

ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТА

А.Г. Малинин, канд. техн. наук,
технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой»,
член Правления Тоннельной ассоциации России,
П.А. Малинин, инженер

Технология струйной цементации грунтов находит все более широкое применение при решении различных задач подземного строительства. Сущность технологии описана в статьях автора [1,2]. В настоящей статье приводится обоснование и опыт применения технологии для ограждения бортов котлованов при строительстве подземных сооружений.

Введение.

Строительство глубоких котлованов всегда считалось одной из самых сложных задач подземного строительства. Задача многократно усложняется при расположении котлованов на территориях плотной городской застройки вблизи существующих зданий и сооружений. В связи с негативным динамическим воздействием на фундаменты зданий в этом случае полностью исключаются проверенные временем способы устройства ограждения котлованов из шпунтовой забивной крепи. Именно поэтому в последнее время получили широкое распространение «щадящие» способы устройства ограждений, такие как «стена в грунте» или ограждение из секущихся буровых свай.

Одной из технологий, позволяющей выполнять устройство свай большого диаметра, является технология струйной цементации грунтов. В настоящей статье приведены не только теоретические изыскания в этой области, но и практический опыт устройства ограждения котлована. В конечном итоге это позволит специалистам проектных и строительных организаций достаточно объективно сопоставить возможности предложенной технологии с традиционными способами решения данного класса задач.



Фото 1. Борт котлована из свай.

1. Сущность технологии.

Сущность технологии заключается в разрушении грунта высоконапорной струей цементного раствора с одновременным перемешиванием грунта с цементным раствором. В результате в грунтовом массиве образуются колонны (сваи) из нового материала – грунтобетона, обладающего высокими прочностными и противофильтрационными характеристиками.

Прочность грунтобетона зависит в первую очередь от двух факторов – строительных свойств грунта и от количества цемента на единицу объема укрепляемого грунта.

При устройстве свай в гравийном и песчаном грунте преимущества технологии становятся очевидными. Действительно, в этом случае сама природа дает основной материал для производства бетона, что позволяет резко уменьшить стоимость работ по сравнению с традиционными технологиями, требующими доставку заводского бетона на строительную площадку.

Действие второго фактора основано на практически пропорциональном росте прочности грунтобетона в зависимости от количества затраченного цемента. При повышенном расходе цемента можно говорить о достаточной прочности свай, устраиваемых в супесях и суглинках. В некоторых специфических случаях возможно даже полное замещение грунта цементным раствором для создания свай в глинах и органических грунтах [3]. Однако подобные варианты требуют более детального экономического анализа и могут быть применены как альтернатива традиционным способам, скорее всего, только при наличии дополнительных преимуществ.

2. Преимущества технологии.

Основным преимуществом технологии является отсутствие негативного воздействия на фундаменты близко расположенных зданий.



Вторым преимуществом является возможность установки на участке устройства свай только буровой установки, а весь узел приготовления цементного раствора, включающего силос для хранения цемента, миксерную станцию и высоконапорный насос, расположить в любом месте, удобном для подъезда цементовоза. Это является особенно важным при производстве работ в стесненных условиях городских строительных площадок.

Другим достоинством технологии является возможность производства работ в зимнее время. Особенно это касается случая, когда ростверк, объединяющий оголовки свай, заглублен ниже зоны промерзания грунта и тогда не требуется дополнительных мероприятий по обеспечению условий твердения грунтоцемента. Возможность работ по ограждению котлована в зимний период, позволяет перевести на летний строительный сезон весь основной фронт работ, включающий разработку грунта, бетонные работы по обустройству котлована и непосредственно строительство самого подземного объекта.

Фото 2. Устройство грунтоцементных свай буровой установкой Raptor.

3. Конструирование ограждения из свай.

Конструкция ограждения выбирается исходя из глубины котлована, устойчивости грунтов, уровня грунтовых вод, а также ответственности сооружения (рис.1).

