

ANALYSIS OF THE HYDRAULIC BINDER USE FOR BASE STRENGTHENING IN PAVEMENT CONSTRUCTIONS

АНАЛИЗА УПОТРЕБЕ ХИДРАУЛИЧНОГ ВЕЗИВА ЗА ОЈАЧАЊЕ ПОСТЕЉИЦЕ У КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА

Miloš Šešlija¹
Igor Peško²
Nebojša Radović³
Mila Svilar⁴
Fawzia Kired⁵

UDK: 625.731.6
DOI: 10.14415/JFCE-880
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: The paper presents the application of cement stabilization in the world and in our country. In addition to the literature review, basic physical - mechanical tests of the pavement base without the use of hydraulic binder and with the use of hydraulic binder with different percentages of participation (2, 4, and 6%) were given. The hydraulic binder of the manufacturer LaFarge HRB 12.5 was used as a binder, and the material on which this binder was tested is a clay material taken in the vicinity of Belgrade. Using this binder, it was concluded that any percentage of binder leads to significant improvement of the placenta and thus improves the load-bearing capacity of the pavement structure.

Резиме: У раду је дат приказ примене цементне стабилизације у свету и код нас. Поред прегледа литературе дата су основна физичко – механичка испитивања постељице без употребе хидрауличног везива и са употребом хидрауличног везива са различитим процентима учешћа (2, 4, и 6%). Као везиво коришћено је хидраулично везиво произвођача LaFarge HRB 12.5, а материјал на којем је испитивано ово везиво је глиновити материјал узет у околини Београда. Коришћењем овог везива дошло се до закључка да било који проценат везива доводи до значајног побољшања постељице и тиме поспешује носивост коловозне конструкције.

Keywords: Hydraulic binder, base, pavement construction

Кључне речи: Хидраулично везиво, постељица, коловозна конструкција

¹ Doc. dr Miloš Šešlija, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Civil Engineering and Geodesy, Dr Sime Miloševića 12, Novi Sad, Serbia, tel: +381 65 399 0089, e-mail: sele@uns.ac.rs

² Prof. dr Igor Peško, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Civil Engineering and Geodesy, Dr Sime Miloševića 12, Novi Sad, Serbia, tel: +381 63 102 8911, e-mail: igorbp@uns.ac.rs

³ Prof. dr Nebojša Radović, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Civil Engineering and Geodesy, Dr Sime Miloševića 12, Novi Sad, Serbia, tel: +381 65 440 5900, e-mail: nradovic@uns.ac.rs

⁴ Ass. Mila Svilar, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 65 505 4002, e-mail: mila.svilar@gmail.com

⁵ Fawzia Kired, dipl.inž.građ., University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department for Civil Engineering and Geodesy, Dr Sime Miloševića 12, Novi Sad, Serbia, tel: +381 61 324 0176, e-mail: fawziamuftah74@gmail.com

1. INTRODUCTION

During the infrastructure building, it is sometimes impossible to avoid sections where the foundation soil or pavement base soil does not meet the minimum requirements, either in terms of load-bearing capacity or in terms of required material quality, and which the project or some general applicable regulation imposes on the material itself and its installation condition. There are several procedures, groups of soil stabilization procedures: mechanical, stabilization with lime, cement or similar hydraulic binders, bituminous binders, special chemical agents and geotextiles.

The basic mechanism for mechanical soil stabilization is thickening, then its granulometric composition must be improved. When soil stabilization is carried out with binders, hardening is achieved by connecting soil particles by mixing with binders. Necessary groups are soil stabilization procedures using geotextiles, when geotextiles (non-woven textiles, mesh) and a layer of stone material are laid over weak and unstable soil, which is used to establish the required load-bearing capacity.

The first application of soil stabilization was achieved approximately 5000 years ago, when the so-called Shaanxi-pyramids (towards the province of Shaanxi) were made of clay mixed with lime. The Chinese wall between the brick walls has a core of clay stabilized with lime, and the Chinese used the same procedure to build roads and improve the soil during the bridges building. The Indians used a mixture of clay and lime as masonry mortar, and the Romans built roads with lime and volcanic ash 2000 years ago.

The Roman road Via Appia has three of the four layers of pavement structure (1.2 m thick) stabilized with lime. The practice of stabilizing the soil with

1. УВОД

Приликом изградње инфраструктурних објеката понекад је немогуће избећи деонице на којима темељно тло или тло постелице не задовољавају минималне захтеве, било у погледу носивости или у погледу потребног квалитета материјала, а које пројекат или неки општи важећи пропис постављају на сам материјал и на стање његове уграђености. Постоји више поступака, односно група поступака стабилизације тла: механичка, стабилизација кречом, цементом или сличним хидрауличним везивима, битуменским везивима, посебним хемијским средствима и помоћу геотекстила. Основни механизам за механичку стабилизацију тла је згушњавање, тада се већином мора поправити и његов гранулометријски састав. Када се стабилизација тла спроводи везивима, учвршћавање се постиже повезивањем честица тла мешањем са везивима. Потребне групе чине поступци стабилизације тла помоћу геотекстила, када се преко слабог и нестабилног тла полажу геотекстили (неткани текстил, мрежа) и слој каменог материјала помоћу којег се успоставља потребна носивост.

