

WYKORZYSTANIE POWIERZCHNIOWYCH SONDOWAŃ SEJSMICZNYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

Marek Bajda, Nikodem Sarosiak, Katarzyna Markowska-Lech
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań geofizycznych metodą wielokanałowej analizy fal sejsmicznych (MASW), mające na celu określenie stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Badania terenowe przeprowadzono na wybranym odcinku obwałowań Wisły, w miejscowości Kraski Górne. Powierzchniowe pomiary sejsmiczne pozwoliły na wyznaczenie w korpusie nasypu stref o zróżnicowanych wartościach prędkości fal sejsmicznych, wynikające z różnego stanu zagęszczenia materiału wbudowanego w nasyp. Uzyskane wyniki pomiarów zostały porównane z wynikami wierceń i sondowań dynamiczną sondą lekką DPL. W podsumowaniu omówiono uzyskane wyniki oraz wykazano, że mogą one zostać wykorzystane do wyznaczenia stref osłabienia konstrukcji obwałowania.

Słowa kluczowe: MASW, sejsmika powierzchniowa, wały przeciwpowodziowe

WSTĘP

Jak pokazały ostatnie powodzie, właściwa ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa ludzi i dóbr materialnych znajdujących się w ochranianych dolinach rzecznych.

W praktyce inżynierskiej ocena stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych przeprowadzania jest na podstawie punktowych badań *in situ* (wierceń oraz sondowań) uzupełnionych badaniami laboratoryjnymi. Główną zaletą badań *in situ* jest fakt, że są one przeprowadzane w rzeczywistych warunkach guntowo-wodnych, które nie zawsze mogą być w pełni odtworzone w laboratorium. Ich wadą z kolei jest to, że dają informacje punktowe o stanie technicznym wału. Duże odległości między wierceniami i sondowaniami mogą prowadzić do błędnej interpretacji budowy i stanu technicznego wałów, w której wyniku mogą zostać pominięte strefy rozluźnienia w korpusie obwałowania

[Gołębiewski i in. 2012]. Rozwiązaniem problemu mogłoby być zagęszczenie badań *in situ* jednakże stałyby się one z ekonomicznego punktu widzenia nieopłacalne oraz wpłynęłyby niekorzystnie na strukturę wału przeciwpowodziowego.

Nowe zadania stawiane geoinżynierii wymagają nowych technik służących do oceny warunków gruntowych *in situ* oraz do monitorowania procesów zachodzących w gruncie. Znaczącą rolę w zaspokojeniu tych potrzeb odgrywają metody geofizyczne zaadaptowane do celów geotechnicznych.

Powierzchniowe badania geofizyczne od dziesięcioleci stosowane są w praktyce inżynierskiej. Do zalet metod geofizycznych zaliczyć można nieniszczący i nieinwazyjny charakter, niskie koszty, szybkie uzyskanie wyników i możliwość ich stosowania w różnorodnych materiałach, w tym: w gruntach, skałach litych, materiałach odpadowych i utworach antropogenicznych. Z szerokiej gamy geofizycznych technik pomiarowych najczęściej wykorzystywane w praktyce inżynierskiej to: metody georadarowe (GPR), tomografia elektrooporowa (ERT), profilowanie elektromagnetyczne (konduktometria) oraz powierzchniowe badania sejsmiczne (np. MASW). Metody te wykorzystuje się w problematyce geotechnicznej dotyczącej przeważnie oceny stanu środowiska (tomografia elektrooporowa), określaniu granic strukturalnych budowli oraz infrastruktury inżynierskiej (metody georadarowe), a także parametrów odkształceniowych metodami sejsmicznymi [Stokoe i Santamarina 2000, Samouelian i in. 2005, Bajda i in. 2012].

Ze względu na swoje zalety badania te zyskują coraz większe grono zwolenników przy przeprowadzaniu ocen stanu technicznego budowli hydrotechnicznych, stateczności skarp, odkształceń podłoża i korpusu wału czy też do geologiczno-inżynierskiego rozpoznania warunków gruntowych podłoża [Ślusarczyk 2001, Krzywiec i Bestyński 2001, Bajda i in. 2012, Gołębiewski i in. 2012].

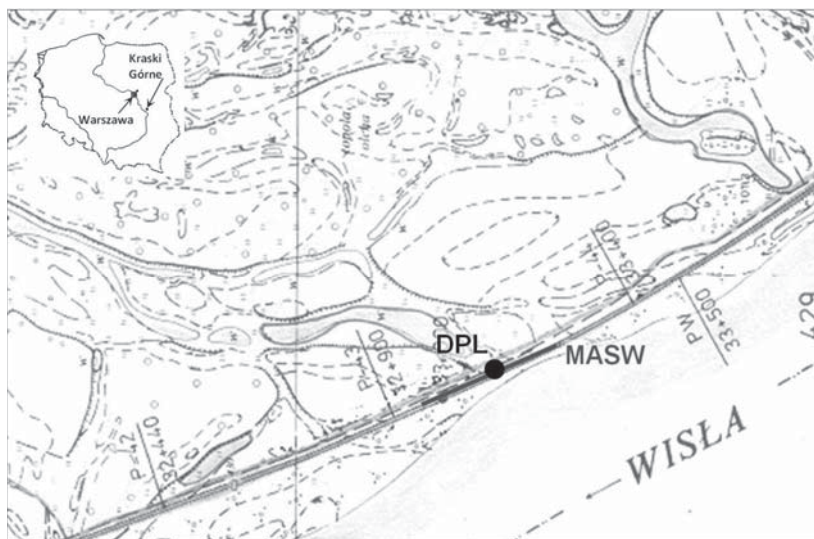
Badania sejsmiczne, których celem jest skorelowanie pomierzonej prędkości fal akustycznych z parametrami mechanicznymi gruntu charakteryzującymi właściwości sprężyste ośrodka, mogą być wykonywane w formie badań wstępnych (przy orientacyjnym rozpoznaniu warunków gruntowych), badań uzupełniających oraz monitoringu. Powierzchniowe badania sejsmiczne mogą być bardzo przydatne do szybkiego określenia i wskazania stref osłabienia, uszkodzeń lub – w przypadku korpusu i podłoża gruntowego wałów przeciwpowodziowych – stref podatnych na niebezpieczne zjawiska filtracyjne.

Badania te pozwalają również na wstępne rozpoznanie budowy podłoża i wskazanie obszarów do szczegółowego rozpoznania, na przykład sondowaniami geotechnicznymi, do których można zaliczyć sondowania DPL, CPTU i SCPTU.

ZAKRES BADAŃ I CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Celem prac badawczych było udokumentowanie możliwości zastosowania powierzchniowych pomiarów sejsmicznych do wstępnego rozpoznania budowy i stanu technicznego wybranego fragmentu wałów przeciwpowodziowych. Badania prowadzone były na fragmencie prawobrzeżnego wału przeciwpowodziowego Wisły, w rejonie miejscowości Kraski Górne, w województwie mazowieckim, i obejmowały powierzchniowe badania sejsmiczne metodą MASW. Analizowany fragment wału wytypowany został do badań na podstawie wizji lokalnej oraz analizy materiałów archiwalnych (wierceń i sondowań

wykonanych w ramach projektu przebudowy wału). W miejscu tym podczas powodzi wielokrotnie dochodziło do licznych przesiąków przez korpus i podłoże wału. Po zakończeniu badań geofizycznych wykonano sondowanie sondą DPL w celu potwierdzenia uzyskanych wyników. Sondowanie wykonano zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-B-04452:2002. Mapa dokumentacyjna przedstawiająca zakres i lokalizację przeprowadzonych badań została zamieszczona na rysunku 1.

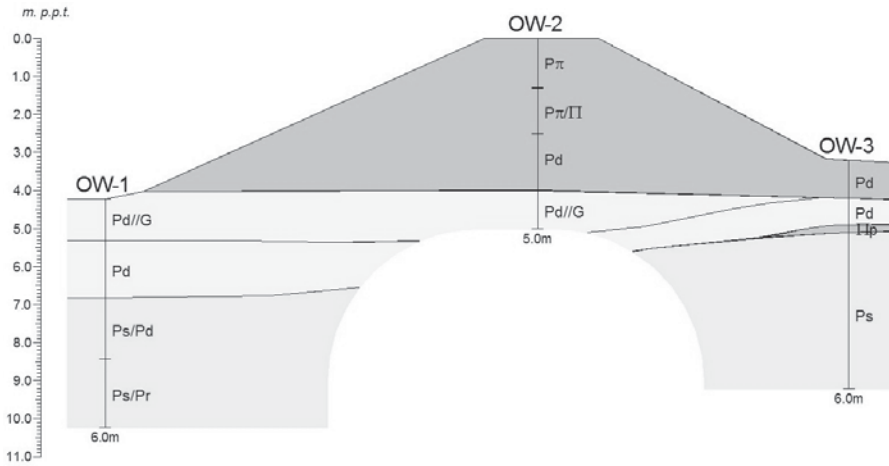


Rys. 1. Mapa dokumentacyjna obszaru badań
Fig. 1. Location map of tested profiles of the site

Przedmiotowy fragment obwałowania przebiega w bezpośredniej bliskości Wisły oraz przecina starorzecze. Nasyp obwałowania wznosi się na wysokość od 4 do 5 m, szerokość korony wynosi 3 m, nachylenie skarp około 1 : 2. Korpus wału uformowany został z piasków pylastych i drobnych z lokalnymi wkładkami pyłów i glin pylastych. Budowa podłoża jest zróżnicowana. Wał zbudowano na madowym tarasie zalewowym Wisły. Tworzą go aluwialne piaski lokalnie nadbudowane warstwą madowych osadów powodziowych. Podłoże w miejscu prowadzonych badań do głębokości rozpoznania (7 m) zbudowane jest z piasków drobnych (z przewarstwieniami gliniastymi) oraz z piasków średnich. Przekrój geologiczny obszaru badań zamieszczony został na rysunku 2.

METODYKA BADAŃ

Badania geofizyczne na obwałowaniu przeciwpowodziowym przeprowadzono techniką wielokanałowej analizy fal sejsmicznych (MASW) urządzeniem włoskiej firmy PASI. Urządzenie to składa się z jednostki centralnej z zainstalowanym oprogramowaniem, 24 geofonów o częstotliwości 10 Hz, geofonu startowego (wyzwalacza), aluminiowej

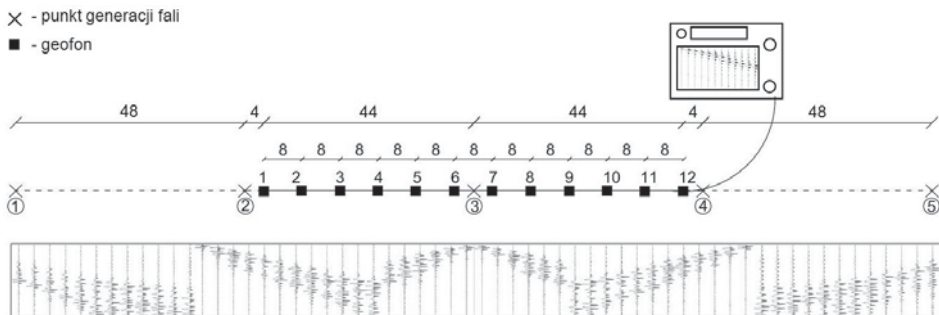


Rys. 2. Schemat budowy geologicznej nasypu i podłoża w rejonie badań
 Fig. 2. Geological cross-section of tested site

płyty służącej do wzbudzenia fal sejsmicznych oraz zestawu przewodów umożliwiającą połączenie całego układu pomiarowego.

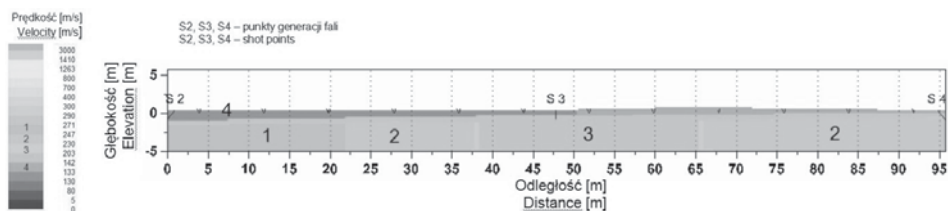
Technika wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (*Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW*) jest sejsmiczną metodą badawczą, bazującą na wyodrębnieniu fal poprzecznych S spośród wygenerowanych powierzchniowych fal typu Rayleigha, a następnie na ich analizie z wykorzystaniem zależności prędkości i tłumienia fal poprzecznych od właściwości sprężystych oraz gęstości objętościowej ośrodka gruntowego [Heisey i in. 1982]. Metoda ta pozwala w sposób ciągły i bezinwazyjny określić rozkład tej prędkości fali wraz ze zmianą głębokości i wzdłuż profilu badawczego.

Badanie sejsmiczne (MASW) przeprowadzono metodą sejsmiki refrakcyjnej z wykorzystaniem 12 geofonów przy rozstawie 8 m. Falę wygenerowano poprzez uderzenie młotem w aluminiową płytę. W badaniu zastosowana została standardowa metoda pomiaru i w sumie wykonano 5 uderzeń: 2 uderzenia offsetowe i 3 pomiarowe – na końcach i w środku rozstawy geofonów (rys. 3) [Redpath 1973]. Bezpośrednio po badaniu otrzy-



Rys. 3. Schemat lokalizacji punktów generacji fali oraz przykładowe sejsmogramy
 Fig. 3. Geophone spacing, shot distance to receiver and recorded seismograms

mano wyniki w formie sejsmogramów (rys. 3). Po skończeniu pobierania danych zostały one przefiltrowane i zinterpretowane za pomocą programu Winsism. Kończącym efektem było uzyskanie rozkładu prędkości fali w profilu pomiarowym (rys. 4).



Rys. 4. Wynik pomiarów metodą refrakcyjną (MASW)

Fig. 4. MASW test results

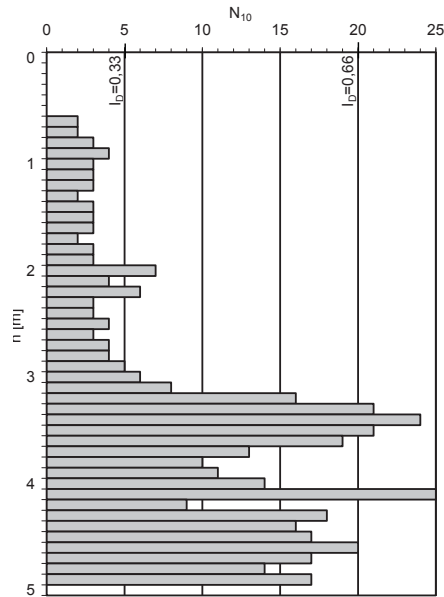
Na podstawie przeprowadzonych powierzchniowych badań sejsmicznych MASW wytypowano miejsce do wykonania kontrolnego badania korpusu wału sondą dynamiczną. Do badań wykorzystano sondę lekką DPL, o masie młota 10 kg. Sprzęt oraz metodyka badania były zgodne z wytycznymi zawartymi w PN-B-04452:2002.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W przekroju uzyskanym z badań MASW wyróżnić można 3 strefy rozkładu prędkości fali w nasypie (rys. 4). Strefa nr 4, o miąższości około 0,5–1,0 m, to warstwa powierzchniowa o wyraźnie mniejszej prędkości niż w pozostałych warstwach, wahającej się od 133 do 203 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, składająca się z materiałów słabych, w której dominuje piasek średni w średnim bądź luźnym stanie zagęszczenia. Jest to warstwa gruntów niespoistych, którymi podwyższona została korona wału po ostatniej powodzi, niedostatecznie zagęszczona. W strefie nr 1, długości około 20 m, znajdującej się na początku profilu pomiarowego, zarejestrowano prędkości rzędu 290 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. W strefie nr 2, znajdującej się na długości od 20 do około 35 m i na końcu profilu od około 75 m, zanotowano prędkość fali o wartości 247 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. W strefie nr 3, znajdującej się w środku profilu, zaobserwowano mniejszą prędkość rzędu 230 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Taki rozkład prędkości wyraźnie wskazuje na znajdujące się w tym obszarze rozluźnienie materiału tworzącego wał. Mniejsza prędkość fali oznacza jej utrudnioną propagację, co może być spowodowane niedostatecznym zagęszczeniem materiału w tym obszarze. Pozwala to przypuszczać, że właśnie w obrębie strefy nr 3 występowały największe przesiąki przez korpus wału.

W celu weryfikacji wyników otrzymanych z badań sejsmicznych z faktycznym stanem gruntów wbudowanych w nasyp wykonano badanie kontrolne sondą DPL w miejscu wskazującym na największe rozluźnienie w korpusie wału (najmniejsza prędkość fali poprzecznej). Wyniki sondowania przedstawiono na rysunku 5.

Wykonane sondowanie potwierdziło wcześniejsze badania. W profilu pomiarowym do głębokości około 3 m zalega piasek w stanie luźnym o stopniu zagęszczenia około 0,25. Świadczy to o wyraźnym osłabieniu konstrukcji wału w analizowanym miejscu i potwierdza istnienie warunków sprzyjających przesiąkom na analizowanym odcinku



Rys. 5. Wynik sondowania DPL

Fig. 5. DPL test results

wału. Poniżej głębokości 3 m średni stopień zagęszczenia gruntów budujących obwałowanie jest większy i wynosi około 0,5, co również nie jest wartością spełniającą normy przewidziane dla tego typu budowli.

Otrzymane wyniki wskazują na konieczność przeprowadzenia modernizacji na analizowanym odcinku wału (w rejonie, w którym uzyskano najmniejsze wartości prędkości fali).

