

№1, 1999

## **Проблемы реконструкции исторических городов, возведенных на слабых грунтах (на примере строительства транспортно-коммерческого центра в Санкт-Петербурге)**

**В.М.Улицкий, А.Г.Шашкин**

Многие крупные города мира возникли на территориях, весьма сложных в инженерно-геологическом отношении. Границы исторического центра города Санкт-Петербурга, например, с удивительной точностью совпадают с контуром зоны распространения слабых глинистых грунтов. С поверхности (абсолютные отметки которой составляют, в основном, +2...+4 м и редко превышают +6 м) под 2-метровым техногенным слоем залегают дельтовые пески мощностью слоя от 2 м до 6 м, отложившиеся при возникновении реки Невы, что произошло около 10 тысяч лет назад в результате прорыва водами Ладожского озера перешейка суши, отделяющего его бассейн от вод Финского залива. Ниже залегают послеледниковые глинистые отложения Балтийского моря, подстилаемые на глубине до 20...30 м от поверхности ледниковыми (моренными) суглинками и супесями.

Из перечисленных слоев грунта сравнительно благоприятными строительными свойствами обладают дельтовые и ледниковые отложения, балтийские морские супеси и суглинки относятся к слабым структурно-неустойчивым грунтам.

До 2-й половины XX века здания в Петербурге возводились преимущественно на фундаментах мелкого заложения (в качестве несущего слоя использовались поверхностные пески), изредка – на коротких (до 10 м длиной) деревянных сваях. В столице императорской России существовало своеобразное ограничение нагрузок на основание: высота рядовой застройки не должна была превышать карниза Зимнего дворца (что, конечно же, было продиктовано этическими и эстетическими соображениями). В результате на кровлю слабых грунтов приходилась сравнительно небольшая нагрузка. Тем не менее печальной закономерностью городской застройки был крен старых зданий в сторону своих новых более тяжелых соседей. Несмотря на довольно солидный возраст зданий, превышающих 100...150 лет, многие из них продолжают претерпевать неравномерные осадки, которые обусловлены увеличением техногенной нагрузки на основание (транспортные воздействия, блуждающие токи, протечки инженерных коммуникаций, устройство подземных тоннелей и т.д.). Особенно сильное влияние оказывает новое строительство в среде сложившейся застройки.

В 70-х и начале 80-х годов широко практиковались два способа защиты существующих зданий от нового строительства: так называемое “консольное примыкание” и разделительный шпунт. Сущность первого состоит в максимально возможном удалении фундаментов нового здания от границы с существующим, надземные конструкции на этом участке вывешивались на консолях. Тем самым пытались уменьшить влияние строящегося здания на существующие. Эффект этого мероприятия оказался невелик, поскольку устройство консолей вылетом более 4 м приводило к существенным конструктивным трудностям. Как показывают расчеты, добиться ощутимого результата можно лишь в том случае, если вынос консоли сопоставим с глубиной сжимаемой толщи (около 20 м), что нереально.

Разделительный шпунт, устраиваемый по границе примыкания зданий, оказывается эффективным лишь тогда, когда он прорезает всю сжимаемую толщу и погружается в малосжимаемые грунты. В связи с тем, что эти грунты залегают на глубинах более 20 м, погружение шпунта становится проблематичным как в техническом отношении, так и в плане

обеспечения безопасности окружающих строений. Кроме этого, шпунтовая стенка трансформирует напряженно-деформированное состояние основания, что может привести к его дополнительным осадкам.

Наиболее радикальным является возведение в историческом центре города зданий на свайных фундаментах, опирающихся на сравнительно прочные ледниковые грунты. В этом случае обеспечивается минимальное воздействие статической нагрузки от нового здания на основание существующих строений, возведенных на фундаментах мелкого заложения. Распространение этого способа до конца 80-х годов сдерживалось отсутствием на российском строительном рынке современных щадящих технологий устройства свай. К ним, прежде всего, следует отнести технологии устройства буронабивных свай. Эти технологии, как показывает опыт, требуют адаптации к грунтовым условиям региона, что невозможно без знания специфических свойств слабых глинистых грунтов.

С крупной аварии началось в Петербурге применение технологии изготовления свай “Bauer”: при строительстве отеля “Невский Палас” в результате устройства свай по этой технологии были разрушены три соседних здания. Скважины пробуривались под защитой обсадной трубы, погружаемой статическим вдавливанием со знакопеременным вращением; разработка грунта осуществлялась набором желончных ковшей и шнеков. При проходке слабых глинистых грунтов происходил их наплыв в скважину, из которой грунт бесконтрольно вычерпывался. В результате осадки соседних жилых зданий превышали 30 см, дома были расселены. После повторения аварийной ситуации на другой площадке в Санкт-Петербурге (Малая Дворянская л., д.4-6) встал вопрос о применимости подобной технологии в геологических условиях города. Исследования, проведенные петербургскими геотехниками [1], позволили выявить причины произошедших аварий и установить безопасные технологические режимы. Была предложена методика расчета необходимой высоты грунтовой пробки над нижним обрезом обсадной трубы, обеспечивающей устойчивость забоя скважины [2]; были устранены динамические воздействия на массив грунта, сопровождающие процесс изготовления свай [3]. Адаптация технологии к специфическим свойствам петербургских грунтов позволила успешно применять ее при реконструкции города.

## **Особенности поведения слабых глинистых грунтов**

Петербургская школа геотехников к слабым глинистым грунтам относит насыщенные водой сильносжимаемые грунты, которые при обычных скоростях приложения нагрузок теряют свою прочность, вследствие чего уменьшается сопротивление сдвигу и возрастает сжимаемость.

С позиций физико-химической механики слабый глинистый грунт представляет собой систему дисперсных частиц, каждую из которых окружают оболочки, связанные с ними воды [5]. Эти частицы с оболочками образуют структурный каркас с водно-коллоидным типом связей (точнее – коагуляционным типом связей). Внутри ячеек каркаса, как в капсулах, находится иммобилизованная вода.

При сохранении структурных связей грунт работает как твердое тело, при нарушении – превращается в вязкую жидкость. Численное значение предела прочности этих грунтов при испытаниях в условиях одноосной деформации (в компрессионном приборе) при свободном дренировании варьирует в интервале 5...20 кПа.

Слабые глинистые грунты обладают свойством тиксотропии (способностью к восстановлению части нарушенных связей). Нарушение другой части связей, возникших за счет синерезиса (старения), необратимо.

Твердообразное состояние характеризуется наличием пространственного структурного

каркаса, жидкообразное – его отсутствием. Наличие или отсутствие единого пространственного каркаса определяет макроскопические свойства среды, в том числе, ее механические свойства. Твердообразному состоянию свойственна наибольшая вязкость, жидкообразному – наименьшая. Первое может быть охарактеризовано некоторым сопротивлением сдвигу, тогда как во втором состоянии сопротивление сдвигу близко к нулю.

Выражения для модуля объемного сжатия и для модуля сдвига обычно записывают через параметры (модуль деформации или модуль Юнга) и  $\nu$  (коэффициент Пуассона). Если же последние выразить через коэффициенты бокового давления  $\xi$  и относительной сжимаемости  $m_v$ :

$$\xi = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\nu}{1-\nu}; m_v = \frac{d\varepsilon_1}{d\sigma_1} = \frac{\beta}{E},$$

где

$$\beta = 1 - 2\nu^2 / (1 - \nu),$$

тогда

$$K = (1 + 2\xi) / 3; \nu = (1 - \xi) / 2.$$

Равенство напряжений по всем направлениям для точки:  $\sigma$  является специфическим распределительным свойством жидкости. При этом коэффициент бокового давления  $\xi = 1$ .

Нетрудно убедиться, что при  $\xi \rightarrow 1$   $G \rightarrow 0$ .

Таким образом, при нарушении структурных связей происходит снижение сопротивления грунта сдвигу.

Другой стороной процесса расструктурирования грунта является освобождение воды из ячеек (пор) структурного каркаса. При создании достаточных градиентов напора вода может быть отжата из грунта. Эти особенности поведения слабого глинистого грунта следует учитывать не только при проектировании фундаментов, но и при выборе технологии их устройства.

### **Опыт устройства СФА-свай и их влияние на массив слабого глинистого грунта**

При строительстве ТКЦ для устройства свайных фундаментов была выбрана технология СФА (проходного шнека). Она обладала такими существенными преимуществами, как:

- высокой производительностью (изготовление одной установкой до 20 свай в смену);
- отсутствием какого-либо динамического воздействия на массив грунта, что чрезвычайно важно при строительстве в окружении существующей застройки;
- гарантированным качеством свай как по сплошности ствола, так и по прочности бетона.

Метод успешно применялся во всем мире в самых различных грунтовых условиях, отсутствовал лишь опыт устройства СФА-свай в Петербурге.

Технология заключается во вращательном погружении в грунт шнека на проектную глубину заложения свай и последующем бетонировании через отверстия, имеющиеся в шнеке.

Бетонирование осуществляется по мере подъема шнека (без вращения) под давлением до 0,9 МПа. В заполненную бетоном скважину с помощью вибропогружателя опускают арматурный каркас. Все технологические процессы регистрируются компьютером.

При строительстве ТКЦ фирма-подрядчик строго придерживалась стандартной технологии и обеспечила высокое качество изготовленных свай. Однако, к сожалению, сжатые сроки подготовки и выполнения работ, диктуемые календарным планом, не позволили провести предварительные исследования и адаптировать технологию к специфическим грунтовым условиям Петербурга, на чем настаивали петербургские геотехники. В результате оказалось, что стандартная СФА-технология, зарекомендовавшая себя щадящей в иных геологических условиях, не является таковой по отношению к слабым грунтам Петербурга.

Как показали наблюдения, при погружении шнека на поверхность по его лопастям вытеснялся грунт в объеме, в 2...3 раза превышающем объем шнека. Это явление было обусловлено сложностью выбора оптимального шага лопастей шнека, который позволял бы проходить разнородные грунты (пески, слабые суглинки и прочные моренные отложения) в режиме “нарезания резьбы”, когда каждому повороту на 360° соответствовало бы погружение шнека на один виток. При бурении морены скорость поступательного движения шнека существенно снижалась, режим проходки приближался к “вращению на месте”. В результате по лопастям шнека происходил вынос избыточных объемов слабого грунта, а также, в ряде случаев, его “наматывание” на шнек (что можно было заметить при подъеме шнека). Этот фактор послужил причиной возникновения в грунте растягивающих напряжений, способствующих локальному расструктуриванию слабого глинистого грунта вокруг скважины. Последующая операция – бетонирование при максимальном давлении 0,9 МПа (и средних давлениях 0,4...0,5 МПа) приводила к возникновению в массиве грунта сжимающих напряжений, почти на два порядка превышающих структурную прочность слабого глинистого грунта и, соответственно, к прогрессирующему его расструктуриванию. При обеих операциях слабый глинистый грунт претерпевал деформации формоизменения. Поэтому нагнетание бетона под давлением не восстанавливало status quo, свойственный грунту до погружения шнека, а лишь усугубляло ситуацию.

Тщательное заполнение скважин бетоном без нарушения сплошности (гарантирующее высокое качество свай) препятствовало релаксации напряжений в массиве грунта, о чем свидетельствует следующий факт. Изготовление каждой последующей сваи в кусте требовало возрастающих затрат времени на проходку морены. Пропорционально затраченному времени возрастал объем закачанного в скважину бетона. При теоретическом объеме скважины диаметром 0,62 м и длиной 24 м около 8 м<sup>3</sup> в первую скважину в кусте закачивали 10...12 м<sup>3</sup> бетона, в последнюю – 20...25 м<sup>3</sup> (в нескольких случаях в скважину было уложено более 40 м<sup>3</sup> бетона).

Изменение свойств грунтов при устройстве СФА-свай было отмечено при анализе результатов статического зондирования (СРТ), проведенного до изготовления свай на площадке (в 1997 г.), после устройства каждой сваи в кусте (в августе 1998 г.) и через 8 месяцев после устройства свай (май 1999 г.). Соппротивление статическому зондированию в слабых грунтах уменьшилось вдвое, в морене – на треть, уменьшились пиковые значения в поверхностных песчаных грунтах (см.рис.). Зафиксированная картина повторяет результаты исследований СФА-технологии, выполненных Van Impe в 1980-х годах. В течение последующего полугодия произошло практически полное восстановление механических свойств глинистых грунтов. График сопротивления зондированию практически совпал с исходным.

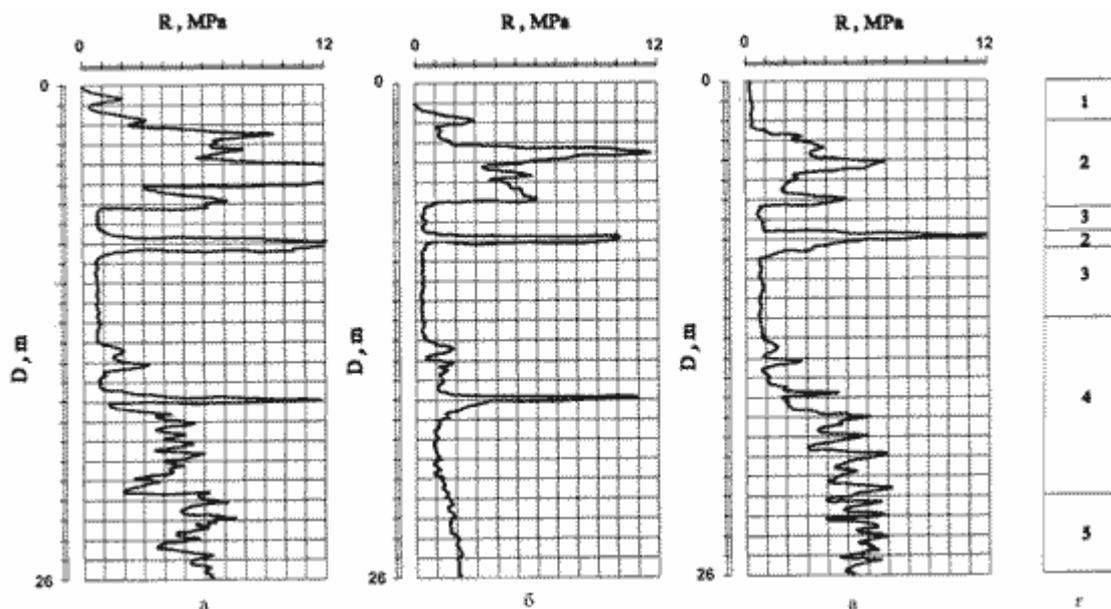


Рис. Результаты статического зондирования (СРТ):

*а* – до начала работ (1997 г.); *б* – в период устройства СФА-свай (август 1998 г.); *в* – через 8 месяцев после устройства СФА-свай (май 1999 г.); *г* – геологическая колонка; 1 – насыпной грунт; 2 – песок средней крупности; 3 – текучепластическая супесь; 4 – суглинки ленточные, текучепластичные; 5 – моренный суглинок

Проведенные нами исследования позволили установить, что для придания СФА-технологии статуса в грунтовых условиях центральной части Петербурга необходимо внести следующие коррективы в стандартную процедуру:

- соотнести вращательное и поступательное движения шнека таким образом, чтобы повороту на  $360^\circ$  соответствовало его погружение на один виток (для выполнения этого требования необходимо рассчитать шаг лопастей шнека, угол их наклона к оси, скорости вращательного и поступательного движений);
- для проходки прочных моренных отложений обеспечить создание достаточного крутящегося момента либо предусмотреть мероприятия по снижению сопротивления бурению;
- бетонирование осуществлять при минимальном давлении, обеспечивающем нормальную транспортировку бетона (0,1...0,2 МПа);
- рассмотреть возможность замены литой бетонной смеси на более жесткие и соответствующего изменения системы ее транспортировки к забою скважины.

К сожалению, эти предложения не могли быть реализованы без кардинального изменения стандартного оборудования. Единственно доступным средством регулирования процесса устройства свай для обеспечения безопасности окружающих строений оставался отказ от применения СФА-технологии в зоне примыкания к существующим зданиям. В 30-метровой зоне примыкания к семиэтажному жилому зданию (крупнейшему доходному дому в Петербурге XIX века) СФА-технология была заменена технологией типа “Bauer”, адаптированной к условиям Петербурга [1] и предусматривающей устройство буронабивных свай под защитой обсадной трубы.

Ограничение зоны применения СФА-технологии принесло свои положительные результаты, позволив обеспечить сохранность соседнего жилого здания. Тем не менее, масштаб воздействия технологии на массив грунта превзошел все ожидания. Сваи, изготовленные по технологии СФА на расстоянии около 30 м от здания, послужили причиной развития его

осадок, несмотря на наличие между домом и сваями шпунтового ряда (типа “Ларсен IV” (Larsen-IV) длиной 12 м.

Как уже отмечалось выше, в результате создания в грунте растягивающих, а затем сжимающих напряжений, слабый глинистый грунт расструктурился в обширной зоне, сопоставимой с глубиной погружения свай. Шпунтовое ограждение в некоторой степени сыграло роль защитной стенки для основания жилого здания от влияния изготовления СФА-свай, однако не позволило избежать его осадок, поскольку длина шпунта была недостаточна для обеспечения его надежной заделки в прочных грунтах. В результате расструктурирования произошло снижение сопротивления грунта сдвигу (зафиксированное при проведении статического зондирования) и, соответственно, снижение пассивного отпора грунта по поверхности шпунтового ограждения. Несмотря на небольшую глубину пионерного котлована (около 2,0 м от поверхности), произошли горизонтальные подвижки шпунтового ограждения на 40...50 мм и даже на 170 мм в зоне минимального расстояния до СФА-свай (рис.1). В условиях снижения пассивного отпора шпунт не смог противостоять активному давлению со стороны массива грунта, нагруженного весом 70-этажного здания.

Из графиков, приведенных на рис.1 видно, что за интенсивными подвижками шпунтового ограждения через несколько дней последовали осадки жилого здания. Такой разрыв во времени характерен для грунтов, обладающих вязкими свойствами. Об этом же свидетельствует запаздывание начала интенсивных смещений геодезических марок по мере их удаления от области наиболее близкого расположения СФА-свай к шпунту и зданию. Характерно, что при этом уменьшалась как абсолютная величина горизонтальных смещений и осадок, так и начальная скорость их развития.

К счастью, достаточно высокая пространственная жесткость здания позволила в значительной степени перераспределить осадки, их относительная неравномерность не превысила 0,002. Благоприятным обстоятельством для здания оказалась и временная приостановка строительства, связанная с финансовым кризисом в России. Тем не менее для обеспечения надежности здания и возможности продолжения строительства (предусматривающего откопку котлована на глубину до 5 м от поверхности) было принято решение об усилении здания. В качестве наиболее целесообразного в данной ситуации варианта было предложено подведение сплошной фундаментной плиты, которая играла бы роль жесткого диска и могла бы выполнять роль ростверка в случае, если окажется необходимым дополнительно устроить буровые сваи.

Таким образом, рассмотренный опыт строительства в центре города в условиях распространения слабых грунтов свидетельствует о насущной необходимости расчетного анализа технологических ситуаций на стадии разработки рабочего проекта, а также о необходимости адаптации технологий к местным грунтовым условиям. В противном случае может оказаться скомпрометированной даже самая передовая геотехнология. Представляется, что приведенные выше рекомендации позволяют успешно применять технологию СФА в условиях плотной городской застройки на слабых грунтах.