

Вячеслав Александрович СЕРНОВ,
магистр технических наук,
старший преподаватель кафедры
"Геотехника и экология в строительстве"
Белорусского национального
технического университета

РАСЧЕТ ОСАДКИ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА В ОСНОВАНИИ РОСТВЕРКА

CALCULATION OF PILED-RAFT FOUNDATION SETTLEMENT TAKING INTO ACCOUNT SOIL RESISTANCE AT THE RAFT BASE

В статье приведены методики расчета осадки свайных фундаментов с несущими ростверками, учитывающие рассеивание напряжений под подошвой ростверка в межсвайном пространстве. Внедрение разработанных методик позволило сократить стоимость фундаментов до 50 %.

This article presents the methods of calculating the piled-raft foundations settlement taking into account stress dissipation in interpile space beneath the raft base. Application of the developed methods allowed reducing the cost of piled-raft foundation up to 50 %.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований, проведенных до настоящего времени в странах СНГ и за рубежом [1], а также данных модельных исследований, выполненных в лаборатории и на полигоне кафедры "Геотехника и экология в строительстве" Белорусского национального технического университета (БНТУ) [2, 3], и натурных испытаний на строительных площадках [3, 4] г. Минска позволили выявить основные закономерности взаимодействия группы свай и несущего ростверка с основанием. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что традиционные расчетные схемы для определения несущей способности и осадки свайных фундаментов чрезмерно упрощены, не учитывают взаимодействие элементов фундамента, а результаты расчетов часто в несколько раз отличаются от экспериментальных данных.

В соответствии с действующими техническими нормативными правовыми актами (ТНПА) осадка группы свай определяется для условного массива. Принимается, что грунт в пределах условного фундамента оседает вместе со сваями. Такая схема не позволяет правильно отразить роль шага свай и учесть взаимодействие ростверка с основанием. Экспериментально было установлено [3], что при уменьшении шага свай в группе от $6d$ до $3d$ без изменения размеров условного фундамента осадка последнего снижалась в 2 и более раза. При включении ростверка в работу осадка фундамента также существенно уменьшается. Результаты проведенных исследований опровергают широко распространенное до сих пор предположение о том, что грунт межсвайного пространства оседает вместе со сваями. Рассмотрим некоторые факты, подтверждающие, что вертикальные деформации грунта межсвайного пространства незначительны по сравнению с осадкой свай.

Во-первых, давление на грунт под нижними концами свай в десятки раз превышает давление на том же уров-

не в межсвайном пространстве от сил трения вдоль их боковых поверхностей. Следовательно, осадка свай должна быть больше осадки окружающего грунта.

Во-вторых, вертикальные напряжения от сил трения вдоль боковых поверхностей свай резко уменьшаются с удалением от них. Значения этих напряжений в любой плоскости, перпендикулярной ее оси, можно определить, используя решение Д. Пати (1963) [5]:

$$p_{z\phi} = 1,148f(R/r)^{-1,237}, \quad (1)$$

где f — расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности сваи в пределах последних 1–2 м у острия;

r — радиус сваи;

R — расстояние от оси сваи до исследуемой точки.

Эпюры напряжений, построенные по зависимости (1), показывают, что максимальные вертикальные напряжения, возникающие у боковой поверхности сваи, резко затухают с удалением от нее (рис. 1). Эти расчеты подтверждаются результатами экспериментальных исследований, проведенных С. И. Цымбалом [6], и объяс-

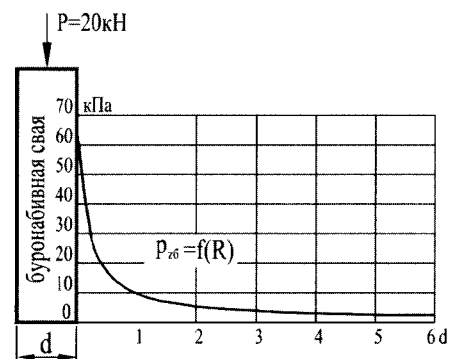


Рис. 1. Эпюра распределения вертикальных напряжений в уровне нижнего конца свай от сил трения грунта по боковой поверхности

няют отсутствие значительных вертикальных перемещений грунта уже на расстоянии менее $0,5d$ от боковой поверхности сваи при проведении модельных исследований [2].

В-третьих, при достижении сваей сдвиговой осадки ее ствол начинает проскальзывать относительно окружающего грунта без дальнейшего увеличения сил трения вдоль боковой поверхности [7]. При последующем нагружении свай вся дополнительная нагрузка передается на грунт их нижними концами, и увеличения осадки межсвайного грунта не происходит (рис. 2).

В-четвертых, многочисленные натурные и модельные испытания [2–4] показали, что при включении ростверка в работу несущая способность свайного фундамента возрастает, а деформативность уменьшается, что было бы невозможно при осадке окружающего грунта вместе со сваями.

