

dr inż. Anna Banaś^{1*)}

ORCID:

mgr inż. Michał Kalużyński²⁾

mgr inż. Andrzej Kuryłowicz³⁾

Zastosowanie betonu jamistego jako warstwy nawierzchni obiektów inżynierskich

Intensywny rozwój infrastruktury transportowej, przez budowę konwencjonalnych nawierzchni drogowych, powoduje przekształcanie naturalnego przepuszczalnego gruntu w nieprzepuszczalne pokrycie terenu [1 – 4]. Nawierzchnie nieprzepuszczalne przyczyniają się do zmian w środowisku lokalnym, szczególnie miejskim, które dotyczą nie tylko aspektów hydrologicznych, ale również wpływają na zmiany termiczne [5, 6].

Szybka rozbudowa sieci dróg miejskich z nawierzchnią nieprzepuszczalną zwiększa ilość odpływającej wody deszczowej. W ostatnich latach niemal każde większe miasto borykało się z problemem podtopień czy zalania dużych powierzchni. Niewłaściwie działający system odwodnienia powoduje: pogorszenie bezpieczeństwa użytkowników dróg na skutek zawilgoceń jezdni; wysadziny; rozmięczenie poboczy drogowych; zmniejszenie nośności podłoża, a w efekcie deformacje nawierzchni oraz zjawiska osuwiskowe [7]. Dodatkowo, duża objętość wody opadowej odprowadzona do jednego punktu generuje powstanie niedopuszczalnego poziomu substancji zanieczyszczających przez splukanie z nawierzchni substancji toksycznych, takich jak oleje i smary [3, 8].

Nawierzchnie nieprzepuszczalne pełnią także rolę nośników ciepła, oddając je w nocy do atmosfery [9]. Zjawisko to powszechnie znane jest jako Miejskie Wyspy Ciepła (*Urban Heat Islands* w skrócie UHI). Doprowadziło ono do dyskomfortu termicznego mieszkańców miast, a tym samym dodatkowego zuży-

cia energii elektrycznej do celów chłodniczych oraz zwiększonej emisji CO₂ [10]. Nie można też pominąć faktu, że jednym z największych problemów w ostatnich dziesięcioleciach jest ocieplenie klimatu. Obecnie nastąpiła zmiana struktury opadów właściwie na całym obszarze Polski, polegająca na zdecydowanym zwiększeniu liczby dni z opadem dobowym o dużym natężeniu [11].

W celu zmniejszenia negatywnego efektu szybkiego rozwoju miast, prowadzone są intensywne badania oraz wdrażane są zrównoważone materiały i technologie przyjazne dla środowiska. Wśród różnych ekologicznych rozwiązań można wymienić **nawierzchnie z betonu jamistego o niewielkim wpływie na środowisko**, ze względu na korzyści strukturalne, ekonomiczne i społeczne. Porowatość betonu jamistego zmniejsza efekt UHI i pomaga utrzymać sprzyjającą temperaturę otoczenia. Dzięki wielu korzyściom, beton jamisty jest powszechnie stosowany przy realizacji ścieżek i chodników dla pieszych oraz ścieżek rowerowych.

W artykule przedstawiono innowacyjne zastosowanie betonu jamistego PERVIA jako warstwy odsączającej na przykładzie tunelu na węzle „OPL Okęcie” w Warszawie. Użycie takiego betonu w tym przypadku pozwoliło na uniknięcie nadmiernej przebudowy obiektu i sprawne odprowadzenie wody. Rozwiązanie to wpisuje się w zrównoważony rozwój miast i stanowi kompromis pomiędzy rozbudową infrastruktury drogowej a zapewnieniem swobodnego ujścia wód gruntowych.

