

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Д. И. Кереселидзе

К расчету одиночных свай на действие  
горизонтальной нагрузки

Выработка правильных методов расчета одиночных свай на горизонтальное давление является весьма важной для разрешения ряда технических задач, связанных с устройством различных инженерных сооружений.

Однако, несмотря на то, что этот вопрос является предметом научного исследования многих авторов, выработанные методы расчета свай на горизонтальное давление не отражают действительной картины совместной работы свай и грунта и по своим результатам значительно расходятся с данными практики.

Это положение делает невозможным практическое применение существующих расчетных формул и заставляет искать новые пути разрешения этого вопроса.

Исключая из рассмотрения метод расчета свай, как балки, лежащей на упругом основании, который дает сильное искажение действительной картины работы свай (особенно короткой, длиной менее 5—6 м), и рассматривая ее как бесконечно жесткую по сравнению с окружающими ее грунтами, все существующие методы расчета разбиваются на две основные группы.

Первая группа методов (метод Якоби-Крея) основана на принципе изменения напряжения грунта пропорционально глубине при постоянстве коэффициента прочности грунта. При этом, изменение напряжения грунта в зависимости от глубины  $y$  на единицу ширины свай выразится формулой

$$\sigma = m y, \quad (1)$$

где  $m$  — произведение величины объемного веса грунта на разность коэффициентов пассивного и активного давлений.

Учитывая то, что под действием горизонтальной силы свая стремится повернуться вокруг некоторой точки  $O$ , расположенной по глубине погружения ее, эпюра изменения напряжения будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Условия равновесия свай, по указанной расчетной схеме при дос-

тижении напряжения грунта у конца ее В—максимума—дает следующее значение для горизонтальной силы:

$$P = \frac{mh}{2} \left[ \sqrt{9H^2 + 12Hh + 5h^2} - (3H + 2h) \right], \quad (2)$$

где  $H$  — расстояние точки приложения горизонтальной силы от поверхности погружения и

$h$  — глубина погружения сваи.

Вторая группа методов (метод Лалетина) основана на принципе изменения напряжения грунта по параболической кривой. Такая форма эпюры напряжения получается при допущении линейного нарастания коэффициента прочности грунта по глубине погружения сваи.

Соответственно с этим расчетная схема, при предельном значении напряжения грунта на поверхности погружения, дается на рис. 2.

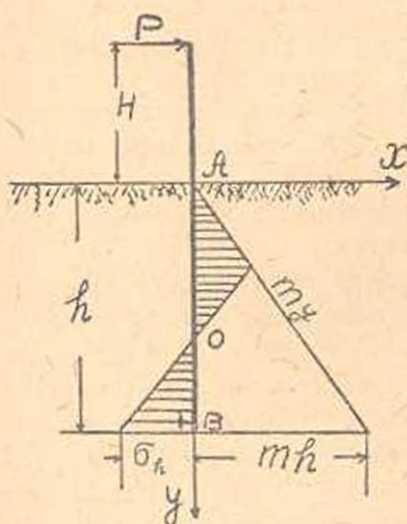


Рис. 1.

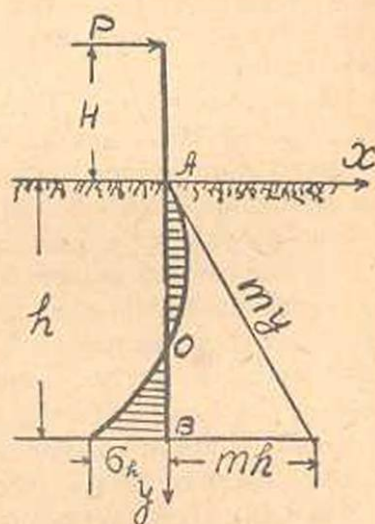


Рис. 2.

Из условия равновесия сваи величина допускаемой горизонтальной силы определится следующей формулой:

$$P = \frac{mh^3}{6(4H + 3h)}. \quad (3)$$

Как показали опыты Лалетина, изменение напряжения грунта по глубине погружения сваи действительно происходит по параболической кривой.

Формула (1), которая кладется в основу расчетных формул (2) и (3), дает представление только лишь о характере изменения напряжения и ничего не говорит о предельном значении его. Опыты показывают, что действительное значение предельных напряжений грунта в несколько раз больше напряжений, определяемых по формуле (1).

Свая, работающая на действие горизонтальной силы, стремясь

повернуться вокруг некоторой точки О, увлекает некоторую область грунта, расположенного непосредственно около сваи со стороны действия отпора земли. Когда напряженное состояние грунта достигает того положения, при котором образуются плоскости сдвигов, границы этой области грунта становятся криволинейными (рис 3).

Такой характер совместной работы сваи и грунта вполне подтверждается данными опытов.

В частности, это подтверждается опытами лаборатории оснований сооружений, результаты которых опубликованы в статье инженера В. И. Голубкова: "Экспериментальные исследования работы свай на горизонтальную нагрузку" в сборнике НИИ № 11, 1948 (фиг. № 11 и 13).

Для упрощения расчетов криволинейную поверхность заменяем прямой, а расчетная величина сопротивления грунта повороту сваи будет обуславливаться силами трения и сцепления по указанной поверхности и торцовым граням сваи.

При этом расчетная схема величины сопротивления грунта повороту прямоугольной сваи на единицу ее длины, соответствующая условию предельного равновесия, дается на рис. 4.

Введем следующие обозначения:

- $a$  — ширина сваи,
- $b$  — толщина,
- $x_0$  — длина клина,
- $\theta$  — угол наклона боковых сторон клина к его основанию,
- $\tau$  — удельная сила трения грунта о торцовые грани сваи,
- $q$  — давление грунта, прихо-

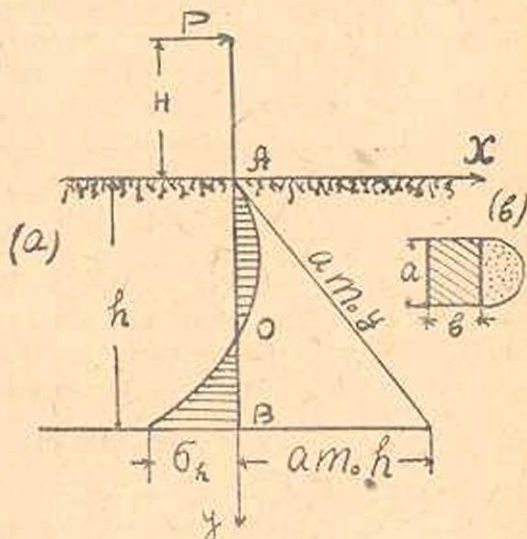


Рис. 3

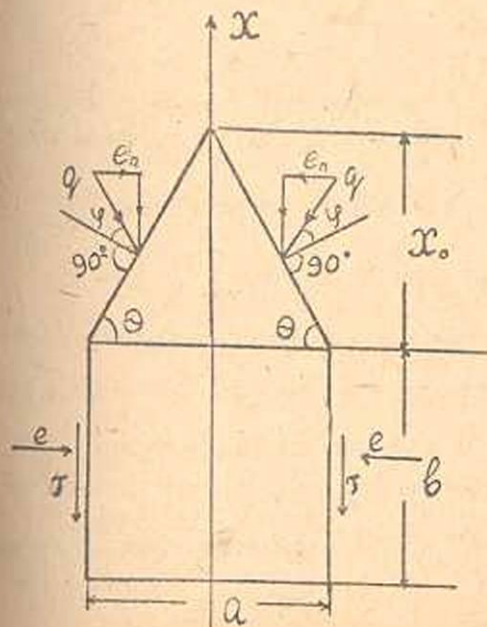


Рис. 4

дающееся на одну половину клина,  
 $e$  — давление грунта, приходящееся на единицу поверхности  
 торцовых сторон и  
 $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта.

Предельное сопротивление грунта повороту свай, как это видно из расчетной схемы, будет представлять собою сумму проекции всех сил на ось  $X$ . Обозначая величину этого сопротивления через  $\sigma$ , получим:

$$\sigma = 2qc \cos(\theta - \varphi) + 2b\tau \quad (4)$$

Произведем разложение силы  $q$ , как это показано на чертеже, и выразим ее через составляющую  $e_n$ , перпендикулярную ось  $X$ :

$$q = \frac{e_n x_\varphi}{\sin(\theta - \varphi)} = \frac{ae_n t_\theta}{2 \sin(\theta - \varphi)} \quad (5)$$

Ввиду того, что скольжение в действительности происходит в толще грунта, а не в плоскости соприкосновения грунта с торцовыми гранями свай, соответствующий коэффициент трения примем равным  $\text{tg} \varphi$  и, подставляя значения  $q$  и  $\tau$  в формулу (4), получим:

$$\sigma = ae_n \text{tg} \theta \text{tg}(\theta - \varphi) + 2b \text{tg} \varphi \quad (5)$$

Так как рассматриваемый клин работает на выпирание грунта, к моменту предельного равновесия, когда во всей напряженной зоне упругие свойства грунта используются до предела, силу  $e_n$  нужно принимать за пассивное давление. Она при горизонтальной поверхности земли и вертикальном положении свай на глубину  $y$  от поверхности земли будет иметь следующее выражение:

$$e_n = \gamma y \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2).$$

Сила  $e$  имеет значение:  $e = \gamma y \xi$ ,  
 где  $\gamma$  — объемный вес грунта, а  $\xi$  — коэффициент бокового давления покоя, значение которого для некоторых грунтов определено опытным путем.

Величина  $\theta$  определится из уравнения (5) по условиям:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = 0; \quad \frac{d^2\sigma}{d\theta^2} > 0.$$

Если учесть, что условию работы клина соответствует изменение  $\theta$  в пределах  $\varphi < \theta < \frac{\pi}{2}$ , то решение этих уравнений дает  $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ .

Подставляя значение  $e_n$ ,  $e$  и  $\theta$  в уравнение (5), получим:

$$\sigma = a\gamma y \text{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + 2b\gamma y \xi \text{tg} \varphi \quad (6)$$

Обозначив выражение  $\gamma[\text{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + 2\xi \text{tg} \varphi]$  через  $m_0$ , где  $n = \frac{b}{a}$ , получим окончательно:

$$\sigma = am_0 y \quad (7)$$

В случае свай с круглым поперечным сечением диаметром  $d$  рас-

чет будет вестись совершенно аналогично и, как это усматривается из рис. 5, весь вопрос сводится к определению основания клина NM и дуги AN=CM.

Принимаем, что силы трения по поверхности, соответствующие величинам дуг AN=CM, обуславливаются величиной бокового давления покоя. Обозначив NM через  $a$ , и AN=CM через  $b$  и определив их значения из геометрического построения, после подстановки этих значений в (6), получим:

$$\sigma' = dy [\cos(45^\circ - \varphi/2) \operatorname{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + i \xi \operatorname{tg} \varphi] \quad (8)$$

где  $i$  — радианное измерение угла

$$\alpha = 45^\circ - \varphi/2.$$

Обозначая выражение

$$[\cos(45^\circ - \varphi/2) \operatorname{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + i \xi \operatorname{tg} \varphi]$$

через  $m_k$ , получим окончательно:

$$\sigma' = dm_k y. \quad (9)$$

Сопротивление грунта, выраженное по формулам (7) и (9), графически представляет собою прямую линию, касательную к параболе в точке A (рис. 3). Оно по величине значительно превосходит сопротивление, выраженное по формуле (1).

Например, при  $\varphi = 30^\circ$ ,  $n = 1$  и  $\xi = 0,36$  для прямоугольной свай отношение этих величин выразится цифрой 3,5, а для круглой свай — цифрой 3,0.

Соответственно с формулами (2) и (3) максимальное значение горизонтальной силы для прямоугольных свай определится выражениями:

$$P = \frac{am_0 h}{2} \left[ \sqrt{9H^2 + 12Hh + 5h^2} - (3H + 2h) \right] \quad (10)$$

$$P = \frac{am_0 h^3}{6(4H + 3h)}. \quad (11)$$

Для круглых свай достаточно в формулах (10) и (11) величины  $a$  и  $m_0$  заменить соответственно величинами  $d$  и  $m_k$ .

Формула (10) выведена из условия устойчивости свай при допущении некоторых неупругих деформаций грунта в верхней зоне погружения ее.

Критическая горизонтальная сила  $P$ , определяемая по этой формуле, настолько мало отличается по величине от силы, определяемой по схеме параболического распределения напряжения (при дос-

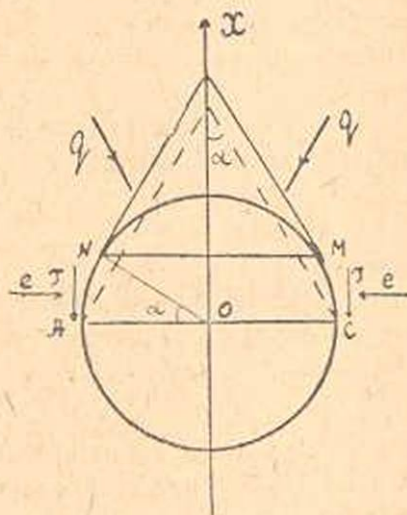


Рис. 5

тижении им максимума у нижнего конца сваи и допущения некоторых неупругих деформаций в верхней зоне погружения), что с практической точки зрения этой разницей можно пренебречь.

