

УДК 624.154

**ВЛИЯНИЕ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ ОПРЕССОВКИ
НА ПЛОТНОСТЬ СЛОЖЕНИЯ ГРУНТОВ
И НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ СВАЙ И АНКЕРОВ**

Игнатов С.В.

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

В статье приведены результаты опытных лабораторных исследований изменчивости свойств грунтов вокруг расширяемой инъекцией скважины и учет этой изменчивости при определении несущей способности анкеров и свай.

The results of experimental laboratory studies of the ground variability around the injection expanded hole and the usage of this variability while piles and anchors bearing capacity determination are given in the paper.

В связи с достаточно плотной застройкой городских территорий в крупных населенных пунктах республики происходит в основном точечная застройка свободных земельных участков, и как следствие инженер–строитель сталкивается с необходимостью передачи на основания больших сосредоточенных нагрузок от надземных конструкций. Можно отметить, что физические характеристики строительного материала всегда постоянны и нам заведомо известны, то характеристики грунта в большей мере являются величинами, изменяющимися во времени и ориентации. Поэтому перед инженером–строителем стоит задача обеспечить надежность, экономич-

ность, экологичности принятых конструктивных решений нулевого цикла, что на сегодняшний день недостижимо без технической мелиорации грунтов оснований.

Одним из наиболее широко применяемых методов улучшения характеристик грунтов и повышения их несущей способности является инъекция – т.е. закачка под давлением в скважину цементных растворов или бетона, что приводит к опрессовке окружающего грунта при вытеснении его в стороны и к увеличению поперечного сечения полости. За счет этого происходит изменение физико-механических свойств грунта, окружающего полость, повышение несущей способности свай и анкеров. Эта технология позволяет эффективнее, в сравнении с традиционными способами, возводить новые фундаменты, усиливать существующие основания, обеспечивая экономичность и социальный эффект, возможность работы в стесненных условиях объектов без динамических воздействий на них, с малым удельным расходом материалов и трудозатрат при достаточно высоких темпах производства работ.

Под руководством доктора тех. наук, проф. Никитенко М.И. в лабораториях кафедры «Геотехника и экология в строительстве» БНТУ по разработанной методике нами были проведены лабораторные крупномасштабные исследования по изучению характера изменения свойств песчаных и глинистых грунтов, окружающих заинъекцированное тело за счет опрессовки, с последующей инфильтрацией избыточной влаги из цементного раствора в грунт и затвердеванием цементного камня.

После опрессовки цементного раствора с $V/C = 0,5$ в опытных лотках под давлением выдерживались технологические перерывы, продолжительностью 7, 14 и 28 суток для обеспечения набора прочности цементным камнем, далее производилась раскопка заинъекцированного тела, отбор опытных образцов и выполнялось опытное динамическое зондирование вокруг инъекционного тела. Наличие технологических перерывов обусловлено тем, что цементный раствор есть жидкая среда с $V/C = 0,5$, а для твердения цементного камня необходимо $V/C = 0,23-0,27$, то избыток «лишней» влаги из раствора не вступал в химическую реакцию с цементом и проникал в поры грунта, тем самым изменяя его влажность на контакте «цементное тело – грунт», что приводит к некоторому снижению прочностных характеристик грунта в начальный период

после инъецирования. По результатам лабораторных исследований, определено, что большая величина влажности W околовзайного массива (по сравнению с удаленным на расстояние $2,5-3,0R$ грунта) для глинистых грунтов обнаруживается более чем через 21 сутки после инъекции; для песчаных грунтов данное изменение не проявляется через 10 суток. Это обусловлено различной фильтрационной способностью песчаного и глинистого грунтов.

По результатам выполненных опытных замеров влажности и плотности выявлено, что за счет инъекции происходит уплотнение грунтов. Так, для супеси пылеватой плотность грунта на границе с инъекционным телом на 28-е сутки от момента инъекции составляет $22,5 \text{ кН/м}^3$, а на удалении в природном состоянии – $18,0 \text{ кН/м}^3$, а для песка среднего данное изменение на 14-е сутки составляет от $19,5 \text{ кН/м}^3$ до $17,6 \text{ кН/м}^3$. Как следствие на удалении от инъекционного тела происходит и увеличение коэффициента пористости (рис. 1).

