

mgr inż. Michał Jukowski^{1*)}

ORCID: 0000-0003-3750-8281

dr inż. Łukasz Jabłoński¹⁾

ORCID: 0000-0002-9221-8335

mgr inż. Mateusz Hypki²⁾

ORCID: 0000-0001-9926-5145

Badanie wpływu drgań wywołanych wbijaniem mikropali STATIpile na konstrukcję istniejącego obiektu

Study of the effect of vibration caused by STATIpile micropile driving on the structure of an existing facility

DOI: 10.15199/33.2023.05.10

Streszczenie. Mikropale aluminiowe wykonywane w technologii STATIpile wykorzystywane są głównie do wzmocnienia istniejących obiektów budowlanych oraz posadawiania nowych budynków w złożonych warunkach gruntowo-wodnych. Wykonywanie mikropali aluminiowych powoduje powstawanie dodatkowych oddziaływań dynamicznych na istniejący budynek. Artykuł prezentuje opis i analizę badań obejmujący: warunki gruntowe; budowę stanowiska badawczego; przebieg i wyniki przeprowadzonych badań; obserwację zachowania mikropali; analizę wyników.

Słowa kluczowe: mikropale aluminiowe; STATIpile; badania dynamiczne.

Abstract. Aluminum micropiles made in the STATIpile technology are mainly used to strengthen existing buildings and for the foundation of new buildings in complex soil and water conditions. The basis for the analysis of pile-subsoil cooperation are static test loads. The article presents the description and analysis of the research covering: soil conditions; construction of the test stand; course and results of the research; observation of micropile behavior; analysis of results and observations.

Keywords: aluminum micropiles; STATIpile; dynamic research.

Złożone warunki gruntowe, zwiększanie obciążeń przekazywanych na podłoże, awarie instalacji wodno-kanalizacyjnych itp. często wywołują potrzebę wzmocnienia fundamentów obiektów. Jedną z metod, znajdującą coraz szersze zastosowanie, jest podbicie istniejących fundamentów mikropalami aluminiowymi w technologii STATIpile. Zakłada ona montaż elementów przez wbijanie (za pomocą ręcznych lub jezdnych kafarów pneumatycznych) sukcesywnie skręcających odcinków mikropala. Technologia stosowana od 2014 r. na terenie Czech nie wykazuje negatywnych wpływów na wzmocniane obiekty, ale ze względu na dotychczasowe niewielkie rozpoznanie oddziaływań w trakcie montażu i współpracy z fundamentami podjęto prace mające na celu potwierdzenie obserwacji praktycznego zastosowania oraz dokładnego poznania ich współpracy z gruntem i budynkiem.

W artykule przedstawiono przebieg i wyniki badania oraz analizę wpływu drgań wywołanych wbijaniem mikropali STATIpile na konstrukcję wzmocnianego obiektu.

Oddziaływania dynamiczne

Zastosowanie urządzeń udarowych powoduje powstanie dodatkowych oddziaływań dynamicznych – drgań przekazywanych przez ośrodek gruntowy w obrębie mikropala na konstrukcję obiektów. Zgodnie z działem V „Bezpieczeństwo

konstrukcji” i działem IX „Ochrona przed hałasem i drganiami” Rozporządzenia Ministra Rozwoju i Technologii z 31 stycznia 2022 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, budynki powinny być projektowane i wykonywane w taki sposób, aby obciążenia mogące na nie działać w trakcie budowy i użytkowania nie prowadziły do przemieszczeń oraz odkształceń o niedopuszczalnej wielkości. Zgodnie z załącznikiem nr 1 do wymienionego Rozporządzenia, ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki powinna być realizowana zgodnie z normą [1]. Metoda diagnostyki pod względem oceny wpływu drgań na budynki przedstawiona jest również w zagranicznych normach. Najbardziej popularne są normy niemieckie [2], brytyjskie [3] i inne opisane zbiorczo w pracach [4, 5]. Realizacja i ocena wpływu drgań na budynki wg zagranicznych norm jest towarzysząca lub pomocnicza i nie zwalnia z obowiązku realizacji badań zgodnie z normą [1]. Zagadnienia wpływu drgań na budynki i na ludzi znajdujących się w budynkach zostały opisane m.in. w krajowych publikacjach [6 – 9, 10, 11]. Rozpatrywane zagadnienie jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy konstrukcji. Obecnie wiele istniejących budynków jest modernizowanych np. przez zmianę liczby kondygnacji, co wpływa na poziom wyężenia elementów konstrukcyjnych budynku. Wszelkiego rodzaju prace mające na celu wzmocnienie tych elementów wykonywane są za pomocą urządzeń mogących generować drgania o wysokiej amplitudzie i wpływać niekorzystnie na analizowany budynek. Zbliżony

