

Александр Невейков, Петр Пойта, Петр Шведовский

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛА БУРОНАБИВНОЙ СВАИ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

### Введение

Современные буронабивные свайные фундаменты [1] отвечают основному направлению развития фундаментостроения в Республике Беларусь - использование фундаментов уплотнения [2]. В процессе устройства таких свай происходит улучшение физико-механических свойств грунта и соответственно повышение несущей способности свай. Именно для таких свай наиболее эффективно применение бетонов на напрягающем цементе (НЦ), расширяющихся

в процессе твердения. Расширение вызывает дополнительное давление на грунт окружающий сваю и создает преднапряжение грунта не только по боковой поверхности, но и под пятой сваи. Это и обеспечивает плотный контакт сваи с грунтом и дополнительное повышение несущей способности свайных фундаментов [3].

Незначительный объем применения бетона на НЦ в фундаментостроении объясняется технологическими трудностями, связанными с получением такого бетона и несовершенными методами расчета. Вместе с тем, очевидно, что проблема проектирования свайных фундаментов из бетонов на НЦ не может быть сведена только лишь к подбору их приемлемого состава. Не менее существенное значение имеет напряженно-деформированное состояние, как самой сваи, так и грунта вокруг нее.

### 1. Расчетные предпосылки

Бетон на НЦ в результате расширения, под влиянием внешнего ограничения, получает напряжения сжатия, арматура - растяжения, а железобетонная конструкция становится предварительно напряженной. В неармированном бетоне на напрягающем цементе при твердении в стесненных грунтовых условиях возникают ограничивающие напряжения

сжатия (рис. 1а) в результате распора при расширении и перемещений в продольном направлении.

Для бетонов с большой величиной свободного расширения при отсутствии достаточной величины внешнего ограничения может происходить разрушение структуры (рис. 1б), что требует оценки ограничивающего влияния грунта на ствол буронабивной сваи при отсутствии арматуры. Величина свободного расширения может достигать  $1,5 \div 2\%$  [3, 4] и зависит от соотношения компонентов в цементе, тонкости помола цемента, минералогического и химического состава клинкера, класса и состава бетона, водоцементного отношения, температурных условий, ограничивающих связей и др. [4]. Принимая во внимание, что диаметры буронабивных свай колеблются от 0,4 до 1,2 м, то очевидно, что чем больше диаметр сваи, тем больше приращение диаметра и давления, оказываемое напрягающим бетоном, на грунт.

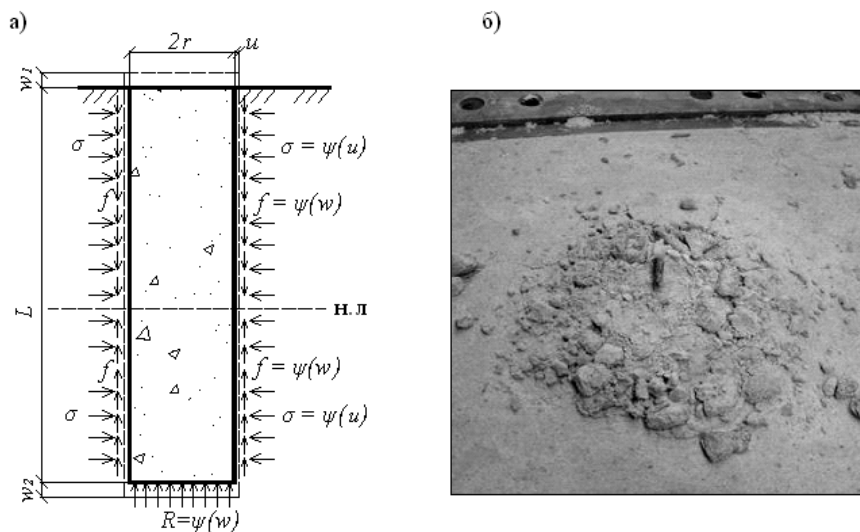


Рис. 1. а) Ограничивающие напряжения на сваю при расширении бетона на НЦ, б) разрушение модели сваи при недостаточном внешнем ограничении

Для определения ограничивающего влияния грунта основания на возникающие напряжения и перемещения бетонного ствола сваи при построении раной модели был принят ряд допущений:

- природное напряженно-деформированное состояние грунта не изменяется при устройстве сваи (рассматривается буровая свая);
- грунт вдоль боковой поверхности сваи - однородный;
- бетон - абсолютно упругий материал;
- деформации расширения имеют постоянный закон распределения;
- сопротивление грунта по боковой поверхности сваи подчиняется закону Кулона;
- сопротивление под пятой сваи принято постоянным.

При использовании литой бетонной смеси, за счет проникновения цементного молока в грунт контактного слоя и его прилипания к стволу сваи, при действии вертикальной нагрузки, осадка сваи проявляется через сдвиг грунта по грунту. Поэтому, как показано во многих работах [5, 6], сопротивление грунта по боковой поверхности ствола буронабивной сваи ( $f$ ) можно определять по закону трения Кулона, используя вместо характеристик поверхностного трения прочностные характеристики грунта, т.е.

$$f = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + c \quad (1)$$

где:

$\varphi$  - угол внутреннего трения;

$c$  - удельное сцепление.

Радиальные горизонтальные напряжения на ствол сваи ( $\sigma$ ) формируются под влиянием:

- природного состояния грунта ( $P_1$ );
- давления укладываемого бетона ( $P_2$ );
- расширения напрягающего бетона ( $P_c$ ).

## 2. Внешнее ограничение в поперечном направлении

Принимая во внимание, что радиальные деформации бетона сваи и радиальные деформации стенок скважины будут равны, то давление от расширения бетона на НЦ ( $P_c$ ) легко можно определить из рассмотрения задачи Ляме о напряженном состоянии толстостенного цилиндра.

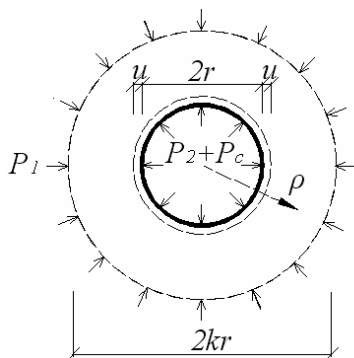


Рис. 2. Расчетная схема определения давления от расширения бетона

Решение такой задачи в перемещениях [7] в принятых обозначениях (рис. 2) имеет вид:

$$u(\rho) = \frac{(r^2(P_c + P_2) - (kr)^2 P_1)(1 - \mu)}{((kr)^2 - r^2)E} \cdot \rho + \frac{r^2(kr)^2((P_c + P_2) - P_1)(1 + \mu)}{((kr)^2 - r^2)E} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

где:

$r$  - радиус сваи;

$k$  - коэффициент внешней границы расширения;

$E$  - модуль деформации грунта;

$\mu$  - коэффициент поперечного расширения грунта.

Напряжения, действующие на внешних границах скважины, от собственного веса грунта ( $P_1$ ) на глубине ( $z$ ) и давления уложенного бетона ( $P_2$ ) [6, 8] определяются:

$$P_1 = \frac{\mu}{(1 - \mu)} \cdot \gamma \cdot z \quad (3)$$

$$P_2 = 17,14 \cdot r, \text{ кПа} \quad (4)$$

Давление на контуре сваи ( $\rho = r$ ) от расширения напрягающего бетона на величину  $u = \varepsilon_0 r$  определяем из (2):

$$P_c = \frac{k^2(2P_1 - P_2(1 + \mu) + E\varepsilon_0) - P_2(1 - \mu) - E\varepsilon_0}{1 - \mu + k^2(1 + \mu)} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  - относительная деформация свободного расширения бетона.