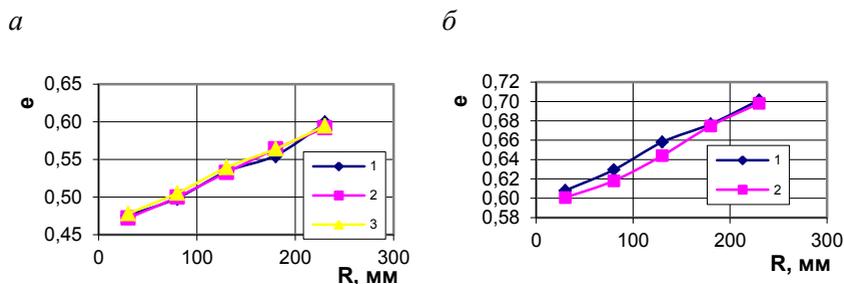


Рис. 1. Графики изменения коэффициента пористости супеси пылеватой (а) и песка среднего (б) с удалением от оси заинъецированной скважины:

1 – через 7 суток после инъекции; 2 – через 14 суток после инъекции;
3 – через 28 суток после инъекции

Результаты опытного динамического зондирования песка среднего вокруг инъекционного тела показали, что в период 7–14 суток изменение сопротивления зондированию составляет не более $0,5 \text{ мПа}$, что говорит о стабилизированном состоянии и о постоянном значении угла внутреннего трения и сцепления. Однако в радиальном направлении происходит существенное снижение сопротивления динамическому зондированию: с 6 МПа на границе

инъекционного тела до 3,0 МПа в природном состоянии (данному изменению соответствует уменьшение угла внутреннего трения с 35,5 ° до 33 °, и значительное уменьшение сцепления: с 1,2 кПа до 0,0 кПа). Для супеси пылеватой радиальное изменение условного динамического сопротивления на 28 сутки составляет 9 МПа (на границе инъекционного тела) до 6,0 МПа на удалении, что соответствует уменьшению угла внутреннего трения с 29 ° до 28 °, удельного сцепления – с 40 кПа до 36 кПа.

По результатам выполненных исследований для скважин с начальным диаметром 110 мм были выведены зависимости по определению коэффициента пористости в радиальном направлении от заинъецированной скважины:

- для супеси пылеватой (с $E_{\text{природ.}}=6,5,0-16,0$ МПа) при увеличении начального диаметра скважины в 1,24 – 1,27 раза растворами с $B/U=0,5$ через 28 суток после устройства инъекционного тела изменение коэффициента пористости от границы заинъецированного тала до расстояния $2R$ от него можно найти:

$$e_{i,R} = e_0 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot (R_i - 2R_1)^2 - 0,0015 \cdot |(R_i - 2R_1)|; \quad (1)$$

- для песка среднего (при $E_{\text{природ.}}=10,0-16,0$ МПа; $R_{0,1}/R_{1,1}=1,19 - 1,23$; $B/U=0,5$) коэффициент пористости определяется:

$$e_{i,R} = e_0 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot (R_i - 2R_1)^2 - 0,0003 \cdot |(R_i - 2R_1)|; \quad (2)$$

где $e_{i,R}$ – искомое значение коэффициента пористости на расстоянии « $0R - 2R$ » от инъекционного тела; e_0 , – природное значение коэффициента пористости грунта; R_1 – радиус опрессованной скважины, мм; $2R_1$ – зона влияния опрессовки грунта, мм; R_i – расстояние, на котором определяется коэффициент пористости, мм.

