

Polowe pomiary odkształcalności fliszowych masywów skalnych

Zbigniew Bestyński¹



Field measurements of the flysh rock mass deformability. Prz. Geol., 62: 544–548.

Abstract. Field deformability measurement for the purpose of hydrotechnical building were performed at the Flysch Carpathian area. Locating of such objects requires the deformability of bedrock to be estimated on an object scale, with regard to its size as well its influence on the bedrock. Measurement were realized with the use static and dynamic methods, for various surface and load time. Measurement methods for bedrock deformability assessment on object scale were discussed. Results of big-scale static surveys were positively verified by measurement of bedrock deformability of existing objects. Geophysical classification index KFG was pointed to be used for geophysical bedrock deformability evaluation.

Keywords: bedrock deformability, Young's modulus E_s and D , geophysical parameters V_p , ρ , geotechnical class RMR and KFG

Polowe pomiary odkształcalności fliszowych ośrodków skalnych, metodami statycznymi i dynamicznymi, były wykonywane w Karpatach, w celu rozpoznania warunków geotechnicznych posadowienia projektowanych obiektów hydrotechnicznych. Obiektami tymi były głównie zapory czołowe. Pomiary metodami dynamicznymi wykonywano również w wielu innych rejonach, tam gdzie rozważano możliwość lokalizacji takich budowli oraz w strefach brzegowych projektowanych zbiorników wodnych, do oceny stateczności ich zboczy. Szczegółową analizę czynników wpływających na stateczność karpaccich zboczy osuwiskowych oraz modelowanie i obliczenia ich stateczności przeprowadzili Zabuski i in. (1999). Obiekty Besko, Dobczyce, Klimkówka i Porąbka Żar zostały już zrealizowane i od kilkunastu lat są eksploatowane, istniała więc możliwość określenia rzeczywistej odkształcalności ich podłoża i porównania z rezultatami uzyskanymi na etapie projektowania.

Lokalizację wszystkich rejonów prac, w których wykonywane były badania odkształcalności metodami statyczną i dynamiczną lub tylko dynamiczną, przedstawiono na mapie tektonicznej Karpat (ryc. 1). Badania statyczne wielkoskalowe i dynamiczne wykonano na 20 stanowiskach pomiarowych w rejonach oznaczonych numerami: 1 – Besko, 8 – Dobczyce, 11 – Klimkówka, 12 – Krempna, 19 – Porąbka Żar i 26 – Świnna Poręba. W pozostałych zaznaczonych rejonach wykonano tylko badania dynamiczne.

CHARAKTERYSTYKA FLISZU

Flisz karpaccy jest osadem terygenicznym, osadzonym w stosunkowo głębokim morskim basenie sedymentacyjnym w wyniku prądów zawieszinowych. Sedymentacja w takich warunkach tworzy charakterystyczną sekwencję osadów, złożoną z naprzemianległych warstw „twardych” osadów gruboziarnistych (piaskowce i zlepieńce) i „miękkich” osadów drobnoziarnistych (mułowce i iłowce). Osady te, w czasie swojej historii geologicznej, zostały sfałdowane, zuskokowane i ponasuwane na siebie, tworząc skomplikowaną strukturę geologiczną wybitnie niejednorodną, nieciągłą i anizotropową. Charakteryzuje się ona również wyraźnymi cechami reologicznymi, związanymi głównie ze składem litologicznym oraz stopniem zaangażowania

tektonicznego. Odkształcalność takiego ośrodka skalnego, określona pomiarami *in situ*, jest w dużym stopniu zależna od metodyki badań, w tym wielkości próby pomiarowej oraz czasu jej obciążania (Thiel, 1989, 1995).

