructing of the tunnel. Tests were carried on by different methods: dilatometer, pressuremeter, geomechanical classification and seismic. Tests results were close to similar for point methods: dilatometer and pressumeter. Deformation modulus determined by seismic method and empirical Barton relation and also empirical Serafim and Pereira relation was several times greater. Based on point methods deformation modulus changes were estimated for sandstone-shale and shale-sandstone rock masses of

* Mgr inż., ** Dr hab. inż., AGH Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska oraz Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Carpathian flysch. Limitations and advantages of deformation modulus determine were underlined. It was pointed on test realization necessity in zones undisturbed by excavation influence and in unweathered zones. It is also needed to collaborate more reliable empirical relations for seismic method and geomechanical classification method in the conditions of weak rock mass, tectonically strong disturbed and flysch structured.

Key words: deformation modulus, elastic modulus, Carpathian flysch, road tunnel, pressuremeter test, dilatometer test, seismic survey, geomechanical classification

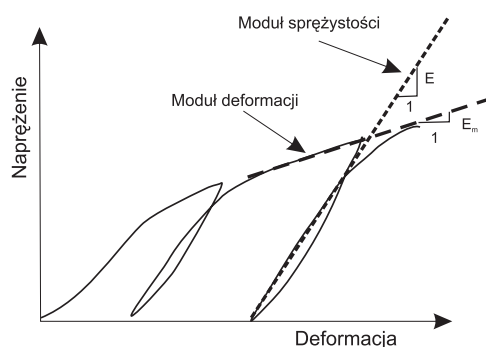
Wprowadzenie

Jednym z podstawowych parametrów geomechanicznych określających jakość górotworu jest moduł deformacji górotworu nazywany modułem odkształcenia i oznaczany często jako E_m . Przyjmuje się, że moduł deformacji górotworu jest stosunkiem przyłożonego naprężenia σ do odpowiadającej mu deformacji ośrodka ε , obejmującej fazę sprężystą i plastyczną w części charakterystyki pokazanej na rysunku 1 (ISRM 1975). Moduł deformacji wyznacza się na wznoszącej części charakterystyki naprężenie–deformacja, natomiast moduł sprężystości na opadającej części w fazie sprężystej.

Pomiar wielkości modułu deformacji górotworu w warunkach *in situ* można wykonać kilkoma metodami:

- **mechaniczną** np. dylatometryczną, presjometryczną, wielkoskalową i innymi (np. Thiel 1989; Schnaid 2009) z pomierzonej charakterystyki naprężenie – deformacja,
- **klasyfikacji geomechanicznej** na podstawie empirycznych zależności modułu deformacji od punktacji klasyfikacji geomechanicznych,
- **sejsmiczną** na podstawie empirycznej zależności modułu deformacji od prędkości fali sejsmicznej.

Możliwie miarodajne wartości modułu deformacji uzyskuje się metodami mechanicznymi. Są to jednak pomiary punktowe i w ośrodkach silnie niejednorodnych należy wykonać dużą ilość pomiarów dla uzyskania reprezentatywnych wyników. Pozostałe dwie metody wykorzystują empiryczne zależności korelacyjne modułu deformacji z odpowiednim parametrem pomiarowym. Wartości modułu deformacji wyznaczone tymi metodami charakteryzują uśrednione właściwości ośrodka na odcinkach pomiarowych. Często wartości takiego



Rys. 1. Sposób wyznaczania modułu deformacji E_m i modułu sprężystości E z charakterystyki naprężenie – deformacja

Fig. 1. Determining of deformation modulus E_m and elastic modulus E from stress – deformation curve

modułu odbiegają od wyników uzyskanych metodami punktowymi, zwłaszcza w ośrodkach silnie niejednorodnych. Mają one tę zaletę, w porównaniu z metodami punktowymi, że pozwalają określić wielkość modułu w sposób ciągły, na dłuższych odcinkach w ośrodku i względnie ekonomicznie.

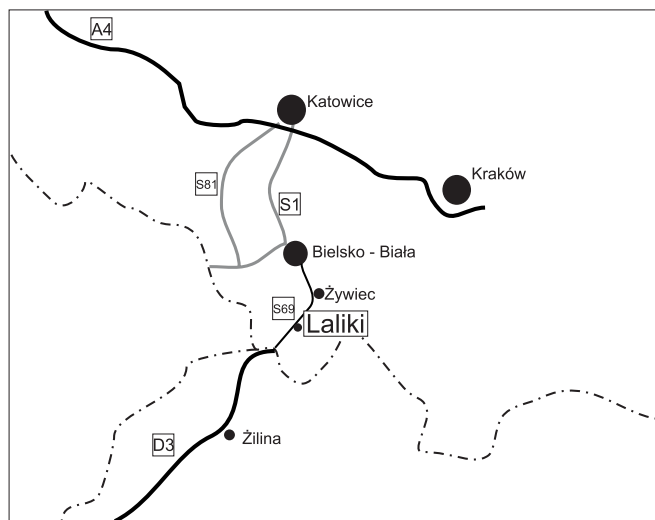
Pomiary modułu deformacji ośrodka skalnego zależą od wielu czynników, przy czym do podstawowych należy zaliczyć (Thiel 1995; Bestyński 1997):

- objętość ośrodka objętego pomiarami – w różnych pomiarach objętości te mogą być znacząco różne. W pomiarach dylatometrycznych, przyjmując średnicę strefy wpływu około 3m, objętość ośrodka będzie wynosiła około 30 m³. W pomiarach wielkoskalowych, dla zasięgu wpływów około 4–5 m, objętość ośrodka objętego pomiarami będzie wynosić około 50 m³,
- czas obciążenia – związany z dwoma zagadnieniami – występuje różnica między pomiarem izotermicznym (np. sejsmicznym) i adiabatycznym (pomiarem o charakterze statycznym) oraz różnica wynikająca z cech reologicznych ośrodka. Pierwsza z nich wynosi kilka procent i nie ma praktycznego znaczenia. Natomiast druga jest zależna od budowy ośrodka i jego właściwości mechanicznych i ma podstawowe znaczenie w ośrodkach zniszczonych.

