

prof. dr hab. inż. Tadeusz Tatara¹⁾

ORCID: 0000-0002-4071-2358

dr hab. inż. Alicja Kowalska-Koczwara, prof. PK¹⁾

ORCID: 0000-0001-8088-7729

dr inż. Maciej Gruszczyński^{1)*}

ORCID: 0000-0002-0445-5745

Beton z dodatkiem granulatu gumowego do wykonywania przegród wibroizolacyjnych do ochrony środowiska przed drganiami

Concrete with the addition of rubber granules to make vibro-isolating partitions to protect the environment against vibrations

DOI: 10.15199/33.2022.06.06

Streszczenie. W artykule omówiono badania surowców, dodatków i domieszek chemicznych, służących do zaprojektowania składu mieszanek betonowych do wykonania przegród w gruncie (palisady i ściany szczelinowe) o zwiększonej wibroizolacyjności w porównaniu z rozwiązaniami stosowanymi obecnie oraz zamieszczono wyniki badań właściwości betonów referencyjnych, a także z dodatkiem granulatu gumowego. Badania wykonano w laboratorium Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Krakowskiej w ramach realizacji projektu: *Innowacyjna konstrukcja przegród wibroizolacyjnych do ochrony środowiska przed drganiami transportowymi i z podobnych źródeł.*

Słowa kluczowe: beton; drgania; granulatu gumowy.

Abstract. The article presents the research on raw materials, additives and chemical admixtures for the design of concrete mixes for the construction of partitions in the ground (palisades and diaphragm walls) with increased vibration isolation compared to the solutions currently used and also the results of tests of the properties of reference concretes and concretes with the addition of rubber granulate. The tests were carried out in the laboratory of the Department of Building Materials Engineering at the Cracow University of Technology as part of the project: *Innovative construction of vibro-isolating partitions to protect the environment against transport vibrations and from similar sources.*

Keywords: concrete; vibrations; rubber granulate.

W literaturze światowej najczęściej stosowanym parametrem do opisu właściwości tłumiących budowli jest ułamek tłumienia krytycznego D [1]. Fizycznie lepiej opisuje zjawisko tłumienia tzw. logarytmiczny dekrement tłumienia δ , który wyraża spadek amplitudy drgań w kolejnych następujących po sobie cyklach w obszarze drgań swobodnych. Bez względu na stosowany parametr tłumienia, samo zjawisko ma duże znaczenie w ograniczaniu wpływów dynamicznych na budowle. Dzięki tłumieniu, czyli de facto możliwościom redukcji drgań propagowanych przez grunt do budynku, ograniczany jest niepożądany wpływ drgań na budynek, ale przede wszystkim przebywających w nim ludzi.

Budynek i przebywających w nim ludzi można chronić w trojaki sposób: w źródle drgań parasejsmicznych, na

drodze propagacji drgań oraz w samym odborniku, jakim jest budynek.

Ochrona antywibracyjna w źródle drgań możliwa jest głównie w trakcie budowy czy modernizacji infrastruktury transportowej i zazwyczaj jest to skuteczna metoda. W przypadku ciągów tramwajowych lub kolejowych stosowane są głównie maty antywibracyjne i/lub systemy antywibracyjne. Ochrona przed drganiami na drodze ich propagacji jest najrzadziej stosowanym rozwiązaniem, głównie z uwagi na koszty budowy dodatkowej przegrody w gruncie [2] oraz na konieczność dysponowania gruntem, w którym taka przegroda ma być wbudowana. W przypadku drgań drogowych może to być jedyna metoda ochronny, choć nie jest stosowana w terenie zabudowanym. Wibroizolację można też zastosować w odborniku drgań. Metod jest kilka, od wykorzystania mat antywibracyjnych w poziomie fundamentów budynku czy elementów konstrukcyjnych najbardziej przenoszących drgania, przez mniej skuteczną podłogę

plywającą, aż po bardzo drogie rozwiązania, jakimi są tłumiki drgań. W ramach projektu POIR.04.01.02-00-0001/17: *Innowacyjna konstrukcja przegród wibroizolacyjnych do ochrony środowiska przed drganiami transportowymi i z podobnych źródeł* została opracowana koncepcja wibroizolacyjnej przegrody w gruncie, lecz nie budowanej specjalnie na drodze propagacji, ale stanowiącej jednocześnie obudowę wykopu czy ścianę parkingu podziemnego. W artykule omówiono badania związane z projektowaniem mieszanki betonowej z dodatkiem granulatu gumowego, który stanowi dodatek antywibracyjny w betonie używanym w palisadach [3].

