УДК 622.24

А.И.КОРОВИН
Факультет освоения подземного пространства,
группа ГС-04-1

УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ И ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ БУРОИНЪЕКЦИОННЫМИ СКВАЖИНАМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ САНК-ПЕТЕРБУРГА

В последнее время строительство новых зданий проводится на участках со сложными грунтовыми условиями. В первую очередь это связано с нехваткой площади, дороговизной земли и прочими внешними факторами. Поэтому весьма актуальна проблема укрепления грунтов, в том числе с помощью буроинъекционных свай.

В статье рассмотрены особенности усиления фундаментов зданий и сооружений с помощью корневидных свай для условий Санкт-Петербурга, их технологические циклы устройства; приведены данные натурных испытаний; сформулированы преимущества укрепления грунтов с помощью буроинъекционных скважин перед другими методами укрепления.

Construction of new buildings has recently been realized on terrains characterized with complicated ground conditions, owing to a lack of free space, increased land value and other external factors. This has made it a vital prerequisite to reinforce soils in the construction area by different means including the injection piles technique. This paper reviews specific features of foundation reinforcement with root piles applied in St. Petersburg conditions, technological stages of their installation; data on full-scale tests are supplied. The main advantages of soil reinforcement with injection piles are given as compared with other reinforcement techniques.

Буроинъекционные сваи являются основным методом закрепления грунта при строительстве или реконструкции зданий, расположенных на территориях, сложенных карстующимися грунтами, а также в заторфованных грунтах. Закрепление с помощью буроинъекционных свай относят к методам стабилизации грунтовых деформаций. Данный метод создавался в результате длительных исследований условий развития осложнений на различных участках, что позволило сделать его практически универсальным решением и лидирующим по частоте использования методом. Главное преимущество использования буроинъекционных свай заключается в отсутствии динамических воздействий на грунт, фундамент и основание уже существующего здания (что актуально при проведении реконструкционных работ). Закрепление грунтов с помощью буроинъекицонных свай – трудоемкий и дорогостоящий метод, однако его эффективность вполне компенсирует данные недостатки. Применение технологии буроинъекционных свай обеспечивает устойчивость фундамента в течение 50 лет, замедляет или практически исключает процесс образования карстовых деформаций [2].

Технологический цикл устройства буроинъекционных свай включает:

1) разбуривание кладки фундамента, установку трубы-кондуктора и ее тампонирование;

2) бурение скважины до проектной отметки под защитой обсадной трубы или под глинистым раствором;

3) заполнение скважины твердеющим раствором;

4) установку арматурного каркаса;

5) опрессовку заполненной раствором скважины под давлением 0,2-0,4 МПа.

Если прочность фундамента недостаточна, проводят инъекцию цементного раствора в его кладку. Бурение в пределах фундамента (рис.1) ведется через кондуктор, являющийся направляющей трубой. Кондуктор обеспечивает надежность опрессовки, предотвращая выпирание из скважины цементного раствора. Арматурный каркас

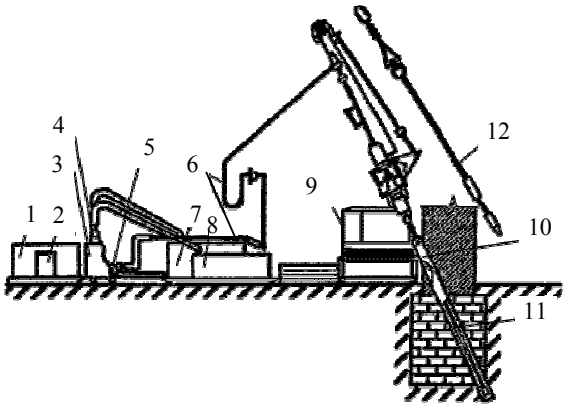


Рис.1. Буроинъекционный комплекс в процессе изготовления сваи

1 – емкость для цементного раствора; 2 – глиномешалка; 3 – мерный бак; 4 – растворный насос; 5 – промывочный насос; 6 – нагнетательный трубопровод; 7 – емкость для глиняного раствора; 8 – шламоотделитель; 9 – буровой станок; 10 – кондуктор; 11 – буровой инструмент; 12 – бурильная труба

или одиночные стержни опускают в скважины секциями длиной 1-3 м, равнопрочный стык которых выполняют с помощью сварки.

