

УДК 624.154

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-3-229-236

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Расчет вертикальной жесткости фундамента с учетом взаимного влияния свай

А.О. Колесников<sup>1</sup>, Т.Н. Костюк<sup>1</sup>, В.Н. Попов<sup>2</sup><sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Российская Федерация, 630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН, Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

### Ключевые слова:

фундамент под машину;  
взаимное влияние свай в группе;  
волновая модель;  
собственная частота колебаний  
свайного фундамента

### Аннотация

**Цели.** В статье описаны исследования по определению влияния расстояния между сваями в кусте при вертикальных колебаниях фундаментов на величину динамической жесткости и сравниваются результаты, полученные при натуральных испытаниях, в рамках волновой модели и согласно СП 26.13330.2012.

**Методы.** Рассчитаны собственные частоты колебаний фундаментов из девяти свай диаметром  $d$  с высоким ростверком в зависимости от расстояний между сваями –  $2d$ ,  $3d$  и  $5d$ . Полученные результаты сравнены с данными, полученными после серии импульсных динамических нагружений, выполненных в полунатурных условиях на моделях фундаментов. Значения скоростей поперечных волн определены непосредственно на опытном полигоне по результатам измерений.

**Результаты.** Установлено, что увеличение расстояния между сваями в кусте приводит к повышению частот собственных колебаний свайных фундаментов. При изменении расстояния между сваями с  $2d$  до  $5d$  при вертикальных колебаниях фундаментов частота возрастает в 1,32 раза. Показано преимущество результатов расчетов в рамках волновой модели по сравнению с методом из СП 26.13330.2012 и их высокое совпадение с величинами, полученными в ходе экспериментов, что позволяет достоверно определять амплитудно-частотные характеристики фундаментов. Показатели, определяемые согласно СП 26.13330.2012, имеют значительно более низкие значения частот собственных колебаний с максимальным расхождением с экспериментальными данными в 2,7 раза и не в полной мере отражают изменение расстояния между сваями.

### История статьи:

Поступила в редакцию: 14 апреля 2019 г.

Доработана: 30 мая 2019 г.

Принята к публикации: 10 июня 2019 г.

### Для цитирования

Колесников А.О., Костюк Т.Н., Попов В.Н. Расчет вертикальной жесткости фундамента с учетом взаимного влияния свай // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 229–236. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-229-236>

## Введение

В настоящее время при оценке характеристик колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками существуют требования к точности получаемых результатов [1]. Ди-

намический отклик системы «машина – фундамент – грунт» определяется ее собственной частотой и амплитудой колебаний при нормальных условиях работы машины, являющимися двумя наиболее важными параметрами, которые необходимо определить при проектировании фундамента. Если для увеличения собственной частоты и уменьшения амплитуды колебаний фундамента требуется использование свай, то для такого расчета необходимо определение жесткости и демпфирования свайного основания с использованием теории колебаний.

Сваи почти всегда используются в виде кустов или групп, и эффект их взаимодействия существенно влияет на динамические характеристики фун-

<sup>1</sup> Колесников Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерной геологии, оснований и фундаментов, eLIBRARY SPIN-код: 1225-7017, ORCID iD: 0000-0002-3627-5888, AuthorID: 150161, [ao\\_kolesnikov@mail.ru](mailto:ao_kolesnikov@mail.ru)

<sup>2</sup> Костюк Татьяна Николаевна, магистрант, кафедра инженерной геологии, оснований и фундаментов, eLIBRARY SPIN-код: 5302-2974, ORCID iD: 0000-0001-5605-7944, AuthorID: 1029998.

<sup>3</sup> Попов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, eLIBRARY SPIN-код: 9483-9689, ORCID iD: 0000-0002-6043-2134, AuthorID: 14977.

© Колесников А.О., Костюк Т.Н., Попов В.Н., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

даментов. Взаимодействие свайного фундамента с окружающим грунтом представляет собой одну из наименее изученных задач динамики фундаментов [2]. Дальнейшее усложнение этой задачи происходит от взаимодействия между сваями в группе. Если расстояние между сваями очень велико, жесткость группы может быть оценена просто путем суммирования жесткостей от одиночных свай. Сваи, находящиеся на близком расстоянии друг от друга, будут оказывать значительное взаимное влияние при динамическом нагружении за счет волны, распространяющейся по грунту от каждой сваи. В результате групповой эффект при динамическом возбуждении может сильно меняться, а отсутствие оценки взаимодействия свая – грунт – свая может сделать результат расчета свайного фундамента абсолютно неточным [3].

