

21. СИЛИКАТИЗАЦИЯ НА ДИСПЕРСНИ ПОЧВИ

1. Уводни бележки

Силикатизацията се основава на циментиращата способност на гела на силициевата киселина, който се отделя при инжектиране на почвата с водно стъкло - $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ или смес на водно стъкло с глина, с органични вещества и др. (вж. гл. 13). Гелът запълва порите, понижава проницаемостта и създава нови кохезионни контакти между почвените частици.

Силикатизацията се използва за подобряване на качествата на пясъчливи и лъсови почви. Създаването ѝ е свързано с имената на Jeziorski и Joosten в Германия. Понастоящем се прилага в няколко разновидности: двуразтворна, едноразтворна, газова и електросиликатизация.

В зависимост от крайния резултат силикатизацията се разделя още на заздравителна и уплътнителна (тампоначна). При заздравителната силикатизация се увеличава якостта на почвата, а при уплътнителната ефектът се изразява предимно в намаляване на порестостта и нарастване на водоплътността. Това разделяне е доста условно, тъй като заздравителната силикатизация често е и уплътнителна, понеже инжекционният разтвор запълва голяма част от порите на почвата и намалява нейната водопроницаемост.

Главните елементи на една уредба за силикатизация са съдове за разтвор на водно стъкло и химични реагенти, помпа за налягане, херметизиран сондаж, в който се спуска инжектор, тръби и измерителни устройства

Инжектирането се осъществява чрез пропиване или чрез разрушаване с помощта на маншетни тръби, както при циментацията

2. Двуразтворна силикатизация.

Състои се в последователно нагнетяване в почвата на водно стъкло и химичен разтвор, които встъпвайки във взаимодействие дават неразтворим гел, запълващ порите на почвата. Най-напред се нагнетява водното стъкло, а след това химичният разтвор – най-често соли на алкалоземни метали и преди всичко CaCl_2 . Водното стъкло има плътност $1,35-1,44 \text{ g/cm}^3$, а разтворът на CaCl_2 – $1,26-1,36 \text{ g/cm}^3$.

Основната химична реакция при двуразтворната силикатизация протича по следната схема:



Тази реакция продължава няколко месеца с краен резултат образуване на втвърден гел от силициева киселина и калциев силикат, който се отлага в порите и контактите между почвените частици.

Ефектът на силикатизацията зависи от свойствата на разтвора и на почвата, както и от спазването на техноложките изисквания. По-добри резултати се получават с водно стъкло с по-висок модул, например при

$M_c=2,8-3,8$. По принцип по-добър ефект се постига с по-гъсти разтвори на водното стъкло, но когато те имат плътност над $1,44 \text{ g/cm}^3$ се намалява проникващата им способност.

Двуразтворната силикатизация е приложима при пясъчни почви с k_f между 2 и 80 m/24 h. Якостта на заздравената почва се увеличава с течение на времето, като основното нарастване е през първите 10 дни (до 70-80%), а останалите 20-30% се прибавят до третия месец. Крайната якост на едноосен натиск може да достигне до няколко МРа.

Основните недостатъци на двуразтворната силикатизация произтичат от сравнително сложната технологична схема и от трудното постигане на еднородна заздравена зона при пясъци с по-малък k_f . При нагнетяването на затвърдителя в пясък с $k_f < 5-6 \text{ m/24h}$ вече инжектираното водно стъкло се изтласква от порите и по този начин не протича пълноценно взаимодействието, посочено в горепосочената реакция. Това прави практически трудно осъществимо силикатизирането на дребнозърнестите, праховите и глинестите пясъци.

3. Едноразтворна силикатизация.

Състои се в нагнетяване в дисперсната почва на разтвор на водно стъкло, съдържащ химически добавки, които след известно време предизвикват неговото втвърдяване. Ролята на втвърдител могат да изпълняват и вещества, съдържащи се в подземната вода, в поровия разтвор и в поглъщащия комплекс на почвата. В такъв случай се инжектира само разтвор на водно стъкло с подходящ вискозитет. Използуването на поредки разтвори на водно стъкло с или без втвърдител позволява да се заздравяват успешно прахови пясъци и лъос с k_f до 0,3-0,5 m/24 h.