Tłumienie w konstrukcji, jak zauważono w [4, 5], jest często źle rozumiane i praktycznie identyfikowane z zastosowaniem tłumików drgań, podczas gdy konstrukcja ma właściwości tłumiące zależne od użytego materiału, połączeń konstrukcyjnych czy środowiska, w którym się znajduje. Budynek działa więc jak swego rodzaju filtr [6, 7]. Celem pro-

¹⁾ Politechnika Krakowska; Wydział Inżynierii Lądowej

^{*}) Adres do korespondencji:

maciej.gruszczyński@pk.edu.pl

jektu POIR.04.01.02-00-0001/17 była poprawa właściwości tłumiących mieszanki betonowej do zastosowania w przegrodach w gruncie.

Założenia do projektowania składu betonów

Założenia projektowe mieszanek betonowych do wykonania przegród betonowych o zwiększonej wibroizolacyjności przyjęto, wykorzystując zapisy norm PN-EN 206+A1:2016-12 *Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* i PN-EN 1536+A1:2015-08 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Pale wiercone*. Założono, że mieszankę betonową do wykonania palisady i beton stwardniały charakteryzuje:

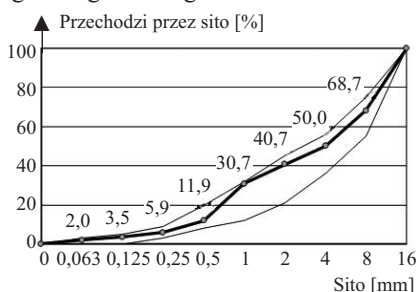
- klasa wytrzymałości betonu na ściskanie: min. C30/37;
- klasa ekspozycji XA1 (tj. beton narażony na kontakt z gruntem naturalnym i wodą gruntową wg Tablicy 2 PN-EN 206), wskaźnik woda/cement $\leq 0,55$;
- maksymalny wymiar ziarna kruszywa: $D_{\max} = 16$ mm;
- klasa konsystencji S4/S5 (opad stożka Abramsa ≥ 200 mm), utrzymana przez co najmniej 60 min;
- głębokość wniknięcia wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 nie większa niż 45 mm.

W procesie projektowania mieszanek betonowych uwzględniono dodatkowe wymagania dotyczące betonu przeznaczonego do wykonywania pali wierconych i przemieszczeniowych formowanych w gruncie, które zawarte są w załączniku D PN-EN 206+A1:2016-12 (Tablica D.1), a mianowicie:

- minimalna zawartość cementu $C_{\min} \geq 325$ kg/m³;
- zawartość frakcji drobnych (ziarna $\leq 0,125$ mm, w tym cement i dodatki) ≥ 400 kg/m³.

Do wykonania mieszanek wykorzystano powszechnie dostępne kruszywa żwirowe. Krzywą uziarnienia mieszanki kruszywa betonu wzorcowego przedstawiono na rysunku 1. Jako spoiwo wykorzystano cement hutniczy CEM III/A 42,5 N z Cementowni Nowiny. O jego wyborze zadecydowały duża wytrzymałość, przy jednocześnie uzyskiwanej dużej szczelności zaczynu cementowego, ograni-

czony skurcz i korzystna termika, co w efekcie warunkuje trwałość wykonywanych konstrukcji geotechnicznych. W celu zapewnienia odpowiedniej urabialności i pompowności mieszanki betonowej oraz spełnienia warunku normowego minimalnej zawartości frakcji drobnych (poniżej 0,125 mm) w m³ mieszanki betonowej, zdecydowano o zastosowaniu dodatku mineralnego typu II, tj. popiołu lotnego krzemionkowego kategorii A wg PN-EN 450-1.



Rys. 1. Krzywa uziarnienia mieszanki kruszywa betonu wzorcowego

Fig. 1. The grain size distribution curve for the mixture of reference concrete aggregates

Do wykonania mieszanek wybrano domieszkę reologiczną, która okazała się w pełni kompatybilna z zastosowanym cementem i popiołem lotnym. Jako dodatek zwiększający wibroizolacyjność przegród wytypowano granulaty gumowy ze zużytych opon – frakcja 2/6 mm o gęstości nasypowej 550 kg/m³ i kubicznym kształcie ziaren.