wodę kruszywa, które jest jednocześnie tak wytrzymałe jak betony standardowe. Doskonale sprawdza się przy wykonywaniu warstw filtracyjnych oraz budowie nawierzchni komunikacyjnych, zapewniając sprawne odprowadzenie wody opadowej. Beton jamisty jest produktem specjalistycznym o strukturze otwartej (fotografia 1). Jego podstawowe zalety to zdolność do swobodnego i szybkiego odprowadzania wód opadowych z powierzchni do warstw głębiej położonych. Dzięki swoim właściwościom absorbuje wodę i przenosi ją na głębsze poziomy konstrukcji nawierzchni, zapobiegając w ten sposób gwałtownej kumulacji wody na nawierzchniach podczas ulewnych deszczy. Objętość pustek w betonie jamistym zwykle wynosi 10 ÷ 25%. Niewielka liczba pustych przestrzeni skutkuje niewielką przepuszczalnością, ale dużą wytrzymałością, natomiast duża liczba pustych przestrzeni daje dużą przepuszczalność, ale niewielką wytrzymałość (tabela, rysunek 1). Zaleca się więc projektować materiał, który będzie kompromisem pomiędzy wytrzymałością a przepuszczalnością betonu.



Fot. 1. Beton jamisty

Zaletą betonu jamistego, związaną z szybkim odprowadzeniem wody z powierzchni, jest jego zdecydowanie mniejsza podatność na oblodzenie oraz większa odporność na mróz w po-

Charakterystyka betonu jamistego

Betonem jamistym określamy kompozyt betonowy o strukturze zbliżonej do luźno usypanego, przepuszczającego

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

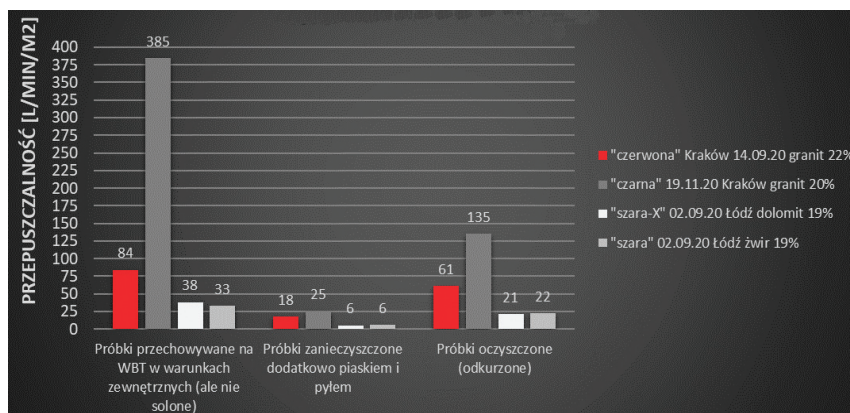
²⁾ CEMEX Polska Sp. z o.o.

³⁾ KURYŁOWICZ PROJECT Sp. z o.o.

*) Adres do korespondencji:

Tabela 1. Dane techniczne i charakterystyki wytrzymałościowe analizowanego betonu jamistego

Parametr	Wartość
Norma (zgodność)	PN-EN 206+A2:2021-08 [12] i PN-B-06265:2022-08 [13]
Przepuszczalność wody	100 – 500 l/min/m ²
Klasa wytrzymałości na ściskanie	C8/10; C12/15; C16/20; C20/25; LC8/9; LC12/13; LC16/18
Grubość warstwy	min. 8 cm
Zawartość pustek powietrznych	od 10% do 25 %
Uziarnienie	do 8 mm lub 16 mm
Temperatura stosowania	od +5°C do +25°C
Maksymalny czas użycia	90 minut
Szybkość obciążania	<ul style="list-style-type: none"> • ruch pieszy po ok. 12 – 24 godzinach • unikać naprężeń punktowych oraz przeciążeń • pełna wytrzymałość po 28 dniach od ułożenia



Rys. 1. Zależność między rodzajem betonu jamistego a szybkością odprowadzenia wody

równaniu z innymi nawierzchniami o strukturze zamkniętej, co zwiększa bezpieczeństwo w ruchu kołowym i pieszym. Beton ten pozwala na dużą swobodę kształtowania powierzchni. Ma także wiele bardzo przydatnych cech architektonicznych, takich jak bogata gama kolorów i możliwość zastosowania lub zatopienia w nim kruszywa typu otoczaki.

