

Nawierzchnie betonowe silnie obciążone na przykładzie terminala kontenerowego

HEAVILY LOADED CONCRETE SURFACE BASED ON THE EXAMPLE OF CONTAINER TERMINAL

Streszczenie

Stały wzrost międzynarodowej wymiany handlowej oraz niskoemisyjny transport kolejowy determinują rozwój śródlądowych terminali kontenerowych, zwanych też „suchymi portami”. Skład pociągu z 50 kontenerami z chińskiego Suzhou w dolinie rzeki Jangcy do Warszawy pokonuje trasę w ciągu 2 tygodni, czyli o połowę krócej niż w transporcie morskim.

Nawierzchnie terminali kontenerowych należą do najsilniej obciążonych i przenoszą naciski na poziomie 10-krotnie wyższym niż drogi. Obciążenie dynamiczne od kontenerowych żurawi jezdnych (ang. Reach Stacker), przekazywane na przednią oś podczas podnoszenia i przemieszczania kontenera, wynoszą od 1000 kN do 1200 kN. Obciążenia statyczne od kontenerów składowanych w stosach wywierają za pośrednictwem narożnikowych stopek bardzo wysokie ciśnienie kontaktowe. Przy czterech trzydziestotonowych kontenerach osiąga ono wartość 10,4 MPa. Dla porównania na drogach UE maksymalne obciążenie osi wynosi 115 kN, zaś ciśnienie stykowe pod kołami ciężkich pojazdów nie przekracza 1,0 MPa. Ponadto nawierzchnie terminali, podobnie jak nawierzchnie drogowe, narażone są na oddziaływania termiczne oraz agresję środowiskową wywołaną w szczególności cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem (klasa ekspozycji XF4).

W prezentowanej pracy przedstawiono nowatorskie w polskich warunkach rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe. Nawierzchnię betonową ułożono bezpośrednio na podbudowie z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, z pominięciem chudego betonu. Natomiast podłoże zostało ulepszone warstwą stabilizacji cementowej. Przyjęcie takiego rozwiązania pozwoliło na skrócenie czasu realizacji do oczekiwań inwestora. Ponadto ten typ podbudowy nie ulega erozji i pozwala na sprawne odprowadzenie wody przedostającej się przez szczeliny. Dyblowana i dylatowana nawierzchnia wykonana została z betonu modyfikowanego domieszką bitumiczną z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien syntetycznych. Do odprowadzenia wód opadowych zasto-

sowano odwodnienie liniowe w postaci koryt kl. F 900. Zaprojektowana i zrealizowana nawierzchnia o powierzchni 11076 m² jest wykorzystywana do przeładunku kontenerów z pojazdów samochodowych na wagony poruszające się na torach europejskich oraz na torach szerokich w kierunku wschodnim.

Abstract

A continuous increase in international trade exchange together with a low-emission railway transport determine development of the inland container terminals also referred to as 'dry ports'. It takes 2 weeks for the number of carriages in a train with 50 containers to travel from the Chinese Suzhou in the Yangtze River Delta to Warsaw, i.e. within a half-time shorter period than in case of sea transport.

