



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 3, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.05

УДК 624.131.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОСТВЕРКА И СВАЙ С УШИРЕНИЕМ В ЛЕНТОЧНОМ ФУНДАМЕНТЕ

А.П. Малышкин, А.В. Есипов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 28 мая 2021

Принята: 24 июля 2021

Опубликована: 30 сентября 2021

Ключевые слова:

несущая способность свай с уширением, ленточный фундамент, ростверк, распределение нагрузки, модель Фламана, модель Буссинеска, решение Мелана.

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является постановка и решение задачи распределения внешней нагрузки между сваями с уширением и низким ростверком в составе ленточного фундамента в плоской постановке и сравнение полученных результатов с данными экспериментов. В качестве исходных расчетных моделей приняты расчетная модель Фламана (плоская задача) и Буссинеска (пространственная задача) о силе, приложенной на поверхности, и решение Мелана о силе, приложенной внутри грунтового полупространства. В результате решения поставленной задачи предложен аналитический метод расчета, который с достаточной для практических целей точностью позволяет определить несущую способность фундамента на сваях с уширением и оценить распределение нагрузки между сваями и ростверком в составе ленточного фундамента. Предложенный подход к решению задачи о распределении нагрузки между ростверком и сваями с уширением имеет важное значение для проектирования ленточных фундамента.

© ПНИПУ

© Малышкин Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru.

Есипов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru.

Aleksandr P. Malyskhin – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: a.petrovich.m@yandex.ru.

Andrei V. Esipov – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sibstroy.2012@yandex.ru.

INVESTIGATION OF THE INTERACTION OF GRILLAGE AND PILES WITH WIDENING IN THE STRIP FOUNDATION

A.P. Malyshkin, A.V. Esipov

Tyumen industrial university, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 May 2021

Accepted: 24 July 2021

Published: 30 September 2021

Keywords:

bearing capacity of pile with widening, strip foundation, grillage, load distribution, Flaman's model, Boussinesq's model, Melan's solution.

ABSTRACT

The research goal is to formulate and solve the problem of distributing the external load between piles with widening and a low grillage as part of a strip foundation in a flat setting and comparing the results obtained with experimental data. The design model of Flaman (the plane problem) and Boussinesq (the spatial problem) about the force applied on the surface and Melan's solution about the force applied inside the soil half-space are taken as the initial design models. An analytical calculation method was proposed, as a result of solving the problem. This method, with sufficient accuracy for practical purposes, allows to define the bearing capacity of the foundation on piles with widening and to estimate the distribution of the load between the piles and the grillage as part of the strip foundation. The proposed approach to solving the problem of load distribution between the grillage and piles with widening is important for design of strip foundations.

© PNRPU

Введение

Проведенные авторами полевые эксперименты [1, 2] по определению несущей способности фундаментов с низким ростверком на сваях с уширением позволяют сделать вывод о том, что несущая способность фундамента с низким ростверком на 40 % выше, чем у фундамента с высоким ростверком [3, 4]. Кроме того, анализ данных выполненных испытаний, показывает, что зависимость «нагрузка – осадка» у фундамента с низким ростверком имеет более гладкие очертания с менее выраженным срывом фундамента. В связи с этим, очевидно, проектировать ленточные фундаменты на сваях с уширением и низким ростверком по II группе предельных состояний более целесообразно.

Экспериментальные исследования работы свай с уширением различной конструкции [5, 6] показывают незначительное сопротивление свай по боковой поверхности и возможность передачи нагрузки на более глубокие слои основания без вовлечения грунта около-свайного пространства под ростверком в воронку оседания, что позволяет наиболее полно использовать несущую способность низкого ростверка.

Постановка и решение задачи

Для решения теоретической задачи распределения нагрузки между ростверком и сваями в составе ленточного фундамента приняты следующие положения:

- 1) грунт считается линейно деформируемым телом;
- 2) нагрузка на основание передается по подошве ростверка и в плоскости нижних концов свай;
- 3) расстояние между сваями в составе ленточного фундамента $10 \div 12$ диаметров ствола, или $2,5 \div 4$ диаметра уширения [7, 8].

