

Динамика конструкций и сооружений

УДК 624.154
DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-360-368

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Расчет собственной частоты колебаний заглубленного фундамента при импульсном нагружении

А.О. Колесников^{1*}, В.Н. Попов²¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
ул. Ленинградская, 113, Новосибирск, Российская Федерация, 630008²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Российская Федерация, 630090

*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 09 июля 2018 г.; доработана: 02 октября 2018 г.; принята к публикации: 10 октября 2018 г.)

Цель. Рассматривается возможность использования формул, полученных в рамках волновой модели и СП 26.13330.2012, для определения динамических жесткостей при рассмотрении вертикальных и горизонтальных колебаний заглубленных фундаментов на обычном и свайном основании.

Методика исследования. Рассчитываются изменения собственных частот колебаний системы в зависимости от заглубления. Полученные результаты сравниваются с данными экспериментальных исследований, полученных в ходе серии импульсных динамических нагружений, выполненных в полунатурных условиях на моделях фундаментов. Значения скоростей поперечных волн определялись непосредственно на опытном полигоне по результатам измерений.

Выводы. Определено, что заглубление приводит к повышению частот собственных колебаний как свайных фундаментов, так и фундаментов на естественном основании. Полное заглубление способствует увеличению частот при горизонтальных колебаниях более чем в 1,6 раза, при вертикальных колебаниях до 1,4 раза и его влияние на фундаменты на естественном основании более значительно. 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. Результаты, определяемые согласно СП 26.13330.2012, имеют значительно более низкие значения частот собственных колебаний и не в полной мере учитывают влияние заглубления. Максимальное расхождение с экспериментальными данными составляет при вертикальных колебаниях для фундамента на сваях и на естественном основании – 33 %. В случае горизонтальных колебаний максимальные расхождения составляют от 20 % для фундамента на естественном основании до 27 % для свайного фундамента.

Ключевые слова: фундамент под машину, заглубленный фундамент, волновая модель, собственная частота колебаний фундамента

Введение

В настоящее время существуют требования к точности результатов при расчетах колебаний фундаментов [1–3]. В связи с этим в используемых моделях необходимо более полно учитывать динамические характеристики системы «заглубленный фундамент – основание» [4–10]. Так,

увеличение жесткости фундамента за счет взаимодействия с окружающей средой заглубленных боковых граней приводит к повышению частот его собственных колебаний, что подтверждается экспериментами, проведенными на опытном полигоне, в лабораторных и натурных условиях [3; 5; 10–12]. Таким образом, учет влияния плотного контакта боковой поверхности фундамента с

окружающим грунтом при расчетах и проектировании фундаментов под машины позволит определить более точные значения амплитудно-частотных характеристик колебаний системы в целом [4; 6; 12; 13].

Вместе с тем при проведении расчетов на этапе проектирования или исследования характеристик обычных и свайных заглубленных фундаментов наблюдается расхождение полученных результатов с данными экспериментальных исследований [5; 10; 12]. Возможно, существует необходимость учитывать геометрию фундамента и другие его индивидуальные характеристики, чтобы повысить точность расчетов, однако это требует детального исследования [14; 15]. Необходимо отметить, что вычисление динамической жесткости фундамента является важной и актуальной инженерной задачей, так как правильность определения собственной частоты колебаний системы «фундамент – машина» позволяет предупредить возникновение резонансных явлений. При этом на практике желательно получать достоверные результаты, используя при расчетах достаточно простые соотношения. В связи с этим настоящая работа посвящена проведению инженерных расчетов с использованием формул из [4; 14] для определения собственной частоты при вертикальных и горизонтальных колебаниях фундаментов с учетом их заглубления и сопоставлению результатов с данными, полученными в ходе экспериментов на опытном полигоне.

