



ИЗСЛЕДВАНЕ ЗА ОПТИМАЛНИ ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕКТРОХИМИЧНОТО ЗАЗДРАВЯВАНЕ НА ГЛИНА

Петър Донеv
petardonev@abv.bg

*ВТУ „Т. Каблешков“ гр. София, 1574, София, ул. „Гео Милев“ 158
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: Електрокинетични процеси, инжектиране, стабилизиращ разтвор, якост на срязване, ареометров анализ, максимално напрежение, протичащ ток.

Резюме: В изградената пътна и железопътна инфраструктура на България съществуват насипи, изградени от глина, които нямат достатъчно носимоспособност за съвременната по-висока интензивност на движението в някои участъци. Така се влошава сигурността на движението и се налага намаляване на скоростта на превозните средства. Често тези участъци са на трудно достъпни места и прекъсването на движението по тях за стабилизиране на земната основа чрез укрепителни съоръжения е икономически неизгодно.

Целта на проведеното изследване е да се потърсят нови оптимални решения за параметрите на технологията на електро-химичното заздравяване, за да стане то подходящ ефективен метод за по-широко приложение в практиката на транспортното строителство.

1. Кратък обзор по проблема

Електрохимичното заздравяване на слаби строителни почви у нас е сравнително нов метод, експериментиран и внедрен от Лилян Драганов [1] в края на миналия век. Грей, 1970 експериментира електроосмотично заздравяване на слаби почви с алуминий, а Акар и др. 1993 установяват, че на електрохимично заздравяване не подлежат слабо водонаситени едрозърнести пясъци и пластични глини [4]. С електрохимичното подобряване на якостно - деформационните свойства на глината се гарантира безаварийната експлоатация на изградените съоръжения, когато натоварванията нараснат, а земната основа се водонасити. Носимоспособността на глинестите почви рязко намалява при водонасищане. Промените на водното съдържание често предизвикват набъбване или свиване, проявява се хидростатичен натиск и всичко това въздейства на строителните конструкции, които са върху тях. Водата в глината е свързана или свободна, обвива зърната на фино-алевритовата фаза и чрез нея се осъществява сцеплението между минералните частици.



Фиг.1 Экспериментална постановка на електрохимичното заздравяване

Структурните връзки между глинестите и другите колоидни частици и агрегати имат различен строеж и при натоварването от конструкциите почвите започват да се разрушават в контакта между водата и твърдата фаза. Якостта на глинестите почви се определя преди всичко от дебелината на водните обвивки на частиците - колкото са по-дебели водните обвивки на частиците, толкова якостта на почвата е по-малка[1].

Земното платно на магистралите и ж.п. линиите преминава през разнообразни почвени формации. Благоприятни за електрохимично заздравяване са строителните глинести почви с кватернерска и палеогенска възраст, които са разделени на пет инженерно-геоложки райони у нас.

2. Экспериментална постановка, стабилизиращи разтвори и електроди на лабораторното проучване

Целта на това проучване е да се оцени използването на електро-кинетичната стабилизация – ЕКС като ефективен метод за заздравяване на слаба глинеста почва. Изследванията са проведени лабораторно, използвайки четири ненарушени проби от тъмносиви глинени с твърда консистенция от извадена ядка с диаметър 100mm от сондаж № 7 от дълбочина 7.50 m и 22 m от обект на Метростанция №12 в София. Химическите вещества, използвани като електролити в експериментите, са два вида: натриев силикат (водно стъкло), както и разтвор на калциев двухлорид с концентрации 15% и 30%.