W praktyce inżynierskiej wartości modułu deformacji górotworu są zmienne nieraz w szerokich granicach. W Polsce w Karpatach fliszowych, pomiary modułu deformacji wykonywano głównie dla potrzeb projektowania obiektów hydrotechnicznych. Thiel (1968, 1995) prowadził wielkoskalowe badania modułu deformacji na terenach projektowanych obiektów hydrotechnicznych w Besku, Świnnej Porębie, Krempnej, a także w innych ośrodkach skalnych w Czorsztynie-Niedzicy w Pieninach, czy w Młotach w Sudetach. Badania te wykonywane były zgodnie z zaleceniami normy branżowej BN-79/8950 pt. Badania wytrzymałości skał – Polowe wyznaczanie odkształcalności skał – Metoda jednoosiowych obciążeń. Zabuski (1999) wykonywał pomiary dylatometryczne, w tym również dla potrzeby projektowania tunelu Emilia (Zabuski i in. 2000). Na podstawie licznych pomiarów sejsmicznych i elektrooporowych Bestyński (1997) obliczył zależności korelacyjne modułu deformacji i modułu sprężystości od wskaźnika KFG (Klasyfikacji Geofizycznej Fliszu). Pomiary dla określenia wskaźnika KFG wykonał on na stanowiskach wielkoskalowych pomiarów statycznych modułu deformacji E_m i sprężystości E w celu możliwie bezpośredniego skorelowania tych wielkości. Liczne pomiary modułu deformacji metodą sejsmiczną z wykorzystaniem zależności empirycznej Bartona (1996) prowadził również Pilecki (2002, 2004). W ogólności, wyznaczenie modułu deformacji w utworach fliszu karpackiego jest skomplikowane ze względu na ich silną niejednorodność połączoną z cechami anizotropowości i nieciągłość.

W pracy przedstawiono analizę wyników pomiaru modułu deformacji przeprowadzonych różnymi metodami terenowymi w utworach fliszu karpackiego na trasie tunelu drogowego „Emilia” w Lalikach w Beskidzie Żywieckim. Pomiary wykonano metodami: dylatometryczną, presjometyczną, klasyfikacji geomechanicznej i sejsmiczną. Pomiary te wykonywane były na etapie projektowania tunelu oraz jego realizacji w różnych okresach od 2001 do 2002 i w 2009.

Tunel Emilia jest obecnie najdłuższym tunelem drogowym w Polsce (678 m) wykonanym metodą górniczą. Trasa tunelu przebiega pod grzbietem Sobczakowej Grapy (766,3 m n.p.m.). Został on zaprojektowany w ciągu realizowanej drogi ekspresowej S-69 na



Rys. 2. Położenie tunelu „Emilia” w Lalikach na trasie Europejskiego Korytarza Transportowego nr VI

Fig. 2. Location of „Emilia” tunnel in Laliki on the route of the European Transport Corridor no. VI

odcinku Żywiec – Zwardoń / Myto-Skalite (granica państwa ze Słowacją). Przedłużeniem drogi S69 na terenie Słowacji będzie projektowana autostrada D3 w kierunku Bratysławy. Droga S69 i autostrada D3 będą częścią Europejskiego Korytarza Transportowego nr VI (rys. 2).

Istotnym utrudnieniem w pomiarze modułu deformacji na trasie tunelu była słaba i bardzo słaba jakość ośrodka według klasyfikacji geomechanicznych RMR i Q (Dziekański i in. 2001) wynikająca głównie z dużego udziału procentowego słabych łupków w seriach skalnych oraz silnego naruszenia tektonicznego górotworu. W słabych, silnie niejednorodnych ośrodkach skalnych określenie zależności korelacyjnych modułu deformacji z prędkością fali sejsmicznej podłużnej, jak również z punktacją klasyfikacji geomechanicznej jest stosunkowo trudne. W tym aspekcie praca ta dostarcza nowych informacji.

Pomiary modułów deformacji w utworach fliszu karpackiego na trasie tunelu w Lalikach zostały wykonane przez różne zespoły badawcze. W pracy przeprowadzono analizę wyników tych pomiarów z uwzględnieniem ograniczeń zastosowanej metodyki. Dokonano również analizy przyczyn zaobserwowanych rozbieżności wielkości modułu deformacji.

2. Charakterystyka warunków geologicznych

Tunel „Emilia” w miejscowości Laliki położony jest na terenie Beskidu Żywieckiego w zachodniej części Karpat fliszowych. Obszar ten znajduje się w strefie płaszczowiny magurskiej i łusek przedmagurskich części południowej (grybowskiej). W części przypowierzchniowej występują utwory fliszowe wieku górnokredowego i paleogeńskiego przykryte utworami czwartorzędowymi, głównie glinami zboczowymi. Na tym obszarze płasz-

czowina magurska jest silnie zaburzona tektonicznie. Warstwy skalne są w dużym stopniu zredukowane, porożrywane i złuskowane. Ustalenie granicy między płaszczowiną magurską a łuskami przedmagurskimi jest praktycznie niemożliwe, tym bardziej, że warstwy są podobne litologicznie i stratygraficznie (Dziewański i in. 2001).

Tunel „Emilia” został wykonany w warstwach krośnieńskich wieku oligoceńskiego zbudowanych z piaskowców, łupków i mułowców. W kompleksie tym przeważają piaskowce średnio- i cienkoławicowe, płytowe i skorupowe. Występują również grube 2–4 metrowe ławice piaskowców twardych z niewielką zawartością muskowitu, niekiedy przechodzące w zlepieńce składające się z grubych frakcji otoczków kwarcu, okruchów marglistych wapieni, łupków serycytowych i chlorytowych oraz łupków ilastych. Zlepieńce zawierają też muskowit, a czasem biotyt, buły i okruchy litotamni, krynoidy, a także ułamki inoceramów. W piaskowcach występuje pospolity detrytus roślinny. W kierunku warstw stropowych kompleks ten staje się bardziej łupkowy. Cienkoławicowe piaskowce składane są najczęściej łupkami szarymi wapnistymi oraz łupkami ciemnobrunatnymi, typu łupków menilitowych. Miąższość tej części warstw krośnieńskich wynosi około 100 m. Warstwy te tworzą poziom łupkowy, w którym łupki stanowią około 70%, piaskowce 20%, margle 10% (Dziewański i in. 2001).

Kąty upadu warstw skalnych są zmienne w granicach od 37° do 86° . Kierunek upadu warstw jest generalnie południowo-wschodni. Kąty rozciągłości warstw są zmienne w granicach od 50° do 90° , kierunek rozciągłości jest nieznacznie odchyłony od osi tunelu (Dziewański i in. 2001) (fot. 1).

Szersze omówienie budowy geologicznej terenu można znaleźć w pracach Paula i in. (1996a, b i c).



Fot. 1. Układ warstw skalnych w przodku kaloty tunelu „Emilia” (fot. Waleczek E.)

Fot. 1. Layout of rock layers in the calota face of the tunnel „Emilia ” (phot. Waleczek E.)

