



DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6
УДК 624.131

Особенности расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайных фундаментов при режимных циклических и циклических нагружениях.

И.Т. Мирсаяпов¹, А.И. Гараев¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г.Казань, Российская Федерация

Аннотация: целью исследования является рассмотрение различных особенностей расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента (ПСФ) при различных видах нагружений. Основная задача данной работы – это выполнить анализ существующих методов расчета плитно-свайных фундаментов при различных видах нагружения. Актуальность затрагиваемой проблемы вызвана отсутствием методики расчета, которая достоверно бы давала сведения о совместной работе плитно-свайного фундамента и окружающего его грунта при режимном циклическом нагружении. При этом существующие методики расчета разработаны для случая циклического нагружения с параметрами, постоянными во времени. В то же время, в реальных условиях эксплуатации многих сооружений, параметры циклического нагружения меняются на различных этапах технологических процессов.

Проведено теоретическое исследование различных методик расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента в зависимости от различных видов взаимодействия и изменения напряженно-деформированного состояния происходящее между основными элементами плитно-свайного фундамента и окружающим его массивом грунта, а также элементов между собой при различных видах нагружения.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что анализ различных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при разных видах нагружения позволяет оценить подходы авторов к этим расчетам и определить какие условия взаимодействия системы «фундамент – грунтовый массив» остались открытыми и при каких видах нагружения.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, свая, фундаментная плита, осадки, несущая способность.

Для цитирования: И.Т.Мирсаяпов, А.И.Гараев Особенности расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайных фундаментов при режимных циклических и циклических нагружениях//Известия КГАСУ.2022. №1 (59). С 6-18.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6

Features of the calculation of the stress-strain state of slab-pile foundations under regime cyclic and cyclic loading.

I.T.Mirsayapov¹, A.I.Garaev¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: problem statement. The purpose of the study is to consider various features of the calculation of the stress-strain state of the slab-pile foundation under various types of loads. The main task of this work is to analyze the existing methods of calculating slab-pile foundations under various types of loading. The urgency of the problem is caused by the lack of a calculation

methodology that would reliably provide information about the joint work of the slab-pile foundation and the surrounding soil under regime cyclic loading. At the same time, the existing calculation methods have been developed for the case of cyclic loading with parameters constant in time. At the same time, in the actual operating conditions of many structures, the parameters of cyclic loading change at various stages of technological processes. A theoretical study of various methods for calculating the bearing capacity and settlement of a slab-pile foundation was carried out, depending on various types of interaction and changes in the stress-strain state occurring between the main elements of the slab-pile foundation and the surrounding soil mass, as well as elements with each other under various types of loading. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the analysis of various methods for calculating the stress-strain state of a slab-pile foundation under different types of loading allows us to evaluate the authors' approaches to these calculations and determine what conditions for the interaction of the "foundation-soil mass" system remained open and under what types of loading.

Key words: slab-pile foundation, pile, foundation slab, precipitation, bearing capacity.

For citation: I.T. Mirsayapov, A.I. Garaev Features of the calculation of the stress-strain state of slab-pile foundations under regime cyclic and cyclic loading // News KSUAE 2022. №1 (59). С 6-18. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_6

1. Введение

Одним из более действенных методик увеличения несущей при больших уровнях нагрузки и негативных грунтовых условиях считается использование ПСФ.

Важной задачей при проектировании зданий и сооружений, является оценка несущей способности и прогноз развития осадок фундаментов. Установление НДС плитно-свайного фундамента представляет из себя задачу с несколькими неизвестными, поскольку в основании фундамента находятся материалы с различными деформационными и прочностными характеристиками и все эти деформации развиваются в связных условиях [1-4].

Особенности расчета плитно-свайных фундаментов (ПСФ) заключаются в решении системы «фундамент-грунтовое основание». При решении данной систем необходимо ответить на такие задачи как, определение осадки фундамента (осадка плитного фундамента и группы свай), определение распределения напряжений и развитие деформаций при совместной работе плитно-свайного фундамента и окружающего его массива грунта, а также элементов ПСФ между собой при нагружении их режимными циклическими нагрузками [5-6].

Методики определение осадки ПСФ была предложены в действующем нормативном документе СП 24.13330.2011 и в работах таких авторов как Мирсаяпова И. Т. и Шакирова М. И. [7-10], Мангушева Р. А. и Фадеева А. Б. [11], Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Т. В. [12], Самородов А.В. [13]. Для всех этих методик характерно то, что для расчета КСПФ не обходимо учитывать различные виды взаимодействия между сваей и грунтом, плитой и грунтом, влияние свай друг на друга через грунт и взаимное влияние свай и плиты ростверка.

Методики определение несущей способности ПСФ были предложены в работах таких авторов как Мирсаяпов И. Т. и Шакиров М. И. [7-8], Артемьев Д. А. [14], Самородов А. В [13].

