

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Плоская расчетная схема свайного фундамента включает в себя абсолютно жесткий ригель (плиту ростверка), гибкие стержни (сваи) и сплошную среду, деформации которой в горизонтальном направлении определяются согласно гипотезе коэффициента постели, линейно увеличивающегося по глубине (грунтовое основание) [1], (рис. 1).

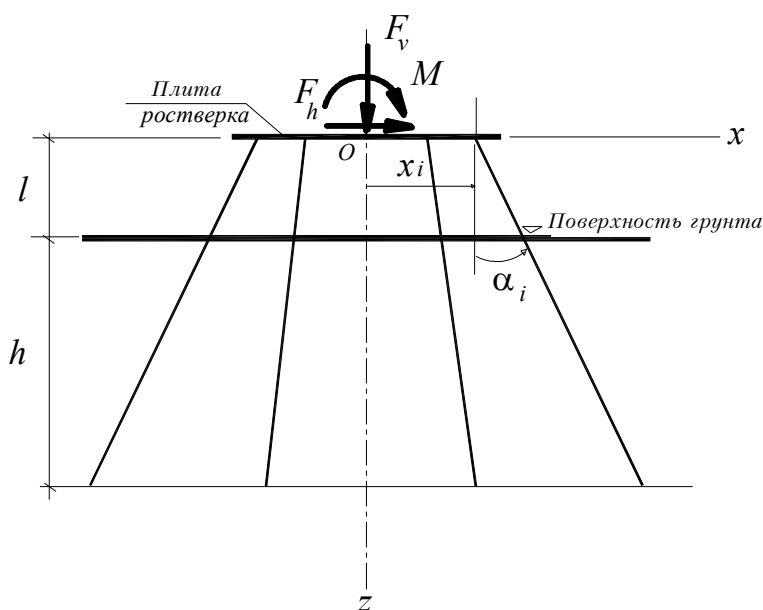


Рис. 1. Плоская расчетная схема свайного фундамента

Каноническая система уравнений обобщенной методики расчета свайного фундамента по плоской схеме имеет вид:

$$\begin{aligned} r_{vv}v + r_{vu}u + r_{v\omega}\omega &= F_v, \\ r_{uv}v + r_{uu}u + r_{u\omega}\omega &= F_h, \\ r_{\omega v}v + r_{\omega u}u + r_{\omega\omega}\omega &= M. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты канонической системы $r_{vv} \dots r_{\omega\omega}$ характеризуют жесткость конструкции. Результатом решения системы уравнений являются перемещения жесткой плиты ростверка — вертикальное v , горизонтальное u и угол поворота ω в зависимости от действующих на подошву ростверка нагрузок: вертикальной силы F_v , горизонтальной силы F_h и момента M . В зависимости от перемещений плиты ростверка определяются усилия в отдельных сваях в уровне подошвы плиты:

$$\begin{aligned} N_i &= \rho_1[u \sin \alpha_i + (v + \omega x_i) \cos \alpha_i], \\ H_i &= \rho_2[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] - \rho_3 \omega, \\ M_i &= \rho_3[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] + \rho_4 \omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 и ρ_4 — характеристики жесткости свай; x_i и α_i — координата точки пересечения оси свай с подошвой плиты ростверка и угол наклона свай к вертикали.

Далее следует проверка свай по несущей способности [2, 3]:

$$N_i \leq \frac{F_d}{\gamma_n}, \quad (3)$$

где F_d — несущая способность сваи на вдавливание (или F_{du} — на выдергивание); γ_n — коэффициент надежности по грунту.

Расчет на действие горизонтальной и моментной нагрузок выполняется в общей системе расчетов свайного фундамента по предельным состояниям. Основным из этих расчетов является уравнение по проверке устойчивости окружающего сваю грунта (или расчет по определению бокового давления сваи на грунт). В предыдущей статье настоящего сборника*) были выведены формулы для расчета сваи по несущей способности на горизонтальную и моментную нагрузки с использованием указанной проверки, решение которых заключалось в выполнении условий:

$$H_i \leq F_{dh}, \quad M_i \leq F_{dM}, \quad (4)$$

где F_{dh} и F_{dM} — несущая способность сваи на горизонтальную и моментную нагрузки.

Таким образом, основные проверки по несущей способности сваи можно выразить неравенствами (3) и (4). При невыполнении этих условий необходимо изменять конструкцию свайного фундамента. В то же время ресурсы по деформациям могут содержать в себе еще значительный запас. Тогда возникает вопрос о возможности допущения перераспределения нагрузок между сваями таким образом, чтобы ряд свай работал в предельном состоянии. Более полное использование запасов несущей способности свайного фундамента открывает возможности их оптимального проектирования.

В данной статье приводится вариант решения задачи оптимального проектирования свайного фундамента, основанный на расчете перераспределения нагрузок между сваями, строгом соблюдении равенства действующих усилий в сваях ее несущей способности на вертикальную, горизонтальную и моментную нагрузки. Это касается тех свай, в которых при действующих нагрузках, как показали стандартные расчеты по обобщенной методике, полученные усилия превышают предельные значения. В то же время предлагаемый вариант решения в принципе соответствует обобщенной методике расчета, принятой в настоящее время в качестве основной расчетной модели свайного фундамента.

Итак, прежде всего необходимо выполнить стандартный расчет свайного фундамента по обобщенной методике. Затем следует сделать анализ, порядок проведения которого изложен ниже.

Допустим, что при некоторой нагрузке в ряде свай были нарушены условия (3) и (4). Тогда примем гипотезу, что в этих сваях усилия, превысившие предельные значения после шага расчета, должны равняться своим предельным значениям. Введем показатели работы сваи: δ_{iv} и δ_{iu} . При работе сваи на вдавливающую и выдергивающую нагрузки в допредельной стадии $\delta_{iv} = 1$ и в предельной стадии $\delta_{iv} = 0$. Аналогично работа сваи на горизонтальную и моментную нагрузки характеризуется значениями показателя $\delta_{iu} = 1$ (допредельная стадия), $\delta_{iu} = 0$ (предельная стадия).

*) См. Королев К.В., Полянкин А.Г. Расчет несущей способности сваи на горизонтальную и моментную нагрузки.

При значении $\delta_{iv} = 0$ нормальная сила $N_i = F_d$ (при явлении вдавливания свай) и $N_i = -F_{du}$ (при явлении выдергивания свай).

Аналогично при значении $\delta_{iu} = 0$ поперечная сила $H_i = F_{dHi}k_{iH}$ и $M_i = F_{dMi}k_{iM}$. Отметим, что эти условия будут иметь место одновременно. Коэффициенты k_{iH} и k_{iM} контролируют знаки соответствующих усилий и устанавливаются по формулам:

$$k_{iH} = \frac{H_i}{\text{abs}(H_i)}, \quad k_{iM} = \frac{M_i}{\text{abs}(M_i)}. \quad (5)$$

Заметим, что при одинаковых типах и размерах свай величины F_d и F_{du} также одинаковы и постоянны для всех свай. Что касается показателей несущей способности F_{dH} и F_{dM} , то, во-первых, они взаимно зависимы, и, во-вторых, будут иметь различные значения для различных свай. Поэтому для этих показателей приняты обозначения F_{dHi} и F_{dMi} .

С учетом принятой системы параметров и коэффициентов запишем выражения для определения усилий в сваях:

$$\begin{aligned} N_i &= \rho_1[u \sin \alpha_i + (v + \omega x_i) \cos \alpha_i] \delta_{iv} + F_{di}(1 - \delta_{iv}), \\ H_i &= \{\rho_2[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] - \rho_3 \omega\} \delta_{iu} + F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH}, \\ M_i &= \{\rho_3[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] + \rho_4 \omega\} \delta_{iu} + F_{dMi}(1 - \delta_{iu})k_{iM}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} &\rho_1 \sum_1^n [u \sin \alpha_i + (v + \omega x_i) \cos \alpha_i] \delta_{iv} \cos \alpha_i + \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv}) \cos \alpha_i - \\ &\quad - \sum_1^n \{\rho_2[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] - \rho_3 \omega\} \delta_{iu} \sin \alpha_i - \\ &\quad - \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH} \sin \alpha_i = F_v, \\ &\rho_1 \sum_1^n [u \sin \alpha_i + (v + \omega x_i) \cos \alpha_i] \delta_{iv} \sin \alpha_i + \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv}) \sin \alpha_i + \\ &\quad + \sum_1^n \{\rho_2[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] - \rho_3 \omega\} \delta_{iu} \cos \alpha_i + \\ &\quad + \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH} \cos \alpha_i = F_h, \\ &\rho_1 \sum_1^n [u \sin \alpha_i + (v + \omega x_i) \cos \alpha_i] \delta_{iv} x_i \cos \alpha_i + \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv}) x_i \cos \alpha_i - \\ &\quad - \sum_1^n \{\rho_2[u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i] - \rho_3 \omega\} \delta_{iu} x_i \sin \alpha_i - \\ &\quad - \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH} x_i \sin \alpha_i + \sum_1^n \{\rho_4 \omega - \rho_3 [u \cos \alpha_i - (v + \omega x_i) \sin \alpha_i]\} \delta_{iu} + \\ &\quad + \sum_1^n F_{dMi}(1 - \delta_{iu})k_{iM} = M. \end{aligned} \quad (7)$$

