



Anna KUBAŃSKA*, Zbigniew ISAKOW**, Zenon PILECKI***

Założenia funkcjonalne systemu Seismobile

Streszczenie: W ostatnich kilkunastu latach dokonał się silny rozwój tzw. strimerów sejsmicznych pozwalających na usprawnienie sejsmicznych pomiarów w warunkach powierzchni utrudniających mocowanie geofonu, np. nawierzchnie betonowe, lub asfaltowe, w przypadku wykonywania długich, wielokilometrowych profili. Strimer jest mobilnym urządzeniem, którego głównym elementem jest układ specjalnie zamontowanych geofonów, przystosowanych do ciągnięcia po powierzchni terenu.

Łącząc zalety profilowania sejsmicznego z użyciem strimera sejsmicznego oraz profilowania georadarowego, został opracowany system Seismobile. System ten jest przeznaczony do diagnostyki podłoża gruntowego projektowanych i modernizowanych szlaków komunikacyjnych – dróg, linii kolejowych, pasów startowych na lotniskach itp. System ten pozwala na wykonanie profilowania sejsmicznego techniką refrakcyjną, refleksyjną lub wielokanałowej analizy fali powierzchniowej MASW oraz profilowania georadarowego. Umożliwia on również ciągły pomiar drgań sejsmicznych, lub parasejsmicznych w okresie do około 12 godzin. Konstrukcja systemu Seismobile umożliwia ciągnięcie 4 linii pomiarowych oraz wózka z podwieszoną anteną georadarową. Rozpoznanie podłoża można prowadzić do szerokości 10,5 m, przy odległości 3,5 m pomiędzy liniami pomiarowymi. Pomiar georadarem prowadzony jest w osi konstrukcji systemu Seismobile.

Cechami charakterystycznymi systemu Seismobile są: zdalna transmisja danych z geofonów oraz ich gromadzenie do 32 GB na geofon z dynamiką rejestracji większą od 120 dB, zautomatyzowany sposób lokalizacji układu pomiarowego na podstawie sygnału GPS oraz zautomatyzowany sposób wzbudzenia fali sejsmicznej. W związku z tym usprawnienia systemu pozwalają na skrócenie czasu pomiaru oraz zmniejszenie pracochłonności.

Słowa kluczowe: system Seismobile, strimer sejsmiczny, profilowanie refrakcyjne, profilowanie refleksyjne, profilowanie MASW, profilowanie georadarowe, deformacja nawierzchni drogi, podłoże szlaku komunikacyjnego

Functional assumptions of the Seismobile system

Abstract: There has been a strong development in recent years of the so-called landstreamers which allow for the improvement of seismic measurements in conditions that hinder geophone attachment to the surfaces such as

* Mgr inż., Centrum Transferu Technologii EMAG, Katowice; email: a.kubanska@cttemag.pl

** Dr hab. inż., prof. EMAG, Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice; e-mail: Zbigniew.Isakow@ibemag.pl

*** Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN, Kraków; e-mail: pilecki@meeri.pl

concrete or asphalt, and in the case of performing long profiles. The landstreamer is a mobile unit, the main element of which is the geophones system specially adapted to pull on the terrain surface.

The Seismobile system was developed, combining the advantages of seismic profiling using landstreamer and georadar profiling. This system is designed for the diagnosis of designed and modernized routes basement such as: roads, railways, airport runways, etc. This system allows for the execution of profiling such seismic techniques as: refractive, reflective, or multi-channel analysis of surface waves MASW. It also enables continuous measurement of seismic vibrations up to approx. 12 hours. The system design enables pulling Seismobile 4 measuring lines and trolleys with a suspended GPR antenna. The basement recognition may be carried out to a maximum width of 10.5 m for a distance of 3.5 m between the measurement lines. GPR measurement is carried out on the axis of the Seismobile system.

