УДК: 624.138.4

**Самарин Е.Н.**

к.г.-м.н., доцент кафедры инженерной и экологической геологии ФГБОУ ВПО МГУ им. М.В. Ломоносова

**Попова А.М.**

аспирант кафедры инженерной и экологической геологии ФГБОУ ВПО МГУ им. М.В. Ломоносова

**ЗАКРЕПЛЕНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ РАСТВОРАМИ КОЛЛОИДНОГО КРЕМНЕЗЕМА.**

**Abstract:** It was determined, that colloidal silica solutions can successfully used for grouting of fine and silty fine sands. It is shown that colloidal silica is hardening by additive poly-condensation under strong electrolytes action. This solution has good regulating time gelation. The unconfined stress of grouting sand samples is coursed by sand fineness and rises from coarse sand to silty fine one.

Не смотря на широкий спектр инъекционных растворов различной природы, разработанных для закрепления грунтов, до сих пор существуют определенные сложности при инъекционной обработке мелких и особенно пылеватых песков (Karol, 2003; Воронкевич, 2005). Частично решению указанной проблемы способствует применение в практике ультрадисперсных цементов (СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011; СП 35.13330.2011), несмотря на их высокую стоимость. Более того, значение d95 наиболее востребованных марок ультрадисперсных цементов находится на уровне 6-10 мкм даже без учета склонности тонкого клинкера к пептизации (Bruce, Weaver, 2007) что согласно критерию Д.Митчелла будет вызывать затруднения уже при закреплении песков с d10 на уровне 0,07-0,11 мм. Химические инъекционные растворы – жидкое стекло, амино- и фенопласты – возможно использовать только в сильно разбавленном виде, а акриламидные смолы характеризуются высокой токсичностью, даже в модифицированном виде. В связи с инъекцией пропиткой определенный интерес представляют растворы коллоидного кремнезема, которые впервые были предложены для инъекционного закрепления в 1995 г (Karol, 2003). Термин «коллоидный кремнезем» относится к стабильным дисперсиям и золям, состоящим из дискретных частиц аморфного кремнезема (Айлер, 1982). Экспериментальные исследования, проведенные с указанным раствором все еще носят эпизодический характер.

Для исследования были отобраны следующие песчаные грунты (классифицированы по ГОСТ 25100-2011).

Песок аллювиальный крупные (*al* QIV) слабо окатанный, отобранный в г.Тверь с глубины 4 м, d10 – 0,26 мм, d50 – 0,77 мм, d90 – 3,0 мм. Содержание кварца – 80 %, КПШ и плагиоклазы – 11 %, кальцит – 4 %, пироксен – 3 %, слюда и хлорит – 1,5 %.

Песок аллювиальный средний (*al* QIV) средней окатанности, отобранный в г.Москва (I надпойменная терраса, Люберецкие поля аэрации) с глубины 3 м, d10 – 0,12 мм, d50 – 0,28 мм, d90 – 1,0 мм. Содержание кварца – 91 %, КПШ и плагиоклазы – 8 %, слюда – 1 %.

Песок морской мелкий (K1a1) хорошей окатанности, отобранный в г.Москва с глубины 20 м, d10 – 0,10 мм, d50 – 0,14 мм, d90 – 0,16 мм. Содержание кварца – 96 %, роговая обманка – 2 %, слюда – 2 %.

Песок морской мелкий (*al* QIII) хорошей окатанности, отобранный в г.Сочи из разреза III (Карангадской) морской террасы с глубины 8 м, d10 – 0,10 мм, d50 – 0,14 мм, d90 – 0,23 мм. Содержание кварца – 67 %, КПШ и плагиоклазы – 29 %, ангидрит – 4 %.

Песок морской пылеватый (K1a1) хорошей окатанности, отобранный в д.Апаринки с глубины 25 м, d10 – 0,055 мм, d50 – 0,075 мм, d90 – 0,26 мм. Содержание кварца – 95 %, КПШ – 2,5 %, слюда – 2,5 %.

Пески незасолены – величина сухого остатка составляет 0,09-0,10 %. В составе водной вытяжки преобладают гидрокарбонаты и сумма натрия и калия, и только для образца песка (*al* QIII), г.Сочи отмечается преобладание кальция и присутствие сульфат-иона в вытяжке.



Рис.1. Изменение условной вязкости золя коллоидного кремнезема при разных дозировках 10 %-ого раствора хлорида натрия (при 200 С).

Пески помещались в инъекционные трубки диаметром 2 см и длиной 30 см, стенки которых изнутри покрывались парафином. Плотность скелета песков составила 1,55-1,50, коэффициент пористости 0,74-0,60, коэффициент водонасыщения – 0,01 (табл.1).

Для закрепления песков был использован коллоидный кремнеземом марки MEYCO MP 320, Концентрация SiO2 - 40$\pm $1%, pH – 9,5-9,8, Плотность (при 20$℃$) – 1,3 г/см3; Вязкость (при 20$℃$) - $\~$10 сП, поверхностное натяжение – 0,030 Н/м. В качестве отвердителя применялся 10 % раствор хлорида натрия, который смешивается с коллоидным кремнеземом непосредственно перед инъекццией. Концентрация солевой добавки определялась экспериментально (рис.1), по кинетике изменения условной вязкости золя коллоидного кремнезема (определение по вискозиметру ВП-3 с диаметром рабочего отверстия 3 мм). Полученные результаты показали, что для любых дозировок отвердителя вязкость рабочего раствора до момента схватывания практически не изменяется, либо изменяется в пределах 3-5 % от первоначальной. При завершении индукционного периода вязкость раствора повышается практически скачкообразно. Время схватывания напрямую зависит от количества отвердителя. Наиболее оптимальные рецептуры – растворы коллоидного кремнезема с 16 %-ной (время схватывания 36 мин.) и 18 %-ной (время схватывания 27,4 мин.) добавкой раствора хлорида натрия.

Сразу после схватывания гель коллоидного кремнезема имеет плотность 1,23-1,28 г/см3, а через 2 месяца хранения в воздушно-влажной среде – 1,44-1,45 %, что обусловлено постепенной потерей окклюдированной влаги и уплотнением структуры за счет образования дополнительных силоксановых связей. Это в конечном счете способствует постепенному упрочнению геля во времени. Так, начальная прочность гелей составляет 0,7 кг/см2 для 16 5-ной дозировке отвердителя и 0,6 кг/см2, увеличиваясь до 11,8 и 7,6 кг/см2 через месяц и до 14,8 и 24,6 кг/см2 через два месяца соответственно. То есть при длительном хранении гель коллоидного кремнезема, полученный отверждением 18 %-ным раствором хлорида натрия, более чем в 1,5 раза. В дальнейшем для закрепления песков был использован именно этот состав.

Инъецирование рабочего раствора производилось под давлением 1-1,5 атм., в течение 5-7 минут, объем раствора, прокачанного через каждый образец, составлял 150-200 мл. После инъекции образцы закрепленного песка вынимались из инъекционных трубок и распиливались на цилиндры, с соотношением высота/диаметр как 2:1. Верхняя и нижняя грани пришлифовывались наждачной бумагой. Сразу после закрепления определялась прочность двух образцов на одноосное сжатие. Оставшиеся образцы закрепленного песка хранились в воздушно-влажной среде в течение полугода, при периодических испытаниях на раздавливание (по два образца на каждом сроке). Показатели физических свойств определялись согласно ГОСТ 5180-84, гранулометрический состав – ГОСТ 12536-2014, состав водной вытяжки – ГОСТ 26483-85 – ГОСТ 26490-85. Рентгеноструктурный анализ выполнен на приборе ДРОН-3 к.г.-м.н. Косоруковым В.Л., электронная микротомография закрепленных образцов – к.г.-м.н. Черновым М.С.

Электронно-микроскопические исследования показали, что затвердевший гель коллоидного кремнезема имеет тонкозернистую структуру, что подтверждает выводы Р.Айлера (1982) о механизме аддитивной поликонденсации, реализуемом при формировании пространственной структуры геля (рис.2).



Рис.2. Структура геля коллоидного кремнезема. Образец крупнозернистого песка (al QIV), г. Тверь (фото Чернова М.С.).

В образце песка, инъектированного раствором коллоидного геля, на поверхности песчаных зерен формируется тонкая пленка кремнегеля толщиной 6-8 мкм (рис.3), что обеспечивает формирование в образце пространственной конденсационной структуры, обеспечивающей его прочность.



Рис.3. Пленка геля на зерне. Образец мелкозернистого песка (K1a1), г. Москва.

В результате инъекционной обработки пески претерпевают существенные изменения (табл.1).

Таблица 1. Физических характеристики песков после закрепления

|  |  |
| --- | --- |
| Показатель | Образец песка |
| Крупный(al QIV),г. Тверь | Cредний(al QIV),г. Москва | Мелкий(K1a1),г. Москва | Мелкий(m QIII),г.Сочи | Пылеватый (K1a1), д.Апари-нки |
| Влажность, % | 0,3/3,0 | 0,1/3,0 | 0,2/4,0 | 0,1/3,0 | 0,3/4,0 |
| Плотность грунта, г/см3 | 1,50/1,90 | 1,50/1,84 | 1,52/1,82 | 1,51/1,82 | 1,49/1,83 |
| Плотность частиц, г/см3 | 2,48/2,25 | 2,55/2,25 | 2,64/2,18 | 2,55/2,19 | 2,69/2,20 |
| Плотность скелета, г/см3 | 1,50/1,85 | 1,50/1,75 | 1,52/1,75 | 1,51/1,77 | 1,46/1,76 |
| Пористость, % | 36/11 | 41/7 | 42/7 | 41/6 | 45/8 |
| Коэффициент пористости, д.е. | 0,56/0,12 | 0,70/0,08 | 0,74/0,08 | 0,69/0,06 | 0,81/0,09 |
| Относительная влажность, д.е. | 0,01/0,46 | 0,01/0,84 | 0,01/0,97 | 0,01/0,88 | 0,01/0,88 |

Примечание: в числителе – исходные показатели песков; в знаменателе – то же, после закрепления.

Плотность твердого компонента закономерно падает до 2,19-2,25 г/см3 из-за малой плотности кремнегеля (1,23-1,45 г/см3), причем наибольшее снижение характерно для более тонкозернистых песков вследствие большей удельной поверхности песчаных зерен и, следовательно, большего количества пленочного вещества. Заполнение порового пространства образовавшемся гелем приводит к резкому уменьшению пористости – с 36-45 % до 6-11 % - и увеличению плотности скелета – до 1,82-1,90 г/см3. При столь плотной структуре влажность в 3-4 % обеспечивает водонасыщение в 84-97 % (для крупнозернистого песка – 46 %).

Кинетика изменения прочности на одноосное раздавливание образцов закрепленных песков, хранившихся в воздушно-влажной среде приведена в табл.2.

Таблица 2. Кинетика изменения прочности на раздавливание образцов песков, обработанных раствором коллоидного кремнезема.

|  |  |
| --- | --- |
| Срок хранения | Прочность на раздавливание, кг/см2 |
| Крупный(al QIV),г. Тверь | Cредний(al QIV),г. Москва | Мелкий(K1a1),г. Москва | Мелкий(m QIII),г.Сочи | Пылеватый (K1a1),д.Апари-нки |
| После схватывания | 1,06 | 1,29 | 1,30 | 3,51 | 3,42 |
| 7 суток | 2,03 | 3,2 | 3,2 | 5,7 | 6,41 |
| 30 суток | 2,04 | 3,39 | 4,79 | 8,2 | 8,53 |
| 60 суток | 2,52 | 4,35 | 5,53 | 9,58 |  |
| 365 суток | - | - | 7,36 | 12,47 | 13,33 |
| 720 суток | 4,86 | 6,52 | - | - | - |

Примечание: в числителе – исходные показатели песков; в знаменателе – то же, после закрепления.

Наименьшая прочность характерна для образцов крупного песка (al QIV), г. Тверь – от 1,06 кг/см2 сразу после схватывания до 4,86 кг/см2 через 2 года хранения. Этот факт в совокупности с неудовлетворительным тампонажным эффектом (табл.1) свидетельствует о нецелесообразности использования коллоидного кремнезема для инъекционной обработки крупного песка раствором коллоидного кремнезема. Для всех остальных песков достигается как удовлетворительный тампонаж – остаточная пористость на уровне 6-9 %, так и достаточно высокая прочность, которая возрастает с ростом дисперсности песков.

При сравнении мелких песков очевидно, что полиминеральный мелкий песок (m QIII), г.Сочи, содержащий в составе некоторое количество водорастворимых сульфатов, закрепляется коллоидным кремнеземом значительно лучше, чем мелкий чистый кварцевый песок (K1a1), г.Москва. Возможно, в данном случае присутствие водорастворимых сульфатов, способствует лучшей коагуляции кремнегеля.

Таким образом, проведенные исследования позволяют констатировать, что растворы коллоидного кремнезема наиболее эффективны при инъекционной обработке именно мелких и пылеватых песков.