Концепция взаимодействия между сваями была введена в [4]. В [5] в решении для группы свай указано, что при близком расстоянии свай смещение одной сваи увеличивается за счет смещения всех других свай, а жесткость и демпфирование группы уменьшаются. В отсутствие аналитического решения для динамического взаимодействия свай, было предположено, что факторы взаимодействия могут быть определены из статического решения [4]. Однако, в стандарте Американского института бетона [6] указано, что динамический групповой эффект значительно отличается от статического группового эффекта, а групповая динамическая жесткость и демпфирование могут быть уменьшены или увеличены взаимодействием системы свая – грунт – свая.

Точное теоретическое решение динамического взаимодействия сваи с грунтом затруднено, поэтому используются различные приближенные методы [5; 7–13]. Однако существует несколько достоверных подтверждений предлагаемых методов результатами динамических испытаний как на маломасштабных группах свай [5; 14–17], так и на группах полномасштабных свай [18; 19], поэтому дальнейшие исследования являются актуальными и полезными.

В [13; 20] была рассмотрена математическая модель и ее решения, описывающие динамическое взаимодействие сваи с грунтом при вертикальном сдвиге в зависимости от ее расположения в составе свайной группы. Из представленных результатов следует, что динамическая жесткость при взаимодействии боковой поверхности сваи с грунтом может изменяться более чем на 20 % в зависимости от ее расположения в группе и расстояния до соседних свай. Однако какого-либо экспериментального подтверждения полученных результатов не приводится.

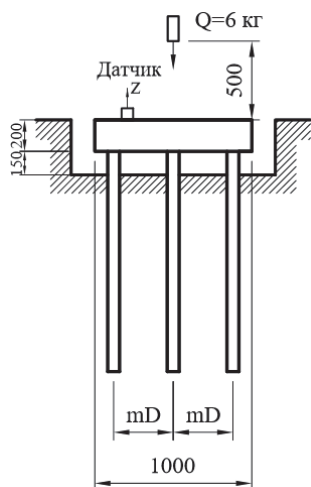
Несмотря на расширяющееся распространение компьютерных технологий с привлечением больших пакетов программ при оценке характеристик колебаний свайных фундаментов, на практике при инженерных расчетах желательнее получать надежные результаты с использованием простых выражений [21]. В связи с этим целью настоящего исследования является изучение динамического поведения группы свай при вертикальном возбуждении и проверка достоверности модели, рассмотренной в [13; 20], для описания взаимодействия висячих свай в кусте с учетом их взаимного расположения. Для решения поставленной задачи проведено комплексное исследование (с применением теоретического анализа), включающее определение собственных частот при вертикальных колебаниях свайных фундаментов в ходе экспериментов на опытном полигоне. Испытания проводились на модельных группах свай 2×2, представляющих собой стальные трубы, что снижало величину сопротивления грунта под их нижним концом и позволяло более точно оценивать жесткость боковой поверхности вертикальному сдвигу. Экспериментально определены собственные частоты фундаментов для различных расстояний между сваями. Полученные результаты сравнивались с теоретическими решениями.

## 1. Методика исследований

С целью оценки взаимовлияния свай в ростверке на собственные частоты при вертикальных колебаниях фундаментов были проведены экспериментальные исследования, схема которых представлена на рис. 1. Испытывались три специально изготовленных свайных фундамента с высоким ростверком с различными вариантами расстояний между девятью сваями в кусте: фундамент Ф-1 – расстояние между сваями 2 диаметра, фундамент Ф-2 – расстояние между сваями 3 диаметра, фундамент Ф-3 – расстояние между сваями 5 диаметров.

Все опытные фундаменты Ф-1, Ф-2, Ф-3 были выполнены в виде монолитного железобетонного ростверка с габаритными размерами 1,0×1,0 м и толщиной 20 см, опирающегося на девять жестко закрепленных свай диаметром  $d = 76$  мм с рабочей длиной 1,4 м, изготовленных из металлических труб с толщиной стенки 3,5 мм. Опалубкой при бетонировании опытных фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3 служили выровненные стенки котлована. Грунт опытного полигона до глубины 9,3 м состоял из лесовидной маловлажной твердой супеси с плотностью  $\rho = 1,70$  т/м<sup>3</sup> и модулем деформации  $E = 14$  МПа, подстилаемой полутвердыми суглинками. Грун-

товые воды на площадке отсутствовали. Масса каждого из фундаментов равнялась 690 кг.



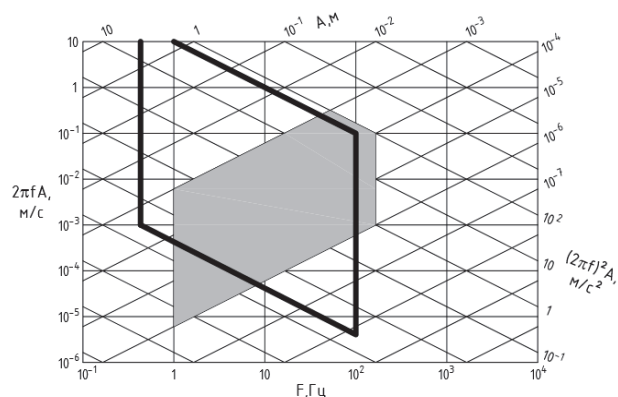
**Рис. 1. Схема экспериментальных исследований опытных фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3:**  
*m* – количество диаметров свай *d*  
**[Figure 1. Scheme of testing foundations F-1, F-2, F-3 experimental researches:**  
*m* – quantity of pile diameters *d*]

По одинаковой методике на каждом фундаменте Ф-1, Ф-2, Ф-3 выполнялись серии импульсных вертикальных динамических нагружений (по 20 раз). Импульсное нагружение производилось стальным грузом, имеющим форму параллелепипеда массой 6 кг, который свободно падал на поверхность каждого испытуемого фундамента с высоты 0,5 м.

Для определения собственных частот колебаний использовалась аппаратура АВМ-1, включающая пять трехкоординатных датчиков виброакселерометров марки Analog Devices, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер, позволяющая регистрировать колебания и одновременно обрабатывать получаемую информацию.

Вибродатчик представлял собой металлический куб с установленными внутри интегральными двухканальными акселерометрами, имеющий возможность закрепления на верхней грани фундамента. Основные характеристики виброакселерометра следующие: измерительный диапазон  $\pm 5g$ , спектральная плотность шума  $250 \mu g/\sqrt{Hz}$  rms. Датчики подключались к АЦП с помощью соединительных кабелей. В качестве АЦП использовался внешний модуль L-CARD E14-140. Диапазон измерений применяемой аппаратуры представлен на рис. 2.

Данные измерений для каждого из фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3 сравнивались с результатами расчетов, полученных при использовании аналитических выражений, предложенных в [1; 13; 20].



**Рис. 2. Диапазон измерений применяемой аппаратуры:**  
 ■ – область измеряемых параметров; ■ – виброметр АВМ-1  
**[Figure 2. Measuring range of the vibration equipment:**  
 ■ – area of measuring parameters; ■ – vibrometer АВМ-1]

Собственные частоты колебаний фундаментов  $\lambda_z$  при вертикальных колебаниях фундаментов определяются согласно

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{K_z}{m}},$$

где  $K_z$  – вертикальная жесткость фундамента;  $m$  – масса всей установки.

Вертикальная жесткость незаглубленных опытных фундаментов определяется суммированием жесткостей каждой из девяти свай в основании с учетом их волнового взаимодействия в зависимости от расстояния между их осями:

$$K_z = \alpha^{-1} \sum_{i=1}^I K_{zi}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент взаимного влияния свай;  $K_z$  – вертикальная жесткость одиночной сваи,  $I = 9$ .

Коэффициент взаимного влияния свай  $\alpha$  определяется по формуле

$$\alpha = \frac{S_{w10}}{S_{w1j}}, \quad (2)$$

где  $S_{w10}$  – коэффициент жесткости одиночной сваи без учета взаимного влияния;  $\bar{S}_{w1j}$  – среднее значение коэффициента жесткости свай в кусте.

Коэффициент жесткости одиночной сваи без учета взаимного влияния определяется согласно [12] по формуле

$$S_{w10}(a_0) = 2\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)}.$$

Среднее значение коэффициента жесткости свай в кусте, согласно [13; 20], связано с безразмерной

частотой колебаний  $a_0$  и расположением свай в ростверке.

