

УДК 624.154.1

В. С. Геращенко

ТЕСТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТАННОЙ СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСНОВАНИЯ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

Тестируются параметры разработанной механической модели основания свайного фундамента. Производится сопоставление статических жесткостей основания для ростверка и свай, вычисленных по объемной и механической моделям основания. Параметры механической модели основания вычисляются по различным методикам.

К л ю ч е в ы е с л о в а: штамп, свая, механическая модель основания, объемная модель основания, интегральные статические жесткости.

Parameters of the developed mechanical model of the pile foundation base are tested. The comparison of static rigidity of foundations for a grillage and a pile calculated on the three-dimensional and mechanical models of foundations is carried out. The parameters of mechanical model of foundation are calculated with the help of different methods.

К e y w o r d s: stamp, pile, mechanical model of foundation, three-dimensional model of foundation, integrated static rigidity.

В настоящее время для учета эффекта взаимодействия сооружения с основанием применяются следующие модели основания:

1. Механическая — совокупность пружин, распределенных на контактных поверхностях фундаментной конструкции с грунтовой средой, имитирующих жесткостные свойства грунтовой среды при их взаимодействии. Жесткостные параметры модели основания получены на основе решения задачи о штампе на упругом однородном полупространстве.

2. Объемная — грунтовой массив, моделируемый элементами сплошной среды, с применением метода конечных элементов.

В работе [1] была разработана механическая модель основания свайного фундамента.

Тестирование параметров разработанной модели [1] производится путем сопоставления статических жесткостей основания для штампа и свай, вычисленных по объемной и механической моделям основания. Параметры механической модели основания вычисляются по различным методикам [1—4].

Для построения конечно-элементных моделей основания и выполнения расчетов применяется программный комплекс ANSYS.

Исходные данные. Для сопоставления статических жесткостей основания рассматриваются штампы круглой и прямоугольной форм на плане и свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями.

Отношение сторон прямоугольного штампа варьируется от 1 до 10.

Радиус круглого штампа варьируется в диапазоне 0,5...5 м с шагом 0,5 м.

Длина свай 3...15 м, при постоянной геометрии поперечного сечения:

$b = h = 0,3$ м — ширина и высота прямоугольного поперечного сечения свай;

$d = 0,3$ м — диаметр круглого сечения свай.

Грунтовой массив для прямоугольного штампа и прямоугольной свай имеет форму куба с габаритами 20 × 20 × 30 м.

Грунтовой массив для круглого штампа и круглой свай имеет форму цилиндра с радиусом 30 м и высотой 30 м.

Для грунтового массива и свай используется линейно-упругий материал со следующими деформационными характеристиками:

модуль упругости грунтового массива $E = 20$ МПа;

коэффициент поперечной деформации грунтового массива $\mu = 0,3$;

модуль упругости свай $E = 30 \cdot 10^3$ МПа;

коэффициент поперечной деформации свай $\mu = 0,2$;

коэффициент пропорциональности $K = 100000$ кН/м⁴ [4, табл. В.1];

единичная горизонтальная или вертикальная сила, прикладывается в геометрическом центре штампа или верхнего конца свай, $P = 1$ Н.

Основная часть. Задача решается для набора штампов и свай. Определяются параметры (статические жесткости) механической модели основания для штампов и свай по различным методикам [1—4].

Выполняется построение механических и объемных конечно-элементных моделей систем «штамп — основание» и «свая — основание» в соответствии с вычисленными параметрами моделей и исходными данными.

Прикладывается единичная горизонтальная или вертикальная сила к центру штампа или к центру свободного конца свай.

Выбирается статический анализ, и решаются задачи в геометрически и физически линейной постановке.

Определяются горизонтальные или вертикальные перемещения центра жесткого штампа, свободного конца свай и находится обратная величина, т. е. жесткость грунтовой среды.

Статические жесткости основания круглого и прямоугольного штампов (ростверков). В табл. 1 представлены выражения для определения интегральных жесткостей основания для прямоугольного и круглого штампов (ростверков) [1—3].