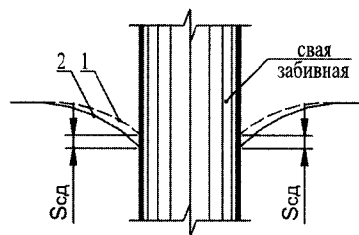
Результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований [1–4] позволяют сделать следующие выводы.

1. Расчет осадки свайного фундамента как условного массива с некоторым допущением можно применять для групп с шагом свай не более $3d-4d$ и передачей большей части нагрузки на основание их боковыми поверхностями. С увеличением шага свай и уменьшением доли работы их боковых поверхностей этот метод будет давать значительную погрешность. В данном случае осадку группы свай целесообразно рассчитывать исходя из осадки одиночной сваи с учетом их взаимодействия в группе.

2. Поскольку осадка группы свай значительно больше чем у окружающего грунта, включенный в работу ростверк, оседая вместе с ними, оказывает давление на основание. С увеличением осадки напряжения под ростверком возрастают и рассеиваются частично или полностью в пределах длины свай, уменьшая давление на грунт под их нижними концами. В результате сглаживания максимальных пиковых напряжений под остриями свай осадка фундамента с низким ростверком значительно меньше, чем с высоким.

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКАЕМОЙ НАГРУЗКИ
И ОСАДКИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
С НЕСУЩИМИ РОСТВЕРКАМИ**

Схема перераспределения давлений на грунт основания от внешней нагрузки N при уменьшении шага свай и включении ростверка в работу приведена на рис. 3. Как было установлено выше, давления под нижними концами свай p_n во много раз превышают давления на том же уровне от сил трения вдоль их боковых поверхностей p_6 .



1 — после забивки; 2 — при испытании

Рис. 2. Схема деформации слоев грунта около сваи

При достаточно большом шаге свай (см. рис. 3б) эпюры давлений p_n и p_6 на основание на уровне их нижних концов будут аналогичны таким же эпюрам одиночных свай (см. рис. 3а).

С увеличением количества свай в группе без изменения внешней нагрузки N и размеров фундамента, давление на грунт межсвайного пространства p_6 возрастает за счет передачи большей части этой нагрузки боковыми поверхностями свай из-за увеличения их общей площади и наложения напряжений вследствие уменьшения их шага (см. рис. 3в). Давление под нижними концами свай p_n уменьшается, поскольку возрастает площадь их опирания на грунт. Кроме того, как показывает практика, несущая способность боковых поверхностей свай реализуется раньше, чем их нижних концов, особенно в песчаных грунтах, где значение сдвиговой осадки составляет всего несколько миллиметров [7]. Вследствие этого при увеличении количества свай в первую очередь уменьшаются давления под их нижними концами.

При взаимодействии ростверка с основанием (см. рис. 3г) под его подошвой возникает давление p_p , и часть нагрузки N передается на грунт межсвайного пространства, разгружая основание на уровне нижних концов свай. При этом в первую очередь уменьшаются напряжения под остриями свай p_n . За счет обжатия грунта в основании ростверка и возникновения горизонтальных распорных напряжений возрастают силы трения вдоль боковых поверхностей свай, а неравномерность вертикальных напряжений в уровне их нижних концов уменьшается. Таким образом, эффективность взаимодействия ростверка с основанием связана не только с уменьшением доли нагрузки, приходящейся на сваи, но и со снижением неравномерности давлений на грунт в уровне их нижних концов. Нагрузка на основание распределяется более равномерно. Часть напряжений затухает в пределах межсвайного пространства, не достигая уровня нижних концов свай. Осадка такого фундамента гораздо ниже, чем группы свай с высоким ростверком.

При расчете осадки свайного фундамента деформации бетонных конструкций обычно не учитываются,

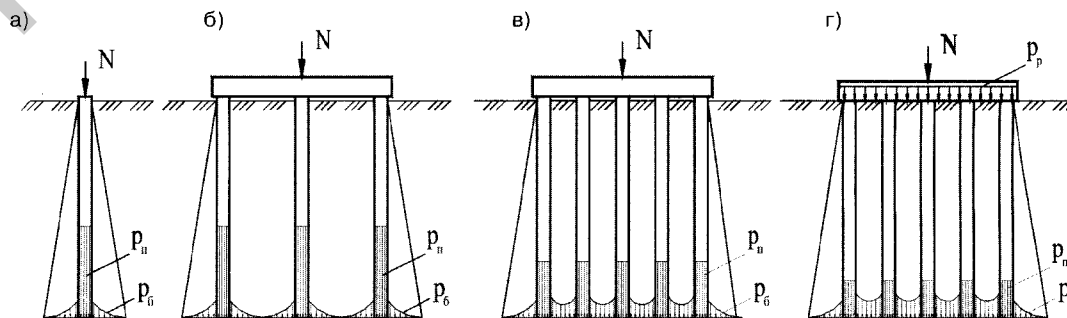


Рис. 3. Схема распределения давления на грунты основания одиночной сваи (а), группы свай с высокими (б, в) и низкими (г) ростверками

а за расчетное сечение принимается плоскость на уровне нижних концов свай. Определяются дополнительные напряжения от внешней нагрузки на эту плоскость, и с учетом деформационных свойств грунтов, расположенных ниже расчетного сечения, определяется осадка фундамента. При взаимодействии ростверка с грунтом часть нагрузки рассеивается в пределах межсвайного пространства, не оказывая влияния на напряженное состояние основания на уровне нижних концов свай. Величину рассеянной нагрузки можно определить, зная деформационные свойства грунта межсвайного пространства и характер затухания напряжений под подошвой ростверка.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что в верхней части основания группы свай с высоким ростверком вертикальные напряжения практически отсутствуют. Силы трения вдоль боковых поверхностей свай незначительны в пределах 1–2 м от их оголовков, а при забивке свай в верхней части основания часто образуется зазор между ее стволом и грунтом, силы трения отсутствуют вообще. С глубиной вертикальные напряжения в межсвайном пространстве от сил трения вдоль боковых поверхностей возрастают и в однородных грунтах достигают максимального значения на уровне нижних концов свай. При включении ростверка в работу максимальные вертикальные напряжения возникают под его подошвой и уменьшаются с глубиной, как под фундаментом на естественном основании.

Для оценки возможности применения теории линейно деформируемых тел при определении напряжений в грунте межсвайного пространства под подошвой ростверка выполнено сравнение теоретических и опытных данных. На рис. 4 представлены эпюры распределения напряжений в основании ростверков для фундаментов с разным количеством и шагом свай, построенные по экспериментальным [8] и расчетным данным по теории линейно деформируемых тел.

На рис. 4 слева даны эпюры распределения вертикальных напряжений в межсвайном пространстве для групп свай с высокими ростверками, справа — для групп свай с низкими ростверками. Эпюры в основании низких ростверков имеют седлообразную форму, поскольку напряжения от давления ростверка на грунт с глубиной затухают, а от сил трения вдоль боковых поверхностей свай возрастают. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных построены эпюры дополнительных вертикальных напряжений от взаимодействия ростверка с основанием по разнице седлообразной эпюры суммарных напряжений в правой части схемы и эпюры для группы свай с высоким ростверком в левой ее части.

Сравнение теоретических и опытных значений показывает их совпадение даже при давлениях под ростверками свыше 0,6 МПа. Погрешность составила не более 5%. Для расчета же фундамента на естественном осно-

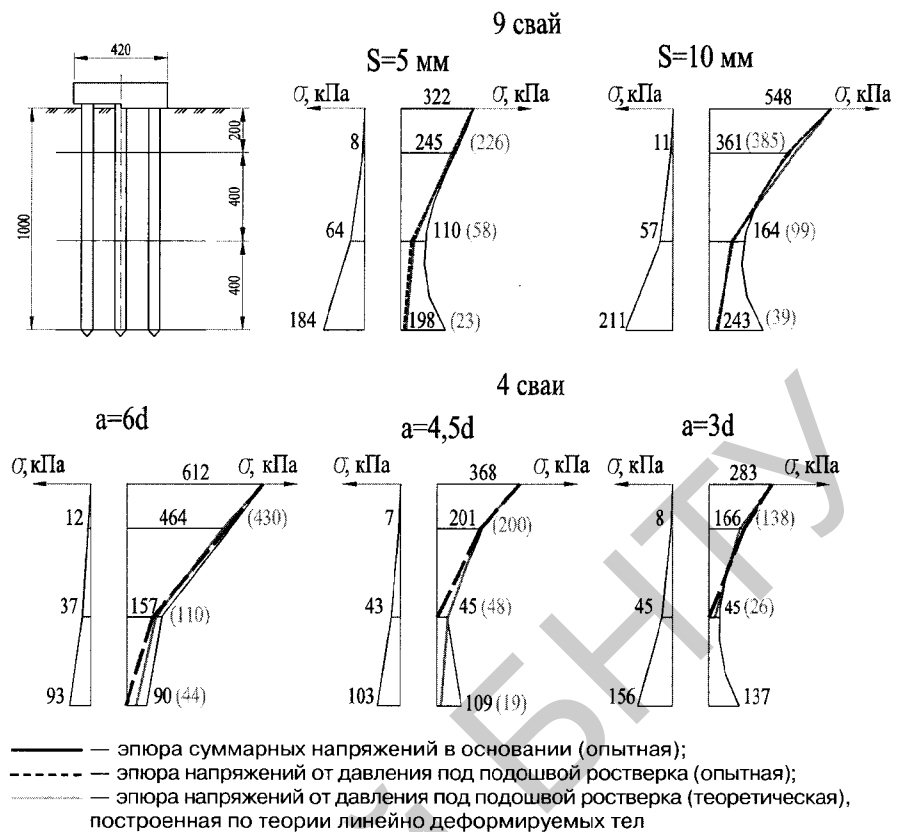


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические эпюры распределения напряжений в основании ростверка

вании схожих размеров по теории линейно деформируемых тел давление под подошвой не должно превышать расчетное сопротивление грунта $R = 0,24$ МПа при заглублении $d = 1,00$ м. Таким образом, значения напряжений в межсвайном пространстве от взаимодействия ростверка с основанием с высокой точностью можно определить по теории линейно деформируемых тел.