Wyniki badań

Badania wstępne miały na celu opracowanie receptury (tabela 1 i 2) betonu wzorcowego (bez modyfikatora wibroizolacyjnego) o następujących parametrach: C35/45 XA1, S4/S5, $D_{\max} 16$, Cl 0,20 wg PN-EN 206+A1:2016-12.

Wyniki badań właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu potwierdziły uzyskanie założonych parametrów (tj. klasy konsystencji i jej utrzymania w czasie, wytrzymałości na ściskanie i głębokości wniknięcia

Tabela 1. Receptura mieszanki betonowej
Table 1. Recipe of the reference concrete mix

| Składniki | | Ilość [kg/m ³] |
|---------------------|------------------|----------------------------|
| Spoiwo | CEM III/A 42,5 N | 360 |
| | popiół lotny | 80 |
| Woda | | 162 |
| Domieszka chemiczna | plastyfikator | 3,15 |

Tabela 2. Właściwości mieszanki betonowej
Table 2. Properties of concrete mix

| Parametr | Wartość |
|---|---------|
| Wskaźnik woda/cement | 0,45 |
| Gęstość mieszanki betonowej [kg/m ³] | 2420 |
| Punkt piaskowy [%] | 40,8 |
| Ilość zaczynu [dm ³ /m ³] | 341 |
| Ilość zaprawy [dm ³ /m ³] | 605 |
| Zawartość frakcji drobnych $\leq 0,125$ mm [kg/m ³] | 497 |

wody pod ciśnieniem). Uznano, że zaprojektowany skład betonu wzorcowego C35/45 będzie modyfikowany dodatkiem granulatu gumowego, przez zastąpienie nim odpowiednio 10, 15, 20, 25 i 30% frakcji kruszywa 2/8 mm. Konsystencję mieszanek regulowano, dozując domieszkę reologiczną w taki sposób, aby osiągnąć opad stożka ponad 200 mm. Zarób wykonano w profesjonalnej wytwórni betonu towarowego (odzworowano warunki przemysłowej produkcji betonu). Objętość każdego zarobu wynosiła 3,5 m³. Mieszankę betonową przeładowywano do bębna betonomieszarki samochodowej i mieszano przez 60 min na wolnych obrotach, co odzwierciedlało warunki rzeczywistego transportu.

Z każdego zarobu pobierano próbki mieszanki betonowej, wykonując:

- oznaczenie konsystencji metodą stożka opadowego (wg PN-EN 12390-2);
- oznaczenie gęstości mieszanki betonowej (wg PN-EN 12350-6);
- badanie zawartości powietrza – metodą ciśnieniową (wg PN-EN 12350-7).

Z pobranej mieszanki betonowej każdorazowo formowano sześciennie próbki betonu (30 szt.) o długości boku 150 mm do badania wytrzymałości na ściskanie (po 7, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania) oraz oznaczenia głębokości wniknięcia wody pod ciśnieniem.

W ramach wykonania próbek w wytwórni betonu w pierwszej kolejności badano konsystencję mieszanki betonowej i jej zachowanie w czasie (po 10 i 60 min) oraz zawartość powietrza. Dozowanie domieszki reologicznej gwarantowało w każdym wypadku uzyskanie konsystencji mieszanki 200 – 250 mm (S4/S5 wg PN-EN 206+A1:2016-12). Wyniki prób przemysłowych pokazały, że w zależności od receptury i rodzaju dodatku wibroizolacyjnego ilość domieszki wynosiła 2,40 – 2,75 kg/m³

i była o 0,40 – 0,75 kg/m³ mniejsza od ilości ustalonej w warunkach laboratoryjnych (3,15 kg/m³). Zawartość powietrza w zagęszczonej mieszance betonowej zmierzona metodą ciśnieniową wynosiła 0,4 ÷ 1,7%, co czyniło zadość wymaganiom projektowym. Wyniki badania konsystencji mieszanek betonowych i zawartości powietrza przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Konsystencja mieszanek betonowych z dodatkami granulatu gumowego wraz z zawartością powietrza

