

УДК 624.138.24

Шакиров И.Ф. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: fsrshakirov@mail.ru

Гарифуллин Д.Р. – студент

E-mail: dinar_garifullin@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Исследование несущей способности и деформаций песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией

Аннотация

В статье освещены вопросы исследования песчаных грунтов после их укрепления методом напорной цементации, приводятся результаты лабораторных исследований напряженно-деформированного состояния и характеристик укрепленного массива грунта. Исследования проводились в лабораторных лотках, массив грунта создавался из маловлажного мелкозернистого песка. После инъекции и твердения укрепляющего раствора проводились испытания массива грунта вертикальной статической нагрузкой. В проведенных экспериментах определены закономерности изменения напряжений в массиве при инъекции раствора, зафиксирована зависимость увеличения модуля деформации грунта от объема нагнетаемого раствора и технологии цементации.

Ключевые слова: основание, фундамент, массив грунта, напорная цементация, несущая способность, сжимаемость, грунтоцементные элементы.

В связи с освоением неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении территорий, возникает вопрос искусственного улучшения физико-механических свойств слабых грунтов, имеющих невысокую несущую способность и повышенную сжимаемость. Одним из перспективных методов упрочнения грунтов основания является укрепление грунтов путем напорной инъекции цементного раствора. В результате нагнетания укрепляющего раствора в грунт под давлением происходит улучшение его физико-механических характеристик, как за счет его уплотнения, так и за счет образования в грунте армирующих элементов из затвердевшего цементного раствора. Преимуществами данного метода являются техническая простота, возможность применения для любых сжимаемых дисперсных грунтов, при наличии грунтовых вод, в стесненных условиях строительной площадки и т.д. К недостаткам можно отнести сложность прогнозирования характеристик массива после укрепления и контроля качества работ.

Метод напорной цементации сегодня в практике строительства широко применяется, особенно при укреплении оснований существующих зданий и сооружений. В то же время в литературе мало данных о методике определения характеристик грунтового массива, укрепленного этим методом.

В лаборатории кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология» Казанского государственного архитектурно-строительного университета были проведены исследования массива песчаного грунта после укрепления методом напорной цементации. Эксперименты проводились в лабораторном лотке с размерами 100x100x100 см, массив грунта создавался из маловлажного мелкозернистого песка. В результате послойной отсыпки с равномерным уплотнением грунт в лотке имел следующие физико-механические характеристики: плотность $\rho=1,48\text{г/см}^3$, влажность $W=3\%$, коэффициент пористости $e=0,843$ д.е., угол внутреннего трения $\varphi=26^\circ$, модуль деформации $E=11,0$ МПа. Во время отсыпки грунта был установлен иньектор, изготовленный из пластиковой трубки и имеющий в зоне инъекции (на участке длиной 500 мм) отверстия диаметром 3 мм и шагом 50 мм. На глубине 20 см от поверхности устанавливался плоский штамп с размерами в плане 30x30 см. Для определения напряжений в грунте в ходе испытаний применялись объемные грунтовые датчики. Измерение деформаций поверхности грунта при инъекции раствора производилось индикаторами, установленными на специальной рамке.

Общий вид испытательной установки показан на рис. 1, схема размещения иньектора, штампа и контрольно-измерительных приборов приведена на рис. 2.