Seismobile characterizes: remote data transmission from geophones and storage up to 32 GB on a geophone with the dynamics of registration greater than 120 dB, automated location of the system based on GPS and automated way of inducing the seismic wave. Therefore, the improvements in the system allow the measurement time to be shortened, thus reducing work effort.

Keywords: Seismobile system, landstreamer, 3D refraction profiling, 3D reflection profiling, 3D MASW profiling, GPR profiling, road surface deformation, road basement

Wprowadzenie

Dla potrzeb projektowania nowych szlaków komunikacyjnych i modernizacji istniejących, zazwyczaj analizuje się warunki geologiczno-inżynierskie w podłożu gruntowym w celu identyfikacji różnego rodzaju stref osłabienia. Strefy te, najczęściej w wyniku eksploatacji szlaków komunikacyjnych są przyczyną różnego rodzaju deformacji w ośrodku geologicznym i w konsekwencji deformacji konstrukcji obiektu. W przypadku dróg, najczęściej widocznym efektem osłabienia podłoża są deformacje nawierzchni jezdni w postaci różnego rodzaju lokalnych obniżeń, spękań, progów, a nawet fleksur. Na terenach górniczych zdarzają się również zapadliska i inne formy deformacji nieciągłych.

Do stref osłabienia w podłożu szlaków komunikacyjnych wymagających rozpoznania należy zaliczyć silne zróżnicowanie właściwości ośrodka, strefy nieuregulowanego przepływu wód gruntowych (w tym strefy wymycia), występowanie gruntów organicznych i kurzałek, strefy osuwiskowe, zaburzenia tektoniczne, występowanie pustek i stref rozluźnień na terenach eksploatacji górniczej i terenach podlegających procesom krasowym itp.

W przypadku modernizacji szlaków komunikacyjnych, obserwowane deformacje na powierzchni obiektu mogą również być efektem niekorzystnego stanu technicznego jego podziemnej części. W tym celu należy rozpoznać przebieg i ciągłość warstw konstrukcyjnych oraz położenia elementów wzmocnienia konstrukcji, a także zlokalizować obiekty podziemnej infrastruktury takich jak kanały, rury itp.

Identyfikacja stref osłabienia oraz określenie przypuszczalnych przyczyn ich wpływu na proces niszczenia konstrukcji drogowej pozwalają na właściwe zaprojektowanie specjalnego zabezpieczenia i w efekcie przeciwdziałanie wystąpieniu deformacji konstrukcji szlaków komunikacyjnych.

Do metod powszechnie stosowanych w diagnostyce szlaków komunikacyjnych, w tym rozpoznania budowy i właściwości podłoża gruntowego, należą metody geofizyczne. W badaniach tego rodzaju najszersze zastosowanie znajdują metoda georadarowa (GPR), sejsmiczna i elektrooporowa. Ze względu na wieloznaczność i ograniczenia metod geofizycznych, takie rozpoznanie jest najkorzystniej wykonać dwoma metodami bazującymi na odmiennych właściwościach fizycznych ośrodka.

Metoda georadarowa jest często stosowana ze względu na krótki czas pomiaru i zautomatyzowane w dużym stopniu przetwarzanie i interpretację danych. Jednak podstawowym jej ograniczeniem jest niewielki zasięg głębokościowy i malejąca rozdzielczość ze wzrostem zasięgu rozpoznania. Użycie anten o częstotliwości od 200 do 400 MHz, w typowych warunkach umożliwia rozpoznanie do głębokości kilku metrów. W przypadku diagnostyki warstw konstrukcyjnych, wymagających większej rozdzielczości, stosuje się anteny o większych częstotliwościach, dla których zasięg jest jeszcze mniejszy.

W przypadku metod sejsmicznej i elektrooporowej, w typowych schematach pomiarowych dla zagadnień inżynierskich osiąga się zazwyczaj zasięg głębokościowy do 20–40 m. Natomiast istotnym ograniczeniem w użyciu obu metod jest duża pracochłonność w realizacji pomiarów, jak również w przetwarzaniu i interpretacji danych.