От давления и времени опрессовки зависят в последующем сопротивление трению по боковой поверхности сваи и, соответственно, ее несущая способность. На контакте свая – грунт происходит частичная цементация грунта. В слабых грунтах при опрессовке под давлением 0,2-0,4 МПа грунт вокруг сваи уплотняется, сечение сваи увеличивается, имеющиеся полости заполняются раствором.

Виды и составы твердеющих растворов, применяемых при изготовлении буроинъекционных свай, зависят от условий применения свай и в каждом конкретном случае подбираются специализированной лабораторией. Таким образом, установленная буроинъекционная свая одним концом упирается в существующий фундамент, а другим – в твердые грунты основания. Последние сравнительные испытания различных методов цементизации грунтов основания показали, что применение буроинъекционных свай, несмотря на относительную дороговизну этого метода, позволяют в два раза снизить материалоемкость и трудоемкость работ по закреплению карстующихся слоев, что, в свою очередь, существенно уменьшает проектную стоимость здания [4].

Дополнительным преимуществом использования буроинъекционных свай для реконструкции фундаментов является сохранение подлинной кладки здания, ее декоративных особенностей, признаков давности (фактуры поверхности), что очень актуально при реконструкции исторических зданий. Все эти детали не могут быть восполнены при возведении новой кладки. Поэтому буроинъекционные сваи можно назвать не просто методом ремонта фундамента, а методом его щадящей реконструкции.

Однако при значительной толще слабого грунта (в Санкт-Петербурге ее мощность достигает 30 м) эффективность и экономичность тонких длинных буроинъекционных свай может оказаться недостаточной. Численное моделирование является единственным инструментом, позволяющим дать объективную оценку целесообразности предлагаемых реконструкционных мер с использованием свай усиления [3].

Как показали численные исследования и опыт реконструкции фундаментов [5], при использовании буроинъекционных свай необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1. Угол наклона свай незначительно влияет на осадку усиленной конструкции, поэтому нет необходимости его увеличивать. Это упрощает ведение работ по их устройству.

2. Сваи должны быть надежно закреплены в фундаменте, для чего состоящий из отдельных бутовых камней на растворе старый фундамент должен быть усилен инъекциями цементного раствора. Фундамент фактически превращается в ростверк и должен по прочности соответствовать своему назначению. Если прочность фундамента недостаточна, либо заделка сваи в тело фундамента осуществлена менее чем на пять диаметров, необходимо создать дополнительную конструкцию на контакте «фундамент-грунт» (так называемый «контактный слой»).

3. Расчетом установлено, что увеличение наклона значительно повышает внут-

ренние усилия в сваях. Это обстоятельство в зависимости от основных прочностных и деформационных свойств грунта может быть учтено расчетом и, соответственно, специальной системой объемного армирования. В расчете буроинъекционная свая рассматривается как железобетонная конструкция, поэтому при ее изготовлении, помимо вяжущего цемента, необходим инертный материал. Учитывая технологические особенности, в качестве инертного материала можно использовать песок. Цементные сваи могут применяться при небольших углах наклона для временных усилений и анкерных временных креплений (зданий в зоне строительства подземных выработок и пр.).

Если рассматривать скважину как расширяющийся цилиндр, то для упругой области при $\sigma_r = 0$ справедливы равенства [5]

$$E_{ur} = \sigma_r - \mu\sigma_\theta;\ E_\theta = \sigma_\theta - \mu\sigma_r,$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Для пластической области

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2c;\ \ \sigma_r = -p + 2c\ln\frac{r}{a}.$$

Тогда

$$\sigma_\theta = -p + 2c(1 + \ln\frac{r}{a}),$$

где c – сцепление; a – начальный радиус упруго сжатого расширяющегося цилиндра (скважины); p – давление в расширяющемся цилиндре.

В упругой области $(\sigma_0 - \sigma_r < 2c)$

$$\sigma_r = -a^2\frac{p}{r^2};\ \ \sigma_\theta = a^2\frac{p}{r^2}.$$

Относительная деформация упругого цилиндра ε определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{(1+\mu)}{E}\frac{a^2 p}{r^2}.$$

При $r = a$ получаем формулу Ламе для определения модуля упругости:

$$E = (1+\mu)a\frac{p}{\varepsilon}.$$

Имея сведения о форме боковой поверхности сваи, можно по приведенным выше зависимостям косвенно судить о модуле деформации грунта, окружающего сваю на заданных значениях глубины при соответствующем давлении.

Возможность сопоставить количество инъецированного бетона с объемом, соответствующим объему скважины на различных участках ее глубины, позволяет на основании накопленного эмпирического материала корректировать несущую способность свай и уточнять их число.

Опыт применения этой технологии в России показал, что бетонирование под избыточным давлением повышает несущую способность свай в 1,5-1,7 раза по сравнению с расчетной [4].

Когда давление в цилиндре равно сцеплению, а затем превосходит его, в среде вокруг цилиндра возникают пластические деформации, формируется область пластического состояния с радиусом ρ, за которым следует упругая зона. Радиус пластической области [1]:

$$\ln\frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} = \frac{p}{2c}.$$

Деформации области $a \le r \le \rho$ определяются уравнением Прандтля – Рейса:

$$\varepsilon = \frac{1-\mu^2}{E}2c\frac{\rho^2}{r} + \frac{(1+\mu)(1-\mu)}{E}2\,\delta(\ln\frac{\rho}{\grave{a}} - \frac{\rho}{\grave{a}}).$$

Таким образом, расход бетона, геометрия скважины, площадь поперечного сечения и упругая составляющая расширения скважины – основные факторы, влияющие на силу прижима, определяющие расчетное сопротивление по боковой поверхности сваи.

4. При использовании арматурных каркасов должны быть запроектированы и выполнены равнопрочные стыки. Возможно включение в конструкцию свай прочных труб, металлических профилей, специального стекла. В любом случае для буроинъекционных свай, устраиваемых в слабых грунтах, армирование должно производиться в зависимости от фактически действующих моментов в различных сечениях.

5. Технология изготовления буроинъекционных свай, обеспечивающая в условиях

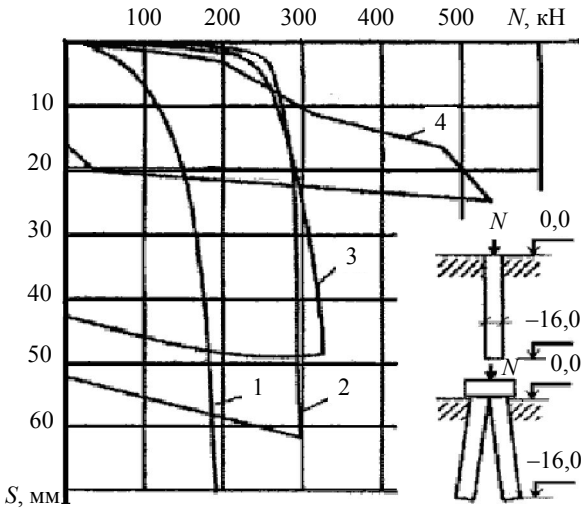


Рис.2. График испытаний буроинъекционных свай на опытной площадке

1 – без опрессовки; 2, 3 – с опрессовкой соответственно 0,2 и 0,4 МПа; 4 – двух наклонных свай

