

д.т.н. Должиков П. Н.,
Збицкая В. В.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ

В данной работе проведено аналитическое исследование несущей способности буроинъекционной сваи, обоснована новая формула для расчета несущей способности этих свай, определена погрешность вычисления.

Ключевые слова: аналитическое исследование, буроинъекционная свая, несущая способность, силы сопротивления, погрешность.

Введение. Практика показывает, что потеря несущей способности основания фундаментов — это одна из основных причин аварий зданий и сооружений. Поэтому, сегодня вопрос восстановления несущей способности оснований фундаментов является актуальным.

В настоящее время одним из наиболее распространенных способов усиления основания фундаментов реконструируемых и восстанавливаемых зданий являются способы, которые базируются на использовании инъекционных свай (буроинъекционных, корневидных, анкерных и др.). В мировой и отечественной практике накоплен большой практический опыт использования буроинъекционных свай, разработаны многочисленные рекомендации. Технология сооружения буроинъекционных свай при реконструкции фундаментов известна и хорошо обработана. Однако, постоянно растущие нагрузки, увеличение темпов строительства, снижение стоимости СМР вызывают необходимость совершенствования и дальнейшего развития технологии сооружения, методики проектирования параметров и нормативных документов для расчета несущей способности буроинъекционных свай.

Как известно, в инженерной практике расчет несущей способности свай по табличным данным используется, по большей части, для ее предварительной оценки, поскольку имеет объективные причины не-

соответствия фактической (реальной) величине. Однако, при отсутствии результатов статических испытаний, этот расчет остается определяющим для выбора параметров свай и расчета свайных фундаментов, и потому повышение его точности является актуальной задачей [1].

Свайные фундаменты рассчитываются на основании результатов инженерно-геологических изысканий, а также исходя из конструктивных и технологических особенностей проектируемых или эксплуатируемых зданий.

Расчет свайных фундаментов осуществляется по предельным состояниям: первой группы, т.е. по прочности материала свай и по несущей способности грунта оснований; второй группы, т.е. по осадкам и перемещениям свай [2].

В общем случае несущую способность свай, работающей на сжимаемую нагрузку, определяют как сумму расчетных сил сопротивлений грунтов основания под нижним концом сваи и на ее боковой поверхности по формуле:

$$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), (1)$$

где γ_c — коэффициент условий работы свай; R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа; A — площадь опирания сваи на грунт, см²; u — наружный периметр поперечного сечения сваи, м; f_i — расчетное сопротивление i -ого слоя грунта на боковой поверхности,

кПа; h_i — толщина i -ого слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; γ_{cR} , γ_{cF} — коэффициенты условий работы грунта, соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи.

Однако, при устройстве буроинъекционных свай данная формула не может быть применена, так как не учитывает конструктивные особенности сваи.

Цель работы — аналитическое обоснование формулы для расчета несущей способности буроинъекционных свай.

Изложение материала и его результаты. Буроинъекционная свая представляет собой устроенную в грунт инъекционную трубу, через которую под давлением нагнетался цементный раствор. Напорная инъекция цементного раствора способствует формированию в грунте разнонаправленных каналов гидроразрыва. В результате чего в грунте образуется система из инъекционной трубы и цементных уширений. Эта система работает как единая.

Основными параметрами буроинъекционной сваи являются:

- диаметр d_c и длина рабочей поверхности l_c инъекционной трубы;
- радиус распространения r и раскрытие δ трещин гидроразрыва;

Модель буроинъекционной сваи приведена на рисунке 1.

