механических характеристик и, таким образом, может быть прогнозировано в проекте в зависимости от решения поставленной задачи.

1. Алексеев С. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Избранные гла-вы. Учебное пособие (для магистрантов и аспирантов строительных специальностей), Издательство АСВ. М. 2019 г.
2. Алексеев С.И., Городнова Е.В., Пашин К.С., Хисамов Р.Р. Патент на полезную модель RU 127768 U1, 10.05.2013. Заявка № 2012156988/03 от 25.12.2012. <http://www.buildcalc.ru/Common/Images/Pile-127768-2012-12-25.jpg>
3. К. Терцаги. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. ГОССТРОЙИЗДАТ.1933 г.
4. Свод правил. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>

Алексеев С.И.

Использование системы дистанционного образования при выполнении лабораторных работ по механике грунтов для студентов строительных специальностей

*Петербургский государственный университет путей сообщения императора
Александра I
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/sr-10-08-2020-02

idsp: sciencerussia-10-08-2020-02

Аннотация

Широкое применение системы дистанционного образования (СДО) в высшей школе, ставит новые задачи по реализации специальных технических дисциплин. Особое значение в этом отношении имеют лабораторные работы, которые в классическом варианте всегда выполнялись в специализированных лабораториях – в аудиториях ВУЗа. В современных условиях необходим новый подход к реализации учебных программ, который приведён в качестве примера при рассмотрении одной из лабораторных работ по курсу «Механика грунтов» с учетом требований Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования. Рассмотрен метод определения модуля деформации песка на основе штампового испытания с построением и анализом графиков нелинейного деформирования основания. Защита выполненной лабораторной работы осуществляется с использованием тематического теста.

Ключевые слова: Система дистанционного образования, лабораторные работы, механика грунтов, методика определения модуля деформации грунта, штамповые испытания.

Лабораторная работа:

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПЕСКА НА ОСНОВЕ ШТАМПОВОГО ИСПЫТАНИЯ

Теоретическая часть:

Нелинейность деформирования основания при нагружении.

По результатам многочисленных штамповых и натурных испытаний фундаментов, между давлениями (P) в основании под подошвой фундамента (штампа) и его деформациями (S) (осадкой) может быть построена нелинейная зависимость (рис. 1).

Рис. 1. График зависимости развития осадки (S) фундамента (штампа) от прикладываемого давления (P). 0, I, II, III – характерные расчётные интервалы давлений

Представленная на рис. 1. зависимость $S=S(P)$ носит нелинейный характер, при этом по оси абсцисс (P) можно выделить несколько интервалов (фаз напряженно-деформированного состояния основания):

- Интервал с обозначением «0» соответствует давлению под подошвой фундамента от 0 до структурной прочности исследуемого грунта ($P_{стр.}$). В данном интервале давлений даже при максимальном его значении осадки грунта практически не происходит. Значение $P_{стр.}$, зависящее от водно-коллоидных и кристаллизационных связей в грунте, определяется специальными исследованиями и используется в основном при расчётах ползучести скелета грунта (расчёт развития осадки фундамента во времени).

- Интервал с обозначением «I» соответствует давлению под подошвой фундамента от $P_{стр.}$ до начальной критической нагрузки ($P_{н.кр.}$) (по Н.П. Пузыревскому). В данном интервале давлений развитие осадки фундамента происходит практически линейно, т.е. в соответствии с функцией $S=kP$, где k – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально в зависимости от свойств грунта. При величине давления, соответствующего $P_{н.кр.}$ в основании, в угловых зонах под подошвой фундамента, возникают (зарождаются) зоны пластических деформаций. Значение $P_{н.кр.}$ определяется следующим выражением:

$$P_{н.кр.} = \frac{\pi(\gamma d + c \times ctg\varphi)}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma d, \quad (1)$$

где γ – удельный вес грунта; d – глубина расположения фундамента (штампа), к которому прикладывается нагрузка; c – сцепление грунта; φ – угол внутреннего трения грунта.

Величина $P_{н.кр.}$, как правило, имеет небольшое значение и в расчётах находит ограниченное применение, характеризуя основание вне зависимости от размеров подошвы фундамента.