Приведем каноническую форму этой системы:

$$r_{vv}v + r_{vu}u + r_{v\omega}\omega = F_v + \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH} \sin \alpha_i - \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv}) \cos \alpha_i,$$

$$r_{uv}v + r_{uu}u + r_{u\omega}\omega = F_h - \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH} \cos \alpha_i - \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv}) \sin \alpha_i, \quad (8)$$

$$r_{\omega v}v + r_{\omega u}u + r_{\omega\omega}\omega = M - \sum_1^n F_{dMi}(1 - \delta_{iu})k_{iM} + \sum_1^n F_{dHi}(1 - \delta_{iu})k_{iH}x_i \sin \alpha_i - \sum_1^n F_{di}(1 - \delta_{iv})x_i \cos \alpha_i.$$

Коэффициенты канонической системы будут равны:

$$\begin{aligned} r_{vv} &= \rho_1 \sum \cos^2 \alpha_i + \rho_2, \\ r_{vu} &= \rho_0 \sum \sin \alpha_i \cos \alpha_i, \\ r_{v\omega} &= \rho_0 \sum x_i \cos^2 \alpha_i + \rho_2 \sum x_i + \rho_3 \sum \sin \alpha_i, \\ r_{uu} &= \rho_0 \sum \sin^2 \alpha_i + n\rho_2, \\ r_{u\omega} &= \rho_0 \sum x_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i - \rho_3 \sum \cos \alpha_i, \\ r_{\omega\omega} &= \rho_0 \sum x_i^2 \cos^2 \alpha_i + \rho_2 \sum x_i^2 + 2\rho_3 \sum x_i \sin \alpha_i + n\rho_4. \end{aligned} \quad (9)$$

Конкретизируем методику определения параметров несущей способности F_{dHi} и F_{dMi} . Допустим, что в некоторой свае получены усилия H_i и M_i . Вычислим относительные значения этих усилий:

$$\overline{H}_i = H_i \frac{\alpha_\varepsilon^2}{\gamma b}, \quad \overline{M}_i = M_i \frac{\alpha_\varepsilon^3}{\gamma b}. \quad (10)$$

Исходным параметрам грунтовых условий и характеристик сваи отвечает определенная зависимость показателей несущей способности H_m и M_m :

$$H_m \overline{M}_0 + M_m \overline{H}_0 = \overline{H}_0 \overline{M}_0. \quad (11)$$

Величины $\overline{H}_0$ и $\overline{M}_0$ находятся по таблицам (см. предыдущую статью). Поскольку статическому нагружению отвечает пропорциональное изменение усилий H_i и M_i , то показатели несущей способности могут быть найдены из уравнений:

$$H_m = \frac{\overline{H}_i \overline{H}_0 \overline{M}_0}{\overline{H}_i \overline{M}_0 + \overline{H}_0 \overline{M}_i}, \quad M_m = \frac{\overline{M}_i \overline{H}_0 \overline{M}_0}{\overline{H}_i \overline{M}_0 + \overline{H}_0 \overline{M}_i}. \quad (12)$$

Абсолютные значения несущей способности будут равны:

$$F_{dH} = \frac{\gamma b}{\alpha^2} H_m; \quad F_{dM} = \frac{\gamma b}{\alpha^3} M_m. \quad (13)$$

Общий алгоритм расчета свайного фундамента включает ряд итераций. На первом шаге расчета для всех свай принимается равенство коэффициентов δ_{iv} и δ_{iu} единице. На последующих шагах расчета для свай, в которых усилия H_i , M_i превысили несущую способность, принимается равенство $\delta_{iv} = 0$ или $\delta_{iu} = 0$ в зависимости от полученного показателя. В результате либо процесс выхода свай в предельное состояние по грунту прекратится, либо свайный фундамент полностью перейдет в недопустимое предельное состояние.