W ostatnich kilkunastu latach dokonał się silny rozwój tzw. strimerów sejsmicznych (ang. *landstreamer*) – urządzenia pozwalającego na usprawnienie sejsmicznych pomiarów w warunkach utrudniających mocowanie geofonu np. nawierzchnie betonowe, lub asfaltowe, w przypadku wykonywania długich, wielokilometrowych profili (Inazaki 1999). Strimer jest mobilnym urządzeniem, którego głównym elementem jest układ specjalnie zamontowanych geofonów, przystosowanych do ciągnięcia po powierzchni terenu. Uproszczenie pomiarów sejsmicznych za pomocą strimera związane jest też z wieloma ograniczeniami, w tym ograniczeniami związanymi z ukształtowaniem powierzchni terenu oraz kontaktem czujnika z ośrodkiem. Szerszy przegląd różnych strimerów sejsmicznych można znaleźć w pracy Pileckiego i in. (2014).

Łącząc zalety profilowania sejsmicznego z użyciem strimera sejsmicznego oraz profilowania georadarowego został opracowany system Seismobile. System ten pozwala na wykonanie profilowania sejsmicznego techniką refrakcyjną, refleksyjną, lub wielokanałowej analizy fali powierzchniowej MASW oraz profilowania georadarowego. Umożliwia on również ciągły pomiar drgań sejsmicznych, lub parasejsmicznych w okresie do około 12 godzin. Cechą charakterystyczną Seismobile jest zdalna transmisja danych z czujników oraz ich gromadzenie, a także zautomatyzowany sposób lokalizacji układu pomiarowego na podstawie GPS oraz zautomatyzowany sposób wzbudzania fali sejsmicznej.

1. Rozwój sejsmicznych strimerów

Współczesne rozwiązania konstrukcyjne sejsmicznych strimerów znajdujących zastosowanie w zagadnieniach inżynierskich bazują na doświadczeniach z badań sejsmicznych w warunkach morskich. Pierwsze zastosowanie układu geofonów w warunkach lądowych, ciągniętych po pokrywie śnieżnej i lodzie, których gładka i śliska powierzchnia ułatwiała przemieszczanie się długiego profilu przedstawił Eiken i in. (1989). W kolejnych latach rozwijano mobilne systemy sejsmiczne w schemacie sejsmiki refleksyjnej (van der Veen i in. 2001; Link i in. 2006; Pullan i in. 2008; Inazaki i Nakanishi 2009), jak również w schemacie MASW (Leech 2006; Lane i in. 2008). Szersze podsumowanie rozwoju technologii strimerów sejsmicznych można znaleźć w pracy Brodicia i in (2015).

Obecnie mobilne systemy sejsmiczne rozwijają się w kierunku poprawy ergonomii pracy systemu oraz poprawy stosunku sygnału użytecznego do szumu. Interesujące doświadczenia w odniesieniu do kontaktu czujnika z podłożem zostało przedstawione w pracach Moura

i in. (2012), czy Van der Veena i in. (2001). W celu poprawy jakości sygnału użytecznego do szumu stosowano różne metody, głównie polegające na dociążaniu podstawy czujnika do podłoża.

Nadal powszechne zastosowanie znajdują geofony elektrodynamiczne ze względu na dużą czułość rejestracji, pomimo ich wrażliwości na wychylenia, szum elektromagnetyczny oraz węższe pasmo częstotliwości rejestracji w porównaniu do innych typów czujników. Interesujący strimer sejsmiczny bazujący na czujnikach MEMS (ang. *Micro-Electro-Mechanical System*) przedstawił Brodic i in. (2015). Czujniki MEMS posiadają mniejszą wrażliwość od tradycyjnych na zakłócenia środowiskowe elektryczne i elektromagnetyczne oraz dość szerokie pasmo rejestracji częstotliwości od 0 do 800 Hz.

Większość badań z wykorzystaniem strimerów prowadzonych jest w wariancie dwuwymiarowym (Malehmir i in. 2015; Vangkilde-Pedersen i in. 2012), ale istnieją również zastosowania strimerów w wariancie trójwymiarowym (Dolena i in. 2008).

