

Skuteczność stabilizacji cementem podłoża nawierzchni drogowej na podstawie wyników badania płytą statyczną

Effectiveness of cement in stabilizing subgrade of pavement as based on static plate load tests

Słowa kluczowe: stabilizacja podłoża nawierzchni, mieszanka gruntu związana cementem, badanie płytą statyczną, nośność podbudowy

Keywords: stabilizing subgrade of pavement, mixture with cement, static plate load test, bearing capacity of subgrade

1. Wstęp

W budownictwie jedną z kluczowych pozycji wśród materiałów budowlanych zajmuje cement i wytwarzane z niego materiały, nie tylko jako podstawowy składnik do produkcji betonu, ale także do produkcji zapraw, tynków oraz łączenia materiałów budowlanych (1,2). W ostatnich latach w Polsce następuje dynamiczny rozwój sieci dróg, w szczególności autostrad i dróg szybkiego ruchu, często przebiegających nowymi trasami na terenach rolnych lub leśnych, co wiąże się z koniecznością dostosowania podłoża gruntowego pod konstrukcję nawierzchni. Trwałość nawierzchni drogowych jest ściśle związana z zastosowaniem odpowiedniej jakości materiałów przy ulepszaniu podłoża. Zasadniczy wpływ na ilość i rodzaj stosowanych materiałów, w celu przystosowania podłoża pod ułożenie nawierzchni, mają warunki gruntowe. Znaczne powierzchnie terenów Polski zajmują wysadziny gruntu w dolinach rzek [mady] oraz polodowcowe gliny zwałowe (3), a wykonanie nawierzchni na takich gruntach rodzi konieczność wzmocnienia podłoża przez ułożenie dodatkowych warstw należyście zagęszczonego kruszywa, albo stabilizację podłoża spoiwami hydraulicznymi. Uzyskanie warstw o odpowiedniej nośności na słabych gruntach wymaga zastosowania dobrej jakości kruszywa i odpowiedniego zagęszczenia, przy grubości warstw zwykle 40 – 80 cm (4). W niektórych rejonach kraju problemem jest pozyskanie kruszyw dobrej jakości, na przykład kruszyw łamanych ze skał magmowych lub metamorficznych, a także znaczne koszty produkcji kruszywa, jego transportu i zagęszczania. Innym rozwiązaniem wykonywania zagęszczanych warstw kruszywa jest stabilizacja gruntów spoiwami hydraulicznymi, w szczególności cementem (5), lub dowóz na budowę gotowej mieszanki związanej cementem, z betoniarni. Grubość warstwy stabilizowanej spoiwami o wymaganej nośności wynosi zwykle 15 – 25 cm (4,6) i jest znacznie mniejsza od warstw kruszywa zagęszczanych mecha-

1. Introduction

One of the key positions among construction materials is held by cement and materials based on it, which not only constitute a major factor in producing concrete, but also in the production of mortars and plasters, as well as combining construction materials (1, 2). In recent years, a dynamic development of the road network is observed in Poland, especially as motorways and express roads, often going through new lands in rural and forest areas, which makes it necessary to adapt the subgrade for road construction. The durability of road surfaces is strictly related to used materials of appropriate quality, during the process of ground improvement. The factor of primary influence on the amount and type of materials used for ground improvement are surface conditions. A significant part of Poland is covered by soils subjected to frost-heave in river valleys - alluvial soils and glacial tills (3), and construction of a road on such surfaces requires ground improvement by placing additional layers of aggregates or stabilization of the subgrade with hydraulic binders. The construction of bearing capacity embankments on weak grounds requires the use of high-quality aggregates and appropriate compacting, with the layer thickness being usually between 40 and 80 cm (4). In some regions of the country, the problem is obtaining high-quality aggregates, from magmatic or metamorphic rocks, as well as high cost of their production, transport and compacting. An alternative for making compacted embankments is stabilizing the subgrade of pavement by adding of hydraulic binders, especially cement (5), or transporting the ready mixture with cement from a concrete plant to the construction site. The thickness of stabilizing layer, of the required bearing capacity, is usually 15 – 25 cm (4, 6), and is much lower than the thickness of mechanically condensed embankment layers. In the case of subgrade soil types appropriate for stabilizing with binders, it is not necessary to transport large quantities of aggregates. Instead, it is enough to mix native soil with

nicznie. W przypadku gruntów podłoża podatnych na stabilizację spoiwami nie jest konieczne dowiezienie dużych ilości kruszywa, a jedynie odpowiednie zmieszanie na miejscu rodzimego gruntu z cementem i wodą, za pomocą maszyny frezująco-mieszającej. Warstwę stabilizowaną cementem stosuje się często przy budowie dróg, placów, parkingów lub podbudów posadzek hal przemysłowych. Skuteczność stabilizacji uwarunkowana jest osiągnięciem dobrych właściwości mieszanki po związaniu cementu, jak również spełniania wymagań odpowiedniej nośności ulepszonego podłoża i podbudowy nawierzchni.

Celem artykułu jest przedstawienie i analiza wyników badań nośności podłoża oraz warstw gruntu stabilizowanych cementem, w kontekście skuteczności osiągniętej nośności, w zależności od wybranej metody wykonywania stabilizacji.

2. Materiały i metody

Konstrukcja drogi obejmuje nawierzchnię i podłoże [rysunek 1]. Nawierzchnię tworzą: warstwa ścieralna, po której odbywa się ruch pojazdów, warstwa wiążąca – w przypadku nawierzchni podatnych i podbudowa zasadnicza, która spełnia podstawową funkcję w rozłożeniu naprężeń od kół pojazdów, a w niektórych przypadkach także podbudowa pomocnicza (3, 6).