Като изходна суровина за получаване на електролита използваме отпадъчен продукт от варовик (CaCO_3) на прах от кариерата на гара Карлуково и разтвор на солна киселина (HCl) с концентрация 37%. В резултат на реакцията се получава калциев двухлорид и въглеродна киселина:



При това изследване се използва източник на постоянен ток TEC5060 с максимално напрежение 100 V. За електроди са използвани алуминиеви тръбички с диаметър 10mm и стоманени плоски електроди с дължина 110 mm, ширина 11 mm и дебелина 5mm, оформени като филтър (тръбичките са пробити в четири реда с дължина 90mm с отвори 3mm, за да може да се инфилтрира заздравяващият разтвор в цялата проба от ядката, която е с диаметър 100mm (фиг. 1). Разстоянието между електродите е 55mm при три от пробите и 40 mm при четвъртата (проба №3). Подаваното напрежение между електродите за заздравяване на пробите е от 30 V до 100 V, за време от 1, 3 и 5 дни. През анода са инжектирани разтвори на калциев двухлорид

180 ml с концентрация 30% и 200 ml с концентрация 15%, както и 65 ml натриев метасиликат (водно стъкло, което се предлага в търговската мрежа).

Преди и след електрокинетичната обработка една проба е изпитана за якост на срязване в едноплоскостен апарат тип *Taylor* в лабораторията на „Аква - тера консулт“ ЕООД - гр. София. В лабораторията по земна механика на „As Geo“ ООД - гр. София са извършени изследвания за определяне на физическите свойства на пробите преди и след електрохимичното заздравяване, съгласно Българските и Европейски стандарти.

3. Геотехнически свойства на глинестите строителни почви

3.1. Предпоставки на физико – химичната структура на глината

Механичните свойства на глинестите минерали се определят от кристалния им строеж. Основните структурни единици са силициево-кислородният тетраедър SiO_4 и алуминиево-кислородно-хидроксилният октаедър $\text{Al}(\text{O},\text{OH})_6$. При амфотерно заместване на Si и Al с по-нисковалентните елементи Ca и Mg се получават съответно калциево-кислородно-хидроксилен октаедър $\text{Ca}_3(\text{O},\text{OH})_6$ и магнезиево-кислородно-хидроксилен октаедър $\text{Mg}_3(\text{O},\text{OH})_6$. Тетраедричните единици са свързани с върховете на своите основи и образуват тетраедрични решетъчни слоеве, а октаедрите се съединяват в странични ребра и образуват октаедрични решетъчни слоеве, които перпендикулярно на диагонала са развити неограничено, а по посока на диагонала образуват пакети. Якостните и деформационните показатели на глинестите почви се определят от различията в състава на тетраедричните и октаедричните слоеве и от отсъствието или наличието на водни прослойки [1].

Строителните почви са полифракционни, но свойствата им обикновено се определят от преобладаващата маса. Зърнометричният състав на пясъчната фракция оказва съществено влияние на електрокинетичните процеси при електрохимичното заздравяване. След електрокинетичната обработка разнوزърнестите среди преминават в равнوزърнести, при което се получават големи количества водоустойчиви агрегати (прах и пясък) за сметка на глинестата фракция, което се вижда от табл.1.

3.2. Опитни резултати за физичните показатели на глината



Фиг.2: Зърнометрични криви на натуралната и електрохимично заздравената проба

Геотехническите показатели на опитните проби в естествено състояние и на лабораторно заздравените са отразени на фиг. 2

Ареометричният анализ е извършен с ареометър модел „Casagrande“ № 49 TS „М“, съобразно българските и европейски стандарти: CEN ISO/ IS 17892-1/12:2004, БДС EN ISO 14688-1 и БДС EN ISO 14688-2. От диаметъра и процентното съдържание на всяка фракция от ареометричния анализ са построени зърнометричните криви на незаздравената и електрокинетично заздравената проба на фиг. 2.

4. Описание на електрохимични процеси, протекли при заздравяване на лабораторните проби

Електрохимичните процеси се пораждат от протичащия през пробата постоянен ток с максимално напрежение $U_{\max} = 100 \text{ V}$. Преди заздравяването и без инжектиране на заздравяващ (стабилизиращ) разтвор между електродите на четирите проби за време от 3 до 7 часа е подавано постоянно максимално напрежение $U_{\max} = 100 \text{ V}$. Електрохимични процеси не протичат поради ниската влажност на пробата и отсъствие на Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} и K^{+} катийонни. В този случай пробите са аналогични на зареден плосък кондензатор.