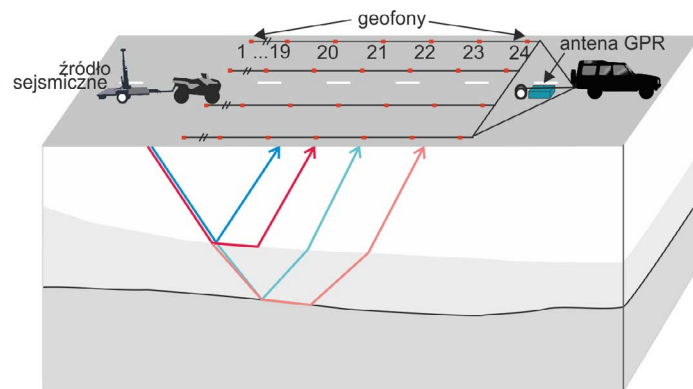
Sejsmiczny system mobilny jest obecnie oferowany przez wielu producentów takich jak np.: Federal Institute of Technology (Szwajcaria), COWI (Dania), Ramboll (Dania), Illinois Geological Survey (Stany Zjednoczone), Kansas Geological Survey (Stany Zjednoczone), Bay Geophysical (Stany Zjednoczone), Montana Tech (Stany Zjednoczone).

2. Podstawowe założenia systemu Seismobile

System Seismobile jest przeznaczony do diagnostyki podłoża gruntowego projektowanych i modernizowanych szlaków komunikacyjnych – dróg, linii kolejowych, pasów startowych na lotniskach itp. System ten bazuje na metodzie sejsmicznej w wersji profilowania refrakcyjnego, refleksyjnego lub MASW oraz metodzie georadarowej. Według posiadanej wiedzy autorów, nie jest znany system, który łączyłby mobilne możliwości pomiaru sejsmicznego i georadarowego. W zależności od zadania badawczego i warunków pomiarowych dobiera się schemat pomiarowy oraz parametry pomiaru, w tym rodzaj źródła sejsmicznego, długość rozstawu, częstotliwość własną geofonów i częstotliwość anteny georadaru.

Schemat systemu Seismobile 3D przedstawiono na rysunku 1. Składa się on z części sejsmicznej oraz części georadarowej pracujących niezależnie. Synchronizacja pomiaru wynika z namiaru GPS.

Część sejsmiczna, ze względu na technologię pomiaru, tworzy główną konstrukcję systemu. W najbardziej rozbudowanej wersji 3D, Seismobile składa się z 4 linii pomiarowych po 24 geofony jednoskładowe, w sumie 96 czujników. Możliwe jest zainstalowanie geofonów trójskładowych. Największy odstęp między geofonami wynosi 5 m, co pozwala na zastosowanie rozstawów o długości 115 m. Najmniejszy odstęp między geofonami wynosi 1 m, lecz odległość ta może być specjalnie dobierana w zależności od rodzaju zadania badawczego. Geofony są przymocowane do taśmy parcjanej o dużej wytrzymałości na rozciąganie za pomocą specjalnej metalowej podstawy (fot. 1). Za podstawą czujnika na taśmie, na innej metalowej podstawie, zainstalowany jest elektroniczny moduł pomiarowy, przyłączony do geofonu krótkim kablem. Moduł pomiarowy zapewnia synchroniczne w czasie próbkowanie analogowych sygnałów z czujników z błędem nieprzekraczającym 1 μ s, gromadzenie przetworzonych na postać cyfrową danych, ich bezprzewodową transmisję oraz zasilanie całego układu pomiarowego. Sejsmiczna jednostka sterująca znajduje się na pojeździe samochodowo-