Так, например, для неглубоких котлованов, сооружаемых в связных грунтах, ограждение котлованов может состоять из отдельно стоящих свай (рис.1, а). В случае строительства котлована в несвязных грунтах целесообразно ограждение выполнять из касательных свай (рис.1, б). В тех случаях, когда прочности касательных свай не достаточно, а также, когда котлован сооружается в обводненных условиях, ограждение выполняют из взаимносекущихся свай (рис.1, в). Для ответственных конструкций возможно сооружение двухрядной стены в грунте (рис.1, г) или расположение взаимносекущихся свай в два ряда в шахматном порядке (рис.1, д).

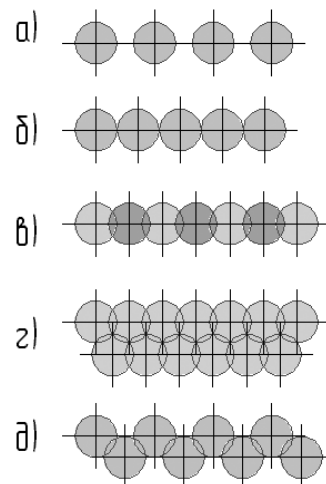


Рис.1. Варианты ограждения котлована из свай.

4. Расчет свай.

Расчёт свай является одним из основных этапов проектирования, в процессе которого подбираются важнейшие характеристики – диаметр, шаг и глубина свай, а также тип арматуры.

Общая методология расчёта основана на определении максимальных моментов в сваях, испытывающих боковое давление и сопоставление этой величины с предельным моментом в сечении сваи.

Первый этап выполняют с помощью инженерных методик и численных методов, позволяющих решать задачи совместного деформирования грунтового массива и ограждающих элементов котлована. Т.к. в настоящее время существует большое количество компьютерных программ для нахождения усилий в ограждающих элементах, этот этап проектирования в данной статье не рассматривается.

Для определения предельных усилий в сечении армированной грунтоцементной сваи воспользуемся общей методологией расчета, приведенной в СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции», а также в монографии [4].

Практический опыт показывает, что армирование свай выполняют, как правило, центрально расположенным арматурным стержнем или трубой. Однако в связи с различием прочностных и деформационных характеристик грунтоцемента при сжатии и растяжении нейтральная ось смещается от центра сечения сваи, а армирующий элемент оказывается расположенным в растягивающей зоне (рис.2).

При разработке расчетной методики применяли следующие предположения:

- сопротивление грунтоцемента растяжению принимается равным нулю,
- сопротивление грунтоцемента сжатию представляется напряжениями R_b , равномерно распределенными по сжатой зоне сечения,
- растягивающие напряжения в арматуре принимаются не более расчетного сопротивления растяжению R_s .

Отметим, что приведенная методика не учитывает тип арматуры (стержень или труба), т.к. в расчете используется только сопротивление растяжению R_s и площадь сечения арматуры A_s .

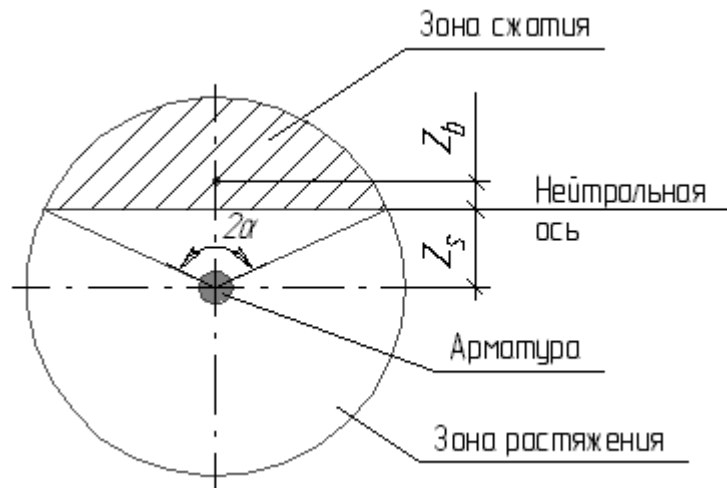


Рис.2. Расчетная схема для определения предельных усилий в сечении отдельно стоящих свай.

