

УДК 681.3.06:624.131

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ СВАЙ, УСТРОЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины
Советская, 102, Гомель, 246019**Поступила в редакцию 24 октября 2016*

Предложена оригинальная методика расчета свай, устроенных с применением разрядно-импульсной технологии, по несущей способности и деформациям в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом уплотнения грунта в зоне разрядно-импульсной обработки.

Ключевые слова: свая РИТ, методика расчета, несущая способность, осадка.

Введение

При устройстве фундамента на основе свай, устроенных с применением разрядно-импульсной технологии (сваи РИТ), происходит уплотнение грунта в области камуфлетного уширения. Размеры зоны уплотнения, образовавшейся в результате разрядно-импульсной обработки, зависят от свойств прилегающего грунтового основания и от мощности электровзрыва. В результате формирования тела сваи РИТ окружающий грунт уплотняется, что увеличивает несущую способность сваи РИТ. Сваи РИТ, как и все виды фундаментов, рассчитываются по несущей способности и по деформациям [1]. Формулы, приведенные в строительных нормах и правилах для расчета несущей способности и осадки свай РИТ, получены из предположения, что связь между напряжением и деформацией является линейной и не учитывают уплотнение грунта в области разрядно-импульсной обработки, что ведет к недоиспользованию несущей способности грунтового основания сваи РИТ.

Устройство и расчет по несущей способности сваи РИТ

Сущность разрядно-импульсной технологии изготовления свай заключается в следующем: скважина, заполненная цементным раствором, обрабатывается серией высоковольтных электрических разрядов, в результате которых формируется тело сваи РИТ, уплотняется окружающий грунт (рис. 1).



Рис. 1. Устройство сваи РИТ

В рекомендациях СНиП предложена следующая формула для определения несущей способности свай РИТ [1]:

$$F_d = g_{kk} g_{crin} \left(g_{cR} R_{rit} A_{rit} + g_{cf} \sum u_{irit} f_i h_i \right). \quad (1)$$

Несущая способность свай РИТ, полученная по формуле (1), не отражает ее реальную несущую способность, что подтверждается тем, что указанная формула не учитывает уплотнение грунта вследствие устройства свай РИТ, и эта формула получена из предположения, что связь между напряжением и деформацией в грунте является линейной.

Учитывая уплотнение грунта в области разрядно-импульсной обработки (закон деформирования грунта принят в виде степенной функции гиперболического типа), получена формула для определения предельной несущей способности [2]:

$$F_{du} = g_{kk} g_{crin} \left(g_{cR} R_{rit} \left(\frac{r_{up}}{r_u} \right)^n A_{rit} + g_{cf} \sum u_{irit} f_i \left(\frac{r_{up}}{r_u} \right)^n h_i \right), \quad (2)$$

где r_{up} , r_u – радиус зоны уплотнения и уширения свай РИТ; значения R_{rit} , f_i , r_u , r_{up} определяются по таблицам СНиП [1].

В работе [2] формула (2) была апробирована на одном эксперименте, что не отражает общности, поэтому в настоящей статье указанная формула апробирована еще на двух экспериментах (рис. 2). Результаты представлены в табл. 1,2.

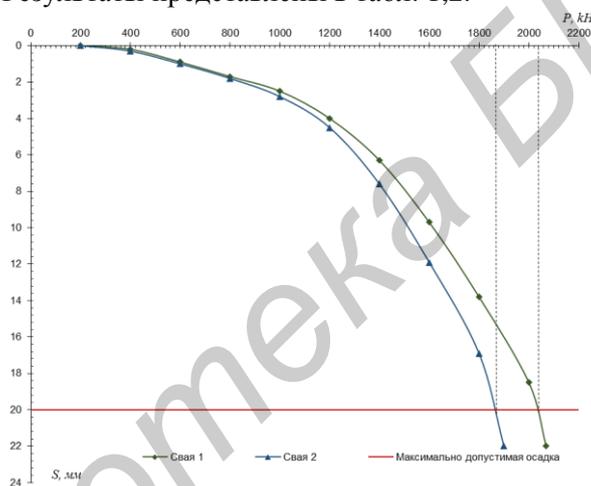


Рис. 2. Осадка свай РИТ

Таблица 1. Данные для расчет свай-РИТ № 1

№	Наименование грунта	h_i	Разбивка	Глубина	f_{i0}	f_i	D_{ku}/d_c	u_{irit}	u_{irirs}	I_c	g_{ef}
1	Насыпной искусственный	0,6	0,6	0,33	0	0	-	-	0,79	0,6	1,3
2	Супесь пылев. текучая ($I_L > 1$) с прим. орг. вещ	1,325	1,325	1,26	0	0	-	-	0,79	1,325	1,3
3	Песок пылеватый средней прочности	8,8	1,9	2,88	25	36,7	1,6	1,26	0,89	1,5	1,3
			1,9	4,78	29	42,6	1,6	1,26	0,89	1,5	1,3
			1,9	6,68	31	45,5	1,6	1,26	0,89	1,5	1,3
			1,55	8,58	33	48,5	1,6	1,26	1	0,75	1,3
			1,55	9,4	34	49,9	1,6	1,26	1	0,75	1,3
4	Песок мелкий средней прочности	1,175	1,175	11,31	48	69	1,7	1,34	1	0,75	1,3
5	Песок средний, насыщенный водой	4,8	1,2	12,5	49	68,9	1,8	1,41	1,02	0,75	1,3
			1,65	13,9	50	70,3	1,8	1,41	1,13	0,75	1,3
			1,95	15,73	52	73,1	1,8	1,41	0,93	1,5	1,3

$$F_d = 1411 \text{ кН}, \quad F_{du} = 2002 \text{ кН}$$

Таблица 2. Данные для расчет свай-РИТ № 2

№	Наименование грунта	h_i	Разбивка	Глубина	f_{i0}	f_i	D_{kui}/d_c	u_{irit}	u_{iritsr}	I_c	g_{cf}
1	Насыпной искусственный	0,65	0,65	0,33	0	0	-	-	0,79	0,65	1,3
2	Супесь пылев. текучая ($I_L > 1$) с примесью орг. веществ	1,63	1,63	1,33	0	0	-	-	0,79	1,63	1,3
3	Песок пылеватый средней прочности	8,4	1,4	2,9	25	36,7	1,6	1,26	0,92	1	1,3
			1,4	4,7	29	42,6	1,6	1,26	0,92	1	1,3
			1,4	6,5	31	45,5	1,6	1,26	0,92	1	1,3
			1,4	8,3	33	48,5	1,6	1,26	0,92	1	1,3
			1,8	9,9	34	49,9	1,6	1,26	1	1	1,3
			1	10,75	35	51,4	1,6	1,26	0,79	1	1,3
4	Песок мелкий ср. пр. насыщ. водой	1,2	1,2	11,28	48	69	1,7	1,34	0,95	1	1,3
5	Песок средний, насыщенный водой	4,8	1,9	12,9	49	68,9	1,8	1,41	1,08	1	1,3
			1,45	14,8	50	70,3	1,8	1,41	0,98	1	1,3
			1,45	16,23	52	73,1	1,8	1,41	0,98	1	1,3

$$F_d = 1399 \text{ кН}, F_{du} = 1985 \text{ кН}$$

Характеристики свай РИТ: буронабивные с диаметром ствола $\varnothing 250$ мм, выполнены по технологии РИТ, длиной 16,7 м, с уширениями $\varnothing 650$ мм вдоль ствола для свай РИТ 1 через 0,75 м; для РИТ 2 через 1 м. Расчетные сопротивления грунта под нижним концом равны: $A_{rit} = 0,142 \text{ м}^2$, $R_{rit} = 4560 \text{ кПа}$, $R_{ritmax} = 6410 \text{ кПа}$, $g_{kk} = 0,85$. Расчетные сопротивления грунта на боковой поверхности свай РИТ (экспериментальные данные), при размере уширений, взятых из таблиц СНиПа, приведены в табл. 1, 2.

Для свай РИТ 1,2 (рис. 2) несущую способность, рассчитанную по формуле (2), получили равной 2002 и 1985 кН, а по экспериментальным данным несущая способность этих свай равняется – 2040 и 1870 кН соответственно. Этим показана общность применения полученного решения определения несущей способности свай РИТ с учетом нелинейности деформирования грунта и его уплотнения.

Определение осадки свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании

Рассмотрим одиночную сваю РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании, уравнение состояния которого принято в следующем виде:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m, 0 < m < 1, A > 0.$$

Представим сваю РИТ в виде равной по объему цилиндрической сваи, радиус которой можно определить по следующей формуле:

$$r_{pr} = r_0 \sqrt{1 + 2n \frac{r_u}{L} \left(\left(\frac{r_u}{r_0} \right)^2 - 1 \right)},$$

где n – количество камуфлетных уширений; L – длина свай РИТ; r_0 – радиус свай РИТ.