Rys. 1. Schemat systemu Seismobile 3D

Fig. 1. The scheme of the Seismobile 3D system



Fot. 1. Zestaw pomiarowy strimera sejsmicznego składający się z geofonu mocowanego na metalowej podstawie z trzema „nózkami” w kształcie półkul oraz współpracującego z modulem pomiarowym mocowanym na innej metalowej podstawie z wyprofilowanymi płozami

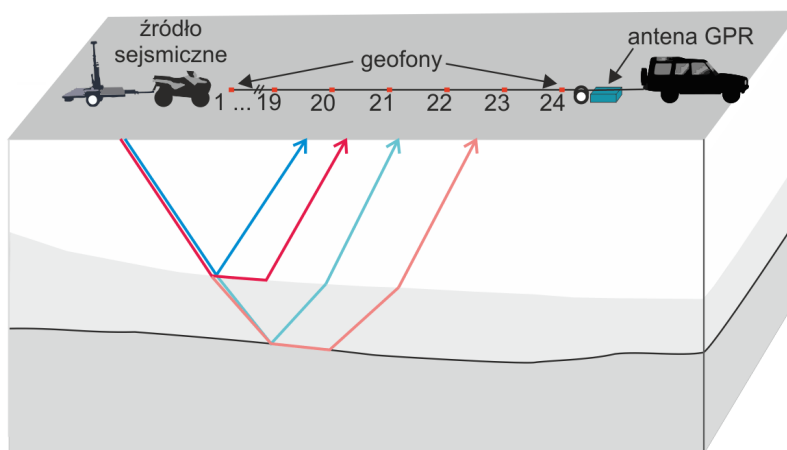
Phot. 1. Set of seismic streamers consisting of a geophone mounted on a metal base with three “legs” in the shape of hemispheres, and collaborating with measurement modules mounted on another metal base with contoured skids

wym. Wzbudzenie fali sejsmicznej może być przeprowadzone w dowolny sposób. Najczęściej wykorzystywany jest uderzenie młotem lub kłosa samojezdny. Dokładność określenia czasu wzbudzenia fali sejsmicznej jest kontrolowana za pomocą czujników zsynchronizowanych z modułami pomiarowymi, zamontowanych na wzbudnikach.

Część georadarowa składa się z konstrukcji do mocowania anten georadaru w części osiowo-symetrycznej całego układu pomiarowego oraz jednostki sterującej znajdującej się na pojeździe samochodowym. Anteny połączone są kablami z jednostką sterującą. Konstrukcja dla mocowania anteny została tak dobrana, aby można było zamocować różnej wielkości anteny.

Cały system Seismobile jest przesuwany przez pojazd samochodowy wzdłuż ustalonego profilu. Pomiar sejsmiczny odbywa się na długości rozstawu w ustalonym interwale odle-

głości. W trakcie przesuwania systemu na kolejny rozstaw dokonywany jest pomiar georadarowy. Systemu Seismobile można używać w wersji z mniejszą liczbą linii pomiarowych (rys. 2) lub wydłużonej jednej linii pomiarowej do 96 kanałów.



Rys. 2. Schemat systemu Seismobile w wersji 2D

Fig. 2. The scheme of the Seismobile 2D system

Odpowiednie oprogramowanie sprzętowe umożliwia konfigurowanie pomiarów, w tym podgląd tras przed pomiarem i zestawienie zarejestrowanych sejsmogramów w różnych konfiguracjach. Zarejestrowane dane pomiarowe zapisane w formacie SEG Y wymagają archiwizacji i segregacji, a następnie podlegają przetwarzaniu i interpretacji z wykorzystaniem oprogramowania SeismicPro firmy GeoGiga dostosowanego do różnych schematów pomiarowych (refleksyjnego, refrakcyjnego lub MASW) w układzie 1D, 2D lub 3D. Pozyskane dane pomiarowe ze strimera sejsmicznego pozwalają na wystarczająco skuteczne ich przetwarzanie i interpretację (Lehman 2007).

