

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ УСТРОЙСТВЕ БУРОВЫХ СВАЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЖЕТ-ТЕХНОЛОГИИ

И.Л.Бойко¹, к.т.н., доц., Раед М. Абдулхуссейн¹, инж,
А.В.Шаповал², к.т.н., доц, Е.В.Нестерова², к.т.н., доц,
В.Г.Шаповал³, д.т.н., проф.

¹Республиканский институт инновационных технологий БНТУ

²Приднепровская государственная академия строительства и
архитектуры

³Днепропетровский национальный горный университет

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. Метод устройства буровых свай с использованием джет – технологии получил широкое распространение в инженерной практике [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В настоящее время с использованием этой технологии успешно решают такие задачи:

- укрепление слабых грунтов (например, при строительстве тоннелей и коллекторов)
- ограждение котлованов в обводненных грунтах,
- устройство противофльтрационных завес,
- усиление фундаментов при реконструкции и надстройке зданий,
- укрепление грунтов в основании плитных фундаментов,
- повышения устойчивости склонов и откосов,
- заполнение карстовых полостей в трещиноватых скальных грунтах.

Одним из недостатков процесса является то, что на этапе устройства свай происходит разрушение основания и образование водо – грунто – цементной смеси, свойства которой существенно ниже свойств грунта в природном состоянии.

Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании оснований реконструируемых зданий и сооружений, вблизи которых ухудшаются свойства грунта. На решение очерченной проблемы и направлены изложенные в настоящей работе материалы исследований.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы. Проблеме расчета консолидирующих оснований посвящено большое количество работ [7, 8].

При этом в них рассматриваются задачи, в которых границы консолидирующей области остаются во времени неизменными.

Отличием рассматриваемой нами задачи от рассмотренных ранее заключается в том, что в данном случае граница консолидирующей области перемещается с некоторой скоростью (рис. 1).

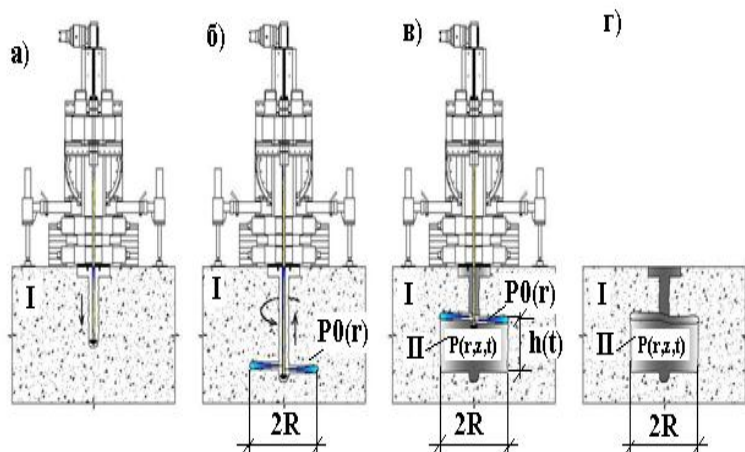


Рис. 1. Метод струйной цементации (схема). а) – проходка лидерной скважины; б), в) – размыв породы с нагнетанием водно – цементной смеси и подъемом буровой колонки; г) – консолидация и твердение грунто - цементной смеси.

I – грунт естественной структуры; II – закрепляемая область основания

На наш взгляд, в математическом плане к рассматриваемой наиболее близка задача о нагреве тела с подвижной верхней границей [9].

При написании настоящей статьи преследовалась цель получить аналитические формулы, позволяющие определять давление в водно – грунто – цементной смеси в процессе струйного закрепления оснований на интервале времен от начала гидроразрыва основания (рис. 1 –б) до момента подъема буровой колонки в крайнее верхнее положение (рис. 1-в).

Постановка задачи исследований. Предпосылки и допущения.

1. Процесс уплотнения водно – грунто – цементной смеси во времени после завершения перемешивания подчиняется уравнению фильтрационной консолидации:

$$c_v \cdot \Delta P = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

где $P(r, z, t)$ - давление в поровой жидкости в водно – грунто – цементном цилиндре высотой $h(t)$ и радиусом R в точке с координатами (r, z) в момент времени t (рис. 2); c_v - коэффициент пространственной консолидации основания; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа в цилиндрической системе координат с осевой симметрией [10].