Експериментирани са голям брой химически вещества, като втвърдители при едноразтворната силикатизация (Соколович, 1980; Воронкевич, Ed, 1981).

В зависимост от вида на втвърдителя разтворите се разделят на основни и кисели. При основните разтвори преминаването на зола в гел настъпва при неутрализация на 25 до 45 % на NaOH, която се съдържа във водното стъкло и при $pH \approx 10,5$, а при киселите разтвори гелификацията настъпва при $pH = 3,5-5,5$. Добри резултати се получават с натриев алуминат - $NaAlO_3$, който предизвиква равномерна гелификация на водното стъкло и значителна якост на затвърдения гел. Това е т.н. алумосиликатна рецептура, която е използвана при уплътняване на основата на Асуанския язовир. Най-добри резултати са получени с разтвор на водно стъкло с плътност $1,15 \text{ g/cm}^3$ и силикатен модул 2,7-2,8 и натриев алуминат с модул 1,5-1,7 и плътност $1,05 \text{ g/cm}^3$.

Акрило-силикатната рецептура е с разтвор на водно стъкло с плътност $1,135 \text{ g/cm}^3$ и 10-20 % разтвор на акрилова киселина (вж. гл. 13). При температура 18-19° свързването започва след 60-70 min. Разтворът е кисел ($pH=4,5-4,7$) и не е подходящ при почви с високо карбонатно съдържание.

Други втвърдители, които се използват при едноразтворната силикатизация са разтвори на оксалова киселина ($C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$) и алуминиев сулфат ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), силикофлуороводородна киселина (H_2SiF_6), други киселини (HCl , H_2SO_4 , H_3PO_4) и соли (Na_2CO_3 , $NaHCO_3$, $NaHSO_4$ и др.) – вж гл. 13. Силните киселини не са намерили практическо приложение поради бързото пресичане на разтвора.

Инжектирането на водно стъкло без втвърдител дава добър резултат при почви, които съдържат соли, пресичащи силикатния гел. През 1925 г. Joosten патентова метод за ограничаване на притока на силно минерализирани води при строителство на минни изработки. Водното стъкло след инжектиране в почвата коагулира под действие на солите, разтворени във водата.

Едноразтворната силикатизация без втвърдител за борба с пропадането и филтрацията на лъсовите почви е предложена от В. В. Аскалонов през 1946 г. Инжектира се разтвор на водно стъкло с плътност $1,09-1,18 \text{ g/cm}^3$ с налягане $1 - 3 \text{ atm}$. Водното стъкло коагулира под действие на водоразтворимите соли в лъоса и на Ca^{++} от поглъщащият комплекс. По повърхността на почвените частици се отлагат циментационни обвивки, които създават здраво сцепление между тях. Непрореагиралата част от разтвора, която изпълва порите с течение на времето се кондензира и образува слаб гел от силициева киселина, който понижава водопроницаемостта. След 1-3 седмици всичият разтвор инжектиран в лъоса преминава в гелообразно състояние.

При повечето лъсови разновидности ефикасността на силикатизацията се определя предимно от взаимодействието с поглъщащия комплекс и в по-малка степен от реакцията с водоразтворимите соли, които са в неголям процент. Освен това сорбционният капацитет на лъоса нараства значително в алкална среда. След инжектирането, в резултат на физикомеханични процеси, от 1 m^3 лъос от обменния комплекс се отделят $4,5-4,7 \text{ kg Ca}^{++}$ или $8,3-13,9 \text{ kg Ca(OH)}_2$. Калциевият хидрат, който е във високодисперсна форма взаимодействува със силициевата киселина и по повърхността на почвените частици се образува неразтворимо във вода циментиращо вещество, чийто състав е недостатъчно изяснен. Връзката между разтворимостта на циментиращия гел, сорбционния капацитет и времето е изяснена от Соколович (1980).

При този механизъм на взаимодействие ефикасността на едноразтворимата силикатизация се увеличава с нарастване на сорбционния капацитет на лъоса. Например, в Узбекистан, където лъосът има по-малък сорбционен капацитет в алкална среда ($10-12 \text{ mg.eq}$) се получава по-малък заздравителен ефект, отколкото в европейската част на Русия, където сорбционният капацитет на лъоса е по-голям ($24-32 \text{ mg. eq}$).