Table 3. Consistency of concrete mixes with additives of rubber granules together with air compactness

| Rodzaj betonu | Dozowanie granulatu gumowego [%] | Opad stożka [mm] po | | Zawartość powietrza [%] |
|---|----------------------------------|---------------------|--------|-------------------------|
| | | 10 min | 60 min | |
| Beton wzorcowy C35/45 | – | 225 | 240 | 0,4 |
| Beton z dodatkiem granulatu gumowego 2/6 mm | 10 | 235 | 250 | 0,6 |
| | 15 | 230 | 240 | 0,9 |
| | 20 | 210 | 230 | 1,2 |
| | 25 | 220 | 250 | 1,1 |
| | 30 | 205 | 230 | 1,0 |

Wyniki badania konsystencji mieszanek betonowych i zawartości powietrza spełniają wymagania projektu i są zbieżne, szczególnie jeżeli chodzi o upłynienie mieszanki w czasie 10 ÷ 60 min, z wynikami uzyskanymi w skali laboratoryjnej, ale przy zmniejszonym poziomie dozowania domieszki reologicznej.

W tabeli 4 zestawiono wyniki badania wytrzymałości betonów do wykonania palisad po 7, 28, 56 i 90 dniach dojrze-

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonów po 7, 28, 56 i 90 dniach dojrzewania (wyniki prób przemysłowych)

Table 4. Results of the compressive strength test of concretes after 7, 28, 56 and 90 days of maturation (results of industrial tests)

| Rodzaj betonu | Dozowanie granulatu gumowego [%] | Wytrzymałość średnia [N/mm ²] po dniach | | | | Klasa betonu |
|---|----------------------------------|---|------|------|------|--------------|
| | | 7 | 28 | 56 | 90 | |
| Beton wzorcowy C35/45 | – | 26,2 | 55,4 | 58,0 | 61,2 | C45/55 |
| Beton z dodatkiem granulatu gumowego 2/6 mm | 10 | 23,1 | 42,9 | 45,0 | 50,9 | C35/45 |
| | 15 | 18,2 | 36,6 | 38,9 | 42,9 | C30/37 |
| | 20 | 16,4 | 33,7 | 36,7 | 40,4 | C25/30 |
| | 25 | 15,5 | 28,4 | 30,1 | 33,8 | C20/25 |
| | 30 | 13,8 | 25,3 | 28,8 | 30,1 | C20/25 |

wania (przez pierwsze 24 h próbki betonu przechowywano w formach, zabezpieczono przed utratą wilgoci, a następnie rozformowano i przechowywano do chwili badania w wodzie o temperaturze 20°C). Zgodnie z normą PN-B-06265:2018-10, ze względu na zastosowanie do produkcji betonu cementu hutniczego CEM III/A 42,5 N – za miarodajną uznano wytrzymałość po 90 dniach. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3.

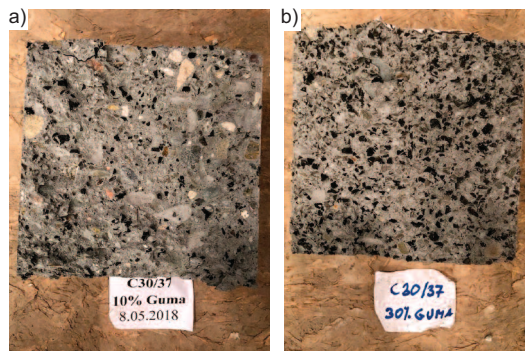
Uzyskane wyniki badań pozwoliły na wytypowanie optymalnej (ze względu na właściwości reologiczne oraz końcową wytrzymałość na ściskanie) receptury betonu z 10% dodatkiem granulatu gumowego 2/6 mm do prób poligonowych. W celu weryfikacji uzyskanych parametrów betonu wykonano, zgodnie z normą PN-EN 12390-8, badanie maksymalnej głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Badanie wg normy PN-B-06265:2018-10 prowadzono w czasie równoważnym 90 dni, a uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki badania głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w betonie z dodatkiem granulatu gumowego