4.1. Определение предельных усилий в сечении отдельно стоящих свай.

Наиболее просто предельное усилие вычисляется для отдельно стоящих или касательных свай (рис.1, а, б). Для схемы, приведенной на рис.2, положение нейтральной оси определяется из уравнения равновесия внутренних сил, действующих в сечении сваи:

$$R_b A_b - R_s A_s = 0 \quad (1)$$

где A_s – площадь сечения арматуры, A_b – площадь сжатой зоны грунтоцемента.

Из геометрических построений для круглого сечения радиуса $r = D/2$ следует:

$$A_b = \frac{r^2}{2} (2\alpha - \sin 2\alpha) \quad (2)$$

Подставляя равенство (2) в (1), получим уравнение вида:

$$2\alpha - \sin 2\alpha = A, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{2R_s A_s}{R_b r^2} \quad (4)$$

Уравнение (3) является трансцендентным уравнением относительно угла α , определяющего положение нейтральной оси. В монографии [4] данное уравнение решается графическим способом. На наш взгляд, более удобным является подбор аналитической функции $\alpha = \alpha(A)$, которая с высоким приближением является решением данного уравнения.

С помощью компьютерной программы CurveExpert, реализующей метод наименьших квадратов, подобраны две наиболее удобные для практического применения функции:

$$\alpha = 0.923 \cdot 1.047^A \cdot A^{0.336} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.988 \cdot A^{0.379} \quad (6)$$

Первое из приведенных уравнений дает максимальную погрешность вычислений не более 0.05 %, а второе уравнение, хотя и является более удобным для практического применения, но имеет погрешность порядка 1.5 %.

Предельный момент сечения составит:

$$M_{np} = R_b A_b z_b + R_s A_s z_s \quad (7)$$

где z_b – расстояние от центра тяжести зоны сжатия до нейтральной оси, z_s – расстояние от центра тяжести круговой арматуры, совпадающего с центром сечения свай, до нейтральной оси:

$$z_b = \frac{4r \sin^3 \alpha}{3A} - r \cos \alpha, \quad z_s = r \cos \alpha \quad (8)$$

Рассмотрим пример определения предельного момента для армированной свай диаметром $D=70$ см со следующими прочностными и геометрическими характеристиками: $R_b = 100$ кг/см², $R_s = 2350$ кг/см², площадь арматуры составляет $A_s = 26.6$ см².

При указанных параметрах вычисление по формуле (4) дает $A = 1.02$. Используя функцию (5), получим значение угла, определяющего положение нейтральной оси $\alpha = 0.974$ рад (55.8°). По формулам (8) вычислим $z_b = 7.1$ см, $z_s = 19.6$ см.

Предельное усилие по формуле (7) составит $M_{np} = 16.6$ т·м. В случае касания свай предельный момент на 1 п.м. ограждения составит $\overline{M}_{np} = 23.7$ т·м.

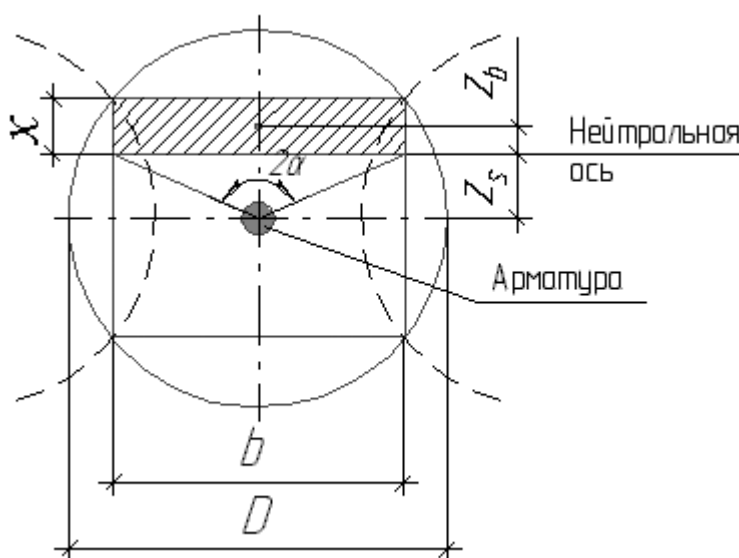


Рис.3. Расчетная схема для определения предельных усилий в сечении взаимносекущихся свай.