След силикатизацията лъсовите почви придобиват водоустойчива структура и загубват напълно пропадащността си. Нещо повече, проби от силикатизиран лъос имат якост на едноосен натиск до $1,5 \text{ MPa}$.

Реализирани са редица технологички подобрения на силикатизацията на лъоса, които направиха метода още по-ефикасен (Соколович,1980). Установено е, че увеличаването на силикатния модул на водното стъкло от 2,8 до 3,5 води до 1,5-2 пъти нарастване на якостта на силикатизираната маса. Благоприятно влияе и повишаването на температурата на силикатния разтвор. Разходът на водно стъкло може да се намали до 30 %, ако най-напред се нагнетява по-гъст разтвор (обемно тегло 1,19 g/cm³), а след това по-рядък (обемно тегло 1,05 g/cm³). Подобен резултат се получава и при постепенно увеличаване на инжекционното налягане.

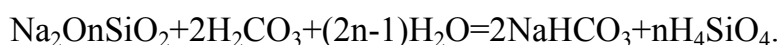
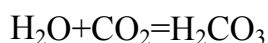
Посредством разреждане на водното стъкло с амонячен разтвор е постигнато увеличаване на обема и якостта на силикатизираната маса. Направени са успешни опити за борба с пропадането на лъоса с инжектиране само на амонячен разтвор без водно стъкло.

При лъос с добре изразена макропореста структура, може да се използва заливане на дъното на строителната яма с по-рядък силикатен разтвор. В такъв случай, за да се избегне колматацията на най-горния лъосов слой дъното се покрива с тънък пясъчен пласт. За ускоряване на проникването може да се използват сондажни пясъчни дренажи.

4. Газова силикатизация.

Състои се от последователно нагнетяване в почвата на разтвор на водно стъкло и въглероден диоксид. Използува се при пясъчни и лъосови почви. Методът е особено ефективен при водонаситен лъос, при който обикновената силикатизация се провежда много трудно.

Методът се основава на образуване на въглена киселина от взаимодействието на въглеродния диоксид с водата и от реакцията на последния с водното стъкло, което се изразява със следните химични реакции:



Водородният показател при тези реакции не е висок - рН≈8,30, което създава благоприятни условия за по-пълна полимеризация на гела на силициевата киселина. Освен това между бикарбоната и силициевата киселина (дясната част на втората реакция) протичат вторични реакции, които водят до образуване на допълнително циментиращо карбонатно-силикатно вещество.

За да протече реакцията в завършен вид е необходимо да се нагнетяват по-големи количества газ, например, при разтвор на водно стъкло с плътност 1,19 g/cm³ около 5 kg CO₂ на 1 m³ силикатизирана маса. При по-малки количества CO₂ например 2-3 kg/m³ се образува Na₂CO₃ и рН на средата нараства до 11,6, а при още по-малко количество CO₂ в порите остава значително количество непрореагирани NaOH и рН има още по-големи стойности.

Установено е, че когато алкалността на средата е над 10,5 настъпва деполимеризация на гела от силициева киселина, получен по втората формула по-горе. От движението на подземната вода може да настъпи излужване на гела и намаляване на якостта на силикатизираната маса.

При пясъчни почви газовата силикатизация дава най-добър резултат при k_f между 0,2 и 20 m/24h. При по-големи стойности на k_f настъпва голямо разсейване на газа. Установено е, че при сухите пясъци инжектирането на CO_2 позволява да се увеличи обема на силикатизираната маса с 60-75%, а при водонаситени – с 24-40% в сравнение с едноразтворната силикатизация.

Якостта на силикатизираната маса може да достигне до 2,0-2,5 МРа. Освен от k_f и техноложките фактори тя зависи още от зърнометричния и минералния състав на пясъка (Воронкевич, ред., 1981). В рамките на горепосочената стойност на k_f е благоприятно наличието на дребнозърнеста и прахова фракции. В лабораторни условия най-добри резултати са получавани с карбонатни пясъци. Неблагоприятно влияние оказва наличието на органични налепи върху повърхността на пясъчните частици.

Лъсовите почви имат най-често $k_f < 1$ m/24h и за това при тях радиусът на инжектираната зона около сондажа при едноразтворната силикатизация рядко надхвърля 1 m. Освен това образуването на циментираща гел се извършва при високи стойности на рН – между 12,2 и 13,2, което създава условия за наличие на голямо количество непрореагирала NaOH в порите с всички произтичащи от това неблагоприятни последици.

За подобряване на ефекта на силикатизацията на лъоса от 1969 г. в СССР е въведена газовата силикатизация, което спомага, както за увеличаване на инжекционния радиус така и на якостта на заздравената почва (Соколович, 1980; Ржаницин, 1986). Установено е, че вследствие допълнителното нагнетяване на CO_2 якостта на силикатизирания лъос се увеличава до 2 пъти, а излужването на силициевата киселина намалява до 4 пъти. Освен това се постига по-равномерно разпределение на водното стъкло, което позволява неговият разход да се намали с 60% без да се влошава качеството на силикатизирания лъос.

При малък сорбционен капацитет на лъоса, високо съдържание на дисперсен CaCO_2 и при степен на водонасищане $S_r > 0,7$ се постига най-добър резултат, ако най-напред се нагнети CO_2 в количество 2-3 kg/m³, след това водно стъкло стъкло с плътност 1,13 g/cm³ и накрая отново CO_2 в количество 3-4 kg/m³.

5. Електросиликатизация

При този метод чрез забити в почвата перфорирани тръби – инжектори, които служат едновременно и за електроди, се подава под налягане силикатен разтвор и се пропуска постоянен електричен ток. По-бързото и по-дълбоко проникване на силикатния разтвор се дължи на ефекта на

електроосмозата, изразяващ се в придвижването на йоните в поровия разтвор към електродите с противоположен знак (вж. гл. 24).

Под действието на тока и на силикатния разтвор, настъпва обезводняване и агрегиране на почвата, а така също нейното заздравяване с гела на силициевата киселина - якостта на едноосен натиск достига до 0,5 – 0,8 МРа. Методът е прилаган успешно при почви с по-ниска проницаемост ($k_f < 0,1 \text{ m/24h}$) – глина, глинест пясък и глинест лъос.

Електросиликатизация за укрепване на земната основа на сгради е използвана в Полша, като през железни инжектори е правено последователно нагнетяване на водно стъкло и калциев двухлорид (Ржаницин, 1986). След това през инжекторите, които са служили за електроди е пропускан електрически ток. В Румъния е използван същия начин, но за ускоряване на придвижването на разтвора освен нагнетяване е използвано и вакуумиране в катодните електроди. В Япония са прилагани разтвори с по-ниска концентрация. При глинеста почва водното стъкло е изливано в катодния електрод, а в анодния – разтвора на калциевия двухлорид. При пясъчлива почва е правено обратното.

Електросиликатизацията може да бъде едноразтворна и двуразтворна. При лъоса се използва едноразтворната електросиликатизация.

6. Приложение на силикатизацията в България

Българските специалисти са запознати със силикатизацията на лъоса още в началото на шестдесетте години (Стефанов и Кремакова, 1960). Методът е приложен за първи път за заздравяване на основите на черквата на Кольо Фичето “Св. Троица” в гр. Свищов (Венков, 1966). Силикатизирани са около 100 м³ почва. Във връзка с този случай са направени изпитвания за ускоряване на проникването на разтвора с електрически ток (електросиликатизация). По-късно в Свищов посредством силикатизация са прекратени пропадъчните деформации на основата на Икономическия техникум.

Следващо голямо приложение е заздравяването на пропадъчния лъос в основата на Народния театър в гр. Русе. Вследствие намокряне на лъоса от аварии на ВиК мрежата възниква неравномерно пропадане, което застрашава устойчивостта на този паметник на културата. След провеждане на силикатизация деформациите се прекратяват и сградата стана пригодна за нормална експлоатация.

Методът е приложен също за заздравяване на основата на склад в с. Пордим. Експерименти са извършени и на площадката на първия енергоблок на АЕЦ “Козлодуй” в рамките на проучванията за избор на подходящ метод за фундиране на Централата.

У нас силикатизацията има добри перспективи за укрепване на основите на пропаднали сгради в лъос.