Что касается формулы (11), то она выведена по схеме параболического изменения напряжения, но при отсутствии неупругих деформаций грунта по всей глубине погружения сваи.

Величину активного давления земли на сваю в расчет не вводим, так как, ввиду малой толщины ее и возможности появления сводов давления грунта, действие активного давления является маловероятным.

С учетом сил сцепления сопротивление грунта повороту сваи соответственно формулам (7) и (9) выразится величинами:

$$\sigma = am_y + t_c, \quad (12)$$

$$\sigma' = dm_y + t'_c. \quad (13)$$

Величины сил сцепления грунта  $t_c$  и  $t'_c$ , отнесенные к единице высоты сваи, расположенной на глубине  $y$  от поверхности погружения, определяются следующими выражениями:

$$t_c = yc \left[ \frac{a}{\cos(45^\circ + \varphi/2)} + 2b \right], \quad (14)$$

$$t'_c = yc \left[ \frac{a'}{\cos(45^\circ + \varphi'/2)} + 2b' \right], \quad (15)$$

где  $c$  — удельная сила сцепления грунта, а выражения в квадратных скобках — поверхности сцепления соответственно для сваи с прямоугольным и круглым поперечным сечениями.

Сопоставлением результатов расчета с данными опытов убеждаемся, что предлагаемый метод расчета по сравнению с другими методами лучше согласуется с данными опытов. В частности, анализ результатов многочисленных опытов с деревянными сваями и песчаным грунтом, проведенных ЦНИИВТ-ом в полевых условиях и опубликованных в 1935 г. в сборнике трудов (вып. 155, „Полевые и лабораторные исследования устойчивости и прочности свай и шпунтовой стенки“) показывает, что опытная величина критической горизонтальной силы всегда превышает расчетную величину, определяемую по формуле (10). Коэффициент превышения колеблется в пределах 1,10—5,0. Причем низкий коэффициент (1,10—1,50) относится к рыхлым, а высокий (1,50—5,0) — к плотным грунтам.

Однако, это кажущееся расхождение между практикой и теорией есть результат вполне закономерных явлений и не может снизить качество теоретических исследований. В указанных опытах критическая горизонтальная сила определялась к моменту нарушенного равновесия грунта, а угол внутреннего трения —  $\varphi$ , для всех состояний грунтов (плотных и рыхлых) принимался равным углу естественного откоса ( $30^\circ$ ). Ввиду этого, превышение опытной величины горизонтальной силы над теоретической для рыхлых грунтов объясняется,

главным образом, условиями нарушения равновесия, а для плотных грунтов, помимо того, еще значительным превышением величины угла внутреннего трения плотных грунтов над углом естественного откоса, вводимого в расчетную формулу.

Предлагаемый метод можно применить, с большей гарантией на точность, для металлических и железобетонных свай, жесткость которых по сравнению с грунтами действительно весьма велика.

Тбилисский Институт  
Инженеров Железнодорожного Транспорта  
им. В. И. Ленина.

Գ. Բ. Կերեսկիան

# ՀՈՐԻԶՈՆԱԿԱՆ ՌԻԺԻ ՏԱԿ ԱՌԱՆՁՆԱԿԻ ԱՇԽԱՏՈՂ ՑՑԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հորիզոնական ուժի տակ ցցերի հաշվարկման դոկտրինն ունեցող բանաձևերից ստացված արդյունքները, համեմատած փորձերի-ավյալների հետ, ապրիս են զգալի շեղումներ:

Փորձնական ավյալների հիման վրա հեղինակն առաջարկում է (10) և (11) բանաձևերը:

Հաշվարկային բանաձևերը կառուցված են ցցի ճնշման տակ դուրս հըրվող հող սեպի հավասարակշռության պայմանից ելնելով:

Հեղինակի առաջարկած հաշվարկի մեթոդն այլ մեթոդների հետ համեմատած ավելի լավ է համընկնում փորձնական ավյալների հետ: Այն կարելի է կիրառել, ճշգրտություն մեծ երաշխիքով, մետաղյա և երկաթբետոնե ցցերի համար, որոնց կոշտությունը, հողերի հետ համեմատած, իրոք շատ մեծ է:

