УДК 624.154: 624.04

А.Л. Готман, Л.Я. Соколов

Институт «БашНИИстрой», Уфа, Россия

РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННЫХ СВАЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ

Рассмотрены сопротивление и характер деформирования пирамидально-призматической сборно-монолитной комбинированной сваи при действии горизонтальной нагрузки. Натурными экспериментами установлено, что напряженно-деформированное состояние исследуемой сваи зависит от соотношения длин ее частей (пирамидальной штампованной и призматической забивной) и жесткости на изгиб ее пирамидальной части. На основе полученных данных разработан метод расчета комбинированной сваи переменного сечения на горизонтальную нагрузку с учетом нелинейности деформации грунтового многослойного основания.

Ключевые слова: комбинированная свая, горизонтальное перемещение, изгибающий момент, коэффициент постели.

A.L. Gotman, L.YA. Sokolov

Scientific-Research Institute «BashNIISTroy», Ufa, Russian Federation

ANALYSIS OF A COMPOSITE PILE OF VARIABLE SECTION UNDER THE LATERAL LOAD

Resistance and deformation behavior of tapered-prismatic cast-in-place composite piles under the lateral load are presented in the paper. In situ experiments show stress and strain state of the test pile to be dependent upon relation of its parts lengths (tapered and prismatic) and bending stiffness of its tapered part. Based on data received, method of analysis of a composite pile of variable section under the lateral load is worked out considering the strain nonlinearity of multilayer foundation soil.

Keywords: composite pile, lateral displacement, bending moment, coefficient of subgrade reaction.

Введение

В последнее десятилетие внимание исследователей уделялось сваям переменного сечения (пирамидальные, конусные, бипирамидальные), поскольку они значительно эффективнее свай постоянного по длине сечения работают на вертикальную нагрузку, так как имеют наклонные грани, создающие дополнительное распорное сопротивление по грунту. Такие сваи могут быть как забивные, так и набивные, бетонируемые в выштампованных скважинах.

Набивные пирамидальные сваи могут иметь достаточно большие размеры поперечного сечения верхней части (до $1,2 \times 1,2$ м), поэтому их целесообразно использовать в качестве односвайного фундамента под колонны каркасных зданий и сооружений, в том числе опор трубопроводов.

Пирамидальные сваи в качестве односвайных фундаментов также весьма эффективны и с точки зрения их работы на горизонтальную нагрузку в силу развитого поперечного сечения верхней части сваи. Однако несущая способность таких свай на вертикальную нагрузку ограничена технологическими возможностями сваепогружающего оборудования.

Одним из путей увеличения сопротивления таких свай является применение комбинированной двухэлементной конструкции односвайного фундамента (в дальнейшем для краткости будем называть «комбинированная свая»), изготавливаемой по следующей технологии. В выштампованную скважину после извлечения пирамидального штампа – скважинообразователя погружают молотом копра забивную сваю до отметки выше дна скважины на величину, требуемую для сопряжения этой сваи с телом набивной сваи. Затем в скважину устанавливают арматурный каркас, укладывают бетонную смесь и формируют оголовок сваи для монтажа колонны.

Такие односвайные фундаменты под колонны каркасных зданий и сооружений всегда работают в условиях совместного действия на них горизонтальной, моментной и вертикальной нагрузок, поэтому актуальной является задача исследования работы таких свай на горизонтальную нагрузку.

Экспериментальные исследования

С целью получения данных для построения расчетной схемы таких свай на действие горизонтальной нагрузки проведены эксперименты на натурных сваях в полевых условиях на опытной площадке, сложенной глинистыми грунтами тугопластичной консистенции со следующими физико-механическими характеристиками: $\rho = 1,95 \text{ т/м}^3$, $C = 0,021 \text{ МПа}$, $\varphi = 18^\circ$, $E = 10 \text{ МПа}$.

На опытной площадке молотом копра был забит штамп-скважинообразователь пирамидальной формы с размером поперечного сечения верха 120×110 см, нижнего конца – 30×30 см, длиной 3,5 м.

После отдыха 7 дней забитый штамп, который можно рассматривать как забивную сваю, был испытан на горизонтальную нагрузку. Затем штамп был извлечен из грунта, и в скважину забита свая сечением 30×30 см, длиной 8 м до отметки головы сваи выше дна скважины на 80 см. В скважину на всю глубину установлен арматурный каркас пирамидальной формы, включающий 12 стержней $\varnothing 22$ АIII, т.е. по 4 стержня по каждой стороне. После этого свая забетонирована была путем укладки в скважину бетонной смеси марки В20 с вибрированием.