Table 5. Results of the test of water penetration depth under the pressure of concrete with additives of rubber granules

| Rodzaj betonu | Dozowanie granulatu gumowego [%] | Maksymalna głębokość penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 [mm] |
|---|----------------------------------|---|
| Beton wzorcowy C35/45 | – | 8 |
| Beton z dodatkiem granulatu gumowego 2/6 mm | 10 | 6 |
| | 15 | 11 |
| | 20 | 12 |
| | 25 | 15 |
| | 30 | 10 |

W przypadku wszystkich betonów z dodatkami wibroizolacyjnymi uzyskane wyniki badania maksymalnej głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wg PN-EN 12390-8 są mniejsze od dopuszczalnej wyspecyfikowanej wartości – 45 mm, a zatem z dużym zapasem czynią zadość założeniom. Po badaniu



Przełom próbek betonu do wykonania palisady z dodatkiem wibroizolacyjnym w postaci granulatu gumowego 2/6 mm w ilości 10% (a) i 30% (b)

Breakthrough of concrete samples to make a palisade with a vibro-isolating additive in the form of 2/6 mm rubber granules in the amount of 10% (a) and 30% (b)

próbki betonu z dodatkami wibroizolacyjnymi rozłupywano i oceniano metodą planimetryczną równomierność rozkładu dodatku w strukturze betonu (fotografia). Analiza wyglądu przełomu próbek z dodatkami wibroizolacyjnymi wykazała ich równomierne rozłożenie w całej objętości betonu. W żadnym przypadku nie zanotowano zjawiska jego kumulacji w którymś z obszarów próbek. Potwierdza to, że betony zaprojektowane są w sposób prawidłowy i nie wykazują tendencji do sedymentacji, pomimo dużej ciekłości (konsystencja S4/S5).

W celu ostatecznej oceny przydatności mieszanki betonowej C30/37 z 10% dodatkiem granulatu gumowego do wykonania palisady, przeprowadzono próbę poligonową na budowie. Z wyprodukowanej w warunkach przemysłowych w WBT mieszanki betonowej C30/37 z 10% dodatkiem granulatu gumowego 2/6 mm wykonano cztery pale o średnicy Ø400 i długości 6 m. Jednocześnie przeprowadzono w warunkach poligonowych ocenę właściwości reologicznych mieszanki betonowej wraz z próbą pompowania na dystansie 60 m i oceną możliwości pogrążenia w zaformowanej kolumnie betonowej kosza zbrojenia stalowego. Podczas próby poligonowej producent betonu, w ramach zakładowej kontroli produkcji, ocenił podstawowe właściwości betonu. Uzyskane wyniki badań próbek betonu klasy C30/37 z 10% dodatkiem granulatu gumowego frakcji 2/6 mm zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki badania mieszanki betonowej i betonu stwardniałego C30/37 z 10% dodatkiem granulatu gumowego – próba poligonowa
Table 6. Test results of concrete mix and hardened concrete C30/37 with 10% addition of rubber granules – field test

| Właściwość | Wartość | | |
|---|---------------------|----------------------|------------------------------|
| Konsystencja mieszanki betonowej – opad stożka (wg PN-EN 12350-2) [mm] | po 10 min 225 | po 60 min 255 | klasa konsystencji S5 |
| Zawartość powietrza (wg PN-EN 12350-7) [% vol.] | po 10 min 0,7 | po 60 min 0,5 | – |
| Wytrzymałość na ściskanie [N/mm ²] | po 7 dniach 25,4 | po 28 dniach 47,8 | Klasa wg PN-EN 206 C30/37 |
| Maksymalna głębokość wniknięcia wody pod ciśnieniem (wg PN-EN 12390-8) [mm] | 8 | | |

Weryfikacja możliwości wydłużenia czasu urabialności opracowanych mieszank z dodatkiem wibroizolacyjnym

Uzyskane w wyniku prób laboratoryjnych i przemysłowych właściwości mieszank betonowych i betonu stwardniałego spełniły przyjęte założenia, zarówno w przypadku prób w skali laboratoryjnej, jak i w warunkach produkcji w wytwórni betonu towarowego. Mimo to, wykonawca przedmiotowych elementów zgłosił potrzebę wydłużenia czasu urabialności mieszanki (opad stożka Abramsa 220 – 240 mm) do 300 min, licząc od chwili pierwszego kontaktu spoiwa z wodą, także w warunkach podwyższonej temperatury. W związku z tym zespół autorski, po konsultacjach z dostawcami domieszek chemicznych do betonu, wytypował do prób domieszkę plastyfikująco-opóźniającą wiązanie (przy dozowaniu powyżej 0,35% m.c.). Celem weryfikacji w warunkach przemysłowych wykonano zaroby mieszank betonowych z dodatkiem granulatu gumowego w ilości 10% zastąpienia kruszywa 2/8 mm. Domieszkę dozowano w ilości 0,8% m.c. Po wykonaniu mieszanki umieszczano ją w mieszalniku betonomieszarki pozostawionej na wolnych obrotach i wykonywano badanie konsystencji metodą stożka opadowego (wg PN-EN 12350-2) odpowiednio po 10, 60, 120, 180, 240 i 300 min. Wyniki badania konsystencji przedstawiono w tabeli 7.

Uzyskane wyniki badania mieszank betonowych do wykonania palisady potwierdziły pełną kompatybilność zastosowanej domieszki plastyfikująco-opóźniającej z cementem CEM III/A 42,5 N,

Tabela 7. Zachowanie konsystencji mieszanki betonowej z 10% ilością dodatku granulatu gumowego po dodaniu 0,8% m.c. domieszki plastyfikująco-opóźniającej
Table 7. Maintaining the consistency of a concrete mix with a 10% amount of rubber granulate added after dosing 0,8% b.w. delaying-plasticizing admixtures

| Typ mieszanki | Konsystencja – opad stożka [mm] | | | | | | |
|--|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | po czasie [min] | | | | | | |
| | 10 | 60 | 90 | 120 | 180 | 240 | 300 |
| C30/37 XA1 S4/S5 D _{max} 16 Cl 0,20 | 225 | 250 | 260 | 250 | 245 | 235 | 220 |

popiołem lotnym i domieszką reologiczną w zakresie utrzymania konsystencji nawet do 5 h. Jest to szczególnie ważne w przypadku prowadzenia prac w podwyższonej temperaturze otoczenia (okres letni), dalekiego transportu mieszanki i wykonywania elementów masywnych. Ponadto w celu weryfikacji wpływu wydłużenia czasu wiązania na właściwości stwardniałego betonu z obydwu serii mieszank zaformowano po 300 minutach po 10 kostek sześciennych o długości boku 150 mm, które przechowywano przez 28 dni zgodnie z PN-EN 12350-2. Po tym czasie określono wytrzymałość na ściskanie. Wartość średnia wytrzymałości $f_{cm} = 47,2$ N/mm², z zapasem gwarantuje uzyskanie klasy wytrzymałości betonu C30/37 wg PN-EN 206+A1:2016-12, co jest zgodne z założeniami projek-

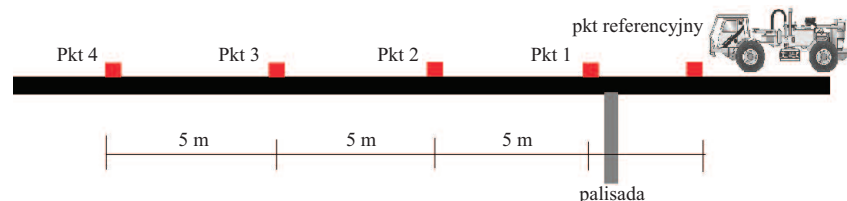
towymi, a tym samym potwierdza możliwość wydłużenia czasu przerobu takich mieszank nawet do 5 h, dzięki zastosowaniu domieszki plastyfikująco-opóźniającej.