3. Zalety i ograniczenia systemu Seismobile

System Seismobile łączy zalety rozpoznania sejsmicznego z georadarowym. W części sejsmicznej system ten jest w dużym stopniu zautomatyzowany. W wyniku zastosowania uproszczeń konstrukcyjnych związanych z instalacją czujników i mobilnością sprzętu pomiarowego, zdecydowanie skrócono czas realizacji pomiarów sejsmicznych.

Konstrukcja systemu Seismobile umożliwia ciągnięcie 4 linii pomiarowych oraz wózka z podwieszoną anteną georadarową. Rozpoznanie podłoża można prowadzić do szerokości 10,5 m, przy największej odległości 3,5 m pomiędzy liniami pomiarowymi. Pomiar georadarem prowadzony jest w osi konstrukcji systemu Seismobile.

System umożliwia zdalną transmisję drogą radiową dużej liczby sejsmicznych danych pomiarowych do 32 GB na geofon z dynamiką rejestracji większą od 120 dB. Wzbudzenie fali sejsmicznej jest również synchronizowane drogą radiową. W związku z tym uzyskuje

się znaczące skrócenie czasu pomiaru oraz mniejszą pracochłonność wynikającą z mechanizacji pomiarów.

W części georadarowej system umożliwia profilowanie georadarowe jednokanałowe lub wielokanałowe w zależności od zastosowanej jednostki sterującej. Istnieje możliwość regulacji konstrukcji podwieszenia anten georadaru i zawieszenia anten o różnych wymiarach. Anteny mogą być również ciągnięte po powierzchni terenu.

Do innych zalet systemu Seismobile należy zaliczyć:

- W systemie zastosowano nowe rozwiązanie autonomicznego modułu pomiarowego czujnika sejsmicznego (geofonu), modułu pomiarowego wzбудnika, sposobu synchronizacji pomiarów dokonywanych w czasie przez wszystkie czujniki, ich mocowania oraz zasilania, w celu poprawy niezawodności oraz ergonomii użytkownika systemu.
- System pozwala na pomiary z precyzyjnym odbiornikiem GPS, co zapewnia większą dokładność i operatywność pomiarów oraz minimalizację błędów pozycjonowania. Dokładna geometria pomiaru jest określana w etapie przetwarzania danych na podstawie współrzędnych GPS i znanych odległości między elementami systemu.
- Sejsmiczne zestawy pomiarowe mogą składać się z czujników jednoskładowych i trójskładowych. Mocowanie geofonu i modułu pomiarowego na podstawach metalowych zestawu pomiarowego umożliwia ich szybką wymianę.
- Zestawy pomiarowe zostały tak skonstruowane, aby środek ciężkości znajdował się jak najniżej oraz ich kształt umożliwiał łatwe pokonywanie niewielkich przeszkód typu kamienie i małe nierówności terenu.
- Moduły pomiarowe są zasilane indywidualnie i pracują autonomicznie. Rejestrowane dane są próbkowane względem czasu astronomicznego z synchronizacją za pomocą zegara GPS z błędem nieprzekraczającym 1 μ s.
- Oprogramowanie sprzętowe umożliwia sprawdzenie gotowości geofonów do pomiaru oraz kontrolę poprawności wykonania pomiaru.
- W systemie w wersji podstawowej znajduje się mobilne źródło fali sejsmicznej na bazie pojazdu typu quad z zamocowanym opcjonalnie półautomatycznym kafarem zdalnie sterowanym i zdalnie zsynchronizowanym z modułami pomiarowymi. Mobilne źródło sejsmiczne jest wyposażone w system precyzyjnego pozycjonowania z wykorzystaniem systemu GPS.
- Pomiar wzбудzenia fali sejsmicznej jest dodatkowo zsynchronizowany za pomocą akcelerometru z geofonami według maksymalnej wartości amplitudy wzбудzenia, co eliminuje powstawanie ewentualnych błędów fazowych.
- Konstrukcje sejsmicznej jednostki sterującej oraz zestawów pomiarowych są pyłoszczelne i wodoszczelne.
- Istnieje możliwość włączenia „czuwania” po dokonaniu pojedynczego pomiaru sejsmicznego do czasu następnego pomiaru, co zapewnia oszczędność energii i pamięci gromadzącej rejestrowane dane.
- W systemie zastosowano interpretacyjne oprogramowanie jednego producenta umożliwiające jednoczesne, interaktywne przetwarzanie oraz interpretację danych według schematów profilowania refrakcyjnego, refleksyjnego oraz MASW. Kompatybilność formatów danych sejsmicznych dla różnych procedur przetwarzania i interpretacji w znaczącym stopniu przyspiesza pracę.