Инженерная методика расчета несущей способности буринъекционных свай и анкеров по грунту может основываться на закономерностях перемещения стенок скважины при инъекционной опрессовке с учетом нижеприведенных допущений:

- основной показатель, к которому следует привязку прочностных и деформационных характеристик грунтов, является коэффициент пористости – отношение переменной величины $V_{\text{пор}}$ к постоянной величине $V_{\text{скелета}}$;

- расширение скважин при опрессовке сначала происходит в грунтах с меньшим модулем деформации, после достижения одинакового модуля деформации всех пластов, прорезываемых сваями, расширение скважины происходит равномерно в радиальных направлениях;

- доминирующим фактором при расширении скважин является объем закаченного цементного раствора или бетона в скважину, а не давление закачки раствора в скважину, фиксируемое на выходе из бетононасоса;

- увеличение диаметра скважины не превышает 65%;
- поведение грунта при данном увеличении диаметра происходит в соответствии с теорией упругости;
- характеристики грунта в природном состоянии известны;
- несущая способность грунтов определяется после технологического перерыва после выполнения конструкций, который составляет не менее 10 суток для песков гравелистых, крупных и средних; 20 суток для песков пылеватых и не менее 30 суток для глинистых грунтов.

Проектирование свай и анкеров с учетом изменчивости свойств грунтов при опрессовке необходимо выполнять при двух типах инженерно-геологических условиях:

- при однослойном грунте основания вдоль тела сваи или корня анкера;
- при прорезании телом сваи или корнем анкера двух и более ИГЭ.

А. При однослойном грунте оснований вдоль тела сваи учет изменчивости свойств грунта при определении несущей способности необходимо выполнять в следующей последовательности:

А.1. определяются начальные размеры (диаметр и длина скважин). Начальный объем скважины находится из выражения:

$$V_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot L_0, \text{ м}^3 \quad (3)$$

А.2. задается необходимый диаметр сваи или размер корня анкера путем введения коэффициента:

$$K_d = \frac{d_k}{d_0} \quad (4)$$

При назначении коэффициента K_d следует учитывать природную плотность сложения окружающего грунта и длину или глубину расположения отрезка тампонирувания скважины. По выполненным нами исследованиям мы рекомендуем коэффициент K_d принимать не более 1,65.

А.3. определяется объем раствора (V_K), необходимого для укладки в скважину при данном диаметре сваи с учетом опрессовки и уплотнения пяты сваи:

$$V_K = \left(\frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot L_K \right) / K_n = \left(K_d^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot L_K \right) / K_n, \text{ м}^3, \quad (5)$$

где

- K_n – безразмерный коэффициент уменьшения объема зоны заделки. Определяется по [3] в зависимости от водоцементного отношения инъекционной смеси для фильтрующих грунтов и при использовании дренающих оболочек по таблице 1 [3]:

Таблица 1

В/Ц	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
K_n	0,70	0,66	0,62	0,59	0,55

- L_K – конечная длина тела сваи или корня анкера, определяемая из выражения:

$$L_K = L_0 + \frac{K_d \cdot d_0 - d_0}{2} \cdot K_E = L_0 + \frac{d_0}{2} \cdot (K_d - 1) \cdot K_E \quad (6)$$

- K_E – коэффициент влияния деформационных характеристик грунта, определяемый из отношения осредненных модулей деформации: осредненного модуля на высоту d_0 вверх от пяты сваи E_e к осредненному модулю деформации грунта на глубину d_0 вниз от пяты сваи E_n . Принимается по таблице 2:

Таблица 2

E_e/E_n	0,3	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
K_E	0,1	0,25	0,6	0,9	1,0	1,1

А.4. нагрузка, воспринимаемая пятой сваи, определяется по зависимости [3]:

$$F_{dv} = A \cdot R, \quad (7)$$

где

- A – площадь пяты сваи или уширение анкера с учетом опрессовки грунта (для анкера принимается активная площадь, передающая усилие на грунт лобовой поверхностью)

- R – сопротивление грунта под нижним концом сваи, МПа, определяемое в зависимости от глубины залегания пяты, гранулометрического состава грунта и коэффициента пористости основания.

А.5. нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью, определяется по зависимости [3]:

$$F_{dv} = u_k \cdot \sum_{i=1}^n R_{fi} \cdot h_i, \quad (8)$$

где u_k – периметр сваи или анкера, полученный путем опрессовки грунта; h_i – толщина грунта, соприкасающаяся с боковой поверхностью ствола сваи или анкера; R_{fi} – расчетное сопротивление трению грунта на боковой поверхности сваи или анкера в пределах членения на i слоев.

Так как сопротивление грунта под нижним концом сваи и расчетное сопротивление трению грунта на боковой поверхности зависит от коэффициента пористости, то значение нового коэффициента пористости уплотненного инъекцией грунта на контакте буроинъекционного тела с грунтом можно найти по выражению (для свай с начальным диаметром скважины 114–500 мм и коэффициентом пористости $0,5 < e < 0,75$):

- для супеси пылеватой:

$$e_{i,R} = e_0 + 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot R_1^2 - 0,00143 \cdot R_1 \quad (9)$$

- для песка среднего:

$$e_{i,R} = e_0 - 8,1 \cdot 10^{-7} \cdot R_1^2 - 0,00029 \cdot R_1 \quad (10)$$

А.6. несущая способность сваи и анкера находится как сумма несущей способности по пяте и по боковой поверхности по существующим методикам.

Б. Определение несущей способности свай и анкеров в случае двух- и более слойного основания необходимо выполнять в следующей последовательности:

Б.1. определяются начальные размеры (диаметр и длина скважин), находится объем скважины

Б.2. определяется необходимый диаметр сваи или размер корня анкера путем введения осредненного коэффициента $K_{d,cp}$. При определении коэффициента $K_{d,cp}$ необходимо учитывать, что в первую очередь происходит опрессовка грунта с меньшим модулем деформации.

Б.3. после выравнивания значения модуля деформации вдоль тела сваи или анкера принимаем, что происходит плоско параллельное расширение скважины. Диаметры расширенных скважины принимаются за условные начальные диаметры d_k^0 , относительно которых и происходит расширение скважины.

Б.4. Для слоистого напластования грунтов оснований находим грунт с максимальным значением модуля деформации E_{max} . По табличным данным для слоев, обладающим модулем меньшим чем E_{max} находим значение коэффициента пористости при $E_i = E_{max}$.

Б.5. находим величины диаметров скважины в различных слоях при равном модуле деформации грунтов, прорезаемых свай.

Б.6. определяется осредненный объем раствора ($V_{k,cp}$), необходимого для заполнения буровой скважины с учетом опрессовки стенок скважины и уплотнения пяты сваи:

$$V_k = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi \cdot d_{k,i}^2}{4} \cdot L_{k,i} \right) / K_n = \sum_{i=1}^n \left(K_{d,i}^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_k^{0,2}}{4} \cdot L_i \right) / K_n, \text{ м}^3 \quad (11)$$

Б.7. несущая способность сваи и анкера находится как сумма несущей способности по пяте и по боковой поверхности.

Методика определения лобового сопротивления с учетом изменчивости грунтов оснований идентична как для свай и анкеров при однослойном грунте основания и описана выше. Нагрузка, воспринимаемая боковой поверхностью, определяется как сумма вдоль всего тела сваи или анкера с учетом измененного (увеличенного) за счет опрессовки размера тела буроинъекционной конструкции и уплотненного грунта вокруг инъекционного тела.

Литература

1. Прочностные и деформационные характеристики грунтов по данным динамического зондирования. Правила определения : ТКП 45–5.01–17–2006 (02250). – Введ. 03.03.2006. – Минск : Минстройархитектуры, 2006. – 20 с.
2. Грунты. Метод ускоренного определения степени уплотнения динамическим зондированием : СТБ 1377–2003. Введ. 31.01.2003. – Минск : Минстройархитектуры, 2003. – 14 с.
3. Проектирование и устройство буроинъекционных анкеров и свай : пособие П18–04 к СНБ 5.01.01–99 / М.И. Никитенко [и др.]; Минархстрой Респ. Беларусь. – Минск, 2004. – 79 с.