После набора бетоном проектной прочности комбинированная свая была испытана на горизонтальную нагрузку.

Оба испытания проводились по ускоренной методике БашНИИ-строя, в соответствии с которой за критерий стабилизации горизонтальных перемещений сваи принималось перемещение в уровне поверхности грунта 0,1 мм за последние 15 минут.

Горизонтальные перемещения сваи измерялись в уровне поверхности грунта и на высоте 1 м от поверхности грунта.

На рис. 1 представлены результаты испытаний пирамидальной сваи (штампа-скважинообразователя): графики «нагрузка–перемещение» и «нагрузка–угол поворота» сваи (рис. 1, а), а также деформационная схема сваи как абсолютно жесткого стержня поворачивающегося вокруг точки нулевых перемещений (рис. 1, б), что для короткой сваи ($l = 3,5$ м) с большим верхним поперечным сечением (120×110 см) является вполне обоснованным (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытания на горизонтальную нагрузку пирамидальной сваи (штампа-скважинообразователя)

Параметры деформации	Значения параметров деформации при горизонтальной нагрузке на сваю, кН					
	30	60	90	120	150	180
Перемещение сваи в уровне поверхности грунта, U_0 , мм	1,80	2,90	4,40	7,60	11,50	19,60
Перемещение сваи на высоте 1 м от поверхности грунта U_1 , мм	2,80	3,95	5,91	10,20	16,10	27,70
Угол поворота сваи φ , рад	0,00 100	0,00 105	0,00 151	0,00 260	0,00 460	0,00 810
Глубина точки нулевых перемещений l_0 , м	1,800	2,762	2,914	2,923	2,500	2,420
Смещение нижнего конца сваи U_n , мм	–1,700	–0,775	–0,885	–1,500	–4,600	–8,747

Как видно из графика «нагрузка–перемещение», до нагрузки 90 кН эта зависимость линейная, затем график искривляется, но предельного состояния достичь не удалось, несмотря на то, что перемещение в уровне поверхности грунта достигло 21 мм.

Зависимость «нагрузка–угол поворота» в целом аналогична графику «нагрузка–перемещение». Глубина точки нулевых перемещений с увеличением нагрузки изменяется: сначала увеличивается, достигая 2,9 м, затем при максимальной нагрузке уменьшается до минимума – 2,4 м. Следует отметить, что на всех ступенях нагрузки, начиная с первой и до последней, имеет место перемещение нижнего конца в обратную сторону по отношению к направлению действия горизонтальной нагрузки.

Рис. 1. Графики «нагрузка–перемещение» пирамидальной сваи (а): 1 – в уровне поверхности грунта; 2 – на высоте 1 м от поверхности грунта; 3 – «нагрузка–угол поворота»; схема поворота оси сваи (б): 1–5 – при горизонтальной нагрузке 60, 90, 120, 150 и 180 кН соответственно

Далее рассмотрим результаты подобных испытаний комбинированной сваи. Анализ результатов испытаний выполним по аналогии с испытанием пирамидальной сваи. Результаты испытаний представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Как видно, наличие забивной сваи ниже пирамидальной части существенно меняет картину деформаций сваи под нагрузкой. До нагрузки 160 кН и перемещении 12 мм зависимость «нагрузка–перемещение» практически линейная, угол поворота также увеличивается линейно.

Таблица 2

Результаты испытания на горизонтальную нагрузку комбинированной сваи

Параметры деформации	Значения параметров деформации при горизонтальной нагрузке на сваю, кН					
	40	80	120	160	200	240
Перемещение сваи в уровне поверхности грунта, U_0 , мм	1,90	4,10	7,60	10,20	16,80	24,80
Перемещение сваи на высоте 1 м от поверхности грунта U_1 , мм	2,47	5,30	9,90	13,50	21,60	32,40
Угол поворота сваи φ , рад	0,00057	0,00120	0,00230	0,00330	0,00480	0,00760
Глубина точки нулевых перемещений l_0 , м	3,333	3,417	3,304	3,091	3,500	3,263
Смещение нижнего конца сваи U_n , мм	-0,095	-0,100	-0,451	-1,350	-0,000	-1,801

Затем, по-видимому, в стыке забивной сваи с пирамидальной раскрылись трещины, жесткость на изгиб уменьшилась, и отмечается скачкообразное увеличение перемещения и угла поворота. Характерным является то, что точка нулевых перемещений находится в области сопряжения забивной сваи с пирамидальной в пределах линейной части графика (до нагрузки 160 кН), т.е. голова забивной сваи практически не претерпевает горизонтальных перемещений. При дальнейшем увеличении нагрузки несколько увеличивается перемещение нижнего конца пирамидальной сваи, а следовательно, и головы забивной сваи. Однако это перемещение невелико – не более 2 мм.

Рис. 2. Графики «нагрузка-перемещение» комбинированной сваи (а): 1 – в уровне поверхности грунта; 2 – на высоте 1 м от поверхности грунта; 3 – «нагрузка-угол поворота»; схема поворота пирамидальной части сваи (б): 1–5-при горизонтальной нагрузке 80, 120, 160, 200 и 240 кН соответственно

При этом отмечается существенное увеличение сопротивления такой сваи горизонтальной нагрузке по сравнению с пирамидальной сваей: при перемещении 10 мм со 120 до 140 кН, т.е. на 17 %, и при перемещении 20 мм – со 180 до 220 кН или на 22 %. Это увеличение объясняется включением в работу забивной сваи, что необходимо учесть в расчетной схеме.

Таким образом, при построении расчетной схемы такой сваи необходимо учесть следующее.

При действии горизонтальной нагрузки перемещение нижнего конца верхней пирамидальной части сваи, а следовательно, жестко соединенной с ней головы забивной сваи, не превышает 2 мм, поэтому забивная свая работает в области линейных деформаций. Верхняя пирамидальная часть деформируется нелинейно, поэтому для получения достоверных данных во всем диапазоне перемещений в расчетной схеме следует учитывать нелинейность деформаций основания.

Методика расчета

Рассмотрим общий случай конструктивного решения составной комбинированной сваи переменного сечения, когда верхняя часть имеет переменное по глубине сечение, нижняя часть – постоянное по глубине сечение.

Примем следующие предпосылки.

1. Комбинированная свая рассматривается как плоская система.
2. Основание по глубине неоднородное, многослойное, разбито на n слоев в пределах глубины пирамидальной части с постоянными в пределах каждого слоя коэффициентами постели K_i .
3. Размер поперечного сечения пирамидальной части фундамента dz с глубиной изменяется по линейной зависимости $d_z = d_0(1 - \xi z)$,

$$\xi = \frac{(d_0 - d_n)}{d_0 l_n}, \quad (1)$$

где d_0 , d_n – размер сечения верха и низа пирамидальной части; l_n – длина пирамидальной части; z – текущая координата по глубине.

4. Изгибная жесткость верхней пирамидальной части принимается бесконечной, а закономерность изменения ее горизонтального перемещения в грунте по глубине имеет вид

$$u_z = u_0 - \varphi_0 z \quad (2)$$

где U_0 и φ_0 – горизонтальное перемещение и угол поворота сваи в уровне поверхности грунта.

5. В соответствии с моделью местных деформаций сопротивление грунта на лобовой поверхности пирамидальной части сваи q_z пропорционально ее перемещению U_z и коэффициенту постели K_z

$$q_z = U_z K_z d_z, \quad (3)$$

где d_z – размер поперечного сечения пирамидальной сваи на глубине z .

6. Призматическая свая жестко закреплена в пирамидальной части в уровне ее нижнего торца, а реакция головы сваи от действия на нее нагрузок определяется жесткостными характеристиками ρ_2, ρ_3 и ρ_4 [1].

Расчетная схема комбинированной сваи переменного сечения представлена на рис. 3.

Рис. 3. Расчетная схема свай: *а* – конструктивная схема с нагрузками; *б* – эпюра коэффициентов постели, сплошная толстая линия – расчетная; штриховая толстая – сопротивление грунта под наконечником зонда при статическом зондировании; *в* – деформационная схема свай

Запишем изгибающий момент M_c и поперечную силу Q_c , возникающие в пирамидальной части сваи в месте ее сопряжения с призматической