### 3. Внешнее ограничение в продольном направлении

Рост перемещения в продольном направлении приводит к мобилизации сопротивления сдвигу по боковой поверхности сваи ( $f$ ) и плоскости острия сваи ( $R$ ). В соответствии с диаграммой, представленной на рисунке 3, сопротивление сдвигу, в зависимости от величины перемещения, можно выразить следующим образом:

$$\text{при } 0 \leq w < w_0, \quad f = \frac{f_{\max}}{w_0} w \quad (6a)$$

$$\text{при } w \geq w_0, \quad f = f_{\max} \quad (6b)$$

где:

$w$  - перемещение сваи относительно грунта в произвольной точке;

$w_0$  - предельное перемещение грунта.

Аналогичным образом увеличивается и сопротивление под пятой, т.к. особенностью работы буронабивных свай является отсутствие значительной зоны уплотнения, образующейся при устройстве забивной сваи, и грунт под острием находится практически в природном состоянии. Давление под подошвой сваи при осадках даже больше сдвиговых, практически линейно зависят от перемещений пяты, пока не достигнут предельной величины [5]. Для упрощения расчета эту величину целесообразно ограничить расчетным сопротивлением грунта под пятой сваи ( $R_0$ ) по П13-01 к СНБ 5.01.01-99 [9].

Поскольку для сваи из бетона на НЦ с величиной свободного расширения от 1% до 2% длина участка, на котором  $0 \leq u \leq u_0$  на порядок меньше длины участка с  $u > u_0$ , то рассматривалось только решение применительно к (6б), с введением поправочного коэффициента  $k_0 = 0,75$  учитывающего уменьшение сопротивления сдвига после достижения максимальной величины.

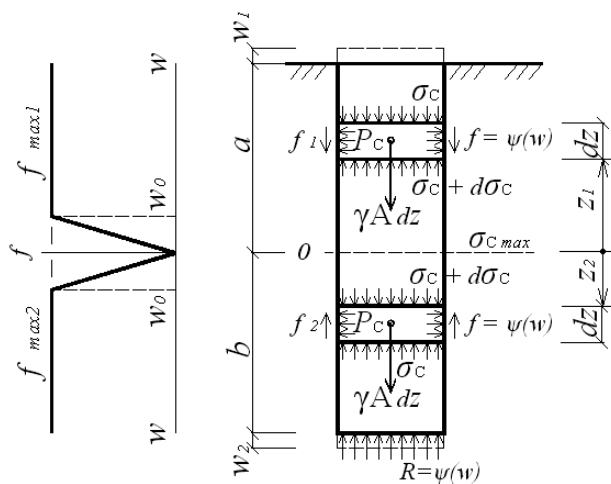


Рис. 3. Расчетная схема ствола буронабивной сваи

Исходя из вышеизложенных допущений и принятой расчетной схемы (рис. 3), после соответствующих преобразований, уравнение равновесия относительно осей  $z_1$  и  $z_2$  принимает вид:

$$\frac{d\sigma_c}{dz} - \frac{\gamma_c r + 2k_0 f_{max}}{r} = 0 \tag{7}$$

где:

$\sigma_c$  - напряжения в стволе сваи;

$\gamma_c$  - удельный вес бетона.

Перемещение ( $w$ ) находится из условия:

$$w(z) = w_\epsilon(z) + w_c(z) \tag{8}$$

где:

$w_\varepsilon(z)$  - перемещение, вызванное расширением бетона;

$w_c(z)$  - перемещение от приложения внешней нагрузки.

Дифференцируя дважды (8), с учетом того, что  $\frac{dw_\varepsilon}{dz} = \varepsilon_0$ ,  $\frac{dw_c}{dz} = \varepsilon_c$  имеем:

$$\frac{d^2 w}{dz^2} = 0 + \frac{d^2 \sigma_c}{dz} \cdot \frac{1}{E_c} \quad (9)$$

где  $E_c$  - модуль упругости бетона.

