XIV Международна научна конференция
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 10-12 септември 2026 г, Варна
XIV International Scientific Conference
„Civil Engineering Design and Construction“, Sept. 10 - 12, 2026, Varna, Bulgaria
ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD)

ВЛИЯНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА СВЪРЗВАЩИ ВЕЩЕСТВА И ЗЕОЛИТНА НАНОДОБАВКА ВЪРХУ ЯКОСТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЦИМЕНТОПОЧВА, ПРЕДСТАВЕНА ОТ ЛЬОСОВИДНА ГЛИНА

Явор Щерев[1]

INFLUENCE OF BINDER CONTENT AND ZEOLITE NANOSCALE ADDITIVE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CEMENT-STABILIZED SOIL REPRESENTED BY LOESS-LIKE CLAY

Yavor Shterev

Abstract:
This article presents the results of laboratory tests on the uniaxial compressive strength of cement-stabilized loess-like clay treated with various types of hydraulic binders and a nano-zeolite additive. The influence of binder content, as well as the effect of the nano-zeolite additive, on the development of uniaxial compressive strength was analyzed. Quantitative relationships between binder content and uniaxial compressive strength were established, and a comparative evaluation was performed between traditional Portland cement and alternative hydraulic binders.

Keywords:
uniaxial compressive strength, Proctor compaction test, soil stabilization, cement-stabilized soils, nano-zeolite additives, hydraulic binders

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Льосовидните почви в България се разпростират около 9800 km^2 от територията на страната. Съгласно възприетата у нас класификация на льосовите почви се различават няколко разновидности – льосовиден пясък, песъчлив льос, типичен льос, глинест льос и льосовидна глина (Minkov, 1968) [1]. Льосовидните глини се с висока порьозност, макроструктурна неустойчивост с чувствителност към овлажняване, което води до рязко намаляване на якостта и деформационните им характеристики. Тези особености ги правят

[1] Явор Щерев, докторант, катедра „Транспортно строителство и съоръжения”, факултет „Техника и строителни технологии в транспорта”, ВТУ Тодор Каблешков, 1574 София, ул. Гео Милев 158 E-mail: yavor_shterev@abv.bg; Yavor Shterev, PhD student, Department of Transport Construction and Facilities, Faculty of Transport Engineering and Construction Technologies, at HST „Todor Kableshkov“, 158 Geo Milev Street, Sofia E-mail: yavor_shterev@abv.bg

проблемни като естествена земна основа за промишленото, гражданско и пътното строителство, и при обекти, за които се изискват висока носимоспособност, ограничени деформации и дълготрайна устойчивост.

Един от най-ефективните методи за подобрение на структурно неустойчива земна основа е чрез използването на циментопочвената възглавница. Последната представлява изкуствено подобрен слой от земната основа, създаден чрез смесване на почвата със свързващо вещество (най-често цимент), с цел повишаване на носимоспособността, намаляване на деформациите и осигуряване на равномерно разпределение на натоварванията от проектираното строителство в дълбочина, така че да не се надвишава началният товар на пропадане $P_{нач.пр.}$ и да се предотвратят неравномерни слягания и повреди.

Циментопочвените възглавници могат да бъдат разделени на два типа [2], [3] и [4]:

- корави ЦПВ, уплътнени при оптимално водно съдържание – W_{opt} до достигане на максимална обемна плътност на скелета – ρ_{dmax}. Тези възглавници се изграждат под целия фундамент на сградите и съоръженията и се отличават с висока носимоспособност;
- пластични ЦПВ, които се изграждат при водни съдържания, близки до границата на протичане на почвите – W_L и се използват преди всичко в стеснени условия.

Ефективното проектиране и оразмеряване на циментопочвените възглавници е пряко зависимо от резултатите от проведените лабораторни изследвания. На първо място, Proctor изпитването /EN 13286-2:2010/ [5] има основополагаща роля при определяне на оптималната влажност и максималната суха плътност на почвата. Тези параметри са критични за технологията на изпълнение на циментопочвената възглавница, тъй като гарантират постигане на необходимата степен на уплътняване и съответно максимално развитие на якостните характеристики. Якостта на едноосов натиск /EN 13286-41:2021/ [6] е основният показател, който характеризира носещата способност на стабилизираната почва. Практически, якостта на едноосов натиск служи като база за определяне на необходимата дебелина на възглавницата, като по-високите якости позволяват редуциране на дебелината при запазване на носимоспособността.