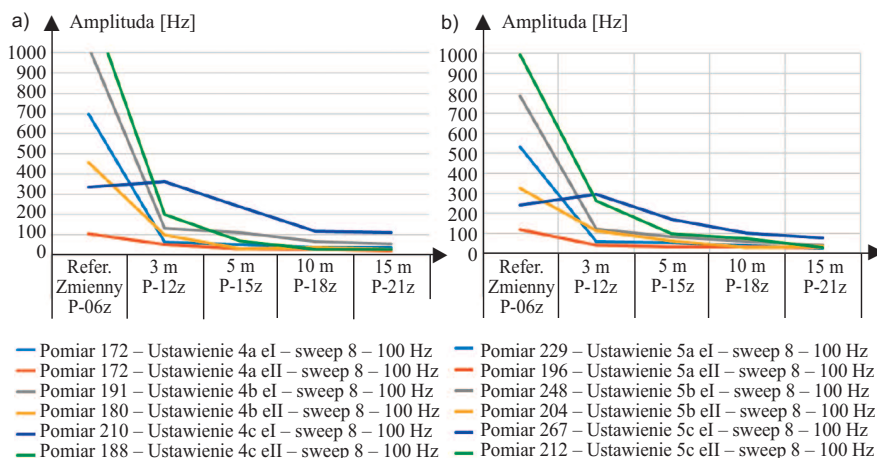
Zaprojektowaną mieszankę betonową zastosowano do wykonania palisady, którą wbudowano na poligonie doświadczalnym. Przeprowadzono tam też badania redukcji drgań, które były generowane za pomocą wibratora mechanicznego. Pomiarom podlegały dwie przegrody: palisada referencyjna oraz palisada z dodatkiem tłumiącym, zgodnie z recepturą betonu opisaną w artykule. Każdorazowo w 5 punktach prowadzono rejestrację sygnału w trzech ortogonalnych kierunkach x, y i z (rysunek 2).

Wyniki pomiaru wskazują jednoznacznie na skuteczność zastosowanego betonu, szczególnie w bliskiej odległości od przegrody (rysunek 3). Średnią wartość tłumienia wyliczono z końcowego odcinka wibrogramów punktu nr 1 (rysunek 2) umieszczonego na palisadzie zgodnie z metodą podaną w [8], w strefie drgań własnych. Oszacowano, że wartość współczynnika ułamka tłumienia krytycznego wynosi 4,5% w przypadku palisady referencyjnej i 7,5% – palisady z mieszanki betonowej o właściwościach tłumiących.

Dyskusja

Projektowaniem betonu w taki sposób, aby uzyskać jak najlepsze właściwości tłumiące, zajmuje się kilku badaczy na świecie. W [9] badano 4 rodzaje betonów: 1 referencyjny oraz 3 o podwyższonych właściwościach tłumiących. Celem badaczy [9] było zaprojektowanie betonu, który pochłaniałby energię w trakcie trzęsienia ziemi. Badano więc ramy żelbetowe. Wymuszenie drgań było realizowane w dwojaki sposób: za pomocą impulsu generowanego przez uderzenie młotka modalne-


Rys. 2. Tor pomiarowy – rozmieszczenie punktów pomiarowych na poligonie doświadczalnym
Fig. 2. Measurement track – distribution of measurement points on the testing ground



Rys. 3. Maksymalne wartości amplitud otrzymanych podczas badań poligonowych: a) palisada – beton z granulatem; b) palisada referencyjna

Fig. 3. Maximum values of amplitudes obtained in the course of field tests: a) palisade – concrete with granulate; b) reference palisade

go oraz na stole wstrząsowym, na którym wywołano drgania harmoniczne. Wyniki, które uzyskano, potwierdzają skuteczność dodatku tłumiącego. Zaobserwowano zwiększenie współczynnika tłumienia krytycznego z początkowej wartości ok. 4% aż do 21%. Warto podkreślić, że tak duże wartości tłumienia wydają się być nierealne, nawet w przypadku materiałów elastomerycznych, a co dopiero mieszanki betonowej.

Bardzo dużą wartość ułamka tłumienia krytycznego (do 14%) otrzymano także w [10]. Badanym materiałem w tym przypadku był beton polimero-owy, którego właściwości nie pozwalają na zastosowanie konstrukcyjne (służy on głównie jako podkładki pod maszyny). W [11] zaproponowano wstępnie zagęszczony beton zawierający grube kruszywo pokryte poliuretanem o wysokim tłumieniu oraz zbadano właściwości mechaniczne i współczynnik tłumienia. Wyniki wykazały, że współczynnik tłumienia betonu wyniósł aż 10% w zakresie $10 \div 200$ Hz, czyli ok. 10 razy więcej niż w przypadku betonu zwykłego, przy jednoczesnym pogorszeniu właściwości mechanicznych. W [12] natomiast w przypadku betonu o podwyższonych właściwościach tłumiących wskazano, że może być zastosowany w postaci podkładów podtorowych. W tych konstrukcjach niezwykle ważne jest ograniczenie wpływu drgań na środowisko. Opisano cały proces projektowania betonu, który w tym przypadku jest poddawany większym obciążeniom.