Общее дифференциальное уравнение, описывающее деформацию сваи от расширения и внешней нагрузки, получаем из (9) с учетом (7):

$$\frac{d^2 w}{dz^2} - \frac{\gamma r + 2k_0 f_{\max}}{E_c r} = 0 \quad (10)$$

– для участка сваи  $z_1 \in [0; a]$ , при  $w'(0) = \varepsilon_0$  и  $w(a) = 0$  имеем:

$$w(z_1) = \frac{z_1(z_1 - 2a)(2k_0 f_{\max 1} + \gamma_c r)}{2rE_c} + \varepsilon_0 z_1 \quad (11)$$

– для участка сваи  $z_2 \in [0; b]$ , при  $w'(b) = -\frac{R_0}{E_c} + \varepsilon_0$  и  $w(0) = 0$  получаем:

$$w(z_2) = \frac{z_2(2k_0 f_{\max 2} z_2 - 2b(2k_0 f_{\max 2} + \gamma_c r) + r(\gamma z_2 + 2E_c \varepsilon_0 - 2R_0))}{2rE_c} \quad (12)$$

Распределение напряжений вдоль ствола сваи вычисляем по формуле:

$$\sigma_c = E_c \left( \frac{dw}{dz} - \varepsilon_0 \right) \quad (13)$$

– для участка сваи  $z_1 \in [0; a]$  имеем:

$$\sigma_c(z_1) = -\frac{(a - z_1)(2k_0 f_{\max 1} + \gamma_c r)}{r} \quad (14)$$

– для участка сваи  $z_2 \in [0; b]$  получаем:

$$\sigma_c(z_2) = -\frac{(b - z_2)(2k_0 f_{\max 2} + \gamma_c r)}{r} - R_0 \quad (15)$$

Сечение свай с максимальным напряжением определяем, приравняв (14) и (15), при  $z_1 = 0$  и  $z_2 = 0$  и  $a = L - b$ :

$$b = \frac{2k_0 f_{\max 1} L + \gamma_c L r - r R_0}{2(k_0 f_{\max 1} + k_0 f_{\max 2} + \gamma_c r)} \quad (16)$$

#### 4. Результаты расчета и их обсуждение

Результаты расчета оценим на конкретном примере.

Для расчетов принята буронабивная свая из бетона на НЦ с  $\epsilon_0 = 1,5\%$  и грунт с характеристиками:

свая -  $L = 6$  м;  $r = 0,2$  м;  $E_c = 25000$  МПа;

грунт - песок мелкий средней плотности, средней прочности;  $\gamma = 17,2$  кН/м<sup>3</sup>;  $\varphi = 36^\circ$ ;  $c = 4$  кПа;  $E = 10,0$  МПа;  $\mu = 0,3$ ;

Сопротивление грунта под нижним концом сваи  $R_0 = 1,6$  МПа принято постоянным по П13-01 к СНБ 5.01.01-99 [9].

Давление от расширения напрягающего бетона определяем на глубинах 1 м, 3 м, 5 м по формуле (5) при  $k = 2$ , которое составляет  $P_{C1} = 86,3$  кПа,  $P_{C3} = 106,3$  кПа,  $P_{C5} = 126,4$  кПа, что значительно превышает природное боковое давление.

Сопротивление грунта по боковой поверхности вычисляем по формуле (1). Для участка  $z_1 \in [0; a]$   $f_{\max 1} = 67,2$  кПа, для участка  $z_2 \in [0; b]$   $f_{\max 2} = 95,5$  кПа.

По данным расчетов по формулам (11, 12, 14-16) построены эпюры развития напряжений и перемещений вдоль ствола буронабивной сваи (рис. 4).