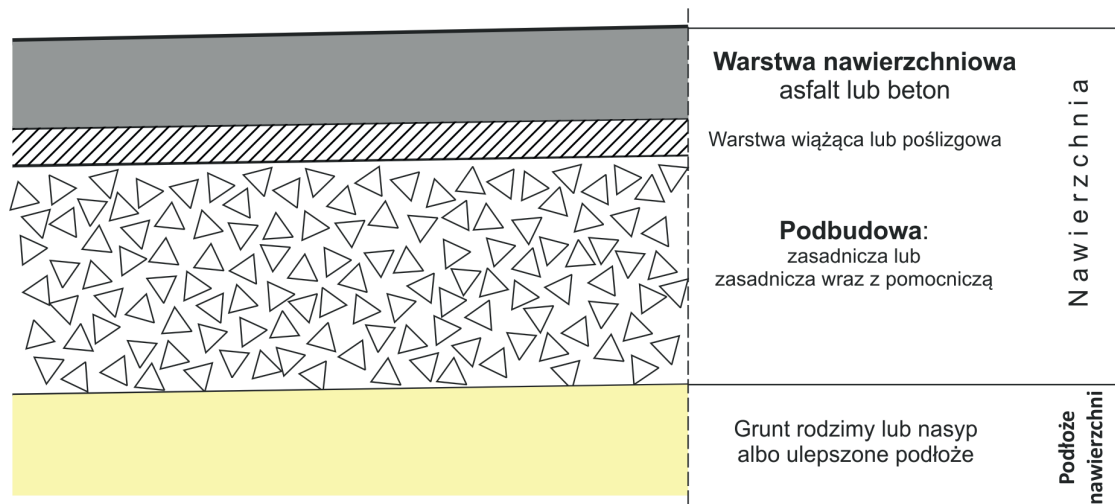
Warstwy nawierzchni drogowej układa się na podłożu, które powinno wykazywać odpowiednie właściwości. Wyróżnia się cztery grupy nośności podłoża nawierzchni, w zależności od rodzajów gruntów i warunków wodnych (3, 7). Podłoże powinno mieć odpowiednią nośność, wyrażoną wartością wtórnego modułu odkształcenia E_2 z badania płytą pod naciskiem statycznym; stosowano płytę VSS o średnicy 30 cm. Grupa nośności G1, w przypadku podłoża o najkorzystniejszych właściwościach, obejmuje grunty niespoiste, a więc czyste piaski, pospółki, żwiry i rumosze skalne. Natomiast grunty spoiste, do których należą piaski gliniaste, pyły, gliny i ropy, zalicza się zasadniczo do grup o nośności G3 lub G4.

cement and water, using milling and mixing machines. Using the layer stabilized with concrete is popular during the construction of roads, squares, parking places or floor substructures of production halls. The effectiveness of stabilization is conditioned by the ability to achieve appropriate parameters for the bound mixture, as well as meeting the requirements concerning the bearing capacity of the improved subgrade and substructure of the road. The aim of the paper is to present and analyze the results of studies on the carrying capacity of the surfaces and embankments stabilized with cement in the context of achieved bearing capacity parameters, depending on the methods of performing the stabilization process.

2. Materials and methods

Construction of a road involves the pavement and subgrade [Fig. 1]. The pavement is composed of the wearing course, on which the vehicles traffic takes place, the binding layer – in the case of damageable surfaces and the basic subgrade, which plays the primary role in the distribution of strains created by vehicles wheels, and in some cases auxiliary subgrade (3, 6).

Road surface layers are placed on the ground which should have particular properties. Four groups of surface carrying capacity are distinguished, depending on the soil type, their frost-heave and groundwater conditions (3, 7). The subgrade should have appropriate bearing capacity, expressed by the value of secondary deformation modulus E_2 obtained in the static plate load tests. For this test VSS plate with a diameter of 30 cm is used. The G1 bearing capacity group, i.e. the surface with the most suitable properties, includes non-cohesive soils, to which the pure sands, sandy gravels, gravels and rock debris are belonging, whereas cohesive soils, it means argillaceous sands, dusts, tills and loams, are included into the G3 or G4 bearing capacity group. A road should be constructed on a G1 subgrade of E_2 modulus of at least 120 MPa and ≥ 100 MPa for light traffic roads (6). In practice, non-cohesive indigenous soils, especially the most commonly encountered sands included into the



Rys. 1. Uproszczony schemat konstrukcji nawierzchni

Fig. 1. Simplified pattern of pavement structure

Konstrukcję nawierzchni należy układać na podłożu o nośności G1 i module E_2 co najmniej 120 MPa, natomiast o module ≥ 100 MPa dla dróg o małym obciążeniu (7). W praktyce niespoiste grunty rodzime, w szczególności najczęściej spotykane piaski, zaliczane do grupy nośności G1, mają moduł E_2 mniejszy od 100 MPa (8, 9). Grube żwiry lub rumosze skalne osiągają wartości $E_2 > 120$ MPa, jednak ich występowanie w podłożu dróg jest sporadyczne i ogranicza się praktycznie do terenów górskich. Najczęściej spotykane w podłożu dróg grunty spoiste, do których należą ablacyjne gliny lodowcowe, mady i mułki, osiągają wartości modułu E_2 nie przekraczające 50 MPa (3, 8). W związku z tym, dla uzyskania podłoża nawierzchni o nośności G1 w przypadku modułu $E_2 \geq 120$ MPa konieczne jest wykonanie nasypu z kruszywa lub ułożenie mieszanki związanej cementem, względnie stabilizacja rodzimego podłoża spoiwem hydraulicznym.

Stosowane są następujące warianty stabilizacji gruntów spoiwami hydraulicznymi:

- stabilizacja gruntu cementem na miejscu, w celu uzyskania warstwy ulepszanego podłoża,
- stabilizacja warstwy kruszywa ułożonego na podłożu rodzimym oraz zastosowanie mieszanki związanej cementem,
- przygotowaniu mieszanki związanej cementem w betoniarni i jej ułożenie, po dostarczeniu na budowę.

Stabilizacja podłoża dla jego ulepszenia, lub stabilizacja warstw kruszywa w celu uzyskania mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym, polega na zmieszaniu cementu, gruntu i wody, a w określonych przypadkach także innych dodatków, na przykład wapna, co daje jednorodną warstwę związaną (10-12). W mieszaninie spoiw z gruntem zachodzi wymiana jonowa, w której jony Ca^{2+} zastępują Na^+ , czemu towarzyszy aglomeracja cząstek gruntu, ułatwiająca jego zagęszczanie. W celu przyspieszenia tego procesu stosuje się czasem dodatek domieszek ułatwiających wymianę jonową.

Do stabilizacji cementem nadają się grunty niespoiste, przede wszystkim piaski i pospółki, a także grunty o małej spoistości oraz o wskaźniku plastyczności $I_p < 15$, a więc piaski gliniaste, pyły, gliny piaszczyste. Grunty średnio i bardzo spoiste – gliny zwięzłe i ility, są mało podatne na stabilizację cementem (13, 14), ze względu na trudność ich odpowiedniego rozdrobnienia, a więc także zmieszania ze spoiwem. Dane literaturowe (12), a także doświadczenia autorów wykazują, że gliny zwięzłe można stabilizować cementem przy zastosowaniu dyspergatora, powodującego rozpad bryłek w tym gruncie. W zależności od rodzaju gruntu, jego porowatości oraz wymaganej wytrzymałości mieszanki związanej, określa się ilość spoiwa jaką należy zastosować. Zwykle jest to od 4% do 10% masowych cementu (15-19). Najczęściej stosowany jest cement portlandzki CEM I 32,R lub cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R (5, 6, 16-20). Duże znaczenie ma grubość warstwy stabilizowanej. Ze względów technologicznych skuteczną stabilizacja, w celu uzyskania jednorodnej mieszanki, obejmuje zwykle warstwę o grubości do 35 cm. Bardzo ważne jest odpowiednie rozdrobnienie gruntów spoistych, gdyż przy grubości warstwy stabilizowanej większej od 20 cm zmieszanie gruntu ze spoiwem

B1 group, have the E_2 values below 100 MPa (8, 9). Thick gravel or rock debris reach the values of $E_2 > 120$ MPa, but their occurrence in the vicinity of roads is sporadic, and practically limited to the mountainous areas. The cohesive soils most commonly encountered in the proximity of roads, as glacial tills, alluvial soils and loams, have E_2 values below 50 MPa (3, 8). Due to the aforementioned information for obtaining the surface of G1 bearing capacity with E_2 modulus ≥ 120 MPa, it is necessary to construct the embankment of aggregates or stabilize the indigenous subgrade with the binders. Stabilization by the binders the most frequently involves:

- stabilization of indigenous soil for creating a layer of improved subgrade,
- stabilization on aggregates embankments, on indigenous soil and making a cement-bound mixture,
- producing the cement-bond mixture at a concrete plant and using it at the construction site.

Stabilization of the subgrade for improvement or stabilization of embankments for creating a mixture bond with the hydraulic binder after mixing cement, soil and water, and in certain cases also specific admixtures, such as calcium ions exchange agents, for the obtaining of appropriately homogeneous bond layer (10-12). The soils suitable for stabilization with cement are cohesive ones sands and rock aggregate and low-cohesion soils whose plasticity index is $I_p < 15$, which means argillaceous sands, dusts and tills. Soils of medium and high cohesion i.e. clays and loams are hardly susceptible to stabilization with cement (13, 14), due to the difficulty of powdering them and mixing them with a binder. Data from subject literature (12) and the authors experience indicate that cohesive silt can be stabilized with cement using a dispersant which causes lumps disintegration. Depending on the type of soil, its porosity and the required durability parameters of the bond mixture, the required amount of binders is determined. It is usually between 4% to 10% by cement mass (15-19). The most frequently cement used is CEM I 32,R or CEM II/B-V 32,5R Portland fly ash cement (5, 6, 16-20). A factor of great significance is the thickness of the stabilized layer. Due to technological reasons, an effective stabilization for creating a homogeneous mixture, usually requires a layer which is up to 35 cm thick. It is important to sufficiently powder cohesive soils, as in the case of stabilizing layer which is thicker than 20 cm the soil and the binder tend to not be mixed to a satisfactory degree [Fig. 2]. In the case of cement-bond mixtures delivered from a concrete plant, the thickness of the layer is usually between 15 cm and 25 cm.

The basic parameters which determine the quality of cement-stabilized layer are resistance to compression and frost (5, 20). When performing a stabilization, samples of soil mixed with cement are placed in appropriate molds and matured at a laboratory according to the required norms, most frequently for at least 28 days. Resistance to compression may be measured as quickly as after 7 days after starting the cement setting, and on that basis it is possible to predict the strength growth after the 28-day period of hardening. The desired values of samples compressive strength of improved stabilized subgrade should not be lower than 1,0 MPa

bywa niezadowolające [rysunek 2]. W przypadku mieszanek związanych cementem, dostarczanych z betoniarni, grubość układanej warstwy wynosi zwykle od 15 cm do 25 cm.

Zasadniczymi właściwościami określającymi jakość warstwy stabilizowanej cementem jest jej wytrzymałość na ściskanie oraz mrozoodporność (5, 20). Przy wykonywaniu stabilizacji, próbki gruntu zmieszanego z cementem pobierane są do odpowiednich form i pielęgnowane w laboratorium według zaleceń normy, najczęściej przez co najmniej 28 dni. Wytrzymałość na ściskanie można oznaczyć już po 7 dniach od rozpoczęcia wiązania cementu; na tej podstawie można oszacować jej przyrost po dłuższym okresie, do 28 dni. Zakładana wytrzymałość na ściskanie próbek ulepszanego podłoża stabilizowanego cementem powinna po 7 dniach wynosić nie mniej niż 1 MPa, a po 28 dniach więcej niż 1,5 MPa, zaś dla mieszanki związanej cementem, odpowiednio, więcej od 1,6 MPa i 2,5 MPa (3, 16, 20). Niestety, ewentualne niekorzystne właściwości występują po długim okresie, gdy zazwyczaj wykonane są już warstwy podbudowy lub nawet cała nawierzchnia drogowa. W okresie poprzedzającym stabilizację można pobrać próbki gruntów, a także wykonać mieszankę związaną w warunkach laboratoryjnych, jednakże wyniki pomiarów wytrzymałości, szczególnie w przypadku gruntów o wątpliwych właściwościach, często odbiegają od uzyskiwanych podczas stabilizacji podłoża na budowie.

W przypadku odporności na mróz znanym problemem są trudności w uzyskaniu w warunkach laboratoryjnych założonej odporności próbek stabilizowanych cementem, dla większości gruntów spoistych i niektórych sypkich (15,16). Zatem w przypadkach wątpliwych najkorzystniej przewidzieć wykonanie warstwy ulepszanego podłoża stabilizowanego cementem, położonej poniżej poziomu zamarzania.

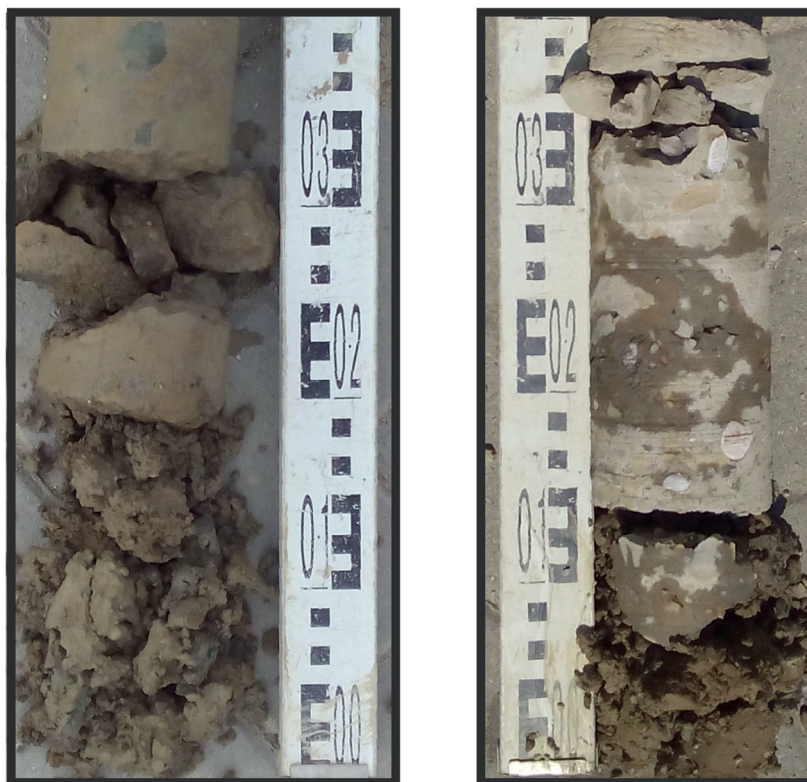
Podstawowym kryterium oceny przydatności podłoża, na których można układać warstwy nawierzchni, jest osiągnięcie wymaganego poziomu wtórnego modułu odkształcenia E_2 , na podstawie badań płytą statyczną (3). Oznaczenie modułów odkształcenia odbywa się poprzez obciążenie podłoża stalową płytą o średnicy 30 cm. Osiadania płyty mierzone są czujnikami zegarowymi z dokładnością 0,01 mm. Obciążenie następuje skokowo co 50 kPa, aż do najczęściej stosowanych wartości 350 lub 450 kPa. Wyznaczany jest pierwotny moduł odkształcenia E_1 , zmierzony przy pierwszym obciążeniu, po czym następuje odciążenie i ponowne obciążenie. Wtórny moduł odkształcenia E_2 , który jest miarą nośności warstwy, obliczany jest przy powtórnym obciążeniu, dla zakresu obciążeń wynoszących zwykle 150 – 250 kPa.

Badanie płytą statyczną powinno się przeprowadzać nie wcześniej niż po 24 godzinach od stabilizacji cementem, w praktyce do trzeciego dnia po rozpoczęciu wiązania. Badanie trwa zwykle nie dłużej niż 30 minut i pozwala usta-

after 7 days, and higher than 1.5 MPa after 28 days, whereas for a cement-bond mixture the values should be over 1,6 MPa and 2,5 MPa, respectively (3, 16, 20). Unfortunately, possible negative results are obtained after longer periods, usually after the subgrade layers and the whole road itself have already been constructed. In the period before stabilization it is possible to take the soil samples and make a mixture bond in laboratory conditions, but the results of durability tests, especially in the case of dubious soils, often vary from the ones obtained while stabilizing the ground at a construction site.

In relation to frost resistance, known problems include difficulties with obtaining the assumed frost resistance in laboratory conditions in the case of cement-stabilized samples for most of the cohesive soils and some free-flowing ones (16, 17). Thus, in dubious cases, it is best to assume construction of a layer of improved cement-stabilized subgrade below the freezing level.

The basic criterion for evaluating whether it is possible to construct a road on a determined surface, is obtaining the required values of E_2 secondary deformation modulus in the static plate load test (3). Marking the deformation moduli is performed by pressuring the surface with a steel plate, 30 cm in diameter. The plates settlements are measured by clock sensors with the accuracy of up to 0.01 mm. The pressure is applied in steps of 50 kPa, most frequently up to the value of 350 or 450 kPa. The E_1 primary deformation modulus



Rys. 2. Próbkę podłoża rodzimego stabilizowanego cementem – po prawej piasku, po lewej gliny zwięzłej, pobrane z warstwy stabilizowanej po 3 latach od wykonania stabilizacji na zakładaną głębokość 40 cm

Fig. 2. Samples of indigenous subgrade stabilized with cement (on the right: sand, on the left concise clay) taken from a stabilized layer 3 years after making a stabilizing layer for the assumed depth of 40 cm.

lic wartości E_1 , E_2 oraz I_0 , czyli wskaźnik odkształcenia, który jest stosunkiem modułu wtórnego do pierwotnego [E_2/E_1]; określa on pośrednio zagęszczenie warstwy. Przyjmuje się, że nasyp ma odpowiednie zagęszczenie jeśli I_0 nie przekracza 2,2, przy czym należy podkreślić, że dla warstw zbudowanych z materiałów gruboziarnistych, nasyp może osiągnąć wymagane zagęszczenie także przy większych wskaźnikach odkształcenia (8).

W niniejszym artykule przeanalizowano 316 pomiarów płytą statyczną VSS różnych podłoży, pochodzących z 36 różnych nawierzchni drogowych, a także budowlanych, a mianowicie:

- dla celów porównawczych badania na podłożu rodzimym, na podłożu powierzchniowo stabilizowanym wapnem oraz na nasypach stabilizowanych mechanicznie – 37 punktów,
- na podłożu rodzimym stabilizowanym cementem lub cementem z dodatkiem domieszki ułatwiającej wymianę jonów EN-1 – 80 punktów,
- na warstwie nasypu z kruszywa stabilizowanego cementem oraz mieszanki związanej cementem dostarczonej z betoniarni – 103 punkty,
- na podbudowie zasadniczej z kruszywa stabilizowanej mechanicznie, ułożonej na podłożu lub na nasypie stabilizowanym cementem – 96 punktów.

3. Wyniki i dyskusja

Warstwy nawierzchni drogowej wykonywane są dosyć często bezpośrednio na podłożu gruntów rodzimych, albo na cienkiej warstwie nasypu z kruszywa stabilizowanego mechanicznie, które określa się na podstawie wtórnego modułu odkształcenia, znacznie mniejszego od 120 MPa. W tabelicy 1 podano wartości E_2 dla 4 realizacji budowlanych.

W pierwszym przypadku nawierzchnię zaprojektowano na podłożu rodzimym zbudowanym z glin pylastych – mady, które po powierzchniowej stabilizacji wapnem uzyskały lepsze właściwości, jednak nie osiągnęły $E_2 \geq 120$ MPa. Ułożono zatem warstwę mieszanki związanej w postaci pospółki z cementem przygotowanej w betoniarni, co pozwoliło uzyskać wymaganą nośność. W drugim przypadku wykonawca boiska sportowego przeprowadził mechaniczne zagęszczanie zróżnicowanych gruntów podłoża, obejmujących rodzime gliny oraz nasypy ziemno-gruzowe. Badania płytą statyczną wykazały znaczny rozrzut wartości E_2 od 23 do 205 MPa, przy średniej wartości 70 MPa. Zdecydowano się na stabilizację zróżnicowanego podłoża poprzez dodanie do niego cementu i ponowne zagęszczenie, w związku z czym uzyskano wartości E_2 w przedziale 132 - 450 MPa.

W trzecim przypadku podbudowę posadzki hali wykonano zgodnie z projektem, jako nasyp o grubości 25 - 30 cm z kruszywa naturalnego, stabilizowany mechanicznie. Jednak, wobec zbyt cienkiej warstwy nasypu nie uzyskano wymaganego poziomu E_2 , zatem nasyp ten zmieszano z cementem, co pozwoliło osiągnąć duże wartości E_2 .

is marked at the first load, after which the load is removed, and a new one is placed again. E_2 secondary deformation modulus, which is the measure of the layer bearing capacity, is calculated after a repeated application of pressure, usually for the range of pressure of 150 – 250 kPa. A static plate load test should not be conducted sooner than 24 hours after stabilization with cement, in practice within 3 days after the beginning of the setting process. The test does not usually take longer than 30 minutes and allows to determine the values of E_1 , E_2 and I_0 , namely the deformation ratio, which is the secondary/primary modulus ratio (E_2/E_1), and which indirectly defines the layer density. It is accepted that an embankment has a sufficient density if its I_0 does not exceed 2.2, but it is worth noting that for layers composed of coarse-grained materials an embankment can reach the required density also at lower values of the deformation ratio (8).

In this article, 316 VSS static plate load tests from 36 various construction sites, were described, including:

- for the purpose of comparison, studies on native surfaces, surfaces stabilized with lime, or mechanically-stabilized embankments – 37 sites,
- on native surfaces stabilized with cement or cement mixed with EN-1 ions exchange enhancing agent – 80 sites,
- on a layer of aggregate stabilized with cement or cement-bond mixture delivered from a concrete plant – 103 sites
- on a basic mechanically stabilized aggregate subgrade, constructed on a cement-stabilized surface or embankment – 96 sites.

3. Results and discussion

Road layers are rather frequently designed directly on the subgrade of native soil or upon a thin layer of mechanically stabilized aggregate, which is characterized by secondary deformation values much below 120 MPa. Table 1 presents the values of E_2 for 4 constructions.

In the first case, the road surface was designed on local subgrade composed of silt [alluvial] soils, which after being stabilized with lime on the surface improved their parameters, but not enough to constitute a subgrade with $E_2 \geq 120$ MPa. Thus a layer of bound mixture of rock aggregate and cement transported from a concrete plant was placed, which allowed obtaining the required bearing capacity.

In the second case, the contractor of the sports field conducted mechanical consolidation of diverse subgrade soils, which included native clays and dirt and debris embankments. Static plate load tests demonstrated large differences in the values of E_2 from 23 to over 205 MPa, with the average value of 70 MPa. It was decided that a stabilization process of diverse subgrade soil would be conducted by adding cement and re-consolidation, the result of which was obtaining of E_2 values between 132 - 450 MPa.

Tablica 1 / Table 1

WARTOŚCI MODUŁU ODKSZTAŁCENIA E_2 NA GRUNTACH RODZIMYCH LUB NASYPACH, PRZED I PO WYKONANIU STABILIZACJI CEMENTEM
 VALUES OF E_2 DEFORMATION MODULUS ON LOCAL SOILS OR EMBANKMENTS BEFORE AND AFTER STABILIZATION WITH CEMENT

Rodzaj podbudowy Type of construction	Rodzaj podłoża / Type of subgrade		
Podbudowa dróg i placów Substructure for roads and squares	Podłoże rodzime – Gliny pylaste twardoplastyczne Indigenous soil – high-plasticity silty clay	Gliny pylaste powierzchniowo stabilizowane wapnem Silty clay- stabilized with lime on the surface	Stabilizacja dowieziona: Pospółka z cementem z betoniarni Delivered stabilization: aggregate with cement from a concrete plant
E_2 MPa wartość średnia average value	28	49	133
zakres wartości Range of values	26 – 34	45 - 56	125 – 145
Podbudowa boiska sportowego Substructure for a sport field	Podłoże rodzime albo zróżnicowane nasypy ziemno-gruzowe stabilizowane mechanicznie Indigenous subgrade or mechanically-stabilized diverse dirt-rock embankments	Podłoże rodzime lub istniejące nasypy stabilizowane cementem Indigenous or existing embankments stabilized with cement	
E_2 MPa wartość średnia average value	70	235	
zakres wartości range of values	23 - 205	132 – 450	
Podbudowa posadzki hali Substructure for a production hall's floor	Nasyp z kruszywa naturalnego stabilizowany mechanicznie Natural aggregate embankment, mechanically stabilized	Nasyp z kruszywa naturalnego stabilizowany cementem Natural aggregate embankment, stabilized with cement	
E_2 MPa wartość średnia average value	80	275	
zakres wartości range of values	32 - 110	196 – 392	
Podbudowa dróg i parkingu Substructure of roads and parking places	Nasyp z kruszywa naturalnego stabilizowany mechanicznie Natural chipping embankment, mechanically stabilized	Podłoże gruntowe stabilizowane cementem z dodatkiem środka EN-1 Soil stabilized with cement, with addition of EN-1 agent	
E_2 MPa wartość średnia average value	77	229	
zakres wartości range of values	32 - 125	118 – 450	

W czwartym przypadku, we wstępnej fazie budowy centrum handlowego z halą o wielkiej powierzchni, z rozległym parkingiem, zdecydowano się wykonać na części terenu nasyp z kruszywa o grubości 25 cm, zaś na innej części dokonać stabilizacji rodzimych glin zwałowych cementem z dodatkiem domieszki EN-1. Średnia wartość E_2 , przy podobnej grubości warstwy, była blisko trzykrotnie większa w przypadku podłoża stabilizowanego cementem z dodatkiem domieszki EN-1 niż zagęszczonego nasypu z kruszywa. Ponadto problemem praktycznym, przy wymianie gruntów na zagęszczany nasyp, jest między innymi ryzyko upla-

In the third case, for the substructure for construction hall floor, according to the project, a 25-30 cm mechanically stabilized embankment made of natural aggregate was constructed. However, due to insufficient thickness of the embankment the required E_2 values were not obtained, which was why the embankment was mixed with cement, allowing the achievement of high E_2 values.