Прва примена стабилизације тла остварена је пре приближно 5000 година када су на тибетско-монголској висоравни саграђене тзв. шенси-пирамиде (према покрајини Схенси) од глине помешане са кречом. Кинески зид између стена од опеке има језгро од глине стабилизоване кречом, а Кинези су исти поступак искористили за градњу путева и побољшање тла при темељењу мостова. Индијци су мешавину глине и креча употребљавали као малтер за зидање, а Римљани су још пре 2000 година градили путеве помоћу креча

hydraulic binders (lime, pozzolan) in many countries has survived to our time. Modern soil stabilization procedures, which are based not only on experience but also on professional and scientific claims, began to develop first in the United States. Due to the very bad condition of the roads at the beginning of our century and the need to connect very remote areas, various possibilities of soil consolidation were begun to be studied.

The national reports of the World Congress on Roads (AIPCR) show that four basic stabilization procedures are applied today (mechanical, lime, hydraulic binders, bitumen) and that they have become standard techniques in more than 50 countries. The mentioned stabilization procedures have also been applied in our country since the 1960s. They are mostly standardized by SRPS standards. Stabilization, improvement of bearing capacity with the help of geotextiles, began to be applied much later (around 1960), which was conditioned by the ability of the industry to produce sufficient quantities of these materials, at low enough prices, to be rationally used in construction.

The papers encountered in the last decade are the stabilization of fine-grained soil with fly ash [1]. The authors examined low to medium plasticity clay as well as medium to high plasticity clay. The ash was used as a binder in the amount of 15 to 20%. After the tests, it is concluded that the ash can be used to improve the pavement base. Some of the authors have examined the use of ash as a material for the construction of road embankments using a hydraulic binder (lime and cement) with different percentages [2]. The authors came to the conclusion that the application of ash with or without binders can be used for road construction and give quite good test results. Some authors have examined

и вулканског пепела. Римски пут Виа Аппиа има три од четири слоја коловозне конструкције (дебелјине 1,2 m) који су стабилизирани кречом. Пракса стабилизације тла хидрауличким везивима (кречом, пуцоланом) у многим се земљама задржала до нашег времена. Модерни поступци стабилизације тла, који се заснивају не само на искуство него и на стручним и научним тврдњама, почели су се развијати најпре у САД-у. Тамо су се због врло лошег стања путева почетком нашег века и потребе да се повежу врло удаљени предели, почеле проучавати различите могућности учвршћивања тла.

Из националних извештаја организације светских конгреса за путеве (АИПЦР) се види да се данас примењују четири основна поступка стабилизације (механичка, помоћу креча, помоћу хидрауличних везива, битуменска) и да су они постали стандардна техника у више од 50 земаља. У нашој земљи се од шездесетих година такође примењују споменути поступци стабилизације. Они су углавном стандардизирани стандардима СРПС. Стабилизација, односно побољшање носивости помоћу геотекстила почело се примењивати много касније (око 1960. године), што је било условљено способношћу индустрије да произведе довољне количине тих материјала, по довољно ниским ценама, да би се рационално могли употребљавати у грађевинарству.

Радови које су сурећу у последњој деценији су стабилизација ситнозрног тла летећим пепелом [1]. Аутори су испитивали глину ниске до средње пластичности као и глину средње до високе пластичности. Пепео је коришћен као везиво и то у количини од 15 до 20%. Након урађених испитивања долази се до закључка да пепео може да се примењује за побољшање постелице у путарству. Неки од

river sludge as bedding material in pavement bases. As a binder, they used cement with the addition of ash up to 20%, on the basis of which they concluded that ash and sludge can be used as embankments of material [3]. Many papers are related to the use of waste and recycled materials [4-9] for the production of pavement layers and with the addition of binders in order to improve the load-bearing capacity in the layer.

This paper presents the basic physical and mechanical tests of the pavement base with and without the addition of binders, in order to be able to compare the values and show how much the hydraulic binder has improved in terms of natural soil characteristics. As a binder, a hydraulic binder was used, which was formed by a combination of lime and cement. The percentages of soil stabilizer binder additives are 2, 4 and 6%.

2. MATERIALS

Natural material (clay material) and hydraulic binder (HRB 12.5 "LaFarge" from Beocin) were used to make the stabilized pavement base. The location of the taken sample is shown in Figure 1.

аутора су се бавили испитивањем употребе пепела као материјала за израду путних насипа са употребом хидрауличног везива (креч и цемент) са различитим процентом [2]. Аутори су дошли до закључка да примена пепела са или без везива може да се користи за путоградњу и да дају доста добре резултате испитивања. Неки аутори су се бавили испитивањем муља из река као материјал за постелу у коловозним конструкцијама. Као везиво су користили цемент са додатком пепела до 20%, на основу чега су закључили да пепео и муљ могу да се користе у путарству као насипи материјала [3]. Доса радова је везано за употребу отпадних и рециклираних материјала [4-9] за израду слојева коловозне конструкције и са додатком везива како би се поспешила носивост у слоју.