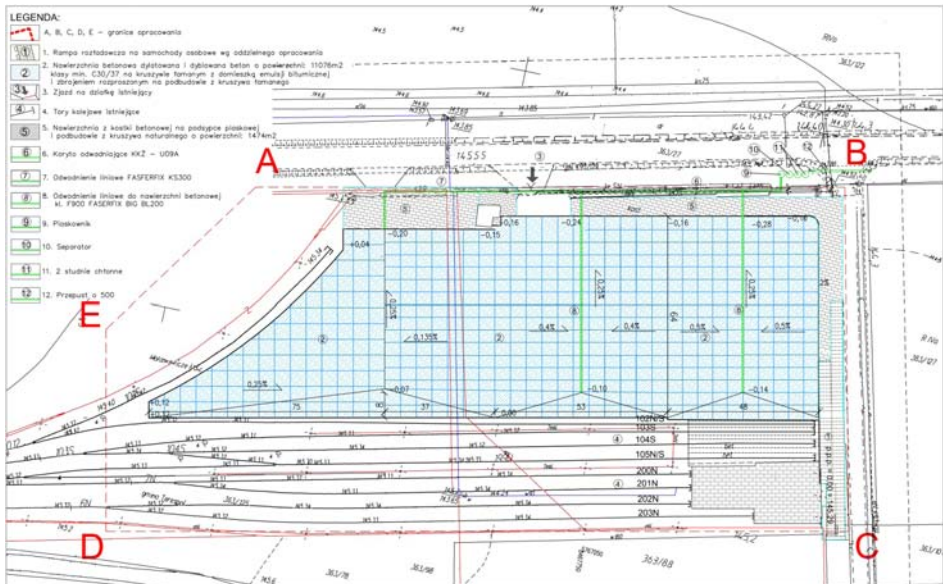
The surfaces of container terminals are among those which are the highest loaded and they transmit the loads at the level of ten times higher than roads. The dynamic loads created by Reach Stackers as transmitted to the front axle while lifting and moving the container are from 1,000 kN to 1,200 kN. Static loads created by the containers stored in piles make a very high contact pressure via corner feet. With four thirty-ton containers it reaches a value of 10.4 MPa. In comparison on the EU roads the maximum load of the axle is 115 kN and the contact pressure under the wheels of heavy vehicles does not exceed 1.0 MPa. Furthermore the surfaces of terminals similarly as the road surfaces are exposed to thermal effects and environmental aggression caused in particular by cyclic freezing and ice melting (exposure class XF4).

In the presented study an innovative in the Polish conditions constructional and material solution was proposed. A concrete surface was put directly on a foundation made from the mechanically stabilized crushed stone aggregate with omission of lean concrete. However the ground was strengthened with a layer of concrete stabilization. The adoption of such solution allowed to shorten the construction time according to the investor's expectations. Moreover, such a type of foundation does not erode and enables the efficient channelling of water getting through the cracks. The doweled and dilated surface was made from some modified concrete with bitumen admixture with addition of the distributed reinforcement in the form of synthetic fibre. A linear floor drain in the form of F 900 troughs was used to channel the rain water. The designed and completed surface of the area of 11,076 m² is used to trans-ship the containers from car vehicles to train carriages which move along European railway tracks and broad-gauge tracks towards the East.

1. Wprowadzenie

Istniejąca nawierzchnia o grubości 15 cm z płyt drogowych i trylinki, na terenie terminala w Wolnym Obszarze Celnym koło Terespolu, była wystarczająca do dystrybucji na rynki wschodnie samochodów osobowych wyprodukowanych w fabrykach europejskich. Przywożone koleją i lawetami pojazdy wprowadzano, z wykorzystaniem ramp najazdowych, do wagonów ustawionych na szerokich torach i wysyłano do odbiorców za wschodnią granicą, głównie w Rosji i Kazachstanie. Rozszerzenie działalności terminala o dystrybucję towarów w kontenerach wymagało ciężkiego sprzętu przeładunkowego w postaci kontenerowych żurawi jezdnych (ang. Reach Stacker) i inwestycji w odpowiednią nawierzchnię odporną na silne obciążenia mechaniczne (naciski na oś żurawi kontenerowych są na poziomie 10-krotnie większym niż dopuszczalne na drogach) i agresywne oddziaływania środowiskowe (klasy ekspozycji). Dodatkowo przy doborze układu konstrukcyjnego poszczególnych warstw nawierzchni oraz technologii wykonania wzięto pod uwagę konieczność nieprzerwanej pracy terminala i możliwie krótki czas realizacji. Mając na względzie powyższe, przyjęto nowatorskie w polskich warunkach rozwiązanie konstrukcyjno-materiałowe nawierzchni betonowej ułożonej bezpośrednio na podbudowie z kruszywa łamanego, stabilizowanego mechanicznie, z pominięciem chudego betonu. Ponadto założono ulepszenie istniejącego podłoża piaszczystego poprzez doziarnienie i dogęszczenie lub stabilizację cementową.

Stosownie do oczekiwań Inwestora przyjęto 5 etapową realizację, aby możliwe było jednoczesne funkcjonowanie terminala na 3/5 powierzchni i prowadzenie prac na 2/5 powierzchni (1/5 powierzchni – roboty, 1/5 powierzchni – pielęgnacja i dojrzwanie). W ten sposób wykonano nawierzchnię betonową o powierzchni 11076 m² (rys. 1).