In the fourth case, at the initial stage of constructing a large shopping hall a decision was made to construct a 25 cm aggregate embankment on one part of the area, and conduct stabilization

stycznienia podłoża, wskutek nasycenia gruntów spoistych wodami opadowymi lub w wyniku odprężenia mokrych gruntów pyłowych, po usunięciu znajdujących się wyżej warstw. Niekorzystne zmiany może także spowodować zbyt intensywna vibracja, wywołująca wyciskanie gruntów spoistych z podłoża do zagęszczanego nasypu. Ważne znaczenie ma również niska jakość kruszyw oraz zbyt duża ich wilgotność. Czynniki te oddziałują na uzyskiwany poziom nośności. Badania zagęszczanych nasypów wykonywanych z grubego kruszywa, w tym przypadku ze żwiru z doliny rzeki Dunajec, wykazują, że przy grubości warstwy około 40 cm, ponad 50% badanych nasypów nie spełniało kryterium $E_2 \geq 120$ MPa (8).

Alternatywą dla wykonywania nasypów z kruszywa w celu uzyskania podłoża z grupy nośności G1 o $E_2 \geq 120$ MPa jest wykonanie warstwy stabilizowanej spoiwami hydraulicznymi. Dobre wyniki stabilizacji uzyskuje się dla piasków o różnej ziarnistości lub pospółek, a także piasków gliniastych i pyłów piaszczystych, ale nie zawierających próchnicy (16, 21). Spośród wykonanych 80 pomiarów nośności, na ulepszonym podłożu z gruntów stabilizowanych, 26 uzyskało wartości E_2 mniejsze od 120 MPa [tablica 2]. W tej liczbie ponad połowa dotyczyła stabilizacji cementem glin zwięzłych, w przypadku których, w związku z niedostateczną nośnością, zastosowano w kolejnym etapie dodatek domieszki EN-1 ułatwiającej wymianę jonów. Uzyskano wówczas tylko jeden wynik pomiaru E_2 nieco mniejszy od 120 MPa – a mianowicie 118 MPa. Część niekorzystnych wyników dotyczyła stabilizacji gruntów podłoża lokalnych dróg, biegnących na wysoczyźnie polodowcowej. Strefowa zmienność litologiczna gruntów, przy występowaniu glin zwięzłych na wierzchołkach, a piasków gliniastych na zboczach i w dolinkach, spowodowała że w rejonach występowania glin wartości E_2 po stabilizacji cementem były od 2 do nawet 5 razy niższe niż w rejonach występowania piasków. Badania wytrzymałości wykazały, że glina z domieszką cementu wykazywała zbyt małą wytrzymałość na ściskanie $R_c = 0,12$ MPa.

Większą efektywność uzyskania wymaganych wartości E_2 stwierdzono przy stosowaniu mieszanek związanych, to jest kruszyw z dodatkiem cementu. W tych warunkach nie występuje problem nieodpowiedniego rozdrobnienia gruntu, który ma miejsce w przypadku glin, a łatwe zmieszanie gruntu sypkiego z cementem, zapewnia uzyskanie warstwy stabilizowanej o odpowiedniej jednorodności. Kilka przypadków bardzo dużych wartości E_2 , większych od 750 MPa, wskazuje na wytworzenie sztywnej warstwy, praktycznie niepodatnej na ugięcie pod obciążeniem pomiarowym, podobnie jak w przypadku podbudowy betonowej. Spośród 103 badanych punktów, w przypadku warstw mieszanek związanych cementem, jedynie 10 nie spełniało kryterium $E_2 \geq 120$ MPa [tablica 2].

Przypadki nieodpowiedniej nośności warstw z mieszanek związanych dotyczyły zarówno kruszyw mieszanych z cementem na budowie, jak i dowiezionych z betoniarni, aczkolwiek powody niewystarczającej nośności w obu przypadkach były różne. Dla gruntu mieszanego na budowie problemem była zbyt mała głębokość mieszania warstwy kruszywa z cementem, co wytworzyło ciekłą, kilkucentymetrową sztywną warstwę piasku, z dużą ilością cementu. Ta warstwa pękała przy obciążeniu płytą statyczną

of native morainic clay with cement, adding EN-1 agent. The average E_2 value, with similar thickness of the layers, was almost three times higher for the subgrade stabilized with cement with the addition of EN-1 agent, than in the case of reinforced aggregate embankment. Moreover, a practical problem with soil replacement during a construction of reinforced embankment is, among others, the risk of subgrade plasticization due to saturation of cohesive soils with rainwater, or as a result of relaxation of damp dusty soils after the removal of the overlying bed, as well as the influence of excessive vibration, which causes pushing of the cohesive soil from the subbed into the reinforced embankment. An important factor is also low quality of the aggregates and their high moisture content. Those factors have influence upon the obtained bearing capacity parameters. Studies of reinforced embankments made of coarse aggregate, which was the gravel from the Dunajec river valley, indicate that at the thickness of the layer of ~40 cm, over 50% of the investigated embankments did not meet the criterion of $E_2 \geq 120$ MPa (8).

An alternative for constructing aggregate embankments, in order to obtain a subgrade from G1 bearing capacity group with $E_2 \geq 120$ MPa is to construct a layer stabilized by hydraulic binders. Good results of stabilization are achieved for unsorted sand of rock aggregate, as well as loamy sands and silt, but not ones which contain humus (15,20).

From among 80 conducted measurements of bearing capacity on improved subgrade of stabilized soil, 26 were characterized by E_2 values below 120 MPa (Table 2), with more than half related to stabilization of cohesive silt with cement, for which, due to insufficient bearing capacity, addition of ions helping exchange EN-1 agent, was performed at the subsequent stage. The result being only one E_2 measurement below 120 MPa, equal 118 MPa, precisely speaking. Some of the negative results were related to stabilization of subgrade soil under local roads on the glacial upland. Zonal lithological changes of soil, with cohesive silts occurring on the top parts of the upland and loamy sands on the slopes and in valleys, resulted in the values of E_2 . After cement stabilization in the places where silt appeared were 2 to 5 times lower than in the regions where sands occurred. Durability tests demonstrated that silt with an addition of cement was characterized by insufficient resistance to compression, $R_c = 0,12$ MPa.