3. Podstawy metodyczne wyznaczania *in situ* modułu deformacji

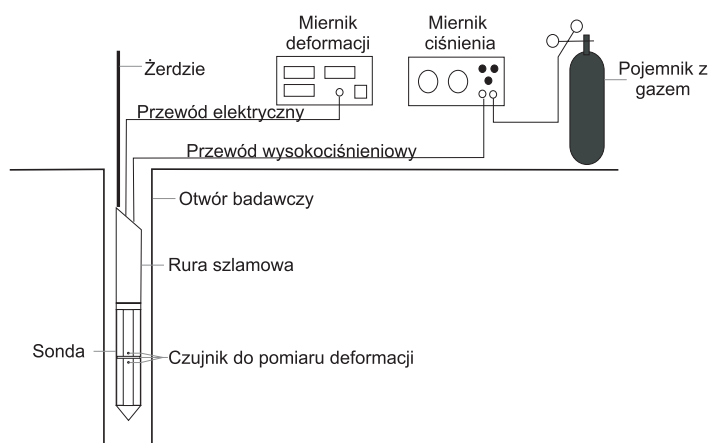
3.1. Wyznaczanie modułu deformacji metodą dylatometryczną i presjometryczną

Wyznaczanie modułu deformacji metodą dylatometryczną i presjometryczną ma charakter punktowy. W niejednorodnym ośrodku skalnym o lokalnej orientacji i właściwościach nieciągłości, moduł ten może charakteryzować jedynie niewielką objętość ośrodka o objętości około 30 m³. W tym kontekście, reprezentatywność wyników pomiaru jest ważnym zagadnieniem. Jest to kompromis między dokładnością rozpoznania ośrodka a ilością wykonanych pomiarów we właściwie wyznaczonych miejscach. Duże znaczenie w projektowaniu pomiarów ma możliwie dokładna znajomość warunków geologiczno-inżynierskich. W celu określenia zakresu zmienności modułu, pomiary w niejednorodnym ośrodku skalnym należy przeprowadzić w taki sposób, aby uwzględnić strefy osłabienia oraz strefy najmocniejszych skał. W przypadku prac projektowych dla potrzeb realizacji obiektów budowlanych, pomiary modułu należałoby przeprowadzić na jednym z końcowych etapów rozpoznania budowy i właściwości ośrodka.

Badania wykonuje się za pomocą specjalnie skonstruowanych sond otworowych. Generalnie sondy dylatometryczne przystosowane są do pomiaru w ośrodkach skalnych, a sondy presjometryczne w gruntach i słabych ośrodkach skalnych.

Sonda dylatometryczna

Budowę i działanie sondy dylatometrycznej przedstawiono na przykładzie przyrządu firmy szwajcarskiej będącego w posiadaniu IBW PAN (Zabuski 1999). Głównym elementem sondy jest cylinder stalowy o długości 1,5 m i średnicy zewnętrznej 95 mm, otoczony osłoną gumową o długości 1,0 m (rys. 3). W środkowej części osłony znajdują się trzy czujniki do pomiaru przemieszczenia radialnego, usytuowane względem siebie pod



Rys. 3. Schemat budowy dylatometrów otworowych

Fig. 3. Scheme of borehole dilatometer structure

kątem 60 stopni. Czujniki te umożliwiają pomiar zmian średnicy sondy w trzech kierunkach i ewentualnie ocenę zróżnicowanej deformacji badanego ośrodka.

Informacja uzyskana w czasie badań pozwala na wyznaczenie zależności między ciśnieniem (mierzonym na manometrze) a przemieszczeniem ścianek otworu. Na tej podstawie obliczane są parametry sprężystości i deformacji ośrodka w miejscu badań.

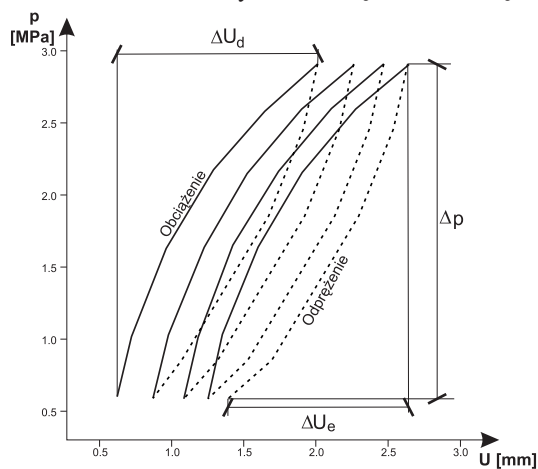
Moduł sprężystości E lub moduł deformacji E_m wyznaczany sondą dylatometryczną oblicza się ze wzoru:

$$E \text{ lub } E_m = \frac{\Delta p}{\Delta U_{e,d}} d(1 + \nu) \quad (1)$$

gdzie:

- Δp – przyrost ciśnienia w cyklu badawczym,
- ΔU_d – zmiana średnicy sondy odpowiadająca obciążeniu (wzrost ciśnienia p),
- ΔU_e – zmiana średnicy sondy odpowiadająca odciążeniu (spadek ciśnienia p),
- d – średnica początkowa otworu,
- ν – współczynnik Poissona.

Na rysunku 4 przedstawiono sposób określania przyrostów ciśnienia p na manometrze i przemieszczenia U ścianek otworu w wyniku obciążania i odciążania.



Rys. 4. Ogólny sposób wyznaczania przyrostu ciśnienia na manometrze i przemieszczenia ścianek otworu w badaniach dylatometrycznych

Fig. 4. General way of determining the increment of manometer pressure and displacement of borehole walls in dilatometer test

Sonda presjometryczna

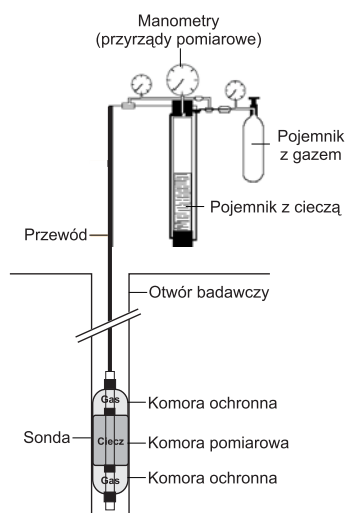
Sposób określania mechanicznych parametrów ośrodka za pomocą radialnie rozszerzającej się sondy walcowej w otworze badawczym był wzmiankowany w literaturze przez Köglera w roku 1930 (Schlosser 1978). Od 1950 roku technika presjometryczna była rozwijana przez Menarda i Rousseau (1962) i zmodyfikowana przez Baguelina (1978).

Badania polegają na działaniu ciśnienia radialnego wytwarzanego przez sondę presjometryczną na ścianę otworu badawczego o małej średnicy. Pomiar deformacji ośrodka gruntowego jak i skalnego (słabe skały) polega na rejestracji zmian objętościowych medium wypełniającego urządzenie.

W ogólności, stosowane są cztery różnego rodzaju presjometry:

- Menarda MPM (ang. *Menard pressuremeter*),
- presjometr ze „wstępnym wierceniem” PBP (ang. *prebored pressuremeter*),
- presjometr „samowwiercający się” SBP (ang. *self-boring pressuremeter*),
- presjometr zagłębiony FDP (ang. *full displacement pressuremeter*).