Методика исследования

С целью оценки влияния заглубления на собственные частоты при вертикальных и горизонтальных колебаниях фундаментов были проведены экспериментальные исследования, схема которых представлена на рис. 1. Испытывались два специально изготовленных фундамента, один из которых свайный (Ф-1), а другой – на естественном основании (Ф-2). Опытный фундамент Ф-1 был выполнен в виде монолитного железобетонного ростверка с габаритными размерами $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м, опирающегося на 4 жестко закрепленные сваи диаметром 114 мм с рабочей длиной 2 м, изготовленные из металлических труб с толщиной стенки 6 мм. Расстояние между осями свай, равное шести с половиной диаметрам, составляло 750 мм и исключало их взаимное влияние в кусте [15]. Монолитный фундамент на

естественном основании Ф-2 имел аналогичные с фундаментом Ф-1 размеры – $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м. Опалубкой при бетонировании опытных фундаментов служили тщательно выровненные стенки котлована. Грунт опытного полигона до глубины 9,3 м состоял из лессовидной маловлажной твердой супеси с удельным весом $17,0 \text{ кН/м}^3$ и модулем деформации $E = 14 \text{ МПа}$, подстилаемой полутвердыми суглинками. Грунтовые воды на площадке отсутствовали.

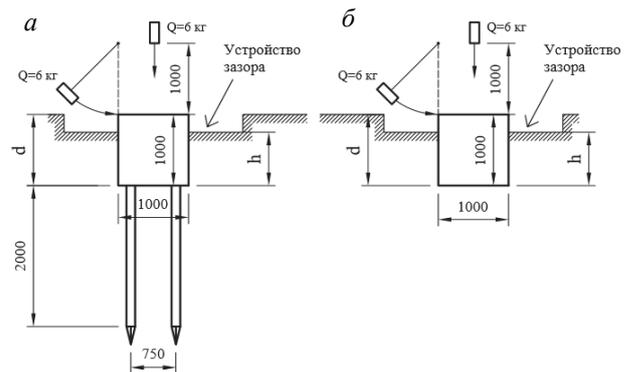


Рис. 1. Схема опытных фундаментов Ф-1 (а) и Ф-2 (б):
h – высота засыпки; *d* – глубина заложения
[Figure 1. Experimental foundation layout F-1 (a) and F-2 (b):
h – backfill height; *d* – foundation depth]

По одинаковой методике выполнялись серии импульсных динамических нагружений (по 20 раз) при различных вариантах заглубления. Импульсная нагрузка прикладывалась с помощью стального груза, имеющего форму параллелепипеда, массой 6 кг. Для получения нагрузки в вертикальном направлении груз свободно падал на поверхность испытуемого фундамента с высоты 1,0 м. Для создания нагружения в горизонтальном направлении использовался маятник, подвешенный над боковой гранью фундамента на высоте 1,0 м, груз на бечевке опускался с высоты 1,0 м и ударял в верхнюю кромку фундамента. При полном заглублении фундамента, чтобы не создавать помехи, вблизи точки воздействия незначительная часть грунта была удалена.

Для определения собственных частот колебаний использовалась аппаратура АВМ-1, позволяющая регистрировать колебания и одновременно обрабатывать получаемую информацию, включающая пять трехкоординатных датчиков виброакселерометров марки ADXL, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер. Датчик представлял собой металлический корпус, выполненный в виде куба, с возможно-

стью его закрепления на поверхности фундамента, с установленными внутри платами с интегральными двухканальными акселерометрами. Основные характеристики виброакселерометра – измерительный диапазон ± 5 g, спектральная плотность шума $250 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms. Датчики подключались к АЦП с помощью соединительных кабелей. В качестве АЦП использовался внешний модуль E14-140 производства L-CARD. Диапазон измерений применяемой аппаратуры представлен на рис. 2.

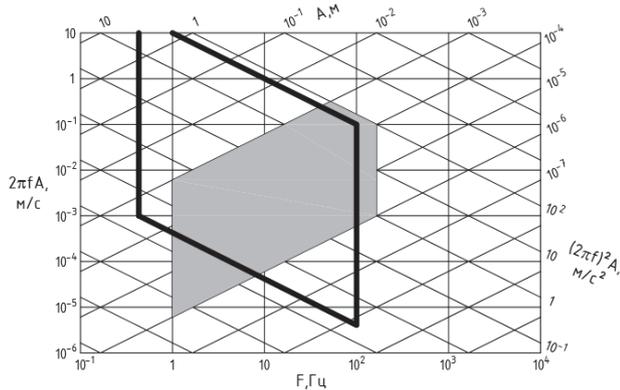


Рис. 2. Диапазон измерений применяемой аппаратуры:
 ■ – область измеряемых параметров; ———— – виброметр АВМ-1
[Figure 2. Measuring range of the vibration equipment:
 ■ – area of measuring parameters; ———— – vibrometer AVM-1]

Данные измерений для каждого из фундаментов Ф-1 и Ф-2 сравнивались с результатами инженерных расчетов, полученных при использовании аналитических выражений, предложенных в [4; 14] и СП 26.13330.2012.