Предполагается, что взаимное влияние ростверка и свай минимально, силами трения по стволу свай, как указано выше, можно пренебречь, напряженно-деформированное состояние основания определяется действием нормальных сил [9–11]. Расчетная схема лен-

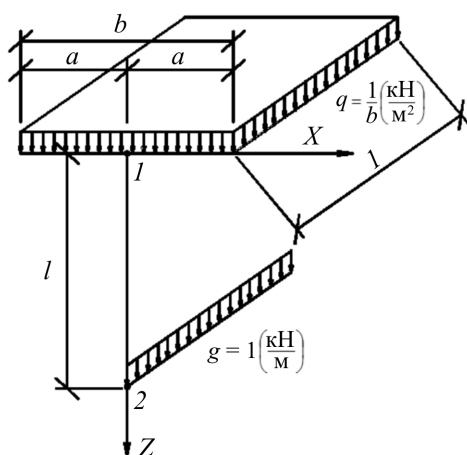


Рис. 1. Расчетная схема ленточного фундамента на сваях с уширением в двумерной постановке: b – ширина ростверка, l – длина свай
 Fig. 1. Design diagram of a strip foundation on piles with widening in a two-dimensional setting: b – width grillage, l – pile length

точного фундамента на сваях с уширением в двумерной постановке представлена на рис 1.

Общая нагрузка на фундамент воспринимается сваями и ростверком:

$$F = F_1 + F_2, \quad (1)$$

где F – полная нагрузка на фундамент; F_1 – нагрузка, приходящаяся на сваи; F_2 – нагрузка, приходящаяся на подошву ростверка.

В связи с тем что деформации ствола сваи по сравнению с осадками фундамента пренебрежимо малы, будем считать, что осадки ростверка и пяты сваи одинаковы. Поэтому будут справедливы выражения:

$$S = W_{11} + W_{12}, \quad (2)$$

$$S = W_{21} + W_{22}, \quad (3)$$

где S – осадка фундамента.

$$W_{11} = \delta_{11} \cdot F_1, \quad (4)$$

где δ_{11} – перемещение грунта основания в точке под ростверком от единичной силы в той же точке.

$$W_{22} = \delta_{22} \cdot F_2, \quad (5)$$

где δ_{22} – перемещение грунта основания в точке под пятой сваи от единичной силы в той же точке.

$$W_{12} = \delta_{12} \cdot F_2, \quad (6)$$

где δ_{12} – перемещение грунта основания в точке I (под ростверком) от единичной силы в точке 2 (под пятой сваи).

$$W_{21} = \delta_{21} \cdot F_1, \quad (7)$$

где δ_{21} – перемещение грунта основания в точке 2 (под пятой сваи) от единичной силы в точке I (под ростверком).

Согласно теореме о взаимности работ «работа сил первого состояния на перемещениях по их направлениям, вызванных силами второго состояния, равна работе сил второго состояния на перемещениях по их направлениям, вызванных силами первого состояния», при $F_1 = F_2 = 1$:

$$\delta_{21} = \delta_{12}. \quad (8)$$

В таблице приведены компоненты перемещений от единичных сил в зависимости от постановки задачи и приняты следующие обозначения:

H – толщина сжимаемой толщи грунта;

L – длина свай с учетом половины высоты уширения;

A_1 – площадь ростверка;

E_1 – модуль деформации грунта под ростверком;

A_2 – расчетная площадь горизонтальной проекции уширения сваи;

E_2 – природный модуль деформации грунта под пятой сваи;

μ – коэффициент Пуассона;
 q – единичная нагрузка от ростверка;
 a – половина ширины ростверка;
 x – координата точки под ростверком, в которой определяется перемещение.

Компоненты перемещений при различных постановках задачи

Displacement components for different problem statements

| Перемещение | Осесимметричная задача | Плоская задача |
|---------------|---|--|
| δ_{11} | $\delta_{11} = \frac{H+L}{2A_1E_1}$ | Решение Фламана [13] $\delta_{11} = \frac{2q}{\pi} \cdot \frac{1-\mu^2}{E_1} \cdot \left(2a + \ln \frac{ x-a ^{x-a}}{ x+a ^{x+a}} \right)$ |
| δ_{22} | $\delta_{22} = \frac{H}{2A_2E_2}$ | Решение Мелана [14] * |
| δ_{21} | Решение Буссинеска [12] $\delta_{21} = \frac{(1+\mu)(1+2(1-\mu))}{2\pi E_1 L}$ | Решение Фламана [13] $\delta_{21} = \frac{1-\mu^2}{\pi E_1} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) \right)$ |

Примечание: * – решение Мелана:

$$\delta_{22} = \frac{1}{\pi E_1} \left\{ \frac{1}{2} (1 + \mu_1) \left[\frac{x^2}{2r_1^2} + \ln r_1 r_2 + \frac{x^2 - 4dz - 2d^2}{2r_2^2} + \frac{2dzx^2}{r_2^4} \right] + \frac{1}{4} (1 - \mu_1) \left[\ln r_1 + 3 \ln r_2 + \frac{2(x^2 + dz + d^2)}{r_2^2} \right] + \frac{\mu_1}{2} (1 + \mu_1) \left[\frac{x^2}{2r_1^2} + \frac{x^2 + 2d^2}{2r_2^2} + \frac{2dzx^2}{r_2^4} \right] - \frac{\mu_1}{4} (1 - \mu_1) \left[\ln \frac{r_2}{r_1} - 2 \frac{d(z+d) + x^2}{r_2^2} \right] \right\}.$$

Схема к расчету перемещений по решению Мелана приведена на рис. 2.

Результаты и их обсуждение

Учитывая вышеизложенное и задаваясь предельной осадкой S , получим выражения для нагрузки, воспринимаемой сваями и ростверком:

$$F_1 = \frac{S \cdot \left(1 - \frac{\delta_{22}}{\delta_{12}} \right)}{\delta_{21} - \frac{\delta_{22}}{\delta_{12}} \cdot \delta_{11}}; \tag{9}$$

$$F_2 = \frac{S - \delta_{11} \cdot F_1}{\delta_{12}}. \tag{10}$$

Общая несущая способность фундамента в зависимости от предельной осадки S равна:

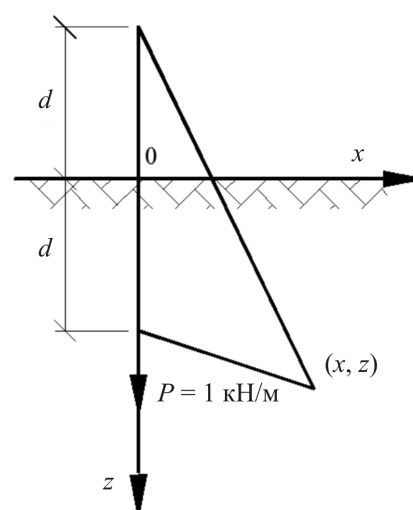


Рис. 2. Схема к расчету вертикальных перемещений по решению Мелана
 Fig. 2. Scheme for calculating vertical displacements according to Melan's solution

$$F = F_1 + \frac{S - \delta_{11} \cdot F_1}{\delta_{12}} \quad (11)$$

Данное аналитическое выражение учитывает взаимное влияние работы ростверка и свай с уширением в ленточном однорядном фундаменте.

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные графики зависимости «нагрузка – осадка» для ленточного фундамента на сваях с уширением в целом и для ростверка и свай по отдельности. На диаграмме видно, что данный способ расчета свайного фундамента с низким ростверком хорошо отражает характер взаимовлияния элементов фундамента на осадках до 10÷20 мм. При этом расхождение расчетных и экспериментальных графиков составляет на осадке 10 мм: у ростверка – 27 %, у свай – 1 %, у фундамента в целом – 3 %; на осадке 20 мм: у ростверка – 10 %, у свай – 45 %, у фундамента в целом – 40 %.