POMIARY ODKSZTAŁCALNOŚCI

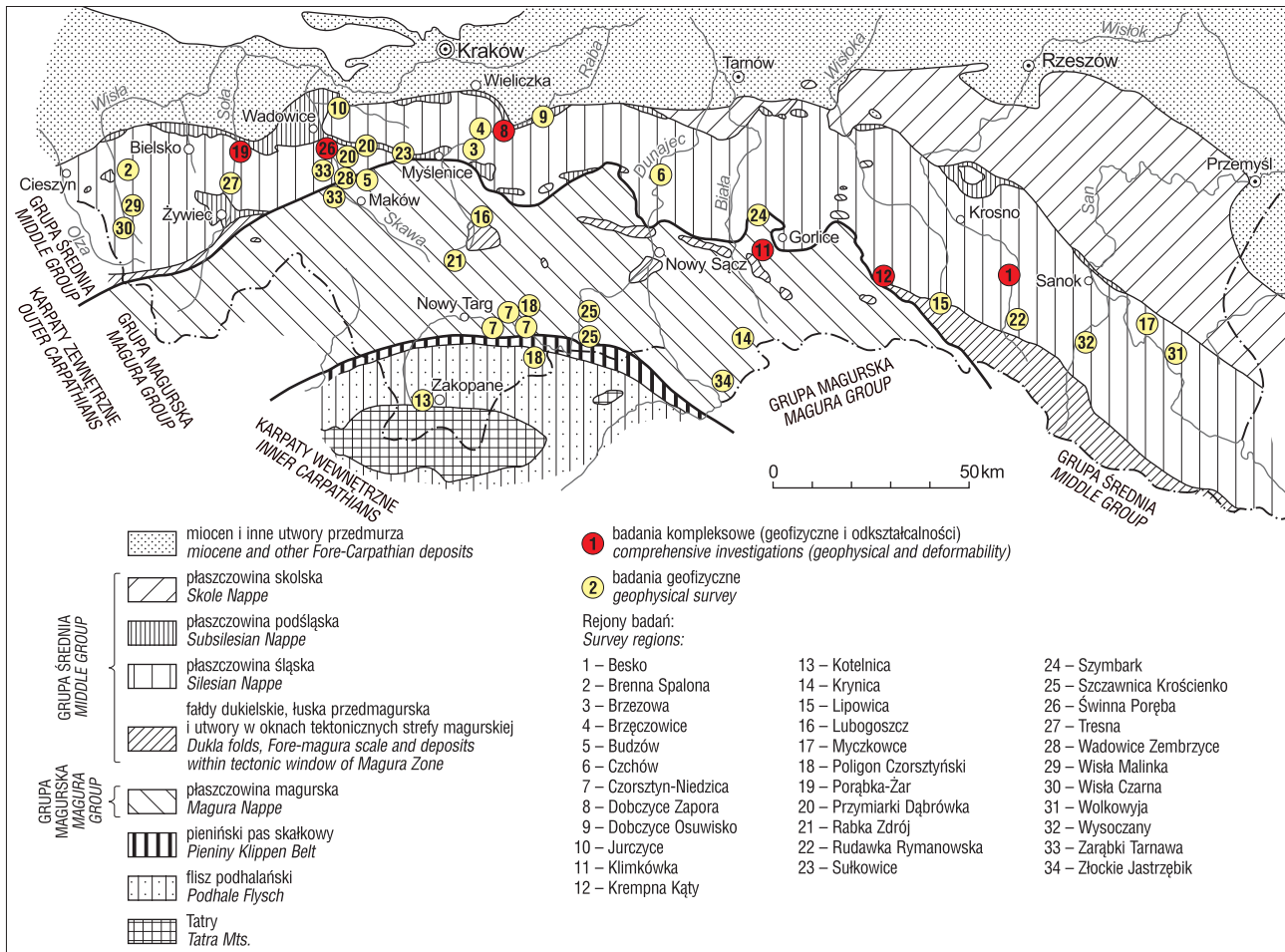
Analizowane pomiary wykonane były, jak już wspomniano, metodami statycznymi i dynamicznymi. Pomiary statyczne, wykonywane zgodnie z normą BN-79/8950-11 (Thiel, 1995), polegały na cyklicznym obciążaniu i odciążaniu ośrodka na odpowiednio przygotowanych stanowiskach pomiarowych. Czas pojedynczego cyklu obciążania wynosił kilkadziesiąt minut, ale cykle obciążeń i odciążeń powtarzano wielokrotnie, co imitowało „zmęczenie” materiału występujące w czasie wieloletniego obciążenia podłoża budowlą. Wielkość obciążanej powierzchni w tych pomiarach wynosiła 2 m^2 , a związana z nią objętość próbki pomiarowej zawierała się w przedziale od około kilkadziesiątu m^3 , przy powierzchni obciążeń równej 2 m^2 , do kilku m^3 , przy pomiarach dylatometrycznych.

