

Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании

Д.В. ПРОКОПЕНКО, В.Е. БЫХОВЦЕВ, С.В. КИРГИНЦЕВА

Предлагается оригинальный аналитический метод определения несущей способности свай, устроенных с применением резонансно-импульсной технологии (свай-РИТ) в грунтовом основании при учёте его уплотнения в области камуфлетного уширения.

Ключевые слова: свая-РИТ, аналитический метод, грунтовое основание, уплотнение грунта.

The original analytical method of definition of bearing the ability of the piles arranged with application of resonance-pulse technology (CIT-pile) in the soil basis is offered at the account of its consolidation in area kamufletny broadening.

Keywords: CIT-pile, analytical method, soil basis, ground consolidation.

Введение. В строительной практике расчёт фундаментов зданий, согласно существующим строительным нормам и правилам (СНиП), должен производиться по двум предельным состояниям: по несущей способности и по деформациям. В СНиП предлагаются соответствующие методики, основанные на обширном табличном материале и приближённых формулах. При таком подходе изменённое состояние грунтовых оснований и некоторые конструктивные особенности фундаментов учитываются недостаточно. В настоящей работе рассматриваются фундаменты на основе свай сложной конфигурации, которые устроены с применением резонансно-импульсной технологии. При этом в грунтовом основании в области камуфлетного уширения образуется уплотнённая зона, размеры которой зависят от первичных характеристик грунта и от силы взрыва. В целом образующееся уширение и уплотнённая зона грунта, примыкающая к уширению, значительно повышают несущую способность свай-РИТ. Для расчёта таких свай по несущей способности (по первому предельному состоянию) предлагается оригинальный аналитический метод, учитывающий указанные особенности РИТ-свай и её грунтового основания как единой физической системы, что, в целом, позволяет значительно повысить точность определения несущей способности свай длиной L , с радиусом ствола r_c и с радиусом камуфлетного уширения r_y .

Технология изготовления свай-РИТ. Сущность разрядно-импульсной технологии изготовления свай заключается в следующем: по соответствующей технологии в грунт на расчётную глубину опускается обсадная труба с встроенными на конце трубы электродами. Обсадная труба заполняется бетоном. При подаче высокого напряжения на электроды, погруженные в бетонную смесь, происходит пробой межэлектродного промежутка с взрывообразным преобразованием электрической энергии. В результате серии электровзрывов в зоне разряда ствол сваи приобретает увеличенный объём, который заполняется бетоном и, вследствие этого, на конце сваи образуется камуфлетное уширение, которое обеспечивает работу сваи с грунтом как единой геотехнической системы.

Испытания свай-РИТ по несущей способности грунтового основания подтверждают их высокую несущую способность в сравнении с другими сваями равного диаметра и длины.

Деформирование грунтового основания одиночной свай-РИТ. По технологии устройства РИТ-свая можно классифицировать как буронабивную. Поэтому при действии вертикальной нагрузки на сваю по всей её контактной поверхности проскальзывание будет отсутствовать. В силу этого несущая способность РИТ-свай будет определяться несущей способностью контактной поверхности ствола сваи P_σ и камуфлетного уширения P_y .

$$P = P_\sigma + P_y, \quad (1)$$

Проведёнными ранее экспериментальными и теоретическими исследованиями различными специалистами показано, что в области грунта, примыкающего к боковой поверхности

сваи, при условии линейного и нелинейного деформирования, существует телескопический сдвиг [1]. Методом вычислительного эксперимента показано, что при телескопическом сдвиге с достаточной для практических целей точностью можно принять

$$U = 0, W = f(r), \quad (2)$$

U, W – горизонтальная и вертикальная компоненты вектора перемещения в цилиндрической системе координат с осями r, z .

$$\text{Из (2) следует} \quad \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial W}{\partial r}, \quad (3)$$

При условиях (2) и (3) уравнения равновесия рассматриваемой физической системы можно представить только одним уравнением

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0,$$

или в более компактной форме

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

Из (4) следует $r \frac{\partial W}{\partial r} = c_1$, следовательно

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad (5)$$

Несущая способность боковой поверхности сваи. Несущая способность боковой поверхности сваи определяется уравнением

$$P_\sigma = 2\pi r_c \int_0^L \tau_{rz} dh, \quad (6)$$

При условиях (3) и (5)

$$\tau_{rz} = G \gamma_{rz} = G \frac{\partial W}{\partial r} = G \frac{c_1}{r}, \quad (7)$$

следовательно,

$$P_\sigma = 2\pi r \int_0^L G \frac{c_1}{r} dh = 2\pi G L c_1, \quad (8)$$

По закону Кулона:

$$\tau_{np} = c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi, \quad (9)$$

где c, ϕ, σ_{np} – нормативные характеристики грунтов: сцепление, угол внутреннего трения и предельное нормальное напряжение;

τ_{np} – предельное касательное напряжение в грунте.