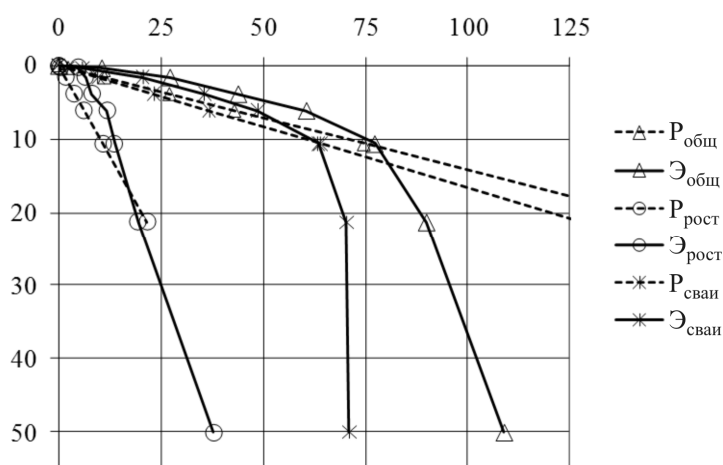


Рис. 3. Расчетные (P) и экспериментальные (Э) графики зависимости «нагрузка – осадка» для фундамента в целом и для ростверка и свай по отдельности

Fig. 3. Calculated (P) and experimental (E) graphs of the “load – settlement” dependence for the foundation as a whole and for the grillage and piles separately

Выводы

Таким образом, предложенный аналитический метод расчета, даже без учета горизонтальных перемещений грунта основания [15], с достаточной для практических целей точностью позволяет определить как несущую способность фундамента на сваях с уширением и распределение внешней нагрузки между отдельными элементами фундамента (сваями и ростверком) с учетом взаимного влияния всех входящих в него компонентов. Для более полного и точного описания работы фундамента на сваях с уширением с низким ростверком необходимо учитывать нелинейность зависимости «нагрузка – осадка» при помощи учета пластических свойств грунтов.

Библиографический список

1. Малышкин А.П. Экспериментальные исследования работы лопастных свай в водонасыщенных суглинках // Основания и фундаменты: межвузовский сборник научных трудов. – Пермь: ППИ, 1990. – С. 46–53.

2. Есипов А.В. Экспериментальные исследования несущей способности ленточных фундаментов на микросваях // *Строительство и реконструкция деревянных жилых домов: сборник трудов международной научно-технической конференции.* – Архангельск, 2002. – С. 60–64.

3. Яблочков В.Д. К вопросу об учете работы низкого ростверка в расчетах свайных фундаментов на коротких забивных висячих сваях // *Сборник трудов Пермского политехнического института.* – 1964. – № 16.

4. Тер-Ованесов Г.С. Совместная работа ростверка, свай и грунта в висячих свайных фундаментах. – М.: МИСИ, 1953.

5. Кондрашов В.А. Натуральные испытания свайных фундаментов с низким ростверком // *Основания, фундаменты и механика грунтов: материалы III Всесоюзного совещания.* – Киев: Будивельник, 1971. – С. 331–335.

6. Бойко И.П., Фундаменты из забивных свай с уширенной пятой // *Основания и фундаменты.* – Киев: Будивельник, 1972. – Вып. 5. – С. 12–15.

7. Малышкин А.П., Есипов А.В. Инженерный метод расчета фундаментов на микросваях по заданным осадкам // *Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции.* – Пенза, 2002. – С. 136–138.

8. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов / под ред. А.А. Бартоломея. – М.: Стройиздат, 1994.

9. Koizumi Y., Ito K. Field-tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations // *Soil and Foundation.* – Tokyo, 1967. – Vol. VII, № 3.

