



Janusz P. KOGUT*, Jakub ZIĘBA**

Funkcje impulsowe jako narzędzie identyfikacji dynamicznych parametrów przypowierzchniowych warstw podłoża

Streszczenie: Wymuszenia impulsowe należą do istotnych źródeł sił dynamicznych, które pełnią kluczową rolę przy badaniu właściwości dynamicznych podłoża gruntowego. W różnych okolicznościach korzysta się z różnych typów wymuszeń, które najczęściej obejmują pewien charakterystyczny zakres częstotliwości. Zakres częstotliwości powinien mieć odzwierciedlenie w charakterystyce dynamicznej układu, np. uwarstwionego podłoża gruntowego. W pracy zajęto się analizą kilku przekrojów gruntowych, w których ulokowane są szlaki i obiekty komunikacyjne oraz obiekty budowlane. W badanych przekrojach realizowano wymuszenia impulsowe oraz dokonywano pomiarów odpowiedzi dynamicznej obejmującej źródło drgań, drogę propagacji fal oraz obiekt odbierający drgania. Przedstawione w pracy wymuszenia impulsowe były realizowane zarówno przez spadającą masę, jak i użycie specjalistycznego pojazdu posiadającego możliwość wymuszeń harmonicznnych oraz używając młotka modalnego. Rejestracja drgań obejmowała głównie punkty położone na powierzchni gruntu w różnych odległościach od źródła drgań i dotyczyła kierunku pionowego oraz kierunku poziomego, prostopadłego do wymuszenia. Na podstawie analizy pomierzonych sygnałów można próbować określić zarówno charakterystykę dynamiczną podłoża (poprzez ustalenie prędkości propagacji fal poprzecznych i podłużnych oraz oszacowanie parametrów tłumienia w badanym przekroju), jak i cechy dynamiczne budowli (np. obejmujące częstości i postacie własne) oraz modelować i oceniać skutki wpływów dynamicznych.

Słowa kluczowe: wymuszenie impulsowe, propagacja fal w gruncie, modelowanie sygnału

Impulse function as a dynamic impact force used for the identification of different soil conditions

Abstract: Impulse excitations belong to the contemporary sources of dynamic forces. They play a key role in the study of the dynamic properties of the shallow layers of subsoil. In various circumstances, the use of different types of excitations in general covers a characteristic low frequency range. This should reflect the dynamic characteristics of the layered subsoil.

* Dr inż., ** Mgr inż., Politechnika Krakowska, Kraków; e-mail: jkogut@pk.edu.pl

The study deals with the analysis of several soil cross-sections, which are located along roads and railway tracks, and near buildings. The impulse functions and measurements of the dynamic response consisting of a source and the propagating along the elastic half-space have been studied. The measurements of dynamic responses of a source of vibration, wave propagation path and the object receiving the vibrations in the studied cross-sections have been performed. The impulse excitations are carried out as follows: by a falling weight device, with the use of a specialized vehicle with the possibility of harmonic excitations, as well as with the use of an instrumented hammer. The vibration measurements were performed at the points located along the soil surface at different distances from the vibration source. The vertical vibrations as well as vibrations in the horizontal direction perpendicular to the direction of propagation of the impulse force in the subsoil have been measured. Based on the results of analysis, one may try to determine both the dynamic characteristics of the substrate by determining the propagation of transverse and longitudinal waves and the estimation of the attenuation parameters in the analyzed cross-section, and the dynamic characteristics of the structures (eigenfrequencies and eigenmodes). Afterwards, the modeling and the assessment of the impact of the wave propagation in the soil may be performed.

Keywords: impulse function, impact force, wave propagation in the soil, numerical model

Wprowadzenie

Obciążenie impulsowe S , które działa na jakiś układ przez skończony odcinek czasowy τ (rys. 1) może być przedstawione (Lipiński 1985) przy pomocy całki:

$$S = \int_0^{\tau} P(t) dt = P_0 \int_0^{\tau} f(t) dt = P_{sr} \cdot \tau \quad (1.1)$$

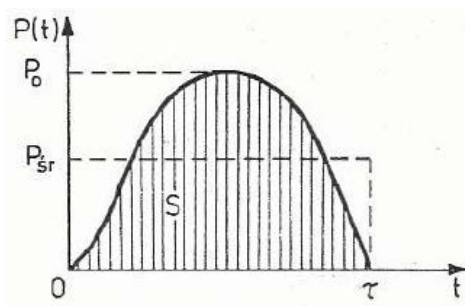
Można przyjąć, że obciążenie impulsowe to takie, które działa w skończonym czasie τ :

$$\tau \leq 2,5 \cdot T_0$$

gdzie:

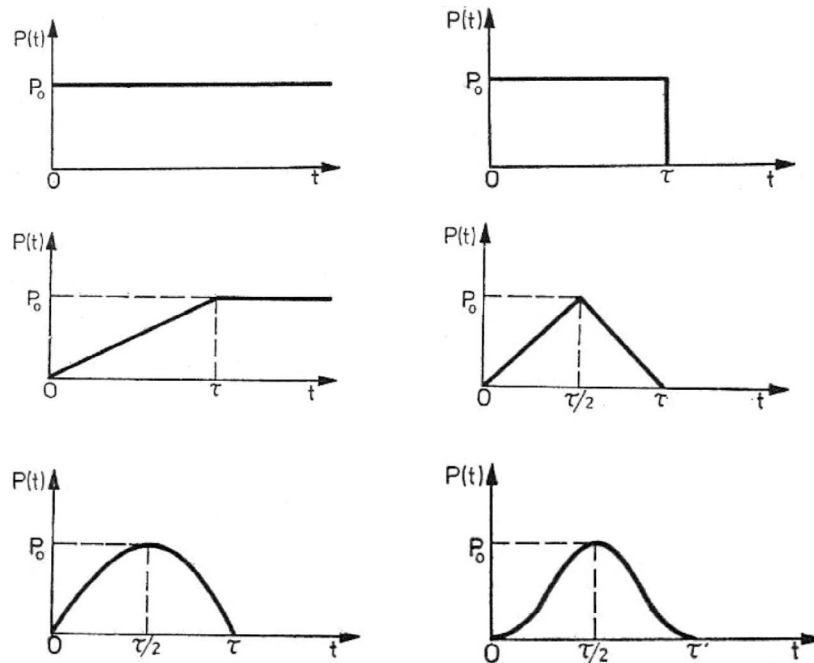
T_0 – podstawowy okres drgań własnych rozważanego układu, na który działa to obciążenie.

Zwykle opisuje się dwa typy impulsów: impuls nagły: $\tau < 0,1T_n$, określany przez wartość impulsu S (por. rys. 1) oraz impuls krótkotrwały: $0,1T_n < \tau < T_0$ określany przez S , lub



Rys. 1. Przykład obciążenia impulsowego

Fig. 1. Impulse function example



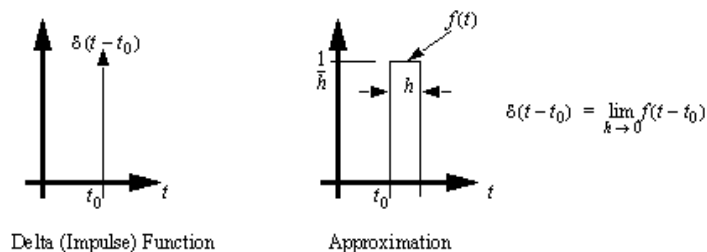
Rys. 2. Różne funkcje impulsowe

Fig. 2. Various impulse functions

jego wartość szczytową P_0 , postać impulsu $f(t) = P(t)/P_0$ oraz czas trwania τ . Wielkość T_n oznacza najmniejszy okres drgań własnych układu.

Można też rozróżnić szereg funkcji impulsowych (rys. 2): funkcje stałe (a), funkcje liniowe i odcinkowo liniowe (b), czy też funkcje nieliniowe – paraboliczne czy inne np. funkcje Gaussa (c). Główną realizacją funkcji impulsowej jest funkcja (czy też dystrybucja) Diraca charakteryzująca się tym, że:

$$\delta = \begin{cases} 0 & t \neq t_0 \\ +\infty & t = t_0 \end{cases} \quad \text{oraz} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2)$$



Delta (Impulse) Function

Approximation

Rys. 3. Dystrybucja Diraca

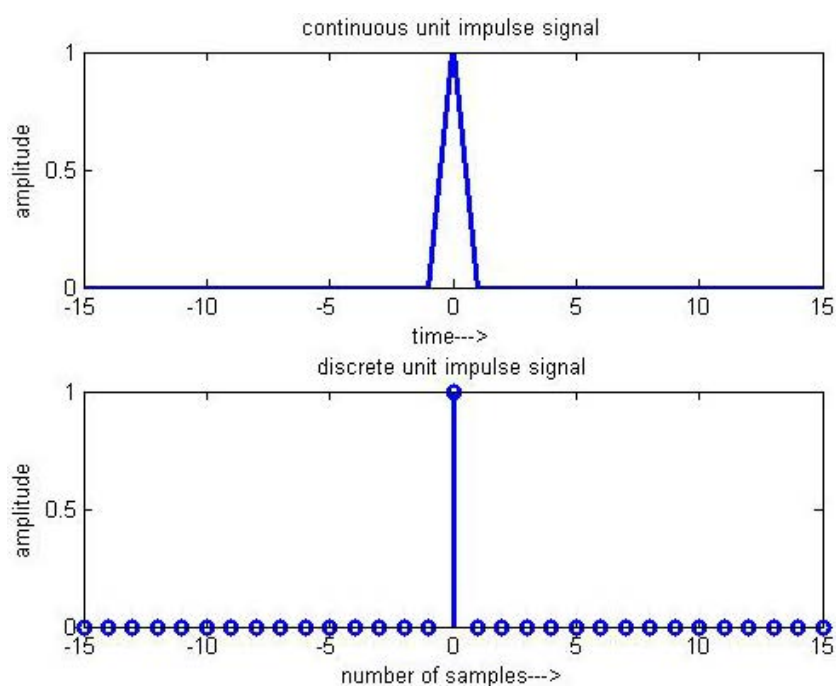
Fig. 3. Dirac distribution

Rysunek 3 prezentuje dystrybucję Diraca w dwóch różnych postaciach: jako wartość graniczną zmierzającą do nieskończoności oraz jako wartość skończoną w przedziale czasowym o szerokości zmierzającej do zera ($h \rightarrow 0$).

1. Realizacja wymuszenia impulsowego

1.1. Postać numeryczna wymuszenia impulsowego

Przykład realizacji numerycznej funkcji wymuszenia impulsowego jest przedstawiony na rysunku 4. Funkcja ta może być w obliczeniach numerycznych przedstawiana w dziedzinie czasu tylko w formie skończonej. Kolejne kroki czasowe ograniczone są poprzez wielkość czasu próbkowania Δt , który powinien być tak dobrany, aby prawidłowo odwzorować częstotliwość Nyquista, czyli mieć możliwość odwracalnego odwzorowania sygnału analogowego w cyfrowy w zakresie częstotliwości, który właściwie go odwzoruje.



Rys. 4. Realizacja numeryczna dystrybucji Diraca

Fig. 4. Numerical Dirac distribution

1.2. Sposoby realizacji wymuszeń impulsowych

1.2.1. Wymuszenie przez spadającą masę

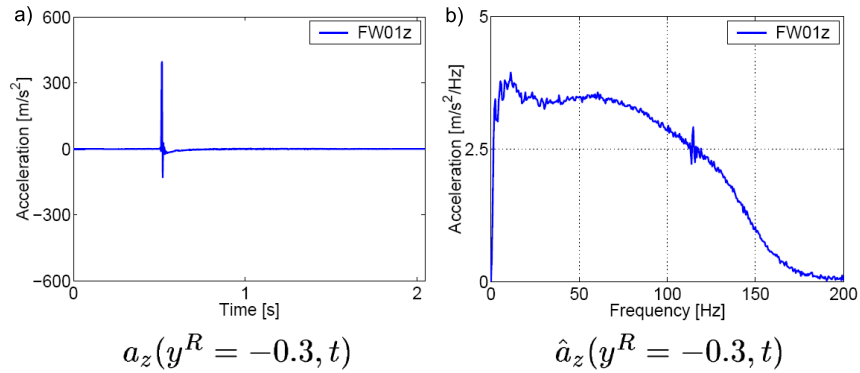
Wymuszenia impulsowe realizowane są najczęściej poprzez wykorzystanie urządzeń, które posiadają opadającą masę. Przykładem takiego urządzenia jest to pokazane na fotografii 1.



Fot. 1. Spadająca masa służąca do wymuszeń impulsowych o ciężarze odpowiadającym ciężarowi sondy DSPH (63,5 kg) z widocznym niskoczułym akcelerometrem

Phot. 1. A falling mass device with a mass equal to 63.5 kg, i.e. as a DSPH device with the accelerometer mounted to the mass

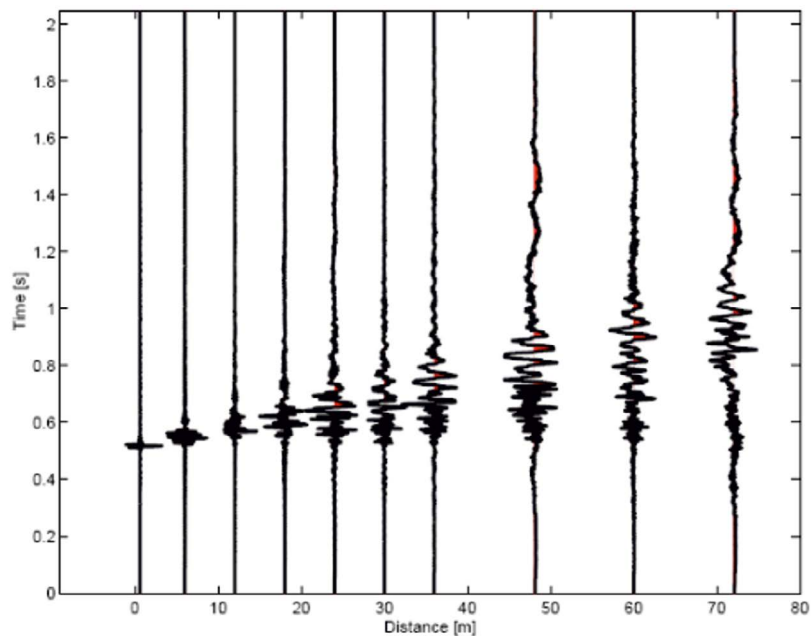
Rysunek 4 prezentuje zarejestrowany przebieg czasowy i analizę częstotliwościową sygnału zarejestrowanego przez akcelerometr usytuowany jak na fotografii 1. Krótki czas trwania sygnału (a) jest pokazany w dziedzinie częstotliwości (b) wskazując, że przedział dominujących częstotliwości ograniczony jest do około 150 Hz. Niestety sygnał impulsu zrealizowany przez spadającą masę wykazuje w dziedzinie czasu przejście do wartości ujemnych. Różni się on zatem od typowej dystrybucji Diraca. Oddziaływanie amplitudy maksymalnej rzędu $a = 350 \text{ m/s}^2$ daje siłę impulsu około $P_0 = 22 \text{ kN}$.