Pomiary dynamiczne wykonano metodami sejsmiczną i akustyczną. W pomiarach sejsmicznych częstotliwość fal sprężystych wynosiła ok. 1000 Hz, a w pomiarach akustycznych ok. 10 000 Hz. Czas obciążenia ośrodka w czasie tych pomiarów, związany z przebiegiem fal sejsmicznych, wynosił ok. $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, w przypadku pomiarów sejsmicznych i ok. $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ w pomiarach akustycznych. Objętość próbki pomiarowej, zależna od częstotliwości i prędkości fal sejsmicznych, wynosiła w wykonanych pomiarach od kilkadziesiątu m^3 , przy pomiarach sejsmicznych, do poniżej 1 m^3 , w przypadku pomiarów akustycznych.

REZULTATY BADAŃ

Pomiary odkształcalności podłoża budowli, użyteczne do obliczeń inżynierskich, powinny ją określać w skali budowli zarówno ze względu na przestrzeń, jak i czas oddziaływania. W ośrodku fliszowym zbudowanym z naprzemianległych, spękanych warstw piaskowców i mułowców, najczęściej o miąższości od kilku do kilkadziesiątu centymetrów, o odpowiedniości modelowej próbki pomia-

¹ Geo-Relefs, ul. Zaciszańska 8/3, 03-284 Warszawa; bestynski.z@gmail.com.



Ryc. 1. Lokalizacja rejonów badań odkształcalności na mapie tektonicznej Karpat
Fig. 1. Karpaty tectonic map with regions of deformability measurement location

rowej i masywu skalnego można mówić przy próbkach o objętości rzędu kilkunastu m^3 i czasie obciążenia liczonego w latach.

W przypadku prezentowanych badań odpowiedniość modelową próbki i masywu, tak ze względu na czas jak i przestrzeń w rejonie pomiaru, zapewniają pomiary statyczne wielkoskalowe, przy powierzchni obciążania równej $2 m^2$ oraz cyklicznych seriach obciążeń i odciążenia ośrodka, imitujących zmęczenie materiału. Fakt ten potwierdzają pomiary rzeczywistej odkształcalności podłoża wzniesionych i eksploatowanych już od kilkunastu lat obiektów w Besku (Boros-Meinike, 1995), Dobczycach (Żebrowska, 1995) i Porąbce Żar (Fiedler, 1995), na ogół zgodnej z określoną wcześniej pomiarami wielkoskalowymi.

Pomiary sejsmiczne zapewniają odpowiedniość modelowe tylko ze względu na objętość próbki pomiarowej.

Pomiary statyczne przy mniejszych powierzchniach obciążenia, jak również pomiary akustyczne w przypadku fliszu z reguły nie spełniają warunku odpowiedniości modelowej z masywem ze względu na wielkość próbki pomiarowej, charakteryzują one w większym stopniu materiał skalny niż masyw.

W projektowaniu i modelowaniu matematycznym równie ważne, jak określenie odkształcalności ośrodka we właściwej skali czasu i wielkości próbki pomiarowej, jest określenie jego zróżnicowania w obrębie przestrzeni, na którą będzie oddziaływała budowla. Możliwości takiej nie

dają punktowe pomiary statyczne. Przestrzenne zróżnicowanie ośrodka umożliwiają natomiast pomiary sejsmiczne, które spełniają warunek odpowiedniości modelowej z masywem ze względu na wielkość próbki pomiarowej, nie spełniają jej jednak ze względu na czas obciążania. W przypadku pomiarów sejsmicznych jest on liczony w ułamkach sekundy, a w przypadku obciążenia podłoża budowla – w latach.

Ze względu na właściwości reologiczne masywów skalnych, w szczególności fliszowych, ich odkształcalność określona badaniami dynamicznymi (sejsmicznymi) jest kilku-, a nawet kilkunastokrotnie mniejsza od rzeczywistej wywołanej długotrwałym obciążeniem budowla. Wykorzystanie wyników pomiarów dynamicznych w obliczeniach projektowych i modelowaniu matematycznym jest więc uzależnione od możliwości ich wiarygodnego przeliczenia na wartości charakteryzujące masyw poddany obciążeniom długotrwałym. Jest to zwykle zadanie trudne, szczególnie w masywach fliszowych, głównie ze względu na zmienne i zdecydowanie różne cechy reologiczne budujących flisz „twardych” piaskowców i „miękkich” mułowców oraz zróżnicowaną litologię i stopień zaangażowania tektonicznego fliszu. Wartość współczynnika przeliczeniowego odkształcalności masywu fliszowego określonej w sposób dynamiczny (E_d) na określoną w sposób statyczny (E_s) zależy głównie od wyżej wymienionych czynników. Proste przeliczenie wartości dynamicznej na statyczną

może więc prowadzić do dużych błędów w ocenie odkształcalności podłoża budowli.