4.2. Определение предельных усилий в сечении взаимносекущихся свай.

На рис.1, в показана однорядная конструкция ограждения из взаимносекущихся свай диаметром D , расположенных с шагом $b = I \cdot D$, где I – коэффициент, определяющий степень взаимного пересечения свай. На рис.3 приведена расчетная схема задачи. Наиболее простой вывод формулы для предельного момента может быть получен из условия, что зона сжатия грунтоцемента представляет прямоугольник шириной b и высотой x . Повторяя порядок вывода предыдущего раздела, из уравнения равновесия внутренних сил (1), с учётом того, что площадь сжатой зоны составляет $A_b = bx$, получим выражение для определения высоты сжатой зоны грунтоцемента:

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b} \quad (9)$$

Предельный момент в этом случае будет равен:

$$M_{np} = R_s A_s z_s + R_b A_b z_b \quad (10)$$

Т.к. нейтральная ось проходит через нижнюю границу зоны сжатия, расстояния от центра тяжести сжатой зоны и от центра арматуры до нейтральной оси определяются как:

$$z_b = x/2, \quad z_s = h/2 - x, \quad h = \sqrt{D^2 - b^2} \quad (11)$$

В качестве примера приведем расчет предельного усилия в сечении ограждающей конструкции, устроенной из взаимносекущихся свай с геометрическими и прочностными характеристиками, приведенных в предыдущем разделе.

При $I = 0.7$ шаг между сваями равен $b = 49$ см. В этом случае высота зоны сжатия, вычисленная по формуле (9), составит $x = 12.75$ см.

Из формул (11) следует $h = 50$ см, $z_s = 12.25$ см, $z_b = 6.38$ см, а предельный момент, вычисленный по формуле (10), имеет значение $M_{np} = 11.6$ т·м.

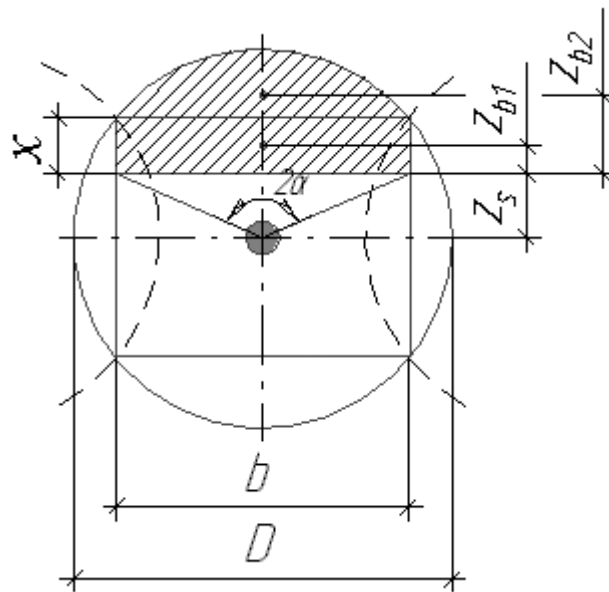


Рис.4. Расчетная схема для определения предельных усилий в сечении взаимносекущихся свай.

4.3. Определение предельных усилий в сечении взаимносекущихся свай с учетом полного сечения.

Дальнейшее усложнение расчетной схемы связано с учетом дополнительного запаса прочности грунтоцемента, расположенного в области верхнего сегмента (рис.4).