Rys. 5. Przebieg czasowy oraz charakterystyka częstotliwościowa sygnału zarejestrowanego od wymuszenia spadającą masą

Fig. 5. Time history and the frequency content of the impact of the falling mass

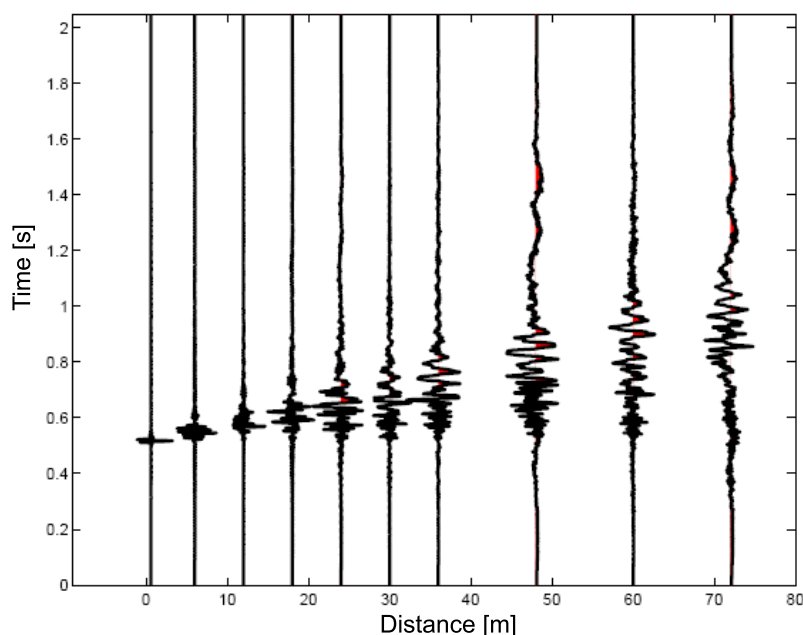
Efekty wymuszenia impulsowego zostały pokazane w dwóch sytuacjach i przekrojach pomiarowych. Zadaniem omawianego badania było sprawdzenie propagacji fal w przekroju pomiarowym odnoszącym się do typowego toru kolejowego zbudowanego z szyn UIC60 na podkładach strunobetonowych z przytwierdzeniem systemu Pandrol (Lombaert i in. 2006).



Rys. 6. Unormowane przebiegi czasowe od wymuszenia spadającą masą pomierzone wzdłuż toru kolejowego

Fig. 6. Time history of the impact of the falling mass measured along the railway track

Podkłady były położone na podsypce kamiennej. Kolejne wykresy przedstawiają zarejestrowane przebiegi czasowe drgań pionowych. Pierwszy odnosi się do rejestracji sygnału od wymuszenia impulsowego wzdłuż toru kolejowego do 72 m od źródła wymuszenia (rys. 6). Drugi zaś pokazuje propagację wymuszenia impulsowego w kierunku prostopadłym do osi toru, a rejestrowanym na powierzchni gruntu do 64 m od osi toru (rys. 7). Obydwa przebiegi pokazują wartości unormowane do wartości maksymalnej każdego zarejestrowanego sygnału.



Rys. 7. Unormowane przebiegi czasowe od wymuszenia spadającą masą zarejestrowane na gruncie w kierunku prostopadłym do toru kolejowego

Fig. 7. Time history of the impact of the falling mass in the free field and perpendicular to the track

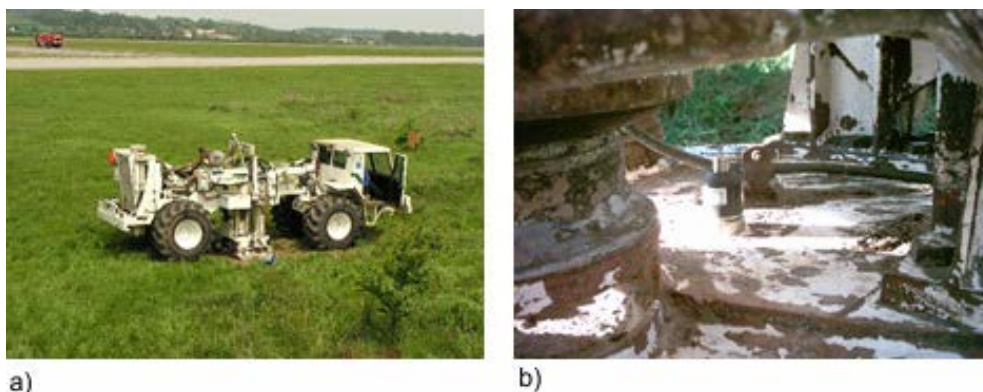
W przypadku pierwszym rejestracja drgań pionowych wykonywana jest poprzez akcelerometry umiejscowione na podkładach kolejowych, zaś w drugim przypadku akcelerometry umieszczono na sztywnych i lekkich aluminiowych prętach o przekroju krzyżakowym wbitych w grunt. Z rysunku 6 można dostrzec, że propagacja fali odbywa się poprzez usztywnioną warstwę podbudowy, a jej charakter jest inny niż w przypadku rejestracji w gruncie (rys. 7). Jednakże w obu przypadkach zauważamy, iż następuje dyspersja fali. Świadczy to o niejednorodności przypowierzchniowych warstw podłoża. Z analiz odwrotnych (Kogut 2007a), potwierdzonych badaniami propagacji fal w gruncie (SASW) oraz SCPT wynika, że w gruncie występuje jedna warstwa podatna, w której prędkość propagacji fal poprzecznych $V_s = 105$ m/s.

