

УДК 624.131:624.15

Н.В. Блащук, И.В. Маевская

Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

**РАЗНИЦА В РАБОТЕ РОСТВЕРКА СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА
И УСИЛЕННОГО СВАЯМИ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА
МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ**

Приведены результаты исследования работы нового свайного фундамента и усиленного выносными сваями ленточного фундамента мелкого заложения. На основе результатов численного моделирования разработана методика расчета допустимой нагрузки на новый свайный фундамент и усиленный выносными сваями ленточный фундамент мелкого заложения. Предложенная методика позволяет более корректно учитывать совместную работу элементов фундаментов с основанием и получать более экономические решения при проектировании данных фундаментов.

Ключевые слова: свайный фундамент, усиленный сваями ленточный фундамент мелкого заложения, ростверк, свая, основание, работа ростверка.

N.V. Blashchuk, I.V. Maevskaya

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

**DIFFERENCE IN THE GRILLAGE PILE FOUNDATION
AND AMPLIFIED PILES STRIP SHALLOW FOUNDATION**

The paper presents the results of a study of the new pile foundation piles and reinforced outrigger shallow strip foundation. Based on the results of numerical simulation of the design procedure of carrying capacity of the new pile foundation piles and reinforced outrigger belt shallow foundation. The proposed technique allows a more correct to consider working together elements of foundations with a base and a more economic solution for the design of data bases.

Keywords: pile foundation, reinforced piles shallow strip foundations, grillage, pile foundation work grillage.

Введение

Сваи и свайные фундаменты используются довольно давно и в разных грунтовых условиях, но при их проектировании остается еще очень много вопросов. Актуальным среди них является и учет работы низкого ростверка. При расчете свайных фундаментов вся нагрузка от здания чаще всего полностью передается на сваи, хотя действующие на

территории Украины нормы рекомендуют учитывать работу ростверка как реакцию грунтового основания под подошвой, но такой подход не позволяет адекватно учитывать работу ростверка в составе свайного фундамента.

В усиленном выносными сваями ленточном фундаменте ростверком служит существующий до усиления фундамент и дополнительный ростверк над выносными сваями. При проектировании усиленный фундамент по особенностям работы под нагрузкой условно приводят до обычного свайного ленточного фундамента.

Обзор последних источников исследований и публикаций

Экспериментальными исследованиями работы ростверка в составе свайного фундамента занимались А.А. Бартоломей, Б.В. Бахолдин, Б.В. Варнаков, В.Н. Голубков, Н.М. Дорошкевич, В.В. Знаменский, В.А. Кондрашов, Н.С. Метелюк, В.А. Сернов, В.Д. Яблочков и др.

Экспериментальные исследования работы фундамента мелкого заложения, усиленного выносными сваями с объединением ростверком с существующим фундаментом, практически не выполнялись.

Проведенные разными авторами исследования влияния низкого ростверка на работу свайного фундамента показали, что часть нагрузки передается на грунт подошвой ростверка, а несущая способность свай в составе свайного фундамента не всегда соответствует несущей способности одиночной сваи.

Основными факторами, влияющими на долю работы ростверка, являются инженерно-геологические условия, геометрические параметры свайного фундамента, интенсивность нагрузки на свайный фундамент. Но проведенных исследований пока еще не достаточно для практических рекомендаций по определению количественного соотношения между суммой несущих способностей одиночных свай и несущей способностью группы свай с низким ростверком. Удобным инструментом для решения поставленной задачи является численное моделирование методом конечных элементов.

Предварительно был проведен анализ методов расчета новых свайных фундаментах и усиленных сваями ленточных фундаментах мелкого заложения с учетом работы ростверка. Существует значительное количество методов расчета свайных фундаментах с учетом рабо-

ты низкого ростверка, которые содержат много допущений. В литературных источниках найдено всего лишь два метода, которые непосредственно касаются расчета несущей способности усиленного сваями фундамента (Л.Ш. Лундин [2], Н.В. Корниенко [3]). Результаты расчета по существующим методикам существенно отличаются от результатов экспериментальных исследований, в связи с чем необходима разработка нового метода расчета, который бы позволил адекватно учитывать работу низкого ростверка в составе нового свайного и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения.

