

УДК

А.Г. МАЛИНИН, канд. техн. наук, СК «ИнжПроектСтрой» (Пермь); И.А. САЛМИН, инженер,  
Пермский научно-исследовательский политехнический университет

## Расчет несущей способности армированной грунтоцементной сваи по материалу

Приведен расчет несущей способности армированных грунтоцементных свай с учетом различной жесткости и прочности грунтоцемента и материала армирующего сердечника. Приведено выражение для определения несущей способности армированной грунтоцементной сваи по материалу при заданных жесткостных и прочностных параметрах, а также приведена система для определения действующих напряжений в грунтоцементе и армирующем сердечнике в зависимости от приложенной нагрузки на сваю. Выполнен анализ влияния параметров задачи на значения напряжений в грунтоцементе и стальном сердечнике.

**Ключевые слова:** струйная цементация грунтов, jet-grouting, несущая способность по материалу, армированная грунтоцементная свая, расчет.

В настоящее время технология струйной цементации грунтов применяется, как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих зданий и сооружений. Важным вопросом проектирования фундаментов с применением грунтоцементных свай является определение несущей способности колонн. При расчете выделяют несущую способность по грунту (геотехническая несущая способность), несущую способность по материалу (конструкционная несущая способность) [1].

Особенность проектирования грунтоцементных свай заключается в том, что большая площадь контакта с грунтом и высокое сопротивление на боковой поверхности свай, приводят к высоким значениям несущей способности по грунту, в то время, как низкая прочность материала сваи приводит к относительно невысоким значениям прочности сваи по материалу. Для повышения конструкционной несущей способности применяют армирование сваи прочным железобетонным или стальным сердечником.

Расчет несущей способности армированной грунтоцементной сваи зависит от жесткости материала сердечника и деформативности грунтоцемента. Конструкционная несущая способность должна быть обеспечена как по материалу тела сваи, так и по материалу сердечника, то есть напряжения в любой точке конструкции не должны превышать предельных значений. Таким образом, должны выполняться условия:

$$\begin{cases} \sigma_c < R_b \\ \sigma_s < R_s, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  и  $\sigma_s$  – значения действующих напряжений в грунтоцементе и армирующем сердечнике;  $R_b$  и  $R_s$  – предельные значения напряжений в материалах конструкции, для грунтоцемента – прочность на одноосное сжатие, для металлического сердечника – предел текучести.

Значения действующих напряжений в конструкции можно определить, приняв ряд гипотез и составив систему уравнений. Первое уравнение системы – уравнение равновесия сил в проекции на вертикальную ось:

$$N = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c, \quad (2)$$

где  $A_c$  и  $A_s$  – площадь сечения грунтоцемента и армирующего сердечника соответственно;  $N$  – нагрузка, передаваемая на армированную грунтоцементную сваю.

Примем в качестве рабочей гипотезу плоских сечений – предполагаем одинаковыми осевые деформации грунтоцемента и армирующего сердечника по всей длине сваи. Предположим, что конструкция должна работать только в зоне упругих деформаций, поэтому в качестве физических соотношений принимаем линейную зависимость напряжений от деформаций.

$$\varepsilon = \sigma_c / E_c = \sigma_s / E_s. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют замкнутую систему уравнений, неизвестными в которой выступают напряжения в грунтоцементе  $\sigma_c$  и в армирующем сердечнике  $\sigma_s$ :

$$\begin{cases} \sigma_s A_s + \sigma_c A_c = N \\ \sigma_c = \sigma_s \cdot E_c / E_s. \end{cases} \quad (4)$$

Подставляя второе уравнение в первое уравнение системы (4) получим:

$$\begin{cases} \sigma_s = \frac{N}{(A_s + A_c \cdot E_c / E_s)} \\ \sigma_c = \sigma_s \cdot E_c / E_s. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) позволяет определить значения напряжений, действующих в грунтоцементе и армирующем сердечнике при заданной нагрузке на сваю.