Zagadnieniem określenia empirycznej formuły przeliczeniowej Ed/Es , na podstawie pomiarów korelacyjnych na tych samych stanowiskach pomiarowych, zajmowało się wielu autorów, między innymi :

Masuda (1964) podał zależność określoną dla skał magmowych, w postaci:

$$ES = 0,5(V/Vm)Ed$$

gdzie:

V – prędkość fal podłużnych określona w terenie,

Vm – prędkość fal podłużnych określona w laboratorium.

Savic (1969) podał zależność dla różnych rodzajów skał, ma ona postać :

$$Es = a(Ed/Ed_{max})^b$$

gdzie:

a i b – stałe dobierane doświadczalnie, zależne od rodzaju skały.

Dla wapieni budujących Pieniński Pas Skałkowy w podłożu zapory Czorsztyn-Niedzica formułę przeliczeniową Ed/Es określił Linowski (1969), ma ona postać:

$$Ed / Es = [2\rho(1+\sigma)]^{m/2} V_s \times Ed^{-m/2}$$

gdzie:

ρ – gęstość ośrodka,

σ – współczynnik Poissona,

V_s – prędkość fali poprzecznej,

m – współczynnik charakteryzujący właściwości reologiczne ośrodka.

Formułę przeliczeniową Ed/Es określono również dla fliszu warstw godulskich płaszczowiny śląskiej (Bestyński, 1991), ma ona postać:

$$Es = 0,056(Ed)^{1,43} \text{ [GPa]}$$

Dla zobrazowania stopnia zróżnicowania wartości modułu sprężystości fliszu określonej różnymi metodami pomiarowymi, różniącymi się głównie czasem obciążania, wykonano pomiary korelacyjne w rejonie lokalizacji jazu przelewu powierzchniowego zapory Świnna Poręba. W rejonie tym, zbudowanym z warstw istebniańskich płaszczowiny śląskiej, na etapie projektowania wykonano wielkoskalowe pomiary odkształcalności statyczne i pomiary dynamiczne (sejsmiczne). W czasie budowy zdjęto nadkład i w dniu wykopu, w masywie fliszowym, wykonano otwory cementacyjne. W otworach położonych w bezpośrednim sąsiedztwie wymienionych pomiarów statycznych wielkoskalowych wykonano dylatometryczne pomiary statyczne i sejsmiczne pomiary akustyczne. Pomiary te wykonano na dwóch stanowiskach. Stanowisko S1 zlokalizowane było we fliszu piaskowcowo-łupkowym zbudowanym ze średnio i cienkoławicowych piaskowców średnioziarnistych przewarstwionych ciemnoszarymi mułowcami i łupkami ilastymi. Zawartość piaskowców wynosiła 60 %, a stopień zaangażowania tektonicznego był niski. Stanowisko S2 było zlokalizowane w identycznym litologicznie fliszu, ale silnie zaangażowanym tektonicznie. Rezultaty wykonanych badań zestawiono w tabeli 1.

Na omawianych stanowiskach dla fliszu niezaburzonego tektonicznie współczynnik przeliczeniowy Ed/Es wynosi 6,4, a dla fliszu zaburzonego tektonicznie wynosi on 15,3. W określeniu wymienionego przelicznika nie uwzględniono pomiarów akustycznych ze względu na zbyt małą próbkę pomiarową. W ośrodku o strukturze fliszu charakteryzują one raczej materiał skalny a nie masyw.

Współczynnik przeliczeniowy Ed/Es często traktowany jest jako wskaźnik cech reologicznych masywu skalnego.