Физическое моделирование

Целью экспериментальных исследований на маломасштабных моделях было установить зависимость несущей способности ростверка в составе нового свайного фундамента и в составе усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения от длины и шага свай.

Физическое маломасштабное моделирование работы фундаментов является доступным и, как показывает опыт, позволяет получить достаточно достоверную качественную картину поведения свайных фундаментов под нагрузкой. Его преимуществом является возможность многократного повторения и широкого варьирования размеров и размещения свай.

Модельные исследования проводились в лотке размерами 1800×1200×1000 мм, в качестве грунта основания использован песок средней крупности. В результате анализа размеров лотка для сохранения нетронутой картины напряженного состояния в грунтовом основании вокруг фундамента, а также параметров опорной рамы для передачи нагрузки, был выбран масштаб моделирования 1:15. Использовались модели свай из дерева квадратного сечения 20×20 мм длиной 200, 300, 400 мм; модели существующего фундамента и ростверка – металлические жесткие плиты. Модель ростверка была изготовлена таким образом, что позволяла моделировать работу фундамента мелкого заложения до и после усиления выносными сваями, а также работу под нагрузкой нового свайного фундамента. На рис. 1 показана экспериментальная модель фундамента под нагрузкой.

В процессе исследований замерялись деформации и нагрузки на каждую сваю. Нагрузка прикладывалась с помощью гидравлических

домкратов, ее величина контролировалась манометром. Перемещение свай замерялось с помощью прогибомеров, а нагрузка на сваю – специальными наголовниками с тензометрическими датчиками. В качестве опорной системы использовалась рама.



Рис. 1. Модель фундамента под нагрузкой

При моделировании работы усиленного выносными сваями ленточного фундамента мелкого заложения сначала моделировалась работа фундамента мелкого заложения под действием вертикальной нагрузки, потом без снятия нагрузки вдавливались сваи усиления, сваи объединялись ростверком с существующим фундаментом. Нагрузка увеличивалась до момента разрушения основания, внешним признаком которого являлось появление трещин основания.

Для оценки работы свай в составе фундаментов также было проведено физическое моделирование работы одиночных свай под нагрузкой.

По результатам проведенного физического моделирования в однородных грунтовых условиях проанализированы факторы, которые влияют на работу ростверка в составе нового свайного и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения, а также установлены основные закономерности изменения доли нагрузки, воспринимаемой ростверком от этих факторов. Исследована работа сваи в составе фундамента в сравнении с одиночной сваей. Более детально результаты физического моделирования приведены в источнике [1].

Численное моделирование

Физическое моделирование позволило качественно оценить влияние геометрических и конструктивных параметров на работу фундаментов в однородных грунтовых условиях. При численном моделировании сделан комплексный анализ напряжено-деформированного состояния систем «ростверк – сваи – основание» и «существующий фундамент – сваи усиления – основание» с учетом не только влияния геометрических параметров, но и физико-механических свойств основания, и способа устройства свай.

Численное моделирование методом конечных элементов было реализовано в программном комплексе Plaxis. Были приняты следующие предпосылки и параметры:

- модель грунта основания – упругопластическая модель Кулона–Мора;

- модель ленточного свайного фундамента с соотношением сторон ростверка $L/B \geq 10$;

- сваи – призматические с размером поперечного сечения 30 см, длиной 3, 6, 9, 12 и 15 м;

- расположение свай в два ряда;

- расстояние между рядами свай $5d$, $7d$ и $9d$;

- шаг свай $3d$, $6d$, $9d$ и $12d$;

- размеры расчетной области в плане 40×60 м, по глубине размер меняется в зависимости от длины свай;

- за нагрузку, которую воспринимает ленточный фундамент мелкого заложения до усиления, принимается значение, соответствующее расчетному сопротивлению основания. За допустимую нагрузку после усиления принимается значение, при котором достигается допустимое значение осадки.