Поведение компонентов плитно-свайного фундамента с окружающим грунтовым массивом при определении напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента были рассмотрены многими авторами. Так, например, при определении осадки плитно-свайного фундамента учитываются различные факторы и особенности, одной и таких особенностей является дополнительная осадка плитно-свайного фундамента за счет деформации ствола сваи. Такими авторами как, Тер-Мартirosян З. Г. и Чинь Т. В. в работе [15]. В работе [16] авторов Уткина В. С., Сушева Л. А., Соловьева С. А., была предложена методика определения осадки сваи за счет сжатия ствола сваи с учетом сил трения по боковой поверхности. На основании экспериментальных исследований в работе [17]. Готмана А. Л. и Гаврикова М. Д. была разработана методика определения осадок

ствола сваи с возникновением дополнительных осадок по мере увеличения нагрузок. В работе Готмана Н. З., Алехина В. С., Сергеева Ф. В. [18] описывается способ нахождения несущей способности грунта под подошвой сваи в составе группы свай. Способ определения напряженно-деформированного состояния, основывается на результатах испытаний, проведенных для сваи в составе группы свай и для одной сваи.

Данные методики расчета позволяют рассматривать изменение напряженно-деформированного состояния системы «плитно-свайный фундамент – грунтовый массив» при действии кратковременного статического нагружения и постоянного циклического нагружения и не рассматривают изменения нагружений которые меняются на различных этапах эксплуатации зданий и сооружений, что является актуальной проблемой. В связи с этим цель исследования является разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при действии режимного циклического нагружения. Для достижения цели необходимо:

- изучить методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при статическом нагружении;
- изучить методики определения напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента и грунтового основания при режимном циклическом нагружении;
- изучить методики расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при режимных циклических нагружениях.

2. Материалы и методы

При определении напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента от действия различного рода нагрузок необходимо учитывать различные виды взаимодействия, возникающие в процессе их совместного деформирования. Данные особенности были рассмотрены авторами при определении осадки и несущей способности плитно-свайного фундамента путем рассмотрения системы «плитно-свайный фундамент – грунт».

Методики расчета осадки плитно-свайного фундамента

Методика расчета, предложенная в СП 24.13330.2011, состоит в определении трех частей:

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c \quad (1)$$

где s_{ef} – осадка условного фундамента;

Δs_p – дополнительная осадка за счет продавливания сваи;

Δs_c – дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи.

Расчет осадки условного фундамента s_{ef} производят методом послойного суммирования деформаций линейно-деформируемого основания с условным ограничением сжимаемой толщи согласно СП 22.13330.2016.

Величина деформации грунта продавливания Δs_p является переменной и зависит от шага свай в свайно-плитном фундаменте. Расчет выполняется методом ячейки в упругопластической постановке.

Расчет осадки за счет сжатия ствола сваи заключается в том, что сжатие ствола сваи происходит под действием внешней нагрузки по законам линейной деформации.

В работах [7-10] за расчетную схему была принята модель, состоящая из плитного ростверка, жестко соединенного со сваями и окружающий его массив.

Осадку плитно-свайного фундамента при действии многократно повторяющейся циклической нагрузки вычисляется по выражению:

$$S(N) = S_{ef}(N) + \Delta S_p(N) + \Delta S_c(N) \quad (2)$$

где $S_{ef}(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки условного фундамента;

$\Delta S_p(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки за счет продавливания основания сваи;

$\Delta S_c(N)$ – деформации при действии многократно повторяющейся нагрузки за счет сжатия ствола сваи.

Осадку условного фундамента вычисляется из выражения:

$$S_{ef}(N) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{z,i}(t, t_0)] * h_i \quad (3)$$

где h_i – высота i -го слоя грунта;

n – число слоев сжимаемой толщи;

t – промежуток времени, зависящий от начала момента наблюдения и количества циклов нагружения N ;

$\varepsilon_{z,i}(t, t_0)$ – деформации i -го слоя при действии циклической нагрузки t ;

t_0 – промежуток времени равный периоду 1-ому циклу нагружения;

h_i – высота i -го слоя грунта.

Осадки при действии повторяющейся нагрузки за счет деформирования основания сваи определяются исходя из формулы:

$$\Delta S_c(N) = \frac{\sigma_c^{max}(N_1)(l-a)}{E_b(N_1)} + \frac{\varepsilon_{pl}^{rp}(N) * (l-a)}{\left[1 + \frac{E_b(N)}{E_{rp}(N)} * \frac{A_{св}}{A_{rp}}\right]} \quad (4)$$

где $E_b(N)$ – коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией сваи при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$A_{св}$ – площадь сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

$E_{rp}(N)$ – характеристика изменений грунта, возникающих под воздействием разных типов нагрузок при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$\varepsilon_{pl}^{rp}(N)$ – деформации в дисперсных грунтах при длительных динамических нагрузках вследствие ослабления взаимодействия между частицами и их взаимной переупаковки;

$G_v(N)$ – характеристика деформируемости, определяемая отношением приложенного к грунту касательного напряжения к углу сдвига при действии многократно повторяющейся нагрузки;

$K_v(N)$ – объемный модуль деформации грунта при действии многократно повторяющейся нагрузки;

σ_c^{max} – максимальное давление в стволе сваи;

A_{rp} – площадь грунта рассматриваемой ячейки;

l – продольный размер сваи.