Nawierzchnie z betonu jamistego należą do grupy tzw. nawierzchni sztywnych. W związku z tym należy położyć szczególny nacisk na prawidłowe prognozowanie obciążenia ruchem projektowanej nawierzchni oraz dokonać dokładnego rozpoznania warunków gruntowo-wodnych na miejscu budowy. Jest to szczególnie istotne w Polsce, ze względu na klimat i zmiany dobowe temperatury oraz częste przechodzenie temperatury przez 0°C. W przypadku, gdy dodatkowo występuje nieodpowiednie podłoże, może dochodzić do wysadzin, a w konsekwencji przelomu nawierzchni. W celu poprawnego zaprojektowania warstwy podłoża należy określić jego rodzaj. Jeśli

na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono podłoże o nośności G2 – G4 (grunty wysadzinowe o niewielkim wskaźniku nośności), należy je wymienić na grunt nośności G1. W przypadku gruntów G2 i G3 grunt wymienia się na głębokość 15 cm, natomiast w przypadku gruntów G4 na 30 cm.

Badanie przepuszczalności betonu jamistego

Badanie przepuszczalności betonu jamistego przeprowadzono w zależności od rodzaju zastosowanego kruszywa, jamistości, stopnia zanieczyszczenia próbek oraz dodatku proszku pigmentującego. Wykonano je zgodnie z normą ASTM C1701-09 [14]. Wykorzystano próbki betonu o jamistości 19 ÷ 22% i wymiarach 40 x 40 x 5 cm. W przypadku betonu barwionego na czarno i czerwono użyto kruszywa granitowego frakcji 2 – 8 mm, a betonu bez pigmentu – dolomitu i żwiru o takiej samej frakcji. Zastosowano cement hutniczy CEM III/A 42,5 N. W przypadku betonu czerwonego użyto 12,5 kg/m³ pigmen-

tu proszkowego, natomiast czarnego – 7,5 kg/m³. Po wstępnym zwilżeniu badanego miejsca wprowadzono odpowiednią ilość wody do pierścienia i rejestrowano czas jej infiltracji w nawierzchnię. Pierścień infiltracyjny o średnicy 11 cali został tymczasowo uszczelniony na powierzchni przepuszczalnej nawierzchni. Stopień infiltracji obliczono wg wzoru:

$$I = KM/D^2t'$$

gdzie:

I – szybkość infiltracji [mm/h]/[in./h];

M – masa infiltrowanej wody [kg]/[lb];

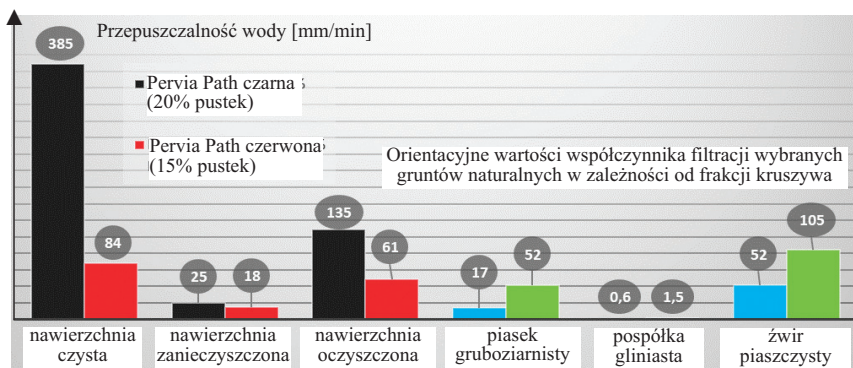
D – średnica wewnętrzna pierścienia infiltracyjnego [mm]/[in.];

t – czas wymagany do przeniknięcia odmierzonych ilości wody do betonu [s];

K – współczynnik równy 4 583 666 000 [SI] lub 126 870 [in.]. Współczynnik K wyrażony jest [(mm³·s)/(kg·h)] w układzie SI lub [(in³·s)/(lb·h)] i stosowany do przeliczenia zarejestrowanych danych (M, D i t) na szybkość infiltracji I w [mm/h] lub [in./h].