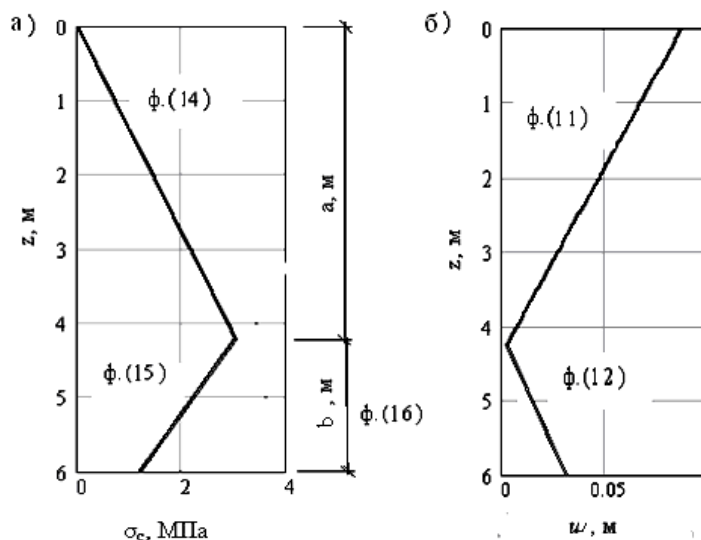


Рис. 4. Эпюры напряжений (а) и перемещений, (б) вдоль ствола сваи

Их анализ показывает, что полученные теоретические решения не в полной мере и не совсем достоверно отражают физическую картину работы сваи при

расширении бетонов на НЦ. Поэтому необходимо проведение полномасштабных экспериментальных исследований, которые позволят уточнить расчетные теоретические решения.

### Выводы

1. Напряженно деформированное состояние ствола буронабивной сваи из бетонов на НЦ формируется как под влиянием природного состояния грунта, так и давления бетона при устройстве сваи.
2. Принимая во внимание, что значение  $R_c$  может быть весьма значительным, в сравнении с  $R_1$  и  $R_2$ , то сопротивление грунта сдвигу будет определяться именно давлением, создаваемым напрягающим бетоном.
3. В неармированном бетоне на НЦ при твердении в стесненных грунтовых условиях возникают ограничивающие напряжения сжатия в результате распора при расширении и перемещений в продольном направлении.
4. Перемещения ствола сваи в вертикальном направлении имеют значение близкое к свободным деформациям бетона при расширении, а напряжения в стволе сваи, выполненной без армирования, достигает значительных величин и имеет наибольшее значение в нижней части.
5. При проектировании, для исключения разрушения ствола сваи из бетона на НЦ, целесообразно его использовать в нижней половине сваи.

### Литература

- [1] Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И., Современные свайные технологии: Учебное пособие, Издательство АСВ, Спб. гос.архит.-строит. ун-т, М.: 2007, 160 с.
- [2] Сеськов В.Е., Кравцов В.Н., Лях В.Н., Тенденции развития и опыт применения прогрессивных фундаментов в условиях Беларуси, Строительная наука и техника 2007, 5, 131-141.
- [3] Невейков А.Н., Пойта П.С., Эффективность применения напрягающих бетонов для изготовления буронабивных свай, Вестник Брестского государственного технического университета, Строительство и архитектура 2009, 1, 27-30.
- [4] Тур В.В., Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона, изд. БПИ, Брест: 1998, 246 с.
- [5] Лапшин Ф.К., Расчет свай по предельным состояниям, Издательство Саратовского университета 1979, 152 с.
- [6] Мамонов В.М., Дзагов А.М., Ермошкин П.М., Несущая способность буронабивных свай, изготовленных из бетонов различного состава, Основания, фундаменты и механика грунтов, 1989, 1, 11-14.
- [7] Александров А.В., Потапов В.Д., Основы теории упругости и пластичности, Высш. шк., М.: 1990, 400 с.
- [8] Ермошкин П.М., Устройство буронабивных свай, Стройиздат, М.: 1982, 160 с.
- [9] Проектирование и устройство буронабивных свай: П13-01 к СНБ 5.01.01-99, Минстрой-архитектуры РБ, Мн.: 2002, 44 с.

### Резюме



Рассматривается проблема расчёта напряженно-деформированного состояния ствола буронабивной сваи из напрягающего бетона. Прежде всего анализируются перемещения в поперечном и продольном направлениях, а также их эффекты.

### **Abstract**

This article presents a model for determination of internal stress and displacements in bored pile from expansive concrete due to the restraint of the base.