2. ИЗПОЛЗВАНИ МАТЕРИАЛИ ПРИ ЛАБОРАТОРНИТЕ ОПИТИ

За подготовката на изпитвателните образци бяха използвани следните материали:

- Свързващи вещества:
  - портландцимент CEM I 42,5 N SR5, съгласно БДС EN 197-1:2011;
  - зеолитна нанодобавка ROADCEM;
  - хидравлично свързващо вещество Strentor на Holcim;
- вода за направа на рецептите за стабилизация, отговаря на БДС EN 1008:2003;
- почва – льосовидна глина;

Почвата за сместа е взета от строителната площадка на проекта за нов пътен насип, в района на гр.Търговище, а цементът и хидравличното свързващо вещество са доставени от производителите и имат съответните технически сертификати.

Льосовидната глина, която се ползва в този проект, притежава следните характеристики:

- специфична плътност ρ_s = 2,71t/m3;
- обемна плътност ρ_n = 1,94t/m3;
- обемна плътност на скелета ρ_d = 1,61t/m3;
- коефициент на порите e = 0,66;
- водно съдържание W_n = 19,89%;

- степен на водонасищане Sr = 0,81;
- показател на пластичност Ip=20,16%;
- граница на протичане W_l = 37,37%;
- обем на макропорите относително пропадане (δ) = от 0,7% до 2.5%, със средна стойност: 1,17%;
- компресионен модул М при товар от 0,20MPa, = 5,40MPa;
- начален товар на пропадане $P_{нач.пр.}$ със средна стойност 144kPa;
- стойности за CBR=4.5% – слаба земна основа;
- като материал за изграждане на пътни насипи льосовидната глина се отнася към група А-6.

Льосовидната глина, в зависимост от склонността към пропадане, се характеризира като основа от първи тип (T_1) – пропада от допълнителен товар, като пропадането от геоложки товар е $S_{пр\gamma} < 5cm$.

3. ВИДОВЕ ЛАБОРАТОРНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Извършиха се опити с различни смеси от почва (льосовидна глина) и различни свързващи вещества в различни тегловни съотношения.

- Proctor на естествената почва:
  - оптимално водно съдържание – W_{opt};
  - максимална обемна плътност на скелета - $\rho_{d,max}$
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа /циментопочвата/. Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 4%;
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа /циментопочвата/. Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 6%;
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа /циментопочвата/. Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 4% + зеолитна нанодобавка ROADCEM с количество 4% от цимента;
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа /циментопочвата/. Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 6% + зеолитна нанодобавка ROADCEM с количество 6% от цимента;
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа. Хидравлично свързващо вещество Strentor на Holcim с количество 4%;
- Якост на едноосов натиск след 28 дни отлежаване на сместа. Хидравлично свързващо вещество Strentor на Holcim с количество 6%;

4. ПОДГОТОВКА НА ПОЧВАТА ЗА ОПИТА

За всеки отделен опит се използва льосовидна глина, към която се добавят съответните количества вода, цимент, зеолитна нанодобавка и хидравлично свързващо вещество. Приготвят се т.нар. „твърди смеси“ при максимална обемна плътност на скелета $\rho_{d,max}$=1,64t/m3 и оптимално водно съдържание W_{opt}=21,5%.

Почвата предварително се натрошава с дървен чук, след което се пресява. Към пресятата почва се добавят предварително определените количества свързващи вещества (цимент, хидравлично свързващо вещество и зеолитна нанодобавка) и вода. Получената смес се разбърква до постигане на хомогенна структура. Хомогенизираната смес се уплътнява с уреда на Proctor (фигура. 1) при зададените параметри на уплътняване. След оформянето им цилиндричните пробни тела се оставят да отлежават и да се втвърдят при лабораторни условия (фигура 2).

Фигура1. Апарат на Proctor

Фигура 2. Отлежаване на уплътнените образци (фотографии Явор Щерев)

5. ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

След отлежаване на цилиндричните образци при стайна температура се пристъпва към тяхното изпитване на осов натиск с преса. Пресата е модел КЕ 200/А. Зададената скорост на подаване на натоварването е 0,6 ±0,2 MPa/s (N/mm^2.s).

Разрушението започва с образуване на вертикални пукнатини по образците, като при пълното разрушаване се получава разцепване на образеца. Илюстрации на фазите на експеримента са показани на фигури 2 и 3.