Осадки при действии повторяющейся нагрузки за счет деформирования ствола сваи определяется по формуле:

$$\Delta S_p(N) = \alpha_{св} \left[\frac{P_3(N)}{G_v(N)} - \left(\frac{P_3(N) + 2P_3(N) \cos B}{3} \right) * \frac{3K_v(N) - G_v(N)}{3K_v(N) - G_v(N)} \right] \quad (5)$$

где $P_3(N)$ – давление в основании сваи;

$\alpha_{св}$ – размер сваи, образованный пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу.

В работе Фадеева А. Б. и Мангушева Р. А. [11] осадка плитно-свайного фундамента (ПСФ) определяется из двух компонентов:

$$S_{п.с} = S_1 + S_2 \quad (6)$$

Первая компонента осадки S_1 , представляет собой осадку плитного ростверка и зависит от доли нагрузки, передаваемой на грунтовое основание плитным ростверком:

$$S_1 = (1 - \alpha) S_{п} \quad (7)$$

где α – доля нагрузки, приходящаяся на сваю;

$S_{п}$ – осадка плитного ростверка.

Вторая компонента осадки S_2 , представляет собой осадку свай и зависит от доли нагрузки передаваемой сваи определяемая сжимаемостью подсвайной толщи:

$$S_2 = \alpha S_c \quad (8)$$

где S_c – осадка сваи.

В работе [12] для определения осадки плитно-свайного фундамента рассматривается задача, по количественной оценке, напряженно-деформированного состояния (НДС) ячейки ПСФ.

Осадка сваи в составе плитно-свайного фундамента рассматривается в зависимости трех слагаемых: сил трения T , от нагрузок в основании плитного ростверка P и от усилий, возникающих в основании свайного поля R . В связи с высокими значениями жесткости материала сваи во всех 3-х случаях осадки считаются одинаковыми, т.е.:

$$S_c = S_1(T) = S_2(P) = S_3(R)$$

Осадка сваи $S_1(T)$ от воздействия сил трения вычисляется по формуле:

$$S_1(T) = S_c = S_b + \frac{\tau_a}{3G}(b - a) \quad (9)$$

где G – модуль сдвига;

τ_a – значение касательных напряжений действующих по боковой поверхности сваи;

b – половина ширины ячейки плитно-свайного фундамента;

a – половина ширины сечения сваи.

В зависимости от действия усилий R в основании свайного фундамента осадка сваи $S_3(R)$ определяется по формуле:

$$S_3(R) = S_{св} = \frac{R(1 - \nu)K_1}{4aG} = \frac{R(1 - \nu)K_1}{2aE} \quad (10)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий длину сваи;

ν – коэффициент Пуассона;

R – напряжения возникающие под нижним концом сваи.

В зависимости от действия силы нагрузок P под ростверком, осадка сваи $S_2(P)$ определяется по формуле:

$$S_2(P) = \frac{PL}{E} \beta(\nu) \quad (11)$$

где L – высота столба грунта;

$\beta(\nu) = 0.8$;

E – модуль деформации грунта.

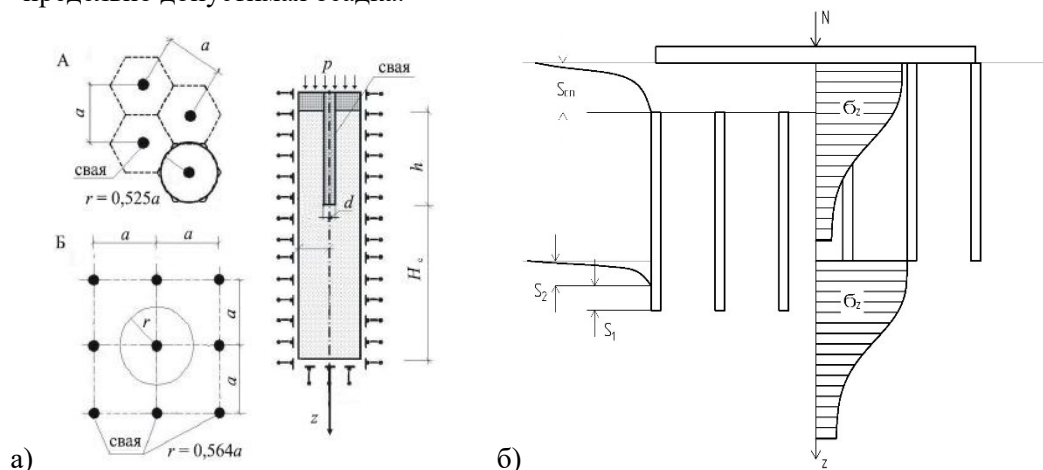
В работе Самородова А. В. [13] в основу определения осадки плитно-свайного фундамента лег обобщенный закон Гука для равномерно нагруженного слоя грунта. Условие для определения осадки плитно-свайного фундамента имеет вид:

$$S_{пл} + S_N \leq S_u \quad (12)$$

где $S_{пл}$ – осадка плитного ростверка;

S_N – осадка свайного поля;

S_u – предельно допустимая осадка.



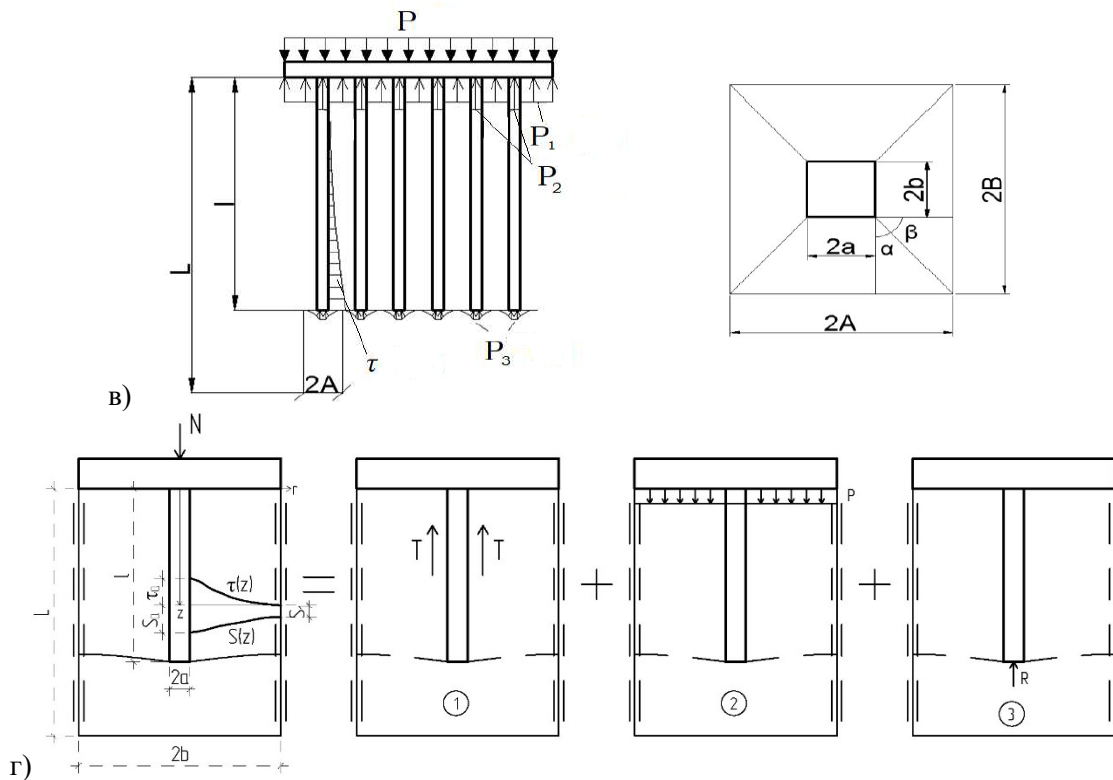


Рис. 1. Расчетные схемы: а) Метод ячейки [СП 24.13330.2011]; б) Схема к определению осадки плитно-свайного фундамента [11]; в) Схема взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым основанием [7]; г) Схема для определения осадки отдельной ячейки плитно-свайного фундамента [12].

Методики расчета несущей способности плитно-свайного фундамента

В работах [7-8] представляется методика определения несущей способности ПСФ при действии многократно повторяющейся циклической нагрузки. За расчетную схему была принята модель, состоящая из плитного ростверка, жестко соединенного со сваями и окружающий его массив (рис. 1в).

Несущая способность ПСФ определялась исходя из условий, что напряжения под пятой сваи $P_{3,i}(N)$ и напряжения на уровне оголовка сваи $P_{2,i}(N)$ не превышают предельные напряжения в грунте $\sigma_{1u}(N)$.

$$P_{2,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \tag{13}$$

$$P_{3,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \tag{14}$$

Напряжения возникающие при многократно повторяющейся нагрузки были определены из 4-х уравнения квазистатики и получены следующие уравнения:

Напряжения в грунте под ростверком вычисляются по формуле:

$$P_1(N) = \frac{P * AB - p_2(N) * ab}{(AB - ab)} \tag{15}$$

где P – равномерно распределенная нагрузка;

A, B – размеры рассматриваемой ячейки;

a, b – размеры сечения свай.

Давление на уровне вершины сваи выражается формулой:

$$\begin{aligned}
 P_2(N) = & \frac{P * G_{gr}(N) * AB * (AB - ab) * L * \beta_{gr} * \left(1 - \frac{1}{L}\right) + 0.33 * \tau_0(N) * E_{gr}(N) * (A - a) * (AB - ab) * k_1}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \\
 + & \frac{0.33 * \tau_0(N) * E_{gr}(N) * (B - b) * (AB - ab) * k_2 - 4 \frac{\tau_0(N)}{\alpha} E_{gr}(N) * l * (AB - ab) * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l)}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \\
 + & \frac{\frac{\tau_0(N)}{\alpha} * E_{gr}(N) * \frac{a + b}{b} * l * (AB - ab) e^{-\alpha l} * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l)}{\alpha * \omega * (1 - \nu_{gr}) * k(l) * (AB - ab) * E_{gr}(N) + ab * \beta_{gr} * L * \left(1 - \frac{1}{L}\right) * G_{gr}(N)} \tag{16}
 \end{aligned}$$

где G – физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться сдвиговой деформации;

$k(l)$ – величина, учитывающая глубину приложения штампа на его длину;

ω – параметр, зависящий от формы рассматриваемой ячейки;

ν – упругая константа, величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению;

$\alpha = 5/l$, где l – длина сваи.

Давление под основанием сваи рассчитывается из выражения:

$$p_3(N) = \frac{p_2(N) * 4ab + 4(a+b) * l * \frac{\tau_0(N)}{\alpha} - 4(a+b) * l * \frac{\tau_0(N)}{\alpha} * e^{-\alpha l}}{4ab} \quad (17)$$

где $\tau_0(N)$ – давление в возникающее за счет бокового трения по поверхности сваи при действии многократно повторяющейся нагрузки;

В работе [14] основываясь на ряд лабораторных испытаний была выдвинута гипотеза об образовании уплотненных зон и на основании данной гипотезы была составлена методика расчета несущей способности комбинированного плитно-свайного фундамента:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{i=0}^n R_{\text{св}} + R_{\text{пл}} \quad (18)$$

$R_{\text{пл}}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая сваяй:

$$R_{\text{св } i} = R_{\text{бок } i} + R_{\text{лоб } i} \quad (19)$$

где $R_{\text{бок } i}$ – величина нагрузки, воспринимаемая сваяй за счет бокового трения, $R_{\text{лоб } i}$ – величина нагрузки, воспринимаемая подошвой сваи, $R_{\text{пл}}$ – величина нагрузки, воспринимаемая плитным ростверком:

$$R_{\text{пл}} = \int_0^{A_p} f(x) \sigma_{\text{гр}} dA_p \quad (20)$$

где $f(x)$ – параметр эпюры давления в грунте;

$\sigma_{\text{гр}}$ – давление в основании под плитным ростверком;

A_p – площадь основания плитного ростверка, без учета площади поперечного сечения свай.

В работе [13] несущая способность ПСФ $R_{\text{пл}}$ определяется из условия максимально допустимой осадки плитной части фундамента $S_{\text{пл}}$ и выражается формулой:

$$P_{\text{пл}} = \frac{d_1 + \sqrt{d_1^2 + \frac{4 * S_{\text{пл}} * E}{k * \gamma * \beta}}}{2} k * \gamma \quad (21)$$

где d_1 – размер поперечного сечения свай;

$S_{\text{пл}}$ – осадка плитной части;

k – коэффициент, принимаемый в зависимости от ширины подошвы фундамента;

γ – удельный вес грунта;

β – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

E – модуль деформации грунта.

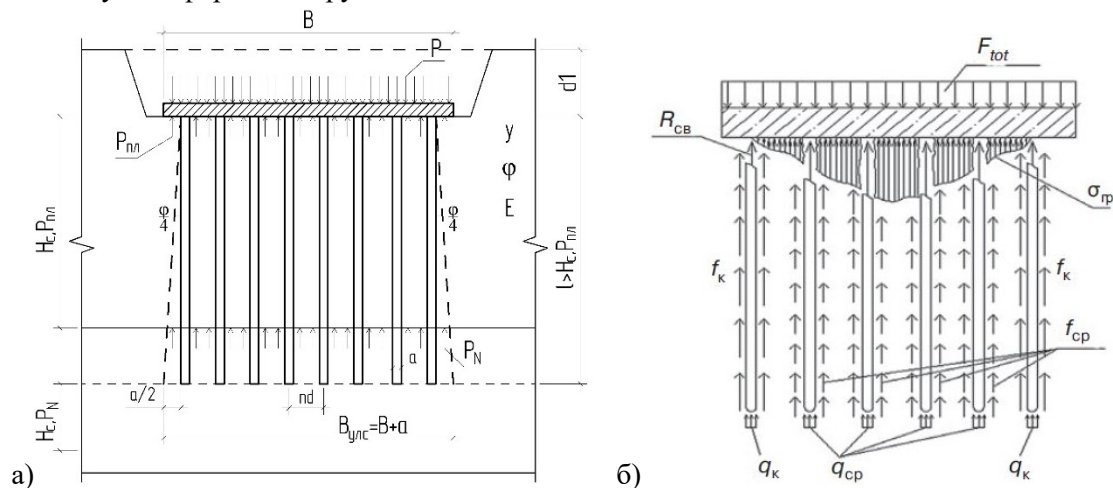


Рис. 2. Расчетные схемы: а) Расчетная схема взаимодействия плитно-свайного крупноразмерного фундамента с грунтовым массивом [13]; б) Расчетная схема плитно-свайного фундамента [14];

Методики расчета напряженно-деформированного состояния компонентов плитно-свайного фундамента с окружающим грунтовым массивом

В работе [15] рассматривается методика расчета осадки сваи с учетом сжимаемости материала сваи. Представленная методика способствует определению осадки сваи от действия напряжений σ_x , σ_z , τ_z (рис. 5).

В работе [16] осадка сваи состоит из следующих составляющих (рис.6):

$$\Delta s_c = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_f \quad (22)$$

где Δ_p – деформации за счет деформирования ствола сваи от действия внешних сил;
 Δ_G – деформации за счет деформирования ствола сваи от действия собственного веса сваи;
 $\Delta_{f,отр}$ – дополнительная осадка в результате возникновения отрицательных сил трения;
 Δ_f – отрицательная осадка в результате действия сил трения.