свай от ее реакции при горизонтальном перемещении пирамидальной сваи U_0 и угле поворота φ_0 в уровне поверхности грунта:

$$\begin{aligned} M_c &= \rho_4 \varphi_0 + \rho_3 (\varphi_0 l_n - U_0), \\ Q_c &= \rho_2 (U_0 - \varphi_0 l_n) - \rho_3 \varphi_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Из условия равновесия действующих и реактивных сил в соответствии с расчетной схемой, изгибающий момент M_z и поперечная сила Q_z в произвольном сечении пирамидальной сваи на глубине z при действии на фундамент горизонтальной нагрузки H и изгибающего момента M в уровне поверхности грунта имеют вид

$$M_z = M + H_z - M_z^{\text{гр}}; \quad Q_z = H - Q_z^{\text{гр}}, \quad (5)$$

где $M_z^{\text{гр}}$ и $Q_z^{\text{гр}}$ – изгибающий момент и поперечная сила соответственно в произвольном сечении пирамидальной сваи на глубине z от сопротивления грунта $q_{\bar{z}}$ i -го слоя на глубине $\bar{z}$ (см. рис. 3). Они определяются из выражений

$$\begin{cases} M_{z_i}^{\text{гр}} = K_i \int_{z_i-1}^{z_i} (d_0 - \xi d_0 \bar{z})(U_0 - \bar{z} \varphi_0)(z - \bar{z}) d\bar{z}, \\ Q_{z_i}^{\text{гр}} = K_i \int_{z_i-1}^{z_i} (d_0 - \xi d_0 \bar{z})(U_0 - \bar{z} \varphi_0) d\bar{z}. \end{cases} \quad (6)$$

После интегрирования выражений (6), суммирования результатов по длине пирамидальной части сваи до слоя, в котором расположено сечение z , и подстановки их в (5), принимая за граничные условия выражения (4) при $z = l_n$, получим систему двух уравнений. Решая ее относительно U_0 и φ_0 , после некоторых преобразований имеем

$$U_0 = H\delta_1 + M\delta_2; \quad \varphi_0 = H\delta_2 + M\delta_3, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\phi_4 - l_n}{\eta}; \quad \delta_2 = \frac{-\phi_2}{\eta}; \quad \delta_3 = \frac{\phi_1}{\eta}, \\ \eta &= \phi_2 \phi_3 - \phi_1 \phi_4. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\phi_1 = d_0 \frac{A}{12} - \rho_2; \quad \phi_2 = d_0 \frac{B}{12} + \rho_2 l_n + \rho_3, \quad (9)$$

$$\phi_3 = \frac{d_0}{12} (A l_n + B) + \rho_3; \quad \phi_4 = \frac{d_0}{12} (B l_n - C) - \rho_3 l_n - \rho_4,$$

$$A = 6b\xi - 12a; B = 6b - 4d\xi; C = 4d - 3c\xi, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^n K_i(z_i - z_{i-1}); b = \sum_{i=1}^n K_i(z_i^2 - z_{i-1}^2), \\ d &= \sum_{i=1}^n K_i(z_i^3 - z_{i-1}^3); c = \sum_{i=1}^n K_i(z_i^4 - z_{i-1}^4), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где z_i , и z_{i-1} – расстояние от поверхности грунта до подошвы и кровли i -го слоя грунта соответственно.

Выражения для определения изгибающего момента M_{nz} и поперечной силы Q_{nz} в пирамидальной свае на глубине z будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} M_{nz} &= M = H_z + U_0\Phi_3^1 + \Phi_0\Phi_4^1, \\ Q_{nz} &= H - U_0 - \Phi_1^1 - \Phi_0\Phi_2^1, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\text{где } \Phi_1^1 = d_0 \frac{A_z}{12}; \Phi_2^1 = d_0 \frac{B_z}{12}; \Phi_3^1 = \frac{d_0}{12}(A_z z + B_z); \Phi_4^1 = \frac{d_0}{12}(B_z z - C_z). \quad (13)$$

Значения A_z , B_z и C_z определяются по формулам (10) и (11), при этом суммирование в (11) производится до слоя, в котором находится сечение z .

Усилия в стыке призматической сваи с пирамидальной определяются по формулам (4).

Жесткостные характеристики свай ρ_2, ρ_3 и ρ_4 определяются по формулам, изложенным в [1], при этом перемещения от единичных усилий, входящие в эти формулы, могут определяться по разным методикам. Так, если принять закон изменения коэффициента постели по глубине в виде линейной функции от текущей координаты, то можно использовать методику СНиП.

Однако наиболее достоверные результаты будут получены, если принять расчетную схему с использованием многослойного основания с постоянным в пределах каждого слоя коэффициентом постели в соответствии с решением [2] с использованием МКЭ.