Pomiary rzeczywistej odkształcalności podłoża obciążonego pracującymi już obiektami w Besku, Dobczycach i Porąbce Żar, równoważne, jak już wspomniano, pomiarom wielkoskalowym, były wykonane po kilku latach ich eksploatacji, to znaczy że czas obciążenia podłoża wynosił powyżej 10^8 s. Porównując ten czas z czasem obciążenia

Tab. 1. Rezultaty badań odkształcalności fliszu przy różnych czasach obciążania
Table 1. The results of deformation tests on flysch deposits at various loading time

Stanowisko <i>Position</i>	Lokalizacja pomiaru <i>Measurement localization</i>	Geologia <i>Geology</i>	Metoda pomiaru <i>Measurement method</i>	Objętość próbki [m ²] <i>Specimen volume [m²]</i>	Czas obciążania [s] <i>Loading time [s]</i>	Moduł Younga [MPa] <i>Young's modulus [MPa]</i>
S1	3 m p.p. stropu masywu <i>3 m below top of massive</i>	wartstwy istebniańskie, 60% piaskowców, niezaburzone tektonicznie <i>Istebnian layers, 60% sandstones, tectonically unfaulted</i>	akustyka <i>seismoacoustic test</i>	< 1	$5 \cdot 10^{-5}$	32 200
			sejsmika <i>seismic test</i>	~ 30	$5 \cdot 10^{-4}$	19 200
			dylatometr <i>dilatometer test</i>	~ 5	$5 \cdot 10^3$	3 200
			pomiar wielkoskalowy <i>big scale test</i>	~ 30	~ 10^8	3 000
S2	4 m p.p. stropu masywu <i>4 m below top of massive</i>	wartstwy istebniańskie, 60% piaskowców, zaburzone tektonicznie <i>Istebnian layers, 60% sandstones, tectonically faulted</i>	akustyka <i>seismoacoustic test</i>	< 1	$5 \cdot 10^{-5}$	9 900
			sejsmika <i>seismic test</i>	~ 30	$5 \cdot 10^{-4}$	6 600
			dylatometr <i>dilatometer test</i>	~ 5	$5 \cdot 10^3$	540
			pomiar wielkoskalowy <i>big scale test</i>	~ 30	~ 10^8	430

ośrodka w czasie przebiegu fali sejsmicznej o częstotliwości 1000 Hz, otrzymujemy stosunek czasów obciążenia ośrodka w czasie pomiaru statycznego (równoważnego z pomiarem odkształcalności podłoża obciążonego budowlą) i dynamicznego wynoszący około 10^{12} . Opisane badania wykonano tylko na dwóch stanowiskach pomiarowych, nie dają więc podstawy do bardziej precyzyjnych uogólnień. Wskazują jednak w sposób ilościowy, jak ogromna jest różnica w czasie obciążenia ośrodka przy pomiarze dynamicznym w porównaniu z czasem obciążenia podłoża budowlą i w jak dużym stopniu wynik pomiaru jego odkształcalności zależy od metody pomiaru. Wymienione badania są chyba jedynymi wykonanymi na terenie Karpat fliszowych badaniami *in situ* na jednym stanowisku pomiarowym, przy tak dużym zróżnicowaniu czasu obciążenia.

Szczegółową analizę właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych materiału skalnego budującego masywy fliszowe Karpat wykonano w Zakładzie Geomechaniki IHiGI Wydziału Geologicznego Uniwersytetu Warszawskiego (Pinińska, 2004, 2009). Badania te, wykonane w laboratorium, na próbkach materiału pobranego z naturalnych i sztucznych odsłonięć, dobrze charakteryzują materiał skalny budujący masywy fliszowe. W ocenie ich odkształcalności mogą być jednak wykorzystane jedynie w sposób pośredni.

GEOFIZYCZNY WSKAŹNIK KLASYFIKACYJNY KFG

Jak już wspomniano, rezultaty pomiarów sejsmicznych, umożliwiających przestrzenne rozpoznanie i zróżnicowanie ośrodka, nie mogą być bezpośrednio wykorzystane do obliczeń projektowych, czy też matematycznego modelowania zachowania się podłoża budowli. W przypadku fliszu karpackiego istnieje jednak możliwość wykorzystania pomiarów geofizycznych, sejsmicznych i elektrooporowych, do oceny jego rzeczywistej odkształcalności w warunkach długotrwałego obciążenia podłoża budowla. Możliwość

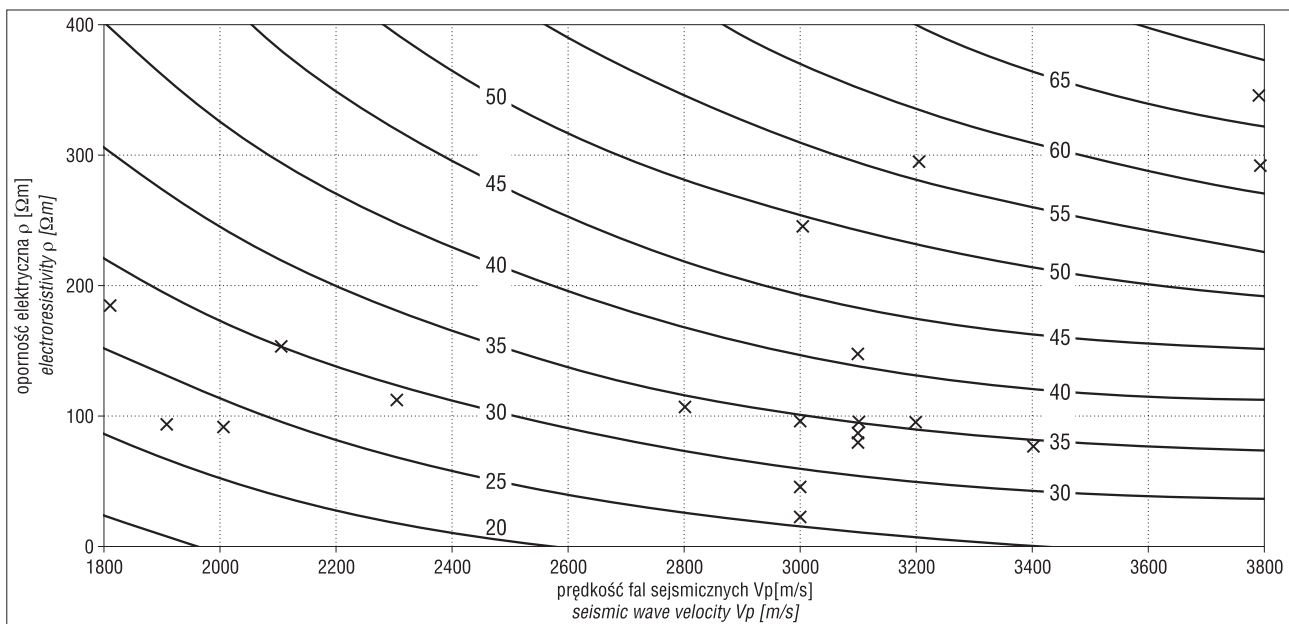
taką daje wykorzystanie geofizycznego wskaźnika klasyfikacyjnego KFG (Klasyfikacja Fliszu-Geofizyczna).

Wskaźnik KFG (Bestyński, 1997; Bestyński & Thiel, 1999), utworzony na podstawie badań wykonanych na terenie polskich Karpat fliszowych, oparty jest na dwóch parametrach geofizycznych, opisujących podstawowe charakterystyki fliszu wpływające na jego odkształcalność i właściwości reologiczne. Parametrami tymi są prędkość fal sejsmicznych podłużnych (V_p), zależna od wytrzymałości materiału skalnego, stopnia jego spękania i naruszenia pierwotnej struktury oraz oporność elektryczna (ρ), zależna od jego składu litologicznego i zawodnienia. Z charakterystykami tymi związana jest odkształcalność i cechy reologiczne ośrodka, a więc wskaźnik KFG, będący kombinacją opisujących te charakterystyki parametrów geofizycznych, powinien dobrze charakteryzować cechy reologiczne fliszu i umożliwić ocenę jego odkształcalności w warunkach obciążenia długotrwałego.

Wskaźnik KFG, którego wartość w założeniu jest równoważna klasie geotechnicznej klasyfikacji RMR (*Rock Mass Rating*) Bieniawskiego (1989), utworzono w wyniku aproksymacji wielowymiarowej w przestrzeni KFG, V_p [m/s], ρ [Ω m]. Wykres zależności KFG = $f(V_p, \rho)$ określonej w wyniku aproksymacji wielomianem drugiego stopnia przedstawiono na rycinie 2.