Higher effectiveness in obtaining the required E_2 values was achieved when using bond mixtures – aggregate with cement. In such cases, there is no problem of inappropriate overgrinding of soil, which could be observed with clay, with easy mixing of powdered soil and cement allowing for obtaining sufficiently homogeneous stabilized layer. A number of cases of extremely high E_2 values – over 750 MPa, indicates that a stiff layer was formed, virtually unsusceptible to bending under the test weight, similarly to concrete substructure. Among 103 studied sites for cement-bond mixtures, only 10 did not match the criterion of $E_2 \geq 120$ MPa (Table 2).

The identified cases of insufficient bearing capacity of layers composed of bond mixtures were related both to aggregate mixed

Tablica 2 / Table 2

MODUŁY ODKSZTAŁCENIA E_2 WARSTWY PODŁOŻA STABILIZOWANEGO CEMENTEM ORAZ MIESZANKI ZWIĄZANEJ CEMENTEM
VALUES OF E_2 DEFORMATION MODULUS ON A CEMENT-STABILIZED SUBGRADE AND A CEMENT-STABILIZED MIXTURE

Rodzaj warstwy/ Layer type	Zakres wartości Range of values of E_2 , MPa	Wartość średnia Average value of E_2 , MPa	Mediana Median of E_2 , MPa	% punktów Points % $E_2 < 120$ MPa
Ulepszone podłoże stabilizowane cementem Improved cement-stabilized subgrade	33 - 450	196	170	33
Mieszanka związana spoiwem – kruszywo z cementem Mixture bound with a binder – aggregate with cement	68 - 1125	307	250	10

Tablica 3 / Table 3

MODUŁ ODKSZTAŁCENIA E_2 PODBUDOWY ZASADNICZEJ Z KRUSZYWA ŁAMANEGO NA PODŁOŻU STABILIZOWANYM CEMENTEM
VALUES OF E_2 DEFORMATION MODULUS ON BASIC SUBSTRUCTURE COMPOSED OF AGGREGATE ON CEMENT-STABILIZED SUBGRADE

Rodzaj warstwy/ Layer type	Zakres wartości Range of values of E_2 , MPa	Wartość średnia Average value of E_2 , MPa	Mediana Median of E_2 , MPa	% punktów Points % $E_2 < 120$ MPa
Podbudowa zasadnicza z kruszywa łamanego na podłożu stabilizowanym cementem Basic substructure composed of aggregate on cement stabilized subgrade	94 - 563	217	205	3

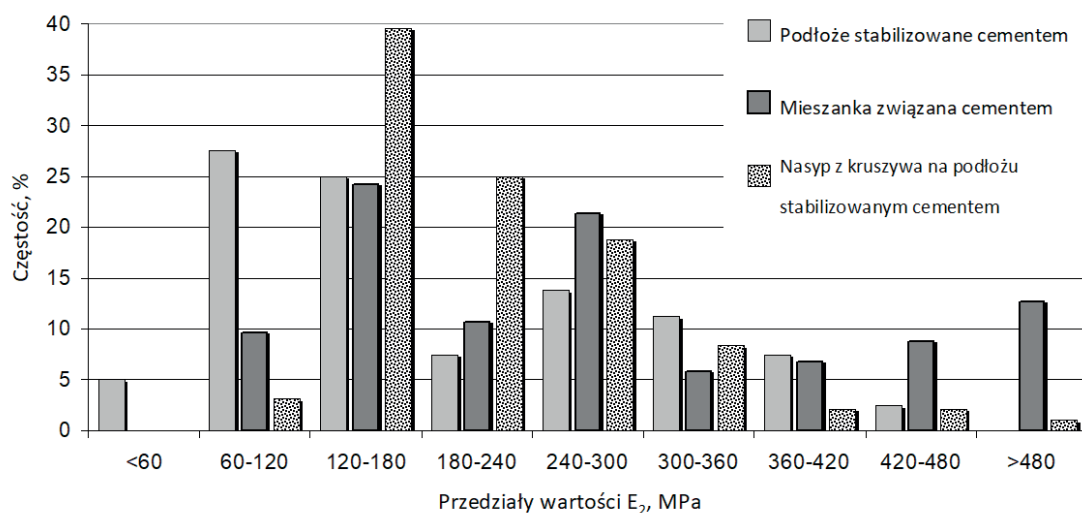


Fig. 3. Distribution of E_2 modulus values

Rys. 3. Rozrzut wartości modułu E_2

przekraczającym 300 kPa. W przypadku dowożonych z betoniarni mieszanek problemem była niewłaściwie dobrana ilość cementu lub względy technologiczne. Te ostatnie wiązały się z ułożeniem cienkiej warstwy mieszanki na zbyt płytko wyźłobionym podłożu, bądź obciążenie ruchem warstwy jeszcze nie związanej, co powodowało spękania w warstwie stabilizowanej.

Warstwy stabilizowane cementem najczęściej stanowią ulepszone podłoże albo podbudowę pomocniczą nawierzchni, na których układa się podbudowę zasadniczą, zapewniającą przenoszenie

with cement at the construction site and mixtures transported from a concrete plant, although the reasons for insufficient bearing capacity were different in each case. For soil mixed at the construction site, the problem was too low depth of mixing of the aggregate layer with cement, which created a thin, several-centimeter layer of stiff sand, with a large amount of cement. This layer was cracking when being exposed to static plate pressure over 300 kPa. In the case of transported mixtures, the problem was inappropriate content of cement or technological issues related to placing a thin layer of

obciążeń z warstw jezdnych na podbudowę pomocniczą lub na podłoże (3, 18). Badania nośności na podbudowach zasadniczych, z kruszyw łamanych układanych na warstwach stabilizowanych cementem, wskazują na dużą skuteczność uzyskiwania żądanych wartości wtórnego modułu odkształcenia (tablica 3).

Spośród 96 pomiarów jedynie w 3 przypadkach zmierzono wartości E_2 mniejsze od 120 MPa, przy czym najmniejsze wartości tego modułu uzyskane w badaniach wynoszą 94 MPa, a blisko 60% badanych punktów miało moduły $E_2 > 180$ MPa [rysunek 3].