Поскольку система полостей гидрорасчленения имеет хаотический характер, то целесообразно в расчетах заменить раскрытие трещины δ на эквивалентное раскрытие полости разрыва h_3 , а радиус r распространения трещин гидроразрыва на эффективный радиус R_3 (рис. 2). Эти параметры можно вычислить по формулам (2) и (3) [3]:

$$h_3 = h \cdot \left(\frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \right), \quad (2)$$

где e_1 и e_2 — коэффициенты пористости грунта, рассчитываемые по формулам:

$$e_1 = \frac{\gamma_s}{\gamma_1} - 1,$$

$$e_2 = \frac{\gamma_s}{\gamma_2} - 1,$$

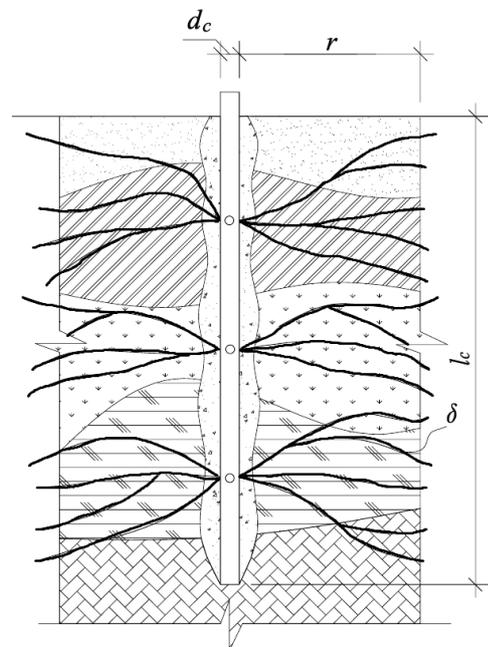
где γ_s — удельный вес частиц грунта, кН/см³, γ_1 , γ_2 — объемный вес скелета грунта до и после консолидации.

$$R_3 = r_k - \frac{(P_3 - P_k) \cdot (r_k - r_c)}{P_c - P_k}, \quad (3)$$

где r_k — максимальный радиус распространения раствора при перепаде давления в канале гидроразрыва $\Delta P = P_c - P_k$, Па; P_3 — эффективное давление раствора на стенки канала разрыва, соответствующее эффективному радиусу R_3 , рассчитываемое по формуле, Па:

$$P_3 = \frac{h_3 \cdot (1 + e_1)}{h \cdot m_0}; \quad (4)$$

P_k — давление раствора на стенки канала разрыва, соответствующее максимальному радиусу r , Па; P_c — давление раствора на стенки канала разрыва у ствола скважины, Па; r_c — радиус инъекционной трубы, м.

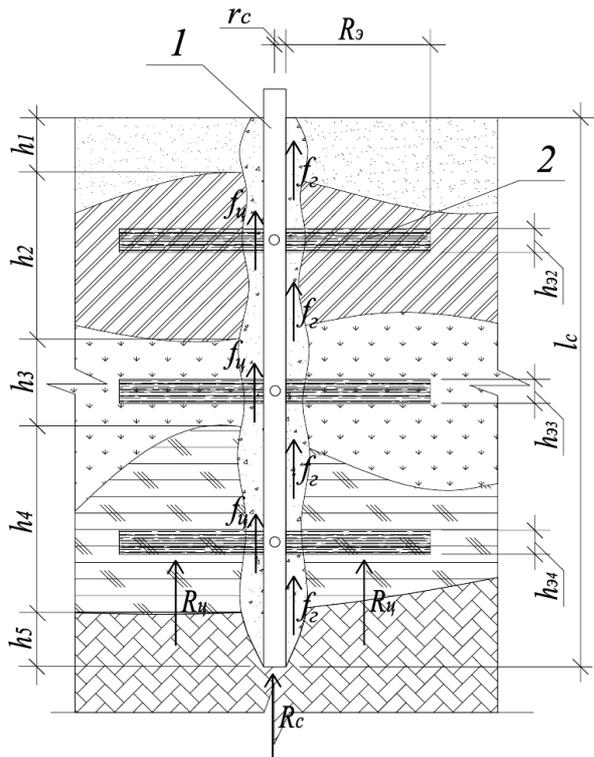


d_c — диаметр инъекционной трубы; l_c — длина рабочей поверхности инъекционной трубы; r — радиус распространения трещин гидроразрыва; δ — раскрытие трещин гидроразрыва

Рисунок 1 — Модель буроинъекционной сваи

Эффективный радиус на практике в суглинках и песках составляет 0,5–1,2 м.