- Интервал с обозначением «II» соответствует давлению под подошвой фундамента от $P_{н.кр.}$ до предельного давления на грунт основания ($P_{пр.}$). В данном интервале давлений развитие осадки фундамента происходит нелинейно, или можно принять в соответствии с произвольной (в зависимости от свойств и состояния грунта основания) степенной функцией $S=k^n P$, где n – коэффициент, определяемый

экспериментально. Нелинейность деформирования основания обусловлена развитием зон пластических деформаций (касательных напряжений), которые при достижении $P_{пр.}$ образуют замкнутые поверхности скольжения с формированием выпора грунта из-под подошвы фундамента. При данной степени нагружения осадка фундамента фактически может стремиться к бесконечности, что и соответствует выпору грунта или потери устойчивости (нарушение условий I предельного состояния [1]).

- Интервал с обозначением «III» соответствует давлению под подошвой фундамента превышающего предельного давления на грунт основания ($P_{пр.}$). При данной степени нагружения основание фактически не работает на сжатие, поскольку преобладающие зоны касательных напряжений вызывают развитие поверхностей скольжения с выпором грунта из-под подошвы фундамента. Данная степень нагружения основания соответствует потери устойчивости конструкции, что недопустимо.

На практике допускается работа оснований в фазе уплотнения (интервал I) и в начале фазы сдвигов (интервал II).

Для более обоснованного учёта работы основания, с целью получения экономичных решений, при расчёте фундаментов необходимо учитывать нелинейную работу основания на всём интервале давлений участка «II» (рис. 1). Нелинейность деформирования основания в данной стадии нагружения обусловлена появлением и развитием объёмов областей зон пластических деформаций (касательных напряжений) под подошвой фундамента.

Аналитически описать нелинейную зависимость $S_i=S_i(P_i)$ на всём интервале давлений участка «II» (рис. 1) возможно с использованием вычисляемого коэффициента нелинейности K_i' (ф. 1.10. [2]).

$$K_i' = \frac{P_{пр.} - 1,1P_{н.кр.}}{P_{пр.} - P_{н.кр.}(0,9 + 0,2i)} ; \quad (2)$$

Вычисление коэффициента нелинейности K_i' (фактически функциональной зависимости между I и II предельными состояниями) осуществляется для фундамента заданного размера, при различных давлениях $P_i = P_{н.кр.}(1 + 0,2i)$, при $i=1 \dots n$, что позволяет рассчитать осадку упругопластического основания ($S_{yn.i}$) по формуле:

$$S_{yn.i} = S_{y(1,2P_{н.кр.})} \times K_i' , \quad (3)$$

где $S_{y(1,2P_{н.кр.})}$ – осадка фундамента на линейно-деформированном полупространстве при давлении соответствующем $1,2P_{н.кр.}$, может быть определена по рекомендациям СП 22.13330.2016 [1]. В проводимых лабораторных испытаниях $S_{y(1,2P_{н.кр.})} = S_{проп.}$ (по линейной части экспериментальной зависимости $S_i=S_i(P_i)$ на рис. 4).

При лабораторных испытаниях основные закономерности наступления и смены стадий напряженно-деформированного состояния основания можно проследить, увеличивая нагрузку на модель фундамента - штамп, установленный в лоток с песком (модель основания), и фиксируя его осадку.

Такое испытание называется штамповым (рис. 2). В настоящее время это основной полевой способ определения, модуля деформации (при диаметре штампа $D = 70$ см). Подобные испытания в лабораторных условиях с моделью штампа представлены на рис. 3.

Обычно результаты испытания оформляются в виде зависимости осадки от среднего давления по подошве штампа (рис. 1). Давление, соответствующее концу фазы уплотнения, называется пределом пропорциональности и обозначается $P_{проп.}$; давление, соответствующее концу фазы сдвигов, называется предельным и обозначается $P_{пр.}$ (рис. 1).