В работе [17] были получены следующие формулы для определения дополнительных осадок:

- деформация за счет сжатия ствола сваи S_p :

$$S_p = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA} \quad (23)$$

где l – продольный размер сваи;

E – коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией сваи;
 A – площадь сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

N_f – максимальная нагрузка, воспринимаемая сваей за счет трения грунта по боковой поверхности.

N_{03} – величина приложенной нагрузки;

- за счет сжатия под нижним концом сваи S_l :

$$S_l = \frac{(1 - \mu^2)\omega dP}{E_0 A} \quad (24)$$

где E_0 – приращение механического напряжения, вызывающее единичное приращение относительной деформации грунта соответствующего вида под основанием сваи;

μ – упругая константа, величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению;

d – размер сваи, образованная пересечением продолговатого тела с воображаемой плоскостью, расположенных перпендикулярно друг другу;

ω – коэффициент формы, принимаемый для круглого сечения равным единице.

P – величина нагрузки под пятой сваи.

Общая осадка сваи:

$$S = \frac{l(2N_{03} - N_f)}{2EA} + \frac{(1 - \mu^2)\omega dP}{E_0 A} + S_g \quad (25)$$

В работе. [18] способ определения напряженно-деформированного состояния учитывает эффект «обжатия», тогда несущая способность основания выражается формулой:

$$F_{d.g.c} = F_{d.исп} * \frac{F'_{d.g.c}}{F'_{d.o.c}} \quad (26)$$

где $F_{d.g.c}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая основанием сваи в составе в составе свайного поля;

$F_{d.исп}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая основанием сваи, по данным полевых испытаний;

$F'_{d.g.c} = (R + \Delta R) * A + u \sum (f_i + \Delta f_i) h_i$ и $F'_{d.o.c} = R * A + u \sum f_i h_i$ максимальная нагрузка, воспринимаемая сваей в составе группы свай и одиночной сваи.

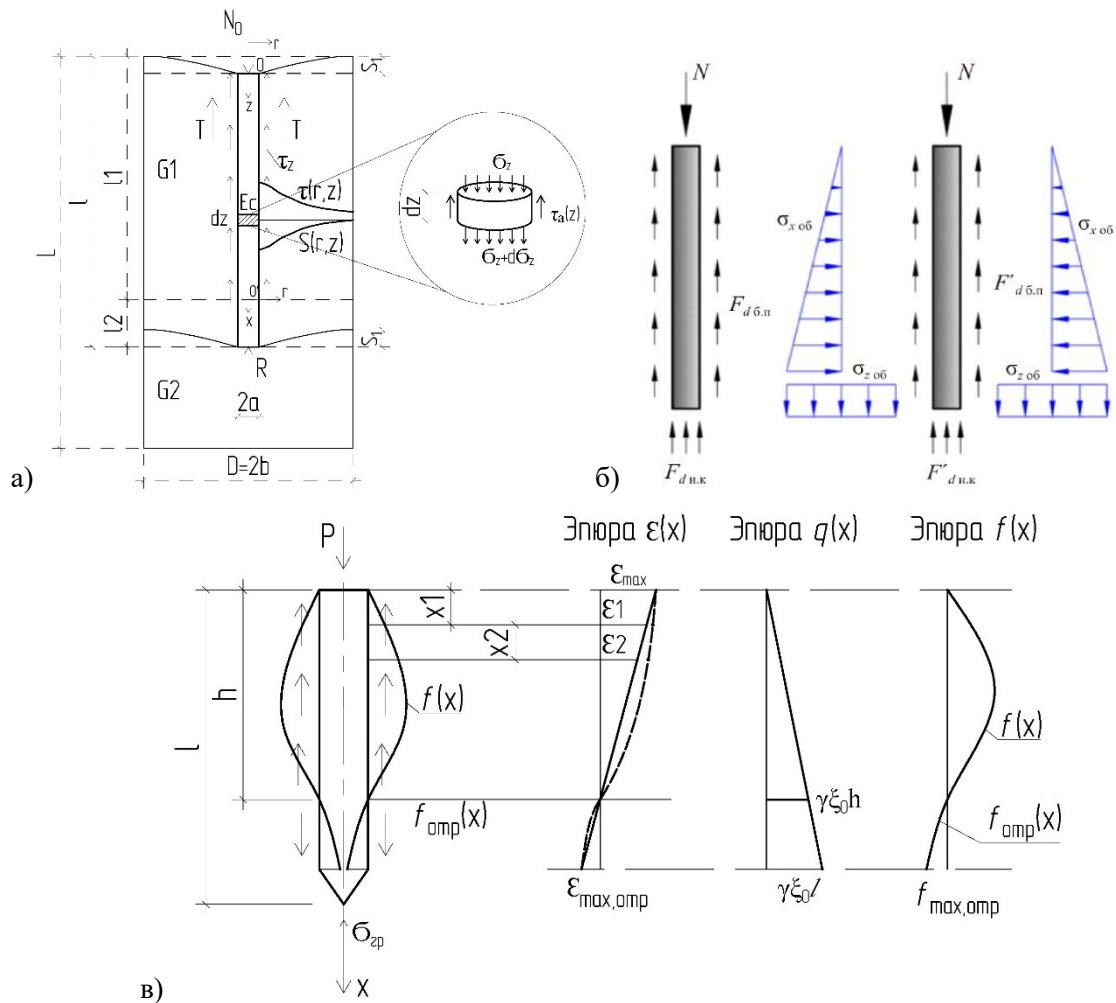


Рис. 3. а) Расчетная схема взаимодействия сжимаемой сваи с двухслойным массивом грунта [15]; б) Расчетная схема для определения предельного сопротивления одиночной сваи и сваи в составе группы свай [17]; в) Расчетная схема работы сваи в однородном грунте основания [16];