Например, для рассматриваемого в данной работе фундамента из девяти свай  $\bar{S}_{w1j}$  определяется исходя из схемы расположения свай (рис. 3) по формуле

$$\bar{S}_{w1j} = \frac{4S_{w14}(a_0) + 4S_{w15}(a_0) + S_{w13}(a_0)}{9},$$

$$S_{w13}(a_0) = 2\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} - \frac{3}{2}\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(ma_0) + Y_0(a_0)Y_1(ma_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} C,$$

$$S_{w14}(a_0) = 2\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} - \frac{5}{4}\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(ma_0) + Y_0(a_0)Y_1(ma_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} C,$$

$$S_{w15}(a_0) = 2\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} - \frac{7}{8}\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(ma_0) + Y_0(a_0)Y_1(ma_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} C,$$

$$C = \frac{\sum_{n=1}^N J_{2n-1}(a_0)[Y_{2n-2}(a_0) - Y_{2n}(a_0)] - Y_{2n-1}(a_0)[J_{2n-2}(a_0) - J_{2n}(a_0)]}{\sum_{n=1}^N J_{2n-1}(a_0)[Y_{2n-2}(ma_0) - Y_{2n}(ma_0)] - Y_{2n-1}(a_0)[J_{2n-2}(ma_0) - J_{2n}(ma_0)]},$$

где  $a_0 = \omega r_0 / V_s$ ;  $\omega$  – угловая частота колебаний;  $V_s$  – скорость поперечных волн в грунте;  $m$  – количество диаметров свай между их осями;  $J_n, Y_n$  – функции Бесселя первого и второго рода,  $N = 2$ .

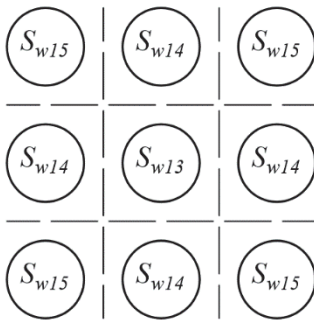


Рис. 3. Схема коэффициентов жесткости опытного свайного фундамента  
[Figure 3. Scheme of stiffness ratios of the trial pile foundation]

Вертикальная жесткость одиночной сваи  $K_{zi}$  определяется согласно [22] по формуле

$$K_{zi} = \frac{E_p A_p}{r_p} f_{18,1},$$

в которой  $E_p = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости материала сваи;  $A_p$  – площадь поперечного сече-

ния металлической сваи-трубы;  $r_p$  – внешний радиус сваи;  $f_{18,1}$  – коэффициент, определяемый по табл. 1, согласно [23], зависящий от соотношений  $L / r_p$  и  $E_p / G$ , где  $L$  – длина сваи,  $G = V_s^2 \rho$  – модуль сдвига грунта,  $\rho$  – плотность грунта, который прорезает свая.

Таблица 1

Коэффициенты вертикальной жесткости  $f_{18,1}$  для висячих свай

[Table 1. Vertical stiffness coefficients  $f_{18,1}$  for friction piles]

$E_p / G$	$L / r_p$				
	10 000	2500	1000	500	250
10,8696	0,0021	0,0052	0,0104	0,0187	0,0332
21,7391	0,0031	0,0083	0,0166	0,0301	0,0509
32,6087	0,0042	0,0104	0,0218	0,0364	0,0571
43,4783	0,0042	0,0125	0,0260	0,0405	0,0582
46,7391	0,0052	0,0135	0,0270	0,0416	0,0582
54,3478	0,0052	0,0145	0,0281	0,0416	0,0582
65,2174	0,0062	0,0166	0,0291	0,0416	0,0582
76,0870	0,0062	0,0177	0,0301	0,0416	0,0582
86,9565	0,0073	0,0187	0,0301	0,0416	0,0582
100,0000	0,0083	0,0197	0,0301	0,0416	0,0582

## 2. Результаты исследований

Результаты измерений и расчетов частот собственных колебаний фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3

приведены в табл. 2 и 3 соответственно. Для каждого испытуемого фундамента производилась регистрация частот собственных колебаний и одновременный расчет по формулам (1), (2) и согласно [1] для различных вариантов размещения свай в ростверке  $m = 2, 3, 5$ .

Необходимо отметить, что при расчетах использовались значения скоростей поперечных волн  $V_s$ , определенных непосредственно на опытном полигоне согласно методу, описанному в [22]. Были использованы две погруженные в грунт на расстоянии 2 м друг от друга металлические сваи «источник» и «приемник» диаметром 76 мм и длиной 1500 мм, имеющие на верхних торцах металлические пластины с закрепленными трехкоординатными вибродатчиками. При вертикальном ударе по свае-источнику регистрировались импульсы на ней и на свае-приемнике. По времени прохождения импульса между сваями высчитывалась скорость поперечных волн в грунте. Значение скорости поперечных волн для грунта опытного полигона составило  $V_s = 146$  м/с.