Перед началом численного моделирования было проведено обоснование выбора моделей систем «ростверк – сваи – основание» и «существующий фундамент – сваи усиления – основание» путем моделирования работы одиночных свай, фундамента мелкого заложения (натурные исследования) и работы свайного фундамента (физическое моделирование) и сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными. Расхождение результатов составило не более 10 %, т.е. выбранные модели адекватны.

По результатам численного моделирования проведен комплексный анализ факторов, которые влияют на несущую способность систем «ростверк – сваи – основание» и «существующий фундамент – сваи усиления – основание». Установлено, что наиболее влиятельными факторами являются:

1) шаг свай в продольном направлении – с увеличением шага свай доля нагрузки, воспринимаемой ростверком, возрастает;

2) расстояние между рядами свай – с увеличением расстояния между рядами свай доля нагрузки, воспринимаемой ростверком, возрастает;

3) длина свай – с увеличением длины свай доля нагрузки, воспринимаемой ростверком, уменьшается;

4) вид свай – доля нагрузки, воспринимаемой ростверком, зависит от способа устройства свай; при устройстве свай с выемкой грунта доля нагрузки, воспринимаемой ростверком, больше, чем при устройстве свай без выемки грунта;

5) при варьировании грунтовых условий закономерности изменения доли нагрузки, воспринимаемой ростверком, от отдельных характеристик грунта не имеют четкого характера. Грунтовые условия подбирались таким образом, чтобы охватить характерные диапазоны реальной смены комплекса физико-механических характеристик для глинистых грунтов и песков;

б) несущая способность одиночной сваи в составе свайного фундамента реализуется не полностью. С увеличением продольного шага свай и расстояния между рядами свай несущая способность свай в составе свайного фундамента приближается к несущей способности одиночной сваи.

Разница в работе свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения состоит в том, что доля нагрузки, воспринимаемой ростверком в составе нового свайного фундамента, меньше. В новом ленточном свайном фундаменте ростверк начинает воспринимать нагрузку практически одновременно со сваями,

а в усиленном фундаменте в состав ростверка входит существующий ранее фундамент, который уже воспринимает нагрузку, т.е. характер распределения нагрузки между ростверком и сваями совсем другой.

Установлено, что разница между величиной нагрузки на ростверк в этих случаях соответствует нагрузке, которую воспринимает фундамент мелкого заложения до усиления.

К результатам численного моделирования были добавлены граничные условия, которые вытекают из физической сущности работы нового свайного фундамента и усиленного выносными сваями ленточного фундамента мелкого заложения. В результате корреляционного анализа были получены функциональные зависимости для определения эффекта совместной работы ростверка в составе нового свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения (формула (1)). Адекватность предложенной зависимости подтверждается сходимостью с результатами численного моделирования.

Методика расчета допустимой нагрузки на свайный фундамент с учетом работы ростверка

На основании выявленных закономерностей в работе нового свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения и разработанных функциональных зависимостей была разработана методика расчета ленточных свайных фундаментов с учетом работы ростверка. Область применения методики:

- под подошвой ростверка размещен грунт с модулем деформации не меньше 5 МПа;
- сваи в составе фундамента по характеру работы в грунте висячие;
- двухрядное размещение свай в составе фундамента;
- для усиленных выносными сваями ленточных фундаментов мелкого заложения выполняется объединение свай ростверком с существующим фундаментом (жесткое).

Последовательность расчета:

1. Оценка инженерно-геологических условий строительной площадки и определение нагрузки на фундамент.
2. Выбор типа и длины свай, определение геометрических параметров нового свайного или усиленного сваями фундамента. В первом приближении принимается количество и шаг свай без учета работы ростверка.