Z rysunku 1 wynika, że największym stopniem przepuszczalności cechują się betony jamiste na kruszywie granitowym. Przepuszczalność betonów jamistych maleje wraz ze wzrostem zanieczyszczenia betonu, np. pyłami i piaskami, na które jest narażony podczas eksploatacji. Standardowe prace utrzymaniowe typu np. czyszczenie myjkami wysokociśnieniowymi, pozwalają w dużej mierze przywrócić pierwotną przepuszczalność betonu jamistego. Przepuszczalność betonu jamistego została porównana ze współczynnikami filtracji wybranych gruntów naturalnych, występujących na terenie Polski (rysunek 2). Stwierdzono, że betony jamiste charakteryzują się znacznie wyższym stopniem przepuszczalności wody przy jednoczesnym zachowaniu stosunkowo dużej wytrzymałości projektowanego podłoża.

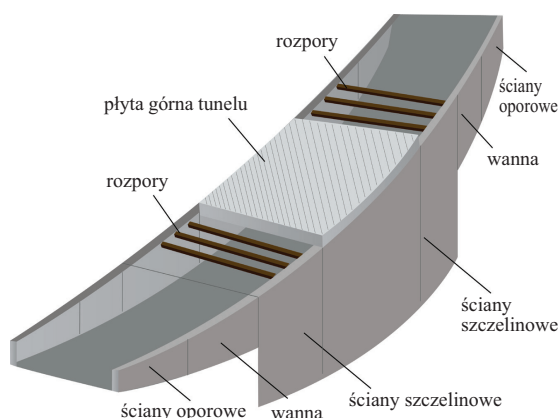
Badania prowadzone w tym samym miejscu nawierzchni przez lata mogą zostać wykorzystane do wykrycia zmniejszenia stopnia infiltracji przepuszczalnego betonu, identyfikując w ten sposób potrzebę jego oczyszczenia. Stopień infiltracji uzyskany tą metodą charakteryzuje tylko obszar nawierzchni, na którym przeprowadzone zostało badanie. Aby określić stopień infiltracji całej nawierzchni, należy wyznaczyć wiele miejsc pomiarowych i uśrednić wyniki.



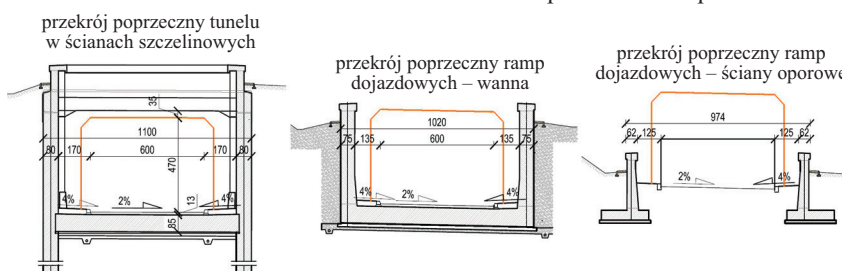
Rys. 2. Zależność między rodzajem podłoża a przepuszczalnością wody