Учитывая, что свая представляет собой систему из инъекционной трубы и цементных уширений, силы сопротивления под нижним концом — это сумма сил сопротивления под нижним концом сваи R_c и под цементными уширениями R_u (рис. 2).



1 — инъекционная труба; 2 — цементное уширение

Рисунок 2 — Расчетная схема буроинъекционной сваи

Расчетные силы сопротивления под нижним концом сваи:

$$R_c = \gamma_{cR} \cdot R \cdot A = \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi \cdot r_c^2.$$

При расчете сил сопротивления под цементными уширениями необходимо учесть, что не по всей длине сваи есть уширения (поэтому вводим коэффициент постели):

$$\begin{aligned} R_u &= \gamma_{cR} \cdot R \cdot A \cdot k_n = \\ &= \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi \cdot (R_3 - r_c)^2 \cdot k_n, \end{aligned}$$

где k_n — коэффициент постели для инъекционного раствора:

$$k_n = \frac{\sum h_{\Delta i}}{l_c}.$$

Силы сопротивления на боковой поверхности сваи так же состоят из двух частей: сопротивление грунта и сопротивление цементного раствора

В результате напорной цементации обводненный грунт консолидируется и упрочняется на 10–20%. Поэтому силы сопротивления грунта на боковой поверхности сваи равны:

$$\begin{aligned} f_2 &= u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_{2i} \cdot (h_i - h_{\Delta i}) \cdot k_{ki} = \\ &= u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_{2i} \cdot h_{2i} \cdot k_{ki}, \end{aligned}$$

где k_{ki} — коэффициент консолидации в i -том слое грунта:

$$k_{ki} = \frac{\gamma_{2i}}{\gamma_{1i}}.$$

Силы сопротивления цемента на боковой поверхности сваи:

$$f_u = u \cdot \sum \gamma_{cf} \cdot f_{ui} \cdot h_{\Delta i}.$$

На основании выше сказанного можем сделать вывод, что несущая способность буроинъекционной сваи состоит из четырех слагаемых и рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} F_d &= \gamma_c \cdot (R_c + R_u + f_2 + f_u), \\ &= \gamma_c \cdot \gamma_{cR} \cdot R \cdot \pi \times \\ &\times (r_c^2 + k_n \cdot (R_3 - r_c)^2) + \\ &+ \gamma_c \cdot u \cdot (\sum \gamma_{cf} \cdot f_{2i} \cdot h_{2i} \cdot k_{ki} + \\ &+ \sum \gamma_{cf} \cdot f_{ui} \cdot h_{\Delta i}). \end{aligned} \quad (5)$$

где γ_c — коэффициент условий работы сваи; γ_{cR} , γ_{cf} — коэффициенты условий работы грунта, соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи; R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа; r_c — радиус

БУДІВНИЦТВО

инъекционной трубы, м; R_3 — эффективный радиус, м; k_n — коэффициент постели для инъекционного раствора; u — наружный периметр поперечного сечения сваи, м; f_{2i} — расчетное сопротивление i -ого слоя грунта на боковой поверхности, кПа; h_{2i} — толщина i -ого слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; k_{ki} — коэффициент консолидации i -го слоя грунта; f_{1i} — расчетное сопротивление i -ого слоя цементного раствора на боковой поверхности, кПа; h_{3i} — эквивалентная полость раскрытия трещин гидроразрыва в i -том слое грунта, м.

Рассмотрим расчет несущей способности буроинъекционной сваи на примере реконструкции фундамента Луганской городской больницы №7, где были выполнены работы по сооружению дополнительных буроинъекционных свай с целью усиления строительных конструкций фундамента и выполнения надстройки дополнительных этажей.

При проектировании инъекционных работ был произведен расчет несущей способности буроинъекционной сваи по несущей способности грунта по формуле (1).