Do podstawowych ograniczeń systemu Seismobile należy zaliczyć:

- Pomiary systemem Seismobile można wykonywać w warunkach terenowych o niewielkiej zmienności ukształtowania, pozwalającej na zachowanie stateczności przesuwanego zestawu pomiarowego.
- Kontakt geofonu z ośrodkiem jest ograniczony do styku nóżek zestawu pomiarowego z powierzchnią terenu. Kontakt ten jest korzystniejszy w warunkach dużego obciążenia powierzchni styku zestawem pomiarowym.
- Rejestracja danych może być zakłócona w warunkach oddziaływania lokalnych pól elektrycznych i elektromagnetycznych.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono założenia funkcjonalne systemu Seismobile z podkreśleniem jego zalet i ograniczeń. System ten służy do diagnostyki podłoża gruntowego projektowanych i modernizowanych szlaków komunikacyjnych – dróg, linii kolejowych, pasów startowych na lotniskach itp. Zazwyczaj analizuje się warunki geologiczno-inżynierskie w podłożu gruntowym pod kątem występowania różnego rodzaju stref osłabienia. Strefy te w wyniku eksploatacji szlaków komunikacyjnych są powodem różnego rodzaju deformacji podłoża i w konsekwencji deformacji konstrukcji takiego obiektu. W przypadku dróg, najczęściej widocznym efektem osłabienia podłoża są deformacje nawierzchni jezdni w postaci różnego rodzaju lokalnych obniżeń, spękań, progów, a nawet fleksur. Na terenach górniczych zdarzają się również zapadliska i inne formy deformacji nieciągłych.

System Seismobile bazuje na metodzie sejsmicznej w wersji profilowania refrakcyjnego, refleksyjnego lub MASW wspomaganą metodą georadarową. W zależności od zadania badawczego dobiera się schemat pomiarowy oraz parametry pomiaru, w tym rodzaj źródła sejsmicznego, długość rozstawu jak i częstotliwość własną geofonów i anten georadaru. Umożliwia on również ciągły pomiar drgań sejsmicznych, lub parasejsmicznych w okresie do około 12 godzin.

Konstrukcja systemu Seismobile umożliwia ciągnięcie 4 linii pomiarowych oraz wózka z podwieszoną anteną georadarową. Rozpoznanie podłoża można prowadzić do szerokości 10,5 m, przy największej odległości 3,5 m pomiędzy liniami pomiarowymi.

Pomiar georadarem prowadzony jest w osi konstrukcji systemu Seismobile, z możliwością użycia anten o różnych częstotliwościach w sposób jednokanałowy, lub wielokanałowy w zależności od zastosowanej aparatury GPR. Pomiar georadarowy jest niezależny od pomiaru sejsmicznego i przeprowadza się go w czasie przesuwania systemu na kolejną pozycję pomiarową.

Cechą charakterystyczną Seismobile jest duża dynamika rejestracji większa od 120 dB, zdalna bezprzewodowa transmisja danych oraz ich gromadzenie do 32 GB na geofon, dzięki zastosowanym modułom pomiarowym współpracującym z geofonami, a także zautomatyzowany sposób lokalizacji układu pomiarowego na podstawie GPS oraz zautomatyzowany sposób wzbudzania fali sejsmicznej.