Rys. 1. Innowacyjny Multimodalny Terminal Kontenerowy w WOC k. Terespolu

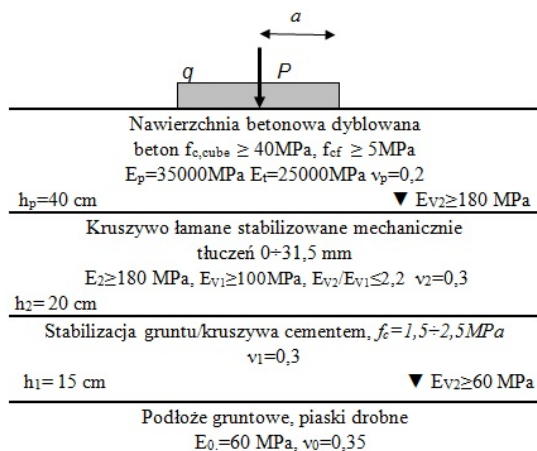
2. Konstrukcja nawierzchni

Przy projektowaniu konstrukcji nawierzchni terminala przyjęto obciążenie od kontenerowego żurawia jezdnego (ang. Reach Stacker) model SC 4531 TA 5. Według specyfikacji firmy Kalmar [12] maksymalne obciążenie przekazywane na przednią oś podczas podnoszenia kontenera wynosi 101,5 t, zaś ciśnienie kontaktowe wywierane przez oponę na nawierzchnię wynosi 1,0 MPa. Obciążenie osi przedniej przenoszone jest na każde z 4 kół, tj. $101,5 \text{ t} / 4 = 25,375 \text{ t}$ (253,75 kN). Obciążenie to wynika z masy własnej pojazdu Reach Stacker równej 71,1 t oraz obciążenia podnoszonego kontenera. Ponadto uwzględniono obciążenia od składowanych w stosy 30 tonowych kontenerów. Na podstawie publikacji [2] zastosowano współczynnik redukcji ciężaru zależny od liczby kontenerów w stosie. Przyjęto ciężar obliczeniowy stosu z pięcioma kontenerami $0,6 \times 5 \times 300 \text{ kN} = 900,00 \text{ kN}$, przekazywany na nawierzchnię za pośrednictwem czterech narożnych stopek o wymiarach $162 \times 178 \text{ mm}$, z ciśnieniem stykowym o wartości 7802 kN/m^2 .

Do obliczeń przyjęto schematy obciążeń od dźwigów kołowych i stosów z kontenerami w kilku wariantach:

- od pojedynczego koła $P=253,75 \text{ kN}$, ciśnienie stykowe $q=1000 \text{ kPa}$
- od podwójnego koła $2xP=507,50 \text{ kN}$ z rozstawem $0,56 \text{ m}$, $q=1000 \text{ kN/m}^2$
- od pojedynczego stosu kontenerów $P=225,00 \text{ kN}$ na stopkę $162 \times 178 \text{ mm}$,
- od stykających się ze sobą stosów kontenerów w rzędzie $2xP=450,00 \text{ kN}$, na 2 stopki, z rozstawem $0,162 \text{ m}$.

Wstępne obliczenia oparto na modelu płyty opracowanym przez Westergaarda, w którym płyta betonowa o module sprężystości E_p i współczynniku Poissona ν_p spoczywa na podłożu typu Winklera charakteryzującym się współczynnikiem reakcji podłoża K [1]. Schemat układu warstw przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu warstw konstrukcyjnych betonowej nawierzchni dyblowanej