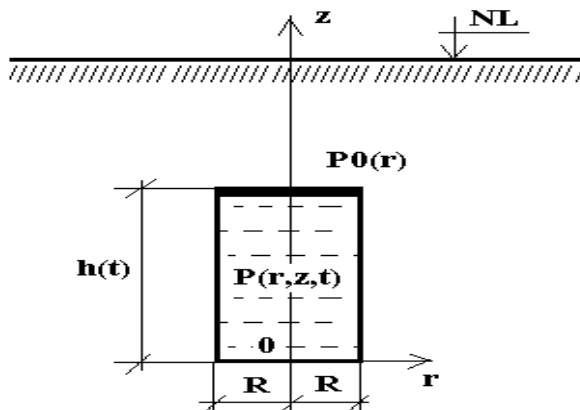


Рис. 2. К определению порового давления в процессе закрепления грунта

2. Известно значение коэффициента пространственной консолидации закрепляемой области c_k .
3. Известно изменение во времени высоты закрепляемой области $h(t)$.
4. В области размыва грунта давление равно $P_0(r)$.
5. На границах закрепляемой области поровое давление равно нулю.

Изложение основного материала исследования.

Для решения задачи используем вариационный метод наименьших квадратов [10].

С учетом принятых нами допущений граничные условия имеют вид:

$$P(R, z, t) = 0; \quad P(r, 0, t) = 0; \quad P[r, h(t), t] = P_0(r). \quad (2)$$

Поскольку до начала процесса поровое давление в закрепляемой области равно нулю, в качестве начального условия имеем:

$$P(r, z, 0) = 0. \quad (3)$$

Далее введем в рассмотрение функцию вида

$$P(r, z, t) = 2 \cdot P_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \cdot \left\{ C(t) + A(t) \cdot \frac{z}{h(t)} + B(t) \cdot \left[\frac{z}{h(t)} \right]^2 \right\}, \quad (4)$$

где $A(t)$, $B(t)$, и $C(t)$ - подлежащие определению путем удовлетворения граничным условиям (2) и уравнению порового давления (1) неизвестные функции времени.

При

$$C(t) = 0; \quad B(t) = 1 - A(t). \quad (5)$$

первые два граничных условия (2) удовлетворяются тождественно, а для третьего имеет место приближенное равенство вида:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R \int_0^R d\varphi \int P[r, h(t), t] \cdot r \cdot dr}{\pi \cdot R^2} = P_0, \quad (6)$$

т.е. последнее граничное условие удовлетворяется в среднем.

Таким образом, в общем случае зависимость давление от времени и координат имеет вид:

$$P(r, z, t) = 2 \cdot P_0 \cdot \left\langle \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \cdot \frac{z}{h(t)} \cdot \left[1 - \frac{z}{h(t)} \right] \cdot A(t) + \frac{z^2}{h^2(t)} \right\rangle. \quad (7)$$

Далее поступим так:

1. Подставим (7) в (1) и найдем невязку $\varepsilon(r, z, t)$.

2. После этого найдем квадрат невязки $\varepsilon^2(r, z, t)$.

Далее проинтегрируем квадрат невязки по объему. Имеем:

$$\varepsilon_1 = \int_V \varepsilon^2(r, z, t) \cdot dV = \int_0^R d\varphi \int_0^{h(t)} dz \int_0^R \varepsilon^2(r, z, t) \cdot r \cdot dr. \quad (8)$$

3. После этого найдем минимум строго положительного функционала (8). Для этого найдем частную производную по переменной $A' = dA(t)/dt$ и приравняем полученное таким образом выражение нулю. Имеем:

$$\frac{dA(t)}{dt} - \left[\frac{6 \cdot c_v}{R^2} + \frac{1}{2 \cdot h(t)} \cdot \frac{dh(t)}{dt} \right] \cdot A(t) - \frac{3}{h(t)} \cdot \frac{dh(t)}{dt} + \frac{9}{R^2} = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) с учетом начального условия (3) имеет вид:

$$A(t) = \frac{3}{R^2} \cdot \int_0^t \exp \left[\frac{6 \cdot c_v \cdot (t - \tau)}{R^2} \right] \frac{R^2 \cdot \frac{dh(\tau)}{d\tau} - 3 \cdot c_v \cdot h(\tau)}{\sqrt{h(t) \cdot h(\tau)}} \cdot d\tau. \quad (10)$$

Подставив (10) в (7) найдем окончательное общее решение задачи:

$$P(r, z, t) = 2 \cdot P_0 \cdot \left(1 - r^2 / R^2 \right) \cdot \frac{z}{h(t)} \cdot \left[1 - \frac{z}{h(t)} \right] \cdot \left\{ \frac{3}{R^2} \cdot \int_0^t \exp \left[\frac{6 \cdot c_v \cdot (t - \tau)}{R^2} \right] \cdot \frac{\left[R^2 \cdot \frac{dh(\tau)}{d\tau} - 3 \cdot c_v \cdot h(\tau) \right]}{\sqrt{h(t) \cdot h(\tau)}} \cdot d\tau \right\} + \frac{2 \cdot P_0 \cdot z^2}{h^2(t)}. \quad (11)$$

Равенство (11) позволяет определять давление в поровой жидкости в процессе изготовления с использованием джет – технологии буровых свай в точке с координатами (r, z) в момент времени t в зависимости от величины порового давления P_0 в области размыва и закона изменения во времени высоты подъема буровой колонки $h(t)$.