У раду су приказана основна физичко-механичка испитивања постелу са и без додатка везива, како би могле да се упореде вредности и да се прикаже колико је хидраулично везиво поспешило у погледу карактеристика од природног тла. Као везиво коришћено је хидраулично везиво која је настало комбинацијом креча и цемента. Количине процентуалног учешћа додатка везива за стабилизацију тла су 2, 4 и 6%.

2. МАТЕРИЈАЛИ

За израду стабилизоване постелу коришћен је природни материјал (глиновити материјал) и хидраулично везиво (ХРБ 12.5 „LaFarge“ из Беочина). Локација узетог узорка приказана је на слици 1.



Слика 1 – Приказ локације узетог узорка материјала
Figure 1 – View of the location of the taken material sample

2.1 Clay material of high plasticity

To test this type of soil, tests were performed according to the following standards:

- determination of granulometric composition of aggregates (SRPS U.B1.018: 2005 [10], SRPS EN 933-1: 2013 [11]),
- determination of soil sample moisture (SRPS U.B1.012: 1995 [12]),
- determination of soil consistency, Aterberg limits (SRPS U.B1.020: 1980 [13]),
- determination of the ratio of moisture and dry bulk density of soil (SRPS EN 13286-2: 2012 [14]),
- determination of the California load index (SRPS EN 13286-47: 2012 [15]).

2.1.1. Granulometric composition

In order to classify the material, the granulometric composition and distribution of particles as a function of grain size were examined. The method of wet sowing with the use of distilled water was applied. To determine the granulometric composition of the clay, 300 g of material with a series of sieves were used: 4, 2, 1 mm and 500, 250, 125, 90, 63 μm . Most of the material

2.1. Глиновити материјал високе пластичности

За испитивање ове врсте тла урађена су испитивања према следећим стандардима:

- одређивање гранулометријског састава агрегата (СРПС У.Б1.018:2005 [10], СРПС ЕН 933-1:2013 [11]),
- одређивање влажности узорка тла (СРПС У.Б1.012:1995 [12]),
- одређивање конзистенције тла, Атербергове границе (СРПС У.Б1.020:1980 [13]),
- одређивање односа влажности и суве запреминске масе тла (СРПС ЕН 13286-2:2012 [14]),
- одређивање Калифорнијског индекса носивости (СРПС ЕН 13286-47:2012 [15]).

2.1.1. Гранулометријски састав

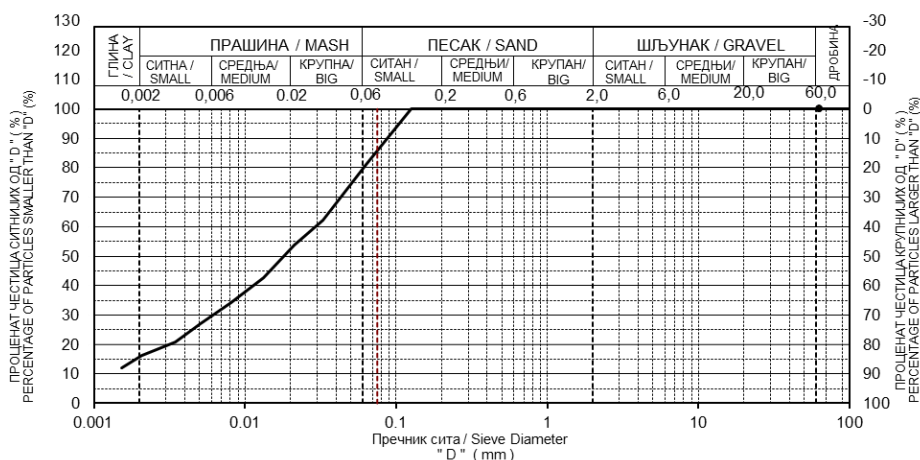
Ради класификовања материјала испитани су гранулометријски састав и дистрибуција честица у функцији величине зрна. Примењена је метода мокрог сејања уз употребу дестилисане воде. За утврђивање гранулометријског састава глине употребљено је 300 g материјала са серијом сита: 4, 2, 1 mm и 500, 250, 125, 90, 63 μm . Највећи део

passed through a 1 mm sieve (99%), with rare exceptions. A total of 1 sample was made, in accordance with the appropriate standards, and depending on the size of the tested particles:

- SRPS EN 933 - 1: 2013 - Tests for particle size distribution of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Screening method,
 - SRPS U.B1.018: 2005 - Geomechanical testing: Determination of particle size distribution.
- The tested sample can be classified into a group of very fine clay materials. The granulometric composition of the aggregate is given in Figure 2.

материјала прошао је кроз сито од 1 мм (99%), са ретким изузетком. Укупно је урађен 1 узорак, у складу са одговарајућим стандардима, а у зависности од величине испитиваних честица:

- СРПС ЕН 933 – 1: 2013 – Испитивање гранулометријских својстава агрегата – Део 1: Одређивање гранулометријског састава – Метода просејавања,
 - СРПС У.Б1.018: 2005 – Геомеханичка испитивања: Одређивање гранулометријског састава.
- Испитивани узорак се може сврстати у групу врло ситних глиновитих материјала. Приказ гранулометријског састава агрегата дат је на слици 2.



Слика 2 – Гранулометријски састав агрегата
Figure 2 – Granulometric composition of aggregates

According to the USCS [16] classification, the material belongs to the CH group or high plasticity clay, while according to the AASHTO [17] classification it belongs to the A-7-6 group, ie it belongs to the group with high plasticity index in relation to their yield strengths, and such materials can be highly elastic and subject to significant changes in volume.

Према USCS [16] класификацији материјал припада групи CH односно глини високе пластичности, док према AASHTO [17] класификацији припада групи A-7-6, односно припада групи са великим индексом пластичности у односу на њихове границе течења, тј такви материјал могу бити јако еластични и подложни знатној промени запремине.

2.1.2. Material characteristics experiment)

This procedure defines the optimal water content. With it the largest dry bulk density is achieved, with the applied compaction energy, and under the conditions defined by the standard:

- SRPS EN 13286-2: 2012 - Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference volume and water content - Proctor compaction.

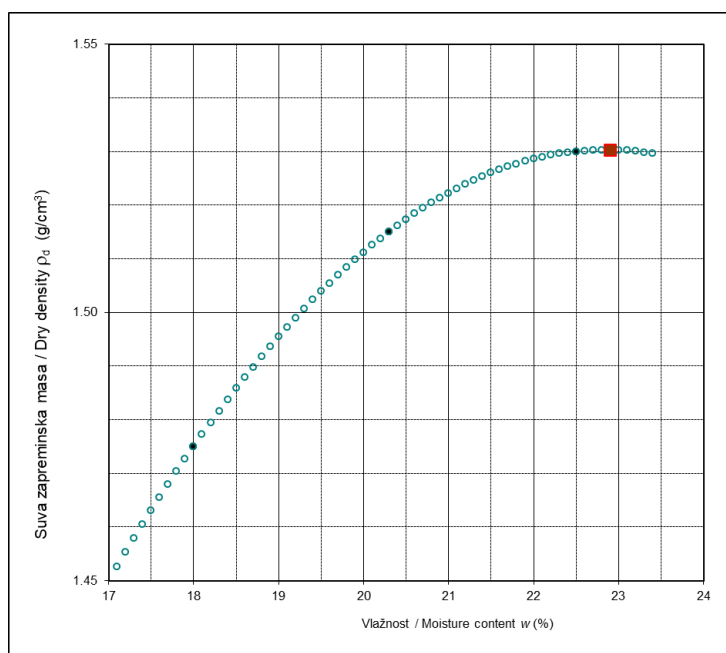
In accordance with the granulometric composition, a compaction energy of 600 kN/m^3 was applied, and under the assumption that the same will be applied in the field. The test results of the Proctor test are shown in Figure 3. It is observed that the maximum bulk density is 1.53 t/m^3 at an optimum humidity of 22.9%.

compaction (Proctor's

2.1.2. Карактеристике збијености материјала (Прокторов опит)

Овим поступком дефинисан је оптималан садржај воде са којом се остварује највећа сува запреминска маса, уз примењену енергију збијања, а под условима које дефинише стандард:

- СРПС ЕН 13286-2:2012 - Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 2: Методе испитивања за лабораторијску референтну запреминску масу и садржај воде – Збијање по Проктору. У складу са гранулометријским саставом, примењена је енергија збијања од 600 kN/m^3 , а под претпоставком да ће иста бити примењена и на терену. Резултати испитивања Прокторовог опита приказани су на слици 3. Уочава се да је максимална запреминска маса 1.53 t/m^3 при оптималној влажности која износи 22.9 %.



Слика 3 – Дијаграм Прокторовог опита
Figure 3 – Chart of Proctor's test

2.1.3. Load-bearing capacity of the California load-bearing index

The California Load Index (CBR) is a number that physically represents the resistance of a standard piston to standard values. When designing pavement structures in road construction, one of the basic parameters of material quality, and in the technical conditions of construction, is prescribed as a mandatory parameter in the production of bedding. The experiment was performed according to the procedure and in the apparatus, with accessories and measuring devices that are clearly defined by the standard:

- Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test methods for the determination of California bearing capacity index, immediate bearing capacity index and linear swelling. After the test, the CBR value for penetration of 2.54 mm is 4.2%, while for penetration of 5.08 mm is 3.6%.

2.2. HRB 12.5 "LaFarge" Beočin

The following tests were performed for testing the hydraulic road binder:

- start and end of binding time - SRPS EN 196-3 [18],
- standard consistency SRPS EN 196-3 [18],
- volume constancy (Le Chatelier rings) SRPS EN 196-3 [18],
- determination of compressive strength of cement after 7 and 28 days SRPS EN 196-1 [19],
- determination of flexural strength of cement after 7 and 28 days SRPS EN 196-1 [19].

The test results of this binder as well as the manufacturer's specifications or specifications of quality conditions prescribed by the standard SRPS EN 13282-2 are shown in Table 1.

2.1.3. Носивост материјала Калифорнијским индексом носивости

Калифорнијски индекс носивости (ЦБР – број) је број који физички представља отпор утискивања стандардног клипа у односу на стандардне вредности. При пројектовању коловозних конструкција у путоградњи један од основних параметара квалитета материјала, а у техничким условима градње, прописује се као обавезан параметар при изради постељичног слоја. Опит је изведен по процедури и у апаратима, са прибором и мерним уређајима који су јасно дефинисани стандардом:

- СРПС ЕН 13286-47:2012 - Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 47: Методе испитивања за одређивање калифорнијског индекса носивости, непосредног индекса носивости и линеарног бубрења. Након урађеног испитивања вредност ЦБР-а за пенетрацију од 2,54 mm износи 4,2%, док за пенетрацију од 5,08 mm износи 3,6%.

2.2. ХРБ 12.5 „LaFarge“ Беочин

За испитивање хидрауличног путног везива урађена су следећа испитивања:

- почетак и крај времена везивања – СРПС ЕН 196-3 [18],
- стандардна конзистенција СРПС ЕН 196-3 [18],
- сталност запремине (Le Šateljeovim прстеновима) СРПС ЕН 196-3 [18],
- одређивање притисне чврстоће цемента након 7 и 28 дана СРПС ЕН 196-1 [19],
- одређивање савојне чврстоће цемента након 7 и 28 дана СРПС ЕН 196-1 [19].

Резултати испитивања овог везива као и произвођачке спецификације односно спецификације услова квалитета које су прописане

стандардном СРПС ЕН 13282-2 приказани су у табели 1.

Табела 1 – Резултати лабораторијских испитивања хидрауличног путног везива ХРБ 12.5 „LaFarge“ Беоџин
Table 1 – Results of laboratory tests of hydraulic road binder HRB 12.5 „LaFarge“ Беоџин

Binder characteristics / Карактеристике везива	Test results / Резултати испитивања	Quality conditions / Услови квалитета [20]
Start of binding time / Почетак времена везивања (min) [18]	210	≥ 120
End of binding time / Крај времена везивања (min) [18]	265	
Standard consistency / Стандардна конзистенција (%) [18]	32.5	
Constancy of volume (Le Chatelier rings) / Сталност запремине (Le Šateljeovim прстеновима) (mm) [18]	0.33	≤ 10
Determination of compressive strength of cement after 7 days / Одређивање притисне чврстоће цемента након 7 дана (МПа) [19]	8.4	
Determination of compressive strength of cement after 28 days / Одређивање притисне чврстоће цемента након 28 дана (МПа) [19]	16.1	12.5-32.5
Determination of flexural strength of cement after 7 days / Одређивање савојне чврстоће цемента након 7 дана (МПа) [19]	2.5	
Determination of flexural strength of cement after 28 days / Одређивање савојне чврстоће цемента након 28 дана (МПа) [19]	2.6	

After the tests, it is concluded that the hydraulic road binder HRB 12.5 "LaFarge" Беоџин fulfills the prescribed requirements defined by the standard SRPS EN 13282-2 [14].

Након урађених испитивања констатује се да је хидраулично путно везиво ХРБ 12.5 „LaFarge“ Беоџин испуњава прописане захтеве који су дефинисани стандардом СРПС ЕН 13282-2 [14].

3. ANALYSIS OF RESULTS AND DISCUSSION

The mixtures made in this paper are as follows:

- reference sample without added binder,
- sample with 2% binder,
- sample with 4% binder and
- sample with 6% binder.

The tests were performed according to the requirements of the standard SRPS EN 14227-11, which include the

3. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ДИСКУСИЈА

Мешавине које су рађене у овом раду су следеће:

- еталонски узорак без додатка везива,
- узорак са 2% везива,
- узорак са 4% везива и
- узорак са 6% везива.

Испитивања су урађена по захтевима стандарда СРПС ЕН 14227-11, која подразумевају следећа испитивања:

following tests:

- determination of optimal humidity and maximum bulk density - Proctor's test with 2, 4 and 6% binder,
- determination of the California load index after 30 minutes, 4 and 28 days of immersion in water,
- determination of compressive strength after 7 and 28 days.

In addition to the above tests prescribed by the standard [20], the following tests were additionally performed:

- determination of Aterberg's consistency limits after 5, 15 and 30 minutes, with the addition of 2, 4 and 6% binder.

From the analyzed location, it was concluded that this is a material belonging to the group of highly plastic clay (CH) according to the USCS classification of materials, which has certain yield limits $W_L=52\%$ and with a plasticity limit $W_P=28\%$. The average humidity of the homogenized material is 28%. According to the AASHTO classification, the material belongs to group A-7-6.

Figures 4 and 5 show the changes in the yield strength W_L , the plasticity limit W_P as well as the calculated plasticity index depending on the percentage of added binder over a period of 5, 15 and 30 minutes.