Фигура 2. Начало на опита

Фигура 3. Форма на разрушение при образеца (фотографии Явор Щерев)

6. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗВЪРШЕНИТЕ ОПИТИ

Числените стойности на резултатите от извършените опити са дадени в следната таблица:

Таблица 1. Таблица с резултати от проведените изпитвания

Свързващо вещество	Якост на едноосов натиск на 28-мия ден [MPa]
Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 4%;	0,74
Портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 с количество 6%;	1,42
CEM I 42,5 N SR5 с количество 4% + зеолитна нанодобавка ROADCEM с количество 4% от цимента	0,78
CEM I 42,5 N SR5 с количество 6% + зеолитна нанодобавка ROADCEM с количество 6% от цимента	1,12
Хидравлично свързващо вещество Strentor на Holcim с количество 4%	0,57
Хидравлично свързващо вещество Strentor на Holcim с количество 6%	0,85

7. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ, ИЗВОДИ

- Установена е линейна зависимост между съдържанието на цимент и якостта на едноосен натиск, описана с уравнението $y = 34x - 0.62$, където x е съдържанието на цимент (%), а y е якостта на едоосов натиск (MPa).
- Увеличаването на цимента от 4% на 6% води до ≈92% нарастване на якостта (от 0,74MPa до 1,42MPa).
- Използваният портланд цимент CEM I 42,5 N SR5 съществено увеличава стойността на якостта на натиск на сместа.
- При практическото приложение на циментo-почвените възглавници в такава льосовидна глина е необходимо да се влага висок клас цимент и по-дебели пластове от смеси, достатъчно добре уплътнение.
- При използването на зеолитна нанодобавка в комбинация с цимент се получават следните резултати:
  - при количества 4% цимент + зеолит, якостта на едноосов натиск леко се повишава 0,78MPa спрямо 0,74MPa при количества на цимента 4%, т.е. увеличението на якостта е с 5%.
  - при 6% цимент + зеолит, якостта на едноосов натиск е 1,12MPa, което е по-ниско от 1,42MPa при 6% цимент без зеолит, т.е. има намаление на якостта с 26%.

  Получените резултати показват, че влиянието на зеолитната нанодобавка върху якостните характеристики не е еднозначно и зависи от съдържанието на цимента в сместа. На базата на получените резултати може да се предположи, че оптималното количество зеолитна нанодобавка се намира в интервала между изследваните стойности, при съдържание на цимент около 5%, което следва да бъде потвърдено с допълнителни изпитвания. Тези данни дават насоки за провеждането на допълнителни експериментални изследвания с различни количества зеолитна нанодобавка с цел определяне на нейното оптимално съдържание.
- Установена е линейна зависимост между съдържанието на хидравлично свързващо вещество STRENTOR и якостта на едноосов натиск, описана с уравнението $y = 14x + 0.01$, където x е съдържанието на хидравлично свързващо вещество STRENTOR (%), а y е якостта на едноосов натиск (MPa).
- Увеличаването на хидравлично свързващо вещество STRENTOR от 4% на 6% води до ≈49% нарастване на якостта (от 0,57MPa до 0.85MPa).
- При влагане на хидравличното свързващо вещество Strentor в количества 4÷6% се получават по-ниски стойности на якостта на едноосен натиск в сравнение със смеси, стабилизирани единствено с цимент в същите количества. Вероятният принос на тази добавка не е свързан с повишаване на якостта на натиск, а с подобряване на деформационните характеристики на материала и намаляване на риска от крехко разрушаване на възглавницата при въздействие на динамични натоварвания.
- Получените резултати потвърждават, че оптимизацията на състава на стабилизираните почви изисква балансиран подход между количество свързващо вещество и използването на добавки. Нанодобавките, като зеолит, имат потенциал, но приложението им следва да бъде внимателно дозирано спрямо съдържанието на цимент. Хидравличните свързващи вещества могат да се явят като алтернатива спрямо използването на цимент при стабилизацията на льосовидна глина.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Minkov, M. 1968. The Loess in North Bulgaria. A Complex Study. Sofia, Publishing House of the Bulgarian Academy of Sciences, 202 p. (in Bulgarian)
[2] Evstatiev D., "Improving construction soils", BAS, Sofia. 2009
[3] Минков, М., Д. Евстатиев. 1975. Основи, облицовки и екрани от заздравени льосови почви. С., Техника, 189 с
[4] Evstatiev, D., Karastanev, D. Izsledvania i prilozhenia na tsimentolyosa v Bulgaria. BAN, Inzhenerna geologia i hidrogeologia, 27, 2013, 85 – 112
[5] EN 13286-2:2010, Test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction
[6] EN 13286-41:2010. Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures