

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ИНЪЕКЦИЕЙ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ

THE TECHNOLOGY AND DESIGN FEATURES OF STRENGTHENING SANDY SOIL BY INJECTING CEMENT MORTAR

М. Н. ИБРАГИМОВ, канд. техн. наук

Рассматривается способ инъекционного закрепления песчаных грунтов растворами из микроцементов. Излагаются основные концепции физических процессов, происходящих в цементных растворах в процессе фильтрации в песках. Отмечаются недостатки способа в непредсказуемости получаемых объемов и прочности закрепления и пути их устранения.

The paper presents a method for strengthening sands by injecting microcement mortar. The basic principles of physical processes occurring in cement solution infiltrating through sand are described. The paper discloses shortcomings of the method regarding to unpredictability of the produced material volume and strength, and a way to eliminate ones.

Ключевые слова:

Гироразрыв, закрепленный грунт, инъекция, микроцементные растворы

Key words:

Gyro disturbance, injection, microcement mortar, stabilized soil

Введение

Закрепление песчаных грунтов инъекцией цементных растворов широко применяется в фундаментостроении. Наиболее часто оно применяется для усиления грунтов в основаниях существующих зданий и сооружений с целью их защиты от разрушения, когда в непосредственной близости ведется строительство многоэтажных жилых и административных комплексов с глубокими подземными многоярусными гаражами. Этот способ успешно применяется и при ликвидации водопритоков в котлованы строящихся объектов.

Главными достоинствами такого закрепления являются техническая простота и удобство применения, а также экологическая безопасность для окружающей среды. Кроме того, способ не требует сложного оборудования.

Сущность закрепления песчаных грунтов цементными растворами состоит в инъекции и пропитке пор грунта раствором и превращении его в грунтоцемент с повышенными прочностными и деформационными характеристиками. Инъекция производится под невысоким давлением, не вызывающим в грунте разрывы, по которым раствор может распространяться за пределы зоны закрепления.

Давление, при котором происходят гидроразрывы в грунте, зависит от глубины инъекции и от физических свойств грунта и не зависит от проницаемости грунта, вида и вязкости раствора и может рассчитываться по формуле

$$P_{кр} = \gamma \cdot h \cdot \xi + C,$$

где γ – средневзвешенная плотность толщи грунтов, т/м³; h – глубина инъекции от дневной поверхности, м; C – удельное сцепление грунта, кПа; ξ – коэффициент бокового давления, для песчаных грунтов $\xi = 0,25 \dots 0,37$, для глинистых в зависимости от их консистенции $\xi = 0,11 \dots 0,82$.

Для закрепления песчаных грунтов применяются в зависимости от водопроницаемости растворы, приготовленные из цементов различной тонкости помола, характеризующиеся показателем удельной поверхности частиц. Для каждого вида песка с определенным гранулометрическим составом и коэффициентом фильтрации (K_f) может использоваться только определенный цемент по тонкости помола. Наличие крупных фракций в нем даже в небольшом количестве сокращает радиус распространения раствора, поскольку тампонирует поры песка непосредственно вблизи скважины, затрудняя или даже прекращая распространение раствора.

Цементные растворы из поргладцементов общестроительного назначения способны закреплять только хорошо фильтрующие грунты – гравелистые и крупнообломочные, коэффициент фильтрации которых не менее 100 м/сут, поскольку они имеют грубодисперсный состав и удельную поверхность частиц, составляющую порядка 2500 -2800 см²/г.

Для закрепления менее проницаемых грунтов, например, песков средней крупности с коэффициентом фильтрации порядка 20-30 м/сут, применяют цемент с удельной поверхностью не менее 10 000 см²/г и не содержащий фракции крупнее 30 мкм, а для мелких и пылеватых песков – порядка 16000-20000 см²/г.

Для закрепления песчаных грунтов в России применяют, в основном, микроцементы «ОТДВ микродур» четырех марок [1]. Цемент марки «RX» содержит фракции менее 6 мкм не менее 95%, и удельная поверхность частиц составляет $F = 20000$ см²/г; марка «RU» — фракции менее 9,5 мкм не менее 95%, $F = 16000$ см²/г; марки «RF» — фракции менее 16 мкм не менее 95%, $F = 16000$ см²/г; марка «RS» — менее 24 мкм не менее 95%, $F = 8000$ см²/г. Стоимость поставляемых цементов довольно высокая. Она резко возрастает с увеличением дисперсности и достигает 2000 Евро за 1 т.

Проектирование и закрепление грунтов указанными цементами производят по методическим указаниям ООО «Веста Инж» [2] – поставщика ОТДВ микродур. Закрепление

песчаных грунтов в монолиты диаметром от 1,0 до 1,5 м рекомендуется производить растворами с В/Ц от 3:1 до 5:1, приготовляемыми из разных марок ОТДВ микродур. Объем расходуемого цементного раствора рассчитывается из условия полного заполнения порового пространства в закрепляемом песке:

$$Q_p = \pi \cdot R_p^2 \cdot h \cdot n, \quad (1)$$

где R_p – расчетный радиус закрепленного песка, м; h – высота захватки, м; n – пористость, д.е.

Прочность закрепленного песка в зависимости от применяемой марки цемента и В/Ц раствора назначается от 1,0 до 24 МПа. Выбор цемента рекомендуется производить методом сопоставления диаметров частиц цемента с гранулометрическим составом песка.

Характер и качество закрепления песка цементными растворами из цементов ОТДВ микродур были неоднократно исследованы в натуральных и полевых условиях [3 – 8]. Прочности песка, закрепленного в лаборатории растворами из цемента микродур «RU» разных В/Ц от 1:1 до 6:1 методами смешения и пропитки под давлением в трубках представлены на рис. 1.

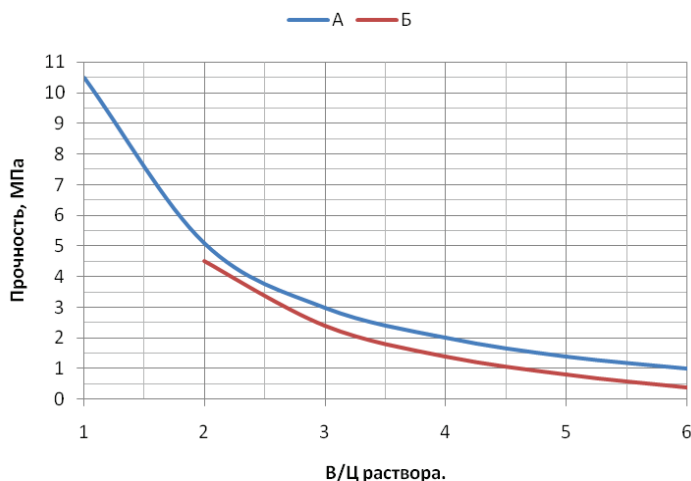


Рис.1. Влияние В/Ц цементного раствора из микродур «RU» и способа закрепления (А – смешением, Б – инъекцией) на прочность закрепленного песка

Установлено, что прочность песка, закрепленного рекомендуемыми [2] составами (В/Ц от 3:1 до 5:1) независимо от способа закрепления (смешением или пропиткой под давлением), получается невысокая: при В/Ц = 3 не превышает 3 МПа, а с понижением до В/Ц = 5 понижается до 1,5 МПа. Динамика изменения прочности не зависит практически от способа закрепления – смешением или пропиткой песка с цементным раствором.

В России в связи с задачей импортозамещения появляются отечественные предприятия, производящие микроцементы. Однако применение выпускаемых ими цементов для закрепления грунтов в настоящее время ограничено в силу малой их известности и отсутствия соответствующего опыта.

Предлагаемый способ выбора цемента согласно [2] по соотношению размеров частиц песка и цемента недостаточно корректен, поскольку K_ϕ песка при одинаковом грануломе-

трическом составе с увеличением плотности сложения от рыхлого до плотного состояния снижается в 1,5- 2 раза. Автором предлагается новый способ выбора цемента по зависимости удельной поверхности цемента в растворе и K_{ϕ} песка.

На основании лабораторных исследований построена диаграмма (рис. 2) корреляционной зависимости между удельной поверхностью цемента в растворе и K_{ϕ} закрепляемого песка.

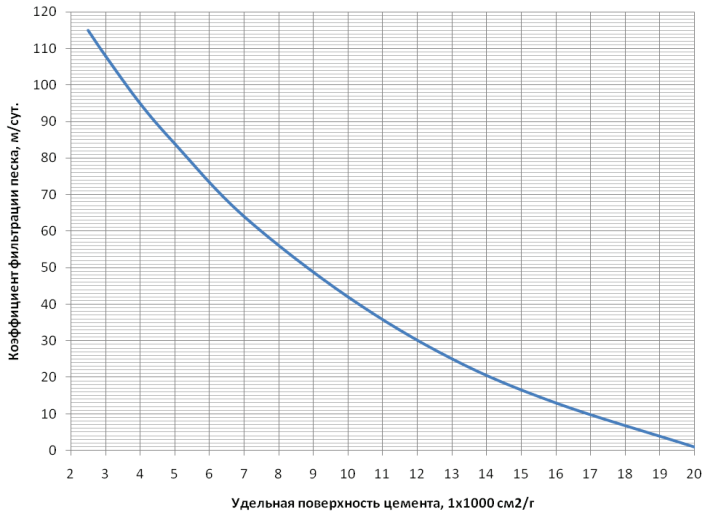


Рис.2. Проникающая способность цементного раствора в зависимости от удельной поверхности цемента и K_{ϕ} песка

Пользуясь графиком, можно определять для цементов с показателем удельной поверхности нижнюю, ориентировочно, в первом приближении, границу водопроницаемости (K_{ϕ}) песка, ниже которой цементный раствор неспособен проникать в его поры. Полученная граница для исследуемого цемента корректируется последующими лабораторными и опытно-производственными работами.

Технология цементации грунтов инъекцией путем пропитки пор грунта раствором включает следующие основные операции: погружение инъекторов в грунт или бурение скважин с устройством манжетных колонн; приготовление закрепляющего раствора и закачка его в грунт; ликвидация инъекционной скважины.

Цементацию грунтов инъекцией цементных растворов рекомендуется производить с соблюдением следующих правил:

а) нагнетание цементного раствора для равномерного однородного закрепления грунта по глубине следует производить небольшими зонами (захватками) по 0,5-1,0 м при использовании металлических инъекторов (рис. 3) и по 0,33-0,5 м при инъекции через скважины с манжетными колоннами (рис. 4);

б) нагнетание раствора в грунт следует выполнять в режиме с соблюдением давления, не вызывающего в грунте разрывов и выхода раствора за пределы зоны закрепления;

в) нагнетание раствора следует выполнять до полного поглощения зоной (захваткой) проектной нормы или до «отказа», когда величина расхода раствора в течение 5 мин не превышает 0,2 л/мин при максимально допустимом давлении, предусмотренном проектом;

г) в неоднородных по проницаемости грунтах слои с большей проницаемостью следует закреплять в первую очередь.

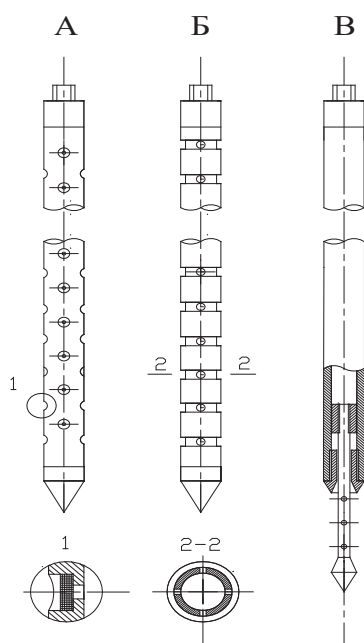


Рис.3. Конструкция иньекторов для закрепления грунтов: А – с клапанами на отверстиях; Б – с резиновыми кольцами; В – телескопическая

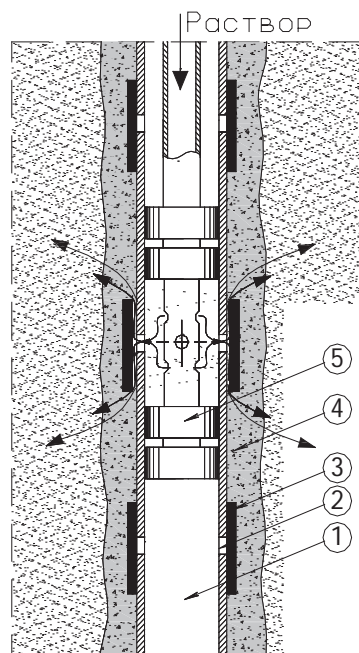


Рис.4. Сквжина иньекционная с манжетной колонной: 1 – труба метал-лическая; 2 – отверстие; 3 – резиновый манжет; 4 – обойма; 5 – тампон само-уплотняющийся

Технология цементация грунтов в основаниях существующих и строящихся зданий и сооружений предусматривает иньекцию цементного раствора в грунт как через иньекторы, так и через буровые скважины, оборудованные манжетными колоннами. Закрепление грунтов до глубины 8-10 м целесообразно (по затратам труда и времени) производить путем иньекции раствора через погружаемые металлические иньекторы. При закрепление грунта на больших глубинах иньекцию следует производить через скважины с манжетными колоннами.

Проектирование закрепления грунтов производят в следующей последовательности. Назначают на основании лабораторных исследований состав цементного раствора и способ и регламент иньекции, обеспечивающие прочностные и деформационные характеристики закрепленного грунта расчетным требованиям. Значения нормативных прочностных и деформационных характеристик закрепленных песков микроцементными растворами устанавливаются лабораторными исследованиями с последующим уточнением на опытно-производственных работах.

Выбирают схему закрепления грунтов в основании строящегося или реконструируемого здания – сплошное на заданную глубину (рис. 5) или комбинированное (рис. 6), предусматривающее, например, сверху сплошное закрепление, а ниже – из отдельных опор.

Назначают предварительные геометрические размеры закрепленного грунта в плане и по глубине. Производят расчет закрепленного основания по предельным состояниям согласно СП 22.13330 [9].

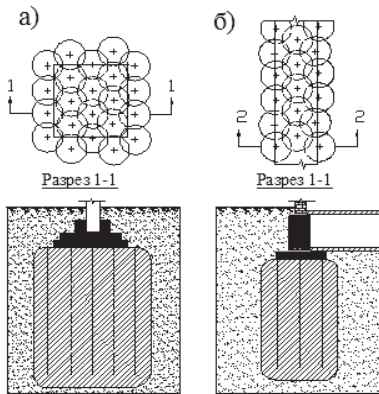


Рис.5. Схема сплошного закрепления грунта под фундаментами колонн (а) и несущих стен (б)

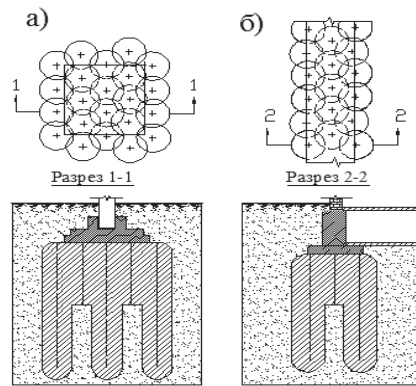


Рис.6. Схема комбинированного закрепление грунта под фундаментом колонны (а), несущей стены (б)

Наиболее сложными для инъекционного закрепления песчаных грунтов микроцементными растворами, недостаточно изученными и освоенными и, в связи с этим, затрудняющими оптимальное проектирование и производство работ по закреплению, к тому же не всегда заканчивающиеся положительными результатами, являются следующие вопросы:

1. Выбор вида цемента с оптимальной дисперсностью, способного в растворе проникать в поры и закреплять песок с заданным K_{ϕ} .
2. Разработка и исследование составов растворов из этого цемента, обеспечивающих расчетную прочность закрепляемому грунтоцементу.
3. Расчет оптимального объема цементного раствора, необходимого для придания закрепленному грунтоцементу расчетных объема и прочности.

Особо следует отметить, что при инъекции микроцементных растворов объемы закрепленного грунтоцемента получаются значительно меньшими по сравнению с расчетными. Радиусы закрепления при этом бывает до 30% меньше расчетных, а прочность закрепленного песка резко понижается от скважины к периферии [4, 6, 7].

Основной причиной меньших объемов закрепления по сравнению с расчетными и резкого понижения прочности по радиусу закрепления являются процессы, связанные с изменением реологических и физических свойств цементных растворов по пути фильтрации в порах песка. В меньшей степени влияние оказывают гранулометрический состав песка, его K_{ϕ} , а также режим и продолжительность инъекции раствора.

Известно, что микроцементные растворы с В/Ц = 3-5, применяемые для закрепления песчаных грунтов, представляют собой сильно разбавленные, нестабильные водные суспензии, которые как в статическом состоянии, так и при спокойном (ламинарном) движении (фильтрации) подвергаются непрерывному расслаиванию. Цементные частицы выпадают в осадок. Интенсивность и объем расслаивания зависят от концентрации раствора,

тонкости помола цемента и продолжительности инъекции.

При нагнетании цементный раствор в песчаном грунте претерпевает физические и релогические изменения. Прежде всего, в зоне вокруг скважины начинают отфильтровываться из раствора порами песка наиболее крупные фракции цемента. В результате в грунте вокруг скважины содержание цемента оказывается повышенным по сравнению с инъекцируемым раствором, что заметно влияет на получаемые достаточно высокие прочностные характеристики грунта, достигающие 10 МПа, равные, как при закреплении раствором повышенной концентрации, $B/C = 1$ (см. рис.1).

Концентрация профильтровавшего через эту зону раствора становится несколько пониженной. С удалением от скважины, с увеличением фронта (площади) фильтрации скорость потока замедляется и переходит из турбулентного в ламинарное (спокойное) состояние. Начинается постепенное осаждение из раствора цементных частиц и понижение его концентрации.

Инъекции порции раствора в зону, производимые с соблюдением технологического режима, зависящего от K_{ϕ} песка, продолжаются согласно [2] от 1 до 2 ч. Водоотделение цементного раствора, например, из микродур «RU», ($B/C = 4$) через 1 ч составляет 25%, B/C раствора (фильтрующего) увеличивается до $B/C = 10$, при этом плотность понижается с $\gamma = 1,15$ г/см³ до $\gamma = 1,06$ г/см³. Раствор такой концентрации продолжает фильтровать, хотя практически становится неспособным твердеть и закреплять песок. В этой связи и радиус закрепления до 30% и более бывает меньше расчетного.

Для того чтобы объем закрепленного песка соответствовал расчетному, необходимо закачивать в песок цементный раствор с некоторым превышением объема в нем пор. Коэффициент превышения k предлагается определять по формуле (2) на основании разницы расчетного радиуса и фактически полученного на опытных работах:

$$k = V_p / V_3 = R_3^2 \cdot / \cdot (R_p - m)^2, \quad (2)$$

где V_p, V_3 – объемы соответственно расчетного и закрепленного песка, м³; $m = R_p - R_3$ – показатель разницы расчетного R_p и закрепленного радиуса R_3 песка, м; h – размер захватки; n – пористость песка, д.е.

Расход цементного раствора Q_p для закрепления песчаного грунта следует определять с учетом k по формуле

$$Q_p = V_p \cdot n \cdot k = \pi \cdot R_p^2 \cdot h \cdot n \cdot k. \quad (3)$$

Следует отметить, что коэффициент k зависит не только от разницы расчетного и получаемого объемов закрепления, но и от разницы радиусов расчетных и фактических.

Согласно рис. 7 на основе функциональной зависимости отношений объемов расчетных и фактически полученных от разницы радиусов расчетных и фактических можно по разнице радиусов на опытном участке, не прибегая к расчетам, определить во сколько раз следует увеличить объем нагнетаемого раствора для обеспечения расчетного объема закрепления.

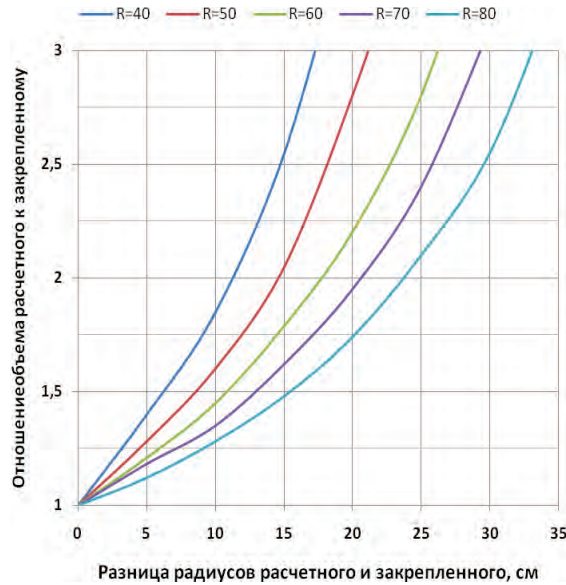


Рис.7. Зависимость соотношения расчетного к закрепленному объемам песка от разности их радиусов при заданном расчетном $R = 40; 50; 60; 70; 80$ см

Заключение

Экспериментальные исследования показали эффективность применения способа цементации песчаных грунтов растворами из микроцементов при условии обязательного геотехнического контроля подготовки искусственного основания на всех этапах строительных работ. Необходимость контроля для скрытых методов укрепления, к которым относится и вышеописанный метод, обусловлена непредсказуемостью получаемых объемов и прочности закрепления. К достоинствам данного метода можно отнести техническую простоту, не требующую сложного оборудования, а также экологическую безопасность для окружающей среды. Расход цементного раствора для закрепления песчаного грунта следует определять с учетом коэффициента k увеличения объема раствора, уточняемого по результатам опытных работах.

Библиографический список

1. «Микродур» особо тонкодисперсное вяжущее // Прайс-лист, Дюкхофф, АО Висбаден, Германия, М., 2004.
2. Королев В.М., Смирнов О.Е., Аргал Э.С., Ашихмен В.А. Опыт закрепления грунтов с помощью микроцемента // «ОФМГ», 2006. № 4. С. 10-14.
3. Ибрагимов М.Н. Закрепление грунтов цементными растворами // «ОФМГ», 2005. № 2. С. 24-28.
4. Mittag Jens. Untersuchungen zum Filtrationsverhalten von Feinstbindemittel-suspensionen bei der Injektion in Sande. Berlin 2000.
5. ООО «ВЕСТА Инж» Методические рекомендации по применению особотон-кодисперсного минерального вяжущего (ОТДВ) «Микродур» для инъекционного закрепления

грунтов в строительстве. М.: ООО «ВЕСТА Инж», 2007г.

6. Буданов В.Г., Скачко А.Н., Голованов А.П. Опыт устройства подвала в реконструируемом здании исторической застройки / Сборник научных трудов НИИОСП №100, 2011. С. 21-26.

7. Укрепление грунтов цементацией «Микродуrom» на опытном участке объекта «Административное здание» по адресу: М. ул. Поварская, д.13. // ООО «ВЕ-СТА Инж», М.,1999.

8. Ильичев В.А., Никифорова В.А., Харченко И.Я., Дмитриев В.В. Научно-техническое сопровождение реконструкции объекта «Мавзолей В.И. Ленина на Красной площади» в части усиления грунтов основания // «ОФМГ», 2015. № 1. С. 2-6.

9. СП 22.13330.2016 СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений.

Автор

Мидехать Насибулович ИБРАГИМОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Усиление оснований и закрепление грунтов», НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Midkhat IBRAGIMOV, Ph.D. (Engineering), leading researcher of the 'Strengthening the Foundations' laboratory, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: Midhat33@gmail.com

тел.: +7 (499) 170-27-85