4.1. Приложено напрежение, състав на разтворите и протекло време за опитите

Проба №1 е подложена на електро-кинетично заздравяване. За период от 18 часа през катода в нея се инжектират 180ml, 30% разтвор на калциев двухлорид (CaCl_2) на порции от 3 ml до 15 ml. През пробата протича електрически ток с големина $I = 0,3\text{A}$. Електрохимичните процеси протичат в момента на инфилтриране на порцията от стабилизиращия разтвор. Големината на електрическия ток намалява до нула след една две минути. След престой от 20 дни пробата е подложена отново на електрохимично заздравяване. При подадено напрежение от $U_{\max} = 100 \text{ V}$ за 7 часа, без вкарване на заздравяващ разтвор, електрохимични процеси не протичат. При смяна на поляритета между електродите и инжектиране на електролит протича ток с големина от 0,2A, който скоро намалява до 0. И от двата електрода се отделя хлор и се наблюдава разяждане на алуминиевите електроди. Когато вкарваме през анода 30% разтвор на калциев двухлорид (CaCl_2), на катода се отлагат глинести минерали. Смяната на посоката на протичащия електрически ток между електродите (смяна на поляритета) е извършена на три цикъла. През първия и втория цикъл за четири часа са инжектирани на порции 40 ml и 50 ml 30% разтвор на калциев двухлорид. През третия цикъл на смяна на поляритета за 7 часа в пробата са инфилтрирани 20 ml 30% разтвор на калциев двухлорид в катода. Електрохимичното заздравяване на проба №1 завършва, като между електродите е подавано постоянно напрежение от 20 V до 100 V. През това време в положителния електрод (анода) са инжектирани 150ml 30% разтвор на калциев двухлорид. От отрицателния електрод (катода) се изпарява хлора. Електрическият ток, протичащ през пробата, е с големина 0,3A за една период от две минути и намалява до нула, когато напрежението достигне $U_{\max} = 100 \text{ V}$.

Проба №2 е подложена на електрохимично заздравяване за 3 дни при подадено максимално напрежение на апаратурата $U_{\max} = 100 \text{ V}$. За това време в пробата са инжектирани 350 ml 30% разтвор на калциев двухлорид и 170 ml 15% разтвор на калциев двухлорид. При включване на източника за постоянен ток напрежението нараства от 15 V до 100 V. Електрическият ток протичащ през пробата намалява от 1,5A до 0,4 A за време 30 sec. Изтеглени са 70 ml течност от катода за период от 7 часа. След това на източника за постоянен ток е зададено напрежение $U_{\max} = 50 \text{ V}$. Силата на

протичащия електрически ток през пробата от 1А намалява до 0,2А за време една минута .

Проба №3 е електрохимично заздравявана със 170 ml 15% разтвор на калциев двухлорид, инжектиран на порции през плоски електроди от стоманена ламарина с дължина 11 mm , ширина 10 mm и дебелина 5 mm за период от пет дни. Характерно за електрохимичното заздравяване е, че през първите четири часа е зададено напрежение $U_{max} = 30 V$ на източника за постоянен ток. През пробата протича ток с големина от 0,2А за две минути и намалява до нула. След това заздравяването продължава три дни при зададено напрежение $U_{max} = 70 V$ на източника за постоянен ток с инжектиране през електродите на 15% разтвор на калциев двухлорид на порции от 5 ml през първия ден а през останалите два дни - на порции от 10 ml. През четвъртия и петия ден на стабилизирането между електродите на пробата е подадено напрежение $U_{max} = 100 V$, и се инжектира на порции от 10 ml 15% разтвор на калциев двухлорид. Електрически ток протича през пробата в момента на инжектиране на порцията от разтвор на калциев двухлорид .

Проба №4 е електрохимично заздравена за 20 часа с 65 ml воден разтвор на калиев или натриев силикат с хидратиран оксид на силиций $K_2(Na_2)SiO_3 + SiO_2 \cdot H_2O$ (водно стъкло) инжектиран на порций от 5 ml и 10 ml при подадено максимално напрежение между електродите $U_{max} = 100 V$. Протичащият ток е с големина от 0,2А в момента на подаване на напрежението и намалява до 0 за една две минути.

4.2. Отлагане на вещества по електродите

При електрохимичното стабилизиране на проба 1 с маса 1635,94g на катода се отлага 6,44g $CaCO_3$, а на анода 6,63g $CaCO_3$. При проба №2, която е с маса 760,86g, на катода се отлага 22,94g $CaCO_3$, а на анода се отлага 7,63g $CaCO_3$. Еднаквото количество отложен $CaCO_3$ на електродите на проба №1 се дължи на факта, че електрохимичното заздравяване е извършено с циклична смяна на поляритета на захранваното напрежение между електродите.

4.3. Якостни характеристики на глината

Резултатите от лабораторното определяне на якостта на срязване в едноплоскостен апарат тип *Taylor* на незаздравяваната и електрохимично заздравената проба са отразени в табл.1. От нея се вижда ,че тангенциалното напрежение в катодната зона на заздравената проба се е увеличило 2.6 пъти спрямо незаздравената. А това е важен параметър при проектиране устойчивостт на откоси.

Таблица 1: Якостни характеристики на глината

	Незаздравена проба		Заздравена проба-анодна зона		Заздравена проба-катодна зона	
σ , kPa	111	333.0	111.0	333.0	111.0	333.0
τ , kPa	90.0	218.0	84	213.0	94.0	244.0
ϕ , deg	29.97		30.16		34.05	
c , kPa	26.0		19.5		19.0	

5. Дискусии

Движението на заредени частици в почвата под действието на електрическо поле се обяснява с протичането на четири сложни физико – химични процеси, каквито са електролиза, електроосмоза, електрофореза и електромиграция (фиг 3). Съвместяването

на тези сложни електрохимични процеси променя физикохимичните, хидроложки и механичните свойства на почвите под действието на електрическо поле. С тези процеси могат да се инжектират химични съединения в почвата като вар и циментови разтвори през един от електродите. Така намалява делът на глинестите частици и се увеличава този на пясъчно-алевритовата фракция. Електрокинетичното заздравяване предизвиква промени в химията на флуида в порите, дифузията в двоен слой и хидравличната проводимост на почвата. Геохимичните реакции включват различни процеси, каквито са например сорбция-десорбция, утаяване/разтваряне и окисление-редукция. Jayasekera и Hall [5] описват електрохимично заздравяване на глина в Австралия. Интензитетът на протичащия ток е бил от 0,2А до 0,01А в продължение на 14 дни при напрегнатост на електрическото поле 0,5 V/cm. Електрохимичните процеси се прекратяват при заздравяване повече от 14 дни. Електропроводимостта на почвата е най-висока близо до анода и намалява в близост до катода. Стоманените електроди се окисляват и произвеждат Fe^{3+} катийони. Железните Fe^{3+} катийони също са податливи на миграция от анода към катода и взаимодействат с глинестите минерали. Следователно, Fe^{3+} катийоните могат също да допринесат за електрическата проводимост на почвата. Затова се счита, че железните електроди са най-ефективни. Електропроводимостта на почвата по напречното сечение на пробата зависи от количеството и проводимостта на йоните, присъстващи в електролита. Водородните H^+ катийони са по-мобилни в разтвор спрямо други йони. Концентрацията на водородни H^+ катийони допринася в голяма степен за електрическата проводимост на почвата. Когато почвите се подлагат на електрохимична обработка, влияние върху електрическата проводимост оказва и степента на соленост на почвата.

