

Черныш А. С., канд. техн. наук,
Золотарев К. В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ С РАЗВИТОЙ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

gkadastr@mail.ru

Свайные основания являются в настоящее время наиболее распространенным видом фундаментов применяемых в строительстве высотных зданий. Совершенствование расчета несущей способности свай позволяет с минимальными затратами выбрать оптимальный тип свай, обеспечивая достаточную несущую способность. Существующие методики расчета несущей способности свай по грунту не учитывают форму поперечного сечения сваи, в связи с чем перспективные виды свай не получают достаточного распространения из-за недостаточной обоснованности подтвержденной расчетом.

Ключевые слова: свая, грунт, несущая способность сваи по грунту, эффективный периметр, расчетное сопротивление грунта.

Согласно принятой в Российской Федерации методике расчета висячих свай (свай трения), несущая способность сваи прямо пропорциональна периметру ее поперечного сечения [1]. Вычисление несущей способности забивной сваи проводится по формуле:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{CR} RA + U \sum f_i h_i \gamma_{cf}),$$

где R - расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, принимаемое по таблице 7.1 СП[1]; A - площадь опирания сваи на грунт, м²; U - периметр поперечного сечения сваи, м²; f_i - расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, кПа; h_i - толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; γ_c ; γ_{CR} ; γ_{cf} - коэффициенты условий работы сваи в грунте и грунта на боковой поверхности и острие сваи.

Как показывают многочисленные исследования и экспериментальные данные, фактическая несущая способность висячей сваи не всегда соответствует расчетному значению несущей способности. Этот эффект связан в основном с формой сваи [2], причем, чем сложнее форма поперечного сечения сваи, тем значительнее расхождение в несущей способности, определенной расчетом и испытаниями свай статической нагрузкой. Однако, неоспоримым фактом является утверждение, что повышения несущей способности висячей сваи можно достичь изменением формы поперечного сечения сваи, т.е. увеличением периметра поперечного сечения.

Исследования несущей способности свай в этом направлении позволили предположить, что зависимость периметра поперечного сечения и

несущей способности сваи не является прямо пропорциональной.

В опубликованных ранее наших работах [3, 4, 5] на основании моделирования в программе Liga 9.6 и обработки результатов натурных экспериментов установлено, что наступление предельного состояния при вдавливании сваи в грунт статической нагрузкой (или при ее выдергивании) происходит не только по поверхности свая-грунт, но и по поверхности грунт-грунт. Это означает, что на боковой поверхности сваи возникают зоны, в которых сцепление грунта с бетоном свай выше, чем прочность связей в грунте, выражаемая законом сдвига $\tau = \sigma \tan \phi + c$. Этот эффект наглядно представлен на рис. 1.

Кривая 1, представленная на данном рисунке, - это периметр, по которому происходит срез грунта при перемещении сваи. По наружным граням (Линия 2) срез происходит по телу сваи (бетону), а по внутренним - по грунту. Эффект «залипания» грунта в угловых пазах отмечен многими исследователями при извлечении свай из грунта. Установлено, что длина и форма линии 1 зависит от размеров внутреннего угла ϕ (рис.2). Длина кривой 1 является эффективным периметром сваи.

Эффективный периметр представляет собой множество всех точек вокруг тела сваи на заданной глубине, для которого выполняется равенство:

$$\oint_U \sigma_i u_i = \min,$$

где σ_i - напряжение в грунте поперек i -го участка периметра; u_i - протяженность i -го участка периметра, см. рис. 1.

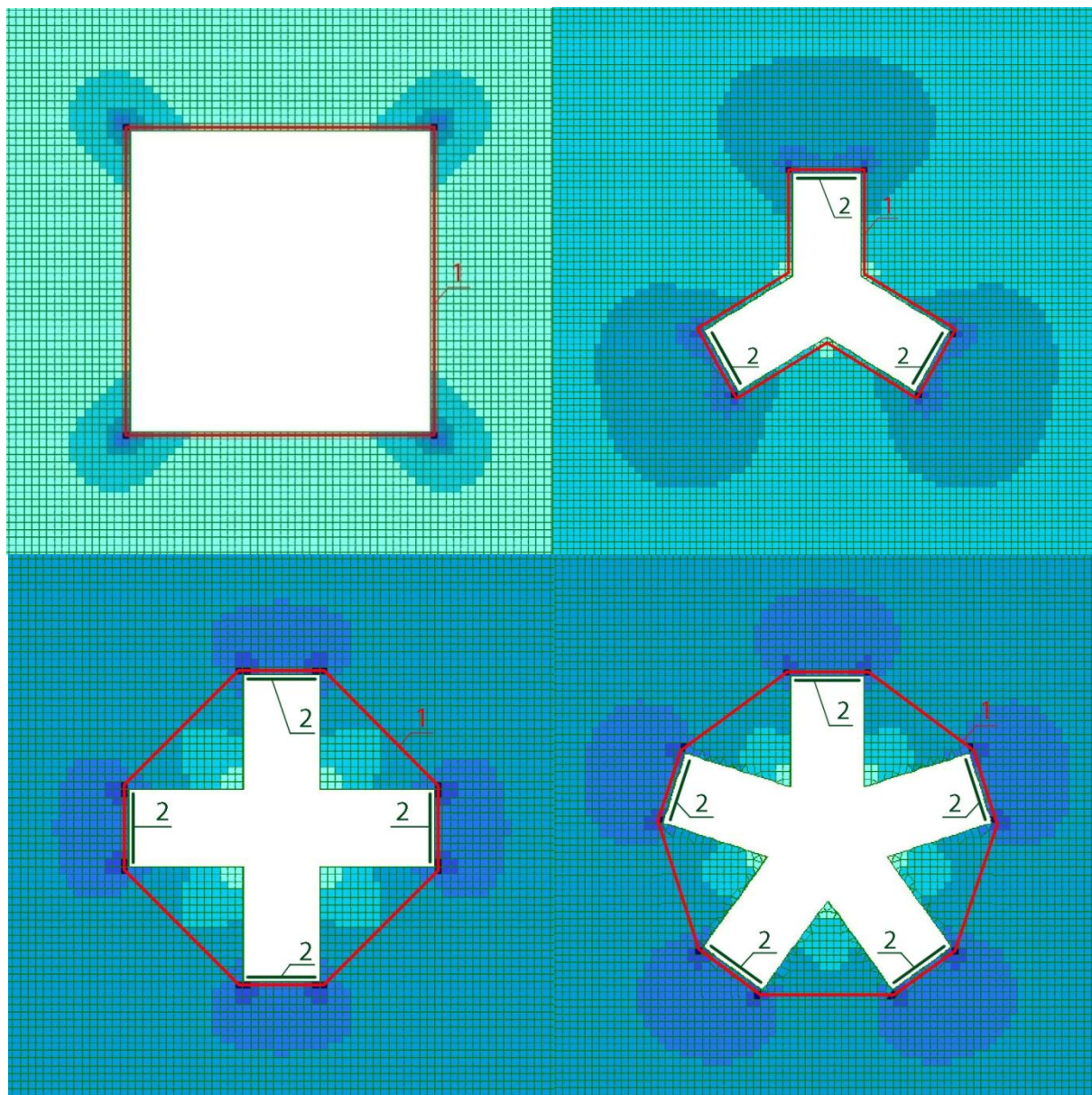


Рис. 1. Зоны грунта в области тела сваи:

1 – эффективный периметр U , 2 – наружные грани

На основании данных натурных экспериментов и моделирования в программе Lira 9.6 составлена табл. 1, в которой оценивается величина эффективного периметра в зависимости от формы сваи. Рассматривались следующие фор-






мы – круглая , квадратная , 3-х лепестковая , 4-х лепестковая , 5-ти лепестковая .

Таблица 1

Зависимость эффективного периметра от формы сваи

Тип сваи	Площадь сечения сваи, $A, \text{ м}^2$	Периметр тела сваи, $U, \text{ м}$	Эффективный периметр сваи, $U_{\mu}, \text{ м}$	Коэффициент формы, U / U_{μ}	U_{μ} / A
Круглая, 300 мм	0,071	0,94	0,94	1,0	13,2
Квадратная, 300 мм	0,09	1,2	1,16**	0,97	12,9
3-х лепестковая*	0,049	1,2	1,06	0,88	21,6
4-х лепестковая*	0,07	1,6	1,23	0,77	17,6
5-ти лепестковая*	0,092	2,0	1,4	0,7	15,2

* - для габаритов сечения сваи: вылет лепестка 150 мм, ширина лепестка 100 мм;

** для квадратной сваи учтено отношение средних нормальных напряжений на грани квадратной сваи и нормальных напряжений вокруг круглой сваи (1,26/1,3=0,97).

Очевидно, что и несущая способность сваи будет определяться эффективным периметром. Рассматривая форму распределения напряжений у острых углов свай (например, у треугольной или квадратной), можно сделать вывод, что срез будет выполнен по краю угла сваи, как по пути с наименьшим значением $\sum \sigma_i u_i$.

Положение линии среза для внутренних углов лопастных свай зависит от значения угла. Минимальное значение угла, при котором отме-

чается явление «зависания» грунта во внутреннем пространстве лопастной сваи - 109° . Для углов свыше 109° срез происходит по грани сваи.

График функции несущей способности F по линии среза внутреннего угла от значений половины угла $\varphi/2$, приведенный на рис. 2, представляет собой зависимость, близкую к прямой пропорциональности, с затуханием при приближении $\varphi=109^\circ$.

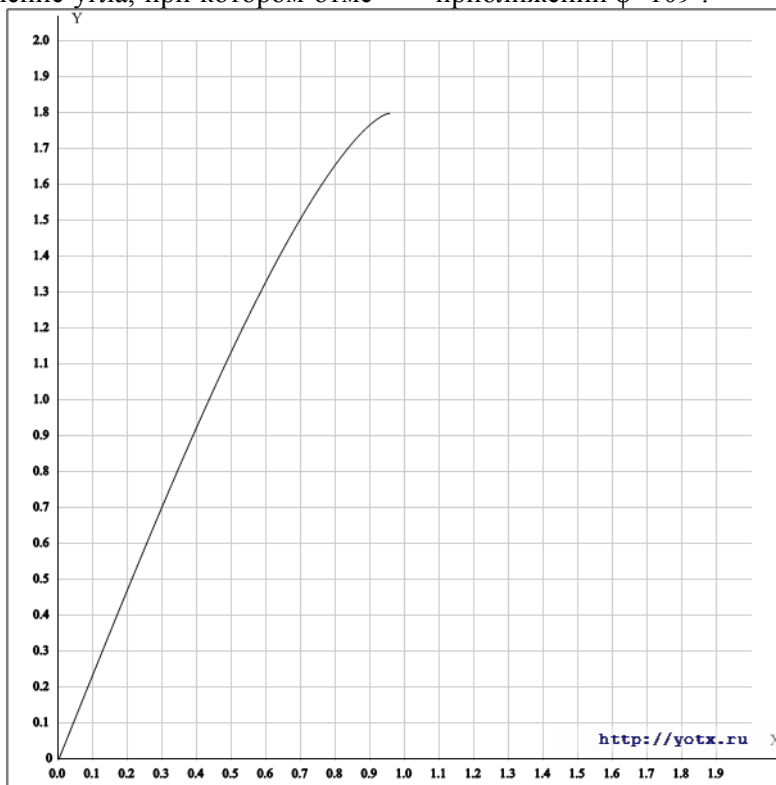


Рис. 2. График функции $F(\varphi/2)$ от угла в радианах

Из трех рассматриваемых в табл. 1 форм поперечного сечения свай максимум несущей способности F_u трехлопастной сваи.

Для проверки обнаруженного эффекта концентрации напряжений в грунте около сваи было получено аналитическое решение для круглой сваи (рис. 3).

Удельное горизонтальное давление грунта на исследуемой глубине p . Бетонная или стальная свая имеет модуль упругости $E_{сваи}$, в тысячи раз превосходящий модуль упругости грунта $E_{грунт}$, поэтому деформации грунта на участке контакта свая-грунт близки к нулю.

Рассматриваемая задача является осесимметричной задачей оплоской деформации. Решение задач подобного рода сводится к интегрированию бигармонического уравнения относительно функции напряжений. Функцию напряжений для осесимметричной задачи будем искать в виде:

$$\varphi = c_1 r^2 \ln r + c_2 r^2 + c_3 \ln r + c_4. \quad (1)$$

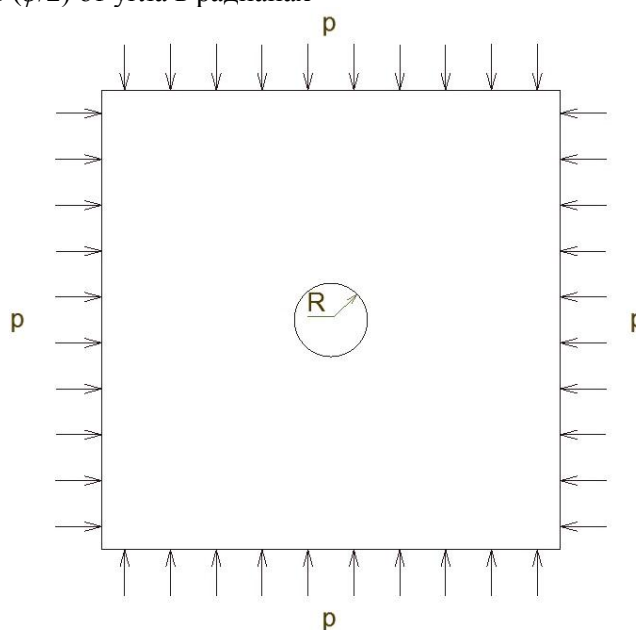


Рис. 3. Схема нагружения поперечного сечения сваи, радиусом R

Решение выполним в полярных координатах. Значения напряжений выразим через искомую функцию:

$$\sigma_r = \frac{d\varphi}{r dr}, \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{d^2\varphi}{dr^2}. \quad (3)$$

где σ_r, σ_θ – напряжения в полярной системе координат вдоль радиуса r и поперек вдоль угла θ .

Записываем уравнения, определяющие решение осесимметричной задачи. Уравнения Коши:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ – деформации в полярной системе координат.

Подставляем в уравнение (4) значение u из уравнения (5), будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr}(r\varepsilon_\theta) - \varepsilon_r &= 0, \\ r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_r &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Запись физического закона теории упругости в полярной системе координат выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_r = (\sigma_r - \nu\sigma_\theta)/E, \quad (7)$$

$$\varepsilon_\theta = (\sigma_\theta - \nu\sigma_r)/E, \quad (8)$$

ν, E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга соответственно для плоской задачи.

Подставляя в уравнение (6) значения деформации физического закона, получим:

$$r \left(\frac{d\sigma_\theta}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r}{dr} \right) + (1 + \nu)(\sigma_\theta - \sigma_r) = 0 \quad (9)$$

Что соответствует уравнению равновесия:

$$\frac{d(r\sigma_r)}{dr} - \sigma_\theta = 0. \quad (10)$$

Подставляя значения (2) и (3) в уравнение (10), получим дифференциальное уравнение третьего порядка

$$\begin{aligned} \frac{d^3\varphi}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2\varphi}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{d\varphi}{dr} &= 0, \\ \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) \right] &= 0, \end{aligned}$$

решение которого имеет вид:

$$\varphi = c_2 r^2 + c_3 \ln r + c_4. \quad (11)$$

Из уравнения (11), применяя ранее принятые значения (2) и (3), получим:

$$\sigma_r = 2c_2 + \frac{c_3}{r^2}, \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = 2c_2 - \frac{c_3}{r^2}. \quad (13)$$

Функция напряжения для пространства без отверстия (или на достаточном удалении от отверстия) имеет вид:

$$\varphi = \frac{1}{2} p r^2,$$

а напряжение равно

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -p,$$

где знак минус указывает на напряжение сжатия.

Запишем граничные условия для нашей задачи:

$$\begin{aligned} r \rightarrow \infty, \sigma_r = \sigma_\theta &= -p, \\ r = R, \varepsilon_r &= 0. \end{aligned}$$

Из первого граничного условия при подстановке в уравнение (12) вытекает значение $2c_2$.

$$2c_2 = -p.$$

Второе граничное условие при выражении его через физический закон (8) с подстановкой в него значения (12), (13) и $2c_2$:

$$-p + \frac{c_3}{R^2} = \nu(-p - \frac{c_3}{R^2}),$$

отсюда

$$c_3 = \frac{1-\nu}{1+\nu} p R^2.$$

а из уравнения (12)

$$\sigma_r = p + p \frac{1-\nu R^2}{1+\nu r^2}. \quad (14)$$

Используемая в выражении выше постоянная Пуассона приведена для плоской задачи. Постоянная Пуассона для плоской задачи ν^* равна:

$$\nu^* = \frac{\nu}{1-\nu},$$

тогда

$$\begin{aligned} 1 - \nu^* &= \frac{1-2\nu}{1-\nu}, \\ 1 + \nu^* &= \frac{1}{1-\nu}. \end{aligned}$$

Уравнение (14), выраженное через привычную постоянную (коэффициент) Пуассона, будет выглядеть как:

$$\sigma_r = p + p(1 - 2\nu) \frac{R^2}{r^2}. \quad (15)$$

Для границы контакта грунт-свая, $R=r$ в формуле 15:

$$\sigma_R = 2p(1 - \nu).$$

Для данных, приведенных в табл. 1: $p=1 \text{ м/м}^2$, $\nu=0,35$, отсюда напряжения, нормальные к периметру круглой сваи:

$$\sigma_R = 2(1 - 0,35) = 1,3 \text{ т/м}^2.$$

Полученное аналитическим решением значение концентрации напряжения для круглой сваи совпадает с решением, полученным численным методом при компьютерном моделировании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свод правил СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. Издание официальное. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 86с.
2. Калачук Т.Г. Модульные сваи таврового сечения и составные на их основе в глинистых грунтах: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02 /

Калачук, Татьяна Григорьевна. – Белгород, 2004. 136 с.

3. Zolotarev C.V., Kalachuk T.G. Bearing capacity of piles with improved lateral surface (статья). 3rd International scientific conference "European Applied Sciences: modern approaches in scientific research", 20-21th May 2013 Volume 2, Stuttgart, Germany. S. 28-33.

4. Zolotarev C.V., Kalachuk T.G. Bearing capacity of piles with improved lateral surface (статья). 1st International Scientific Conference

"Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings". Conference papers. Volume 1, June 29, 2013, New York, USA. S. 199-204.

5. Золотарев К.В. Влияние формы свай с развитой боковой поверхностью на несущую способность (статья). Сборник материалов III Международной научно-технической интернет-конференции «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства». Харьков, 15 апреля - 15 мая 2012 г., С. 98-102.