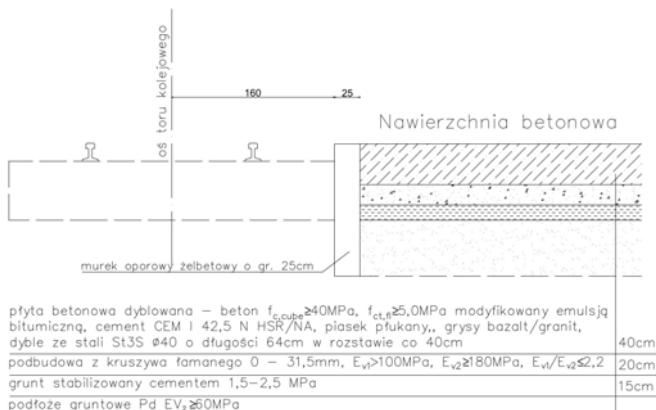
Moduł reakcji podłoża K wyliczono z zależności uwzględniającej wartość modułu odkształcenia sprężystego podbudowy z kruszywa naturalnego, stabilizowanego mechanicznie E_{V2} . Następnie obliczono promień względnej sztywności płyty l , który jest określany jako pierwiastek czwartego stopnia sztywności płyty betonowej D , podzielonej przez moduł reakcji podłoża K . Ponadto, dla każdego wariantu obciążenia wyznaczano promienie

równoważne powierzchni obciążających a oraz równoważne promienie b uwzględniające rozkład obciążeń na grubości płyty h . Następnie stosując wzory Westergaarda [1] obliczono naprężenia w środku, na krawędzi oraz w narożu płyty od obciążeń użytkowych oraz od różnicy temperatur pomiędzy wierzchem i spodem płyty. Maksymalne naprężenia całkowite od kombinacji obciążeń kołami żurawi jezdnych i temperaturą nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych na zginanie, jakie przenosi beton z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa. Naprężenia od pojedynczego stosu kontenerów i wpływów termicznych również nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych, natomiast rozpatrując układ stykających się stosów w rzędzie, stwierdzono przekroczenie naprężeń na krawędzi i w narożu. Dlatego przyjęto rozwiązanie zebrojeniem rozproszonym o współczynniku odporności na pęknięcie $R_{e,3}=0,3$ wg japońskiej normy [4] i przeliczono płytę wg opracowania [3]. W celu zmniejszenia obciążeń na dylatacjach zastosowano dyble ze stali St3S o średnicy 40 mm i rozstawie 40 cm. Przyjęto długość dybla równą obliczonej długości efektywnej $2 \times 8 \times 40 \text{ mm} = 640 \text{ mm}$. Rozstaw został sprawdzony przy założeniu przenoszenia naprężeń przez dyble w obrębie 0,9 promienia względnej sztywności płyty po obu stronach obciążenia [3]. W ten sposób zaprojektowana płyta pozwala na ustawianie kontenerów w stosy, tak aby masa kontenerów w pojedynczym stosie nie przekraczała 120 t, zaś masy stykających się stosów nie przekraczały 220 t, co spełniło oczekiwania Inwestora. W przypadku większych mas, które w praktyce mogą się zdarzać sporadycznie należy zachować odstępy pomiędzy rzędami stosów w przedziale do dwóch grubości płyty.

Mając na względzie zalecenia normy [8] związane z agresywnymi oddziaływaniami środowiskowymi, nawierzchnie betonowe zakwalifikowano do klasy ekspozycji XF 4, jako najbardziej agresywnej, (cykliczne zamrażanie i rozmrażanie z udziałem środków odladzających), co wymagało zastosowania betonu klasy minimum C30/37, z zawartością cementu co najmniej 340 kg/m^3 i ograniczoną ilością wody, $w/c \leq 0,45$. Ponadto zastosowane kruszywo powinno być o odpowiedniej odporności na zamrażanie/rozmrażanie, zgodne z normą [10].

3. Realizacja

Do realizacji przyjęto układ warstw konstrukcyjnych przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Przekrój konstrukcji nawierzchni na podbudowie z kruszywa łamanego