Przykład zastosowania betonu jamistego

Omawiany tunel usytuowany jest w ciągu łącznicy Ł1 drogi krajowej S79a w KM 1+665 w Warszawie. Przeprowadza on w jednym kierunku ruch kołowy z drogi krajowej S79a w kierunku Międzynarodowego Portu Lotniczego Okęcie i stanowi ważny element komunikacyjny doprowadzający ruch kołowy na lotnisko. Tunel to konstrukcja ramowa, jednokomorowa, żelbetowa wykonywana w technologii ścian szczelinowych. Na drodze doprowadzającej ruch do tunelu wykonano rampy w konstrukcji oporowej. W zależności od zagłębienia ściany, rampy wykonano w różnych technologiach: ścian szczelinowych; w wannach i w kątowych ścianach oporowych (rysunki 3 i 4). Ściany ramp od strony zewnętrznej tunelu wystają ok. 90 cm ponad poziom terenu. Całkowita długość tunelu wynosi 145,00 m, natomiast całkowita długość tunelu wraz z rampami dojazdowymi 501,80 m, a skrajnia pionowa na obiekcie 5,05 m.



Rys. 3. Schemat tunelu wraz z podziałem na sekcje



Rys. 4. Przekroje poprzeczne tunelu przed remontem

Grunty występujące w obrębie obiektu to kompleks glin zwałowych przewarstwionych piaskami średnimi, kompleks utworów wodnolodowcowych oraz grunty antropogeniczne w nasypach. Ściany oporowe oraz wanny żelbetowe zasypane zostały od strony zewnętrznej gruntami nasypowymi (piaski, pospółki), które dodatkowo zwiększają dopływ wody do obiektu.

Z archiwalnej dokumentacji z badań wynika, że pierwsze zwierciadło wód gruntowych nawiercono na głębokości ok. 25,0 m powyżej „0” Wisły, czyli ok. 1 m poniżej płyty dennej. Po wybudowaniu skarp stanowiących dojazd do wiaduktów węzła „MPL Okęcie” zwierciadło wód gruntowych uległo lokalnemu podwyższeniu. Przy budynku pobliskiej stacji energetycznej woda utrzymuje się na powierzchni terenu (ok. 28 m powyżej „0” Wisły).

Przed remontem obiektu nawierzchnia jezdni składała się z warstwy wiążącej z betonu asfaltowego oraz warstwy ścieralnej z masytksu grysowego ułożonej bezpośrednio na izolacji płyty dennej. Odwodnienie tunelu zrealizowano przez zachowanie wymaganych

spadków podłużnych i poprzecznych oraz polipropylenowe drenaże podłużne i poprzeczne zatopione w grysie otoczone żywicą. Na czas budowy tunel został odwodniony za pomocą drenażu roboczego z gruntu filtracyjnego oraz dwóch rur \varnothing 100 mm, znajdujących się pod płytą denną. Tunel wyposażono w dziewięć studni odwadniających z indywidualnym odpompowaniem wody poza obiekt, rozstawionych co ok. 50 m. Podczas prowadzonych dotychczas remontów na obiekcie wykonano bruzdy przykrawężnikowe i drenaże podłużne za kapami chodniko-

wymi, a także tzw. przewiertki ze studni odbierające wodę spod płyty.

W obrębie wanien żelbetowych występowały nieszczelności dylatacji zarówno pionowych, jak i poziomych, a widoczne przecieki stwierdzono także w rejonie płyty przejściowej (na styku ze ścianami oporowymi). Przecieki były szczególnie widoczne od strony wyjazdu z tunelu, od „MPL Okęcie”. Dodatkowo na płycie dennej powstały rysy wzdłuż styku ze ścianami szczelinowymi, jako skutek niedostatecznego zbrojenia zsiwającego płytę ze ścianami oporowymi oraz w wyniku pracy termicznej w poprzek płyty. W trakcie budowy obiektu zrezygnowano z dodatkowych prętów wklejanych w ściany szczelinowe, co mogłoby ograniczyć problem. W okresie zimowym styk rozszerza się nawet o ok. 1 mm. Okresowo widoczne są wycieki na kapach chodnikowych. Występujące szczególnie w okresie zimowym przecieki świadczą o tym, że zwierciadło wody znajduje się powyżej płyty dennej na rampach i woda może dostawać się na nawierzchnię, wpływając po płycie przejściowej. Wszystkie ściany szczelinowe zakończone są w gruntach nieprzepuszczalnych. Filtracja wody przez te ściany jest niewielka. Głównym źródłem wody przedostającej się pod płytę denną w obrębie ścian szczelinowych są