В зависимости от геометрических параметров свайного фундамента и напряжений под подошвой ростверка глубина сжимаемой толщи H_c может быть менее или более длины свай L . В случае $H_c < L$ (рис. 5) давление под подошвой ростверка рассеивается в межсвайном пространстве и не оказывает влияние на напряженное состояние грунта на уровне нижних концов свай. Если $H_c > L$ (рис. 6), давление под подошвой ростверка рассеивается не полностью в пределах длины свай и на уровне их нижних концов возникают дополнительные напряжения, вызывающие увеличение осадки свай. Эти выводы подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Из графиков на рис. 4 видно, что напряжения в основании группы свай с низким ростверком выше, чем у группы с высоким (в случаях, когда $H_c < L$). Аналогичные результаты были получены при исследовании деформации грунта межсвайного пространства моделей в лотке с прозрачной стенкой [2]. Если глубина сжимаемой толщи H_c превышает длину свай L , при расчете осадки группы свай необходимо учитывать дополнительные напряжения на уровне их нижних концов.

Расчет осадки свайного фундамента с несущим ростверком представляет собой решение задачи с двумя неизвестными. Во-первых, неизвестна осадка фундамента. Во-вторых, неизвестна доля нагрузки, передаваемой на основание ростверком. Данная задача может быть решена методом последовательных приближений,

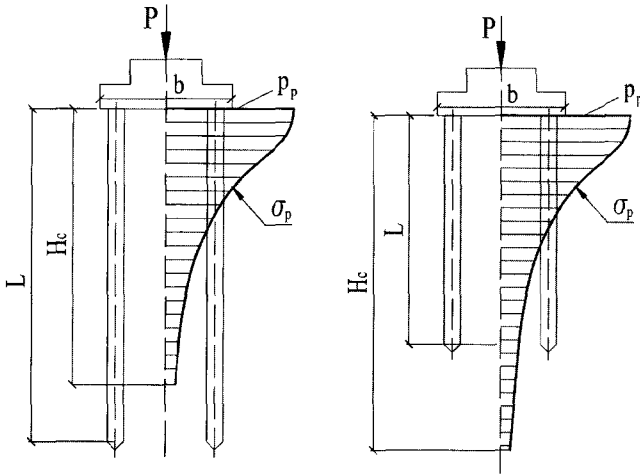


Рис. 5. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой ростверка при $H_c < L$

Рис. 5. Схема распределения вертикальных напряжений под подошвой ростверка при $H_c > L$

исходя из условия равенства осадок группы свай и ростверка, либо графическим способом. Задаваясь значениями осадки с определенным шагом, строятся графики зависимости осадки ростверка и группы свай от нагрузки: $s_r = f(P_r)$ и $s_p = f(P_p)$. Суммируя эти графики, можно получить зависимость осадки свайного фундамента с несущим ростверком от нагрузки $s_{pr} = f(P_{pr})$ (рис. 7).

График зависимости $s_r = f(P_r)$ для ростверка строится как для фундамента на естественном основании. Поскольку не вся площадь подошвы ростверка опирается на грунт, а часть ее передает нагрузку на сваи, при построении зависимости $s_r = f(P_r)$ необходимо использовать приведенную площадь подошвы ростверка A_r' . Приведенная площадь равна разнице фактической площади ростверка и сумме площадей поперечных сечений свай, входящих в состав фундамента:

$$A_r' = A_r - n A_{ci}, \quad (2)$$

где A_r — площадь подошвы ростверка, m^2 ;
 A_{ci} — площадь поперечного сечения сваи, m^2 ;
 n — количество свай в фундаменте.

Поскольку глубина сжимаемой толщи зависит от отношения длины и ширины l/b фундамента, значение l/b у приведенного и фактического ростверков должно быть одинаковым.