3. Определение эффекта работы ростверка в составе нового свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения (α):

$$\alpha = \left(\frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot l^2 \cdot (f_0/E)}{(a \cdot b)}} \right) \cdot e^{-((l/d)^{0.75}/(a/d))}, \quad (1)$$

где l – длина свай, м; f_0 – начальное сопротивление по боковой поверхности (сопротивление по боковой поверхности в верхней зоне длины свай); a – шаг свай в продольном направлении, м; b – расстояние между рядами свай, м; d – поперечный размер свай, м; E – приведенный модуль деформации грунта, определяемый по П. 1.3¹ ДБН В. 2.1-10–2009:

$$E = (1-b)k_f E_f + k_p b E_p, \quad (2)$$

где b – коэффициент, который определяет часть нагрузки, передаваемой острием свай, определяют по табл. П. 1.2 ДБН В.2.1-10–2009; E_f – усредненный по длине свай модуль деформации грунтового основания, который контактирует с боковой поверхностью и определяется согласно формуле П. 1.4 ДБН В.2.1-10–2009; E_p – модуль деформации под нижним концом свай, определяется в пределах одного диаметра выше и четырех ниже отметки нижнего конца свай; k_f – коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности свай, определяют согласно П. 1.5; k_p – коэффициент условий работы грунта под нижним концом свай, определяется согласно П. 1.5 ДБН В.2.1-10–2009.

4. Определение допустимой нагрузки на группу свай:

$$F_p = n \cdot \zeta_p \cdot N, \quad (3)$$

где n – количество свай, шт.; ζ_p – коэффициент, учитывающий степень реализации несущей способности свай по грунту в составе фундамента, зависит от грунтовых условий, длины и расстояния между

¹ ДБН В.2.1-10–2009. Основания и фундамента зданий и сооружений. Основные положения проектирования. Изменение 1 [Действуют от 2011-07-01]. К.: Минрегионбуд Украины, 2011. 55 с. (Государственные строительные нормы Украины.)

сваями. Для усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения определяется по таблице в зависимости от вида грунта под острием свай и шага свай. Для нового свайного фундамента при продольном шаге свай $a = 3d$ коэффициент $\zeta_p = 0,65$ для песков и $\zeta_p = 0,85$ – для пылевато-глинистых грунтов, а при $a > 3d$ – $\zeta_p = 1$. Значения коэффициента ζ_p получены путем обработки результатов численного моделирования; N – допустимая нагрузка на одиночную сваю, определяется согласно ДБН В.2.1-10–2009.

Значение коэффициента ζ_p

Продольный шаг свай	Грунт под нижним концом свай									
	песок			глинистый при I_L						
	пылеватый	мелкий	средней крупности	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$3d$	0,4	0,35	0,3	0,44	0,4	0,39	0,34	0,28	0,28	0,22
$6d$	0,69	0,63	0,52	0,75	0,71	0,58	0,53	0,47	0,5	0,39
$9d$	0,8	0,77	0,68	0,92	0,88	0,7	0,67	0,64	0,67	0,55
$12d$	0,8	0,78	0,7	0,97	0,9	0,85	0,81	0,76	0,78	0,61

Примечания: 1. Для продольного шага (a) свай более $12d$ значения ζ_p принимать как для $a = 12d$. 2. Для свай, устроенных с выемкой грунта, значения ζ_p увеличивать на 30 % (при $\zeta_p > 1$ принимать $\zeta_p = 1$). 3. Для промежуточных значений продольного шага и показателя текучести значения ζ_p находить интерполяцией.

5. Определение допустимой нагрузки на фундамент:

$$F_{\Sigma} = F_{r0} + \frac{F_p}{1 - \alpha}, \quad (4)$$

$$F_{r0} = P \cdot A, \quad (5)$$

где A – площадь ленточного фундамента мелкого заложения до усиления; P – среднее давление под подошвой ленточного фундамента мелкого заложения.

Для нового свайного фундамента $F_{r0} = 0$.

6. Увеличение шага свай и повторное определение эффекта работы ростверка (п. 2). При необходимости можно также варьировать длину свай.

7. Выбор оптимального варианта свайного фундамента или усиления выносными сваями ленточного фундамента мелкого заложения, где работа ростверка максимально используется (оптимальный шаг и длины свай).

При выборе оптимального шага свай следует учитывать, что величина допустимой нагрузки на фундамент при изменении шага свай меняется в диапазоне от 3 до 25 %. Иными словами, при большем шаге и меньшем количестве свай может быть достигнута необходимая величина допустимой нагрузки на фундамент, что позволит снизить стоимость работ по устройству фундаментов.