4. Wnioski

- Wyniki uzyskane z ponad 300 pomiarów płytą statyczną, z kilkudziesięciu podbudów drogowych i budowlanych, pozwala postawić wniosek o skuteczności zastosowania cementu jako spoiwa dla stabilizacji gruntów lub mieszanek z kruszywa w odniesieniu do ocenianej nośności podłoża nawierzchni, jakim jest wtórny moduł odkształcenia E_2 .
- Zastosowanie cementu jako spoiwa w ilości kilku procent masowych pozwoliło uzyskać wymaganą nośność podłoża nawierzchni przy kilkukrotnie mniejszej grubości warstwy niż w przypadku wymiany gruntów na zagęszczany nasyp z kruszywa. Ponadto uzyskanie żądanej nośności było technologicznie prostsze niż wymiana gruntów na nasyp stabilizowany mechanicznie.
- Zastosowanie mieszanek związanych z kruszywa stabilizowanego cementem jest skuteczniejsze niż stabilizowanie rodzimego podłoża gruntowego spoiwami hydraulicznymi. Ta metoda pozwala uzyskać większe wartości modułu odkształcenia, a ponadto łatwiej jest zidentyfikować i wyeliminować błędy technologiczne przy wykonywaniu mieszanki związanej, niż w przypadku stabilizacji spoiwem różnych litologicznie gruntów rodzimych.
- Podbudowy z kruszywa łamanego, ułożone na podłożu stabilizowanym cementem lub na warstwie mieszanki związanej cementem, mają dużą nośność, co dowodzi celowości stosowania cementu jako spoiwa do stabilizacji podłoża nawierzchni w celu szybkiej i skutecznej realizacji robót drogowych.

Literatura / References

1. W. Kurdowski, G. Kądziałowski, Pułapki w chemii cementu, *Cement Wapno Beton*, **85**, 333–340 (2018).
2. R. R. Kaczyński, Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2017.
3. Katalog typowych nawierzchni podatnych i półsztywnych, Załącznik do zarządzenia nr. 31 GDDKiA (2014).
4. J. Prusinski, S. Bhattacharja, Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils, *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1652**, 1, 215-227 (1999).
5. Norma PN-EN 14227-1 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym.

mixture in a too shallow subgrade. It was also to allowing traffic on a still uncongealed layer, which resulted in cracks formation in the stabilized layer.

Cement-stabilized layers most frequently constitute improved subgrade or an auxiliary substructure of the road, upon which the basic substructure is constructed, allowing for transferring the load from the road surface to the auxiliary substructure, or to the subgrade (3, 18). Studies of bearing capacity on basic substructures, composed of aggregate on cement-stabilized layers, indicate high effectiveness of obtaining the desired values of the secondary deformation modulus (Table 3).

From among 96 measurements only in 3 cases were the E_2 values below 120 MPa, with the lowest values obtained during the study being $E_2 = 94$ MPa, and in almost 60% of the investigated sites $E_2 > 180$ MPa [Fig. 3].

4. Conclusions

- The results of over 300 measurements by static plate from a couple of dozens of construction sites allows for drawing a general conclusion that using cement in mixtures or with aggregate as a binder for soil stabilization is effective in terms of improving the general parameter of the bearing capacity of the surface, which is E_2 secondary deformation modulus.
- Adding cement as the binder in several % by mass allowed for obtaining the required bearing capacity of the surface, with the layers thickness being 2-4 times lower than in the case of soil replacement for a compacted aggregate embankment. In addition, the achievement of desired parameters of soil bearing capacity was technologically easier and more effective than during the process of soil replacement for a mechanically-stabilized embankment.
- Using bond mixtures from cement-stabilized aggregate is more effective than stabilizing native soil with hydraulic binder, as it is then easier to obtain higher deformation modulus values. What is more, technological errors during the process of making a bond mixture are easier to identify and eliminate than in the case of stabilization lithological different native soils with a binder.
- Substructures composed of aggregate on cement-stabilized subgrade or on a cement-bond mixture are characterized by high bearing capacity, which proves the effectiveness of using cement as a binder for stabilization of road surface subgrade, as a result allowing for swift realization of road construction works.

6. C. Kraszewski, Charakterystyka wytrzymałościowa mieszanek kruszyw związanych hydraulicznie do stosowania w podbudowach drogowych, Drogi i Mosty, **3**, 31-54 (2009).
7. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. 1999. Nr 43 poz. 430 z późniejszymi zmianami.
8. T. Bardel, Ocena wyników badania płytą VSS kruszyw aluwialnych rejonu Tarnowa wykorzystywanego do budowy nasypów drogowych, Górnictwo i Geologia, **7**, 2, 49-58 (2012).
9. M. Sulewska, Nowoczesny sposób kontroli jakości zagęszczenia nasypów, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo, **97**, 307-314 (2003).
10. L. Chen, D.-F. Lin, Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement, Journal of Hazardous Materials, **162**, 1, 321-327 (2009).
11. W. Cyske, I. Kluska, Porównanie właściwości wybranych środków do stabilizacji gruntów na budowie autostrady A1, Drogi i Mosty, **1**, 5-16 (2007).
12. K. Koś, Stabilizacja gruntów pylastych cementem z dodatkiem środka jonowymiennego, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, **71**, 13-20 (2016).
13. A. Tekielska, Geologiczno-inżynierska ocena wybranych gruntów jako podłoża autostrady A2 w rejonie Grodziska Mazowieckiego i wyniki badań nad polepszeniem ich właściwości, Przegląd Geologiczny, **56**, 3, 253-257 (2008).
14. S. Kolas, V. Kasselouri-Rigopoulou, A. Karahalios, Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement, Cem. Concr. Comp., **27**, 2, 301-313 (2005).
15. K. Piechowicz, Stabilizacja gruntów na potrzeby posadowienia gruntowych dróg rolniczych. Dobór optymalnych mieszanek stabilizujących, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, **16**, 4, 57-71 (2016).
16. B. Kamiński, M. Sobalak, A. Kozłowski, Stabilizacja piasków drobnych równoziarnistych Puszczy Noteckiej cementami portlandzkimi, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, **3/1**, 171-181 (2006).
17. E. Zawisza, A. T. Gruchot, Wpływ stabilizacji cementem lub silmentem na wytrzymałość i mrozoodporność gruntu pylastego, Górnictwo i Geoinżynieria, **32**, 1, 371-379 (2008).
18. Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym do dróg krajowych - Wymagania Techniczne WT-5 (2010).
19. K. Pytel, P. Trybalski, Wpływ komponentów na parametry betonów chudych w podbudowach drogowych, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, **V-VI**, 60-62 (2013).
20. PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.
21. H. Tremblay, J. Duchesne, J. Locat, S. Leroueil, Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement, Canadian Geotechnical Journal, **39**, 3, 535-546 (2002).