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ FieldLab Laboratorium Terenowe

^{*}) Adres do korespondencji: m.jukowski@pollub.pl

problem, dotyczący wpływu drgań na budynek, przedstawiono w pracy [12], gdzie przedmiotem badań był zabytkowy budynek The Saint Louis Art. Museum w Saint Louis (USA) podczas wykonywania podbicia istniejących fundamentów.

Charakterystyka wzmacnianego obiektu

Budynek dydaktyczny „D” Uniwersytetu Ekonomicznego, zlokalizowany w południowej części Wrocławia, składa się z dwóch części: zabytkowej z 1894 r. oraz nowszej z lat sześćdziesiątych XX w. będącej przedmiotem analizy. W tej części obiekt ma jedną kondygnację podziemną i dwie nadziemne przekryte stropodachem wentylowanym (fotografia). Konstrukcja budynku jest tradycyjna, murowana z cegły ceramicznej pełnej, w której stropy międzykondygnacyjne wykonano z płyt typu WPS na belkach stalowych, a stropodach dwuspadowy, żelbetowy, wentylowany, oparty na ściankach ażurowych z cegły dziurawki, pokryty papą. Przed i po badaniach wykonano pełną inwentaryzację fotograficzną uszkodzeń obiektu. Stwierdzono występowanie przede wszystkim zarysowań i ubytków w elewacji. Stan techniczny budynku oceniono jako średni – ocena 3 w sześciostopniowej skali (od 1 do 6). Uszkodzenia te nie miały wpływu na otrzymane wyniki analizy.



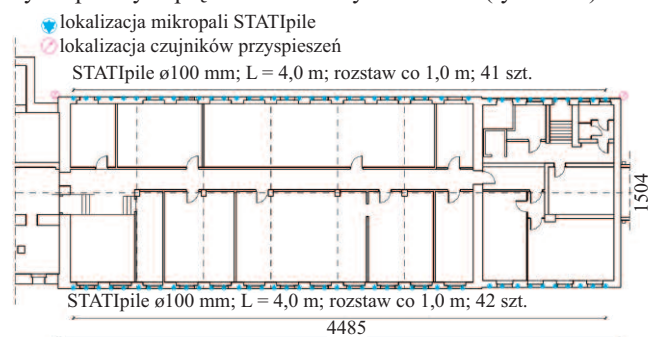
Budynek dydaktyczny „D”, Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
Didactic building „D”, Wrocław University of Economics

Istniejący budynek zostanie nadbudowany o jedną kondygnację użytkową i przykryty nowym czterospadowym dachem o konstrukcji stalowej. Ze względu na zwiększenie obciążenia projektowaną nadbudową, nośność posadowienia jest niewystarczająca. W związku z tym zaprojektowano wzmocnienie za pomocą mikropali.

Badania geotechniczne obejmowały 5 otworów badawczych o głębokości 4,0 m, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie budynku przy ścianach zewnętrznych. Wykazały regularny rozkład warstw geologicznych na analizowanym obszarze. W podłożu pod warstwą nasypów, o miąższości 1,1 – 1,6 m, znajdują się gliny piaszczyste w stanie wilgotnym, twardeplastycznym $I_L = 0,22$ oraz gliny piaszczyste z domieszką żwiru w stanie wilgotnym $I_L = 0,17$. Zwierciadło wody gruntowej znajduje się na głębokości 2,0 – 2,2 m p.p.t.