Рассмотрим пример определения значений для плоской расчетной схемы. В табл. 1 приведены характеристики положения свай.

Таблица 1

Значения координаты x_i и угла α_i

i	1	2	3	4
x_i , м	-2,0	-1,0	1,0	2,0
α_i , рад	-0,5326	-0,1745	-0,0873	0,1745

Характеристики жесткости висячей сваи следующие: $\rho_1 = 50\,000,0 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$;

$\rho_2 = 21\,970,1 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; $\rho_3 = 4\,268,0 \text{ кН}$; $\rho_4 = 11\,420,6 \text{ кН}\cdot\text{м}$; коэффициент деформации составляет: $\alpha_\varepsilon = 0,9544 \text{ м}^{-1}$; глубина погружения сваи в грунт — 10 м; диаметр сваи — 0,3 м.

Несущая способность сваи по грунту на вдавливание $F_d = 1\,200 \text{ кН}$, на выдергивание $F_{du} = -120 \text{ кН}$. Абсолютные значения параметров несущей способности сваи на воздействие горизонтальной и моментной сил: $H_0 = 180 \text{ кН}$, $M_0 = 350 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Расчет выполнялся для следующих нагрузок: $F_v = 1000$, $F_h = 600 \text{ кН}$, $M = 2000 \text{ кН}\cdot\text{м}$. Перераспределение усилий между сваями было установлено за три шага расчета. В табл. 2 приведены значения перемещений плиты ростверка, определенные на каждом шаге расчета, а также (в последней колонке) номера свай, перешедших в предельный режим работы. В табл. 3 представлены данные об изменении усилий в сваях.

Таблица 2

Изменение перемещений в процессе итераций

№ шага	1	2	3	№ свай
v , м	0,009996	0,006603	-0,002225	1
u , м	0,3447	0,4829	0,05811	1, 2, 3
ω , рад	0,0004744	0,003022	0,00790	1, 2, 3

Таблица 3

Изменение усилий в сваях в процессе итераций

№ шага	№ сваи	1	2	3	4
1	N_i	-470,1	169,5	371,3	838,3
	H_i	73,5	76,2	75,4	68,4
	M_i	-141,3	-146,5	-145,0	-131,4
2	N_i	-120,0	-243,0	268,9	1042
	H_i	79,6	92,9	94,6	86,8
	M_i	-145,2	-171,1	-174,4	-159,1
3	N_i	-120,0	-120,0	29,472	1173,0
	H_i	57,0	92,5	92,4	86,8
	M_i	-86,0	-170,2	-170,3	-143,9

Таким образом, при действующих нагрузках в рассматриваемом примере плоской схемы свайного фундамента в допредельном режиме будет работать одна свая, в остальных развиваются предельные сопротивления сваи на выдергивание, на поперечные и моментные нагрузки.

Исходные данные для приведенного примера были приняты не из практики, а искусственно, для наглядной иллюстрации значительного влияния на результаты расчета эффекта перераспределения усилий между сваями при допущении их предельной работы. В принципе вопрос о возможности использования предельной несущей способности свай является предметом отдельного рассмотрения. Однако для больших свайных полей определенный процент свай, работающих в предельном режиме, не будет существенно снижать общей надежности конструкции. Кроме того, пропорционально увеличивая нагрузки, можно довести свайный фундамент до полного исчерпания несущей способности и, исходя из этого, установить коэффициент запаса принятой конструкции по нагрузке.

Разработанный метод расчета предлагается для практического использования при оптимальном проектировании свайных фундаментов.

Библиографический список

1. Силин К.С., Готов Н.М., Завериев К.С. Проектирование фундаментов глубокого заложения. М.: Транспорт, 1981. 252 с.
2. СНиП 2.02.03–85. Свайные фундаменты. М., 1986.
3. СП 50-102–2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. М., 2004.