В этом случае уравнение равновесия примет вид:

$$R_b A_{b1} + R_b A_{b2} - R_s A_s = 0 \quad (12)$$

где $A_{b1} = bx$ – площадь прямоугольной области сжатия,

$A_{b2} = r^2(2\alpha - \sin 2\alpha)/2$ – площадь сегмента, которая из геометрических построений $\alpha = \arcsin(b/D) = \arcsin(I)$ и после тригонометрических преобразований может быть записана в виде: $A_{b2} = r^2(\alpha - I\sqrt{1 - I^2})$.

Из решения уравнения (12) найдем все геометрические размеры, необходимые для вычисления предельного момента.

$$x = [(R_s / R_b) A_s - r^2(\alpha - I\sqrt{1 - I^2})] / b$$

$$z_{b1} = r \cos \alpha - x/2, \quad z_{b2} = \frac{4r \sin^3 \alpha}{3(2\alpha - \sin 2\alpha)} - r \cos \alpha + x \quad (13)$$

Для данной расчетной схемы формула для предельного момента имеет вид:

$$M_{np} = R_s A_s z_s + R_b A_{b1} z_{b1} + R_b A_{b2} z_{b2} \quad (14)$$

Используя геометрические и прочностные характеристики предыдущего примера, получим $M_{np} = 16.2$ т·м.

Для сравнения все результаты расчета приведены в таблице 1, в третьем столбце которой приведены значения предельного момента, отнесенного к 1 п.м. ограждения в плане. Анализ таблицы показывает, что применение более точной схемы расчета с учетом всей области сжатия для секущихся свай дает увеличение предельного момента на 32 %.

Таблица 1

Расчетная схема	Предельный момент сечения сваи M_{np} , т·м	Предельный момент 1 п.м. ограждения $\overline{M_{np}}$, т·м
Касательные сваи	16.6	23.7
Секущиеся сваи (упрощенная схема)	11.6	23.6
Секущиеся сваи (с учетом всей области сжатия)	16.2	33.1

Сопоставление первой и третьей строки показывает, что переход к взаимносекущимся сваям дает возможность повысить несущую способность ограждения на 30-40 % в зависимости от шага свай.

Отметим, что применение секущихся свай предпочтительно и по другим соображениям. В этом случае происходит «залечивание» дефектов свай соседними сваями, а также параллельно решаются задачи водонепроницаемости бортов котлована.

5. Ограничения на применение расчетной методики.

Применение методологии расчета железобетонных конструкций накладывает определенные ограничения на разработанную методику. В первую очередь речь идет о теории плоских сечений, как об основной гипотезе, принимаемой при описании процесса изгибного деформирования балок.

Другим более серьезным ограничением является возможность расслоения конструкции тела сваи и, в первую очередь, за счет продавливания (обтекания) грунтоцемента вокруг армирующего элемента. Практический опыт автора [1,2] показывает, что грунтоцемент, полученный в песках, обладает прочностью порядка 10-30 МПа, что сопоставимо с прочностью бетонов, изготовленных в заводских условиях.

Более опасным является сооружение свай по струйной технологии в суглинках и глинах. В этом случае необходимы предварительные исследования возможности разрушения грунтоцемента вокруг арматуры под действием бокового давления грунта.

Для исследования напряженно-деформированного состояния тела грунтоцементной сваи применяли метод конечных элементов. Расчетная схема показана на рис.5.

Анализ результатов численного моделирования процесса деформирования грунтоцемента под действием бокового давления γH (γ – удельный вес грунта, H – глубина расположения сечения сваи) показал, что процесс разрушения имеет достаточно сложный характер, который можно разбить на три основных стадии. На стадии I происходит отслоение тела сваи от арматуры. На стадии II происходит разрушение в нижней части сечения от действия сдвиговых напряжений.