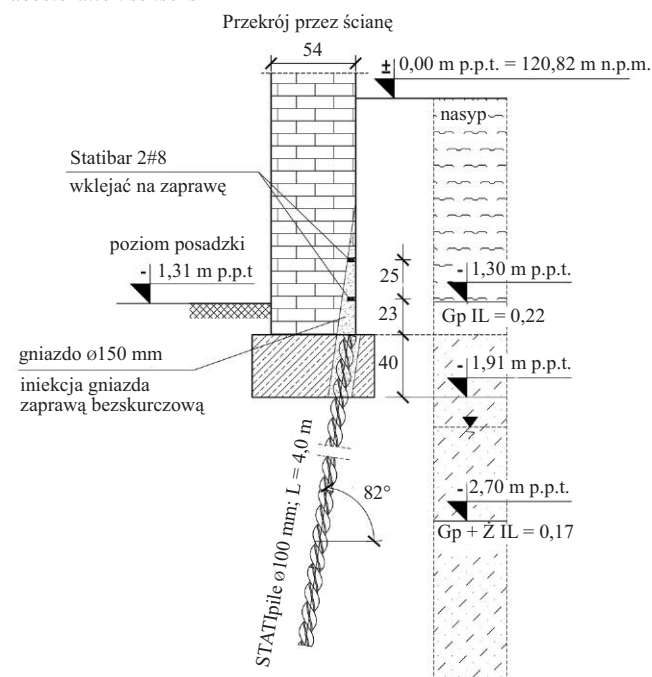
Na podstawie badań geotechnicznych oraz zakładanej wartości wzmocnienia – min. 140 kN/m, zaprojektowano mikropale o średnicy 100 mm i długości $L = 4$ m, rozmieszczone wzdłuż ścian nośnych obiektu co 1,0 m (rysunek 1). Wykona-

nie wzmocnienia przewidziano od strony zewnętrznej ściany piwnicznej, w przygotowanym uprzednio wykopie. Przyjęto rozwiązanie bezpośredniego połączenia istniejących fundamentów z mikropalami przez wykonanie ich w wywierconych gniazdach, a następnie scalenie z murem za pomocą iniekcji szybkością zaprawą bezskurczową. Ściana piwniczna została dodatkowo wzmocniona ukrytym wieńcem z wklejanych spiralnych prętów nierdzewnych $4\phi 8$ mm (rysunek 2).



Rys. 1. Rozmieszczenie mikropali w nadbudowywanym obiekcie, lokalizacja czujników przyspieszeń

Fig. 1. Arrangement of micropiles in the upstructure, location of acceleration sensors



Rys. 2. Detal montażu mikropala od strony zewnętrznej budynku

Fig. 2. Detail of the installation of the micropile from the outside of the building

Metoda i przebieg badania drgań

Pomiary przyspieszenia drgań przeprowadzono w dwóch punktach pomiarowych zgodnie z rysunkiem 3 w trzech kierunkach X, Y, Z wg normy [1]. Do badań wykorzystano dwa trójosiowe piezoelektryczne przetworniki drgań o czułości 1000 mV/g pracujące w zakresie częstotliwości 0,2 – 200 Hz. Przetworniki zostały podłączone do karty pomiarowej National Instruments (IEPE) oraz zamocowane do naroży budynku przez klejoną stalową płytkę oraz wykorzystanie magnesów neodymowych. Niepewności pomiarowe wynikające

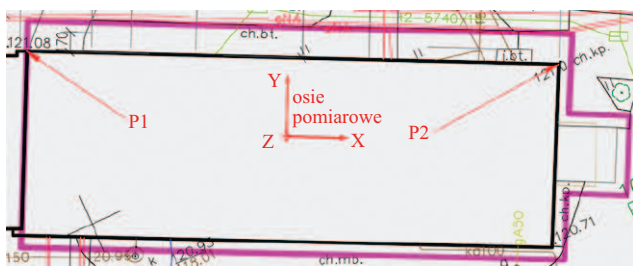
z dokładności aparatury pomiarowej i warunków środowiskowych zostały wyznaczone przy poziomie ufności 95%. W przypadku pomiaru przyspieszenia szczytowego punktu pomiarowego w pełnym pasmie częstotliwości 0,5 – 100 Hz niepewność pomiaru wynosiła $U = \pm 8\%$, gdzie w – wynik pomiaru w danym pasmie częstotliwości środkowej.

Do oceny wpływu drgań podłoża na budynek zastosowano skale SWD zgodnie z normą [1], które zalecane są w przypadku budynków z elementów murowych oraz z wielkich bloków lub posiadających szkieletowy układ nośny. Wyróżnia się skale SWD I i SWD II. Szczegółowo zostały one opisane w [3, 9, 13].