Рассматривая совместно соотношения (7–9) для определения несущей способности боковой поверхности сваи получим следующее выражение:

$$P_\sigma = 2\pi r_c L(c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi), \quad (10)$$

Несущая способность камуфлетного уширения сваи. При устройстве сваи-РИТ происходит уплотнение грунта только в области камуфлетного уширения. Несущая способность уплотнённого грунта будет максимальной в контактной поверхности, постепенно убывая до её начального значения. В настоящем исследовании математическая модель несущей способности уплотнённого грунта принята в виде степенной функции гиперболического типа:

$$\{ y = a x^n, a > 0, n < 0 \}, \quad (11)$$

В соответствии с (11) механико-математическая модель предельного нормального напряжения в уплотнённой зоне грунта будет иметь вид:

$$\sigma_{np} = ar^k, \quad a > 0, \quad k < 0, \quad r_c < r < r_{\max}, \quad (12)$$

где r_{\max} – радиус зоны уплотнения;

σ_{np} – предельное нормальное напряжение грунта.

Поставим в соответствие зоне уплотнения некоторое эквивалентное по несущей способности однородное грунтовое основание с предельным нормальным напряжением $\sigma_{np.y}$. Потенциал несущей способности этой зоны будет:

$$W_{\text{экв}} = \sigma_{np.y}(r_{\max} - r_y), \quad (13)$$

Считая, что уплотнение происходит по гиперболическому закону (12), получим:

$$W_{\text{зун}} = \int_{r_y}^{r_{\max}} ar^k dr = \frac{a}{1+k} (r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}), \quad (14)$$

Из условия построения эквивалентного грунтового основания следует

$$\sigma_{np.y}(r_{\max} - r_y) = \frac{a}{1+k} (r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}), \quad (15)$$

откуда следует:

$$\sigma_{np.y} = \frac{a}{1+k} \frac{r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}}{r_{\max} - r_y}, \quad (16)$$

После несложных преобразований получим:

$$\sigma_{np.y} = \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (17)$$

Несущую способность камуфлетного уширения основания сваи-РИТ при учёте уплотнения, учитывая (17), получим по формуле:

$$P_y = 2\pi \int_0^{r_y} \sigma_{np.y} \cdot r dr = \pi r_y^2 \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (18)$$

где $\sigma_{np.y}$ – предельное нормальное напряжение уплотнённого грунта;

k – коэффициент зависящий от характеристик грунта и сваи [3]:

$$k = -\mu_0 \frac{r_{\max} - r_y}{r_{\max}}$$

Таким образом, для расчёта сваи-РИТ по несущей способности (по первому предельному состоянию) получаем следующую формулу:

$$P = 2\pi r_c L(c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi) + \pi r_y^2 \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (19)$$

Покажем расчёт сваи-РИТ по несущей способности (по первому предельному состоянию) по разработанному методу на примере конкретной задачи. Для этого воспользуемся экспериментальными данными для свай-РИТ, представленными в работе О.В. Козуновой [2].

Численный анализ несущей способности РИТ-свай. Оценку полученного аналитического решения покажем на примере реальной задачи (результаты испытания сваи-РИТ [2]): грунтовые условия, характеристики сваи-РИТ, объект, на котором установлена свая-РИТ и результаты определения несущей способности, полученные методом натурного эксперимента и по аналитическому решению, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет несущей способности свай-РИТ

№	Объект	Характеристики свай-РИТ	Грунтовые условия	Расчетная НС по СНиП, т	Нагрузка эксп.	$S_{\text{эксп}}$, см.	Аналитич. НС, т	$S_{\text{в}}$, см.
1	Б. Знаменский пер., д. 23, свайный фундамент 10-ти этажного корпуса	d=250 мм, L=15,2 м	Пески м., ср. пл., сугл. теку-чепл.	92	120	0.41	131	0.46
2	ул. Остоженка, вл. 35, свайное основание	d=250 мм, L=11,5 м	Пески м.ср. пл., песок ср. кр., в/нас	90	110	0.68	150	0.78

где $S_{\text{эксп}}$ – осадка свай-РИТ, полученная в эксперименте;

$S_{\text{в}}$ – осадка свай-РИТ, полученная по компьютерному моделированию при действии максимально допустимой нагрузки на сваю, рассчитанной по предложенной аналитической формуле (19).

В таблице 1 приведен расчет несущей способности свай-РИТ по нормативным материалам и по разработанному аналитическому методу, осадки свай-РИТ, полученные с помощью эксперимента и компьютерного моделирования.

Из таблицы видно, что осадки, полученные экспериментально и при компьютерном моделировании, близки, несущая способность, полученная с помощью аналитической формулы, превышает несущую способность, рассчитанную по формулам, приведенным в СНиП. Эта разница обуславливается тем, что формулы СНиП-а не учитывают нелинейность деформирования грунтового основания и уплотнение грунта вокруг камуфлетного уширения, образованное вследствие электровзрыва. Доказательством этого является пример, когда на сваю-РИТ подается нагрузка, которая превышает несущую способность, рассчитанную по рекомендациям СНиП в 1.25–1.3 раза (см. таблицу 1).

Литература

1. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
2. Невейков, А.Н. Свая, изготовленная по разрядно-импульсной технологии, свая нового поколения с уширениями в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / А.Н. Невейков, О.В. Козунова // ОАО «Буровая компания «Дельта». Режим доступа : http://belniis.by/sites/default/files/neveykov_a.n._kozunova_o.v._svaya_rit.pdf.
3. Быховцев, В.Е. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75) – С. 110–114.