

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРОБЧАТЫХ ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ БОЛЬШИХ НАГРУЗОК (МОСТЫ, ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ВЫСОТНЫЕ ЗДАНИЯ)

Х. БРАНДЛЬ – профессор, директор Института механики грунтов и геотехники, Технический университет г. Вена, Австрия.

Коробчатые фундаменты состоят из буронабивных или шнековых свай или стен в грунте, они имеют ряд преимуществ перед обычными фундаментами глубокого заложения, особенно в случае передачи на грунт больших сконцентрированных нагрузок. Они имеют более совершенные деформационные характеристики и более устойчивы к горизонтальным нагрузкам и движениям земной коры. Кроме того, благодаря использованию этих конструкций можно уменьшить площадь фундамента, что особенно важно для фундаментов мостов через реки. Все эти положительные характеристики основываются на связующем эффекте между сваями (стенами) и грунтом. В данной работе анализируются результаты модельных и полевых испытаний, приводится теоретическая информация и сравнительная характеристика буронабивных, шнековых свай и стен в грунте.

ВВЕДЕНИЕ

Коробчатые фундаменты действуют как сложная конструкция, состоящая из свай (стен в грунте или буро-инъекционных стен) и заключенного между ними массива грунта. Сваи и плита ростверка образуют короб, который создает физический эффект перевернутого «горшка». Соответственно, подобные конструкции характеризуются меньшими величинами осадок, чем обычные группы свай, а также более устойчивы к сейсмическим воздействиям. Коробчатые фундаменты, состоящие из буронабивных или шнековых свай, являются особой разновидностью плитно-свайных фундаментов, где для передачи нагрузки также задействован заключенный между сваями массив грунта.

1. ИСПЫТАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Для определения параметров, влияющих на несущую способность и величины осадок коробчатых свайных фундаментов проводились комплексные модельные испытания. В

ходе исследования было проведено 70 испытаний, в том числе следующие серии испытаний:

Испытание коробчатых фундаментов со внутренними сваями (согласно общей практике проектирования);

Испытание коробчатых фундаментов без внутренних свай;

Испытание коробчатых фундаментов без грунтового заполнения (моделирование ситуации нулевой прочности массива включенного грунта);

Испытание коробчатых фундаментов, заполненных бетоном (моделирование монолитного блока);

Испытание обычных групп свай (осевой шаг $a \geq 2d$);

Испытания с учетом непосредственного контакта или наличия свободного пространства между плитой и грунтом;

Испытание отдельных свай.

Испытания обычных свайных групп и отдельных свай проводились для того, чтобы сравнить параметры соотношения между нагрузкой и осадкой для разных видов свай. Кроме того, испытывались сваи разного диаметра (d) и длины (l), изменялась величина

плотности грунта (γ). На рис. 1. показаны три стандартных типа коробчатых фундаментов, которые стали объектами исследования. Моделируемые параметры свай были приближены к реальным, используемым при сооружении фундамента для длинного моста через реку. На рис. 2. показано устройство оборудования для маломасштабных испытаний.

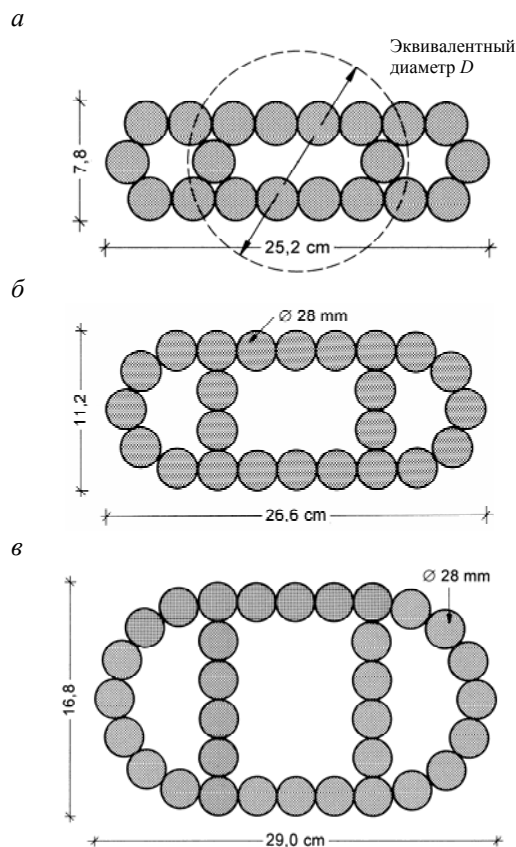


Рис. 1. Три типа коробчатых фундаментов, используемых в модельных испытаниях (масштаб 1:50):
а – короб S (малый); б – короб M (средний);
в – короб L (большой)

В ходе испытаний на основании 5 или 6 измерений строились кривые «нагрузка-осадка» до момента разрушения, определялись мутьда оседания и величина усилия на сваю.

На рис. 5 на нормализованных диаграммах показаны некоторые результаты испытаний. По этим данным можно провести непосредственное сравнение результатов испытаний обычных групп свай или полевых измерений на площадках строительства. Безразмер-

ные диаграммы такого типа также могут быть представлены в больших масштабах.

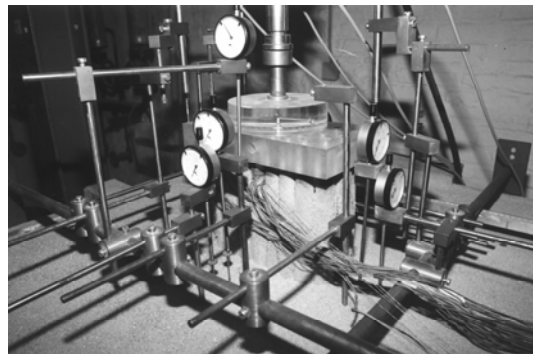


Рис. 2. Оборудование для испытания коробчатого свайного фундамента

На диаграммах отражается влияние устройства свай и интенсивность связей внутри короба фундамента. Благодаря установке внутренних свай уменьшается величина осадки, что может быть выражено через т. н. коэффициент секции $\alpha_s \leq 1,0$ (рис. 4). Сравнив два этих рисунка, можно увидеть, что отношение $Q/(A\gamma)$ – геотехническая эффективность – для малых коробчатых фундаментов больше, хотя, конечно, в целом большие коробчатые фундаменты могут воспринимать большие общие нагрузки, благодаря тому, что их площадь больше и в них входит большее количество свай. На рис. 5 показан связующий эффект: размер заштрихованной зоны между кривыми, характеризующими коробчатые фундаменты без грунтового заполнения и монолитные коробчатые фундаменты, зависит от связующего фактора.

При ограничении нагрузки на сваю увеличивается влияние зависимости между площадью фундамента A и его окружностью U . Эта зависимость соотносится с «гидравлическим радиусом» R . Поэтому коробчатые фундаменты, характеризующиеся малым гидравлическим радиусом (то есть протяженные), могут передавать большие нагрузки, чем фундаменты квадратной или круглой формы. Это хорошо соотносится с теорией, так как квадратные или круглые фундаменты приводят к более высокой концентрации напряжений в грунте.

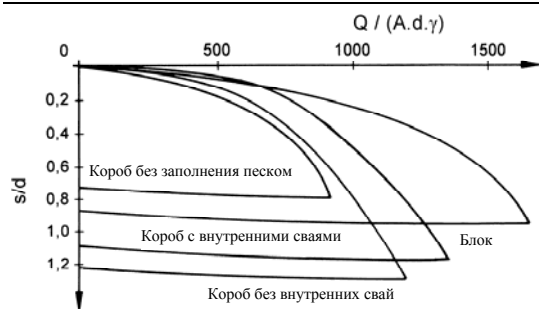


Рис. 3. Безразмерные кривые «нагрузка-осадка» для свайного короба S . Длина свай $l = 40$ см. S – осадка, Q – общая нагрузка на фундамент, d – диаметр свай, A – площадь фундамента (поперечное сечение площади окружности внутри свайного короба), γ – плотность грунта

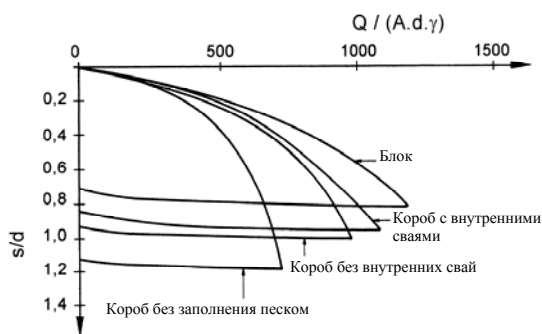


Рис. 4. Безразмерные кривые «нагрузка-осадка» для свайного короба L

По мере увеличения гидравлического радиуса коробчатого фундамента возрастает и доля внешней нагрузки, непосредственно воспринимаемой массивом грунта между сваями (при допущении одинакового расположения свай). На основании испытаний моделей можно вывести «коэффициент короба» k :

$$Q_{\text{грунта}} = k \cdot Q_{\text{общая}} \quad (1)$$

$$\text{отсюда } Q_{\text{свай}} = (1 - k) \cdot Q_{\text{общая}} \quad (2)$$

соответственно, $0 \leq k \leq 0,4$.