При расчете усиления выносными сваями ленточного фундамента мелкого заложения по данной методике для реальных зданий количество свай уменьшилось на 16 и 24 % по сравнению с необходимым количеством при проектировании без учета работы ростверка.

Выводы

1. При физическом моделировании исследовано влияние геометрических параметров свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения на долю нагрузки, воспринимаемой ростверком, и степень реализации несущей способности свай.

2. Численным моделированием исследовано напряженно-деформированное состояние систем «ростверк–сваи–основание» и «существующий фундамент – сваи усиления – основание». Анализ результатов исследования показал, что в усиленном фундаменте сваи включаются в работу только после возникновения дополнительных нагрузок на фундамент. Реактивное сопротивление основания под подошвой ленточного фундамента до и после усиления практически не меняется, а допустимая нагрузка на ростверк усиленного фундамента в сравнении с нагрузкой на ленточный фундамент повышается за счет увеличения его площади.

3. На основании численного моделирования сделан комплексный анализ факторов, которые влияют на долю нагрузки, воспринимаемой ростверком. Такими факторами являются: шаг свай в продольном

направлении и расстояние между рядами свай, длина и тип свай, модуль деформации и прочностные характеристики грунта.

4. Разница в работе ростверка свайного фундамента и усиленного сваями ленточного фундамента мелкого заложения соответствует нагрузке, которую воспринимал ленточный фундамент до усиления.

5. По результатам корреляционного анализа данных численного моделирования были предложены функциональные зависимости, которые дают возможность учитывать основные геометрические параметры и физико-механические свойства основания для оценки доли нагрузки, которую воспринимает ростверк.

6. Предложена методика расчета допустимой нагрузки на новый свайный фундамент и на усиленный сваями ленточный фундамент мелкого заложения с учетом наиболее влиятельных факторов.

Библиографический список

1. Маевская И.В, Блащук Н.В. Учет работы ростверка в составе ленточных свайных фундаментов и усиленных сваями фундаментов: монография. – Винница: ВНТУ, 2013. – 168 с.

2. Лундин Л.Ш., Петров В.И., Биберман Г.Я. Расчет усиления фундамента спаями, располагаемыми за его контуром при реконструкции // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1977. – № 2. – С. 4–6.

3. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Проектирование, строительство и надежная эксплуатация: тр. сем. (Киев, 25–26 февраля 2009 г.). – Киев: Укр. центр переподготовки и обучения, 2009. – 178 с.

References

1. Mayevskaya I.V., Blaschuk N.V. Uchet raboty rostverka v sostave lentochnykh svaynykh fundamentov i usilennykh svayami fundamentov [Accounting work grillage composed tape pile foundations and piles of reinforced foundations: monograph]. Vinnitsa; Vinnitskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2013, 168 p.

2. Lundin L.S., Petrov V.I., Biberman G.Y. Raschet usileniya fundamenta spayami, raspolagaemymi za ego konturom pri rekonstruktsii [Calculation gain foundation junctions, located behind its contour in the reconstruction]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1977, no. 2, pp. 4-6.

3. Trudy seminaru "Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya. Proektirovanie, stroitel'stvo i nadezhnaya ekspluatatsiya" [Proceedings of the Seminar "Bases, foundations and underground structures. Design, construction and reliable operation"]. Kiev: Ukrainskii tsentr perepodgotovki i obucheniya, 2009, 178 p.

Об авторах

Блащук Наталья Викторовна (Винница, Украина) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Винницкого национального технического университета; e-mail: VerNata83@mail.ru

Маевская Ирина Викторовна (Винница, Украина) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Винницкого национального технического университета; e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

About the authors

Blashchuk Natalia Victorovna (Vinnitsa, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and civil building, Vinnytsia National Technical University; e-mail: VerNata83@mail.ru

Maevskaya Irina Victorovna (Vinnitsa, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Industrial and civil building, Vinnytsia National Technical University; e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

Получено 04.04.2014