więc ich końce, gdzie nie zaprojektowano poprzecznej przegrody mogącej odciąć dopływ wody do obiektu. Lokalizacja przecieków na obiekcie wskazuje na napływ wody przez warstwy filtracyjne. Następnie woda przedostaje się do wnętrza obiektu przez najbardziej osłabione miejsca konstrukcji, np. dylatacje – zwłaszcza na styku ścian szczelinowych i wanien. Wymienione uszkodzenia powodują nadmierną filtrację wody do środka obiektu. Dopływ wody zwiększa się w okresie zimowym, kiedy obiekt ulega odkształceniom termicznym i wszystkie rysy oraz szczeliny dylatacyjne się rozszerzają. Filtracja wody skutkuje powstawaniem zacieków na nawierzchni, izolacji i kapach chodnikowych, co przyspiesza korozję elementów konstrukcji i wyposażenia obiektu. Najbardziej istotnym skutkiem nieszczelności jest jednak wpływ wody na powierzchnię jezdni i tworzenie się oblodzenia przy ujemnych temperaturach, co zagraża bezpieczeństwu uczestników ruchu drogowego. Występują także inne typowe uszkodzenia, związane z estetyką oraz należyтым utrzymaniem obiektu, takie jak: wegetacja roślin; spękania poprzeczne nawierzchni; odpryski; łuszczenie się powłok malarskich i inne.

Od czasu budowy obiekt wielokrotnie poddawano procesom naprawczym. Jeszcze w trakcie budowy w latach 2010 – 2012, a następnie kilkakrotnie po jej zakończeniu w latach 2013 – 2014 prowadzono iniekcję rys oraz połączeń elementów konstrukcyjnych. W 2014 r. wykonano przewierty oraz osadzono rury mające odbierać wodę z drenaży roboczych (w przekroju ze ścianami szczelinowymi) do istniejących studni, co pozwoliło na przejście części wody spod płyty dennej. W kolejnym roku wykonano instalację grzewczą (przeciwoblodzeniową) w ściekach przykrawężnikowych oraz lokalnie pod nawierzchnią bitumiczną w celu poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. W 2015 r. zrealizowano drenaż podłużny w narożach za kapami chodnikowymi oraz w warstwie ścieralnej nawierzchni jezdni wzdłuż krawężników.

Na podstawie remontów stwierdzono, że naprawy metodą iniekcji poliuretanowych mają ograniczoną w czasie skuteczność. Jest to najprawdopodobniej

związane z niewystarczającą elastycznością iniektowanej mieszanki, która pęka pod wpływem odkształceń termicznych płyty dennej.

Innowacyjne zastosowanie betonu jamistego jako warstwy filtracyjnej

Brak dylatacji na długości obiektu w ścianach szczelinowych (~300 m) sprawił, że nie można było wykluczyć powstawania kolejnych rys w ścianach szczelinowych i płycie dennej pod wpływem zmian temperatury. Aby uniknąć okresowego powtarzania napraw mających na celu zwiększenie szczelności obiektu, zaprojektowano rozwiązanie uwzględniające powstanie przecieków w długim czasie eksploatacji obiektu. Woda przesączająca się przez szczeliny w płycie dennej oraz w ścianach szczelinowych zostanie odebrana przez drenaże oraz warstwę filtracyjną wykonaną z betonu jamistego wybudowaną na całej szerokości obiektu, a następnie odprowadzona do istniejących studni i wypompowana poza obiekt. Jest to pierwsze tego typu zastosowanie betonu jamistego w Polsce, a prawdopodobnie i w Europie.