- одређивање оптималне влажности и максималне запреимнске масе – Прокторовим опитом са 2, 4 и 6% везива,

- одређивање калифорнијског индекса носивости након 30 минута, 4 и 28 дана потапања у води,

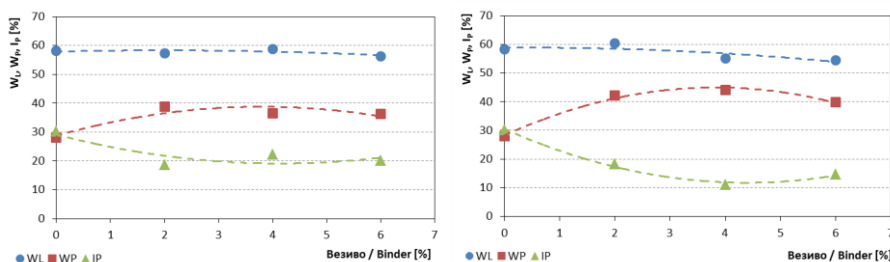
- одређивање чврстоће на притисак након 7 и 28 дана.

Поред наведених испитивања која прописује стандард [20], додатно су урађена следећа испитивања:

- одређивање Атербергових граница конзистенције након 5, 15 и 30 минута, са додавањем 2, 4 и 6% везива.

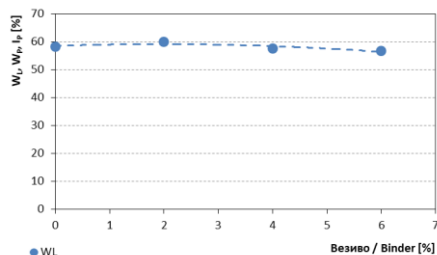
Из анализиране локације констатовано је да се ради о материјалу који припада групи високопластичне глине (CH) према USCS класификацији материјала, која поседује одређене границе течења $W_L=52\%$ и са границом пластичности $W_P=28\%$. Просечна влажност хомогенизованог материјала је 28%. По AASHTO класификацији материјал спада у групу A-7-6.

На сликама 4 и 5 приказане су промене границе течења W_L , границе пластичности W_P као и прорачунатог индекса пластичности у зависности од процената додатог везива у времену од 5, 15 и 30 минута.



Слика 4 – Промена атербергових граница конзистенције у функцији додатог везива након 5 минута (слика лево), након 15 минута (слика десно)

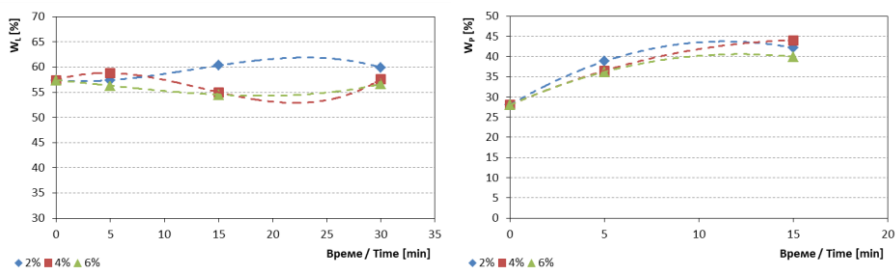
Figure 4 – Change in Aterberg's limits of consistency for the function of added lime after 5 minutes (left figure), after 15 minute (right figure)



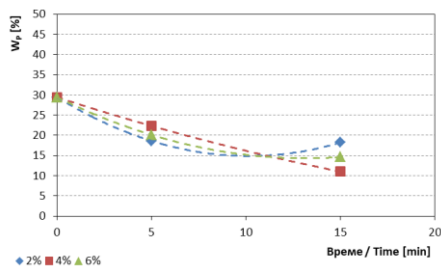
Слика 5 – Промена атербергових граница конзистенције у функцији додатог везива након 30 минута
 Figure 5 – Change in Aterberg's limits of consistency for the function of added lime after 30 minutes (left figure)

The change in the yield strength is negligible and ranges from 56 to 60%, and the plasticity limit increases from 28 to 40%, with a maximum value of 44% being achieved with 4% binder addition. The plasticity index decreases with increasing amount of binder. The minimum value of the plasticity index was achieved with 15.6% with a share of 4% binder. The plastic limit could not be determined 30 minutes after the addition of the binder at different participation values. Figures 6 and 7 shows the flows of change in yield strength, plasticity as well as changes in the calculated plasticity index as a function of time.

Промена границе течења је занемарљива и креће се у границама од 56 до 60%, а граница пластичности се повећава од 28 до 40%, при чему се максимална вредност од 44% постиже са 4% додатка везива. Индекс пластичности се смањује са повећањем количине везива. Минимална вредност индекса пластичности постигнута је са 15,6% са учешћем 4% везива. Граница пластичности није могла бити одређена 30 минута након додавања везива при различитим вредностима учешћа. На сликама 6 и 7 приказани су токови промене границе течења, пластичности као и промене прорачунатог индекса пластичности у функцији времена.



Слика 6 – Промена граница течења у функцији времена за различите проценте додатог везива (слика лево); промена границе пластичности у функцији времена за различите проценте додатог везива (слика десно)
 Figure 6 – Change in the flow rate limits for the function of time for different percentages of added binder (left figure); change in the plasticity limits for the function of time for different percentages of added binder



Слика 7 – Промена индекса пластичности у функцији времена за различите проценте додатог везива

Figure 7 – Change in the index of plasticity of the function of time for different percentages of added binder

The materials have reduced yield and plasticity limits, and there is not much difference in the achieved minimum value of the plasticity index with 2 and 4% of the binder addition.