Таблица 2

Частоты собственных колебаний фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3 [Table 2. Natural frequencies of the foundations F-1, F-2, F-3]

Фундамент [Foundation]	Измеренная частота, Гц [Measured frequency, Hz]	Расчетная частота, Гц [Calculated frequency, Hz]	
		СП 26.13330.2012 [SP 26.13330.2012]	Формулы (1), (2) [Formulas (1), (2)]
Ф-1 [F-1]	76,90	29,39	89,22
Ф-2 [F-2]	91,02	33,73	96,80
Ф-3 [F-3]	101,69	41,15	100,13

Таблица 3

Коэффициенты взаимного влияния свай фундаментов Ф-1, Ф-2, Ф-3 [Table 3. Coefficients of the piles mutual influence of foundations F-1, F-2, F-3]

Фундамент [Foundation]	Измеренный коэффициент, $\alpha$ [Measured coefficient, $\alpha$ ]	Расчетный коэффициент, $\alpha$ [Calculated coefficient, $\alpha$ ]	
		СП 26.13330.2012 [SP 26.13330.2012]	Формула (2) [Formula (2)]
Ф-1 [F-1]	1,32	1,41	1,30
Ф-2 [F-2]	1,11	1,22	1,10
Ф-3 [F-3]	1,00	1,00	1,03

Из результатов экспериментов, проведенных на опытном полигоне, следует, что уменьшение расстояния между сваями в ростверке приводит к понижению частот собственных вертикальных колебаний свайных фундаментов и коэффициента взаимовлияния (рис. 4). Уменьшение расстояния между сваями в кусте с 5 диаметров до 2 способствует

уменьшению частот вертикальных колебаний в 1,32 раза, при этом коэффициент взаимного влияния увеличивается от своего самого минимального значения, равного 1,00, до 1,32. Можно отметить, что увеличение расстояния между сваями с 2 до 3 диаметров более значительно влияет на увеличение частот собственных колебаний и коэффициента взаимного влияния и составляет около 19 % в обоих случаях. Дальнейшее увеличение расстояния между сваями приводит к менее существенному увеличению частоты собственных вертикальных колебаний и коэффициента взаимного влияния свай и равняется 11 %.

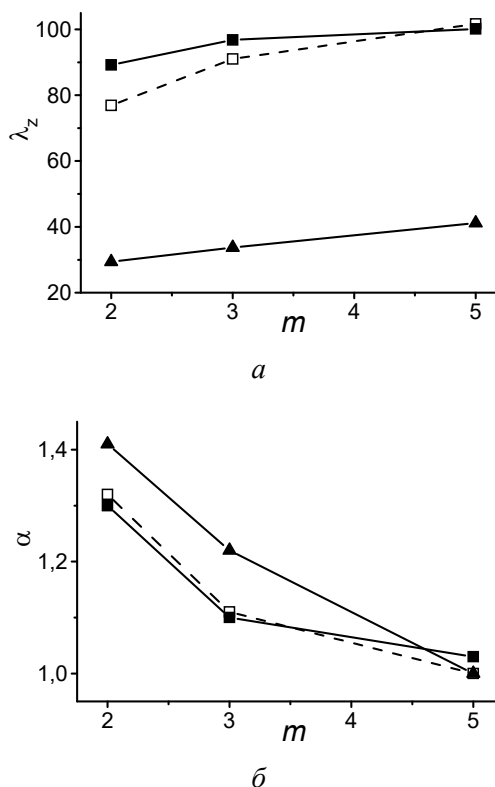


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты  $\lambda_z$  (а) и коэффициента взаимного влияния  $\alpha$  (б) от расстояния между сваями  $m$ : итриховые линии – данные измерений авторов (□); сплошные линии – результаты расчетов по формулам (1) и (2) (■) и согласно СП 26.13330.2012 (▲) [Figure 4. Correlation of the resonant frequency  $\lambda_z$  (a) and the piles mutual ratio  $\alpha$  (b) from the distance between piles  $m$ : dashed lines – the results of measurements of the authors (□); solid lines – the results of calculations according to formulas (1) and (2) (■) and SP 26.13330.2012 (▲)]

Приведенные в табл. 2 и 3 результаты, полученные согласно [1], демонстрируют значительно более низкие (в 2 раза) значения рассчитанных частот собственных колебаний в сравнении с данными опытных замеров. Однако полученные в результате расчетов значения коэффициентов взаимного влияния

практически полностью совпадают с опытными данными. Из чего следует, что эффект взаимного влияния свай в кусте согласно выражениям [1] для определения жесткости свайных фундаментов учитывается достаточно полно, но существуют некоторые проблемы при определении жесткости.