При анализе несущей способности важно оценить, какую часть расчетной нагрузки  $N$  воспринимает грунтоцемент  $n_s = \frac{\sigma_c A_c}{N}$ , а какую – армирующий сердечник  $n_s = \frac{\sigma_s A_s}{N}$ . Из (2) и (5) следует, что эти величины остаются постоянными при любых значениях  $N$ :

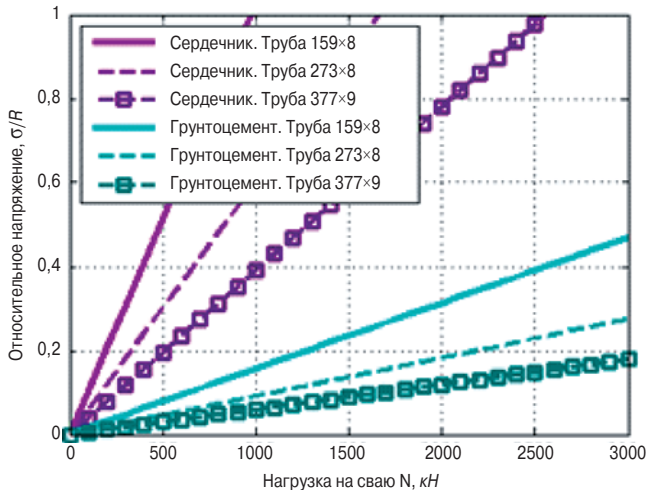


Рис. 1. Зависимость относительных напряжений в грунтоцементе и армирующей трубе от приложенной нагрузки (свая Ø600 мм, E<sub>c</sub>=200 МПа)

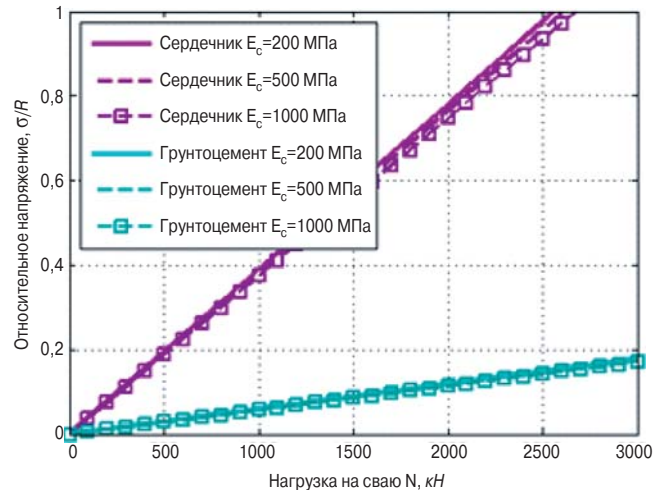


Рис. 2. Зависимость относительных напряжений в грунтоцементе и армирующей трубе от приложенной нагрузки (свая Ø600 мм, армирующая труба Ø377×9)

$$\begin{cases} n_s = \frac{A_s}{(A_s + A_c \cdot E_c / E_s)} \\ n_s = 1 - \frac{\sigma_s A_s}{N} = \frac{A_c \cdot E_c}{(A_s + A_c \cdot E_c / E_s)} \\ n_s + n_c = 1 \end{cases} \quad (6)$$

На практике удобнее представить систему (5) в ином виде, упрощающим определение максимально допустимой нагрузки, при которой свая еще продолжает работать в области упругих деформаций.

Из уравнения (3) и системы ограничений (1) можно получить систему условий для определения действующих напряжений в материале тела сваи и сердечника в момент достижения предельных напряжений в любом из материалов.

$$\begin{cases} \frac{R_s}{E_s} \leq \frac{R_c}{E_c}, \Rightarrow \sigma_s = R_s, \sigma_c = R_s \frac{E_c}{E_s} \\ \frac{R_c}{E_c} < \frac{R_s}{E_s}, \Rightarrow \sigma_c = R_c, \sigma_s = R_c \frac{E_s}{E_c} \end{cases} \quad (7)$$

Отношения  $\varepsilon_s = \frac{R_s}{E_s}$  и  $\varepsilon_c = \frac{R_c}{E_c}$  определяют предельные упругие деформации в сердечнике и материале тела сваи и позволяют оценить, в каком из материалов начнется разрушение в первую очередь. Определим конструкционную несущую способность армированной грунтоцементной сваи, подставив уравнение (2) в систему неравенств (7):

$$N = \begin{cases} R_s(A_s + \frac{E_c}{E_s} A_c), \varepsilon_s \leq \varepsilon_c \\ R_c(A_c + \frac{E_s}{E_c} A_s), \varepsilon_s > \varepsilon_c \end{cases} \quad (8)$$

Система (8) позволяет определить конструкционную несущую способность армированной грунтоцементной сваи с учетом различной жесткости и прочности тела сваи и армирующего сердечника.

Выполним оценку предельных упругих деформаций  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_c$  для стали, бетона и грунтоцемента. Предел текучести стали изменяется в диапазоне  $R_s = 200-600$  МПа, а модуль деформации стали составляет  $E_s = 2 \cdot 10^5$  МПа.

$$\varepsilon_s = \frac{(2 \div 6) \cdot 10^2}{2 \cdot 10^5} = (1 \div 3) \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

Оценка предельных упругих деформаций  $\varepsilon_c$  для бетонов согласно СНиП 2.03.01-84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» приводит к следующим результатам:

$$\varepsilon_c = (0,05 \div 0,8) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что в рамках рассматриваемого подхода, разрушение железобетонной сваи начнется с разрушения бетона. Несущая способность железобетонной сваи определяется первым уравнением системы (8), так как  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_c$ .

Оценка предельных деформаций для грунтоцемента уже не является такой очевидной, как это было для стали и для бетона (9), (10). Характеристики грунтоцемента изменяются в широком диапазоне:  $R_c = 1-20$  МПа,  $E_c = 100-10000$  МПа и зависят от большого числа параметров: свойства закрепляемого грунта, технологические параметры производства работ, возраста грунтоцемента и т. д.

$$\varepsilon_c = \frac{1-20}{(1 \div 100) \cdot 10^2} = \frac{10 \div 200}{1 \div 100} \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Для частных случаев можно выполнить оценку, зная кривые деформирования грунтоцемента. Например, для прочности грунтоцемента, устроенного в глинах, с примесью органических веществ существует зависимость  $E_c = [500 \div 700] \cdot R_c$ .

$$\varepsilon_c = \frac{1}{500 \div 700} = (1,4 \div 2) \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Анализ (9) и (11, 12) показывает невозможность однозначного сравнения предельных упругих деформаций  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_s$  стали и грунтоцемента, так как диапазоны их значений практически одинаковы. В этом случае для расчета несущей способности армированной грунтоцементной сваи необходимо пользоваться системой (8).

Существует упрощенный подход к определению конструкционной несущей способности армированной сваи [1]. При этом подходе предполагается, что в каждой точке конструкции достигнуто предельное состояние. В этом случае вместо системы уравнений (8) используется уравнение (13):

$$N = R_s A_s + R_c A_c \quad (13)$$

где  $N_s = R_s A_s$  – максимальная нагрузка, которую способен воспринять армирующий сердечник;  $N_c = R_c A_c$  – мак-

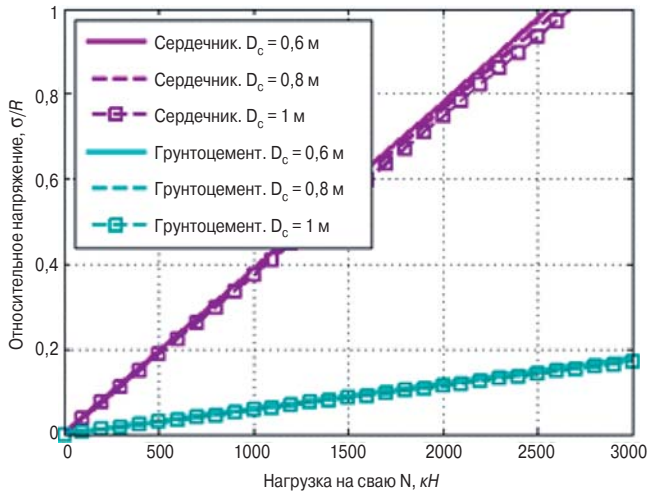


Рис. 3. Зависимость относительных напряжений в грунтоцементе и армирующей трубе от приложенной нагрузки ( $E_c=200$  МПа, армирующая труба  $\varnothing 377 \times 9$ )

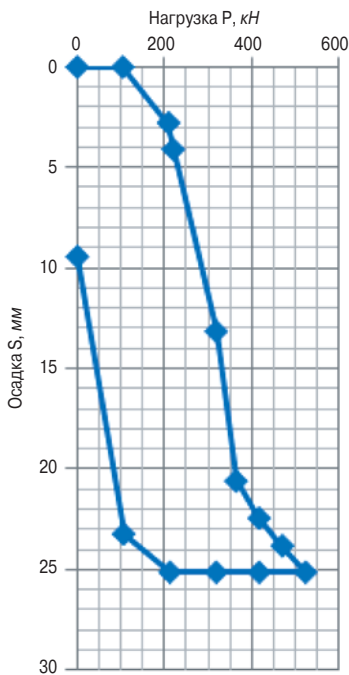


Рис. 4. Зависимость осадки оголовка сваи от нагрузки  $s=f(P)$

При расчете необходимо учесть тот факт, что несущая способность сваи не может быть меньше любого из значений  $N_s$  – несущей способности армирующего сердечника и  $N_c$  – несущей способности материала тела сваи. Поэтому в качестве «нижней оценки» можно рассматривать  $N = \max[N_s, N_c]$ .

Получив значение несущей способности из системы (8), его необходимо сравнить со значениями  $N_s$  и  $N_c$  и выбрать максимальное значение из трех. Окончательно выражение для определения несущей способности принимает вид:

$$N^* = \max \left[ R_s A_s, R_c A_c \begin{cases} R_s (A_s + \frac{E_c}{E_s} A_c), \varepsilon_s \leq \varepsilon_c \\ R_c (A_c + \frac{E_s}{E_c} A_s), \varepsilon_s > \varepsilon_c \end{cases} \right]. \quad (14)$$

Рассмотрим применение методики расчета на конкретных примерах. В качестве параметров расчетной схемы принимаем следующие: диаметр грунтоцементной сваи 600 мм, армирующий сердечник из стальной трубы  $\varnothing 377 \times 9$  мм, модуль деформации грунтоцемента  $E_c = 200$  МПа, модуль деформации стали 210 000 МПа, предел текучести для стали  $R_s = 240$  МПа, предел прочности грунтоцемента на одноосное сжатие  $R_c = 1,5$  МПа.

Для опорных параметров расчетной схемы в соответствии с (6) определим перераспределение нагрузки между грунтоцементом и армирующим сердечником.

$$\begin{cases} n_s = \frac{0,0104}{(0,0104 + 0,2827 \cdot \frac{200}{210\,000})} = 0,97 \\ n_c = 1 - n_s = 0,03. \end{cases}$$

Построим для грунтоцемента и стали зависимости относительных напряжений  $\sigma/R$  (т. е. отношение значения действующего напряжения к значению предельного напряжения) от приложенной нагрузки. Рассмотрим зависимости  $\sigma/R = f(N)$  при различных армирующих сердечниках (рис. 1), различных модулях деформации грунтоцемента (рис. 2) и различных диаметрах свай (рис. 3). Напряжения определяются из решения системы (5).

Из расчетов видно, что наибольшее влияние на распределение напряжений оказывает площадь сечения армирующей трубы. На результаты расчета практически не повлияли изменение модуля деформации грунтоцемента и диаметр грунтоцементной сваи. Это объясняется тем, что армирующий сердечник воспринимает 97% нагрузки, а грунтоцемент всего 3% ( $n_s = 0,97; n_c = 0,03$ ).

Определим несущую способность для параметров расчетной схемы по формуле (8). Для начала проведем оценку предельных упругих деформаций:

$$\varepsilon_s = 1,14 \cdot 10^{-3}, \quad \varepsilon_c = \frac{1,5}{200} = 7,5 \cdot 10^{-3}.$$

Так как из вычислений  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_c$ , то:

$$N = 2,56 \cdot 10^6 H.$$

Проверка подтверждает, что результат находится в допустимом диапазоне.

Данный подход к расчету применялся при проектировании армированных грунтоцементных свай на одном из объектов в Ярославле. Диаметр грунтоцементных свай 600 мм, армирование трубой  $89 \times 6,5$  мм с пределом текучести  $R_s = 390$  МПа. Модуль деформации грунтоцемента  $E_c = 500$  МПа, предел прочности грунтоцемента на одноосное сжатие  $R_c = 2$  МПа.

После оценки распределения нагрузки между грунтоцементом и армирующим сердечником:

$$\begin{cases} n_s = 0,06 \\ n_c = 1 - n_s = 0,94. \end{cases}$$

Воспользуемся системой (8) для определения конструктивной несущей способности. Так как из вычислений  $\varepsilon_s < \varepsilon_c$ , то:

$$N = 604 \cdot 10^3 H.$$

Результат находится в допустимом диапазоне.

На данном объекте проведены полевые испытания грунтоцементных свай статическими вдавливающими нагрузками. График нагрузка-осадка представлен на рис. 4. В результате полевых испытаний нагрузка была доведена до значения 570 кН. Осадка при такой нагрузке составила 25 мм.