Т а б л и ц а 1

Интегральные жесткости основания для круглого и прямоугольного штампа

Вид штампа	Автор	Вид перемещения	Интегральная жесткость
Прямоугольный	[1]	Горизонтальное, поступательное	$k_{x(y)} = 31,1(1-\mu)G\sqrt{A}/\sqrt{\pi}(7-8\mu)$
		Вертикальное, поступательное	$k_z = 4G\sqrt{A}/\sqrt{\pi}(1-\mu)$
	[2]	Горизонтальное, поступательное	$k_{x(y)} = 2(1+\mu)G\beta_x\sqrt{A}$
		Вертикальное, поступательное	$k_z = E\sqrt{A}/\omega(1-\mu)$
	[3]	Вертикальное, поступательное	$k_z = E\sqrt{A}/\omega(1-\mu^2)$
Круглый	[1]	Горизонтальное, поступательное	$k_{x(y)} = 31,1GR/(7-8\mu)$
		Вертикальное, поступательное	$k_z = 4GR/\omega(1-\mu)$
	[2]	Горизонтальное, поступательное	$k_{x(y)} = 32(1-\mu)GR/(7-8\mu)$
		Вертикальное, поступательное	$k_z = 4GR/\omega(1-\mu)$
	[3]	Вертикальное, поступательное	$k_z = E\sqrt{A}/\omega(1-\mu^2)$

В табл. 1 приняты следующие обозначения: $A = L_x L_y$ — площадь штампа; L_x, L_y ($L_x \geq L_y$) — размеры штампа на плане соответственно по координатным осям x и y ; R — радиус штампа; E — модуль упругости грунтов основания; G — модуль сдвига грунтов основания; μ — коэффициент Пуассона грунтов основания; $\beta_{x,z}$ — коэффициент для прямоугольного штампа, величина которого зависит от соотношения сторон штампа на плане [2]; ω — коэффициент формы штампа [3].

При определении результирующей реакции грунтовой среды на контактной поверхности штампа исходят из следующих предположений:

при горизонтальном перемещении на подошве штампа грунты испытывают чистый сдвиг;

при вертикальном перемещении на подошве штампа грунты испытывают сжатие.

Статические жесткости основания свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями. В табл. 2 представлены выражения для определения интегральных жесткостей основания для свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями [1].

Т а б л и ц а 2

*Интегральные жесткости основания свай
с прямоугольным и круглым поперечными сечениями*

Вид перемещения	Интегральная жесткость	
	на боковой поверхности свай	на подошве свай
<i>Свая с прямоугольным поперечным сечением</i>		
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \left(\frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{2a_x\bar{h}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_1)} + \frac{4G_1\sqrt{a_y\bar{h}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_1)} \right) \frac{h}{h}$	$k_x = \frac{31,1(1-\mu_2)G_2\sqrt{2a_xa_y}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_2)}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \left(\frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{2a_y\bar{h}}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_1)} + \frac{4G_1\sqrt{a_x\bar{h}}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_1)} \right) \frac{h}{h}$	$k_y = \frac{31,1(1-\mu_2)G_2\sqrt{2a_xa_y}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_2)}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{2h(a_x+a_y)}}{\sqrt{\pi}(7-8\mu_1)}$	$k_z = \frac{4G_2\sqrt{a_xa_y}}{\sqrt{\pi}(1-\mu_2)}$
<i>Свая с круглым поперечным сечением</i>		
Горизонтальное, по оси x	$k_x = \left(\frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{d\bar{h}/6}}{(7-8\mu_1)} + \frac{4G_1\sqrt{d\bar{h}/6}}{(1-\mu_1)} \right) \frac{h}{h}$	$k_x = \frac{31,1(1-\mu_2)G_2d}{2(7-8\mu_2)}$
Горизонтальное, по оси y	$k_y = \left(\frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{d\bar{h}/6}}{(7-8\mu_1)} + \frac{4G_1\sqrt{d\bar{h}/6}}{(1-\mu_1)} \right) \frac{h}{h}$	$k_y = \frac{31,1(1-\mu_2)G_2d}{2(7-8\mu_2)}$
Вертикальное, по оси z	$k_z = \frac{31,1(1-\mu_1)G_1\sqrt{d\bar{h}}}{(7-8\mu_1)}$	$k_z = \frac{2G_2d}{(1-\mu_2)}$

В табл. 2 приняты следующие обозначения: h — высота свай; $h = 1$ м — высота свай единичной длины; a_x, a_y — размеры поперечного сечения свай по направлениям горизонтальных осей x и y соответственно; d — диаметр свай; G_1 — модуль сдвига грунтов основания по высоте свай; μ_1 — коэффициент

Пуассона грунтов основания по высоте сваи; G_2 — модуль сдвига грунтов основания под нижним концом сваи; μ_2 — коэффициент Пуассона грунтов основания под нижним концом сваи.

При определении результирующей реакции грунтовой среды на контактной поверхности сваи исходят из следующих предположений:

при возникновении растягивающих напряжений на боковой поверхности сваи нарушается условие полного прилипания, исходя из условия, что грунт на растяжение не работает;

при вертикальном перемещении сваи по всей боковой поверхности грунты испытывают чистый сдвиг, на подошве сваи — сжатие;

при горизонтальном перемещении сваи на боковых поверхностях происходит чистый сдвиг грунтов. На передней стенке — сжатие, на задней стенке — отрыв грунта от поверхности стенки сваи, на подошве грунты испытывают чистый сдвиг.

Значения интегральных жесткостей равномерно распределяются по высоте сваи.

Выражение для определения интегральной вертикальной жесткости основания одиночной сваи по [4] имеет вид

$$k_z = G_1 l / \beta N,$$

где G_1 — модуль сдвига грунтов основания по высоте сваи; l — длина сваи; β — коэффициент, определяемый по [4, формула 7.33]; N — единичная вертикальная нагрузка.

Интегральная жесткость k_z равномерно распределяется по высоте сваи.

При определении горизонтальной жесткости по [4] свая рассматривается как балка на упругом основании. Расчетные значения жесткостей на боковой поверхности сваи определяются по формуле

$$k_{x(y)} = K b_p z l_i / \gamma_c,$$

где K — коэффициент пропорциональности, принимаемый в зависимости от вида грунта, окружающего сваю, по [4, табл. В.1]; $b_p = 1,5d + 0,5$ — условная ширина сваи, м [4]; l_i — средняя длина элементов, приходящихся на i -й узел сваи; z — глубина расположения узла сваи в грунте, для которого определяется жесткость; $\gamma_c = 1$ — коэффициент условий работы.

Жесткость $k_{x(y)}$ распределяется по линейному закону.

Описание механических и объемных моделей систем «штамп — основание» и «свая — основание». Для создания конечно-элементных механических и объемных моделей систем «штамп — основание» и «свая — основание» применяются пружинно-демпферные (combin14), стержневые (beam189), оболочечные (shell181) и объемные (solid186) элементы.

Механическая модель системы «штамп — основание» состоит из пружинно-демпферных элементов combin14 и оболочечных элементов shell181. В узлах штампа создаются пружины по направлениям декартовой системы координат.

Жесткости основания, приходящиеся на i -й узел штампа,

$$k_{xi} = k_x A_i / \sum A_j; \quad k_{yi} = k_y A_i / \sum A_j; \quad k_{zi} = k_z A_i / \sum A_j,$$

где k_x, k_y, k_z — интегральные жесткости основания штампа вдоль осей x, y, z ; A_i — средняя площадь элементов, приходящаяся на i -й узел штампа; $\sum A_j$ — суммарная площадь всех элементов штампа.

Свободные узлы пружин закрепляются от поступательных перемещений.

Механическая модель системы «свая — основание» представляет собой пружинно-демпферные элементы `combin14` и стержневые элементы `beam189`. В узлах сваи создаются пружины по направлениям декартовой системы координат.

Жесткости основания, приходящиеся на i -й узел боковой поверхности сваи,

$$k_{xi} = k_x l_i / \sum l_j; \quad k_{yi} = k_y l_i / \sum l_j; \quad k_{zi} = k_z l_i / \sum l_j,$$

где k_x, k_y, k_z — интегральные жесткости основания на боковой поверхности сваи вдоль осей x, y, z ; l_i — средняя длина элементов, приходящихся на i -й узел сваи; $\sum l_j$ — суммарная длина всех элементов сваи.

Жесткости основания, приходящиеся на i -й узел подошвы сваи,

$$k_{xi} = k_x; \quad k_{yi} = k_y; \quad k_{zi} = k_z,$$

где k_x, k_y, k_z — интегральные жесткости основания на подошве сваи вдоль осей x, y, z .

Свободные узлы пружин закрепляются от поступательных перемещений.

Объемная модель системы «штамп — основание» построена с применением объемных (`solid186`) и оболочечных (`shell181`) элементов. Нижняя поверхность грунтового массива закрепляется от поступательных перемещений, боковые поверхности грунтового массива закрепляются от поступательных перемещений в нормальном направлении к поверхности.

Объемная модель № 1 системы «свая — основание». Для моделирования грунтового массива и сваи применяется `solid186`. Нижняя поверхность грунтового массива закрепляется от поступательных перемещений, а боковые поверхности грунтового массива закрепляются от поступательных перемещений в нормальном направлении к поверхности.

Объемная модель № 2 системы «свая — основание». Для моделирования грунтового массива применяется `solid186`, для сваи — `beam189`. Нижняя поверхность грунтового массива закрепляется от поступательных перемещений, боковые поверхности грунтового массива закрепляются от поступательных перемещений в нормальном направлении к поверхности.

Сопоставление расчетных значений жесткостей основания, вычисленных различными методами для круглого и прямоугольного штампов и свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями. На рис. 1—2 представлены жесткости основания вдоль осей x, y прямоугольного и круглого штампов в зависимости от соотношения сторон и радиуса штампов. На рис. 3—4 представлены жесткости основания вдоль осей x и y свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями в зависимости от длины сваи.

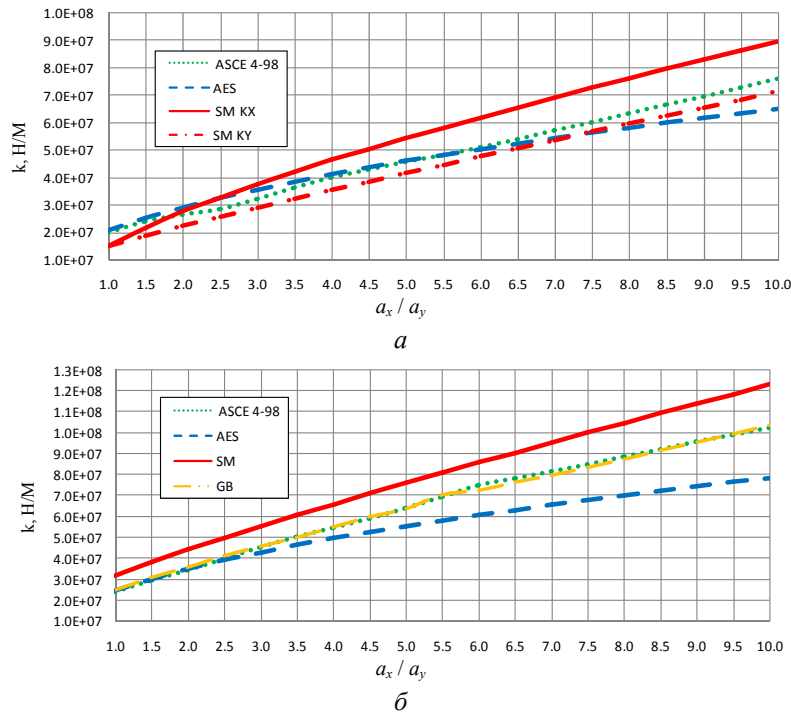


Рис. 1. Жесткость основания прямоугольного штампа в зависимости от соотношения сторон: a — вдоль оси x (y); b — вдоль оси z

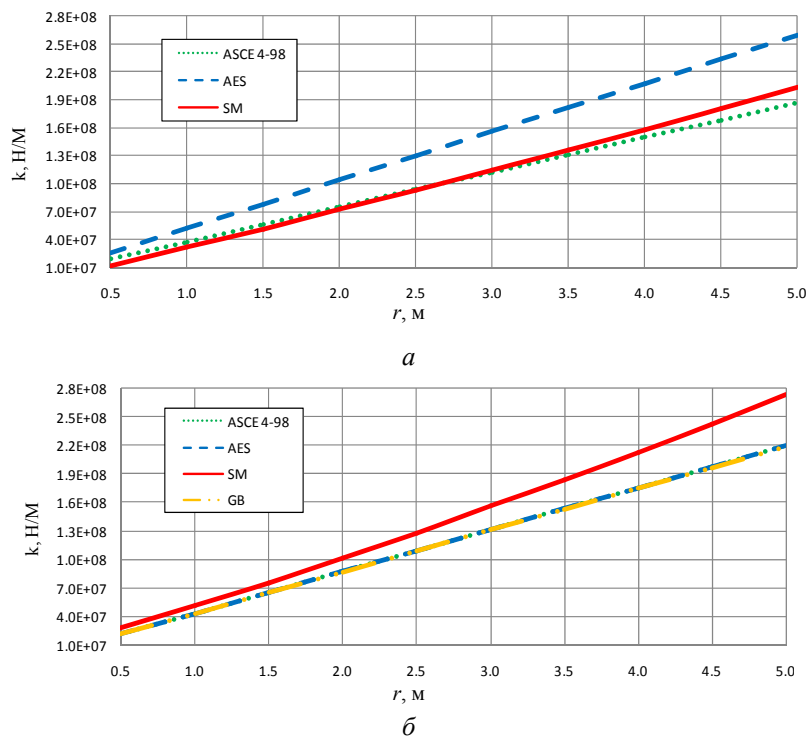


Рис. 2. Жесткость основания круглого штампа в зависимости от радиуса штампа: a — вдоль оси x (y); b — вдоль оси z

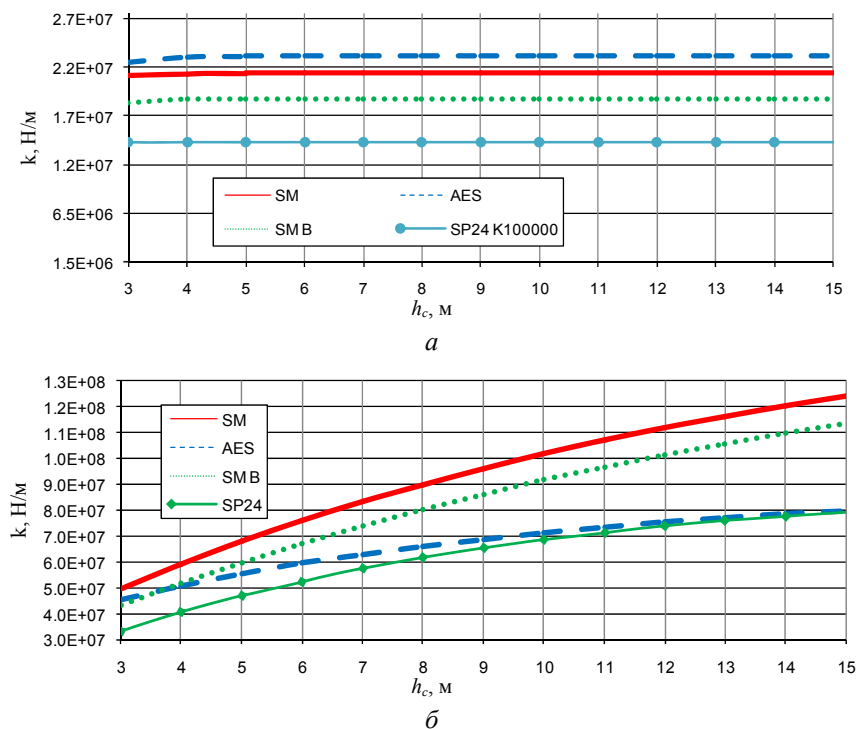


Рис. 3. Жесткость основания сваи с прямоугольным поперечным сечением в зависимости от длины сваи: a — вдоль оси x (y); b — вдоль оси z

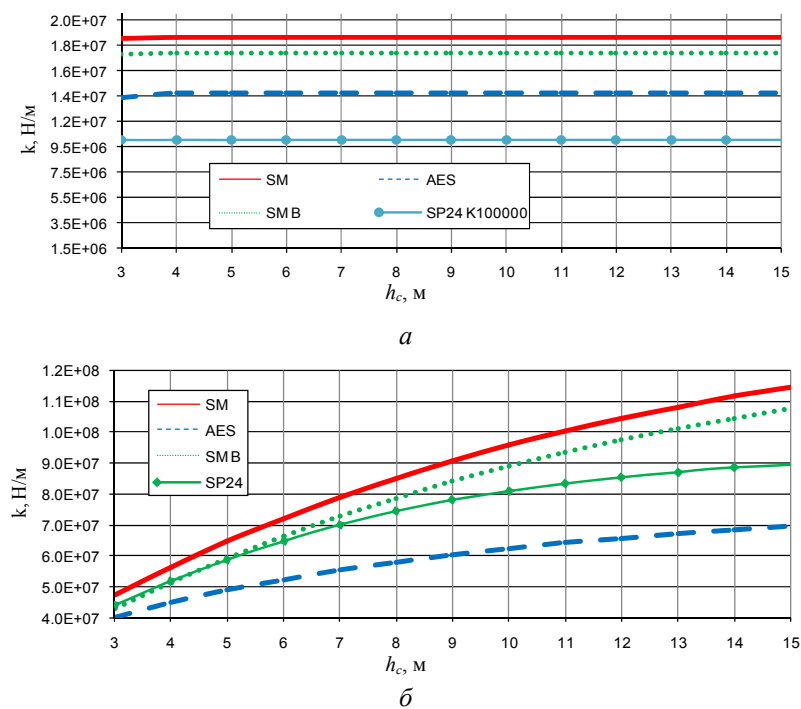


Рис. 4. Жесткость основания сваи с круглым поперечным сечением в зависимости от длины сваи: a — вдоль оси x (y); b — вдоль оси z

На рис. 1—4 введены следующие обозначения: AES — жесткость основания штампа, сваи по механической модели [1]; ASCE 4-98 — жесткость основания штампа по механической модели [2]; GB — жесткость основания штампа по механической модели [3]; SM KX — жесткость основания штампа по объемной модели вдоль оси x ; SM KY — жесткость основания штампа по объемной модели вдоль оси y ; SM — жесткость основания сваи по объемной модели 1; SM B — жесткость основания сваи по объемной модели 2; SP24K100000 — жесткость основания сваи по механической модели [4].

Сопоставление горизонтальных перемещений, вычисленных различными методами для свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями. На рис. 5 представлены горизонтальные перемещения свай с круглым и прямоугольным поперечными сечениями в зависимости от длин свай.

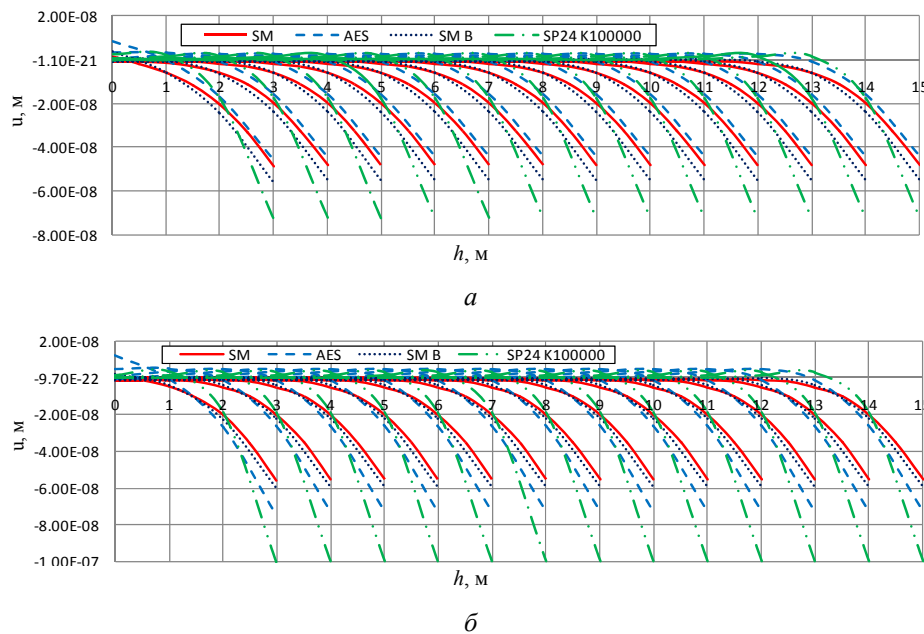


Рис. 5. Горизонтальные перемещения свай в зависимости от длин свай: a — с прямоугольным поперечными сечениями; b — с круглым поперечным сечением

На рис. 5 введены следующие обозначения: AES — горизонтальные перемещения сваи по механической модели [1]; SM — перемещения сваи по объемной модели 1; SM B — горизонтальные перемещения сваи по объемной модели 2; SP24K100000 — горизонтальные перемещения сваи по механической модели [4].

Закключение. Согласно результатам, представленным на рис. 1—4, наблюдается качественное совпадение интегральных жесткостей основания для штампов и свай, полученных по различным методикам. Количественное расхождение между механическими моделями основания [1—4] объясняется заложенными в них коэффициентами, а расхождение результатов механической модели с объемной моделью основания — различными подходами к решению задачи. На рис. 3 и 4 видно, что для моделирования свай в объемной модели основания можно применять стержневые элементы с поправкой на

разницу перемещений, когда свая моделируется объемными элементами. На рис. 5 схемы деформирования свай по механическим и объемным моделям основания имеют схожий характер, следовательно, для учета податливости основания сваи можно использовать как механическую, так и объемную конечно-элементную модель основания в рамках постановки решенных задач. Согласно рис. 3 и 4 значение интегральной горизонтальной жесткости основания сваи с увеличением ее длины от 4 м в практическом отношении остается постоянным. Представленные результаты согласуются с рекомендациями [4], согласно которым при расчете свай всех видов по прочности материала сваю следует рассматривать как стержень, жестко заземленный в грунте, в сечении, расположенном от подошвы ростверка на расстоянии не менее l_1 , определяемом по формуле

$$l_1 = l_0 + 2 / \alpha_{\varepsilon} = 3,08 \text{ м}$$

где l_0 — длина участка сваи от подошвы высокого ростверка до уровня планировки грунта; $\alpha_{\varepsilon} = 0,65 \text{ м}^{-1}$ — коэффициент деформации [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саргсян А. Е., Геращенко В. С. Разработка статической и динамической модели свайных фундаментов с учетом эффекта их взаимодействия с грунтовой средой // Вестник ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. 2010. № 2.
2. ASCE STANDART. Seismic analysis of safety related nuclear structures and commentary on standart for analysis of safety — related nuclear structures. ASCE 4—98. Aproved 1998.
3. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. М. : Стройиздат, 1984.
4. СП 24.13330—2011 Проектирование и устройство свайных фундаментов. М., 2011.
1. Sargsyan A. E., Gerashchenko V. S. Razrabotka staticheskoy i dinamicheskoy modeli svaynykh fundamentov s uchetom effekta ikh vzaimodeystviya s gruntovoy sredoy // Vestnik TsNIISK im. V. A. Kucherenko. 2010. № 2.
2. ASCE STANDART. Seismic analysis of safety related nuclear structures and commentary on standart for analysis of safety — related nuclear structures. ASCE 4—98. Aproved 1998.
3. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanii. M. : Stroyizdat, 1984.
4. SP 24.13330—2011 Proektirovanie i ustroystvo svaynykh fundamentov. M., 2011.

© Геращенко В. С., 2013

Поступила в редакцию
в декабре 2012 г.

Ссылка для цитирования:

Геращенко В. С. Тестирование параметров разработанной статической модели основания свайного фундамента // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 1(25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Gerashchenko-2013_1\(25\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Gerashchenko-2013_1(25).pdf)