Wykonany odwiert wskazał, że była to warstwa osadów czwartorzędowych o grubości około 1,20 m sklasyfikowanych jako pyły (Si).

Znajdowała się ona na sztywniejszym, trzeciorzędowym podłożu, składającym się z warstw o prędkościach propagacji fal poprzecznych V_s pomiędzy 210 a 250 m/s. Warstwy te stanowiły piaski drobne o grubości około 2 m (FSa) oraz poniżej (badane do około 15 m p.p.t.) przemieszane arenity wraz z łąkami piaszczystym (saCl) lub łąkami pylastymi (siCl) z poziomem wody gruntowej na głębokości 10,4 m.

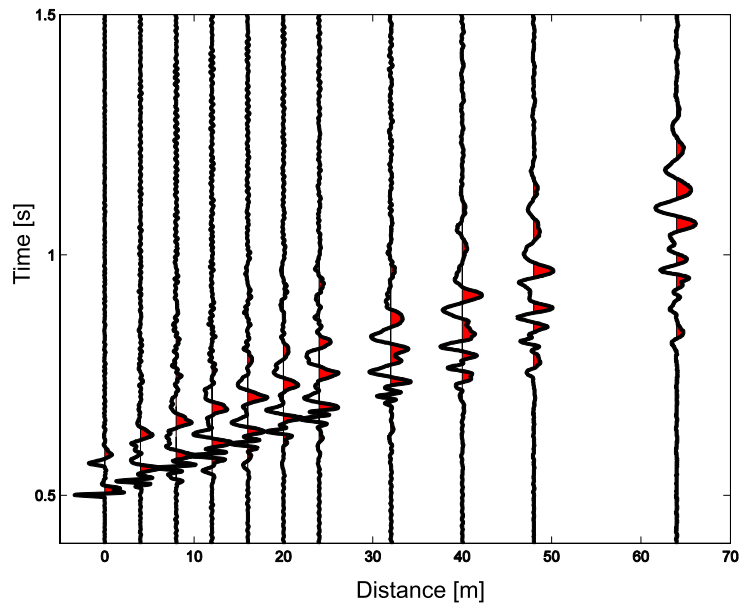
1.2.2. Wymuszenie impulsowe przy użyciu wibrosejsu

Kolejnym przykładem wymuszenia impulsowego jest zastosowanie wibrosejsu (fot. 2a). W celu zidentyfikowania wielkości impulsu wymuszającego drgania zamontowano na płycie urządzenia akcelerometr niskoczuby (fot. 2b). Rejestracja odpowiedzi pionowych podłoża odbywała się poprzez akcelerometry umieszczone na prętach wbitych do powierzchni terenu. Warstwy przypowierzchniowe składały się z osadów czwartorzędowych – dwumetrowej warstwy pyłów z dodatkiem organicznym, na której znajdowała się trzymetrowa warstwa gliny pylastej oraz kolejna trzymetrowa warstwa gliny pylastej zwięzłej, a następnie warstwa pyłów piaszczystych do 25 m p.p.t. Pod nimi znajduje się warstwa piasków grubych. Zwierciadło wód gruntowych wahało się od 8 do 25 m pp.t. Analiza odwrotna (Kogut 2007b) wykazała, że prędkość propagacji fal poprzecznych wynosi około $V_s = 200$ m/s w warstwie pyłów i zmienia się od około 140 m/s do około 160 m/s w warstwie gliny pylastej, a później wzrasta do $V_s = 240$ m/s w warstwie gliny pylastej zwięzłej, by następnie w sztywniejszej warstwie pyłów piaszczystych przekroczyć $V_s = 290$ m/s. Rysunek 8 prezentuje unormowane przebiegi czasowe zarejestrowane od omawianego wymuszenia impulsowego wibrosejsem. Urządzenie niepoprawnie odwzorowuje ten typ wymuszenia, stąd widoczne jest nałożenie się niejako dwóch zarejestrowanych impulsów. Znacznie lepiej urządzenie odwzorowuje wymuszenie sinusoidalne, które może dokonać przy dowolnej częstotliwości z zakresu oddziaływań sejsmicznych.



Fot. 2. Wibrosejs Mark Mk III (a) wykorzystany do wymuszeń impulsowych wraz z widocznym niskoczubym akcelerometrem zamontowanym na płycie (b)

Phot. 2. Mark Mk III device (a) with the accelerometer mounted to the plate (b)

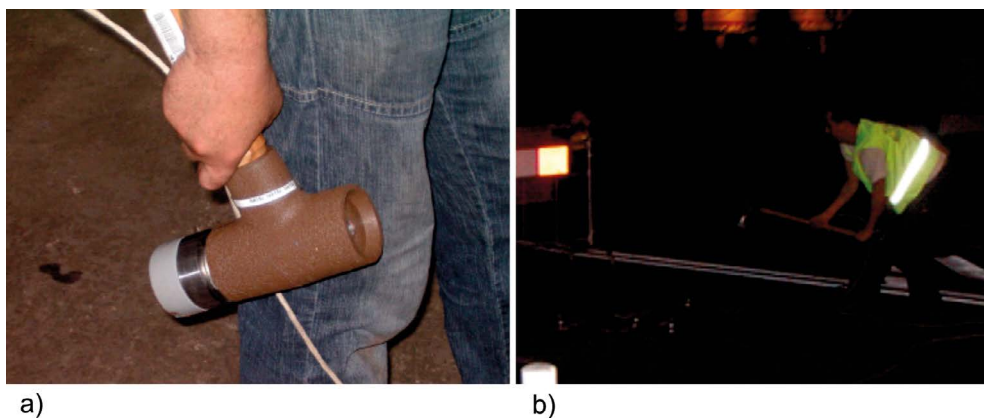


Rys. 8. Unormowane przebiegi czasowe od wymuszenia wibrorejsem zarejestrowane na gruncie