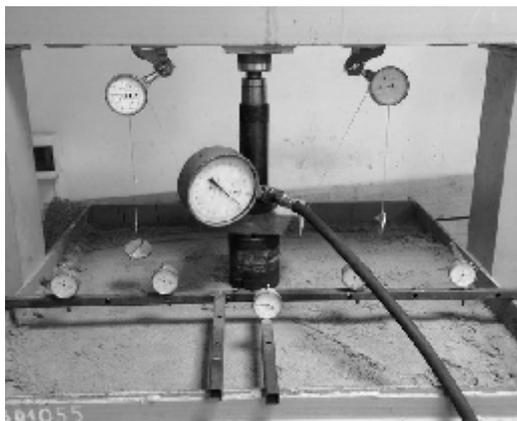


Рис. 1. Общий вид испытательной установки

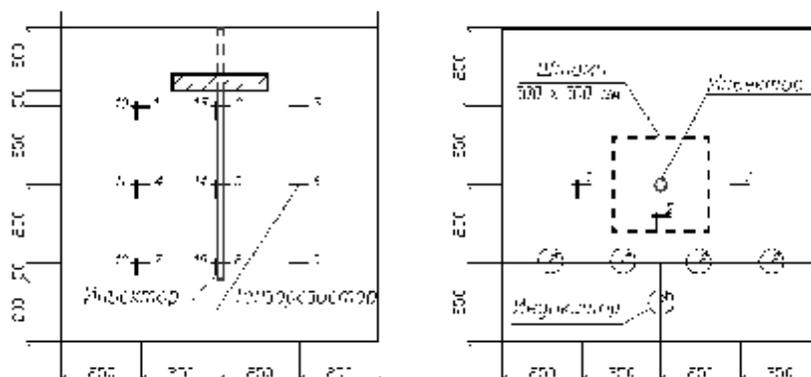


Рис. 2. Схема установки иньектора, штампа и грунтовых датчиков в массиве грунта

В качестве раствора для инъекции был использован цементный раствор с водоцементным отношением 0,7 с добавкой суперпластификатора С-3 в количестве 0,3 % от общего объема цемента. Для приготовления раствора применялся портландцемент марки 400. Приготовление раствора производилось за 5-10 минут до начала инъекции в грунт, при этом раствор постоянно перемешивался. Нагнетание раствора в грунт выполнялось при помощи растворного насоса ШН-6, давление при инъекции плавно увеличивалось до 0,5 МПа.

В ходе исследований было выполнено четыре серии испытаний, отличающиеся объемами инъецируемого раствора и технологией инъекции. Объем цементного раствора в первой серии составил 2 литра на иньектор, во второй, третьей и четвертой – 4, 6 и 8 литров соответственно. Нагнетание раствора производилось порциями по 2 литра, с перерывом на 1,5 часа между инъекциями.

После твердения раствора в течении 7 дней проводились испытания массива грунта вертикальной статической нагрузкой, передаваемой при помощи плоского штампа. Для каждой серии испытаний определялись физико-механические характеристики грунта в разных точках массива, исследовался характер распространения раствора, форма получившегося грунтоцементного элемента и уплотненная зона грунта вокруг элемента.

В результате инъекции цементного раствора в грунт и его твердения в массиве грунта образовывается грунтоцементный столб, имеющие переменное по высоте сечение. Вокруг этого столба происходит значительное уплотнение грунта, эта уплотненная зона выделяется при откопке грунта в виде цилиндрического тела. Форма грунтоцементного элемента и уплотненный грунт вокруг этого элемента, полученные при эксперименте, показаны на рис. 3.

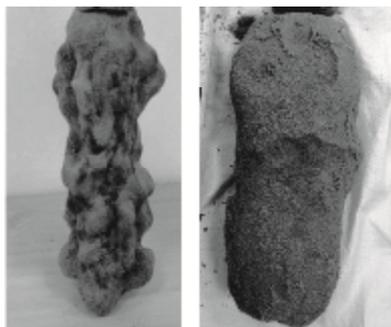


Рис. 3. Форма грунтоцементного элемента и уплотненная зона грунта

По результатам измерения объемов полученных грунтоцементных элементов, а также по их срезу можно заключить, что при инъекции происходит частичное перемешивание раствора с грунтом. Увеличение объема затвердевшего раствора по сравнению с объемом инъектируемого раствора для данных грунтовых условий составляет 35-45 %. Форма грунтоцементного элемента зависит от технологии нагнетания. При плавном возрастании инъекционного давления до 0,5 МПа разрыва грунта практически не происходит, цементный раствор аккумулируется вокруг иньектора, поэтому образуются вертикальные грунтоцементные элементы. В случае нагнетания раствора отдельными порциями в несколько приемов форма этих элементов получается более равномерным, напоминающим по конфигурации буроинъекционную сваю. При инъекции раствора в один прием наиболее вероятна плоская в вертикальном направлении форма элемента.

По данным показаний датчиков давления, установленных в массиве грунта, после нагнетания раствора во всех точках массива происходит увеличение сжимающих напряжений. Наибольшие напряжения возникают в зонах вблизи образовавшегося грунтоцементного элемента. При нагружении массива вертикальной нагрузкой через штамп происходит перераспределение напряжений, напряжения непосредственно под штампом возрастают, в нижней зоне вблизи грунтоцементного столба уменьшаются. Характер изменения вертикальных напряжений в разных точках массива при инъекции раствора и при нагружении штампа представлены на рис. 4.

Степень уплотнения грунта при цементации зависит от объема нагнетаемого раствора, но до определенных пределов. По показаниям индикаторов при инъекции незначительного объема раствора (2-4 литра) деформации поверхности грунта не происходит, давление раствора приводит только к уплотнению окружающего иньектор грунта. При дальнейшем увеличении объема инъектируемого раствора диаметр уплотненной зоны увеличивается, но при этом также начинается подъем поверхности грунта за пределами контура штампа. Поэтому можно заключить, что для каждого конкретного случая есть свое предельное значение объема раствора, по достижении которого плотность грунта вокруг иньектора имеет максимально возможное значение для данных условий.

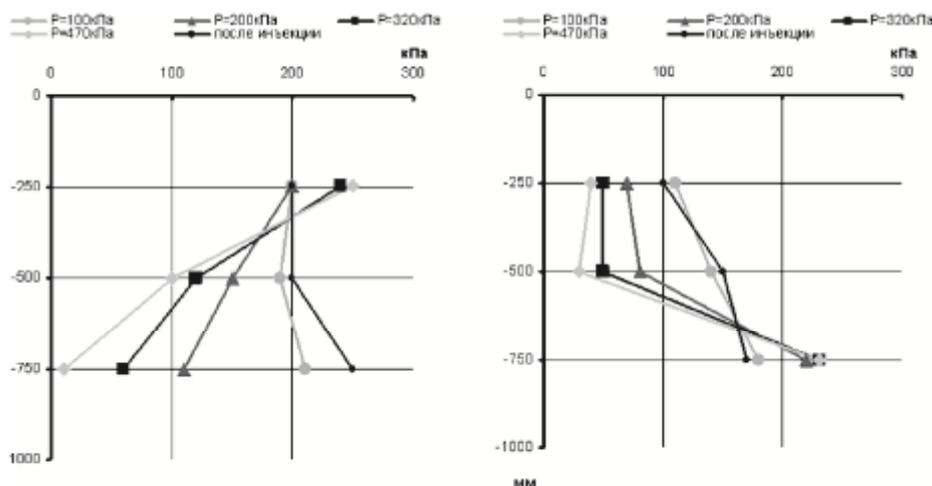


Рис. 4. Вертикальные напряжения в грунте на расстоянии от иньектора 10 и 30 см после инъекции 8 литров раствора и при нагружении штампа

График изменения плотности грунта в зависимости от объема инъецируемого раствора приведены на рис. 5.

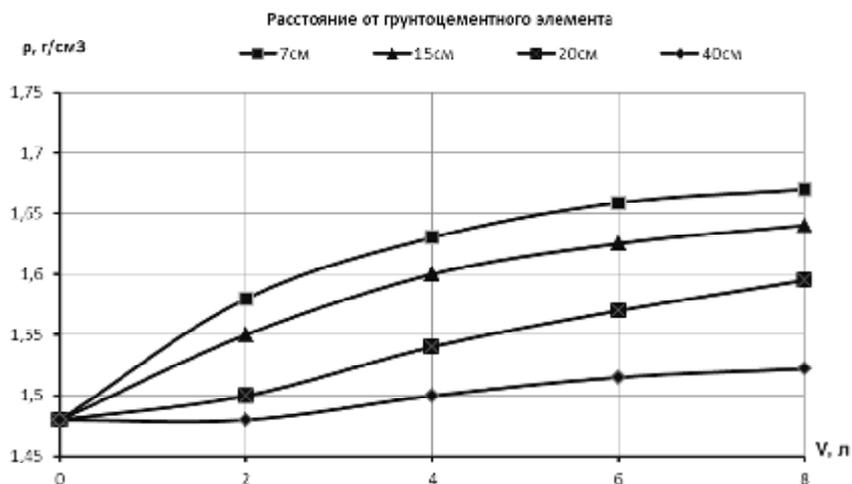


Рис. 5. График изменения плотности грунта в зависимости от объема инъецируемого раствора