С увеличением жесткости массива грунта, возрастает и коэффициент короба. Обычно его значения не превышают $k \leq 0,4$. Большие величины можно получить в случае улучшения грунта с помощью методов инъектирования или глубинного перемешивания.

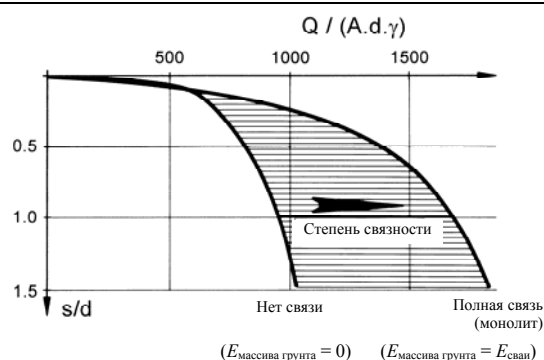


Рис. 5. Влияние жесткости массива грунта или эффект связи между сваями и находящимся между ними массивом грунта на коробчатый фундамент S ; длина свай $l = 40$ см

На рис. 6 показан коэффициент короба при ограниченных нагрузках, что соответствует увеличению наклона кривой «нагрузка-осадка». Линия k не может быть экстраполирована линейно, пока величины не превышают $A/U/d = 2$. В целях безопасности рекомендуется проектировать сваи с учетом того, что далее коэффициент короба не изменяется. При предельной нагрузке усилия концентрируются на сваях, потому что отношение между жесткостью свай и пластичностью грунта увеличивается. Это приводит к уменьшению коэффициента короба k . На рис. 6 показано, как размер(ы) ячейки влияет на параметры передачи нагрузки через массив (ядро) грунта. По мере увеличения гидравлического радиуса коробчатого фундамента A/U или $A/U/d$ возрастает и доля внешней нагрузки, непосредственно воспринимаемой массивом грунта между сваями. Сцепление грунта почти не влияет на отношение $Q_{\text{грунта}}/Q_{\text{общая}}$, но оно должно учитываться в механизме передачи нагрузки через сваи, следовательно, определяет величины трения по боковой поверхности свай и сопротивления по пяте свай.

На рис. 6 приведено лишь одно из множества соотношений, поскольку коэффициент короба зависит от целого ряда параметров:

- отношения $A/U/d$;
- толщины коробчатого фундамента l/D ;
- соотношения между жесткостью бетонных конструкций ($E_{\text{бетона}}$) и жесткостью грунта ($E_{\text{грунта}}$);
- многосекционного профиля коробчатого фундамента;

соотношения между рабочей и предельной нагрузками;
величин осадок.

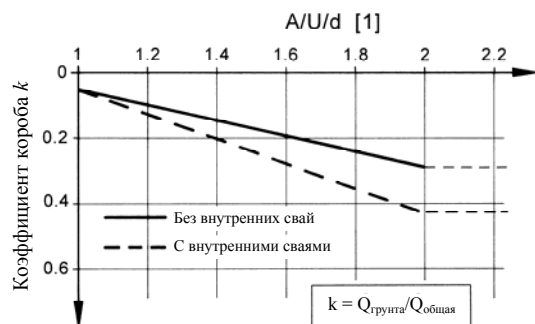


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента коробки k для коробчатых фундаментов от отношения $A/U/d$, A – площадь свайного короба, U – окружность свайного короба, d – диаметр свай (на основании модельных испытаний)

Доля внешней нагрузки, непосредственно передаваемой с плиты на грунт основания $Q_{\text{грунта}}/Q_{\text{общая}}$, уменьшается параллельно с уменьшением длины свай l и толщины короба. Наименьшее значение достигается при $l/D = 0$ (то есть в случае работы чисто плитного фундамента, где плита воспринимает 100% общей нагрузки $Q_{\text{общая}}$) и $l/D = 0,5-0,75$, когда плита воспринимает 30–60% от общей нагрузки $Q_{\text{общая}}$.

Основные вертикальные нагрузки, воспринимаемые коробчатым свайным фундаментом, передаются прежде всего через внутренние, а не внешние сваи. И по мере увеличения общей нагрузки, возрастает и нагрузка на внутренние сваи, это объясняется давлением грунта внутри секций фундамента (Brandl, 2001).

Величина давления по пяте свай возрастает по мере увеличения размера секций грунта, поскольку большие секции оказывают большее давление. В верхней части короба на круглые стены действует разность бокового давления грунта с направлением наружу. С увеличением глубины горизонтальное давление грунта компенсируется боковым давлением грунта в состоянии покоя, которое действует на внешнюю сторону коробчатого фундамента. Поэтому прилегающие сваи должны обеспечивать достаточный связующий эффект вдоль линии их соединения (в основном в

верхней части), то есть предпочтительнее устраивать секущие, а не примыкающие сваи. В случае устройства сплошных или даже прерывистых стен для обеспечения более эффективной передачи нагрузки и заполнения пробелов используется технология инъектирования.

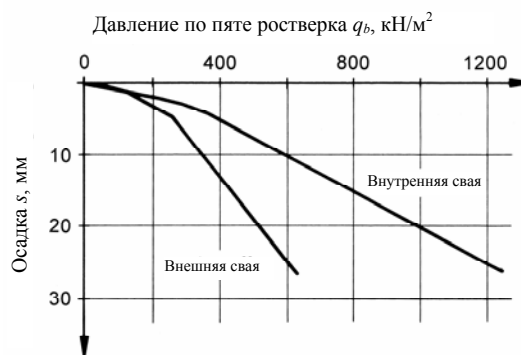


Рис. 7. Зависимость осадки свайного короба S от давления по пяте ростверки

Можно рассчитать эффективность свай, образующих поперечные стены в коробчатых фундаментах глубокого заложения, разделив величину уменьшения осадки на пропорционально увеличивающееся число свай (устраиваются дополнительные внутренние сваи, которые образуют многосекционный профиль). В ходе испытания моделей выяснилось, что сваи, образующие поперечные стены длинных коробчатых фундаментов, более эффективны, чем те, которые устраиваются для квадратных или круглых секций.

2. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ

2.1. Общие замечания

При обычном проектировании несущая способность свайного ростверка фундаментов глубокого заложения чаще всего не учитывается. Однако коробчатые фундаменты глубокого заложения ведут себя как составная структура, и массив грунта, заключенный между сваями, не может передвигаться, следовательно, воспринимать внешние нагрузки. Поэтому необходимо спроектировать свайный ростверк таким образом, чтобы он воспринимал значительную долю нагрузки от

сооружения и передавал ее на грунт основания. Всесторонние модельные испытания и полевые измерения показали, что осадка таких коробчатых фундаментов меньше, чем в случае устройства обычных свайных групп или стен в грунте. Благодаря отсутствию боковой деформации массива грунта и уменьшению деформации сдвига осадки конструкции значительно уменьшаются, потому что вся система фундамента действует по принципу перевернутого «горшка». Для проектирования и расчетов коробчатых фундаментов глубокого заложения можно использовать следующие теории:

- Теория полупространства;
- Теория предельных состояний;
- Моделирование коэффициента постели;
- Численное моделирование.

2.2. Теория упруго-изотропного полупространства

На рис. 8 приводится расчетная схема для определения удельной осадки цилиндрического коробчатого фундамента в зависимости от диаметра и толщины фундамента. В ее основе лежит теория полупространства (Brandl, 1987, 2001). Изначально интеграция уравнений Миндлина использовалась для определения диаметра окружности относительно оси окружной стены (Nazivar, 1979). Поэтому, если короб имеет прямоугольную или многоугольную форму, необходимо выбирать эквивалентный диаметр. Теоретический диаметр сечения должен быть несколько меньше реального (то есть минус $d/2$) в зависимости от расположения свай (прерывистое, сплошное или секущее). Это приближение допустимо и проверено на практике, особенно в случае проектирования и устройства обычных прямоугольных коробчатых фундаментов. В этом случае преобразование в эквивалентный диаметр подразумевает более теоретически обоснованную концентрацию напряжений, в особенности для вытянутых прямоугольных коробов (например, рис. 1, короб S). Этот эффект иллюстрирует тот факт, что величина эквивалентного диаметра несколько превышает реальный размер между осями стен и более подходит для зон, где на самом деле передается сила трения.

Отдельные элементы, расположенные в массиве грунта между сваями, уменьшают величину осадки, но незначительно. Поперечные стены более действенны. Еще одна цель устройства этих дополнительных элементов – укрепление коробчатого фундамента и обеспечения статически оптимальной поддержки плиты ростверка. Кроме того, возрастает несущая способность конструкции на горизонтальные нагрузки и перемещения, и она становится более устойчивой к сейсмическим воздействиям.

На рис. 8 показаны кривые, отражающие развитие осадок цилиндрических коробчатых фундаментов без внутренних элементов жесткости. Но в ходе проведения всесторонних модельных испытаний коробчатых свайных фундаментов с внутренними сваями или без них, выяснилось, что при устройстве внутренних стен увеличивается несущая способность конструкции, и уменьшаются осадки. На основании испытаний моделей и полевых измерений, проводимых на многочисленных площадках строительства, можно вывести коэффициент сечения α_c , который описывает влияние многосекционного профиля коробчатого фундамента (рис. 9). Этот коэффициент определялся для рабочих нагрузок, составляющих 50% от величины предельной нагрузки. Обычно его значения варьировались в пределах

$$0,5 \leq \alpha_c \leq 1,0 \quad (3)$$

Этот коэффициент имеет максимальное значение при отсутствии внутренних свай, а минимальное – в случае устройства многосекционного короба с относительно малыми по размеру секциями (ячейками). В последнем варианте свайный фундамент или стена в грунте ведет себя также, как квази-моноклитный фундамент глубокого заложения. На рис. 9 показано, что коэффициент сечения зависит от гидравлического радиуса A/U коробчатого фундамента, диаметра сваи d (или толщины стены d), количества секций внутри короба. Максимальный эффект по уменьшению осадок и увеличению жесткости конструкции достигается, когда короб разделен на 2-3 секции. Обычно большие фундаменты состоят по крайней мере из 3 секций. Теоретически минимальный коэффициент α_c

получается, если весь короб заполнен бетонными элементами (или инъекционными колоннами, или колоннами глубинного перемешивания). Но возведение такого фундамента неэкономично. Однако выгодным с экономической точки зрения решением является локальное улучшение массива грунта посредством инъектирования. Тем не менее, опыт показывает, что при практической оценке величин осадок должен учитываться коэффициент секции, значение которого не меньше $\alpha_c = 0,5$.

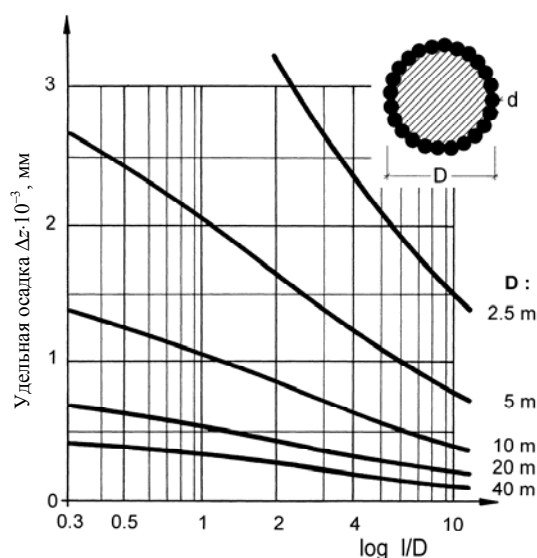


Рис. 8. Расчетная схема для коробчатых фундаментов: кривые развития осадок для цилиндрических коробчатых фундаментов при удельной нагрузке $Q = 1$ кН. Отношение l/D как параметр фундамента, где l – длина свай или стены в грунте, удельный модуль грунта $E_s = 20$ МН/м², d – толщина стены, D – эквивалентный диаметр коробчатого фундамента

На основании рис. 8 и 9 величина осадки s для коробчатых фундаментов глубокого заложения с эквивалентным диаметром D вычисляется следующим образом:

$$s = \alpha_c \left(\frac{Q'_{\text{tot}}}{Q_1} \right) \left(\frac{E_{sl}}{E_s} \right) \Delta z', \quad (4)$$

где α_c – коэффициент секции α_c для коробчатого фундамента глубокого заложения (см. рис. 9); Q'_{tot} [кН] – общая нагрузка на группу свай (или группу стен в грунте); Q_1 – удельная

нагрузка, то есть $Q_1 = 1$ кН; E_s [кН/м²] – модуль грунта (среднее значение);

$E_{s,l}$ – удельный модуль, т.е. $E_{s,l} = 20$ МН/м²; Δz – удельная осадка (см. рис. 8).

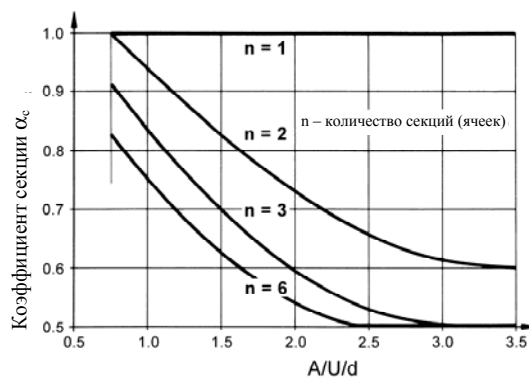


Рис. 9. Зависимость коэффициента секции α_c многосекционного коробчатого фундамента от отношения $A/U/d$, n – количество секций (ячеек) как параметр коробчатого фундамента

Изначально уравнение 4 описывало фундаменты, где толщина стены $d = 1$ м, но с достаточной точностью можно использовать и значения $d = 0,8-1,5$ м (в отдельных случаях толщина диафрагмы может быть $d = 0,6$). Строго говоря, эта величина выведена при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,3$ и отношении модулей конструктивных элементов к грунту, равном примерно 10^3 . Тем не менее, величины коэффициента Пуассона в пределах $0,2 < \nu < 0,5$ практически не влияют на результат вычислений. Кроме того, при правильном выборе модуля грунта допускается изменение отношения $E_{\text{свая}}/E_{\text{грунт}}$ в пределах от 5×10^2 до 5×10^3 . Поэтому уравнение 4 и рис. 8 могут использоваться для расчетов в условиях совершенно разных грунтов. Для очень слабых глин вычисляемые величины осадок значительны, а для очень жестких переуплотненных глин коэффициент секции может не учитываться (поскольку $\alpha_c = 1$ также для многосекционных фундаментов). Кроме того, данная формула не может применяться, если модуль грунта $E_s \geq 100$ МН/м².

2.3. Теория предельных состояний

В основе теории анализа предельных состояний лежат теоретические идеальные

допущения, поэтому она не всегда идентична анализу предельных нагрузок и условий их возникновения для фундаментов глубокого заложения.

Для оценки несущей способности коробчатых фундаментов в практике проектирования успешно применяются два метода:

Вычисление несущей способности отдельной сваи или стены в грунте, коэффициент запаса F_1 ;

Вычисление несущей способности и величин осадок для коробчатого фундамента как квази-моноклитной конструкции (теория моноклитности, коэффициент запаса F_2).

При оценке несущей способности отдельных элементов можно получить только очень приблизительные предельные значения, поскольку в данном случае не учитывается связующий эффект между бетонными элементами и массивом грунта. Поэтому можно вычислить максимальные нагрузки, действующие на сваю или стену в грунте. Но в реальной ситуации отдельные элементы не могут разрушиться благодаря наличию связующего эффекта и жесткой (армированной) связи между сваями или стенами в грунте и плитой ростверка. Кроме того, несущая способность коробчатых фундаментов глубокого заложения обычно описывается как механизм саморегуляции, в особенности, если коробки дополнительно укреплены внутренними свайными стенами, тогда в случае локального перенапряжения грунта вокруг сваи возможно перераспределение напряжения. Поэтому для данной теоретической модели используются очень небольшие значения коэффициента запаса: обычно $F_1 \geq 1,15$. В случае быстрого строительства или чрезвычайных условий допускается величина $F_1 = 1,05$. Вопреки теории моноклитности, в данном случае принимается во внимание трение по внешней и внутренней боковой поверхности короба фундамента, а не то, которое действует между отдельными элементами.

Другой метод в рамках теории предельных состояний – идеальная теория моноклитности, здесь предполагается наличие полного связующего эффекта между элементами фундамента глубокого заложения и массивом грунта, заключенного внутри короба. Однако наличие полного связующего эффекта –

исключительно теоретическое предположение, которое на практике не подтвердилось. Поэтому в данном случае требуется учитывать большие значения коэффициента запаса: например, $F_2 \geq 3,0$ в случае использования традиционных методов расчета для оценки предельного состояния эквивалентного фундамента неглубокого заложения.

В инженерной практике теория моноклитности зарекомендовала себя как достаточно удобный и точный метод анализа величин осадок, поскольку здесь предполагается, что основание коробчатого фундамента – условная поверхность полупространства. Теоретическая величина контактного давления определяется как уменьшение общей нагрузки Q на величину трения по боковой поверхности Q_s .

3. СЛУЧАИ ИЗ ПРАКТИКИ

3.1. Общие замечания

За 30 лет в ходе проведения многочисленных полевых измерений и испытаний была накоплена значительная информация о напряженно-деформированном состоянии коробчатых фундаментов глубокого заложения мостов, электростанций, промышленных и высотных зданий. Обследовались прямоугольные, круглые, эллиптические или многоугольные коробчатые фундаменты, в большинстве случаев укрепленные поперечными и/или продольными элементами. Иногда внутри секций фундаментов устраивались дополнительные отдельные сваи или панели-диафрагмы (по статическим причинам, для компенсации нарушений, возникших при установке и т.д.). Фундаменты закладывались в самых разнообразных грунтах: от слабых до жестких переуплотненных глин, от рыхлых до плотных песков, гравия, от выветрелых отложений на склонах до разрушенных скальных пород.

Конструкции стен и методы их устройства также отличались, что оказывало влияние на зависимость между нагрузками и осадками для коробчатых фундаментов. Например, стены в грунте способствуют лучшей передаче сдвиговых усилий с бетонных панелей, чем сплошные свайные стены, но, с другой сторо-

Поперечное сечение (в том числе и разновидность свай) и толщина коробчатого фундамента;

Величина и распределение внешних нагрузок (V, H, M);

Свойства грунта;

Величина и распределение контактного напряжения между плитой фундамента и грунтом;

Глубина заложения фундамента;

Глубина выемки грунта (откопка котлована);

Условия строительства.

Естественно, что результаты полевых измерений очень разнообразны, здесь наблюдается разброс значений и их изменений в процессе строительства. В статье рассматриваются несколько случаев из практики, где фундаменты устраивались в совершенно различных грунтах: от плотного песка до слабой глины.

Фундаменты опор моста располагаются в толстом слое достаточно молодых речных отложений: 4-метровый слой гравия с песком, под которым залегают слабые илистые грунты (песчаные и глинистые); величина природной влажности находится в пределах текучести и раскатывания, а плотность сухого грунта составляет $\rho_d = 1,6\text{--}1,7 \text{ т/м}^3$. На рис. 10 показан план расположения свай, образующих коробчатый фундамент. Внешние сваи образуют секущую стену, поэтому здесь армирована только каждая вторая свая. Все внутренние сваи армированы, что позволяет обеспечить лучшую передачу нагрузки с опоры

моста на фундамент глубокого заложения. Строительство моста было завершено в 1971 г. Сегодня, скорее всего, и внутренние сваи были бы секущими, так как это увеличивает жесткость конструкции.

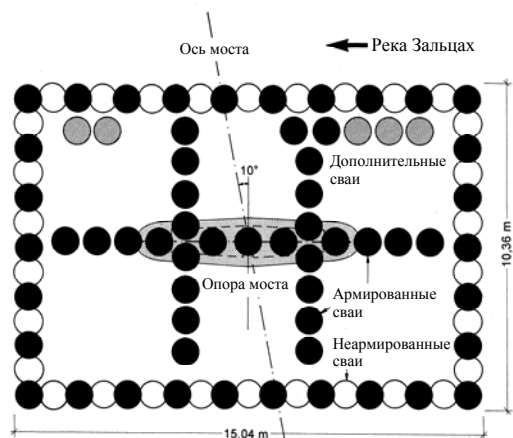


Рис. 10. План коробчатого фундамента для автодорожного моста, построенного на илистых речных отложениях. Бурунабивные сваи $d = 0,9$ м. Для облегчения строительных работ и улучшения локальной неоднородности грунта устроены дополнительные отдельные сваи (заштрихованы), черные круги – армированные сваи, белые – неармированные

При проектировании моста особое внимание уделялось оценке (неравномерных) осадок, поскольку это было одно из первых сооружений на коробчатом фундаменте. Измеренная величина осадки центральной опоры моста ($s = 55$ мм) гораздо меньше прогнозируемого максимума ($s = 100$ мм), тем не менее, ее значения соотносятся с результатами, приведенными на рис. 8 и в уравнении 4:

Площадь коробчатого фундамента, $A = 155,6 \text{ м}^2$;

Окружность коробчатого фундамента,
 $U = 50,7 \text{ м};$

Эквивалентный диаметр для цилиндрического фундамента, $D = 14$ м;

Длина сваи, $l = 11$ м;

Толщина короба фундамента, $l/D = 0,8$ м;

Общая нагрузка (рабочая нагрузка была уменьшена), $Q'_{\text{общ.}} = 55000 \text{ кН}$;

Модуль грунта (среднее значение), $E_s = 8 \text{ МН/м}^2$.

На основании рис. 9 вычисляется коэффициент секции $\alpha_c = 0,5$ (для 6 секций), поэтому удельная осадка $\Delta z' = 0,8 \cdot 10^{-3}$ мм. Отсюда можно вычислить величину общей осадки

$$s = 0,5 \left(\frac{55000}{1} \right) \left(\frac{20}{8} \right) 0,8 \cdot 10^{-3} = 55 \text{ мм} \quad (5)$$

3.3. Автодорожный мост, фундамент которого заложен в слое слабых ленточных глин

На рис. 11 показана схема коробчатого свайного фундамента для 317-метрового автодорожного моста через реку в Альпах. Основание состоит из 3-метрового слоя речного гравия, под которым залегают ленточные пылеватые глины с включениями песка и ила. Молодые отложения водонасыщены ($w_n = 30-45\%$), величина влажности находится между пределами текучести и раскатывания. Плотность сухого грунта варьируется в пределах от $\gamma_d = 12,5$ до 16 кН/м^3 . Величина компрессионного модуля составляет $E_s = 3,5 - 5 \text{ МН/м}^2$ на поверхности и увеличивается с глубиной до $E_s = 8 - 13 \text{ МН/м}^2$ (на глубине 40 м), среднее измеренное значение составляет $E_s = 8 \text{ МН/м}^2$.

Каждая опора моста представляет собой конструкцию, воспринимающую и передающую на грунт нагрузку $Q = 100 \text{ МН}$. Фундаменты глубокого заложения – плитно-свайные коробчатые. Средняя величина нагрузки на сваю – $Q = 1,5 \text{ МН}$, максимальная величина нагрузки на 35-метровую сваю большого диаметра ($d = 1,2 \text{ м}$) составляет $Q_{\max} = 2 \text{ МН}$. Для выверки проектировочных значений перед началом строительных работ проводилось испытание свай на статическую нагрузку. Производилось испытание со ступенчатым приращением нагрузки (первое приращение на $\Delta Q = 500 \text{ кН}$, каждое последующее – на $\Delta Q = 100 \text{ кН}$) от $1,5 \text{ МН}$ до максимальной величины $2,6 \text{ МН}$ с выдержкой на каждой ступени в 30 мин. При величинах нагрузки $Q = 1,5$ и $Q = 2,4 \text{ МН}$ моделировались условия консолидаций и нагрузка действовала в течение 65 ч. Это привело к возникновению осадок 12 и 35 мм при степени консолидации 90–95%.

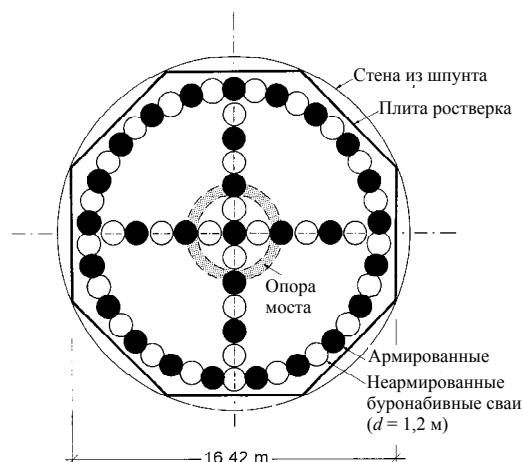


Рис. 11. План коробчатого фундамента глубокого заложения для опоры автодорожного моста через реку. Грунт: слабая (заиленная) глина

На основании результатов полевых испытаний величина общей осадки для обычных свайных групп составила бы $s = 10 \text{ мм}$. Однако благодаря наличию связующего эффекта и многосекционной конструкции коробчатые свайные фундаменты испытывают гораздо меньшую осадку. Продолжительные измерения, проводимые во время строительства (1984-01985 гг.), показали, что величина осадки была гораздо меньше, а с 1994 г. начался процесс окончательной консолидации. Измеренные величины осадок совпадали с прогнозируемыми (на основе уравнения 4):

Эквивалентный диаметр коробчатого фундамента $D = 16 \text{ м}$;

Длина свай $l = 35 \text{ м}$;

Толщина короба фундамента $l/D = 36/16 = 2,2$;

Нагрузка на сваю $Q'_{\text{общ.}} = 85000 \text{ кН}$;

Модуль грунта (среднее значение) $E_s = 8 \text{ МН/м}^2$.

Согласно рис. 8 величина удельной осадки равна $\Delta z' = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$. В соответствии со схемой расположения внутренних свай вычисляется коэффициент секции $\alpha_c = 0,50$ (см. рис. 9). Следовательно можно определить величину общей осадки $s = 0,50 \times 85,000 \times 20/8 \times 0,53 \times 10^{-3} = 56 \text{ мм}$.

Измеренная величина осадки составила $s = 50 \text{ мм}$. Реальное значение несколько меньше прогнозируемого, потому что для обеспечения достаточной надежности опоры в случае

понижения речного русла была установлена плита 5-метровой толщины. Поэтому свайный коробчатый фундамент был устроен на глубине 40 м ниже уровня поверхности, хотя в ходе вычислений принималось, что длина свай $l = 35$ м.

3.4. Фундамент гидроэлектростанции

На рис. 12 показан план гидроэлектростанции, сюда входят машинный зал, два генератора и три плотины. Оборудование электростанции представлено турбинами Каплана с вертикальными валами, поэтому на него оказывают негативное влияние неравномерные осадки.

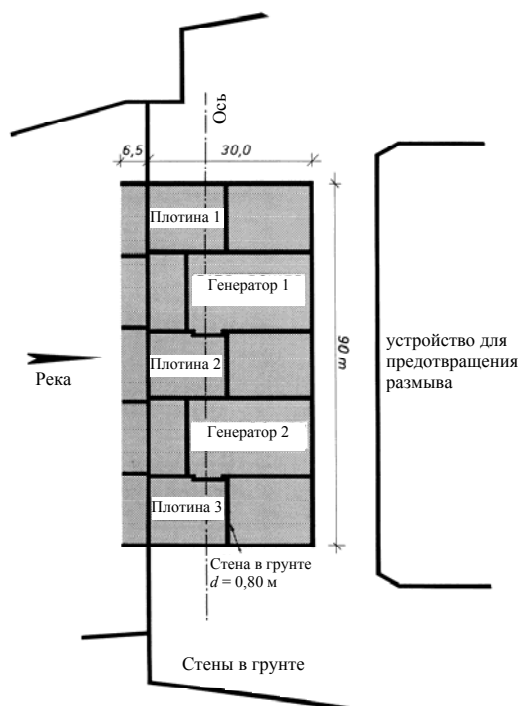


Рис. 12. Фрагмент плана электростанции на коробчатом фундаменте со стенами в грунте, заложенном в слое слабых пылевато-глинистых грунтов

Электростанция расположена в заливной долине реки. Основание состоит из речных отложений (гравий с песком средней плотности), под которыми находится слой мелкозернистых грунтов. Хотя на площадке преобладают илистые глины, также есть включения пылеватых или однородных песков. Соответ-

ственно, характеристики грунта варьируются следующим образом:

Влажность $w_n = 15\text{--}50\%$

Плотность твердого грунта $\rho_d = 1,3\text{--}1,7 \text{ т/м}^3$

Предел текучести $w_l = 20\text{--}60\%$

Число пластичности $I_p = 0\text{--}30\%$

Жесткость слабых глин и илистого грунта увеличивается с глубиной: величина модуля грунта на поверхности слоя составляет $E_s = 4\text{--}10 \text{ МН/м}^2$, а на глубине 30–40 м – $E_s = 10\text{--}20 \text{ МН/м}^2$. В ходе стандартных испытаний на пенетрацию были определены величины $N_{30} =$ от 1 до 10 в зависимости от глубины (4–36 м ниже уровня поверхности).

Несмотря на то, что подошва фундамента электростанции находится ниже первоначального уровня поверхности (то есть в слое слабых речных отложений) и дополнительная нагрузка на грунт сравнительно не велика, необходимо было устраивать фундамент глубокого заложения. Был спроектирован коробчатый фундамент с продольными и поперечными стенами в грунте (толщина 0,8 м), чтобы:

Уменьшить разность осадок;

Увеличить коэффициент запаса в случае землетрясения (электростанция расположена в сейсмически активном районе);

Предотвратить вымывание грунта из-под фундамента электростанции.

При проектировании сооружения открытых стыков между генераторами и плотинами не предполагалось. Эти швы укреплялись таким образом, чтобы в случае возникновения разности осадок они бы работали как шарниры.

Деформации развивались в соответствии с прогнозом: в ходе работ по откопке глубокого котлована под гидроэлектростанцию образовалось поднятие его дна. По мере увеличения нагрузки развивались осадки, второй причиной их нарастания послужило понижение уровня грунтовых вод. Общая осадка достигла максимальной величины $s = 55$ мм. Но благодаря жесткости конструкции коробчатого фундамента величина неравномерных осадок была незначительной.

Хотя трудно сравнивать характеристики большого фундамента электростанции и многосекционных коробчатых фундаментов

для опор мостов и высотных зданий, даже в этом случае для оценки осадок можно применять диаграмму, приведенную на рис. 8:

Площадь поперечного сечения коробчатого фундамента в плане $A = 3000 \text{ м}^2$;

Эквивалентный диаметр цилиндрического фундамента $D = 61 \text{ м}$;

Длина стен в грунте (среднее значение) $l = 16 \text{ м}$;

Толщина короба фундамента $l/D = 0,3$;

Эффективная нагрузка, необходимая для возникновения осадки (уменьшена вследствие выемки грунта) $Q'_{\text{общ}} = 270000 \text{ кН}$;

Модуль грунта основания (среднее значение под стенами в грунте), $E_s = 15 \text{ МН/м}^2$

На основании рис. 8 определяется удельная осадка $\Delta z' = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, а на основании рис. 9 – коэффициент секции $\alpha_c = 0,5$. Отсюда можно вычислить величину общей осадки

$$s = 0,5 \left(\frac{270000}{1} \right) \left(\frac{20}{15} \right) 0,3 \cdot 10^{-3} = 54 \text{ мм} \quad (6)$$

3.5. Коробчатый фундамент с использованием наклонных свай

На судоходных реках с быстрым течением существует опасность вымывания грунта из-под опор моста (в том числе из-под их фундаментов), поэтому они должны иметь минимально возможные размеры и обладать лучшими гидравлическими параметрами. Соответственно, в данном случае альтернативным вариантом для традиционного фундамента призматической формы является коробчатый фундамент в форме усеченного конуса. На рис. 13 приводится продольный разрез такого фундамента, а на рис. 14 – поперечное сечение в верхней и нижней частях свай. На рис. 15–17 показаны коробчатые фундаменты меньшего размера, на рис. 18 – датчик давления.

И в том, и в другом случае сваи устанавливались через слой золы, которой были заполнены сборные железобетонные короба, установленные на дне реки и предварительно укрепленные направляющими сваями.

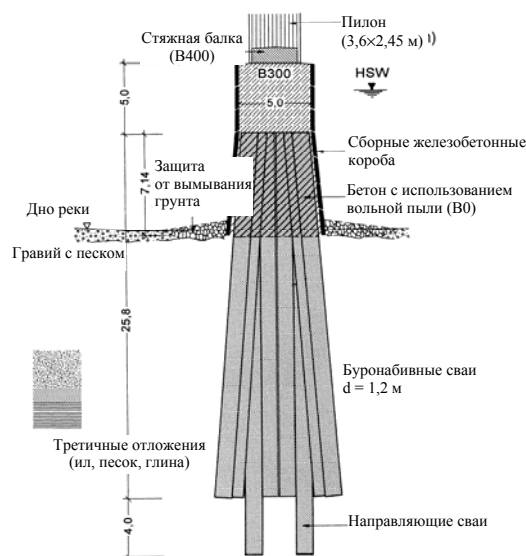


Рис. 13. Продольный разрез коробчатого фундамента на наклонных сваях (для опоры моста)

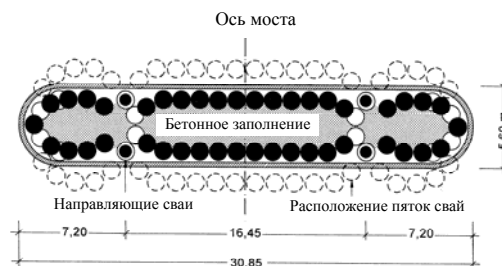


Рис. 14. Поперечное сечение в верхней части свай (см. рис. 13). Положение пят свай указано пунктиром

Это позволило облегчить процедуру устройства наклонных свай и увеличить связующий эффект для коробчатого фундамента. Направляющие сваи были устроены заранее (с рабочих судов) для того, чтобы зафиксировать места установки остального оборудования и опустить сборные железобетонные короба на дно реки. Поэтому обсадная труба в верхней части этих конструкций не устранилась. Кроме того, для предоставления дополнительной информации о свойствах грунта, находящегося под подошвой коробчатого фундамента, направляющие сваи устанавливались на большую глубину, чем обычные. Сооружение коробчатого фундамента с использованием на-

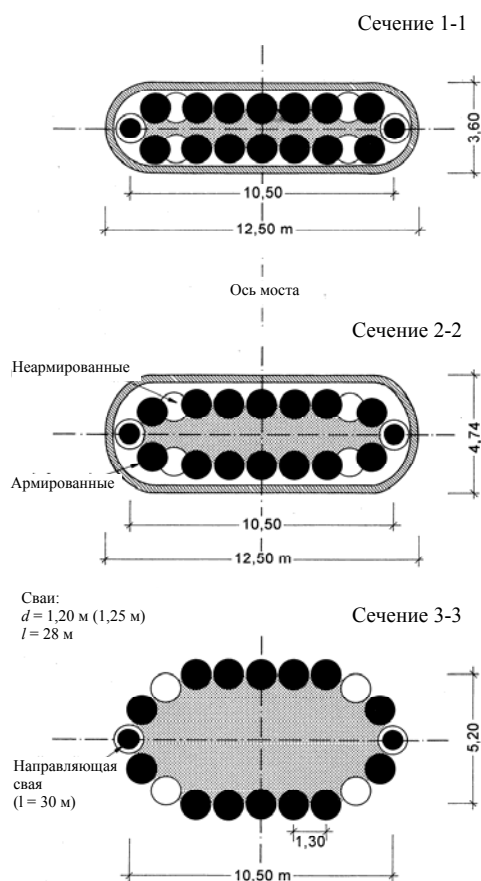


Рис. 15. Поперечный разрез коробчатого фундамента на наклонных сваях: пример малого короба. Разрез 1-1 выполнен на уровне голов свай, разрез 3-3 – на уровне пят свай

Поэтому, а также из-за геометрии конструкции коэффициент короба уменьшается с увеличением глубины. Подобный фундамент представляет собой нечто среднее между коробчатым и плитно-свайным фундаментом.

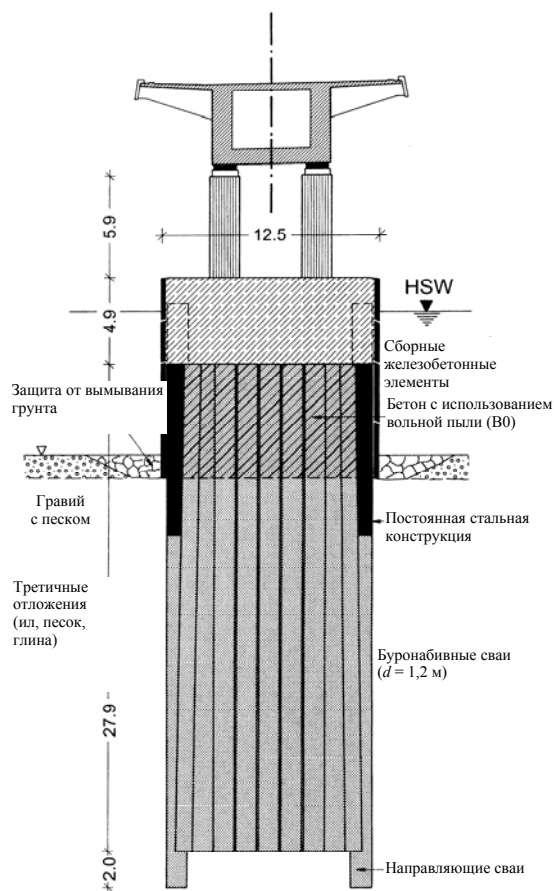


Рис. 16 (к рис. 15). Вид более длинного участка
свайного короба



Рис. 17. Оголовки армированных свай внутри сборных железобетонных элементов (к рис. 15, 16). Для создания эффекта замкнутого короба в верхней части фундамента глубокого заложения в некоторых местах слои гравия с песком между сваями были проинъецированы



Рис. 18. Фрагмент рис. 15–17. Установка мессдозы ($d = 1,20$ м) в пята буронабивной сваи большого диаметра, установка армированного каркаса в стальную трубу

На рис. 19, 20 показан процесс строительства коробчатого свайного фундамента из котлована на дне реки, который огорожен шпунтом. Основание состоит из слоев ленточных глин и пылеватых грунтов с включениями песка и присутствием артезианских грунтовых вод. Поэтому потребовались меры по предотвращению гидравлического разрушения: повышение уровня грунтовых вод в осадной трубе и/или использование стабилизирующего раствора (бентонита). Фундаменты остальных опор 866-метрового моста через Дунай представляют собой прямоугольные коробчатые фундаменты с внутренними буронабивными сваями или стенами в грунте (рис. 21). Величины вертикальных нагрузок на фундаменты глубокого заложения варьировались от 80 до 300 МН, следовательно, для неравномерных осадок вдоль статически неустойчивой балочной системы моста необходимо было строить короба разной конструкции и закладывать их на разную глубину.

На рис. 22 показаны коробчатые свайные фундаменты для боковых стен плотины. Из-за

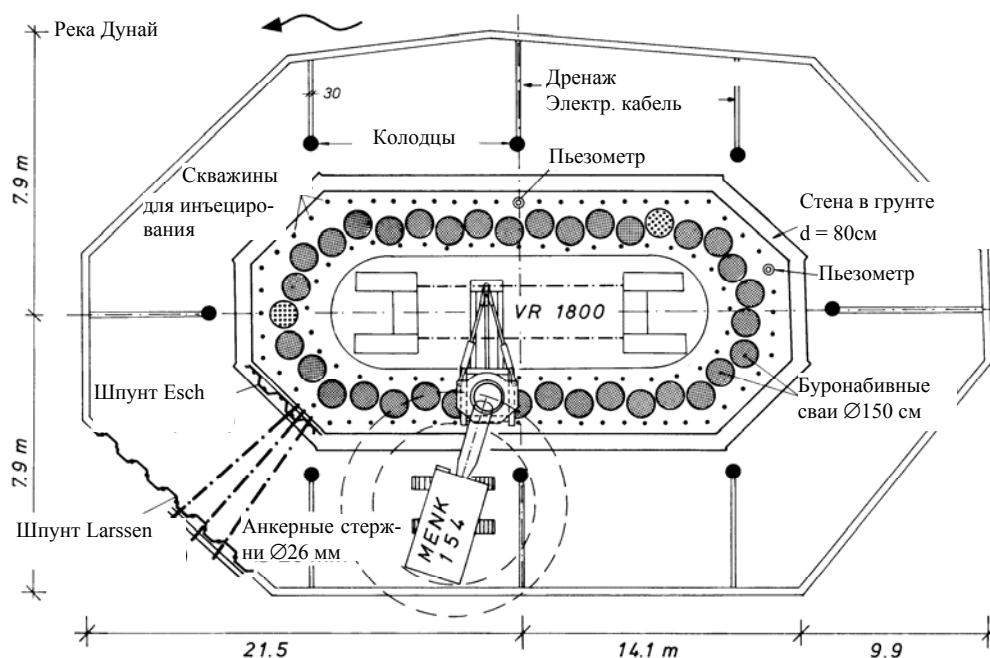


Рис. 19. Коробчатый свайный фундамент для опоры речного моста. Устройство буронабивных свай ($d = 1,5$ м, $l = 20$ м) из котлована на дне реки, который огорожен шпунтом. Обсадная труба выступает на 15 м, чтобы поднять уровень воды и избежать гидравлического разрушения во время установки свай

разнородности грунта основания (песок, ил, глина) и присутствия артезианских грунтовых вод на некоторых сваях были выявлены дефекты. Также сказывается некомпетентность оператора, работавшего на первой стадии установки свай. Поэтому потребовалось устройство дополнительных свай. Несмотря на дефекты в сваях, в течение многих лет этот фундамент работал достаточно успешно, поскольку коробчатые фундаменты глубокого заложения способны перераспределять напряжения даже в случае перегрузки отдельных свай.



Рис. 20. К рис. 19. В пределах стены в грунте устраивалась внутренняя стена из шпунта, которая с помощью анкеров соединялась с внешней стеной

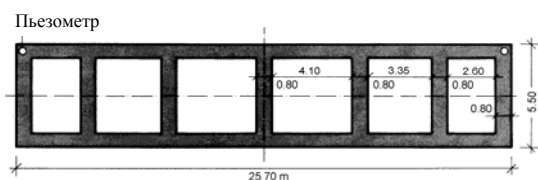


Рис. 21 Коробчатый фундамент глубокого заложения для 866-метрового моста через реку. Фундамент со стеной в грунте за пределами русла реки (в зоне затопления) как альтернативный вариант фундамента с использованием внутренних свай

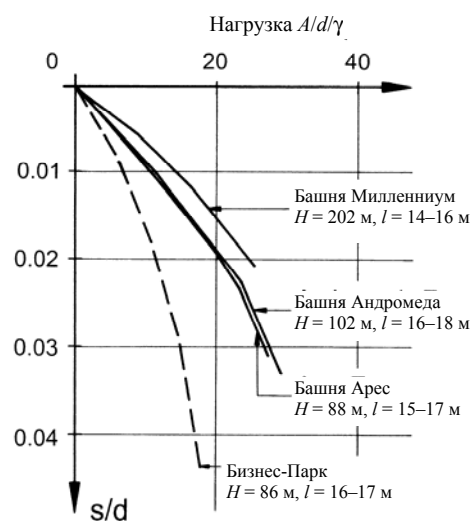


Рис. 22. Нормализованная зависимость между нагрузкой и осадкой для некоторых высотных зданий Вены, фундаменты которых устроены с использованием буронабивных или шнековых свай. s – осадка, Q – общая нагрузка на фундамент, d – диаметр свай, F – площадь фундамента (площадь горизонтального сечения внутри окружности свайного короба), γ – плотность грунта

4. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ (В ОСНОВНОМ ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ)

Для проверки геотехнических теорий и общего применения на практике результатов испытаний необходимо проводить полевые измерения во время строительства сооружений, а также после его завершения. На рис. 22–24 показаны примеры работы фундаментов глубокого заложения, устроенных в слоях третичных отложений, над которыми находятся четвертичные речные отложения. Третичные отложения представлены глинистыми и песчаными пылеватыми грунтами (с локальным включением мелкодисперсных пелов и глин). Несмотря на то, что по геологическому происхождению и местоположению (вдоль реки Дунай в черте города Вена и в его окрестностях) грунты достаточно однородны, их свойства значительно различаются. Тем не менее, можно сравнить условия площадок строительства. Здесь представлены элементы фундаментов глубокого заложения: буронабивные или шнековые сваи большого диаметра

ра ($d = 0,9\text{--}1,2$ м) или стены в грунте (толщина $d = 0,6\text{--}0,8$ м).

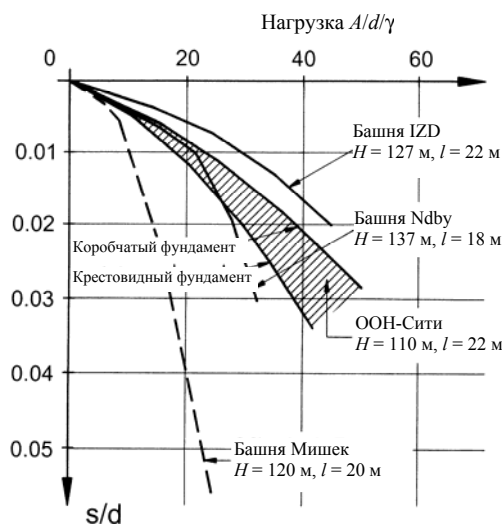


Рис. 23. Нормализованная зависимость между нагрузкой и осадкой для некоторых высотных зданий Вены, фундаменты которых устроены с использованием стен в грунте. s – осадка, Q – общая нагрузка на фундамент, d – диаметр свай, F – площадь фундамента (площадь горизонтального сечения внутри окружности свайного короба), γ – плотность грунта

Данные измерений были снова нанесены на безразмерные диаграммы, при этом были получены такие же результаты, как и при модельном испытании. С помощью нормализованных графиков можно непосредственно сравнить характеристики фундаментов.

На рис. 22 показаны результаты исследований нескольких высотных зданий в Вене. Во всех этих зданиях имеются глубокие подвалы. Поэтому верхняя часть фундаментов находится ниже уровня поверхности, а сами фундаменты – ниже уровня грунтовых вод. Длина свай примерно одинакова с небольшими различиями по статическим и конструкционным причинам. На диаграмме четко видно преимущество плитно-свайных фундаментов перед обычными свайными фундаментами (здание Бизнес Парк). Наилучшие показатели башни Миллениум объясняются тем, что при ее строительстве использовалась процедура предварительного нагружения свай и проводилось улучшение грунта в верхней части

фундамента: слой слабого гравия с песком укреплялся с помощью гидровиброуплотнения.

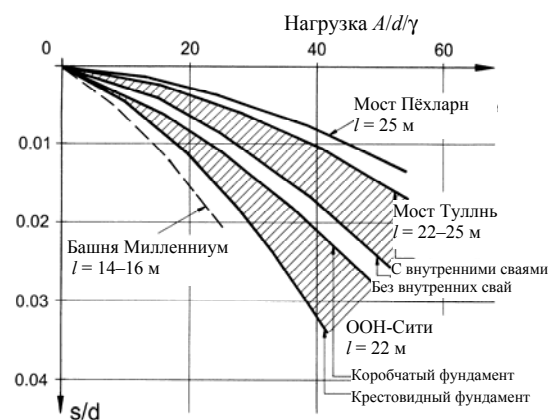


Рис. 24. Нормализованное соотношение между нагрузкой и осадкой для мостов и высотных зданий в зависимости от ряда факторов

На рис. 23. приводится нормализованная зависимость между нагрузкой и осадкой для некоторых высотных зданий Вены, фундаменты которых построены с использованием стен в грунте. Сравниваются следующие взаимосвязанные факторы:

Длина (глубина) элементов стен: менее важна, чем другие факторы, поскольку $l = 18\text{--}20$ м находятся в пределах одной величины. Поэтому в данном случае это второстепенный фактор;

Обрез фундамента. В высотном здании Башня Мишек нет глубокого подвала, и здесь наблюдается максимальная осадка;

Процедура устройства стен. Установка стен в грунте, также как и бурунабивных и шнековых свай, с площадки, находящейся на более высоком уровне, улучшает их деформационные и прочностные свойства (например, Башня IZD). На многих строительных площадках можно было наблюдать положительный эффект со стороны участков свай и стен в грунте, не залитых бетонной смесью. Это происходило, потому что структура грунта в верхней части фундамента глубокого заложения подвергалась наименьшим нарушениям в процессе установки свай;

Влияние переуплотнения грунта. Башня Твин опирается на менее переуплотненное основание, чем остальные здания;

Расположение стен в грунте. Здания ООН Сити в Вене стоят на фундаментах, в конструкцию которых входят коробчатые, а также крестовидные стены в грунте. Последние осели гораздо больше, так как в данном случае связующий эффект между бетонными панелями и грунтом меньше, чем у коробчатых фундаментов.

Площадь нагружения и величина общей нагрузки, и, соответственно, размер зон напряжений в зависимости от глубины. Башня Миллениум и ООН Сити создают более обширные поля напряжения;

Величина геологического переуплотнения грунта. Этот показатель больше у мостов (через реку Дунай в Австрии), чем у высотных зданий в Вене;

Усиление внутренних свайных стен коробчатого фундамента. Опоры моста Тулльн устроены с усилением и без него;

Длина (глубина) свай или стен в грунте;

Влияние локального улучшения свойств грунта: Верхние слои грунта улучшены с помощью гидровиброуплотнения (башня Миллениум) или посредством инъектирования грунта под давлением (мост Пёхларн: внутри короба свайного фундамента поворачивалось инъектирование грунта). Под башней Миллениум третичные отложения залегают гораздо глубже, чем на остальных площадках. Поэтому применение метода гидровиброуплотнения было очень эффективным, так как

это позволило уменьшить длину свай;

Связующий эффект, характерный для коробчатых фундаментов. Башня Миллениум основана на плитно-свайном фундаменте, мост Тулльн – на коробчатом свайном фундаменте, причем только некоторые внутренние сваи укреплялись дополнительно.

Сравнивая характеристики нагрузки и осадки отдельных зданий, можно наблюдать взаимодействие более или менее важных факторов. Поэтому, основываясь лишь на этих параметрах, можно сделать достаточно точный прогноз осадок. Это означает, в теоретических расчетах должны учитываться эмпирические факторы, получены в ходе полевых измерений (или модельных испытаний).