слабых грунтов необходимые расчетные прочностные параметры, достаточна сложна и требует применения комплекса специального оборудования. Остановимся лишь на основных реконструкционных случаях, когда буроинъекционные сваи и инъекционные технологии успешно использовались в отечественной и зарубежной практике:

- усиление оснований и фундаментов при необходимости стабилизации незатухающих осадок;
- усиление различных конструктивных элементов, включая фундаменты, кирпичную кладку несущих стен, сводов, перекрытий;
- изменение конструктивной схемы здания с перераспределением нагрузок на грунты, либо догружение фундаментов;
- устройство отдельно стоящих и ленточных свайных фундаментов в зоне примыкания к существующему зданию в случаях, когда, например, опасна динамика от погружения готовых свай;
- устройство разделительных непрерывных стен между зданиями;
- анкеровка подпорных стен, в том числе выполненных методом «стена в грунте»;
- армирование грунта для улучшения его свойств и повышения несущей способности массива.

На рис.2 приводятся данные натурных испытаний буроинъекционных свай диаметром 132 мм, длиной 16 м, прорезающих толщу слабых грунтов. Как видно из этих данных, сваи такой длины опираются на плотные глинистые грунты твердой консистенции. Без опрессовки несущая способность сваи незначительна (рис.2, кривая 1). Опрессовка избыточным давлением повышает несущую способность свай в слабых грунтах (рис.2, кривые 2-4).

Таким образом, с помощью режима опрессовки и подбора цементного или песчано-цементного раствора можно формировать несущую способность свай даже в слабых заторфованных грунтах. При выполнении работ по усилению оснований и фундаментов буроинъекционными сваями используются отдельные технологические приемы, способствующие улучшению совместной работы системы «фундамент – свая усиления – грунт основания». Так, при усилении отдельно стоящих опор под колонны костела Св.Екатерины в Санкт-Петербурге (Невский пр., 32) после инъекции кладки фундамента производили повторную инъекцию контактного слоя, которая позволила выполнить консервацию гниющих деревянных лежней и способствовала более эффективной работе наклонных свай усиления. Контрольное бурение скважин через тело фундамента позволило оконтурить созданный контактный слой бетона между подошвой фундамента и грунтом. Толщина этого слоя достигла 500 мм. Все вышеуказанные технологические операции выполнялись с помощью отечественного бурового оборудования.

Численное моделирование различных вариантов усиления позволило остановиться на коротких сваях, установленных в виде веера. Благодаря им были улучшены условия передачи нагрузки на относительно прочную толщу песчаных грунтов за счет ее армирования железобетонными стержнями (тонкими буроинъекционными сваями).

В последние годы отдельные фирмы Москвы и Санкт-Петербурга применяют буроинъекционные вертикальные сваи диаметром 250-300 мм для устройства фундаментов новых зданий, встраиваемых между существующими при уплотнении городской застройки. Такие сваи при длине более 15 м представляют определенную опасность для нормальной эксплуатации встроек, связанную с возможностью нарушения вертикальности буровых скважин и сплошности ствола сваи. Сваи необходимо армировать на всю глубину, что осложняет процесс их изготовления по буроинъекционной технологии. В любом случае применимость сравнительно гибких длинных свай подлежит проверке специальными расчетами. Эти сваи должны быть также подвергнуты обязательной проверке на сплошность ствола.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бондарик Г.К.* Полевые методы инженерно-геологических исследований / Г.К.Бондарик, И.С.Комаров, В.И.Ферронский. М.: Недра, 1967.

2. Рекомендации по применению буроинъекционных свай. НИИОСП им.Герсеванова. М., 2001.

3. *Сергеев Е.М.* Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1971.

4. СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов. М.: Госстрой России, 2004.

5. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. М.: Стройиздат, 1961.

Научный руководитель д.т.н. проф. *Л.К.Горшков*