Массив грунта после напорной инъекции цементного раствора и образования в нем вертикального грунтоцементного элемента можно рассматривать как сложную композитную систему, состоящую из жесткого вертикального армирующего элемента, области уплотненного грунта вокруг этого элемента и области неуплотненного грунта. Геометрические размеры этих компонентов можно установить исходя из объема инъецируемого раствора и первоначальной плотности песчаного грунта, при этом диаметр уплотненной зоны зависит от диаметра грунтоцементного элемента. В пределах уплотненной зоны в экспериментах зафиксировано увеличение плотности до 14 %, угла внутреннего трения грунта до 30 %. Исходя из полученных результатов испытаний, плотность грунта на расстоянии в пределах двух диаметров грунтоцементного элемента можно определить по формуле:

$$\rho = \rho_o + \kappa \times \ln(V), \tag{1}$$

где ρ_o – первоначальная плотность грунта;

V – объем инъецируемого цементного раствора;

$\kappa = f(d, \rho_o)$;

d – расстояние от грунтоцементного элемента.

Модуль деформации грунта, определенный по результатам штамповых испытаний для всей композитной системы, в зависимости от объема нагнетаемого раствора увеличился от 50 до 100 % по сравнению с массивом грунта до укрепления. График изменения модуля деформации грунта в зависимости от объема раствора приведен на рис. 6.

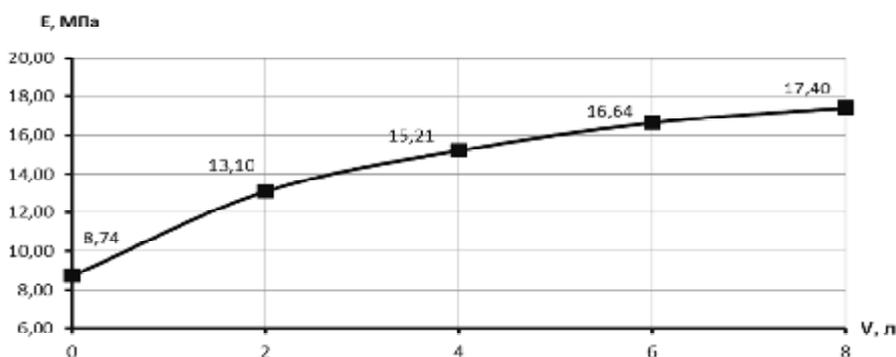


Рис. 6. График изменения модуля деформации грунта в зависимости от объема инъецируемого раствора по результатам штамповых испытаний

В результате проведенных экспериментов были получены грунтоцементные элементы, по конфигурации аналогичные буринъекционной свае. Поэтому при определении несущей способности отдельно взятого грунтоцементного элемента можно использовать общеизвестную формулу для расчета несущей способности буронабивной сваи [6], с применением поправочного коэффициента к расчетному сопротивлению по боковой поверхности:

$$F_d = g_c \sum_{c=R}^{\infty} g_{cR} \times R \times A + u \times \sum_{i=0}^n g_{cfi} \times g_{ri} \times f_i \times h_i \times \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad (2)$$

где γ_{pi} – коэффициент, учитывающий степень уплотнения песчаного грунта при цементации и первоначальную плотность грунта, $\gamma_{pi} = f(V, \rho_0)$.

Площадь и периметр поперечного сечения грунтоцементного элемента предлагается определить исходя из среднего диаметра элемента:

$$d_y = \sqrt{\frac{4 \times V \times \kappa_n \times \kappa_z}{l \times \pi}}, \quad (3)$$

где V – объем инъецируемого цементного раствора;

l – длина перфорированной части иньектора;

κ_n – коэффициент, учитывающий потери раствора при иньекции;

κ_z – коэффициент, учитывающий увеличение объема раствора за счет перемешивания песчаного грунта с цементным раствором, зависящий от консистенции (водоцементного отношения) раствора и характеристик песчаного грунта.

Заключение

1. На основании выполненных экспериментов установлен характер распространения цементного раствора в массиве песчаного грунта при плавном увеличении иньекционного давления.

2. Определены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта в зависимости от объема инъецируемого раствора.

3. Установлено, что модуль деформации массива песчаного грунта с учетом грунтоцементного элемента, при принятых в экспериментах технологических параметрах упрочнения, увеличивается до 2 раз.