3. Результаты

В результате рассмотрения различных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента были найдены формулы позволяющие определить несущую способность и осадку плитно-свайного фундамента в результате нагружения статическими и циклическими нагрузками.

Так осадку плитно-свайного фундамента при действии кратковременных статических нагрузок можно определить, рассматривая деформации линейно-деформируемого основания и дополнительные осадки, зависящие от шага свай, от деформаций ствола сваи и от действия внешней нагрузки по формуле (27), рассматривая взаимное влияние и распределение нагрузок между плитой и сваями (28), а так же с учетом возникающих усилий трения, напряжений под ростверком и по нижним концом свай.

$$s = s_{ef} + \Delta s_p + \Delta s_c \tag{27}$$

$$S_{п.с} = S_{св} + S_{пл} \tag{28}$$

$$S_c = S_1(T) = S_2(P) = S_3(R) \tag{29}$$

Осадку плитно-свайного фундамента при действии циклической нагрузки можно определить из формулы (30) с учетом особенностей достижения предела выносливости в каком-то из элементов системы «плитно-свайный фундамент – грунтовой массив», с учетом проявления деформаций виброползучести грунта и бетона сваи в стесненных условиях.

$$S(N) = S_{ef}(N) + \Delta s_p(N) + \Delta s_c(N) \tag{30}$$

Несущая способность плитно-свайного фундамента под действием циклических нагрузок определяется исходя из учета снижения усталостной прочности и увеличения деформаций циклической ползучести грунтового основания по условию ограничения развития в нем вертикальных деформаций и оценивается из условий:

$$P_{2,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (31)$$

$$P_{3,i}(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (32)$$

Также представлена методика, позволяющая определить несущую способность плитно-свайного фундамента за счет установления ее максимально допустимой осадки:

$$P_{пл} = \frac{d_1 + \sqrt{d_1^2 + \frac{4 * S_{пл} * E}{k * \gamma * \beta}}}{2} k * \gamma \quad (33)$$

Методики расчета напряженно-деформированного состояния отдельных элементов входящий в состав ПСФ в результате действия статических нагрузок с учетом того что с возрастанием величины нагрузки происходит осадка сваи за счет деформации окружающего грунта S_g , по мере увеличения нагрузки возникает дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи S_p и за счет сжатия под нижним концом сваи S_l и общая осадка выражается формулой (34).

$$S = S_p + S_l + S_g \quad (34)$$

Так же определение осадки за счет сжатия ствола сваи с учетом действия сил трения и возникающего отрицательного трения по формуле (35):

$$\Delta S_c = \Delta_p + \Delta_G + \Delta_{f,отр} - \Delta_f \quad (35)$$

4. Обсуждение

Рассмотренные методики расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента и отдельных элементов, входящих в состав ПСФ при статических и циклических нагрузках, показывают, что при расчетах рассматривалась система «фундамент – грунтовое основание». Под действием статических и циклических нагрузок были получены методики расчета рассматривающие взаимное влияние компонентов свайного поля между собой в грунтовом пространстве, влияние сопротивления, возникающего по боковой поверхности сваи и отпора грунта под подошвой сваи на значение деформации сваи, зависимости разделения нагрузки приходящиеся на ПСФ между плитным ростверком и свайным полем, развитие деформации грунтового основания и ствола сваи по мере ее нагружения вертикальной нагрузкой.

5. Заключение

На основании анализа выполненных методик расчета напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента, можно сделать следующие выводы:

1. Основное количество методик расчета напряжено-деформированного состояния ПСФ разработаны для статического нагружения с таким учетом, что данные нагружения неизменны на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения.

2. Существующие методики расчета плитно-свайного фундамента не могут учитывать напряженно-деформированное состояние, возникающее сваях, плитах, в грунте межсвайного пространства и окружающего массива грунта в результате совместной работы системы «плитный ростверк – свая – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи» в результате режимного циклического нагружения.

3. В связи с вышеизложенным назрела необходимость в разработке методики расчета несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при режимных циклических нагружениях.

Список литературы

1. Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.

2. Katzenbach R., Leppla S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and

Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.

3. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.

4. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.

5. Mirsayapov, I., Khorkov, E., Minzianov. R. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor. // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021); E3S Web Conf. V. 274. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403031.

6. Mirsayapov, I., Minzianov. R. Rebar movement in seals under static loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 890, International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2020) 29 April - 15 May 2020, Kazan, Russian Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012073.

7. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Deformation features of raft-pile foundations models under the action of cyclic loading // Socio-Technical Construction and Civil Engineering: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2021) 420043 Kazan, Russia/ – P. 1-9.

8. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Несущая способность и осадки моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении: сб. ст. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании – Международной научной конференции / МГСУ. М. 2012. С. 528–531.

9. Мирсаяпов И. Т., Шакиров М. И. Исследование влияния циклической нагрузки на модели комбинированного плитно-свайного фундамента: сб. ст. Строительство – формирование среды жизнедеятельности – XVII Международной научной конференции / МГСУ. М., 2014. С. 423–429.

10. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.

11. Фадеев А. Б., Мангушев Р. А. Расчет плитно-свайного фундамента // Вестник гражданских инженеров. 2007. №2. – С. 64-67.

12. Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Т. В. Взаимодействие свай большой длины с массивом грунта в составе плитно-свайного фундамента // Вестник МГСУ. 2012. – Т. 7, Вып.3. - С. 74-78.

13. Самородов А. В. Новая конструкция плитно-свайного фундамента. // Вестник Приднeпровской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. Вып.1 - С. 61-68.

14. Мирсаяпов И. Т., Артемьев Д. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при совместном деформировании с окружающим грунтовым массивом Вестник гражданских инженеров. 2009. №2. – С. 121-123.

15. Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Туан Вьет. Взаимодействие одиночной длинной сваи двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2012. – Т. 7, Вып.4, - С. 28-34.

16. Уткин В. С., Сушев Л. А., Соловьев С. А. Совершенствование методов расчета свайных фундаментов по осадке // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 331–339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339

17. Готман А. Л., Гавриков М. Д. Исследование особенностей работы вертикально нагруженных длинномерных буронабивных свай и их расчет // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 72–83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08

18. Готман Н. З., Алехин В. С., Сергеев Ф. В. Определение предельного сопротивления основания сваи в составе группы свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 13–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02

References

1. Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International

Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.

2. Katzenbach R., Leppla S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.

3. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.

4. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.

5. Mirsayapov, I., Khorkov, E., Minzianov. R. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor. // 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021); E3S Web Conf. V. 274. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403031.

6. Ishat Mirsayapov and Rustam Minzianov. Rebar movement in seals under static loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 890, International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2020) 29 April - 15 May 2020, Kazan, Russian Federation. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012073.

7. Mirsayapov I. T., Shakirov M. I. Deformation features of raft-pile foundations models under the action of cyclic loading // Socio-Technical Construction and Civil Engineering: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2021) 420043 Kazan, Russia/ – P. 1-9.

8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlements of models of slab-pile foundations under cyclic loading: Sat. Art. Integration, partnership and innovation in building science and education - International Scientific Conference / MGSU. M. 2012. P. 528–531.

9. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Study of the influence of cyclic load on the model of a combined slab-pile foundation: Sat. Art. Construction - the formation of the environment of life - XVII International Scientific Conference / MGSU. Moscow, 2014, P. 423–429.

10. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.

11. Fadeev A.B., Mangushev R.A. Calculation of slab-pile foundation // Bulletin of civil engineers. 2007. №. 2. – P. 64-67.

12. Ter-Martirosyan Z. G., Chin T. V. Interaction of piles of great length with a mass of soil as part of a slab-pile foundation // Vestnik MGSU. 2012. - Vol. 7, Iss. 3. - P. 74-78.

13. Samorodov A. V. New design of slab-pile foundation. // Bulletin of the Pridneprovsk State Academy of Construction and Architecture. 2016. Iss. 1 - P. 61-68.

14. Mirsayapov I. T., Artemiev D. A. Simulation of the stress-strain state of a slab-pile foundation during joint deformation with the surrounding soil mass Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2009. №. 2. – P. 121-123.

15. Ter-Martirosyan Z. G., Chin T. V. Interaction of a single long pile with a two-layer base, taking into account the compressibility of the pile shaft. Vestnik MGSU. 2012. - Vol. 7, Iss 4, - P. 28-34.

16. Utkin V. S., Sushev L. A., Soloviev S. A. Improving methods for calculating pile foundations by settlement. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. Iss. 3. P. 331–339. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.331-339

17. Gotman N. Z., Alekhin V. S., Sergeev F. V. Determination of bearing capacity of piles in the group. Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture. 2017. Vol. 8, no. 3. Pp. 13-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.02

18. Gotman A. L., Gavrikov M. D. Calculation of a large-size bored pile on a vertical load. Construction and Geotechnics. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 72-83. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.08

Информация об авторах

Илизар Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, профессор Института архитектуры и дизайна КГАСУ, г.Казань, Российская Федерация.

Email: mirsayapov1@mail.ru

Алмаз Ильгамович Гараев аспирант Института архитектуры и дизайна КГАСУ, г.Казань, Российская Федерация.

Email:almaz.garaev1997@mail.ru

Information about the authors.

Pizar T.Mirsayapov doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineerin, Kazan, Russian Federation

Email: mirsayapov1@mail.ru

Almaz I.Garaev postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineerin, Kazan, Russian Federation

Email:almaz.garaev1997@mail.ru