В табл. 2, 3 и на рис. 4 отображены результаты проведения инженерных расчетов с использованием формулы (2) для определения жесткостей свайных фундаментов с различным расстоянием между сваями – случаи расположения  $2d$ ,  $3d$ ,  $5d$ . При вычислении частот собственных колебаний свайных фундаментов с различным размещением свай в ростверке (рис. 3) коэффициенты  $S_{w1j}$  для разных случаев размещения свай в группе ( $j=3, 4, 5$ ) определялись согласно [20]. Представленные значения частот подтверждают, что расчеты в рамках используемых приближений позволяют получить хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Рассматривая результаты, полученные с использованием формулы (1), различие с опытными данными оценивается от 2 до 16 %. Большая величина расхождения зафиксирована при расстоянии между сваями  $m = 2$  для фундамента Ф-1 как следствие неточности изготовления опытного ростверка в полевых условиях. Из оценки результатов, полученных с использованием формулы (2), следует, что различий с опытными данными практически не существует, разброс для случаев при  $m = 2, 3, 5$  составляет от 1 до 3 %.

### Выводы

Исследование показало, что соотношения (1) и (2), учитывающие взаимное влияние свай в кусте, полученные в рамках волновой модели и применяемые для расчета динамических жесткостей при рассмотрении вертикальных колебаний свайных фундаментов, дают более точные результаты при определении резонансных частот по сравнению с методом, предложенным в [1], что подтверждается сравнением результатов с данными экспериментальных исследований, выполненных в полунатурных условиях. Частоты колебаний, найденные с использованием рассмотренных формул, показывают лучшее приближение к частотам, определенным опытным путем, по сравнению с существующими методами действующих норм.

### Список литературы

1. СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05–87. Введ. 2013-01-01.

2. *Rashidifar M.A., Rashidifar A.A., Abertavi A.* Non-linear characteristics of the pile soil system under vertical vibration // *Universal Journal of Engineering Science*. 2016. Vol. 4. No. 4. Pp. 59–65.

3. *Novak M., El Sharnouby B.* Evaluation of dynamic experiments on pile group // *Jl. of Geotech. Eng.* 1984. Vol. 110. Issue 6. Pp. 738–756.

4. *Poulos H.G.* Analysis of the settlement of pile groups // *Geotechnique*. 1968. Vol. 18. Issue 4. Pp. 449–471.

5. *Novak M., Grigg R.F.* Dynamic experiments with small pile foundations // *Canadian Geotech. J.* 1976. Vol. 13. Issue 4. Pp. 372–385.

6. ACI Committee 351. Foundations for dynamic equipment. American Concrete Institute, 2004. 63 p.

7. *Matlock H., Foo S.H.C., Bryant L.M.* Simulation of lateral pile behaviour under earthquake motion // *Proc. ASCE Geotech. Eng. Div. Spec. Conf. on Earthq. Eng. and Soil Dyn.* 1978. Vol. 1. Pp. 600–619.

8. *Sheta M., Novak M.* Vertical vibration of pile groups // *J. Geotech. Engng.* 1982. Vol. 108. Pp. 570–590.

9. *Veletsos A.S., Dotson K.W.* Vertical and torsional vibration of foundations in inhomogeneous media // *Jl. of Geotech. Eng.* 1988. Vol. 114. Issue 9. Pp. 1002–1021.

10. *El Naggar M.H., Novak M.* Non-linear model for dynamic axial pile response // *Jl. of Geotech. Eng.* 1994. Vol. 120. Issue 2. Pp. 308–329.

11. *Gazetas G., Makris N.* Dynamic pile-soil-pile interaction. Part I. Analysis of axial vibration // *Earthquake Engng. ASCE*. 1991. Vol. 20. Pp. 115–132.

12. *Баранов В.А.* О расчете вынужденных колебаний заглубленного фундамента // *Вопросы динамики и прочности: тр. Рижского ПИ.* 1967. № 14. С. 195–209.

13. *Колесников А.О., Попов В.Н.* Оценка динамических реакций на контурах нескольких круглых вырезов при колебаниях пластины // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2014. № 3. С. 37–43.

14. *Hassini S., Woods R.D.* Dynamic experiments with model pile foundations // *Proc. 12th ICSMFE*. 1989. Vol. 2. Pp. 1135–1138.