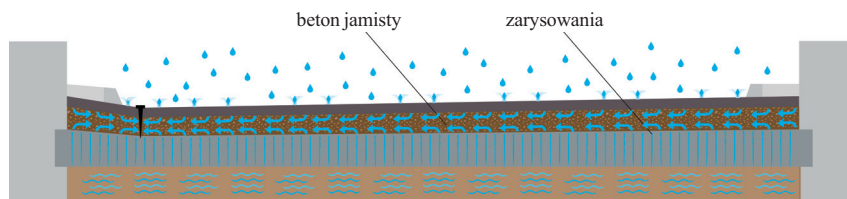
Warstwę filtracyjną stanowi beton jamisty PERVIA wykonany z kruszywa naturalnego o frakcji do 16 mm i klasie wytrzymałości C16/20. Zastosowana mieszanka pozwala na bezpieczne przeniesienie obciążeń ruchem kołowym, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej przepuszczalności. Umożliwia to skuteczne odprowadzanie wody do istniejących studni, zanim dotrze ona ponad nawierzchnię drogową (rysunek 5) i w efekcie zwiększono bezpieczeństwo użytkowników obiektu.

Na czas robót związanych z przebudową nawierzchni tunelu konieczne było wyłączenie obiektu z ruchu kołowego. Rozwiązanie zakładało stopniowe podwyższenie niwelety drogi na łukach pionowych ramp zjazdowych, docelowo do 29 cm na odcinku podziemnym

tunelu (podwyższenie w stosunku do istniejącej niwelety). Lokalne podwyższenie zgodnie z projektem wynosi do 42 cm na wjeździe do tunelu. Co istotne, została zachowana skrajnia pionowa równa 470 cm, z ok. pięciocentymetrowym zapasem na wysokości tunelu. Ze względu na bardzo małą wysokość tunelu, dzięki użyciu betonu jamistego jako warstwy filtracyjnej, z dużym prawdopodobieństwem uda się skutecznie odprowadzić zbierającą się wodę, jednocześnie zachowując wysokość skrajni drogowej. Obecnie na rynku polskim nie ma alternatywnego rozwiązania, umożliwiającego skuteczne odprowadzenie wody przy tak małej grubości warstwy filtracyjnej. Powszechnie stosowane w tym celu kruszywa niespoiste o dużym współczynniku filtracji wymagają zastosowania znacznie grubszych warstw, a tym samym prowadzą do nadmiernego przegłębienia nowo powstających tuneli.

Wykonana pod kapami chodnikowymi warstwa filtracyjna z betonu jamistego układana była ręcznie, a następnie zagęszczana zagęszczarką płytową. W drugim etapie wykonano podbudowę w ciągu komunikacyjnym za pomocą rozściełacza (fotografia 2). Łącznie dostarczono ponad 600 m³ betonu jamistego.

W ramach remontu tunelu zaprojektowano również iniekcję konstrukcji żywicami wysokoelastycznymi oraz odcięcie napływu wody pomiędzy ścianami szczelinowymi i w strefie dylatacji, z zastosowaniem iniekcji strukturalnej (objętościowej) w grunt. Dodatkowo w tunelu planowano zastosowanie specjalnych odwodnień w postaci prefabrykowanych krawężników polimerobetonowych (korytka szczelinowe), ale wykonawca robót zdecydował się na optymalizację tego rozwiązania, stosując uliczne krawężniki betonowe wzmocnione włóknem szklanym z systemem odwodnienia.