Рис. 2. Пример полевых штамповых испытаний грунтов оснований

1 - лоток с песчаным грунтом; 2 - рычажный пресс; 3 - штамп; 4 - индикатор

Рис. 3. Общий вид лабораторного испытательного стенда

Цель работы:

- ✓ получить в опыте зависимость $S_i = S_i(P_i)$ и определить $P_{\text{проп.}}$ и $P_{\text{пр.}}$ по участку, соответствующему фазе уплотнения;
- ✓ определить модуль деформации E ;
- ✓ сопоставить результаты лабораторных штамповых испытаний с расчётной аналитической зависимостью осадки, вычисленной по ф. (3).

Необходимое лабораторное оборудование: жесткий круговой лабораторный штамп диаметром $D=5\text{ см}$, рычажный пресс для нагружения штампа (соотношение плеч рычага $n=10$), лоток с песчаным грунтом, индикатор (рис. 3).

В целях ознакомления с процессом производства работ при проведении полевых штамповых испытаний, рекомендуется просмотреть видео ролик:

<https://www.youtube.com/watch?v=aVNCSXqJsJw>

Порядок выполнения лабораторных испытаний и обработка результатов:

1. На подвеску пресса (рис. 3) уложить гирю массой $m_1=0,5\text{ кг}$, соответствующую первой ступени давления на штамп: $P_1 = 0,1m_1n/A$, где A - площадь штампа.
2. После стабилизации осадки взять отсчет по индикатору h_1 , мм. Значения m_1 , P_1 , h_1 записать в журнал.
3. Приложить вторую ступень нагрузки и т. д.
4. Испытания проводят до разрушения основания – формирование выпора грунта (резкой - провальной осадке штампа). За предельную принимают общую нагрузку на подвеске от последней ступени.
5. Строят график зависимости $S_i = S_i(P_i)$ и выделяют на нем участки, соответствующие трем фазам напряженно-деформированного состояния (см. рис. 1), определяя $P_{\text{проп.}}$, ($S_{\text{проп.}}$) и $P_{\text{пр.}}$.
6. Определяют модуль общей деформации по формуле теории линейно деформируемой среды (ф. Шлейхера - Буссинеска (см. главу 3[3]):

$$E = \omega(1 - \nu^2) \frac{D \cdot P_{\text{проп.}}}{S_{\text{проп.}}} \quad (4)$$

В данной работе $\omega = \pi/4$ (круглый жесткий штамп), $\nu = 0,3$ (песок).

7. Строят, с использованием аналитических вычислений по ф. 1, 2, 3, графическую зависимость $S_i = S_i(P_i)$, (использование «Mathcad», «Excel») и сопоставляют её с результатами проведённых испытаний.

Практическая часть: (Пример образца выполнения и оформления отчёта).

Лабораторная работа

(Выполнение дистанционно по заданному варианту задания в системе СДО ПГУПС)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПЕСКА НА ОСНОВЕ ШТАМПОВОГО ИСПЫТАНИЯ

(Нелинейность деформирования основания при нагружении).

Диаметр штампа $D = 5 \text{ см}$; Площадь штампа $A = 20 \text{ см}^2$

Соотношение плеч рычага $n = 10$.

Характеристики пылеватого песка: $\varphi = 30^\circ$; $c = 3 \text{ кПа}$; $\gamma = 16 \text{ кН/м}^2$.

Результаты лабораторных испытаний по вдавливанию (осадке) штампа

Масса гирь на подвеске, кг, m_i	Давление $P_i = \frac{0,1m_i n}{A}$, МПа	Отсчет по индикатору, мм	Осадка S , мм	Масса гирь на подвеске, кг, m_i	Давление $P_i = \frac{0,1m_i n}{A}$, МПа	Отсчет по индикатору, мм	Осадка S , мм
1	2	3	4	1	2	3	4
		0,00		1,7	0,085	0,53	0,53
0,5	0,025	0,07	0,07	1,9	0,095	0,92	0,92
0,7	0,035	0,18	0,18	2,1	0,105	2,92	2,92
0,9	0,045	0,25	0,25	2,3	0,115	>6,11	
1,1	0,055	0,30	0,30				
1,3	0,065	0,32	0,32				
1,5	0,075	0,42	0,42				