Осадку цилиндрической сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании можно вычислить по следующей формуле [3]:

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2ALr_0} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

При устройстве свай РИТ происходит уплотнение грунта и, следовательно, использовать характеристики неуплотненного грунтового основания при определении осадки свай РИТ будет неправомерным. Закономерность изменения модуля деформации грунта в уплотненной зоне вокруг ствола цилиндрической сваи может быть описана степенной функцией гиперболического типа:

$$E_i = ar_i^k, k < 0, A > 0.$$

Уплотненной зоне сваи ставится в соответствие некоторое однородное грунтовое основание эквивалентное по несущей способности с модулем деформации E_{ekv} . На основании поставленного условия получим [3]:

$$(r_{up} - r_0)E_{ekv} = a \int_{r_0}^{r_{up}} r^k r_0.$$

Интегрируя полученное выражение и после математических преобразований получена формула для определения модуля деформации однородного грунтового основания, эквивалентного по несущей способности исходному неоднородно уплотненному в следующем виде:

$$E_{ekv} = \frac{E_0}{1 - \mu} \frac{r_{up}}{(r_{up} - r_0)k_c},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E_0 – модуль деформации неуплотненного грунта; k_c – коэффициент конфигурации сваи РИТ: $k_c = 0,012\mu P^{1-m}$.

При условии использования приведенных характеристик уплотненного грунтового основания формула для осадки сваи РИТ запишется в следующем виде:

$$W = \frac{2m(1+\mu)(1-\mu)}{\sqrt{3}(1-m)E_0} \frac{r_{up} - r_{pr}}{r_{up}} k_c \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2\sigma_{kr} L r_{pr}} \right)^{\frac{1}{m}} r_{pr}, \quad (3)$$

где σ_{kr} – критическое напряжение грунтового основания; m – параметр закона деформирования грунтового основания принятый в следующем виде:

$$m = \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu}.$$

Проведем сравнительный анализ результатов на практике – сравним осадки сваи РИТ, полученные по формуле (3) с экспериментальными данными (рис. 2). Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость осадки сваи РИТ от нагрузки, полученная опытным путем и с помощью разработанной формулы (3)

$S, \text{ мм}$		$P, \text{ кН}$			
		600	1000	1400	1800
Свая 1	S_{op}	1	2,5	6,3	13,8
	S_f	0,7	2,7	6,8	13,3
Свая 2	S_{op}	1	2,8	7,5	16,8
	S_f	0,8	3	7,6	14,9

Заключение

Исследование деформационных процессов в твердых телах и их системах является, как известно, важнейшей задачей механики деформируемого твердого тела. Решение ее математическими методами основывается на построении физической модели и разработке ее формального описания – математической модели. Оба типа моделей должны достаточно полно описывать реальные свойства объекта или системы: нелинейность деформирования, неоднородность структуры и т.д. Исследование таких моделей представляет значительные трудности. От степени изученности и точности формального описания свойств элементов системы и системы в целом, от уровня подхода к описанию функций системы и принятой методологии ее исследования зависит энергоматериалоемкость системы в физической реализации. Стремление к более точному учету особенностей деформирования твердых тел и их систем приводит к разработке новых методов и методик.

Представленная в работе методика расчета сваи РИТ по первому и второму предельным состояниям (по несущей способности и по деформациям), в отличие от существующих строительных норм и правил, учитывает нелинейность деформирования грунтового основания и его уплотнение в зоне разрядно-импульсной обработки и дает результат достаточно близкий

к экспериментальным данным, что позволяет использовать ее при проектировании фундаментов зданий различного назначения. Использование разработанной методики позволит уменьшить затраты на возведение фундамента здания на основе свай РИТ, рассчитанного по существующим строительным нормам и правилам, в среднем на 20 %.

CALCULATION METHOD ON LIMITING CONDITIONS OF PILES ARRANGED USING BIT-PULSE TECHNOLOGY

V.E. BYKHOUTSEV, V.S. SMORODIN, D.V. PROKOPENKO

Abstract

An original calculation method of the CIT-piles on the bearing capacity and deformations in nonlinear-deformable earth foundation based on soil compaction in the discharge-pulse treatment zone is proposed.

Keywords: pile CIT, calculation method, bearing capacity, settlement.

Список литературы

1. *Кубецкий В.Л., Афанасьева В.Ф., Косоруков В.А. и др.* Технические рекомендации по проектированию и устройству свайных фундаментов, выполняемых с использованием разрядно-импульсной технологии для зданий повышенной этажности (сваи РИТ). М., 2006.
2. *Быховцев В.Е., Прокопенко Д.В., Цурганова Л.А.* // Проблемы физики, математики и техники. 2015. № 3 (24). С. 90–93.
3. *Быховцев В.Е., Прокопенко Д.В.* // Изв. ГГУ. 2012. С. 110–114.