The California load index was tested on the samples after 30 minutes, after 4 and 28 days of immersion in water. Table 2 shows the CBR values for a given time period.

Материјали имају редуковане границе течења и пластичности при чему није велика разлика у постигнутој минималној вредности индекса пластичности са 2 и 4% додатка везива.

Калифорнијски индекс носивости је испитиван на узорцима након 30 минута, након 4 и 28 дана потапања у води. У табели 2 су дате вредности ЦБР-а за дати временски период.

Табела 2 – ЦБР вредности за дати временски период

Table 2 – CBR values for a given time period

Везиво/ Binder (%)	након 30 минута / after 30 minute		након 4 дана / after 4 days		након 28 дана / after 28 days	
	Непосредни индекс носивости / Direct loading capacity index	Категорија/ Category	Непосредни индекс носивости / Direct loading capacity index	Категорија/ Category	Непосредни индекс носивости / Direct loading capacity index	Категорија/ Category
2	25	IPL ₂₀	53.8	CBR ₅₀	78	CBR ₅₀
4	19	IPL ₂₀	61.4	CBR ₅₀	99	CBR ₅₀
6	22	IPL ₂₀	47.7	CBR ₄₀	74.8	CBR ₄₀

The immediate load index, which was determined 30 minutes after the construction of the test body, belongs to the IPL₂₀ category with 2 and 4% binder, and the IPL₂₅ category with 6% binder. CBR values determined after 4 days of immersion in water from the test body and results, belong to the CBR₅₀ category with 2 and 4% binder, and the CBR₄₀ category with 6% added

Непосредни индекс носивости који је одређен након 30 минута од израде пробног тела припада категорији IPL₂₀ са 2 и 4% везива, односно категорији IPL₂₅ са 6% везива. Вредности ЦБР-а одређене након 4 дана потапања у воду од израде пробног тела и резултата, припадају категорији ЦБР₅₀ са 2 и 4% везива, односно категорији ЦБР₄₀ са 6%

binder. No swelling of the material was registered on the test samples that were tested after 4 and 28 days of immersion in water for all three cases of the percentage of binder participation. Compressive strengths after 7 and 28 days are shown in Table 3.

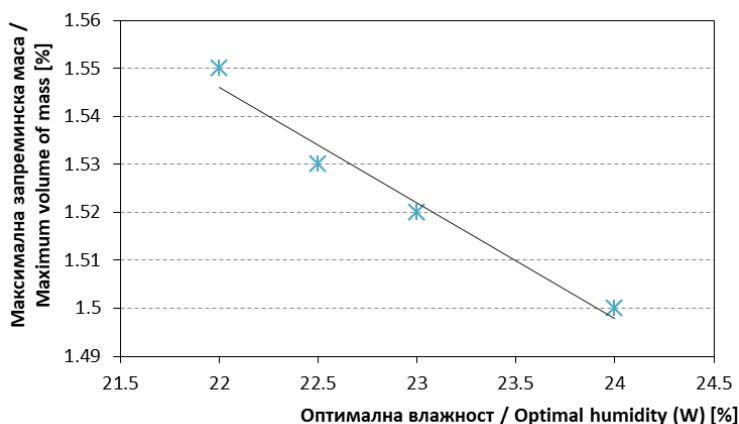
додатог везива. На пробним телима која су испитивана након 4 и 28 дана потапања у води за сва три случаја процента учешћа везива није регистровано бубрење материјала. Чврстоће при притиску након 7 и 28 дана су приказане у табели 3.

Табела 3 – Вредности чврстоће на притисак
Table 3 – Hardness values for pressure

Везиво/Binder (%)	R _c , 7 (MPa)	R _c , 28 (MPa)	Категорија / Category
2	0.843	0.87	Rc 0.5
4	0.945	1.2	Rc 1.0
6	0.895	1.4	Rc 1.0

Compressive strength values with 4 and 6% binder reach the last value of the maximum category according to the requirements of the prescribed standard SRPS EN 14227-11, which is R_c 1.0 and which guarantees the achievement of permanent strength parameters.

Вредности чврстоће на притисак са 4 и 6% везива достижу задњу вредност максималне категорије по захтевима прописаног стандарда СРПС ЕН 14227-11, а то је R_c 1.0 која гарантује постизање трајних параметара чврстоће.



Слика 8 – Промена максималне запреминске масе у функцији оптималне влажности материјала за различите проценте додатог везива
Figure 8 – Change of the maximum volume of mass for the function of optimal humidity of the material for different percentage of added connective tissue

Figure 8 shows the change in optimal humidity and maximum bulk density of the material depending on the percentage of added binder. As the percentage of binder increases, the optimum moisture content of the

На слици 8 приказана је промена оптималне влажности и максималне запреминске масе материјала у зависности од процента додатог везива. Са повећавањем процента везива повећава се оптимална

material increases and the maximum bulk density decreases.

The optimum moisture content of the material with 4% binder increased by 1%, and the bulk density decreased from 1.55 to 1.53 g/cm³.