Badanie miało na celu określenie wpływu drgań wywołanych przez roboty budowlane wykonywane bezpośrednio w omawianym obiekcie budowlanym. Pomiar drgań dotyczył przede wszystkim wpływu pograżania (wbijania) mikropali w grunt rodzimy. Prace wibracyjne w dniu badania prowadzono z wykorzystaniem wibromłota (młot pneumatyczny). Podczas pomiarów nie stwierdzono zakłóceń mogących wpływać na rejestrowane parametry drgań. Pograżane (wbijane) mikropale były w bezpośredniej odległości od budynku, tzn. przy istniejących fundamentach.

Pomiary przyspieszenia drgań w budynku wykonywano na ścianie konstrukcyjnej przy poziomie terenu w dwóch punktach pomiarowych – zgodnie z normą [1]. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 3. Punkty P1 i P2 zlokalizowane były w narożach budynku. Wykonano pięć prób pomiarowych:

- **narożnik nr 1 – P1:** pal nr 1 – mikropal wbijany w odległości ok. 140 cm od czujnika (naroża budynku); pal nr 2 – mikropal wbijany w odległości ok. 240 cm od czujnika; pal nr 3 – mikropal wbijany w odległości około 340 cm od czujnika;
- **narożnik nr 2 – P2:** pal nr 1 – mikropal wbijany ok. 60 cm od czujnika; pal nr 2 – mikropal wbijany ok. 130 cm od czujnika.



Rys. 3. Lokalizacja punktów pomiarowych i schemat sytuacyjny względem budynku

Fig. 3. Location of the measurement points and the location diagram in relation to the building

Wyniki badań i ich analiza

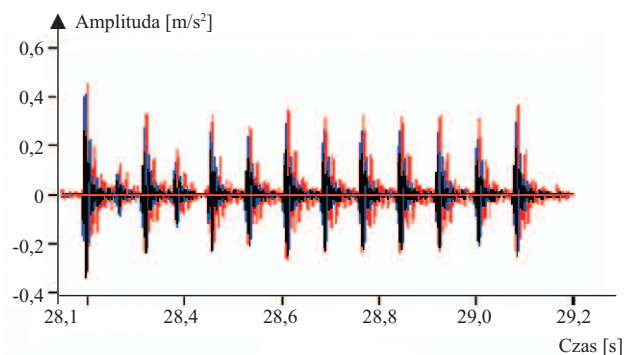
Ocenę wpływu drgań na budynek przeprowadzono na podstawie zarejestrowanego przebiegu czasowego drgań (wibrogramów) składowych poziomych w punktach pomiarowych P1 i P2. Przebieg drgań poddano analizie w pasmach 1/3-oktawowych z wykorzystaniem filtrów Butterwortha. Do oceny wpływu drgań na budynek przyjęto linię graniczną A' skali SWD II jako granicę w trakcie prowadzonych pomiarów. Podczas prowadzonego pomiaru zarejestrowano pomiary drgań budynku wynikające z pograżania mikropali. W tabeli przedstawiono zarejestrowane wartości przyspieszeń

i WODB (wskaźnik odpowiedzi dynamicznej przez budynek) względem każdego przebiegu czasowego, a na rysunku 4 przykładowy pomierzony przebieg przyspieszenia w trakcie wbijania pali.

Zbiornicze zestawienie uzyskanych wyników

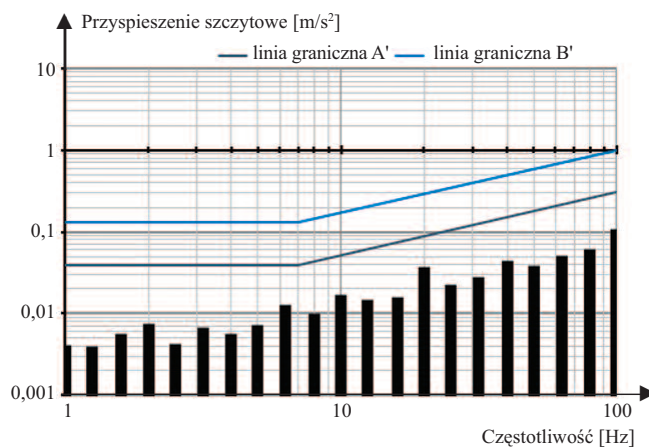
Summary of the obtained results

Punkt pomiarowy	Wykonywany pal	WODB – Strefa I – LgA'	
		X	Y
P1	1	0,13	0,29
	2	0,28	0,28
	3	0,17	0,12
P2	1	0,55	0,65
	2	0,42	0,20