Fig. 8. Time history of Mark Mk III device in the free field

1.2.3. Wymuszenie impulsowe przy użyciu młotka modalnego

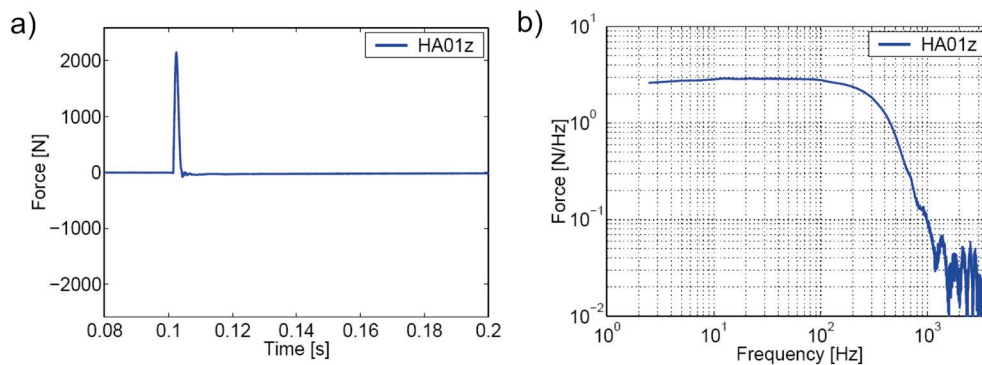
Ostatnim omawianym przykładem wymuszenia impulsowego jest zastosowanie młotka modalnego (fot. 3). Wielkość impulsu wymuszającego drgania jest rejestrowana przez czuj-



Fot. 3. Młotek modalny (a) i wymuszenie impulsowe przy użyciu młotka modalnego (b)

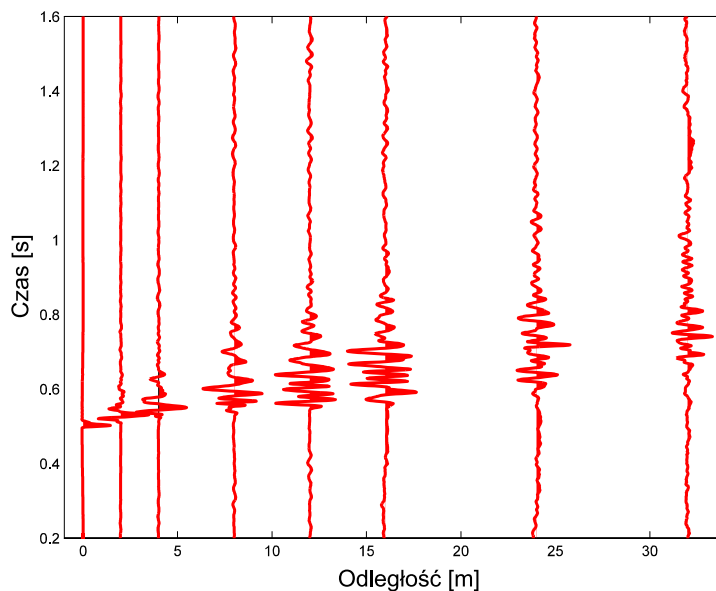
Phot. 3. Instrumented hammer (a) and impulse excitation (b)

nik siły umieszczony w trzonie. Młotek modalny użyty w badaniach to 5,5-kilogramowy młotek produkowany przez PCB Piezotronics. Młotek modalny posiada różne końcówki, które ze względu na sztywność pełnią rolę ograniczającą przedział częstotliwości wymuszających. Rysunek 9a pokazuje przebieg czasowy wymuszenia młotkiem modalnym oraz wielkość siły wymuszającej wynoszącej ponad 2 kN. Na rysunku 9b z kolei zaprezentowano zakres częstotliwościowy wymuszenia przy użyciu młotka PCB. Z wykresu można zauwa-



Rys. 9. Przebieg czasowy (a) oraz charakterystyka częstotliwościowa (b) sygnału zarejestrowanego od wymuszenia młotkiem modalnym PCB

Fig. 9. Time history (a) and the frequency content (b) of the instrumented hammer PCB



Rys. 10. Unormowane przebiegi czasowe od wymuszenia młotkiem modalnym na powierzchni terenu