График зависимости $s_p = f(P_p)$ для группы свай строится с учетом дополнительных вертикальных напряжений от взаимодействия ростверка с основанием на уровне нижних концов свай. При расчете осадки группы буронабивных свай можно использовать график зави-

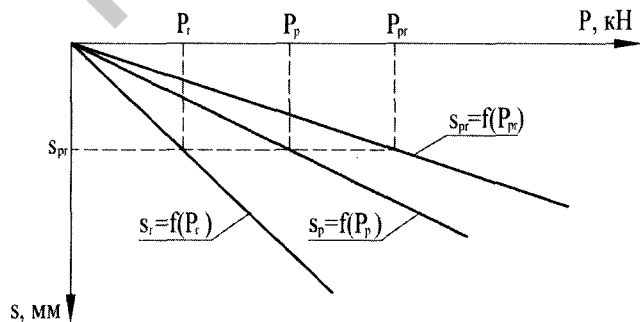


Рис. 7. Графический способ определения осадки свайного фундамента с несущим ростверком

симости осадки от нагрузки одиночной сваи, полученный по результатам статических испытаний. В этом случае осадка фундамента определяется с учетом коэффициента группового эффекта, характеризующего увеличение осадки группы свай при их взаимодействии по отношению к одиночной свае. Просуммировав долю нагрузки, воспринимаемую отдельно ростверком и сваями, можно построить график зависимости осадки свайного фундамента с несущим ростверком от нагрузки $s_{pr} = f(P_{pr})$ (см. рис. 7). По данной зависимости можно определить осадку s_{pr} и соответствующие значения доли нагрузки, воспринимаемой отдельно ростверком P_r и сваями P_p в любой момент нагружения фундамента.

Условия работы грунта в основании ростверка и фундамента на естественном основании отличаются тем, что группа свай, представляющая собой вертикальное армирование основания под ростверком, препятствует выпору грунта из-под его подошвы. Этот фактор вызывает значительное увеличение несущей способности грунта в основании ростверка в сравнении с фундаментом на естественном основании. Эффективность армирования будет возрастать с уменьшением шага свай. В настоящее время не существует методики расчета, позволяющей точно определить предельное сопротивление грунта, расположенного между армирующими элементами. Результаты диссертационных исследований, выполненных С. Н. Банниковым [9], показали, что в случае вертикального армирования грунта его несущая способность возрастает в 2 и более раза.

Несущая способность группы свай определяется суммой предельных сопротивлений грунта вдоль их боковых поверхностей и под их нижними концами. Срыв сил трения вдоль боковых поверхностей свай, как правило, происходит раньше, чем глубинный выпор грунта из-под нижних концов. При взаимодействии ростверка с основанием изменяются условия работы грунта вдоль боковых поверхностей и под нижними концами свай. В межсвайном пространстве возникают горизонтальные напряжения, создающие дополнительный распор и, соответственно, способствующие увеличению сил трения вдоль боковых поверхностей свай, а вертикальные напряжения в уровне их нижних концов создают дополнительную пригрузку, препятствующую выпору грунта. Напряжения, возникающие в основании ростверка, способствуют увеличению несущей способности свай. Однако в верхней части межсвайного пространства осадка грунта, расположенного под подошвой ростверка, будет незначительно отличаться от осадки свай. Поскольку для реализации сил трения вдоль боковых поверхностей свай разница этих осадок должна достигнуть некоторого значения сдвиговой осадки $S_{сд}$, в верхней части основания боковая поверхность свай включается в работу лишь частично. Значение $S_{сд}$ зависит от вида грунта [7]: для песчаных грунтов $S_{сд}$ не превышает 5 мм.

Снижение сопротивления боковых поверхностей свай (в результате влияния ростверка) в песчаных грунтах будет незначительным, и при расчете несущей способности этот фактор можно не учитывать. В глинистых грунтах сдвиговая осадка достигает 25 мм, и влияние ростверка на сопротивление боковых поверхностей свай распространяется на гораздо большую глубину, чем в песках. При расчете несущей способности свай в глинистых грунтах сопротивление их боковых поверхностей рекомендуется не учитывать до глубины, равной $B/2$ от подошвы ростверка (B — ширина подошвы

ростверка). Значение глубины, равное $B/2$, принято по результатам анализа эпюр затухания напряжений в основании ростверка, построенных по экспериментальным данным.

Таким образом, взаимное влияние свай и ростверка способствует увеличению несущей способности этих элементов фундамента по сравнению со значениями, полученными при их раздельном нагружении. Результаты модельных и натурных испытаний свайных фундаментов показывают, что несущая способность группы свай с низким ростверком часто оказывается больше суммарной несущей способности свай и ростверка при их раздельных испытаниях в тех же грунтовых условиях. При включении ростверка в работу графики зависимости осадки от нагрузки $s = f(P)$ имеют более пологий характер. Экспериментально сложно установить предельное сопротивление грунта в основании такого фундамента, поскольку при ступенчатом нагружении с увеличением осадки возрастают сопротивление ростверка и горизонтальный распор грунта вдоль боковых поверхностей свай. Деформации стабилизируются даже при их значениях, существенно превышающих предельно допустимые осадки.

Предельное давление в основании ростверка, армированного сваями, с выпором грунта из-под его подошвы может быть достигнуто только при осадке, значительно превышающей ее предельно допустимое значение. При таком условии решение рассматриваемой задачи не имеет практического значения. Поэтому при оценке предельной нагрузки на свайный фундамент учитывается не несущая способность грунта в основании ростверка, а прогнозируемое значение доли работы ростверка при расчетной осадке. Поскольку значение нагрузки, передаваемой ростверком на основание, зависит от осадки фундамента, задача по определению предельного сопротивления грунта и его деформаций решается совместно с использованием рассмотренного выше графического метода.