5. УСТОЙЧИВОСТЬ КОРОБЧАТЫХ ФУНДАМЕНТОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ К СЕЙСМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В Австрии находятся несколько сейсмически активных зон, где сила землетрясений достигает 7° по шкале Рихтера. При этом величина горизонтального ускорения в скальных породах составляет 1,4 м/с, а в слабых грунтах она может быть еще больше. Сейсмические силы действуют непостоянно и возникают только во время землетрясений, поэтому процесс сжатия и сдвиговые волны затрагивают сваи не одновременно, а поочередно. Следова-

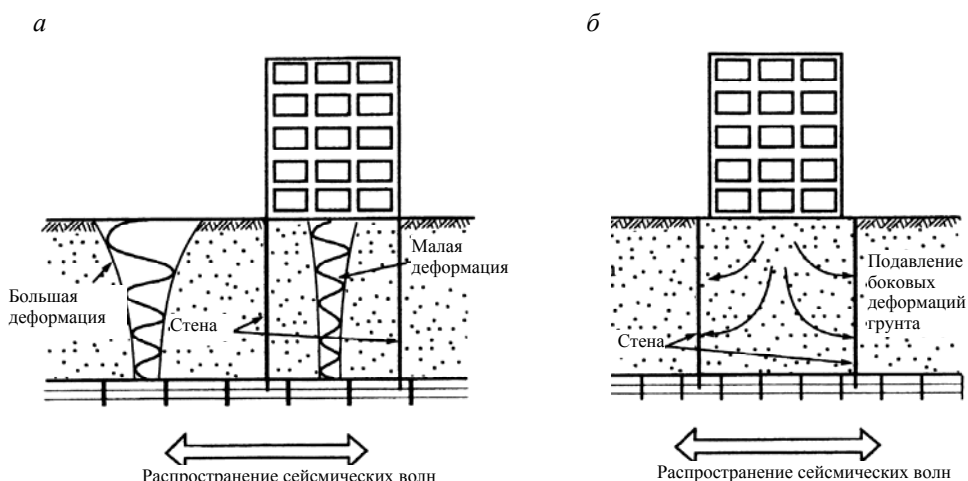


Рис. 25 Устойчивость коробчатых фундаментов к сейсмическим нагрузкам, метод подавления (материалы Японского геотехнического общества, 1998): а – подавление деформаций сдвига во время землетрясения, б – подавление горизонтального течения грунта после его разжижения

тельно, в случае устройства обычной свайной группы могут возникнуть последовательные разрушения, в то время как коробчатый свайный фундамент ведет себя как квази-моноклитная конструкция и выдерживает сейсмическую нагрузку. Поэтому, начиная с 1970 г. стали активно применяться коробчатые многосекционные фундаменты глубокого заложения. Но и в 1950-е гг. строились многосекционные сейсмически устойчивые фундаменты с использованием шпунтовых ограждений. Обычно шпунтовые сваи соединялись между собой при помощи стержней или анкеровались к железобетонной плите. Эти связи очень важны и для коробчатых фундаментов, особенно если они устраиваются в зонах вымывания грунта (опоры мостов через реки).

Сегодня при сооружении коробчатых фундаментов глубокого заложения обычно используются секущие или непрерывные стены из буронабивных свай, а также другие многосекционные конструкции, состоящие из стен в грунте, стен, устраиваемых по технологии глубинного перемешивания грунта или инъецирования.

Такие фундаменты противостоят сдвиговым деформациям грунта во время землетрясений или разжижения основания. При этом устраняется или максимально уменьшается разжижение грунта, заключенного внутри короба фундамента (рис. 25, а). Кроме того, ограничивается возможность бокового перемещения грунта после его разжижения (рис. 25, б). Поэтому многосекционные коробчатые фундаменты глубокого заложения представляют хорошую защиту от возможного разжижения грунта. Эти элементы не только препятствуют возникновению сдвиговой деформации и разжижения грунта, но и защищают конструкции от малого разжижения, поддерживая их посредством коробчатого фундамента (Материалы Японского геотехнического общества, 1998). Устойчивость достигается благодаря тому, что нагрузки от сооружения передаются через секционный коробчатый фундамент глубокого заложения на неразжиженный жесткий грунт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на теоретических исследованиях, модельных испытаниях, многочисленных полевых измерениях и наблюдениях можно заключить, что коробчатые фундаменты глубокого заложения (с использованием буронабивных или шнековых свай, стен в грунте) имеют ряд преимуществ:

Бетонные элементы и массив грунта, заключенный между ними, образуют квази-моноклитную структуру, обладающую большой несущей способностью;

Фундаменты воспринимают и передают большие сосредоточенные нагрузки, чем обычные свайные группы;

Они занимают меньшую площадь по сравнению с обычными свайными фундаментами, где расстояние между осями свай $\geq 2-3d$. Это особенно важно в случае устройства фундаментов для мостов через реки;

Фундаменты исключительно устойчивы к боковым сдвигам, возникающим при сооружении высоких насыпей на слабых грунтах (опоры мостов) или неустойчивых склонах (давление ползучести) – (рис. 26);

Их можно закладывать в разнородных и анизотропных грунтах;

Фундаменты устойчивы к сейсмическим нагрузкам и разжижению грунта;

Они устойчивы к вымыванию грунта (фундаменты на реках с быстрым течением);

Эти конструкции могут использоваться для укрепления существующих сооружений, например, опор речных мостов, поскольку они способствуют увеличению их устойчивости в случае вымывания грунта.

Иногда более выгодно с экономической и экологической точки зрения устраивать прерывистые свайные стены с инъецированием колонн между сваями, что представляет альтернативу для секущихся свайных стен (рис. 27), потому что в этом случае создаются закрытые стены с полной сдвиговой связью без удаления материала из неармированных свай, к тому же все сваи могут быть армированы. Единственный недостаток подобных конструкций – для их устройства необходимо дополнительное оборудование. Оптимальный шаг между сваями составляет от 0,2 до 0,5 м в зависимости от свойств грунта, длины свай

или иецируемых колонн, технологии инъецирования или статических характеристик площадки.

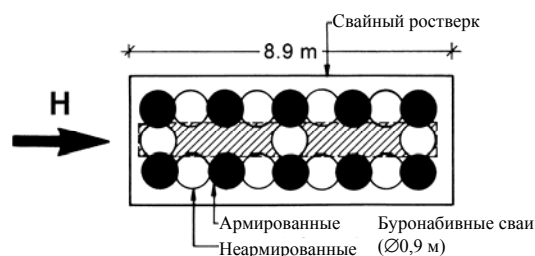


Рис. 26. Фрагмент плана коробчатого фундамента опоры моста. Фундамент, состоящий из трех коробов, подвергается большой горизонтальной нагрузке, поскольку слабые грунты сжимаются под давлением насыпи. Подобные фундаменты можно устраивать и на неустойчивых склонах

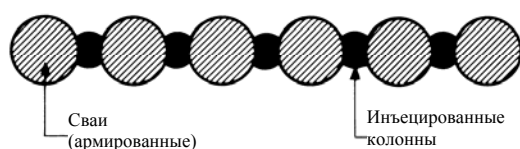


Рис. 27. Схема комбинированной стены для коробчатого фундамента: армированные буронабивные (или шнековые сваи) и инъецированные колонны

Коробчатые фундаменты глубокого заложения могут сооружаться во всех видах грунтов и передавать большие сосредоточенные нагрузки на основание или сдерживать боковые деформации, возникающие вследствие ползучести грунта (под высокими насы-

пями на слабых глинах или неустойчивых склонах). Обычно коробчатые фундаменты состоят из буронабивных свай или стен в грунте, устроенных согласно секционной модели. Заключенный внутри короба массив грунта не подвергается боковым перемещениям и становится частью связанной или квази-моноклитной структуры, устойчивой к сейсмическим воздействиям. На безразмерных диаграммах «нагрузка-осадка», построенных на основании модельных испытаний, видно преимущество коробчатых фундаментов перед обычными свайными группами. С помощью этих графиков также можно описать поведение коробчатых фундаментов или групп стен в грунте, а также фундаментов, устроенных с использованием методов глубинного перемешивания и инъецирования. Результаты комплексных испытаний моделей и многочисленных полевых измерений (проводимых с 1970 г.) хорошо согласуются. Поэтому, несмотря на сложность теоретических расчетов, можно с достаточной точностью вычислить и использовать на практике величины несущей способности и возможных осадок. Поскольку приходится использовать теоретические идеализации и приблизительные допущения, необходимо проводить вычисления с применением разных методов. Для оценки максимальных и минимальных усилий на свайный ростверк и другие элементы фундамента глубокого заложения рекомендуется проводить анализ предельных состояний (теория монолитности и теория отдельных элементов).