15. *Han Y., Vaziri H.* Dynamic response of pile groups under lateral loading // *Soil Dyn. and Earthq. Eng.* 1992. Vol. 11. Pp. 87–99.

16. *Manna B., Baidya D.K.* Dynamic nonlinear response of pile foundations under vertical vibration. Theory versus experiment // *Soil Dyn. and Earthq. Eng.* 2010. Vol. 30. Pp. 456–469.

17. *Burr J.P., Pender M.J., Larkin T.J.* Dynamic response of laterally excited pile groups // *Jl. of Geotech. & Geoenviron. Eng.* 1997. Vol. 123. No. 1. Pp. 1–8.

18. *Blaney G.W., Muster G.L., O'Neill M.W.* Vertical vibration test of a full-scale pile group // *Geotechnical Special Publication*. 1987. No. 11. Pp. 149–165.

19. *Crouse C.B., Cheang L.* Dynamic testing and analysis of pile-group foundations // *Geotechnical Special Publication*. 1987. No. 11. Pp. 79–98.

20. *Колесников А.О., Попов В.Н.* Динамические реакции на контурах круговых вырезов с учетом их взаимного расположения при колебаниях пластины // *Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева*. 2017. Т. 283. С. 3–10.

21. *Prakash S., Sharma H.D.* Pile Foundations in Engineering Practice. John Wiley&Sons, Inc., 1990. 784 p.



22. Chowdhury I., Dasgupta S.P. Dynamics of Structure and Foundation – A Unified Approach: 1. Fundamentals. CRC Press, 2008. 882 p.

23. Novak M., El Sharnouby B. Stiffness and damping constants for single piles // *Jl. of Geotech. Eng.* 1983. Vol. 109. Pp. 961–974.

RESEARCH PAPER

## Calculation of foundation vertical stiffness with the piles mutual influence effect

Aleksei O. Kolesnikov<sup>1</sup>, Tatiana N. Kostiuk<sup>1</sup>, Vladimir N. Popov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113 Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

<sup>2</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS, 4/1 Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

### Keywords:

foundation under equipment;  
mutual influence of piles in group;  
wave model;  
natural-vibration frequency of  
the pile foundation

### Abstract

**Aims of research.** Studies to determine the effect of the distance between the piles in group with vertical oscillations of pile foundations on the value of dynamic stiffness are carried out and the results obtained in full-scale tests, within the wave model and according to SP 26.13330.2012 are compared.

**Methods.** The eigenfrequency changes of the foundation of nine piles with a diameter ( $d$ ) with a high pile cap are calculated depending on the distances between the piles –  $2d$ ,  $3d$  and  $5d$ . The obtained results are compared with the data obtained after a series of pulse dynamic loads performed under semi-natural conditions on foundation models. The values of the transverse wave velocities were determined directly at the test site.

**Results.** It is found that the reduction of the distance between the piles in the bush leads to a decrease in the natural vibration frequencies of pile foundations. Reducing the distance between piles from 5 to 2 diameters of piles leads to reduce the frequency of vertical vibrations of pile foundations by 1.32 times. It is shown the advantage of the results of calculations in the framework of the wave model in comparison with the method of SP 26.13330.2012. Also shown their high coincidence with the values obtained in the course of experiments, which allows to accurately determine the amplitude-frequency characteristics of the foundations. The results determined according to SP 26.13330.2012 have significantly lower values of natural frequencies and do not fully reflect the change in the distance between the piles. The maximum discrepancy with the experimental data is 2.7 times for the vertical oscillations of the pile foundation.

### Article history:

Received: April 14, 2019

Revised: May 30, 2019

Accepted: June 10, 2019

### For citation

Kolesnikov A.O., Kostiuk T.N., Popov V.N. (2019). Calculation of foundation vertical stiffness with the piles mutual influence effect. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(3), 229–236. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-229-236> (In Russ.)

## References

1. SP 26.13330.2012. *Foundations of machines with dynamic loads*. Updated version of SNiP 2.02.05–87. Enter. 2013-01-01.

2. Rashidifar M.A., Rashidifar A.A., Abertavi A. (2016). Nonlinear characteristics of the pile soil system under vertical vibration. *Universal Journal of Engineering Science*, 4(4), 59–65.

3. Novak M., El Sharnouby B. (1984). Evaluation of dynamic experiments on pile group. *Jl. of Geotech. Eng.*, 110(6), 738–756.