Очевидно е, че структурата и съставът на глината лимитират времето за протичане на електро - химическия процес. При нашите опити силата на тока пада доста по-бързо.

6. Изводи и заключения

Извършените експерименти на лабораторните проби са недостатъчни, за да бъдат изяснени електрохимичните реакции и взаимодействия на глинестите частици под електрично поле. Затова са необходими допълнителни изследвания, за да бъдат по-добре изучени физикохимичните изменения в глинестите почви и ефективността от електрохимичното стабилизиране. Интензитета на електричния ток трябва да е от порядъка на 2 до 4 A/m².

Песъчливите глинени и глинестите пясъци са по-податливи на електрохимично заздравяване спрямо пластичните глинени поради по-високата си водопропускливост.

За повишаване на ефективността от електрохимичното заздравяване е необходимо инжектиране на подходящи химични стабилизатори (като вар, цимент и гипс). Оптимизиране на всички променливи (напрежение, времето за обработка, разстояние между електродите, монтажни и експлоатационни разходи и рентабилност на процеса на заздравяване).

Прилагането на природен варовик, стрит на прах за целите на почвеното заздравяване е напълно възможно.

Експерименталните резултати показват, че има потенциал за развитие на електрокинетичното заздравяване за стабилизиране на слаби почви. Електрохимичният метод може да се използва и като алтернативен метод на инжекционния за заздравяване на слаби глинести почви на земните платна на ж.п. линии, магистрали, фундаменти на сгради и мостове.

Благодарности

Изказвам най-искрени благодарности на катедрата по химия във ВТУ „Тодор Каблешков“ за голямото съдействие и помощ при изготвянето на разтворите от калциев дихлорид и дадените методически напътствия!

Благодаря на катедрата по електроснабдяване и електрообзавеждане в транспорта към ВТУ „Тодор Каблешков“ за предоставената ми електротехническа апаратура!

Благодаря на лабораториите по Земна механика към „Аква - тера консулт“ ЕООД и „AS-Geo“ ООД - гр. София за проведените изследвания!

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Драганов, Л. Електрохимично заздравяване на скалите. С., Техника, 1986.
- [2] Geeta A. and Rakaraddi, P., A study on stabilization of soil by electro kinetic method, 2014
- [3] Moayedi, H., Huat, B.K Electrokinetic Injection in Highly Organic Soil—A Review, 2010
- [4] Nasim Mosavat¹, and Gary Chai A Review of Electrokinetic Treatment Technique for Improving the Engineering Characteristics of Low Permeable Problematic Soils Int. J. of GEOMATE, June, 2012, Vol. 2, No. 2 (Sl. No. 4), pp. 266-272
Geotec., Const. Mat. and Env., ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan
- [5] Jayasekera, S. and Hall, S., "Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments." Geotechnical and Geological Engineering. 25(1), 2007, pp. 1-10.

STUDY OPTIMAL PARAMETERS OF ELECTROCHEMICAL WOUND CLAY

Peter Donev
petardonev@abv.bg

***Todor Kableshkov University of Transport,
1574 Sofia, 158 'Geo Milev' Street,
BULGARIA***

Key words: *electric kinetic processes, injection stabilizing solution, shear strength, areometric analysis, maximum voltage flowing current.*

Abstract: *There are many embankments built of clay, who have not enough bearing capacity for modern higher intensity of movement in some areas of the existing road and rail infrastructure in Bulgaria. This worsens traffic safety and leads to reduce the speed of vehicles. Often these areas are hard to reach places and interruption of traffic to stabilize the ground by strengthening facilities is uneconomic.*

The purpose of the survey is to seek new solutions for optimal parameters of the technology of electric-chemical strengthening, to make it effective method suitable for wide practical usage of transport construction.