PODSUMOWANIE

Rozwój technik badawczych w zakresie metod geofizycznych, w tym sejsmiki refrakcyjnej, pozwala na wykorzystanie tych metod w zagadnieniach geotechnicznych. Przedstawione w artykule wyniki badań umożliwiają wstępną ocenę stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych. Rezultaty badań geofizycznych, mimo uśrednień pomiarów wynikających z ich nieinwazyjnego charakteru, korelują ze stanem gruntów określonym na podstawie standardowych badań geotechnicznych – sondowania DPL.

Otrzymany rozkład prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej w korpusie wału charakteryzuje się większymi wartościami prędkości na końcach profilu badawczego i mniejszymi wartościami uzyskanymi w środku przedmiotowego profilu, co wyraźnie wskazuje na występowanie strefy rozluźnienia materiału gruntowego, budującego korpus wału w tym obszarze.

Zarejestrowana mniejsza wartość prędkości fali poprzecznej świadczy o utrudnionej propagacji fali w głąb profilu badawczego, prawdopodobnie związanej z niedostatecz-

nym zagęszczeniem gruntu w tym obszarze na etapie budowy lub na skutek przejścia fali wezbraniowej. Potwierdzają to zaobserwowane na analizowanym odcinku intensywne przesiąki wody przez korpus wału podczas ostatnich wezbrań powodziowych.

Z powierzchniowych badań geofizycznych analizowanego odcinka wału przeciwpowodziowego widać, że uzyskane wyniki stanowią jedynie wstęp do przeprowadzenia oceny stanu technicznego. Mogą one posłużyć do zaplanowania zakresu szczegółowych badań geotechnicznych, szczególnie w miejscach, w których stwierdzono anomalie strukturalne i strefy o zmniejszonej (na tle całości) prędkości fali.

Badania te dzięki ciągłości profili pomiarowych umożliwiają zlokalizowanie stref nieciągłości (rozluźnień), które mogą być pominięte podczas standardowej kontroli stanu wału na podstawie punktowych, rzadko zlokalizowanych wierceń i sondowań.

Niewątpliwą zaletą techniki MASW jest jej nieinwazyjność, dzięki której można uzyskać informacje na temat stanu technicznego wału, bez konieczności dogęszczania siatki otworów znacząco naruszających strukturę korpusu obwałowania.

Przeprowadzane badania sejsmiczne wymagają dalszej analizy w celu wyostrenia otrzymanego obrazu budowy wału i podłoża oraz możliwości wykorzystania uzyskanych wyników do oceny stanu technicznego nasypu w praktyce inżynierskiej.

PIŚMIENNICTWO

- Bajda M., Markowska-Lech K., Lech M., Szymański A., 2012. Wykorzystanie badań geofizycznych do rozpoznania budowy podłoża gruntowego. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 33, 4, 308–313.
- Gołębiewski T., Tomecka-Suchoń S., Farbisz J., 2012. Zastosowanie kompleksowych metod geofizycznych do nieinwazyjnego badania technicznego stanu wałów przeciwpowodziowych. *Symposium Europejskie „Współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej”*. Paryż – Orlean, 1–8.
- Heisey J.S., Stokoe K.H. II, Meyer A.H., 1982. Moduli of pavement system from spectral analysis of surface waves. *Transp. Res. Rec.* 852, 22–31.
- Krzywiec P., Bestyński Z., 2001. Sejsmika refleksyjna w płytkich badaniach geologicznych – przykłady zastosowań. *Konferencja „Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska dla potrzeb samorządności lokalnej”*. PIG, Kraków, 73–84.
- PN-B-04452-2002 *Geotechnika. Badania polowe*.
- Redpath B.B., 1973. Technical report E-73-4 Seismic refraction exploration for engineering site investigations. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California.
- Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83, 173–193.
- Stokoe K.H., Santamarina J.C., 2000. Seismic – wave – based testing in geotechnical engineering. *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, „GeoEng 2000”*, Melbourne.
- Ślusarczyk R., 2001. Możliwości zastosowania geofizyki inżynierskiej w problematyce budownictwa lądowego i wodnego. *Konferencja „Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska dla potrzeb samorządności lokalnej”*. PIG, Kraków, 109–124.

THE USE OF SURFACE SEISMIC METHODS FOR EXAMINATION OF TECHNICAL CONDITIONS OF THE LEVEES

Abstract. In this study a geophysical investigation using multi-channel surface wave measurements (MASW) was undertaken to characterize the condition of earth levees. The field measurements were conducted on Vistula levees near Kraski Górze. The MASW method allowed mapping shear wave velocity structures along levees and so relatively high and low velocity zones in the levee body could be easily read. The results were compared to borehole drillings and DPL test. As a conclusion it can be said that the MASW method can be used to identify failure risk areas with a relatively high resolution.

Key words: MASW, surface seismic, levees

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.12.2012