Zastosowanie systemu Seismobile w badaniach podłoża projektowanych i modernizowanych szlaków komunikacyjnych może przyczynić się do poprawy ich jakości oraz wydłużenia czasu eksploatacji.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE uzyskanego w ramach przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Brodic i in. 2015 – Brodic, B., Malehmir, A., Juhlin, C., Dynesius, L., Bastani, M. i Palm, H. 2015. Multicomponent broadband digital-based seismic landstreamer for near-surface applications. *Journal of Applied Geophysics* 123, s. 227–241.
- Dolena i in. 2008 – Dolena, T.M., Speece, M.A., Link, C.A. i Duaiame, T.E. 2008. *A 3D seismic land-streamer system. Near Surface Geophysics*. doi: 10.3997/1873-0604.2007028.
- Eiken i in. 1989 – Eiken, O., Degutsch, M., Riste, P. i Rod, K. 1989. Snowstreamer: An efficient tool in seismic acquisition. *First Break* 7, s. 374–378.
- Inazaki, T. 1999. Landstrimer: a new system for high-resolution S-wave shallow reflection surveys. Proc. 12th Annual Symp. on Appl. Geophys. Eng. Environ. Problems SAGEEP 1999, s. 207–216.
- Inazaki, T. i Nakanishi, T. 2009. Detailed imaging of near-surface faulting structure using land streamer. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Expanded Abstracts, s. 373.
- Lehman, B. 2007. *Seismic traveltome tomography for engineering and explorations*. EAGE Publications. ISBN 978-90-73781-41-2.
- Lane i in. 2008 – Lane, J., Ivanov, J., Miller, R., Day-Lewis, F., Clemens, D. i Patev, R. 2008. Levee evaluation using MASW: Preliminary findings from the Citrus Lakefront Levee, New Orleans, Louisiana. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Expanded Abstracts.
- Leech, C. 2006. Use of land streamers in English pastureland. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Expanded Abstracts, s. 1055–1064.
- Link i in. 2006 – Link, C., Speece, M. i Betterly, S. 2006. An overview of seismic land streamer projects at Montana Tech. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Expanded Abstracts, s. 1012.
- Malehmir i in. 2015 – Malehmir, A., Zhang, F. i Dehghannejad, M. 2015. Planning of urban underground infrastructure using a broadband seismic landstreamer – Tomography results and uncertainty quantifications from a case study in southwestern Sweden. *Geophysics* 80:B177–B192. doi: 10.1190/geo2015-0052.1
- Moura, R. i Matias, M. 2012. Geophones on blocks: a prototype towable geophone system for shallow land seismic investigations. *Geophysical Prospecting* 60, s. 192–200.
- Pilecki i in. 2014a – Pilecki, Z., Czarny, R. i Harba, P. 2014a. Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 70, s. 22–31.
- Pilecki i in. 2014b – Pilecki, Z., Harba, P. i Laszczak, M. 2014b. Strimery w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 70, s. 32–38.
- Pullan i in. 2008 – Pullan, S.E., Pugin, A., Hunter, J., Cartwright, T. i Douma, M. 2008. Application of P-wave seismic reflection methods using the Landstreamer/Minivib system to near-surface investigations. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Expanded Abstracts, s. 614–615.
- Riveiro, B. i Solla, M. 2016. *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*. CRC Press.
- Saarenketo, T. i Scullion, T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *J Appl Geophys* 43, s. 119–138. doi: 10.1016/S0926-9851(99)00052-X.
- Van der Veen i in. 2001 – Van der Veen, M., Spitzer, R., Green, A.G. i Wild, P. 2001. Design and application of a towed land-streamer for cost-effective 2D and pseudo-3D shallow seismic data acquisition. *Geophysics* 66, s. 482–500.
- Vangkilde-Pedersen i in. 2012 – Vangkilde-Pedersen, T., Rasmussen, E.S. i Kristensen, M. 2012. Detailed mapping of Miocene sand-rich deposits in Denmark with high-resolution 2D land streamer vibroseis. *First Break* Vol. 30, No. 8, s. 45–50.