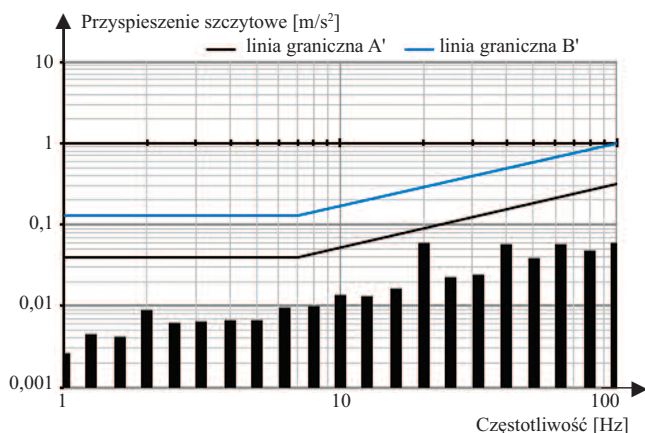
Rys. 4. Fragment przebiegu czasowego przyspieszenia szczytowego: X – kolor niebieski; Y – kolor czerwony; Z – czarny – pal nr 2 P1
Fig. 4. Time course of peak accelerations: X – blue color; Y – red color; Z – black – pile No. 2 P1

Wszystkie pomierzone przebiegi zostały poddane obróbce przez wykonanie analizy tercjalnej. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów, na których kolorem granatowym zaznaczono linię graniczną A', a niebieskim linię graniczną B'. Na rysunkach 5 i 6 zobrazowano wyniki końcowe w przypadku pala zlokalizowanego najbliżej naroża budynku. Wykonano analizę widmową każdego przebiegu, wykorzystując do tego celu algorytm szybkiej transformaty Fouriera. Wyniki tej analizy pokazano na rysunku 7.



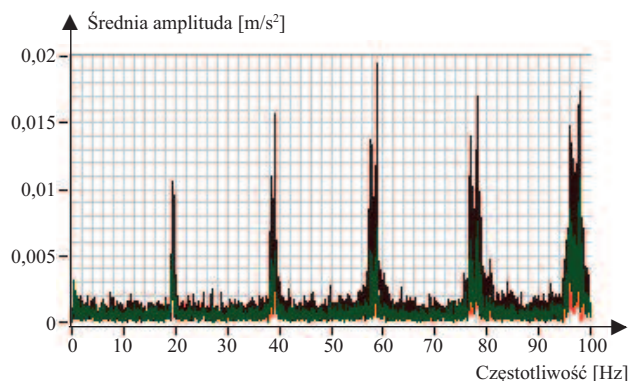
Rys. 5. Wykres analizy tercjalnej przyspieszeń szczytowych – os X – pal nr 1 P2

Fig. 5. Chart of tertiary analysis of peak accelerations – X axis – pile No. 1 P2



Rys. 6. Wykres analizy tarcjalnej przyspieszenia szczytowego – oś Y – pal nr 1 P2

Fig. 6. Chart of tertiary analysis of peak accelerations – Y axis – pile No. 1 P2



Rys. 7. Częstotliwość FFT analizowanego przebiegu

Fig. 7. FFT frequency of the analysed waveform

We wszystkich analizowanych przykładach drgania budynku wynikające z prowadzonych prac budowlanych znajdowały się w I strefie poniżej linii granicznej A' (drgania nieodczuwalne przez budynek). Zastosowana technologia mikropali okazała się bardzo korzystna z punktu widzenia wpływu drgań powstałych podczas wbijania mikropali na konstrukcję budynku.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy przyspieszenia drgań budynku stwierdzono, że:

1) ocena wpływu drgań na konstrukcję budynku dokonana za pomocą skali SWD II [1] na podstawie pomiaru drgań przeprowadzonych w dniu badania świadczy, że drgania generowane przez prace wibracyjne polegające na pogrążeniu (wbijaniu) mikropali STATIpile są nieodczuwalne przez budynek i pomijalne w ocenie wpływu drgań;

2) maksymalny uzyskany wskaźnik WODB (względem strefy I skali SWD II) wyniósł 0,29 w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 100,0 Hz względem punktu pomiarowego P1;

3) maksymalny uzyskany wskaźnik WODB (względem strefy I skali SWD II) wyniósł 0,65 w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 16,0 Hz i 20,0 Hz względem punktu pomiarowego P2;

4) zmierzony w dniu badań poziom drgań w przedmiotowym budynku nie wpływał na powstanie uszkodzeń elementów konstrukcyjnych oraz elementów niekonstrukcyjnych. Przeprowadzona ocena stanu technicznego budynku przed i po wykonanych badaniach nie wykazała zwiększonego zużycia budynku oraz powstania nowych lub powiększenia się istniejących rys lub pęknięć;

5) zastosowana technologia mikropali STATIpile charakteryzuje się korzystnymi cechami podczas prac dynamicznych. Należy prowadzić dalsze badania potwierdzające skuteczność wspomnianej technologii.

Literatura

[1] PN-B-02170:2016-12 Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.

[2] DIN 4150-3:2016-12 Vibrations in buildings – Part 3: Effects on structures.

[3] BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration in buildings Guide to damage levels from groundborne vibration.

[4] Rainer Massarsch K, Bengt H. Fellenius. Ground vibrations from pile and sheet pile driving. Part 2 – review of vibration standards s. 487 – 501. Georisk 2014.

[5] Jaroń A, Jastrzębska M, Łupierzowicz M. The Influence of Water-Jet Modification of Soil Conditions on Reduction of Vibrations during Sheet Pile Driving in the Subsoil. World Journal of Engineering and Technology. 2018; 6: 17 – 49.

[6] Stypuła K. O zmianach w normie PN-B-02170 dotyczącej oceny wpływu drgań przekazywanych na budynki przez podłoże. Przegląd Budowlany. 2017; R. 88, 10: 125 – 128.

[7] Ciesielski R, Kawecki J, Maciąg E. Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna). 1993. Wyd. ITB, Warszawa.

[8] Dulińska J, Kawecki J, Koziół K, Stypuła K, Tataro T. Oddziaływanie parasejsmiczne przekazywane na obiekty budowlane. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. – Kraków: Wydaw. PK, 2014. – 137 s. – Bibliogr. s. 132-137. – ISBN 978-83-7242-792-2.

[9] Kawecki J, Stypuła K, Koziół K. Ochrona budynków przed drganiami komunikacyjnymi. W: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji budowlanych. Budownictwo Ogólne: XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 25-28 marca 2015 roku. T. 2, Wykłady. – Bielsko-Biała: Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział w Bielsku-Białej, 2015. – S. 265-328: rys., schem., tab., wyk. – Bibliogr. s. 322-328. – ISBN 978-83-932934-4-5 (Tom II). – ISBN 978-83-932934-6-9 (całość).

[10] Kawecki J, Stypuła K. Oczekiwane rezultaty znolizowania norm PN-B-02170 i PN-B-02171. W: Awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje: monografia/red. nauk. Maria Kaszyńska; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Wydaw. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2017; 403 – 409.

[11] Kowalska-Koczwaro A, Stypuła K. Assessment of the vibration influence on humans in buildings in the standards of different countries. Procedia Engineering. 2016; 161: 970 – 974.

[12] Arne P. Johnson, W. Robert Hannen. Vibration Limits for Historic Buildings and Art Collections. Journal of preservation technology. 2015; 46: 2 – 3.

[13] Amir Hamidi AM, Abtin Farshi Homayoun Rooz, Majid Pourjenabi. Allowable Distance from Impact Pile Driving to Prevent Structural Damage Considering Limits in Different Standards. S. M. ASCE/Volume 23 Issue 1 – February 2018.

Podziękowania

Autorzy dziękują firmie FAMAR za współpracę oraz pomoc techniczną i finansową w realizacji podjętego przedsięwzięcia badawczo-rozwojowego.

Przyjęto do druku: 17.04.2023 r.