4. CONCLUSION

According to the conducted tests, the following can be stated:

- for more efficient installation of materials in the layers of the pavement construction, in terms of achieving the necessary parameters for material compaction, a percentage of 3% binder is recommended,
- with a percentage of 3% binder it is considered that the compressive strength would decrease by 20%, which leads to a decrease in the value of the maximum category prescribed by the standard [20],
- to achieve maximum effects in terms of load-bearing capacity, compaction and all analyzed segments from this paper, it is necessary to use a percentage of 4% binder,
- using a percentage of 3% or 4% binder during preparation will not cause swelling of the material, which accelerates enough that the binder quite quickly regulates the water in the layer.

REFERENCES

- [1] Вукићевић М., Пујевић В., Марјановић М., Јоцковић С., Мараш-Драгојевић С.: Стабилизација ситнозрног тла летећим пепелом, Грађевина, бр 67/8, стр. 761-770, 2015.
- [2] Шешлија М., Радовић Н., Васић М., Ђого М., Јотић М.: Физичко-механичка својства летећег пепела примјењивог при грађењу цеста, Грађевинар, бр 69/10, стр. 923-932, 2017.
- [3] Накић Д., Воук Д., Штример Н., Сердар М.: Господарење муљем с УПОВ-а – нови увид у могућности његове опорабе као замјенског цеметног материјала, Грађевинар, бр 70/4, стр. 277-286, 2018.
- [4] Загвозда М., Димтер С., Рукваина Т., Нетингер Губеша И.: Могућност примјене биопепела у цестоградњи, Грађевинар, бр. 70/5, стр. 393-402, 2018.
- [5] Стојановић М., Радоњанин В., Малешев М., Миловић Т., Фурган С.: Тлачна чврстоћа цементних стабилизација које садржавају рециклирани и отпадни материјал, Грађевинар, бр. 73/8, стр. 791-804, 2021.
- [6] Лебо Ж., Бачић М., Јурић-Каћунић Д., Ковачевић М.С.: Загребачка глина побољшана различитим везивима, Грађевинар, бр 73/9, стр. 871-880, 2021.
- [7] Tanyadeh R., Vafaieian M., Fard M. Y.: The Influence of lime powder on the behaviour of clay soil, Građevinar Vol. 73, No. 9, pp. 907-915, 2021.

влажност материјала и смањује се максимална запреминска маса. Оптимална влажност материјала са 4% везива се увећала за 1%, а запреминска маса се смањила са 1,55 на 1,53 g/cm³.

4. ЗАКЉУЧАК

Након урађених испитивања може се констатовати следеће:

- за ефикаснију уградњу материјала у слојеве коловозне конструкције, у погледу постизања неопходних параметара за збијање материјала, препоручује се 3% везива,
- са процентом од 3% везива сматра се да би чврстоћа при притиску опала за 20%, што доводи до пада вредности максималне категорије које прописује стандард [20],
- за постизање максималних ефеката у погледу носивости, збијености и свих анализираних сегмената из овог рада, потребно је користити 4% везива,
- употребом 3% или 4% везива приликом справљања неће се појавити бубрење материјала, чиме се довољно поспешује да везиво доста брзо регулише воду у слоју.

- [8] Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J.: Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review, *Journal of Environmental Management*, 312, pp. 1-18, 2022.
- [9] Zhang M., Na M., Yang Z., Shi Y., Guerrieri M., Pan Z.: Study on mechanical properties and solidification mechanism of stabilized dredged materials with recycled GFRP fibre reinforced geopolymer, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 17, pp. 1-12, 2022.
- [10] СРПС У.Б1.018:2005 – Геомеханичка испитивања – Одређивање гранулометријског састава
- [11] СРПС ЕН 933-1:2013 – Испитивање геометријских својстава агрегата – Део 1: Одређивање гранулометријског састава – Метода просејавања
- [12] СРПС У.Б1.012:1995 – Геомеханичка испитивања – Одређивање влажности узорака
- [13] СРПС У.Б1.020:1980 – Геомеханичка испитивања – Одређивање конзистенције тла – Атербергове границе
- [14] СРПС ЕН 13286-2:2012 – Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 2: Метода испитивања за лабораторијску референтну запреминску масу и садржај воде – Збијање по Проктору
- [15] СРПС ЕН 13286-47:2012 – Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 47: Методе испитивања за одређивање калифорнијског индекса носивости, непосредног индекса носивости и линеарног бубрења
- [16] СРПС У.Б1.001:1990 – Геомеханичка испитивања – Општа класификација тла
- [17] СРПС У.Б1.002:1992 – Геомеханичка испитивања – Класификација тла и мешавине тла и агрегата за путеве
- [18] СРПС ЕН 196-3:2017 – Методе испитивања цемента – Део 3: Одређивање времена везивања и сталности запремине
- [19] СРПС ЕН 196-1:2017 – Методе испитивања цемента – Део 1: Одређивање чврстоће
- [20] СРПС ЕН 14227-11:2013 – Мешавине везане хидрауличким везивом – Спецификације – Део 11: Тло третирано кречом