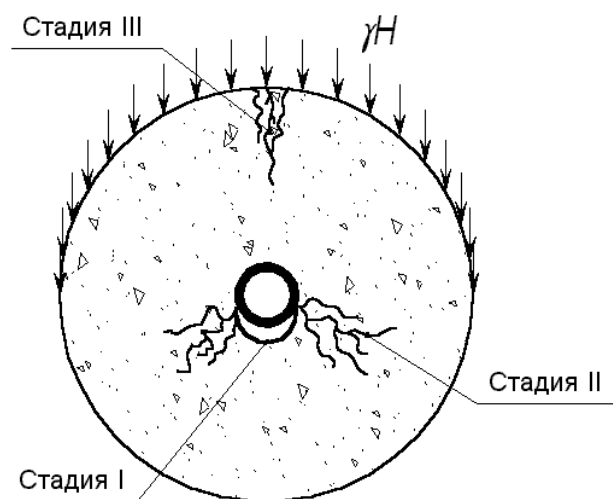


Рис.5. Схема разрушения грунтоцементной сваи.

В качестве критерия разрушения на данной стадии применяли критерий Кулона-Мора. На последней стадии III происходит разрушение верхней части сечения от появления сверхдопустимых растягивающих напряжений.

С точки зрения сохранения сплошности грунтоцемента в сжатой зоне и сохранения параллельности оси сваи и оси арматуры опасными становятся нагрузки, действующие на последней стадии разрушения. Величины этих нагрузок для свай, сформированных в различных типах грунтов, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Тип грунта	Прочность грунтоцемента на сжатие σ_c , МПа	Модуль деформирования, E , МПа	Критическое давление грунта γH , МПа
Глина	3,0	150	0,10
Суглинок	4,5	225	0,14
Супесь	6,0	600	0,20
Песок	20,0	7000	0,60

Анализ таблицы показывает, что расслоение тела сваи в случае низкой прочности грунтоцемента, сформированного в глинах, может наступить при глубине 5-7 м. Для грунтоцемента высокой прочности критическая глубина свай составляет более 30 м.

6. Практический опыт.

В начале этого года предприятием «ИнжПроектСтрой» закончены работы по устройству ограждения котлована двухуровневой подземной автостоянки по ул. Мытной в г. Москве. Работы были выполнены по проекту ООО «Инженерное бюро Юркевича». Детальное описание объекта приведено в [5]. Здесь же кратко укажем, что сваи диаметром 800 мм были армированы толстостенной металлической трубой диаметром 114 мм. Фактическая прочность грунтоцемента составляла 22-25 МПа, при проектном значении 10 МПа. Расположение свай в два ряда с шагом 1100 мм было аналогичным шахматной конструкции, приведенной на рис.1, д.

Результат превзошел все ожидания. Котлован глубиной более 8 м стоял без каких-либо дополнительных силовых элементов – расстрелов, анкеров и пр.



Фото 3. Директор РТА Власов С.Н. и ученый секретарь Бочаров В.Ф. поставили техническому директору «ИнжПроектСтрой» Малинину А.Г. за выполненный объект оценку «отлично».

Заключение.

Ограждение котлована из свай, устраиваемых с помощью струйной цементации грунтов, сегодня является технологией, имеющей все необходимые предпосылки для широкого практического внедрения. Методика расчета, проектирования и, главное, технология сооружения свай прошли реальную апробацию на достаточно сложном объекте. Это позволяет рекомендовать ее для строительства подземных объектов в условиях плотной городской застройки.

Литература.

1. Малинин А.Г. Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве // Подземное пространство мира. 2000. №2.
2. Малинин А.Г. Применение технологии струйной цементации грунтов в транспортном строительстве // Метро и тоннели. 2001. №6.
3. Малинин А.Г. Обоснование расхода цемента при струйной цементации грунта // Подземное пространство мира. 2003. №3.
4. Гинзбург Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979.
5. Малинин А.Г. Предприятие – ЗАО «ИнжПроектСтрой» // Метро и тоннели. 2003. №3.

Контактные телефоны: (3422) 196-103, 196-361
Официальный сайт в Интернете: www.jet-grouting.ru