Rys. 5. Odprowadzenie wody przez warstwę betonu jamistego



Fot. 2. Układanie betonu jamistego w tunelu na węźle „MPL Okęcie”

Wnioski

Beton jamisty jest stosowany od wielu lat, ale niestety często jest niedoceniany mimo swoich wyjątkowych właściwości odprowadzających wodę. Spowodowane jest to zbyt małą wytrzymałością, z powodu braku frakcji piaskowej. Patrząc jednak na problem z drugiej strony, prawidłowe odwodnienie powierzchni komunikacyjnych jest podstawowym zadaniem, które musi rozwiązać projektant. Szybkie odprowadzenie wody z powierzchni drogi jest konieczne, gdyż odpowiada za prawidłową przyczepność pomiędzy oponą i nawierzchnią, a tym samym za bezpieczeństwo ruchu.

Ze względu na uwarunkowania konstrukcyjne, w tym niewielką wysokość skrajni drogowej w tunelu, poszukiwano rozwiązania, które będzie optymalne pod względem szybkiego odprowadzenia wody, zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości i zapobiegania koleinowaniu się nawierzchni. Zdecydowano się na zastosowanie betonu jamistego PERVIA jako elementu podbudowy i warstwy filtracyjnej jezdni tunelu. To innowacyjne podejście pozwoliło na rozwiązanie problemu przenikającej wody przez płytę denną oraz znacznie poprawiło bezpieczeństwo ruchu drogowego przez eliminację wody i oblodzenia na nawierzchni. Dodatkowo wspiera ono odpowiedzialną gospodarkę wodną, wpływając na zwiększenie wód gruntowych oraz zachowanie równowagi w środowisku naturalnym.

Beton jamisty może stanowić odpowiedź na problemy gospodarki wodnej, szczególnie w aglomeracjach miejskich. Im więcej powierzchni przepuszczalnych, tym mniej wody opadowej gwałtownie spływa do kanalizacji i do rzek, nie tracąc tym samym zasobów, które są niezbędne do funkcjonowania całego ekosystemu. Główne zalety betonu jamistego: zabezpiecza przed gwałtownym

przyborem wód w rzece po ulewnych opadach i po wiosennych roztopach; odprowadza wodę gruntową; zapobiega przeciążaniu studzienek oraz powstawaniu kałuż; zwiększa retencję wody w przyrodzie oraz ogranicza skutki ulew i suszy.

Literatura

- [1] Cree D, Green M, Noumowe A. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review, *Constr. Build. Mater.* 2013; 44: 208 – 223.
- [2] Yang J, Jiang G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cem. Concr. Res.* 2002; 33: 381 – 386.
- [3] Haselbach LM, Valavala S, Montes F. Permeability predictions for sandclogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *J. Environ. Manage.* 2005; 81: 42 – 49.
- [4] Volder A, Watson T, Viswanathan B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. *Urban For. Urban Greening.* 2009; 8: 249 – 256.
- [5] Takebayashi H, Moriyama M. Study on surface heat budget of various pavements for urban heat island mitigation. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2012; 42: 2971 – 2979.
- [6] Weng Q, Schubring D, Lu J. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens. Environ.* 2003; 89: 467 – 483.
- [7] Łach K. Problematyka prawidłowego zaprojektowania systemu odwodnienia dróg. *Drogi Publiczne.* 2021; 1: 39 – 43.
- [8] Kayhanian H, Li, Harvey M, J.T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods, *J. Environ. Manage.* 2013; 118: 144 – 152.
- [9] Reducing urban heat islands: compendium of strategies, EPA's heat Island reduction initiative, Environmental Protection Agency (EPA), USA, 2005.
- [10] Kolokotroni M, Ren X, Davies M, Mavrianni A. London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy Build.* 2011; 47: 302 – 311.
- [11] Majer S. Wybrane zagadnienia odwodnienia dróg i ulic. *Magazyn Autostrady.* 2020; 1: 44 – 51.
- [12] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [13] PN-B-06265:2022-08 Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.
- [14] ASTM C1701-09: Standard Test Method for Infiltration Rate of In-Place Pervious Concrete.

pasek
Rettnemaier