10. Fellenius В.Н. Basics of foundation design. January 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://download.unisoftgs.com/RedBook.pdf/> (дата обращения: 12.03.2021).

11. Al – Agha Ahmed S. Basics of Foundation Engineering with Solved Problems. – September. – 2015 [Электронный ресурс]. – URL: <http://site.iugaza.edu.ps/iabuzuhri/files/2015/09/Basics-of-Foundation-Engineering-with-Solved-Problems.pdf> (дата обращения: 12.03.2021).

12. Boussinesq Y. Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement de solides elastiques Application of Potentials to the Study of the Solids Equilibrium and Motion. – Paris, 1885.

13. Флорин В.А. Основы механики грунтов. – М.: Стройиздат, 1959. – Т. 1.

14. Melan E. Ein Beitrag zur Theorie geschweißter Verbindungen // *Ingr. Arch.* – 1932. – Bd. 3, № 2. – P. 123–129.

15. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Лузин И.Н. Прогноз осадок фундаментов с учетом горизонтальных перемещений грунтов основания // *Вестник МГСУ.* – 2017. – Т. 12, вып. 8 (107). – С. 832–838. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.832-838.

References

1. Malyshkin A.P Experimental studies of the operation of paddle piles in water-saturated loams. *Osnovaniya i fundamenty/: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov.* Perm, Permskii Politechnicheskii Institut, 1990, pp. 46–53.

2. Esipov A.V. Experimental studies of the bearing capacity of strip foundations on micropiles. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya derevyannykh zhilykh domov. Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii,* Arkhangel'sk, 2002, pp. 60–64.

3. Yablochkov V.D. On the issue of taking into account the work of a low grillage in the calculation of pile foundations on short driven suspended piles. *Sbornik trudov Permskogo politekhnicheskogo instituta*, 1964, no. 16.

4. Ter-Ovanesov G.S. Join work of grillage, piles and soil in hanging pile foundations. MISI, 1953.

5. Kondrashov V.A. Natural tests of pile foundations with a low grillage: *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov: Materialy III Vsesoyuznogo sobraniya*. Kiyev, Budivel'nik, 1971, pp. 331–335.

6. Boyko I.P. Driven pile foundations with widened heel. *Osnovaniya i fundamenty*. 1972, iss. 5. Kiyev, Budivel'nik, pp. 12–15.

7. Malyshkin A.P., Esipov A.V. An engineering method for calculating foundations on micropiles for specified settlements. *Problemy stroitel'stva, inzhenernogo obespecheniya i ekologii gorodov. Sbornik materialov IV nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Penza, 2002, pp. 136–138.

8. Bartolomey A.A., Omel'chak I.M., Yushkov B.S. Forecast of settlement of pile foundations. Moscow, Stroyizdat, 1994.

9. Koizumi Y., Ito K. Field-tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations. *Soil and Foundation*, 1967, vol. VII, no. 3.

10. Fellenius B.H. Basics of foundation design. January 2021, available at: <https://download.unisoftgs.com/RedBook.pdf/> (accesse 12 Marc 2021).

11. Ahmed S. Al-Agha. Basics of Foundation Engineering with Solved Problems. September 2015, available at: <http://site.iugaza.edu.ps/iabuzuhri/files/2015/09/Basics-of-Foundation-Engineering-with-Solved-Problems.pdf> (accesse 12 Marc 2021).

12. Boussinesq Y. Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement de solides elastiques [Application of Potentials to the Study of the Solids Equilibrium and Motion]. Paris, 1885.

13. Florin V.A. Fundamentals of Soil Mechanics. Moscow, Stroyizdat, 1959, vol. 1.

14. Melan E. Ein Beitrag zur Theorie geschweißter Verbindungen. *Ingr. Arch.*, 1932, bd. 3, no. 2, pp. 123–129.

15. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Luzin I.N. Forecast of foundation settlement taking into account horizontal displacements of foundation soils. *Vestnik MGSU*, 2017, vol. 12, no. 8 (107), pp. 832–838. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.832-838).