Применительно к решению практических задач равенство (11) несет избыточную информацию. Поэтому представляет интерес закон изменения среднего порового давления во времени. Для этого проинтегрируем (11) по объему и разделим полученное таким образом выражение на значение объема скважины в момент времени t . Имеем:

$$\bar{P}(z, t) = 2\pi \cdot \int_0^h \int_0^R \bar{P}(r, z, t) \cdot r \cdot dr \bigg/ \pi \cdot R^2 \cdot h(t). \quad (12)$$

Из (12) вытекает, что среднее давление в находящейся в скважине жидкости зависит от функции $A(t)$, которая, в свою очередь, зависит от скорости подъема буровой колонны $h(t)$.

Исследуем данный вопрос подробнее. Рассмотрим законы изменения высоты подъема буровой колонны в виде:

$$h_1(t) = h_0 + V \cdot t^3; \quad h_2(t) = h_0 + V \cdot t^2 \quad h_2(t) = h_0 + V \cdot t, \quad (13)$$

где V - коэффициент пропорциональности (для третьего варианта это – линейная скорость подъема буровой колонны).

Далее подставим (13) в (10). Имеем:

$$A(t) = \begin{cases} \frac{9}{R^2} \int_0^t \exp\left[-\frac{6c_v(t-\tau)}{R^2}\right] \frac{[R^2 V \tau^2 - c_v h_1(\tau)]}{\sqrt{[h_1(t) \cdot h_1(\tau)]}} d\tau (\text{вариант 1}); \\ \frac{3}{R^2} \int_0^t \exp\left[-\frac{6c_v(t-\tau)}{R^2}\right] \frac{[2R^2 V \tau - 3c_v h_2(\tau)]}{\sqrt{[h_2(t) \cdot h_2(\tau)]}} d\tau (\text{вариант 2}); \\ \frac{3}{R^2} \int_0^t \exp\left[-\frac{6c_v(t-\tau)}{R^2}\right] \frac{[R^2 V - 3c_v h_3(\tau)]}{\sqrt{[h_3(t) \cdot h_3(\tau)]}} d\tau (\text{вариант 3}); \end{cases} \quad (14)$$

Заключение

Изложенные в настоящей статье материалы исследований позволили получить соотношения, позволяющие выявить закономерности распределения давления в поровой жидкости при усилении оснований и устройстве буровых свай с использованием джет – технологии.

Эти результаты имеют ценность при решении таких практических задач:

- определение напряженно – деформированного состояния оснований при устройстве в них конструкций с использованием джет – технологии;

- управление напряженно – деформированным состоянием оснований, в которых с использованием джет – технологии создаются буровые сваи, противофильтрационные завесы и другие конструкции (это достигается путем варьирования давления P_0 и закона изменения во времени высоты подъема буровой колонки $h(t)$).

Summary

An analytical solution of the problem of the average change over time in the pore pressure formed using a single-component variant Jet - technology space . It is shown that the average pressure substantially depends on the time variation rate of ascent of the drill string.

Литература

1. Власов С.Ф. Повышение устойчивости оползнеопасных склонов с помощью струйной технологии закрепления грунтов / С.Ф. Власов, Н.А. Максимова-Гуляева. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2010. – 143 с.
2. Головин К.А., Сапронов И. В. Современные методы закрепления неустойчивых горных пород. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск № 10 / 2013 – С. 152-157.
3. Ground Improvement, Second Edition: учебное пособие/М.П. Мозли, К. Кирш. Оксон, изд-во Spon Press 2.2004 – 431 с.
4. Достижения струйной технологии/Джозеф П. Вэлш, Джордж К. Брукс. США, Мэрилэнд, 2006 – 18 с.
5. Малинин А. Г. Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве//Подземное пространство мира. 2000. №2, с. 18-26.
6. Малинин А. Г. Применение струйной цементации грунтов в транспортном строительстве//Подземное пространство мира. 2001. №6, с. 15-22.
7. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. - Ростов на Дону, 1989 - 608 с.
8. Шаповал А.В., Шаповал В.Г. Теория взаимосвязанной фильтрационной консолидации: Монография.-Днепропетровск: Пороги, 2009-311 с.
9. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. - М.: Высш.шк., 1985. - 480 с.
10. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1974. – 840 с.