Коэффициент постели K_i i -го слоя грунта в пределах глубины пирамидальной части можно определять по формуле (1) в работе [3], которая позволяет учитывать нелинейность деформации основания и использовать в качестве расчетной характеристики грунта как модуль деформации, так и данные статического зондирования.

Учет нелинейности работы грунтового основания осуществляется по итерационной схеме путем пересчета на каждой итерации коэффициента постели K по контактным напряжениям и перемещениям сваи, определенным предыдущим расчетом до условной сходимости результатов последнего и предыдущего расчетов, например, по параметру перемещения сваи в уровне поверхности грунта U_0 .

Значение K_i на каждой i -й итерации определяется как

$$K_i = K_{i-1} \left[1 - \left(\frac{\sigma_{i-1}}{q_s} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где $\sigma_{i-1} = U_{i-1} K_{i-1}$; q_s – сопротивление грунта под наконечником зонда при статическом зондировании.

Критерием сходимости принимается выполнение следующего условия

$$U_i - U_{i-1} \leq 0,0001 \text{ м.} \quad (15)$$

Результат расчета комбинированной сваи на горизонтальную нагрузку по предложенной методике представлен на рис. 4.

Рис. 4. Графики «нагрузка–перемещения» комбинированной сваи в уровне поверхности грунта: 1 – по опыту; 2 – по расчету

Как видно, расчетная кривая близка к экспериментальной: максимальное расхождение расчета с опытом при перемещении головы сваи на всех этапах нагружения в уровне поверхности грунта составляет в «запас» 10–15 %.

Выводы

1. Комбинированная свая переменного сечения состоит из двух участков, как правило, с различной во всех случаях жесткостью на изгиб, что определенным образом сказывается на характере ее деформирования при действии горизонтальной нагрузки. Сопротивление комбинированной сваи горизонтальной нагрузке больше сопротивления соответствующей пирамидальной сваи и зависит от соотношения длин ее частей (штампо набивной и забивной) и жесткости на изгиб пирамидальной части.

2. Экспериментально на натурных сваях получены закономерности поведения комбинированной сваи переменного сечения при действии горизонтальной нагрузки. Установлено, что в месте стыка пирамидальной и призматической части сваи горизонтальные перемещения достаточно малы, т.е. нижняя призматическая часть сваи работает в области упругих деформаций. Верхняя пирамидальная часть сваи деформируется нелинейно.

3. На основе результатов экспериментальных исследований построена расчетная схема и разработан метод расчета комбинированной сваи переменного сечения на горизонтальную нагрузку, в том числе с учетом нелинейности деформации грунтового многослойного основания.

Библиографический список

1. Завриев К.С., Шпиро Г.С. Расчеты фундаментов опор глубокого заложения. – М.: Транспорт, 1970. – 215 с.

2. Готман А.Л. Расчет свай переменного сечения на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок методом конечных элементов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 1. – С. 6–12.

3. Готман А.Л. Расчет пирамидальных свай на совместное действие вертикальной, горизонтальной и моментной нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 1 – С. 12–14.

References

1. Zavriev K.S., Shpiro G.S. Raschety fundamentov opor glubokogo zalozheniya [Analysis of foundations of deep bearings]. Moscow: Transport, 1970. 215 s.
2. Gotman A.L. Raschet svaj peremennogo secheniya na sovmestnoe dejstvie vertikal'noj i gorizonta'noj nagruzok metodom konechnykh elementov [Analysis of piles of variable section under combined effect of the vertical and horizontal loads by finite elements method]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2000, no. 1. pp. 6-12.
3. Gotman A.L. Raschet piramidal'nykh svaj na sovmestnoe dejstvie vertikal'noj, gorizonta'noj i momentnoj nagruzok [Analysis of tapered piles under combined effect of the vertical, horizontal and moment loads]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1987, no. 1. pp. 12-14.

Об авторах

Готман Альфред Леонидович (Уфа, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке института «БашНИИСтрой»; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Соколов Лев Яковлевич (Уфа, Россия) – младший научный сотрудник отдела оснований и фундаментов института «БашНИИСтрой»; e-mail: l.sokolov@mail.ru

About the authors

Gotman Alfred Leonidovich (Ufa, Russian Federation) – Doctor Technical Sciences, Professor, Deputy Director of Science of the Scientific-Research Institute “BashNIIstroy”; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Sokolov Lev Yakovlevich (Ufa, Russian Federation) – Junior Research Worker, Institute “BashNIIstroy”; e-mail: lsf_ps@mail.ru

Получено 19.03.2014