РАСЧЕТ ДОПУСКАЕМОЙ НАГРУЗКИ НА СВАЙНЫЙ ФУНДАМЕНТ С НЕСУЩИМ РОСТВЕРКОМ

Допускаемая вертикальная нагрузка на свайный фундамент с несущим ростверком (с обязательным уплотнением грунта под ростверком) определяется по формуле

$$N = N_r + N_{pf,u}, \quad (3)$$

где N_r — нагрузка, воспринимаемая ростверком, кН, определяется по формуле:

$$N_r = \gamma_{cr} \cdot p_r \cdot A'_r; \quad (4)$$

N_{pf} — предельная нагрузка, воспринимаемая группой свай, кН, определяется по формуле:

$$N_{pf} = \gamma_{ck} \cdot \frac{n \cdot (F_d - F_{B/2})}{\gamma_k}, \quad (5)$$

здесь γ_{cr} — коэффициент условий работы грунта под подошвой ростверка;

p_r — среднее давление грунта под подошвой ростверка, кПа;

A'_r — приведенная площадь подошвы ростверка;

γ_{ck} — коэффициент условий работы осно-

вания фундамента, принимаемый по таблице 4.1 Р 5.01.015.05 [10];

F_d — несущая способность одиночной сваи, кН;

$F_{B/2}$ — несущая способность боковой поверхности одиночной сваи в пределах от подошвы ростверка до глубины $B/2$, кН. Если до глубины $B/2$ от оголовка залегают песчаные грунты, значение $F_{B/2}$ принимается равным 0;

γ_k — коэффициент надежности метода испытания свай.

РАСЧЕТ ОСАДКИ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА С НЕСУЩИМ РОСТВЕРКОМ

Особенностью расчета осадки свайного фундамента с несущим ростверком является учет рассеивания вертикальных напряжений, возникающих при взаимодействии ростверка с основанием, в пределах межсвайного пространства. Расчет осадки фундамента выполняется не от полной внешней нагрузки N , а от ее части, воспринимаемой группой свай P_{pf} . В случае, когда глубина сжимаемой толщи грунта под ростверком не превышает длины свай $H_c < L$ (см. рис. 5), напряжения, возникающие под его подошвой, рассеиваются в пределах межсвайного пространства без оказания влияния на напряженное состояние грунта на уровне нижних концов свай. Анализ инженерно-геологических условий строительных площадок города Минска показал, что при включении ростверка в работу во многих случаях возможен переход на более короткие сваи в сравнении с традиционными проектными решениями. В таких случаях сжимаемая толщина грунта в основании ростверка часто превышает длину свай $H_c > L$ (см. рис. 6). На уровне нижних концов свай возникают дополнительные вертикальные напряжения от взаимодействия ростверка с основанием $S_{дон}$. Эти напряжения вызывают дополнительную осадку основания $S_{дон}$. Осадка свайного фундамента с несущим ростверком определяется по формуле

$$S_{pf} = S_p + S_{дон}, \quad (6)$$

где S_p — осадка группы свай от нагрузки P_{pf} согласно расчету в соответствии с действующими ТНПА;

$S_{дон}$ — дополнительная осадка свай от напряжений под подошвой ростверка в межсвайном пространстве; $S_{дон}$ определяется в соответствии с [10].

При условии, что $H_c < L$, дополнительных напряжений в уровне нижних концов свай от давления под ростверком не возникает ($S_{дон} = 0$).

Учет взаимодействия ростверка с основанием позволяет сократить количество свай в группе. Часто наиболее экономичным решением является увеличение шага свай до $4d$ и более (d — диаметр круглой или сторона прямоугольной сваи). В таких случаях метод расчета осадки группы свай как условного массива не отражает особенностей их взаимодействия с основанием, особенно при использовании буронабивных свай. Грунт межсвайного пространства не уплотняется при выемке грунта из скважин, и осадка группы буронабивных свай всегда больше осадки одиночной сваи. Осадку группы

бурунабивных свай S_p при расстоянии между ними более $4d$ целесообразно определять по осадке одиночной сваи, полученной расчетом или по результатам испытаний статической нагрузкой с учетом их взаимного влияния, по формуле

$$S_p = K_g \cdot S_1, \quad (7)$$

где K_g — коэффициент группового эффекта, полученный на основе численных решений [10], определяется в зависимости от шага свай a , их количества в группе n и гибкости l/d (l — длина сваи, м; d — диаметр сваи, м);
 S_1 — осадка одиночной сваи от доли нагрузки, приходящейся на нее в составе свайного фундамента с несущим ростверком, определяется расчетом в соответствии с действующими ТНПА либо по данным статических испытаний.

В случае превышения сжимаемой толщи грунта в основании ростверка длины свай ($H_c > L$) учитывается дополнительная осадка свай по формуле (6).