3.1. Podłoże gruntowe i podbudowa

W podłożu gruntowym zalegały grunty nośne w postaci piasków drobnych średniozagęszczonych (niewrażliwe na działanie mrozu i wody). Po wykorytowaniu istniejące podłoże doziarniono i dogęszczono mechanicznie, tak aby charakteryzowało się ono wskaźnikiem zagęszczenia $I_s \geq 1,00$, modułami odkształcenia pierwotnego i wtórnego $E_{v1} \geq 60$ MPa, $E_{v2} \geq 120$ MPa, i wskaźnikiem odkształcenia $I_o = E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ [7]. Pomiarów dokonano sondą VSS. Ze względu na niejednorodne wyniki pomiarów zastosowano 15 cm stabilizację cementem o wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach dojrzewania $f_{cm,7} = 1,0 \div 1,6$ MPa, a po 28 dniach dojrzewania $f_{cm,28} = 1,5 \div 2,5$ MPa [6]. Podbudowę zasadniczą wykonano z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (fot. 1). Na świeżą stabilizację układano warstwę tłuczniwa o frakcji $0 \div 31,5$ mm i zagęszczano przy użyciu ciężkich walców ogumowanych. Po siedmiu dniach zbadane moduły odkształcenia z zapasem spełniały założone wymagania $E_{v1} \geq 100$ MPa, $E_{v2} \geq 180$ MPa, $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$. Oznaczanie modułów odkształcenia podbudowy dokonano sondą VSS zgodnie z załącznikiem B do normy [11].



Fot. 1. Podbudowa zasadnicza z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie

3.2. Nawierzchnia z betonu

Do sporządzania mieszanek betonowych zastosowano cement portlandzki o małej zawartości alkaliów, siarczanoodporny CEM I 42,5 N-NA/HSR w ilości 360 kg/m^3 . Kruszywo drobne stanowił piasek płukany, punkt piaskowy 35%. Jako kruszywa grubego użyto grysów granitowych i bazaltowych. Zawartość ziaren mniejszych od $0,25$ mm (cementu i piasku) w 1 m^3 mieszanki nie przekraczała 420 kg/m^3 . Beton został zmodyfikowany domieszką emulsji bitumicznej w celu zmniejszenia nasiąkliwości oraz poprawy szczelności i odporności na agresję środowiska [5]. Emulsja bitumiczna ponadto poprawiała urabialność mieszanki betonowej. Natomiast w celu uzyskania wymaganej konsystencji zastosowano domieszki uplastyczniające na bazie lignosulfonianów i upłynniające z zawartością eterów polikarboksylowych, co pozwoliło na utrzymanie stosunkowo niskiego $w/c=0,37$. Konsystencja sprawdzana była każdorazowo na budowie przed ułożeniem

mieszanki betonowej. Mieszanka charakteryzowała się jednorodną konsystencją K4 – metoda opadu stożka $S \leq 110$ mm, co zobrazowano na fotografii 2.

Uwzględniając obliczenia wg opracowania [3] oraz w celu wyeliminowania rys skurczowych zastosowano zbrojenie rozproszone w postaci włókien syntetycznym dł. 54 mm o wskaźniku wytrzymałości równoważnej (odporność na pęknięcie) $R_{e,3}=0,3$ [13].



Fot. 2. Sprawdzenie konsystencji mieszanki betonowej na placu budowy

W celu polepszenia współpracy płyt na szczelinach oraz ograniczenia klawiszowania zastosowano dyble ze stali St3S w połowie grubości płyty i rozstawie co 40 cm. Średnica dybla wynosiła 40 mm, długość 64 cm. Dyble pokryto do połowy powłoką bitumiczną uniemożliwiającą związanie z betonem z jedną z płyt i umieszczano na stelażach z prętów o średnicy 6mm ze stali St3S (fot. 3). Ostępy pomiędzy dylatacjami nie przekraczały 5 m. Pierwsze cięcie o szerokości 3 mm na 1/3 grubości płyty wykonywane były w zależności od temperatury od 12 do 24 godzin od zabetonowania. Poszerzenie szczelin na szerokość min 8mm i głębokość min 8 mm wykonano po 28 dniach dojrzewania. Krawędzie tak wykonanych szczelin sfazowano skośnie o wymiarach 3x3 mm. Zastosowano w dylatacjach sznur uszczelniający z materiału syntetycznego o wytrzymałości na zerwanie $> 0,5$ N/mm². Szczeliny wypełniono trwale elastyczną dwuskładnikową masą zalewową na bazie polimeru polisiarczkowego, charakteryzującą się odpornością termiczną w przedziale od -50°C do +120°C, dopuszczalnym odkształceniem 25% szerokości szczeliny, twardością 15–25 w skali Shore'a oraz odporną na działanie środków odładzających, paliw i olejów samochodowych. Przed wypełnieniem szczeliny zostały starannie oczyszczone i zagruntowane.