Список библиографических ссылок

1. Шакиров И.Ф., Махпиров Д.А. Экспериментальные исследования песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией // Геотехника. Теория и практика. Общероссийская конференция молодых ученых, научных работников и специалистов // Межвузовский тематический сборник трудов, СПбГАСУ. – СПб., 2013. – С. 57-61.
2. Шакиров И.Ф., Тюркин С.И. Исследование несущей способности висячих свай в массиве грунта, укрепленного напорной цементацией // Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов. XIV Международный симпозиум по реологии грунтов: КГАСУ. – Казань, 2014. – С. 75-80.
3. Шакиров И.Ф., Гарифуллин Д.Р. Исследование массива грунта, укрепленного напорной цементацией // Актуальные вопросы науки, технологии и производства. VIII Международная научно-практическая конференция. – СПб., 2015. – С. 80-83.
4. Ибрагимов М.Н. Закрепление грунтов цементными растворами // Основания, Основания, фундаменты и механика грунтов, 2005, № 2. – С. 24-28.
5. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-83*. Минрегион России. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2011.
6. СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. Минрегион России. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2011.
7. Мирсяпов И.Т., Королева И.В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2011, № 4. – С. 16-23.

8. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proc. intern. symp., Seoul, Korea, 25-27 August 2014. – Lieden: Balkema, 2014. – P. 401-404.

Shakirov I.F. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: fsrshakirov@mail.ru

Garifullin D.R. – student

E-mail: dinar_garifullin@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

The research of bearing capacity and deformation of sandy ground, reinforced by pressure cementation

Resume

Nowadays, in order to improve the physical and mechanical characteristics of the base ground is often use pressure cementation method, especially in strengthening the base ground of reconstructed buildings. In injecting cement mortar into the low permeability ground under the pressure, mortar enters the weakest zones of array and creates rigid reinforcing elements of the solidified mortar. Zones of array, in which the mortar has not penetrated, are also amplified, contracting and sealing under the influence of the injection pressure.

The authors conducted laboratory studies of the stress-strain state of the sandy grounds reinforced by pressure cementation, taking into account the work of grouting element in ground. Researched the character of spread of the reinforcing cement mortar during a gradual increase of the injection pressure; pattern changing of physical and mechanical properties of the ground array, depending on the amount of injectable mortar. Proposals for determining deformation modulus array of reinforced ground and the calculation of the bearing capacity of grouting element are given.

Keywords: base, foundation, the array of soil, pressure cementation, bearing capacity, compressibility, cement grouting elements.

Reference list

1. Shakirov I.F., Mahpirov D.A. Experimental researches of sandy ground, reinforced by pressure cementation // Geotechnics. Theory and practice. All-Russian Conference of Young Scientists, researchers and specialists // Interuniversity thematic collection of works, SPbSUACE., 2013. – P. 57-61.
2. Shakirov I.F., Tyurkin S.I. Researches of bearing capacity of hanging piles in the array of soil, reinforced by pressure cementation // Perspective directions of development in theory and practice of rheology and soil mechanics. XIV International Symposium on the rheology of soils // KGASU. – Kazan, 2014. – P. 75-80.
3. Shakirov I.F., Garifullin D.R. Researches of the ground array, reinforced by pressure cementation // Actual questions of science, technology and production. VIII International Scientific and Practical Conference. – SPb., 2015. – P. 80-83.
4. Ibragimov M.N. Grouting cement mortars // Bases, foundations and geotechnics, 2005, № 2. – P. 24-28.
5. SP 22.13330.2011 «Foundations of buildings and structures». The updated edition of SNiP 2.02.03-83*. Ministry of Regional Development Russia. – M.: NIIOSP them. N.M. Gersevanova, 2011.
6. SP 24.13330.2011 «Pile foundations.» The updated edition of SNIP 2.02.03-85. Ministry of Regional Development Russia. – M.: NIIOSP them. N.M. Gersevanova, 2011.
7. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Prediction of deformation of the foundation with the long-term non-linear deformation of soil // Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, 2011, № 4. – P. 16-23.
8. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proc. intern. symp., Seoul, Korea, 25-27 August 2014. – Lieden: Balkema, 2014. – P. 401-404.