Budowę i działanie sondy dylatometrycznej przedstawiono na przykładzie przyrządu Menarda typu BX (Geofos 2008). Głównym elementem jest gumowa tuba w stalowych osłonkach (rys. 5). Składa się ona z 3 części: środkowej komory pomiarowej wypełnionej cieczą (wodą lub niezamarzającym płynem) oraz dwóch komór ochronnych, od dołu i od góry komory pomiarowej, wypełnionych gazem pod ciśnieniem (np. azotem). Deformację ośrodka rejestruje się dla różnych wartości ciśnienia w sondzie, w interwałach co 15, 30 i 60 sekund od chwili ustabilizowania się ciśnienia w komorze pomiarowej i komorach ochronnych.



Rys. 5. Schemat pomiaru sondą presjometryczną Menarda (Geofos 2008)

Fig. 5. Measurement scheme by Menard pressuremeter (Geofos 2008)

Pomiar sondą presjometryczną pozwala na wyznaczenie takich parametrów jak moduł presjometryczny E_p , napężenie graniczne p_{lim} czy napężenie pełzania p_f . Moduł presjometryczny E_p jest nazywany modułem dystorsji i charakteryzuje fazę deformacji pseudo-sprężystych ośrodka (rys. 6). Wartość tego modułu określa się ze wzoru:

$$E_p = K \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (2)$$

gdzie:

ΔV – zmiana objętości sondy,

Δp – zmiana ciśnienia w sondzie,

K – współczynnik sondy zależny m.in. od współczynnika Poissona n :

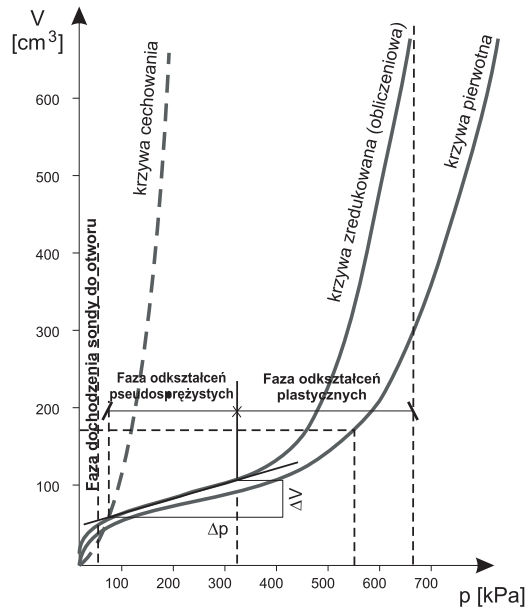
$$K = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \quad (3)$$

gdzie

V_0 – objętość początkowa sondy,

V_m – oszacowana objętość otworu badawczego w miejscu wykonywania pomiaru.

Zaznaczona na rysunku 6 krzywa cechowania sondy presjometrycznej do pomiaru została otrzymana na etapie przygotowania, polegającym na określeniu ściśliwości komór w nieściśliwym ośrodku (np. stalowa rura). Krzywa pierwotna to krzywa otrzymana z pomiaru terenowego. Po uwzględnieniu w wynikach pomiarowych cechowania sondy otrzymuje się charakterystykę ośrodka opisaną krzywą zredukowaną.



Rys. 6. Ogólna zasada obliczania modułu presjometrycznego
(na podstawie Kędzierskiego vide Ignut i in. 1973; Tarnawski 2007)

Fig. 6. General rule of calculating the pressuremeter module
(na podstawie Kędzierskiego vide Ignut i in. 1973; Tarnawski 2007)

Moduł deformacji E_m obliczamy na podstawie wartości modułu presjometrycznego E_p lub edometrycznego E z następującej zależności:

$$E_m = \beta E = \beta \frac{E_p}{\alpha} \quad (4)$$

gdzie:

β – współczynnik korelacyjny,

- α – współczynnik reologiczny przyjmujący wartość:
- 0,33 dla silnie spękanych skał,
 - 0,50 dla skał nieprzeobrażonych,
 - 0,67 dla zwietrzałych skał.

W omawianych w tej pracy pomiarach użyto presjometru Menarda typu BX o średnicy 58 mm, dla którego optymalna średnica otworu badawczego mieści się w zakresie od 60 do 66 mm. Całkowita długość sondy presjometrycznej wynosi około 550 mm, a komora pomiarowa posiada objętość V_0 równą 535 mm³. Presjometr Menarda typu BX produkowany przez firmę APAGEO jest przystosowany do pomiaru ciśnienia do 10 MPa.

3.2. Wyznaczanie modułu deformacji metodą geomechaniczną

Moduł deformacji ośrodka skalnego można wyznaczyć na podstawie zależności empirycznych z punktacjami różnych klasyfikacji geomechanicznych. W tabeli 1 zestawiono najbardziej rozpowszechnione zależności związane z klasyfikacjami RMR (Bieniawski 1989) i Q (Barton 1974). Klasyfikacje te posłużyły do oceny jakości górotworu na trasie tunelu „Emilia”.

TABELA 1. Zestawienie zależności do obliczania modułu deformacji ośrodka skalnego na podstawie klasyfikacji geomechanicznych RMR i Q

TABLE 1. Formulae for calculating modulus of deformation of the rock mass on the basis of geomechanical classification RMR and Q

Rodzaj klasyfikacji geomechanicznej	Formuła do obliczania modułu deformacji E_m [GPa]	
RMR	$E_m = 2RMR - 100$	dla RMR ≥ 58 (Bieniawski 1989)
	$E_m = 10 \left(\frac{RMR - 10}{40} \right)$	dla RMR < 58 (Serafím i Pereira 1983)
Q	$E_m = 25 \log Q$	dla Q > 1 (Barton 1974)
	$E_m = 8Q^{0,4}$	dla $1 < Q < 30$ (Palmström i Singh 2001)

Należy podkreślić, że dla słabszych górotworów (RMR < 30) zależność może być mało miarodajna. W przypadku klasyfikacji Q, dla górotworów słabszych dla punktacji Q < 1 , nie rekomenduje się żadnej zależności korelacyjnej.

3.3. Wyznaczanie modułu deformacji metodą sejsmiczną

Na podstawie znajomości prędkości refrakcyjnej fali podłużnej V_p w ośrodku skalnym można wyznaczyć statyczny moduł deformacji E_m według zależności empirycznej Bartona (1996). W warunkach fliszu karpackiego najbardziej zbliżone wartości modułu E_m do

wyników wielkoskalowych pomiarów uzyskuje się ze wzoru opartego na zmodyfikowanej punktacji Q_c dla wartości minimalnych $E_{m(\min)}$ (Barton 2007):

$$E_{m(\min)} [\text{GPa}] \approx 3 \cdot Q_c^{0,5} \quad (5)$$

gdzie:

$$V_p [\text{km/s}] = \log Q_c + 3,5 \quad (6)$$

Zależność Bartona została wyznaczona dla danych z przewagą skał mocnych, stąd w słabych ośrodkach może dawać zawyżone wyniki.