Собственные частоты колебаний фундаментов, λ_z при вертикальных и λ_x при горизонтальных колебаниях фундаментов определяются согласно

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{K_z}{m}}, \quad \lambda_x = \sqrt{\frac{K_x}{m}},$$

где K_z , K_x – вертикальная и горизонтальная жесткости фундамента соответственно; m – масса фундамента.

Подход к определению динамической жесткости заглубленных фундаментов, основанный на волновых моделях, предполагает суммирование значений, найденных отдельно для боковой поверхности, подошвы и свай при их наличии [1; 9].

Вертикальные (z) и горизонтальные (x) жесткости заглубленных опытных фундаментов определяются следующим образом:

– для свайных фундаментов суммированием жесткости на боковой поверхности заглубленного ростверка K_1 и жесткостей K_2 каждой из N свай в основании:

$$K_z = K_{z1} + \sum_{i=1}^N K_{z2i}, \quad K_x = K_{x1} + \sum_{i=1}^N K_{x2i}; \quad (1)$$

– для фундаментов на естественном основании суммированием жесткостей по боковой поверхности заглубленного фундамента K_1 и под его подошвой K_3 :

$$K_z = K_{z1} + K_{z3}, \quad K_x = K_{x1} + K_{x3}. \quad (2)$$

Вертикальная жесткость по боковой поверхности заглубленного ростверка или фундамента определяется по формуле

$$K_{z1} = V_{s0}^2 \rho_0 S_{w1} h,$$

где ρ_0 – плотность грунта засыпки; V_{s0} – скорость поперечных волн в засыпке фундамента (ростверка); h – высота засыпки; S_{w1} – коэффициент, определяемый безразмерной частотой колебаний $a_0 = r\omega/V_{s0}$ и геометрической формой в плане заглубленного фундамента (ростверка); ω – круговая частота колебаний; r – характерный размер: $r = r_0$ для круглого в плане фундамента с радиусом r_0 , $r = \sqrt{ab/\pi}$ для прямоугольного в плане тела со сторонами a и b [1; 4; 14]. Например, для круглого в плане тела

$$S_{w1}(a_0) = 2\pi a_0 \frac{J_0(a_0)J_1(a_0) + Y_0(a_0)Y_1(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)},$$

где J_0 , J_1 , Y_0 , Y_1 – функции Бесселя первого и второго рода.

Вертикальная жесткость одиночной сваи определяется по формуле

$$K_{z2} = \frac{E_p A_p}{r_p} f_{19.1},$$

где E_p – модуль упругости материала сваи; A_p – площадь поперечного сечения сваи; r_p – радиус круглой сваи (или $r_p = c/\sqrt{\pi}$ в случае квадратной в сечении сваи со стороной c); $f_{19.1}$ – коэффициент, определяемый по табл. 1, согласно [7] зависящий от соотношений L/r_p и E_p/G , где L – длина сваи; $G = V_s^2 \rho$ – модуль сдвига грунта; ρ – плотность грунта, который прорезает свая.

Таблица 1

Коэффициенты вертикальной жесткости $f_{19,1}$
для свай
[Table 1. Vertical stiffness coefficients $f_{19,1}$
for friction piles]

L / r_p	E_p / G				
	10000	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

Вертикальная жесткость под подошвой фундамента определяется по формуле

$$K_{z3} = V_s^2 \rho r F_{1z},$$

где ρ – плотность грунта; V_s – скорость поперечных волн в грунте ниже подошвы фундамента; F_{1z} – коэффициент определяемый согласно [1]:

$$F_{1z} = 5,33 - 0,9a_0^2.$$

Горизонтальная жесткость по боковой поверхности заглубленного ростверка или фундамента определяется по формуле

$$K_{x1} = V_{s0}^2 \rho_0 S_{u1} h,$$

где S_{u1} – коэффициент, согласно [1; 4; 14] связанный с безразмерной частотой колебаний a_0 и геометрической формой заглубленного фундамента (ростверка). Например, для круглого в плане тела

$$S_{u1}(a_0) = \pi a_0^2 \left[1 + 2 \frac{J_0(a_0)J_2(a_0) + Y_0(a_0)Y_2(a_0)}{J_0^2(a_0) + Y_0^2(a_0)} \right].$$