#### Вывод

В настоящей работе предложена методика расчета несущей способности грунтоцементных свай с армирующим элементом (по материалу).

Построены аналитические зависимости для расчета напряжений в грунтоцементном теле сваи и в армирующем сердечнике, с помощью которых, зная прочностные и де-

формационные характеристики материалов сваи, можно установить наиболее «слабый» элемент, с которого начнется разрушение.

Предложенный подход является основой для рационального проектирования сваи – подбора необходимого диаметра сваи, прочности грунтоцемента, типоразмера армирующей трубы из условия равнопрочности ее элементов, т. е. когда коэффициенты запаса по прочности грунтоцемента и металла будут примерно равными, что позволит в конечном итоге существенно снизить стоимость сваи.

#### Список литературы

1. *Малинин А.Г.* Струйная цементация грунтов. М.: «Стройиздат», 2010. 226 с.

## В издательстве «Стройматериалы» Вы можете приобрести специальную литературу



**Книга «Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК)»**  
Авторы – д-р техн. наук С.Б. Турковский, канд. техн. наук А.А. Погорельцев, канд. техн. наук И.П. Преображенская

Книга содержит примеры из опыта применения различных типов конструкций в современном строительстве. Особенность применяемой системы состоит в использовании нового вида соединений в узловых сопряжениях и стыках конструкций, открывающего новые возможности клееной древесины. Система позволяет получить большепролетные сборные конструкции повышенной надежности, в том числе уникальные. Кроме того, теперь имеется возможность на основе серийно изготавливаемых унифицированных элементов создавать самые различные конструктивные системы – как по форме, так и по размерам. Система создана на основании длительных исследований (с 1974 г.), проводимых сотрудниками лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК, а также опыта проектирования, изготовления и применения клееных деревянных конструкций за последние 15–20 лет. Книга содержит материалы, рекомендуемые работникам проектных организаций, студентам, аспирантам, инженерам-строителям и др.



**Альбом «Малозэтажные дома. Примеры проектных решений»**

Авторы – академик РААСН Л.В. Хихлуха, канд. архитектуры Н.М. Согомонян, архитекторы Ю.В. Лопаткин, И.Л. Хихлуха

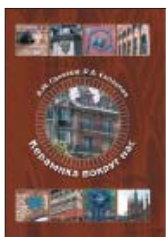
Альбом включает разделы: «Односемейные жилые дома», «Многосемейные жилые дома», «Эстетические качества жилища», «Градостроительные группы». Предназначен для архитекторов, специалистов, занятых вопросами жилищного строительства, для органов исполнительной власти в области архитектуры и строительства, а также для частных застройщиков; может быть использован как методическое пособие для студентов вузов.



**Книга «Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки»**

Автор – канд. техн. наук М.К. Ищук

На конкретных примерах зданий, возведенных в конце 1990-х гг. рассмотрены различные дефекты наружных стен с лицевым слоем из кирпичной кладки. Приведены результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований наружных облегченных стен, инженерные методы расчета различных воздействий на наружные многослойные стены с учетом поэтапности и длительности возведения, включая температурно-влажностные, а также конструктивные требования по назначению расстояния между горизонтальными и вертикальными швами, к конструкциям гибких связей и армированию кладки. Книга предназначена для работников проектных и контролирующих качество строительства организаций.



**Книга «Керамика вокруг нас»**

Авторы – канд. техн. наук А.М. Салахов, Р.А. Салахова

Керамика представлена как искусство и как продукт тонкой технологии. Показано, что свойства керамических изделий определяются химическим, минералогическим и гранулометрическим составом исходных компонентов, а также технологическими параметрами их переработки. Подробно рассмотрены глинистые минералы как основа керамического сырья. Проведено сравнение микроструктуры и минералогического состава различных видов обожженных керамических изделий, изготовленных как несколько веков назад, так и в наши дни.

Книга предназначена специалистам предприятий, производящих керамические материалы, ученым-материаловедам, преподавателям, аспирантам и студентам вузов технологических и архитектурно-строительных специальностей. Будет полезна архитекторам и проектировщикам, работающим в области жилищного и гражданского строительства.

**Для приобретения специальной литературы обращайтесь в издательство «Стройматериалы»  
Тел./факс: (499) 976-22-08, 976-20-36 E-mail: mail@rifsm.ru www.rifsm.ru**