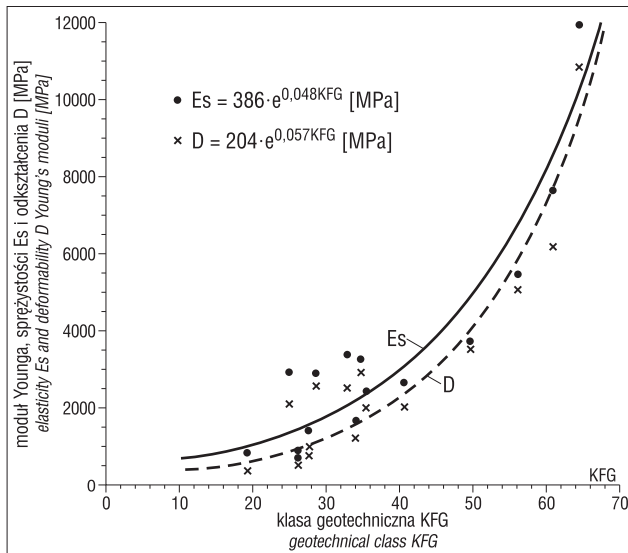
Wszystkie pomiary i obserwacje wykorzystane do utworzenia wskaźnika KFG zostały wykonane na stanowiskach wielkoskalowych, statycznych pomiarów odkształcalności. Stanowiska te były zlokalizowane praktycznie na terenie całego obszaru polskich Karpat fliszowych (ryc. 1) i reprezentowały pełne zróżnicowanie fliszu zarówno pod względem litologii, jak i stopnia zaangażowania tektonicznego. Można więc przyjąć, że uzyskane rezultaty są reprezentatywne dla całego obszaru polskich Karpat fliszowych.

Wspomniane stanowiska pomiarowe były usytuowane w sztolniach badawczych, na głębokości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów p.p.t. i tego zakresu głębokości dotyczą uzyskane związki korelacyjne. Ponieważ pomiary



Ryc. 2. Zależność KFG = $f(V_p, \rho)$

Fig. 2. Relationship KFG = $f(V_p, \rho)$



Ryc. 3. Wykresy zależności $E_s = f(KFG)$ i $D = f(KFG)$
 Fig. 3. Relationships $E_s = f(KFG)$ & $D = f(KFG)$

i obserwacje prowadzące do utworzenia wskaźnika KFG zostały wykonane na stanowiskach wielkoskalowych pomiarów odkształcalności ośrodka, na których określono wartości modułów Younga – sprężystości E_s i odkształcenia D , istniała możliwość bezpośredniej korelacji tych wielkości ze wskaźnikiem KFG. Wykresy zależności $E_s = f(KFG)$ i $D = f(KFG)$ przedstawiono na rycinie 3. Współczynniki korelacji modułów sprężystości i odkształcenia, E_s i D , ze wskaźnikiem KFG wynoszą, na poziomie istotności $q = 0,05$, odpowiednio 0,86 i 0,83, co odpowiada według zasad statystyki matematycznej „dużej zależności”. Można więc przyjąć, że określone na podstawie wskaźnika KFG wartości modułów Younga (E_s i D) umożliwiają wiarygodną ocenę rzeczywistej odkształcalności ośrodków fliszowych w skali obiektu zarówno ze względu na przestrzeń, jak i czas.

PODSUMOWANIE

Odpowiedniość modelową próbki pomiarowej i masywu fliszowego, w warunkach obciążenia podłoża budowlą hydrotechniczną, zarówno ze względu na czas obciążenia, jak i wielkość obciążanej powierzchni, zapewniają pomiary statyczne przy powierzchni obciążania równej 2 m^2 i serii cyklicznych obciążeń imitujących zmęczenie materiału. Fakt ten został potwierdzony badaniami odkształcalności podłoża już istniejących i pracujących obiektów hydrotechnicznych w Besku, Dobczycach i Porąbce Żar.

Pomiary dynamiczne metodą sejsmiczną dobrze odwzorowują różnicowanie odkształcalności ośrodka, ale nie uwzględniają jego cech reologicznych, nie określają więc rzeczywistej odkształcalności w warunkach długotrwałego obciążenia budowlą. Odkształcalność ośrodka określona metodą dynamiczną nie może więc być bezpośrednio wykorzystana w obliczeniach projektowych, czy też matematycznym modelowaniu zachowania się podłoża obiektu.