Fig. 10. Time history of instrumented hammer excitation in the free field

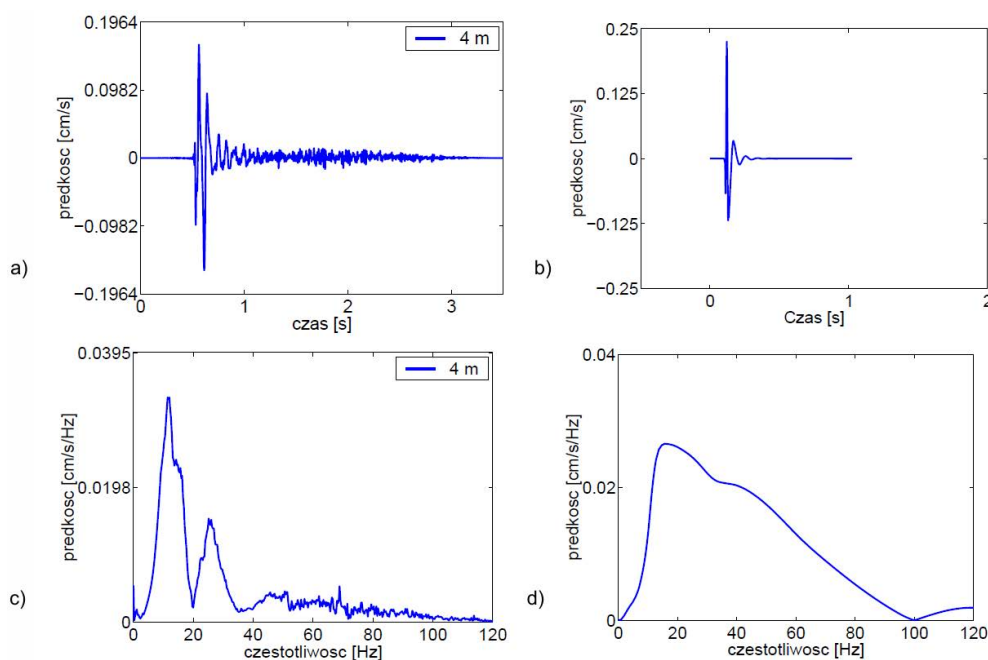
żyć, że do częstotliwości $f = 200$ Hz siła wymuszająca jest stabilna, powyżej tej częstotliwości zdecydowanie spada.

Rejestracja drgań pionowych podłoża w badanym przekroju pomiarowym odbywa się poprzez akcelerometry umieszczone na prętach wbitych w grunt. Płytkie wiercenia przypowierzchniowe wykazały, że w przekroju mamy do czynienia z gruntami antropogenicznymi (Mm), zaś z analizy odwrotnej (Kogut 2008) wynika, że prędkość propagacji fal poprzecznych wynosi około $V_s = 94\text{--}97$ m/s w warstwie do głębokości 1 m p.p.t., zaś później rośnie do do około $V_s = 180\text{--}185$ m/s, by następnie zmaleć do około $V_s = 145\text{--}165$ m/s, by w końcu wzrosnąć do $V_s = 180$ m/s.

Rysunek 10 przedstawia unormowane przebiegi czasowe zarejestrowane w gruncie podczas wymuszenia młotkiem modalnym. Rejestracja odbywała się do 32 m od miejsca impulsowego wymuszenia. Z wykresu można zauważyć, iż pomimo niewielkiej siły wymuszenia amplituda drgań jest wciąż widoczna w odległości 32 m od źródła drgań.

2. Modelowanie propagacji fal w gruncie

Poprawność odwzorowania uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej sprawdzono modelując przy użyciu Metody Elementów Brzegowych (Degrande i Geraedts 2005) odpowiedzi



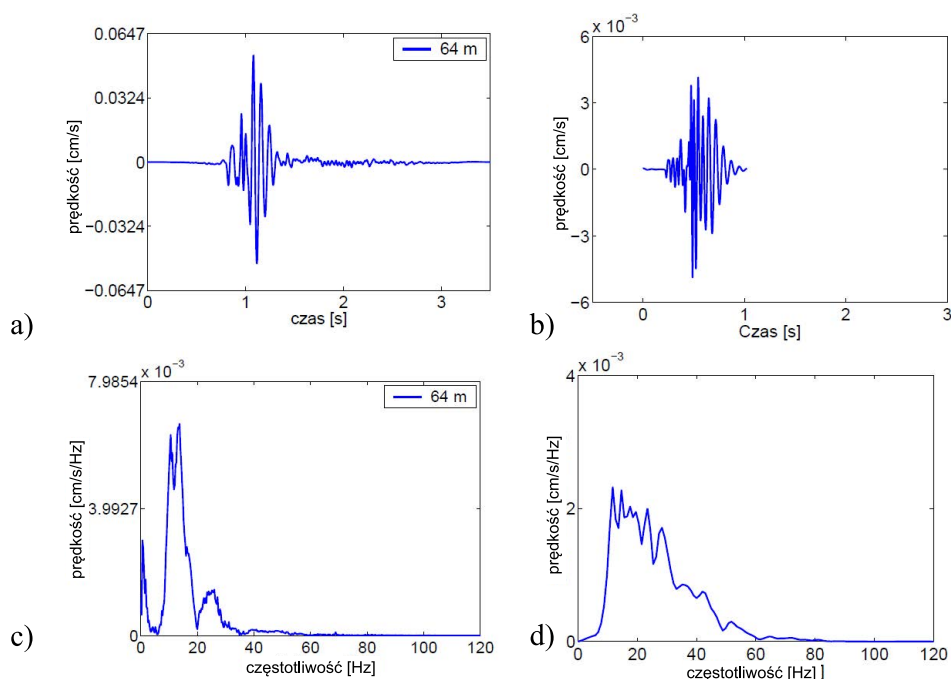
Rys. 11. Przebiegi czasowe (a, b) i charakterystyka częstotliwościowa (c, d) odpowiedzi gruntu rzeczywistej (a, c) i modelowanej MEB (b, d) – 4 metry od źródła impulsu

Fig. 11. Time history (a, b) and the frequency content (c, d) of the free field vibrations measured (a, c) and modelled by BEM (b, d) – 4 meters from the source of impact

dynamiczne gruntu w zakresie małych odkształceń dla przekroju, w którym użyto wymuszeń impulsowych wibrorejsem.