W warunkach fliszu karpackiego mogą być przydatne zależności empiryczne modułów deformacji E_m i sprężystości E od wskaźnika KFG w przypadku znajomości oprócz prędkości fali podłużnej również oporności elektrycznej ośrodka (Bestyński 1997). Dla wskaźnika KFG aproksymowanego powierzchnią drugiego stopnia zależności korelacyjne mają następującą postać:

$$E_m = 386,2 \cdot 10^{0,048\text{KFG}} [\text{MPa}], \quad \text{wspł.kor.} = 0,857 \quad (7)$$

$$E_m = 203,7 \cdot 10^{0,057\text{KFG}} [\text{MPa}], \quad \text{wspł.kor.} = 0,867 \quad (8)$$

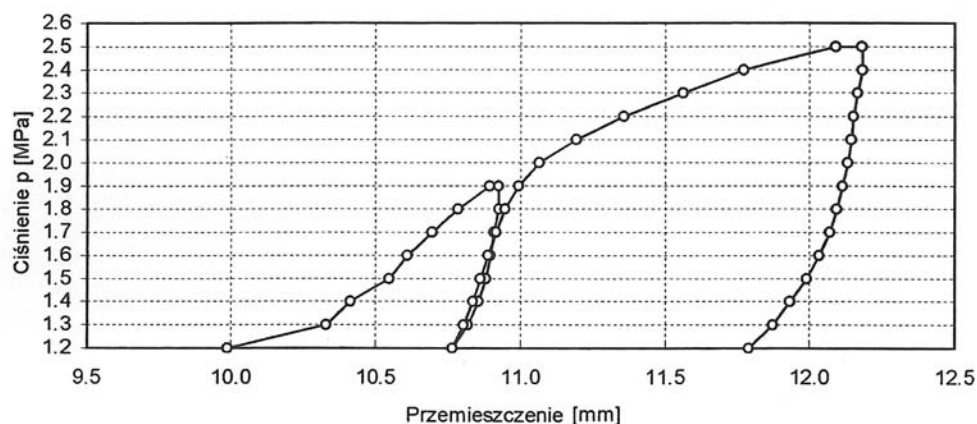
Znane są również sposoby wyznaczania statycznych modułów sprężystości w wyniku przeliczenia pomierzonego dynamicznego modułu sprężystości. Zależności takie zostały opracowane na podstawie pomiarów sejsmicznych i często pomiarów wielkoskalowych (Masuda 1964; Savic 1969; Linowski 1969; Bestyński 1991).

4. Wyniki badań i ich analiza

Metoda dylatometryczna i presjometryczna

Pomiary modułu deformacji metodą dylatometryczną przeprowadził zespół L. Zabuskiego z Instytutu Budownictwa Wodnego PAN i były one częścią dokumentacji geologiczno-inżynierskiej dla projektowanego tunelu „Emilia” (Zabuski i in. 2000; Dziewański i in. 2000). Pomiary te wykonano sondą dylatometryczną w dwóch kierunkowych otworach w rejonie obu portali na etapie projektowania tunelu. Pomiary dylatometryczne przeprowadzono w kierunku zbliżonym do równoległego do uwarstwienia. Otwory zostały odwiercone w taki sposób, aby ich oś była w przybliżeniu prostopadła do uławicenia. Otwór PL1 został odwiercony w rejonie portalu SW (azymut kierunku wiercenia: 350° , a kąt nachylenia osi wiercenia: 60°), a otwór PL2 w rejonie portalu NE (azymut kierunku wiercenia: 335° , a kąt nachylenia osi wiercenia: 55°). Przykładowy przebieg pomiaru zilustrowano na rysunku 7, a wyniki obliczeń modułu deformacji wszystkich pomiarów zestawiono w tabeli 2.

Pomiary sondą presjometryczną zostały wykonane przez słowacką firmę Geofos s.r.o na etapie budowy tunelu „Emilia” (Geofos 2008a, b, c i 2009). Przeprowadzono 22 pomiary



Rys. 7. Przykładowy wynik pomiaru dylatometrycznego w otworze PL1 na trasie tunelu Emilia (Zabuski i in. 2000)

Fig. 7. Exemplary results of dilatometer test in PL1 borehole in the route of Emilia tunnel (Zabuski i in. 2000)

w przodku tunelu w strefie kaloty oraz w obu ociosach tunelu na głębokości od 0,6 do 3,7 m. Pomiary w przodku prowadzone były w ten sposób, aby kierunek działania wypadkowej siły obciążenia był równoległy do uwarstwienia, natomiast w ociosach wyrobiska kierunek działania wypadkowej siły obciążenia był prostopadły do uwarstwienia. Wyniki obliczeń modułu deformacji wszystkich pomiarów zestawiono w tabeli 3, a przykładowy przebieg pomiaru zilustrowano na rysunku 8.

TABELA 2. Zestawienie wyników pomiarów dylatometrycznych w otworach PL1 i PL2 w górotworze na trasie tunelu Emilia

TABLE 2. Results of dilatometer test in PL1 and PL2 boreholes in rock mass along Emilia tunnel

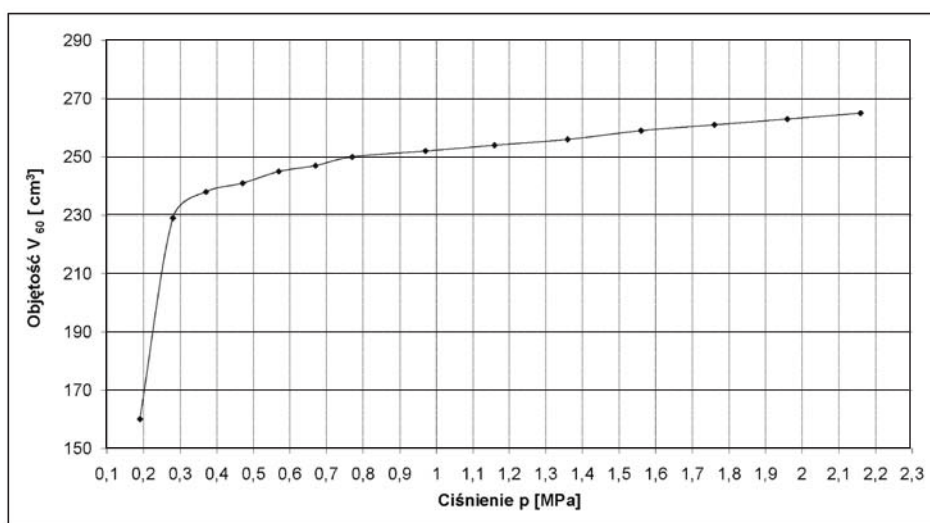
Miejsce badania	Litologia	Głębokość h [m]	Moduł deformacji E_m [MPa]
PL1	margle twarde	15,59	343,0
PL1	łupki ilaste	12,12	203,0
PL1	łupki margliste	9,53	392,0
PL2	łupki, iłowce, pyłowce	18,47	233,0
PL2	łupki z niewielką ilością wkładek piaskowcowych	11,71	132,0
Średnia			261,0
PL2	piaskowce silnie spękane	10,55	140,0
PL1	piaskowce w strefie tektonicznej	19,92	460,0
PL1	piaskowce	24,68	179,0
Średnia			260,0

TABELA 3. Zestawienie wyników pomiarów presjometrycznych w górotworze na trasie tunelu Emilia (Geofos 2008a, b, c i 2009)

TABLE 3. Results of pressuremeter test in rock mass along Emilia tunnel (Geofos 2008a, b, c i 2009)

Metraż tunelu [m]	Miejsce badania	Litologia	Głębokość h [m]	Moduł deformacji E_m [MPa]
123,0	ocios prawy	łupek ilasty	3,3	158,09
172,8	środek kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,0	38,40
172,8	lewa część kaloty	łupek ilasty	1,1	135,14
179,5	lewa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,2	45,73
179,5	lewa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,3	39,22
179,5	lewa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,2	34,08
179,5	ocios prawy	łupek ilasty drobnowarstwowy	2,7	98,27
189,0	ocios prawy	łupek ilasty drobnowarstwowy	3,3	20,10*
189,0	ocios lewy	łupek ilasty	3,6	139,48
295,0	ocios prawy	łupek ilasty	3,7	150,07
452,0	ocios lewy	łupek ilasty	2,3	114,36
526,5	środek kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,8	67,78
526,1	środek kaloty	łupek ilasty	1,7	109,77
526,4	środek kaloty	łupek ilasty	2,0	104,81
552,4	lewa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,7	43,52
552,4	lewa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,4	60,76
552,4	prawa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,3	2,26*
552,4	prawa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	1,5	3,10*
552,4	prawa część kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy	0,6	4,56*
605,7	lewa część kaloty	łupek ilasty	2,2	40,39
605,7	prawa część kaloty	łupek ilasty	2,5	42,74
605,7	środek kaloty	łupek ilasty drobnowarstwowy czerwony	2,2	78,71
605,7	ocios prawy	łupek ilasty czerwony	1,9	46,87
Średnia				81,48
243,0	ocios lewy	piaskowiec	3,7	221,55
295,0	ocios lewy	piaskowiec	3,3	362,18
396,1	ocios lewy	piaskowiec	2,5	218,57
Średnia				267,4

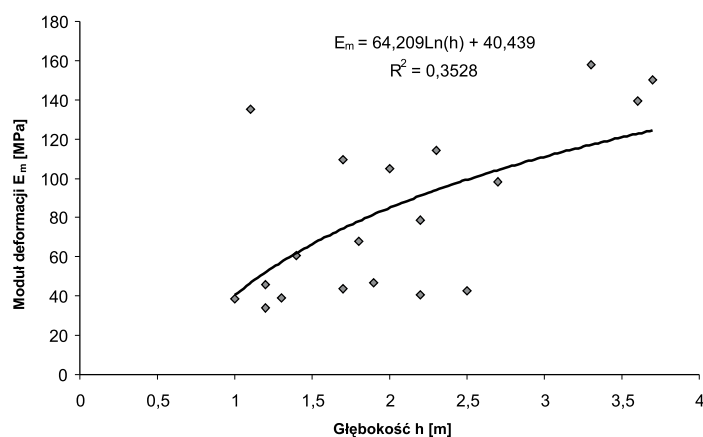
* Wartości nieuwzględniane w obliczeniach średniej



Rys. 8. Przykładowy wynik pomiaru presjometrycznego na trasie tunelu Emilia (GDDPiA 2009)

Fig. 8. Exemplary results of dilatometer test in PL1 borehole in the route of Emilia tunnel (GDDPiA 2009)

Generalnie można zauważyć, że moduł deformacji łupków wyznaczony w pomiarach dylatometrycznych (od 132 do 392 MPa; średnia 261 MPa) na etapie projektowania tunelu ma większe wartości niż wyznaczony z pomiarów presjometrycznych (od 38,40 do 158,09 MPa; średnia 84,48 MPa po odrzuceniu najniższych, mało realistycznych wartości) na etapie budowy. Przyczyną tej różnicy może być zbyt mała głębokość przeprowadzonego testu presjometrycznego od osi tunelu. Test ten w większości przypadków został prawdopodobnie wykonany w strefie odprężonej wykonaniem wyrobiska. Na rysunku 9 widać, że wartości modułu deformacji rosną z głębokością przeprowadzonego testu.



Rys. 9. Zależność wartości modułu deformacji E_m górotworu od głębokości h wykonania testu presjometrycznego dla łupków ilastych

Fig. 9. Dependence of value of deformation modulus E_m from the depth h of test for clay shales

Dla piaskowca wartości modułu deformacji uzyskane w teście presjometrycznym (średnia 267,4 MPa) są porównywalne do wartości z testu dylatometrycznego (średnia 260 MPa). W przypadku testu dylatometrycznego uzyskano tylko jedno oznaczenie w strefie tektonicznej, dla silnie spękanego piaskowca, a dla testu presjometrycznego wykonano trzy oznaczenia w jednej warstwie. Ze względu na niewielką ilość oznaczeń wyniki tych testów są mało miarodajne. W ogólności przeprowadzenie testów dla piaskowca jest trudne ze względu na sporadyczne występowanie grubszych ponad jednometrowych warstw na trasie tunelu.

Moduł deformacji górotworu wyznaczony na podstawie pomiarów presjometrycznych przyjmuje najmniejsze wartości dla łupków drobnowarstwowych. Na ogół najmniejsze wartości uzyskano przy obciążaniu równoległe do uławicenia w strefie kaloty.

Wykonanie pomiaru presjometrycznego w słabych łupkach, na niewielkiej głębokości w otworze, nie dawało miarodajnych wyników. Przy wstępnych niewielkich zmianach ciśnienia zachodziły stosunkowo duże deformacje pseudosprężyste ośrodka. Taki przebieg pomiaru mógł świadczyć o większym stopniu zniszczenia ośrodka. Na rozwój strefy zniszczenia w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska mogły mieć również wpływ wody technologiczne przy wierceniu otworów do kotwienia.

Metoda klasyfikacji geomechanicznej

Punktację klasyfikacji geomechanicznych RMR i Q przeprowadził zespół Z. Pileckiego z Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN na etapie projektowania tunelu (Dziewański i in. 2001). Wykorzystano do tego celu dane z otworów badawczych, wykopów badawczych oraz istniejących odsłoneń. Obliczenia modułu deformacji przeprowadzono jedynie na podstawie punktacji RMR według wzoru zamieszczonego w tabeli 1. Stosując klasyfikację uzyskano punktację $Q < 1$, stąd znane wzory korelacyjne nie pozwalały na wyznaczenie modułu deformacji. Uśrednione wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 4.