Провальная осадка
– выпор грунта из-
под подошвы
штампа

Рис. 4. График зависимости осадки штампа от давления. 1 – кривая осадки $S_i = S_i(P_i)$ по результатам экспериментальных лабораторных испытаний; 2 – расчетная кривая $S_i = S_i(P_i)$ по результатам вычислений (ф. 1, 2, 3)

Табличные результаты испытаний представлены в графическом виде $S_i = S_i(P_i)$. Полученный график (рис. 4) позволяет определить:

- $P_{\text{проп.}} = 0,075 \text{ МПа}$; $S_{\text{проп.}} = 0,042 \text{ см}$ – линейная зависимость $S_i = S_i(P_i)$;
- $P_{\text{пр.}} = 0,115 \text{ МПа}$, – потеря устойчивости штампа (провальная осадка – выпор грунта за пределы подошвы штампа).

Тогда по ф. (4) получим: $E = \omega(1 - \nu^2) \frac{D \cdot P_{\text{проп.}}}{S_{\text{проп.}}} = \frac{\pi}{4} (1 - 0,3^2) \frac{5 \cdot 0,075}{0,042} = 6,4 \text{ МПа}$

Найденный модуль деформации пылеватого песка $E=6,4\text{МПа}$ соответствует коэффициенту пористости $e=0,55$ или его плотному состоянию (см. табл. 1 в приложении к СП 22.13330.2016. [1]) <http://elima.ru/scripts/ground.php>.

Обработка результатов аналитических вычислений по ф. 1, 2, 3 позволяет также построить графическую зависимость $S_i=S_i(P_i)$, (использование «Mathcad», «Excel» - кривая 2 на рис. 4) и, таким образом, прогнозировать нелинейную работу основания для фундамента (штампа) заданного размера на всём диапазоне давлений, вплоть до предельного состояния. Более подробную информацию см. лекционный материал на сайте: <http://www.buildcalc.ru/Learning/SoilMechanics/Open.aspx?id=Chapter12>

Вывод. Сопоставление экспериментальных и расчётных результатов (кривые 1 и 2 на рис. 4) показывает их удовлетворительную сходимость, а, следовательно, обоснованность и возможность, использования результатов расчёта при решении различных геотехнических инженерных задач.

1. Свод правил. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>
2. Алексеев С. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Избранные главы. Учебное пособие (для магистрантов и аспирантов строительных специальностей), Издательство АСВ. М. 2019 г.
3. Механика грунтов, основания и фундаменты. Алексеев С.И., Алексеев П.С. учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / Алексеев С. И., Алексеев П. С.. Москва, 2014. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=58871

Алексеев С.И.

Вероятностная оценка промерзания грунта как определяющий фактор глубины заложения фундаментов

*Петербургский государственный университет путей сообщения императора
Александра I
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi: 10.18411/sr-10-08-2020-03

idsp: sciencerrussia-10-08-2020-03

Аннотация

Приведены результаты обработки измеренных глубин промерзания грунта по данным метеорологической станции как для поверхности с естественным покровом, так и для оголённой поверхности. Показана изменчивость средних значений глубин промерзания за отдельные десятилетия для сорокалетнего периода наблюдений. Ряд наблюдений за глубиной промерзания, в соответствии с нормальным распределением, может быть представлен как изменяющаяся величина с различной степенью вероятности. Предложена методика вычисления глубины промерзания грунта, которая в зависимости от сложности решаемой задачи, использует вероятностный подход с различной степенью обеспеченности.

Ключевые слова: Глубина промерзания грунта, глубина заложения фундаментов, вероятностная оценка промерзания, средняя температура за зимний период, вероятностная шкала, обеспеченность повторяемости промерзания.

Введение

Надёжность и долговечность эксплуатации фундаментов лёгких сооружений в большой степени зависит от глубины заложения или от степени пучинистости промерзающего окружающего грунта. Как известно, процесс пучения грунта в природных условиях отличается крайней неравномерностью, поскольку на него влияют большое количество факторов. Одним из важных и определяющих является фактор