Горизонтальная жесткость одиночной сваи определяется по формуле

$$K_{x2} = \frac{E_p I_p}{r_p^3} f_{11,1},$$

где I_p – момент инерции сечения сваи; $f_{11,1}$ – коэффициент, определяемый согласно [16]:

$$f_{11,1} = 7,25(V_s / V_c)^2 + 0,38(V_s / V_c) - 0,0013,$$

где $V_c = \sqrt{E_p / \gamma_p}$; γ_p – удельный вес материала сваи.

Горизонтальная жесткость под подошвой фундамента определяется по формуле

$$K_{x3} = V_s^2 \rho r F_{1x},$$

где F_{1x} – коэффициент, определяемый согласно [1]:

$$F_{1x} = 4,86 - 0,2a_0^2.$$

Результаты исследований

Результаты измерений и расчетов частот собственных колебаний фундаментов Ф-1 и Ф-2 приведены в табл. 2 и 3 соответственно. Для каждого испытуемого фундамента производилась регистрация частот собственных колебаний и одновременный расчет по формулам (1), (2) для различных уровней их относительного заглубления $h/d = 1; 0,75; 0,5; 0,25; 0$. Вычисления проводились согласно [4] для круглого в плане фундамента, [14] для прямоугольного в плане тела и согласно СП 26.13330.2012. При определении суммарной жесткости свай в основании их взаимное влияние не учитывалось [15].

Необходимо отметить, что при расчетах использовались значения скоростей поперечных волн V_s , определенных непосредственно на опытном полигоне с помощью метода описанного в [16]. Для этого использовались 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 ударе по свае-источнику регистрировались импульсы на ней и на свае-приемнике. По времени прохождения импульса между сваями определялась скорость поперечных волн в грунте в зависимости от вертикального или горизонтального направления приложения импульсной нагрузки. Значения скоростей для грунта опытного полигона определены как $V_{s1} = 146$ м/с – при приложении нагрузки в вертикальном направлении и $V_{s2} = 105$ м/с – при приложении нагрузки в горизонтальном направлении. Разные значения, полученные в зависимости от направления удара, свидетельствуют об анизотропии скоростей упругих волн в грунте [17].

Таблица 2

Частоты собственных колебаний фундамента Ф-1
[Table 2. Natural frequencies of the foundation F-1]

№ п/п	Заглубление, h/d [Deepening, h/d]	Измеренная частота, Гц [Measured frequency, Hz]		Расчетная частота, Гц [Theoretical frequency, Hz]					
				СП 26.13330.2012 [SP 26.13330.2012]		[4]		[14]	
				Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]	Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]	Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]
1	1,00	42,47	54,54	31,04	36,17	39,97	56,59	41,33	59,01
2	0,75	41,43	52,25	30,09	35,46	36,96	54,33	39,57	56,23
3	0,50	38,71	50,00	28,60	34,75	35,92	51,96	37,73	53,29
4	0,25	33,85	47,61	26,48	33,27	34,85	49,49	35,79	50,19
5	0,00	30,03	45,40	24,17	31,72	33,75	46,88	33,75	46,88

Таблица 3

Частоты собственных колебаний фундамента Ф-2
[Table 3. Natural frequencies of the foundation F-2]

№ п/п	Заглубление, h/d [Deepening, h/d]	Измеренная частота, Гц [Measured frequency, Hz]		Расчетная частота, Гц [Theoretical frequency, Hz]					
				СП 26.13330.2012 [SP 26.13330.2012]		[4]		[14]	
				Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]	Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]	Гор. [Hor.]	Верт. [Vert.]
1	1,00	36,10	45,76	28,83	30,30	34,68	44,74	38,27	47,79
2	0,75	32,25	42,30	27,95	29,70	32,08	41,83	35,01	44,29
3	0,50	28,80	39,50	26,56	29,10	29,25	38,70	31,41	40,49
4	0,25	25,45	35,25	24,60	27,85	26,11	35,30	27,34	36,29
5	0,00	22,30	31,15	22,45	26,56	22,55	31,54	22,55	31,54