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С НЕСУЩИМИ РОСТВЕРКАМИ. ПОЛУЧЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Экономический эффект при включении ростверка в работу обусловлен уменьшением требуемой длины и количества свай в фундаменте за счет передачи части нагрузки на основание подошвой ростверка. В соответствии с данными испытаний в инженерно-геологических условиях г. Минска количество свай в фундаментах может быть уменьшено до 50 % за счет включения ростверка в работу. На основании результатов проведенных исследований разработаны и внедрены в проектную практику "Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками" Р 5.01.015.05 [10]. Предложенные методы расчета применялись при проектировании жилых домов в квартале улиц Кропоткина — Старовиленской, Притыцкого — Бельского, Бурдейного — Якубовского [3, 4]. Следует отметить, что две последние площадки характеризуются сложными геологическими условиями: залеганием у поверхности насыпных грунтов, либо заторфованных линз и прослоек в пределах сжимаемой толщи грунта. В качестве базового варианта в этих случаях рассматривалось устройство традиционных фундаментов из длинных забивных свай, пронизывающих слабые грунты и передающих нагрузку на заглубленные прочные слои основания. Однако при устройстве таких фундаментов появляется опасность возникновения сил отрицательного трения грунта вдоль боковых поверхностей свай и значительного снижения их несущей способности, что делает данный вид фундаментов малоэффективным. Альтернативным вариантом фундамента в подобных грунтовых условиях являются короткие конические сваи с несущими ростверками. Наклонные боковые поверхности свай способствуют максимальному уплотнению грунта в межсвайном пространстве. Ростверк, опирающийся на такой грунт, имеет большее сопротивление, чем в фундаменте из призматических свай. Основная часть нагрузки от сооружения передается на верхние слои основания. Напряжения рассеиваются, не достигая прослойки слабого грунта.

В соответствии с рекомендациями [10] в указанных выше случаях забивные сваи были заменены короткими коническими выштампованными сваями с несущими ростверками. Это решение позволило сократить стоимость фундаментов до 50 %.

Аналогичные конструктивно-технологические решения были применены при проектировании фундаментов православного храма во имя Архистратига Божия Михаила в микрорайоне Сухарево г. Минска. По данным изысканий под подошвой ростверка залегают следующие грунты:

- супеси пылеватые средней прочности: $E = 18$ МПа, $h = 4$ м;
- суглинки озерные мягкопластичные: $E = 6$ МПа, $h = 2$ м;
- суглинки с растительными остатками: $E = 10,0$ МПа, $h = 1,5$ м;
- заторфованные грунты и торф: $E = 3,0$ МПа, $h = 2,5$ м;
- пески средней прочности и прочные: $E = 25$ МПа.

Первоначально был выполнен проект фундамента, состоящего из 480 забивных свай длиной 12,0 и 14,0 м с поперечным сечением 0,30 и 0,35 м. Сваи пронизывали слои заторфованных грунтов и погружались в несущий песчаный слой.

Анализ инженерно-геологических условий строительной площадки выявил неэффективность фундамента из длинных забивных свай. При забивке свай атмосферный воздух попадет в слои торфа, что приводит к интенсивному разложению органических веществ, усадке грунта и развитию сил отрицательного трения.

Наиболее рациональным решением, в данном случае, является передача всей нагрузки от здания на верхние, относительно прочные, слои основания. Расчет фундаментов в соответствии с [10] показал, что в данных грунтовых условиях ростверк способен воспринимать около 40 % нагрузки от здания. Остальную часть нагрузки воспринимают конические выштампованные сваи длиной 3,0 м и диаметром от 0,5 м в голове до 0,3 м в нижнем конце свай.

Стоимость первого варианта фундамента из длинных забивных свай составила 372,186 тыс. руб. (315,508 — свайное поле и котлован и 56,678 — ростверк; в ценах 1991 г.), второго, из коротких конических — 200,756 тыс. руб. (147,01 — свайное поле и котлован и 53,746 — ростверк; в ценах 1991 г.). Экономический эффект внедрения разработки составил 171,43 тыс. руб. (в ценах 1991 г.). Стоимость фундаментов снижена почти в 2 раза. Проведенные впоследствии испытания фрагментов фундаментов статической нагрузкой подтвердили результаты выполненных расчетов. По результатам данной работы получен акт внедрения предлагаемой методики расчета.

При строительстве цеха одностадийной выработки стекловолокна в Витебской области проектом было предусмотрено устройство фундаментов из забивных свай длиной 8 м в пылеватых водонасыщенных песках. Однако испытания статической нагрузкой показали, что несущая способность свай недостаточна для восприятия расчетной нагрузки и составляет 315–325 кН при требуемом значении 420 кН. Сваи воспринимают 76 % нагрузки от сооружения.

Наиболее эффективным способом повышения несущей способности свайного фундамента в таких геологических условиях является включение в работу

грунта под подошвой ростверка. Расчет рассматриваемых фундаментов, выполненный в соответствии с [10], показал, что доля работы ростверка составит не менее 34,5 %, а это позволит добиться увеличения несущей способности фундаментов без повышения их стоимости.