W przypadku ośrodków fliszowych określenie ich odkształcalności w skali budowlą zarówno ze względu na

czas, jak i przestrzeń, umożliwia geofizyczny wskaźnik klasyfikacyjny KFG. Wskaźnik ten, utworzony na podstawie pomiarów i obserwacji na stanowiskach wielkoskalowych pomiarów odkształcalności E_s i D , pozwala bezpośrednio skorelować wartości KFG z wartościami modułów E_s i D . Współczynniki korelacji wymienionych wartości wynoszą odpowiednio 0,86 i 0,83. Wskaźnik KFG umożliwia więc określenie wiarygodnej odkształcalności podłoża budowlą zarówno w czasie, jak i przestrzeni.

Pomiary i obserwacje wykorzystane do korelacji wartości wskaźnika KFG z modułami Younga – sprężystości E_s i odkształcenia D , były wykonane na całym obszarze polskich Karpat fliszowych i obejmowały pełne zróżnicowanie fliszu, tak pod względem litologii, jak i stopnia zaangażowania tektonicznego. Uzyskane rezultaty można więc uznać za reprezentatywne dla całego obszaru polskich Karpat fliszowych i wykorzystywać do obliczeń projektowych oraz matematycznego modelowania stateczności projektowanych konstrukcji. Fakt ten ma duże znaczenia praktyczne i ekonomiczne, z uwagi czas i koszt badań wielkoskalowych. Każde takie badanie wymaga kosztownych prac górniczych związanych z wykonaniem kilkudziesięciometrowej sztolni badawczej.

LITERATURA

- BESTYŃSKI Z. 1991 – Badania odkształcalności masywów fliszowych metodą statyczną i dynamiczną. Geo-Refleks Warszawa.
- BESTYŃSKI Z. 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych [praca doktorska]. Archiwum AGH, Kraków.
- BESTYŃSKI Z. & THIEL K. 1999 – Flysch geotechnical properties by the Geophysical Classification Index KFG. Vol. 2. 9 International Congress on rock mechanics ISRM Paris:1339–1346.
- BIENIAŃSKI Z.T. 1989 – Engineering rock mass classification. John Wiley & Sons, New York.
- BOROS-MEINKE D. 1995 – Odkształcalność podłoża zapory betonowej Besko. Seminarium PKMKWZ „Odkształcalność podłoża budowlą hydrotechnicznych w polskich Karpatach fliszowych”. IMGW, Warszawa:16–26.
- FIEDLER K. 1995 – Odkształcalność podłoża zbiornika górnego elektrowni pompowej Porąbka-Żar. Seminarium PKMKWZ „Odkształcalność podłoża budowlą hydrotechnicznych w polskich Karpatach fliszowych”. IMGW, Warszawa: 38–48.
- LINOWSKI H. 1969 – On the relation between dynamic and static moduli of elasticity (Young's moduli). Acta Geoph. Pol., 17 (1).
- MASUDA H. 1964 – Utilization of elastic longitudinal wave velocity for determination the elastic property of dam foundation rock. International Congress des Grand Barrages. Edinburgh.
- PINIŃSKA J. 2004 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał, Część IV Karpaty Fliszowe – objaśnienia i interpretacja, t. 8. Zakład Geomechaniki IHiGI WG Uniwersytetu Warszawskiego.
- PINIŃSKA J. (red.) 2009 – Baza danych geomechanicznych właściwości skał. Zakład Geomechaniki IHiGI WG Uniwersytetu Warszawskiego
- SAVIC A. 1969 – Sejsmoakustyczne metody izuczenia masiwów skalnych porod. Niedra, Moskwa.
- THIEL K. 1989 – Rock Mechanics in Hydroengineering. PWN Elsevier Warszawa–Amsterdam–Oxford–New York–Tokyo, s. 406.
- THIEL K. (red.) 1995 – Właściwości fizyko-mechaniczne i modele masywów skalnych Polskich Karpat Fliszowych. IBW PAN, Biblioteka Naukowa Hydrotechnika nr 19, Gdańsk, s. 226.
- ZABUSKI L., THIEL K. & BOBER L. 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Geologia–Modelowanie–Obliczenia stateczności. IBW PAN, Gdańsk, s.171.
- ŻEBROWSKA A. 1995 – Odkształcalność podłoża zapory ziemnej Dobczyce. Seminarium PKMKWZ „Odkształcalność podłoża budowlą hydrotechnicznych w polskich Karpatach fliszowych”. IMGW, Warszawa: 26–38.