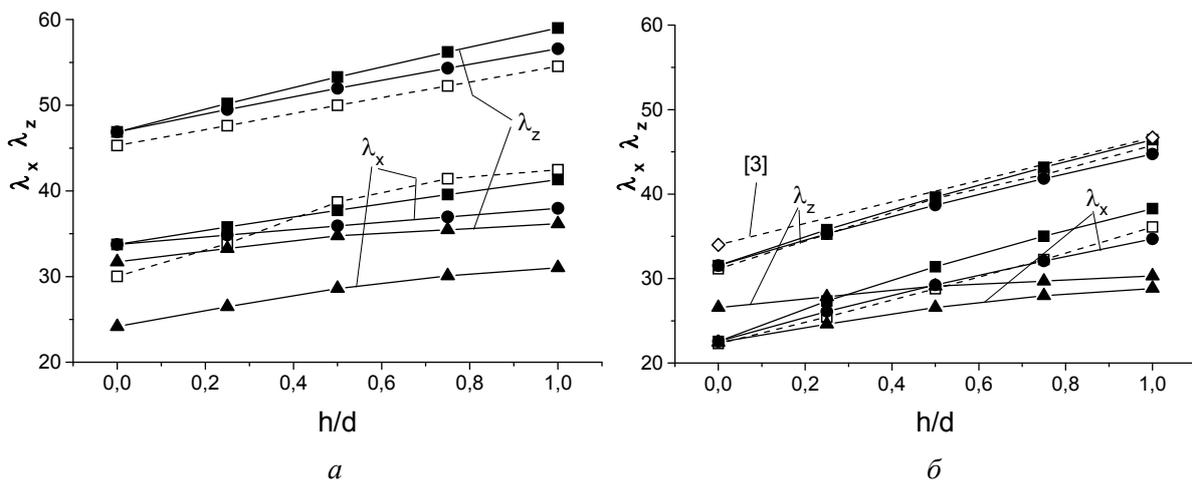


Рис. 3. Зависимость резонансных частот λ_x, λ_z от величины относительного заглубления h/d фундамента:

a – Ф-1; b – Ф-2. Штриховые линии – данные измерений авторов (□) и [3] (◇);
сплошные линии – результаты расчетов согласно [4] (●), [14] (■) и СП 26.13330.2012 (▲)

[Figure 3. Correlation of the resonant frequencies λ_x, λ_z from the relative depth of foundation h/d :

a – F-1; b – F-2. Dashed lines – the results of measurements of the authors (□) and [3] (◇);
solid lines – the results of calculations according to [4] (●), [14] (■) and SP 26.13330.2012 (▲)]

Из результатов экспериментов, проведенных на опытном полигоне, следует, что увеличение заглубления приводит к повышению частот собственных колебаний как свайных фундаментов, так и фундаментов на естественном основании. Изменение частот от заглубления имеет фактически линейную зависимость (рис. 3). Полное заглубление способствует увеличению частот при горизонтальных колебаниях для свайного фундамента в 1,5 раза, для фундамента на естественном основании более чем в 1,6 раз, при вертикальных колебаниях для свайного фундамента в 1,3 раза, для фундамента на естественном основании в 1,4 раза. Можно отметить, что для фундаментов на естественном основании заглубление более значительно влияет на изменение частот собственных колебаний, чем для свайных. В качестве подтверждения полученных результатов измерений на рис. 3, б представлены данные из [3] для фундамента аналогичных размеров и со схожими свойствами грунта.

Приведенные в табл. 2 и 3 результаты, полученные согласно СП 26.13330.2012, иллюстрируют значительно более низкие значения рассчитанных частот собственных колебаний, чем были определены в ходе опытных замеров. Можно сделать вывод, что заглубление в данном случае учитывается не в полной мере. Это подтверждается тем, что максимальное расхождение с экспериментальными данными составляет при вертикальных колебаниях для фундамента на сваях и на естественном основании – 33 %. В случае горизонтальных колебаний максимальные расхождения составляют от 20 % для фундамента на естественном основании до 27 % для свайного фундамента.