Для оценки достоверности расчетов проведены испытания фрагмента свайного фундамента с несущим ростверком. Испытанные ранее одиночные сваи были объединены фрагментом железобетонного ростверка, эквивалентным площади ростверка, приходящейся на одну сваю в составе группы.

Результаты статических испытаний показали, что нагрузка на свайный фундамент может быть увеличена на 41 % за счет включения в работу ростверка. Данная работа была выполнена по заказу ООО "НПФ Строитель" в соответствии с договором № 40/08 от 3 июня 2008 г. Внедрение предлагаемой методики расчета свайных фундаментов с несущими ростверками позволило сократить стоимость работ по устройству свайного поля на 30 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Результаты проведенных автором статьи, а также другими авторами теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют, что предельное сопротивление грунта в основании ростверка с выпором из-под его подошвы может быть достигнуто при осадках, значительно превышающих допустимые значения. Поскольку расчет предельного сопротивления грунта под ростверком носит только поверочный характер, для практических целей правильнее определять передаваемую ростверком на основание фактическую нагрузку, которая зависит от осадки, что и предусмотрено в разработанном автором статьи методе расчета предельно допустимой

нагрузки на свайный фундамент с учетом деформационных свойств грунтов.

- 2 В отличие от существовавших до сих пор подходов в разработанном автором статьи методе расчета предусматривается определять осадку свайного фундамента с несущим ростверком в зависимости от нагрузки, равной доле работы свай. При этом впервые предложено учитывать дополнительные вертикальные напряжения в уровне нижних концов свай от взаимодействия ростверка с основанием, если глубина сжимаемой толщи грунта под его подошвой превышает длину свай. Оба предложенных автором метода расчета отражены во внедренных в проектную практику рекомендациях [10] с изложением основных положений по производству, контролю качества и приемке работ при устройстве свайных фундаментов с несущими ростверками.
- 3 Проведенные автором исследования позволили установить область применения свайных фундаментов с несущими ростверками и уточнить методику испытания свайных фундаментов с фрагментами ростверков, а также предложить рекомендации по подготовке основания при устройстве таких фундаментов.
- 4 Апробация новых расчетных предпосылок показала их хорошую сходимость с экспериментальными данными и возможность достижения высоких показателей экономической эффективности за счет включения в работу несущих ростверков и сокращения при этом потребного количества и длин свай в составе свайных фундаментов в разных грунтовых условиях Беларуси. В частности внедрение на ряде возведенных объектов научных разработок автора позволило уменьшить стоимость устройства свайных фундаментов с несущими ростверками на 30 %–50 % в сравнении с традиционными конструктивными решениями и методами расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совместная работа свай с ростверком в песчаных грунтах; сб. науч. тр. ПГАСА / В. А. Сернов. Вып. 22, ч. 1. Строительство, материаловедение, машиностроение. — Днепропетровск, 2003. — С. 252–256.
2. Исследование напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве: геотехника Беларуси: наука и практика: сб. статей Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 20–22 мая 2008 г. / БНТУ, В. А. Сернов; редкол.: М. И. Никитенко [и др.]. — Минск, 2008. — 239–246 с.
3. Sernov, V. A. The increase of bearing capacity of pile foundations taking into account soil-raft interaction / V. A. Sernov // *Modern Building Materials, Structures and Techniques: The 10th International Conference*. — Lithuania, 2010. — P. 1153–1160.
4. Эффективные конструкции свайных фундаментов с несущими ростверками: перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. науч. трудов XVI Междунар. науч.-методич. семинара, Брест, 28–30 июня 2009 г.: в 2 ч. / БрГТУ, В. А. Сернов; редкол.: А. А. Борисевич [и др.]. — Брест, 2009. — Ч. II. — С. 174–178.
5. Далматов, Б. И. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю. В. Россихин. — Л.: Стройиздат, 1975. — 240 с.
6. Цымбал, С. И. Экспериментальное исследование напряженного состояния в основании модели висячей сваи / С. И. Цымбал; Республ. межвед. науч.-техн. сб.: основания и фундаменты. — Киев: Будівельник, 1973. — Вып. 6. — С. 134–141.
7. Лапшин, Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям / Ф. К. Лапшин. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 152 с.
8. Козачок, Л. Д. Исследование распределения вертикальных напряжений в основании кустов висячих свай с низким ростверком: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Л. Д. Козачок. — Л., 1979. — 174 с.
9. Банников, С. Н. Влияние армирующих элементов в грунтах на устойчивость и деформируемость оснований: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / С. Н. Банников. — Минск, 2001. — 182 с.
10. Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками: Р 5.01.015.05. — М. И. Никитенко, В. А. Сернов. — Минск, 2005. — 24 с.

Статья поступила в редакцию 18.03.2011.