4. Poulos H.G. (1968). Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*, 18(4), 449–471.

5. Novak M., Grigg R.F. (1976). Dynamic experiments with small pile foundations. *Canadian Geotech. J.*, 13(4), 372–385.

6. ACI Committee 351. (2004). *Foundations for dynamic equipment*. American Concrete Institute.

7. Matlock H., Foo S.H.C., Bryant L.M. (1978). Simulation of lateral pile behaviour under earthquake motion. *Proc. ASCE Geotech. Eng. Div. Spec. Conf. on Earthq. Eng. and Soil Dyn.*, 1, 600–619.

8. Sheta M., Novak M. (1982). Vertical vibration of pile groups. *J. Geotech. Engng.*, 108, 570–590.

9. Veletsos A.S., Dotson K.W. (1988). Vertical and torsional vibration of foundations in inhomogeneous media. *Jl. of Geotech. Eng.*, 114(9), 1002–1021.

10. El Naggar M.H., Novak M. (1994). Non-linear model for dynamic axial pile response. *Jl. of Geotech. Eng.*, 120(2), 308–329.

11. Gazetas G., Makris N. (1991). Dynamic pile-soil-pile interaction. Part I. Analysis of axial vibration. *Earthquake Engng. ASCE*, 20, 115–132.

<sup>1</sup> Aleksei O. Kolesnikov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Engineering Geology, Bases and Foundations, eLIBRARY SPIN-code: 1225-7017, ORCID iD: 0000-0002-3627-5888, AuthorID: 150161, [ao\\_kolesnikov@mail.ru](mailto:ao_kolesnikov@mail.ru)

Tatiana N. Kostiuk, master student, Department of Engineering Geology, Bases and Foundations, eLIBRARY SPIN-code: 5302-2974, ORCID iD: 0000-0001-5605-7944, AuthorID: 1029998.

<sup>2</sup> Vladimir N. Popov, Dr. Sc. (Physics-Mathematical), Chief Researcher, eLIBRARY SPIN-код: 9483-9689, ORCID iD: 0000-0002-6043-2134, AuthorID: 14977.

12. Baranov V.A. (1967). O raschete vyinuzhdennykh kolebaniy zaglubennogo fundamenta [On the calculation of forced oscillations of the deepening foundation]. *Voprosy dinamiki i prochnosti: Trudy Rizhskogo Politehnicheskogo Instituta*, (14), 195–209. (In Russ.)
13. Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2014). Otsenka dinamicheskikh reaktsiy na konturakh neskol'kikh kruglykh vyrezov pri kolebaniyakh plastiny [An estimation of dynamic reactions on the contour of several circular cuts at plate oscillations]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*, (3), 37–43. (In Russ.)
14. Hassini S., Woods R.D. (1989). Dynamic experiments with model pile foundations. *Proc. 12th ICSMFE*, 2, 1135–1138.
15. Han Y., Vaziri H. (1992). Dynamic response of pile groups under lateral loading. *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, 11, 87–99.
16. Manna B., Baidya D.K. (2010). Dynamic nonlinear response of pile foundations under vertical vibration. Theory versus experiment. *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, 30, 456–469.
17. Burr J.P., Pender M.J., Larkin T.J. (1997). Dynamic response of laterally excited pile groups. *Jl. of Geotech. & Geoenviron. Eng.*, 123(1), 1–8.
18. Blaney G.W., Muster G.L., O'Neill M.W. (1987). Vertical vibration test of a full-scale pile group. *Geotechnical Special Publication*, (11), 149–165.
19. Crouse C.B., Cheang L. (1987). Dynamic testing and analysis of pile-group foundations. *Geotechnical Special Publication*, (11), 79–98.
20. Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2017). Dinamicheskie reaktsii na konturakh krugovykh vyrezov s uchetom ikh vzaimnogo raspolozheniya pri kolebaniyakh plastiny [Dynamic reactions on contours of circular cuts taking into account their mutual arrangement at plate oscillations]. *Izvestiya VNIIG imeni B.Ye. Vedeneeva*, 283, 3–10. (In Russ.)
21. Prakash S., Sharma H.D. (1990). Pile foundations in engineering practice. John Wiley&Sons, Inc.
22. Chowdhury I., Dasgupta S.P. (2008). *Dynamics of Structure and Foundation – A Unified Approach: 1. Fundamentals*. CRC Press.
23. Novak M., El Sharnouby B. (1983). Stiffness and damping constants for single piles. *Jl. of Geotech. Eng.*, 109, 961–974.