Таблицы и рис. 3 отображают результаты, полученные при проведении инженерных расчетов с использованием формул (1), (2) для определения жесткостей заглубленных фундаментов на сваях и на естественном основании. При вычислении частот собственных колебаний фундаментов коэффициенты S_{w1} и S_{u1} определялись согласно [4] для круглого в плане тела и [14] для прямоугольного в плане тела. На основании представленных значений частот можно утверждать, что расчеты в рамках используемых приближений позволяют получить хорошее совпадение с экспериментальными данными. Частоты для прямоугольного в плане тела имеют более высокие значения, что объясняется большей боковой

поверхностью заглубленного фундамента, взаимодействующей с грунтом и, как следствие, большей жесткостью.

Рассматривая результаты, полученные с использованием S_{w1} и S_{u1} , определяемым по формулам [4] для круглого в плане тела, различие с опытными данными при горизонтальных колебаниях оценивается от 6 до 12,5 % для свайных фундаментов и до 4 % для фундаментов на естественном основании. Большая величина расхождения зафиксирована при заглублении $h/d = 0$ как следствие погрешности вычисления суммарной жесткости свай в основании. При вертикальных колебаниях различие с опытными данными меньше – до 4 % для свайных фундаментов, около 2 % для фундаментов на естественном основании.

При оценке результатов, полученных со значениями S_{w1} и S_{u1} , рассчитанными на основании [14] для прямоугольного в плане тела, получаем, что при горизонтальных колебаниях различие с опытными данными составляет от 3 до 12,5 % для свайных фундаментов и 6 % для фундаментов на естественном основании. Здесь также максимальное расхождение получено при заглублении $h/d = 0$ в ходе вычисления жесткостей свай в основании. При вертикальных колебаниях различие с опытными данными не превышает 8 % для свайных фундаментов и 4 % для фундаментов на естественном основании.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Определено, что соотношения и формулы [4; 14], полученные в рамках волновой модели и применяемые для расчета динамических жесткостей при рассмотрении вертикальных и горизонтальных колебаний заглубленных фундаментов на обычном и свайном основании, позволяют получать более точные результаты при определении резонансных частот по сравнению с методом предложенным в СП 26.13330.2012, 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.

Сравнение результатов по определению частот собственных колебаний не выявило явного преимущества в использовании формул для круглого или квадратного в плане тела, что делает желательным дальнейшие исследования заглубленных фундаментов под динамическими нагрузками при значительном различии в соотношении их сторон и анализ амплитудной характеристики колебаний системы.

© Колесников А.О., Попов В.Н., 2018



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

Список литературы

1. *Забьлин М.И.* Расчет фундаментов под машины. Новосибирск: НИСИ, 1983. 83 с.
2. *Пятецкий В.М., Александров Б.К., Савинов О.А.* Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование. М.: Стройиздат, 1993. 416 с.
3. *Колоушек В.* Динамика строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1965. 632 с.
4. *Баранов В.А.* О расчете вынужденных колебаний заглубленного фундамента // Вопросы динамики и прочности. Труды Рижского политехнического института. Рига. 1967. № 14. С. 195–209.
5. *Семижонов Е.М.* Вынужденные вертикальные колебания массивных фундаментов, защемленных в грунте // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1973. С. 46–51.
6. *Алексеев Б.Г., Швец Н.С., Аграновский Г.Г., Рахлин Ю.Б.* О расчетах защемленных в грунте массивных фундаментов под машины с динамическими нагрузками // Изв. Вузов. Строительство и архитектура. 1978. № 1. С. 31–37.
7. *Novak M., El Sharnouby B.* Stiffness and damping constants for single piles // *Geotechnical Engineering*. 1983. Vol. 109. Pp. 961–974.
8. *Холмянский М.Л.* Учет влияния заглубления и боковой засыпки фундаментов машин на динамические свойства их основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1991. № 5. С. 17–19.
9. *Колесников А.О., Попов В.Н.* Оценка влияния заглубления ростверка при колебаниях свайного фундамента // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2009. № 2. С. 55–61.
10. *Колесников А.О., Попов В.Н.* Экспериментальные исследования заглубления ростверка при колебаниях свайного фундамента // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 4. С. 75–80.
11. *Nath U.K., Hazarika P.J.* Lateral resistance of pile cap – an experimental investigation // *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2013. Vol. 7. Issue 3. Pp. 266–272.
12. *Bhowmik D., Baidya D.K., Dasgupta S.P.* A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to vertical dynamic loading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. June 2016. Vol. 85. Pp. 161–165.
13. *Ali O.S., Aggour M.S., McCuen R.H.* Dynamic of soil-pile interactions for machine foundations // *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 8. Pp. 236–247.
14. *Нуждин Л.В., Колесников А.О.* К оценке динамических реакций на контуре прямоугольного выреза в бесконечной пластине // Известия вузов. Строительство. 2004. № 5. С. 22–31.
15. *Колесников А.О., Попов В.Н.* Динамические реакции на контурах круговых вырезов с учетом их взаимного расположения при колебаниях пластины // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 283. С. 3–10.
16. *Chowdhury I., Dasgupta S.P.* Dynamics of Structure and Foundation – A Unified Approach: 1. Fundamentals. CRC Press, 2008. 882 p.
17. *Петрашень Г.И.* Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л.: Наука, 1980. 280 с.

Об авторах

Колесников Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерной геологии, оснований и фундаментов, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН) (Новосибирск, Россия). *Область научных интересов:* экспериментальные и теоретические исследования колебаний фундаментов. *Контактная информация:* e-mail – ao_kolesnikov@mail.ru. eLIBRARY SPIN-код: 1225-7017. ORCID iD: 0000-0002-3627-5888. Author ID: 150161.

Попов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, Сибирское отделение Российской академии наук (Новосибирск, Россия). *Область научных интересов:* теоретические исследования колебаний фундаментов. *Контактная информация:* e-mail – popov@itam.nsc.ru. eLIBRARY SPIN-код: 9483-9689. ORCID iD: 0000-0002-6043-2134. Author ID: 14977.

Для цитирования

Колесников А.О., Попов В.Н. Расчет собственной частоты колебаний заглубленного фундамента при импульсном нагружении // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 360–368. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-360-368.

Calculation of the natural oscillation frequency of the submerged basement subject to pulsed loading

Aleksei O. Kolesnikov^{1*}, Vladimir N. Popov²

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
113 Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

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

*Corresponding author

(received: July 09, 2018; revised: October 02, 2018; accepted: October 10, 2018)

Abstract. The aim of work. To determine the dynamic stiffness at considering vertical and horizontal vibrations of embedded foundations on a conventional and pile base, the possibility of using formulas obtained within the framework of the wave model and SP 26.13330.2012 is considered.

Solution technique. Depending on deepening changes, the natural-vibration frequencies of the system oscillations are calculated. The obtained results are compared with the experimental data obtained in a series of impulse dynamic loads performed on foundation models in semi-real conditions. The values of the transverse wave velocities were determined directly on the experimental range from the results of measurements.

Results. It is determined that deepening leads to an increase in the frequencies of natural oscillations, both pile foundations and shallow foundations. Full penetration helps to increase natural-vibration frequencies. For horizontal oscillations more than 1.6 times, for vertical oscillations up to 1.4 times. The influence of deepening on shallow foundations is more significant. The advantage of the calculations results and their high agreement with the values obtained during the experiments in the framework of the wave model in comparison with the method from SP 26.13330.2012 is shown. It allows to reliably determining the amplitude-frequency characteristics of the foundations. The results determined in accordance with SP 26.13330.2012, have significantly lower values of the natural-vibration frequencies and do not fully take into account the influence of deepening. The maximum difference with the experimental data for vertical vibrations for a foundation on piles and for a shallow foundation is 33 %. In case of horizontal fluctuations, the maximum differences are from 20 % for a shallow foundation and up to 27 % for a pile foundation.

Keywords: foundation under equipment, embedded foundation, wave model, natural-vibration frequency of the foundation

References

1. Zabylin M.I. (1983). *Raschet fundamentov pod mashiny [Calculation of machine foundations]*. Novosibirsk: NISI Publ., 83. (In Russ.)
2. Pyatetskiy V.M., Aleksandrov B.K., Savinov O.A. (1993). *Sovremennye fundamenty mashin i ikh avtomatizirovannoe proektirovanie [Modern foundations of machines and their automated design]*. Moscow: Stroiizdat Publ., 416. (In Russ.)
3. Koloushek V. (1965). *Dinamika stroitel'nykh konstruksiy [Dynamics of building structures]*. Moscow: Stroiizdat Publ., 632. (In Russ.)
4. Baranov V.A. (1967). O raschete vyinuzhdennykh kolebaniy zaglublennogo fundamenta [On the calculation of forced oscillations of the deepening foundation]. *Voprosy dinamiki i prochnosti, Trudy Rzhskogo politekhnicheskogo instituta*, (14), 195–209. (In Russ.)
5. Semizhonov Y.M. (1973). Vynuzhdennyye vertikal'nyye kolebaniya massivnykh fundamentov, zashchem-

lennykh v grunte [Forced vertical oscillations of massive foundations restrained in ground]. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike*. Energiya Publ., 46–51. (In Russ.)

6. Alekseyev B.G., Shvets N.S., Agranovskiy G.G., Rakhlin Y.B. (1978). O raschetakh zashchemlennykh v grunte massivnykh fundamentov pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami [On calculations of massive foundations restrained in ground under machines with dynamic loadings]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*, (1), 31–37. (In Russ.)

7. Novak M., El Sharnouby B. (1983). Stiffness and damping constants for single piles. *Geotechnical Engineering*, 109, 961–974.

8. Kholmyanskiy M.L. (1991). Uchet vliyaniya zaglubleniya i bokovoy zasyipki fundamentov mashin na dinamicheskie svoystva ikh osnovaniya [Accounting for influence of the deepening and backfilling of machine foundations on the dynamic properties of their foundations]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (5), 17–19. (In Russ.)

9. Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2009). Otsenka vliyaniya zaglubleniya rostverka pri kolebaniyakh svaynogo fundamenta [Evaluation of deepening influence of the pile-cap under the oscillations of the pile foundation]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 5(2), 55–61. (In Russ.)

10. Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2010). Eksperimental'nyie issledovaniya zaglubleniya rostverka pri kolebaniyakh svaynogo fundamenta [Experimental investigation of pile-cap deepening at oscillations of the pile foundation]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (4), 75–80. (In Russ.)

11. Nath U.K., Hazarika P.J. (2013). Lateral resistance of pile cap – an experimental investigation. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 7(3), 266–272.

12. Bhowmik D., Baidya D.K., Dasgupta S.P. (2016). A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to vertical dynamic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 161–165.

13. Ali O.S., Aggour M.S., McCuen R.H. (2016). Dynamic of soil-pile interactions for machine foundations. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8, 236–247.

14. Nuzhdin L.V., Kolesnikov A.O. (2004). K otsenke dinamicheskikh reaktsiy na konture pryamougol'nogo vyireza v beskonechnoy plastine [To an estimation of dynamic reactions on the contour of a rectangular cut in an infinite plate]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, (5), 22–31. (In Russ.)

15. Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2017). Dinamicheskie reaktsii na konturakh krugovykh vyirezov 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 im. B.Ye. Vedeneeva, 283, 3–10. (In Russ.)

16. Chowdhury I., Dasgupta S.P. (2008). *Dynamics of Structure and Foundation – A Unified Approach: 1. Fundamentals*. CRC Press, 882.

17. Petrashen' G.I. (1980). *Rasprostraneniye voln v anizotropnykh uprugikh sredakh [Propagation of waves in anisotropic elastic media]*. Leningrad: Nauka Publ., 280. (In Russ.)

About the authors

Aleksei O. Kolesnikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering Geology, bases and foundations, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN) (Novosibirsk, Russia). *Research interests*: experimental and theoretical investigations of foundation oscillations. *Contacts*: e-mail – ao_kolesnikov@mail.ru. eLIBRARY SPIN-code: 1225-7017. ORCID iD: 0000-0002-3627-5888. Author ID: 150161.

Vladimir N. Popov – Dr Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia). *Research interests*: theoretical investigations of foundation oscillations. *Contacts*: e-mail – popov@itam.nsc.ru. eLIBRARY SPIN-code: 9483-9689. ORCID iD: 0000-0002-6043-2134. Author ID: 14977.

For citation

Kolesnikov A.O., Popov V.N. (2018). Calculation of the natural oscillation frequency of the submerged basement subject to pulsed loading. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(5), 360–368. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-360-368. (In Russ.)