Результаты расчета показали, что несущая способность таких свай будет равна 310 кН.

После окончания работ были выполнены испытания свай статической нагрузкой, соблюдая требования ГОСТ 5686-78, а испытания грунтов статическим зондированием.

Для определения несущей способности свай по результатам исследований было проведено:

- статическое испытание свай..... 2
- испытание грунтов..... 6
- испытание статическим зондированием..... 6

Несущую способность свай по результатам их испытаний выдергивающей статической нагрузкой определяли по формуле:

$$F_d = \gamma_c \frac{F_{u,p}}{\gamma_g}, \quad (6)$$

где γ_c — коэффициент условий работы; $F_{u,p}$ — нормативное значение предельного сопротивления сваи, тс; γ_g — коэффициент надежности по грунту.

Натурные неоднократные испытания показали, что средняя несущая способность свай укрепленной цементным раствором составляет 820 кН.

Рассчитаем несущую способность этих же свай по предложенной формуле (5). Данные для расчета приведены в таблице 1.

Расчет показывает, что несущая способность этих свай равна 910 кН. Средняя погрешность результата составляет около 10%, что допустимо в данном виде расчета.

Сравнив результаты расчетов несущей способности буроинъекционной сваи по формуле из нормативов и по предложенной формуле, можем сделать вывод, что старая формула дает заниженный результат в 3–4 раза.

Таблица 1 — Данные для расчета несущей способности буроинъекционной сваи

№ слоя	γ_c	γ_{cR}	R , кПа	r_c , м	R_3 , м	k_n	f_{2i} , кПа	h_{2i} , м	k_{ki}	f_{1i} , кПа	h_{3i}
1	1	0,8	2900	0,075	0,5	0,25	38	2,95	1,15	160	0,7
2							34	0,70	1,10		0,2
3							34	1,90	1,50		0,5
4							65	2,20	1,50		0,4
5							31	4,30	1,25		1,1

Будівництво

Выводы:

1. Обоснована новая формула для расчета несущей способности буринъекционных свай, погрешность результатов по предложенной формуле не превышает 10%.

2. Результаты расчетов несущей способности буринъекционной свай по нормативной формуле ниже в 3–4 раза по сравнению с результатами натуральных испытаний.

Библиографический список

1. Лебеда О. Ф. Оцінка результатів розрахунку несучої здатності та статичних випробувань бурин'єкційних паль великого діаметру / О. Ф. Лебеда, В. О. Мовчан // *Основи і фундаменти*. — 2006. — №30. — С. 59–67.

2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. — М.: ФГУП ЦПП, 2006. — 46 с.

3. Новые технические решения при строительстве выработок, тампонаже и закреплении горных пород : [монография / под общей ред. Должикова П. Н., Рябичева В. Д.]. — Донецк: Норд-Пресс, 2006. — 265 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Антощенко Н. И., д.т.н., проф. ВНУ им. В. Даля Кипко А. Э.

Статья поступила в редакцию 04.03.14.

д.т.н. Должиков П. М., Збицька В. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ БУРОІН'ЄКЦІЙНОЇ ПАЛІ

У даній роботі виконано аналітичне дослідження несучої здатності бурин'єкційної палі, обґрунтована нова формула для розрахунку несучої здатності цих паль, визначена похибка обчислення.

Ключові слова: аналітичне дослідження, бурин'єкційна паля, несуча здатність, сили опору, похибка.

Dolzhykov P. M. Doctor of Engineering Sciences, Zbytska V. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)
ANALYTICAL RESEARCH OF THE BEARING CAPACITY OF CONTINUOUS FLIGHT AUGER (CFA) PILES

Analytical research of the bearing capacity of continuous flight auger (CFA) pile is given in the article. A new formula for calculation of the bearing capacity of continuous flight auger piles is grounded. An error of calculation is defined.

Key words: analytical research, continuous flight auger (CFA) pile, bearing capacity, force resistance, error.