Odpowiedzi te uzyskano w postaci prędkości drgań. Następnie porównano je z wielkościami otrzymanymi z badań, poprzez przejście z rejestrowanych przyspieszeń na prędkości, dokonany procedurą uwzględniającą zarówno warunki początkowe, jak i powstający trend liniowy. Rysunek 11 prezentuje zarówno przebieg czasowy, jak i charakterystykę częstotliwościową uzyskaną 4 metry od źródła wymuszenia w tzw. bliskim sąsiedztwie impulsu. Z wykresów można zauważyć, że zarówno amplituda drgań, przebieg czasowy, jak i charakterystyka częstotliwościowa są odwzorowywane poprawnie.

Podobnie jest w przypadku modelowania odpowiedzi w najdalszym badanym w przekroju punkcie, czyli 64 metry od źródła wymuszenia. Rysunek 12 prezentuje zarówno przebieg czasowy, jak i charakterystykę częstotliwościową. I w tym przypadku przebieg czasowy oraz charakterystyka częstotliwościowa są odwzorowywane prawidłowo. Jednakże wartości rzędnych amplitud są znacznie mniejsze. Świadczyć to może o przeszacowaniu wartości tłumienia geometrycznego i materiałowego dla gruntu w modelowaniu numerycznym.



Rys. 12. Przebiegi czasowe (a, b) i charakterystyka częstotliwościowa (c, d) odpowiedzi gruntu rzeczywistej (a, c) i modelowanej MEB (b, d) – 64 metry od źródła impulsu

Fig. 12. Time history (a, b) and the frequency content (c, d) of the free field vibrations measured (a, c) and modelled by BEM (b, d) – 64 meters from the source of impact

Podsumowanie

Wymuszenia impulsowe należą do istotnych źródeł sił dynamicznych, które pełnią kluczową rolę przy badaniu właściwości dynamicznych przypowierzchniowych warstw podłoża gruntowego. W różnych okolicznościach korzysta się z różnych typów wymuszeń, które pozwalają na właściwą identyfikację parametrów dynamicznych uwarstwionego podłoża gruntowego. W zależności od wielkości przekazywanej energii wykorzystuje się różne urządzenia, które pozwalają na wymuszenia impulsowe.

W pracy zajęto się analizą trzech przekrojów gruntowych, badanych poprzez wymuszenia impulsowe z udziałem opadającej masy skupionej, młotka modalnego czy też wibrosejsu oraz pomiarami odpowiedzi dynamicznej obejmującej źródło oraz drogę propagacji fal dynamicznych. Na podstawie analizy rezultatów można określić zarówno charakterystykę dynamiczną podłoża np. poprzez oszacowanie prędkości propagacji fal poprzecznych, jak i modelować oraz oceniać skutki wpływów dynamicznych zwykle modelami dyskretnymi. W części drugiej pracy omówiono takie modelowanie z użyciem Metody Elementów Brzegowych i porównano wyniki analiz z rezultatami badań terenowych. Wykazały one rozbieżności w przypadku oddalania się od źródła wymuszenia.

Aby skutecznie modelować zachowanie podłoża, należy wziąć pod uwagę fakt, że podłoże to jest niejednorodne, posiada własności sprężysto-plastyczne – nawet dla małych odkształceń i przez to modelowanie zjawisk statycznych, jak i dynamicznych jest znacznie bardziej skomplikowane i niejednoznaczne, szczególnie gdy odnosimy się do obciążeń cyklicznych i ruchomych. Dodatkowo w podłożu występują problemy związane z warunkami wodnymi, które komplikują modelowanie, a podłoże staje się medium dwufazowym, zaś w przypadku występowania gruntów nienasyconych może być nawet trójfazowe (Wrana 2012).

Literatura

- Degrande, G. i Geraedts, K. 2005. *Spectral version 8.01: a direct stiffness formulation for harmonic and transient wave propagation in layered dry, saturated and unsaturated poroelastic media*, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven.
- Kogut, J.P. 2007a. Dynamic soil profile determination with the use of a neural network, *CAMES, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences* 14 (2), s. 209–217.
- Kogut, J.P. 2007b. Oszacowanie parametrów dynamicznych podłoża gruntowego. *Czasopismo Techniczne* z. 2-B/2007, z. 6, R. 104, s. 55–63.
- Lipiński, J. 1985. *Fundamenty pod maszyny*. Arkady, Warszawa.
- Lombaert i in. 2006 – Lombaert, G., Degrande, G., Kogut, J. i François, S. 2006. The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration* 297, s. 512–535.
- Wrana, B. 2012. *Dynamika gruntów. Modele obliczeniowe*. Monografia. Kraków: Wydawnictwo PK, 243 s.