Fot. 3. Rozmieszczenie dybli w trakcie betonowania

Górną powierzchnię świeżo ułożonej i zawibrowanej mieszanki betonowej zacierano mechanicznie, a następnie przeprowadzono zabiegi mające na celu nadanie nawierzchni odpowiedniej szorstkości przez szczotkowanie w kierunku poprzecznym – co zapewni szybsze odprowadzanie wody. Następnie systematycznie zraszano beton wodą przez ułożoną na nim geowłókninę. Okres pielęgnacji wynosił 21 dni (fot. 4).



Fot. 4. Zacieranie, teksturowanie i pielęgnacja nawierzchni z betonu

Do użytkowania nawierzchni przystąpiono po 28 dniach od zabetonowania. Na fotografii 5 pokazano ustawianie kontenerów w stopy o łącznej masie do 120 t.



Fot. 5. Ustawienie kontenerów w stosy o masie do 120 t

4. Podsumowanie

Przyjęty układ warstw konstrukcyjnych nawierzchni betonowej, z podbudową z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, na podłożu stabilizowanym cementem spełnił założone oczekiwania. Ten typ podbudowy nie ulega erozji i pozwala na sprawne odprowadzenie wody przedostającej się przez szczeliny. Ponadto przyjęcie takiego rozwiązania umożliwiło etapowanie prac i skrócenie czasu realizacji. W trakcie realizacji uzyskano wyraźnie wyższe moduły odkształcenia podbudowy od zakładanych, E_{v1} przekraczał 200 MPa, E_{v2} osiągał nawet 400 MPa przy zachowaniu $E_{v2}/E_{v1} < 2,0$. Ponadto uzyskano beton klasy C35/45 spełniający wymagania stawiane betonom stosowanym w najsurowszych klasach ekspozycji XF4, XD3, XC4, XA3, XM3. Badania laboratoryjne przeprowadzone na próbkach pobieranych w trakcie betonowań potwierdziły wysoką wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28} = 49,74 \div 58,20$ MPa i zginanie $f_{ctm,fl} = 5,55 \div 5,72$ MPa (w dwupunktowym układzie obciążenia), wysoką mrozoodporność F200 i wodoszczelność (średnia głębokość penetracji wody 14,33 mm, a maksymalna 26 mm przy ciśnieniu 0,8 MPa) oraz obniżoną w wyniku zastosowania domieszki bitumicznej nasiąkliwość masową do 3,62%.

Zrealizowana w opisany powyżej sposób nawierzchnia betonowa o powierzchni 11076 m² jest wykorzystywana jako plac manewrowo-składowy i przenosi zakładane obciążenia od żurawi kontenerowych oraz układanych w stosy kontenerów o masie do 120 t.

Podziękowania

Autor publikacji Krzysztof Falkowski jest uczestnikiem projektu „Stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz środków budżetu Województwa Podlaskiego. Ponadto autor pragnie podziękować Inwestorowi ADAMPOL S.A. i Generalnemu Wykonawcy PPU MARK-BUD Sp. z o.o. za umożliwienie wdrożenia pracy naukowej w warunkach przemysłowych o znacznym wymiarze.

Literatura

- [1] Szydło A. Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement. Kraków 2004.
- [2] Judycki J. Projektowanie nawierzchni typu ciężkiego w portach i terminalach kontenerowych, Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2005
- [3] Technical Report No 34, Concrete Industrial Ground Floors – A guide to their Design and Construction, wyd. 3, 2003.
- [4] JCI-SF4 Method of tests for flexural strength toughness of steel fiber reinforced concrete, Concrete library of JSCE. Nr3, Juni 1984, Japan
- [5] Falkowski K, Technologia ochrony materiałowo strukturalnej betonów cementowych w środowisku agresywnym, Budownictwo I Inżynieria Środowiska, 2012 Vol. 3 No. 1
- [6] PN-S-96012:1997 Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem,
- [7] PN-S-06102:1997 Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie,
- [8] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [9] PN-EN 197-1:2012 Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [10] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [11] PN-EN-S-02205:1998 Drogi samochodowe - wymagania i badania
- [12] Specyfikacje firmy Kalmar.
- [13] Materiały informacyjne RUREDIL