W badaniach udało się uzyskać wartość ułamka tłumienia krytycznego na poziomie 7%, czyli wartości podobne jak w przypadku opisanego w artykule betonu z granulatem gumowym.

Wnioski

Zrealizowany program badawczy oraz uzyskane wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- dodatek granulatu gumowego w mieszance betonowej stosowanej do wykonania palisad, zabezpieczających wykopy w centrach dużych miast, wzmacnia właściwości tłumiące tej przegrody;
- zaprojektowana mieszanka betonowa stanowi kompromis pomiędzy jej właściwościami tłumiącymi a parametrami wytrzymałościowymi;
- zastosowanie odpowiedniej kompozycji domieszek chemicznych oraz dodatków mineralnych umożliwia uzyskanie dużej płynności mieszanki nawet do 4 h (licząc od chwili pierwszego kontaktu cementu z wodą), co jest szczególnie istotne w przypadku prowadzenia robót w okresie podwyższonej temperatury oraz dalekiego transportu betonu;
- zastosowanie dodatku granulatu gumowego praktycznie nie wpływa na zawartość powietrza w mieszance betonowej oraz głębokość penetracji wody pod ciśnieniem;
- dodatek granulatu gumowego powoduje proporcjonalny do jego dozwolania ubytek wytrzymałości betonu

na ściskanie; optymalna ze względu na kompromis pomiędzy akceptowalną wytrzymałością a optymalnymi właściwościami tłumiącymi ilość dodatku gumowego wynosi 10%.

Literatura

- [1] Tamura Y. Damping in Buildings and Estimation Techniques, Advanced Structural Wind Engineering. Springer Japan; 2013 (book chapter): 347 – 376.
- [2] Fedorczyk-Cisak M, Kowalska-Koczwara A, Kozak E, Pachla F, Szuminski J, Tatar T. Energy and Cost Analysis of Adapting a New Building to the Standard of the NZEB, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019; 471: 112076.
- [3] Fedorczyk-Cisak M, Furtak M, Gintowt J, Kowalska-Koczwara A, Pachla F, Stypuła K, Tatar T. Thermal and Vibration Comfort Analysis of a Nearly Zero-Energy Building in Poland, Sustainability. 2018; 10, 3774.
- [4] Amick H, Ph.D., P.E. Can vibration be controlled with damped concrete? semiconductor fabtech – 26th edition, FT26 – 09/1.
- [5] Stypuła K. Drgania mechaniczne wywołane eksploatacją metra płytkego i ich wpływ na budynki. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Inżynieria Lądowa. Kraków. 2001; 7.
- [6] Fu X, Li D. Chung, Improving the vibration damping capacity of cement, Journal of Materials Science. 1998; 33: 3601 – 3605.
- [7] Hernandez-Olivares F, Barluenga G. Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High-Strength Concrete, Cement and Concrete Research. 2004; 34, 1: 109 – 117. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00253-9.
- [8] Kawecki J, Kowalska A. Tłumienie drgań w opisie sztywnościowo-bezwładnościowym. Czasopismo Techniczne. Budownictwo 107 (3-B), 43 – 50.
- [9] Nabavi SF, Bhattacharjee B, Madan A. Improving the damping properties of concrete, Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials _Fragomeni, Venkatesan, Lam & Setunge (eds) © 2011 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-61657-7.
- [10] Suh JD, Lee DG. Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine. Int J Mech Mater Des. 2008; 4: 113 – 121. <https://doi.org/10.1007/s10999-007-9033-3>.
- [11] Lee KS, Choi J-I, Park SE, Hwang J-S, Lee BY. Damping property of prepacked concrete incorporating coarse aggregates coated with polyurethane, Cement and Concrete Composites. 2018; 93: 301 – 308. ISSN 0958-9465.
- [12] Kaewunruen S, Li D, Chen Y, Xiang Z. Enhancement of Dynamic Damping in Eco-Friendly Railway Concrete Sleepers Using Waste-Tyre Crumb Rubber. Materials. 2018; 11, 1169. <https://doi.org/10.3390/ma11071169>.

Przyjęto do druku: 20.05.2022 r.