Wyniki obliczeń modułu dla obu klas bardzo słabej i słabej są kilkakrotnie większe od wyników uzyskanych z pomiarów punktowych dylatometrycznych i presjometrycznych. Podstawową przyczyną tej rozbieżności może być duże odchylenie standardowe danych zależności korelacyjnej między modułem deformacji a punktacją RMR dla ośrodków słabszych, silnie niejednorodnych i silnie zniszczonych tektonicznie. Niewystarczająca ilość danych pomiarowych przeprowadzonych w górotworze na trasie tunelu Emilia nie daje możliwości poprawnego wyznaczenia takiej zależności.

TABELA 4. Moduł deformacji wyznaczony na podstawie klasyfikacji geomechanicznej RMR dla tunelu Emilia

TABLE 4. Deformation modulus determined on the basis of RMR geomechanical classification for the Emilia tunnel

	Górotwór bardzo słaby		Górotwór słaby	
	zakres	średnia*	zakres	średnia*
Punktacja klasyfikacji RMR ₈₉	11,8–15,0	13,4	26,0–28,2	27,1
Moduł deformacji górotworu E_m [MPa]	1 109–1 334	1 222	2 512–2 851	2 682

* Średnia z wartości skrajnych przedziału zmienności

Należy również wziąć pod uwagę nienajlepsze dostosowanie kryteriów punktacji RMR do warunków słabych, silnie niejednorodnych i zniszczonych tektonicznie ośrodków skalnych.

Metoda sejsmiczna

Pomiary refrakcyjnego profilowania sejsmicznego zostały wykonane przez zespół Z. Bestyńskiego na etapie opracowania koncepcji tunelu, a następnie poszerzone przez zespół Z. Pileckiego z IGSMiE PAN (Dziewański i in. 2000; Marcak i Pilecki 2003). Podstawowym wyznaczanym parametrem sejsmicznym była prędkość refrakcyjnej fali typu P. Moduł deformacji został obliczony na podstawie zależności (5). Uśrednione wyniki badań przedstawiono w tabeli 5.

TABELA 5. Moduł deformacji na podstawie pomiarów sejsmicznych dla tunelu Emilia

TABLE 5. Modulus of deformation on the basis of seismic profiling for the tunnel Emilia

	Górotwór bardzo słaby		Górotwór słaby	
	zakres	średnia	zakres	średnia
Prędkość fali typu P	2 000–2 600	2 300	2 200–2 700	2 450
Moduł deformacji górotworu E_m [MPa]	534–1 064	754	671–1 194	944

Wartości modułu deformacji wyznaczone metodą sejsmiczną są kilkakrotnie większe od modułów wyznaczonych metodami punktowymi. Natomiast są one mniejsze w porównaniu do określonych na podstawie klasyfikacji geomechanicznej RMR. Jedną z przyczyn rozbieżności może być uśrednienie właściwości sprężystych na odcinku pomiarowym ze względu na metodykę obliczania prędkości fali refrakcyjnej typu P. Świadczy o tym częściowe pokrywanie się zakresów zmienności prędkości dla obu klas górotworów bardzo słabego i słabego. Istotną przyczyną może być również inna niż równanie (5) postać zależności korelacyjnej. Duży wpływ na prędkość fali sejsmicznej typu P ma kierunek spękania i uwarstwienia ośrodka.

Podsumowanie

Wyniki przedstawionych pomiarów modułu deformacji w ośrodku fliszowym, charakteryzującym się silną niejednorodnością, nieciągłością i cechami anizotropowymi, nie są w pełni porównywalne. Może to wynikać z różnych przyczyn, a zwłaszcza nieporównywalnych objętości ośrodka objętych pomiarami, jak również nieporównywalnymi warunkami zastosowanych obciążeń statycznych i dynamicznych w tych pomiarach.

W tabeli 6 zamieszczono wartości modułu deformacji wyznaczone różnymi metodami w górotworze na trasie tunelu Emilia. W przypadku metod punktowych: dylatometrycznej i presjometrycznej średnie wartości modułu są podobne w obu seriach skalnych: łupkowej i piaskowcowej. Wyraźnie, kilkakrotnie większe wartości określono metodą sejsmiczną na podstawie zależności empirycznej Bartona (1996) oraz na podstawie klasyfikacji geomechanicznej RMR.

TABELA 6. Wyniki pomiarów modułu deformacji górotworu dla tunelu „Emilia”

TABLE 6. Results of measurements of deformation modulus of the rock mass for the tunnel „Emilia”

Metoda wyznaczenia modułu deformacji górotworu		Moduł deformacji górotworu E_m [MPa]	
		zakres	średnia
Metoda dylatometryczna	łupki, margle, (klasa bardzo słaba RMR)	132–392	261
	piaskowce (klasa słaba RMR)	140–460	260
Metoda presjometryczna	łupki (klasa bardzo słaba RMR)	34 –158	81*
	piaskowce (klasa słaba RMR)	219–362	267
Metoda klasyfikacji geomechanicznej RMR	klasa bardzo słaba	1 109–1 334	1 222
	klasa słaba	2 512–2 851	2 682
Metoda sejsmiczna	klasa bardzo słaba RMR	534–1 064	754
	klasa słaba RMR	671–1 194	944

* Średnia arytmetyczna po odrzuceniu najniższych, mało realistycznych wartości

Uśrednione wartości modułu deformacji z metod punktowych na trasie tunelu Emilia zawierają się w przedziałach:

- od 34 do 392 MPa dla górotworu łupkowo-piaskowcowego,
- od 140 do 460 MPa dla górotworu piaskowcowo-łupkowego.

Należy sądzić, że najbardziej wiarygodne wartości modułu deformacji można pozyskać w wyniku pomiaru dylatometrycznego w mocniejszym górotworze piaskowcowo-łupkowym i w wyniku pomiaru presjometrycznego w słabym górotworze łupkowym. Pomiar presjometryczny w warunkach mocnych piaskowców, lub z warstwą mocnego piaskowca w otoczeniu łupków, mogą dawać zniekształcone wyniki. Istotne znaczenie ma również usytuowanie otworu testowego w stosunku do warstwowania ośrodka. W przeprowadzonych pomiarach presjometrycznych zaznacza się tendencja wskazująca, iż wyższe wartości modułu otrzymuje się w pomiarach przy obciążeniu w kierunku prostopadłym do warstwowania.

Należy unikać wykonywania testów na małych głębokościach otworu badawczego ze względu na strefę odprężenia związaną z wykonaniem wyrobiska lub strefę utworów zwietrzałych przy wykonywaniu otworu z powierzchni. W tym drugim przypadku zasięg strefy można uprzednio wyznaczyć metodami geofizycznymi.

Wartości modułu deformacji wyznaczone metodą sejsmiczną na podstawie zależności Bartona (1996, 2007) oraz wyznaczone z zależności Serafima i Pereiry (1983) na podstawie klasyfikacji geomechanicznej RMR są zdecydowanie wyższe od metod punktowych. W tych przypadkach zachodzi konieczność opracowania bardziej porównywalnych zależności empirycznych dostosowanych do warunków słabego, silnie zniszczonego tektonicznie ośrodka. Opracowanie takich zależności ma istotne znaczenie ze względu na ciągły, nieniszczący charakter pomiarów sejsmicznych i stosunkowo łatwe użycie klasyfikacji geomechanicznych, zwłaszcza dla potrzeb wstępnego rozpoznania warunków w projektowaniu obiektów budowlanych, a zwłaszcza tunelowych.

Autorzy dziękują Generalnej Dyrekcji Dróg Państwowych i Autostrad Oddział w Katowicach za udostępnienie wyników badań wykonanych w trakcie realizacji tunelu Emilia oraz Panu mgr inż. Edwardowi Waleczkowi za cenne informacje dotyczące realizacji prac badawczych i udostępnienie fotografii.

Serdecznie dziękujemy również Panu doc. dr. hab. inż. Lesławowi Zabuskemu za cenne uwagi, które przyczyniły się do poprawy jakości tej publikacji.

Literatura

- Baguelin F., Jezequel J.F, Shields D.H., 1978 – The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans Tech Publications, Germany.
- Barton N., Lien R. i Lunde J., 1974 – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, nr 6(4), 189–239.
- Barton N., 1996 – Estimating rock mass deformation modulus for excavation disturbed zone studies. Proc. of excavation disturbed zone workshop, eds. J.B. Montino & C.D. Martin, September 20 1996, Manitoba, Canada, 1996, 133–144.
- Barton N., 2007 – Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor and Francis Group, London-Singapore.
- Bestyński Z., 1991 – Badania odkształcalności masywów fliszowych metodą statyczną i dynamiczną. Geo-Ref. Warszawa.
- Bestyński Z., 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Praca doktorska, AGH, Kraków.
- Bestyński Z., Thiel K., Zabuski L., 1991 – Geotechniczne klasyfikacje masywów fliszowych. *Rozprawy Hydrotechniczne z. 52*, 143–163.
- Bieniawski Z.T., 1989 – Engineering rock mass classification. Wiley, New York.
- Dziewański J., Pilecki Z., Sroczyński W., Paul Z. i zespół, 2000 – Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla zadania: Opracowanie dokumentacji technicznej na budowę drogi ekspresowej II klasy technicznej S-94 Bielsko-Biała-Żywiec-Zwardoń, odcinek w Lalikach – część tunelowa km 21+ 900 – 22 + 700. IGSMiE PAN, Kraków (praca niepublikowana).
- Dziewański J., Pilecki Z., Sroczyński W., 2001 – Zagadnienia badań geologiczno-inżynierskich w projektowaniu tuneli komunikacyjnych w utworach fliszu karpackiego – na przykładzie tunelu w Lalikach. IGSMiE PAN, Kraków.
- Geofos, 2008b – Wyniki badań presjometycznych w tunelu Laliki (z dnia 18.09.2008) (praca niepublikowana).
- Geofos, 2008a – Ocena geotechniczna górotworu Laliki zbudowanego z następstwa warstw paleogennych sedymentów z naciskiem na tektonicznie splekane i mocno zwietrzzone (lokalnie aż rozłożone) łupki ilaste laminowane (praca niepublikowana).
- Geofos, 2008c – Wyniki badań presjometycznych w tunelu Laliki (z dnia 02.12.2008), (praca niepublikowana).
- Geofos, 2009 – Wyniki badań presjometycznych w tunelu Laliki (z dnia 11.02.2009), (praca niepublikowana).
- Ignut R., Kłębek A., Puchalski R., 1973 – Terenowe badania geologiczno-inżynierskie. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- ISRM, 1975 – Commission on terminology, symbols and graphic representation. International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- Linowski H., 1969 – On the relation between dynamic and static moduli of elasticity. *Acta Geophysica Pol.* vol. 17, no 1.
- Marcak H., Pilecki Z., red., 2003 – Wyznaczanie właściwości utworów fliszu karpackiego metodą sejsmiczną dla potrzeb budownictwa tunelowego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Masuda H., 1964 – Utilization of elastic longitudinal wave velocity for determination the elastic property of dam foundation rock. Huitieme Cong. Int. des Grands Barrages. Edinburgh.
- Menard L., Roisseau J., 1962 – L’Evaluation des Tassements, Tendances Nouvelles. *Sols-Soils*, nr 1, 13–30.
- Palmström A., Singh R., 2001 – The Deformation Modulus of Rock Masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 16, nr. 3, s. 115–131.
- Paul Z., Ryłko W., Tomasz A., 1996a – Wpływ tektoniki skonsolidowanego podłoża Karpat na rozkład mas fliszowych w polskiej części Karpat Zachodnich. *Przegląd Geologiczny* vol. 44, nr 5, 489–494.
- Paul Z., Ryłko W., Tomasz A., 1996b – Zarys budowy geologicznej zachodniej części Karpat polskich (bez utworów czwartorzędowych). *Przegląd Geologiczny* vol. 44, nr 5, 469–476.

- Paul Z., Rączkowski W., Ryłko W., Tomasz A., 1996c – Budowa geologiczna zachodniej części Karpat polskich. Przewodnik LXVII zjazdu PTG Szczyrk, 6–9 czerwiec.
- Pilecki Z., 2002 – Wyznaczanie parametrów górotworu na podstawie klasyfikacji geotechnicznych. Wyd. Drukrol, Kraków.
- Pilecki Z., 2004 – Badania jakości górotworu za pomocą metody sejsmicznej w budownictwie tunelowym. Materiały XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu, Wyd. KGBiG AGH, 205–223.
- Savic A., 1969 – Sejsmoakusticzeskije metody izucenia masiwow porod. Nedra. Moskwa.
- Schnaid F., 2009 – In situ testing in geomechanics – the main tests. Taylor & Francis, London.
- Schlosser F., 1978 – Presjometr [w:] Wybrane zagadnienia geotechniki. Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wyd. Polskiej Akademii Nauk, Wrocław Warszawa, 59–72.
- Serafim J.L. and Pereira J.P., 1983 – Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Constructions, 1133–1144.
- Thiel K., 1968 – Metodyka określania własności fizyko-mechanicznych podłoża skalnego przy projektowaniu zapór wodnych. Wyd. Arkady, Warszawa.
- Thiel K., red., 1995 – Właściwości fizyko-mechaniczne i modele masywów skalnych polskich Karpat fliszowych. Wyd. IBW PAN, Biblioteka Naukowa Hydrotechnika nr 19, Gdańsk.
- Thiel K., 1989 – Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa.
- Zabuski L., 1999 – Dylatometryczne badania właściwości deformacyjnych fliszowego masywu skalnego. Mat. Konf. Nauk.-Techn. Geotechnika w górnictwie i budownictwie specjalnym, AGH Kraków, 279–286.
- Zabuski L., Golec E., Gaca K., 2000 – Wykonanie badań modułu deformacji górotworu w dwóch otworach wiertniczych dla tunelu komunikacyjnego. Inst. Bud. Wodnego PAN, Gdańsk (praca niepublikowana).

