



УДК 624.131.522:691.4

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Сабирзянов Даниль Дамирович

ассистент

E-mail: danil198900@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Экспериментальные исследования глинистых грунтов в объемных лотках при режимном статико-циклическом нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Целью проведения лотковых экспериментальных исследований является развитие теории прочности и деформирования глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при комбинированных чередующихся длительно статическом и циклическом нагружениях.

Результаты. В качестве результата исследований были получены новые экспериментальные данные об особенностях напряженно-деформированного состояния глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при комбинированном чередующемся длительно статико-циклическом нагружении, а также развитие осадок оснований моделей фундамента в лабораторных условиях.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что в экспериментальных исследованиях определения изменения прочности и деформируемости глинистых грунтов при комбинированном чередующемся длительно статико-циклическом нагружении, необходимы для модернизации инженерных методик расчета осадок и несущей способности оснований фундаментов.

Ключевые слова: трехосное сжатие, глинистые грунты, статическое нагружение, циклическое нагружение, комбинированное нагружение, несущая способность, прочность, удельное сцепление, упрочнение.

Введение

До сегодняшнего дня одной из фундаментальных задач при проектировании, которые так же необходимо учитывать в процессе эксплуатации зданий и сооружений при влиянии статических и циклических нагрузок, является оценка несущей способности и прогноз осадок оснований фундаментов с учетом изменения физико-механических характеристик грунтов при комбинированном чередующемся длительно статико-циклическом нагружении [1-5].

Поэтому проведенные экспериментальные исследования определения изменения прочности и деформируемости глинистых грунтов при комбинированном чередующемся длительно статико-циклическом нагружении в объемных лотках, необходимы для модернизации инженерных методик расчета осадок и несущей способности оснований фундаментов, так как знание природы грунтов, условий их формирования и изменений в процессе будущего существования, их природного состава и строения, сильно действующих на их физико-механические характеристики, дает возможность грамотно оценить их прочностные и деформационные свойства во время проектирования и в процессе эксплуатации зданий и сооружений.

Экспериментальные исследования

Для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния глинистого основания под плитным фундаментом при комбинированном чередующемся длительно статико-циклическом нагружении в лабораторных условиях проведены

штамповые лотковые испытания глинистого грунта нарушенной структуры со следующими физико-механическими характеристиками: $\gamma=19,4$ кН/м³, $W = 23$ %, $W_L=40,1$ %, $W_p=22,8$ %, $I_p=17,3$ %, $I_L=0,012$ Д.е., $e=0,81$ Д.е., $S_r=0,73$ Д.е.

Экспериментальные исследования состояли из нескольких этапов, которые имели свои методические особенности и, в той или иной мере, влияли на конечный результат:

1. Разработка методики проведения испытания.
2. Изготовление опытных образцов.
3. Изготовление тензодатчиков сопротивления.
4. Загрузка моделей и контроль нагрузки в течение опыта.
5. Измерение прогибов, деформаций и осадок модели.
6. Обработка результатов испытания.

Для установления зависимости вертикальных перемещений в грунте от времени действия нагрузки, от приложенных циклических нагрузок, определения деформаций грунтового массива в основании плитного фундамента и в массиве, окружающем при кратковременном статическом, длительно статическом, циклическом и комбинированном чередующихся длительно статических и циклических воздействиях внешней нагрузки испытания проводились методами статических вдавливающих нагрузок и циклических нагружений.

Экспериментальные исследования проводились в лотке с размерами 1000×1000×1000 мм лаборатории кафедры ОФДСиИГ Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Показания деформаций снимались с помощью Автоматического Измерителя Деформаций (АИД-4).

В экспериментах нагрузка передавалась через конструкцию жесткой рамы, при помощи гидравлического домкрата. В качестве модели плитного фундамента принята железобетонная плита. Измерения вертикальных перемещений модели плитного фундамента осуществлялась индикаторами часового типа. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. Схема нагружения глинистого основания и размеры плиты приведены на рис. 2.

Для замеров напряжений в грунтовом массиве основания штампа были размещены грунтовые датчики давлений. Принципиальная схема расположения датчиков в грунтовом основании приведены на рис. 3.

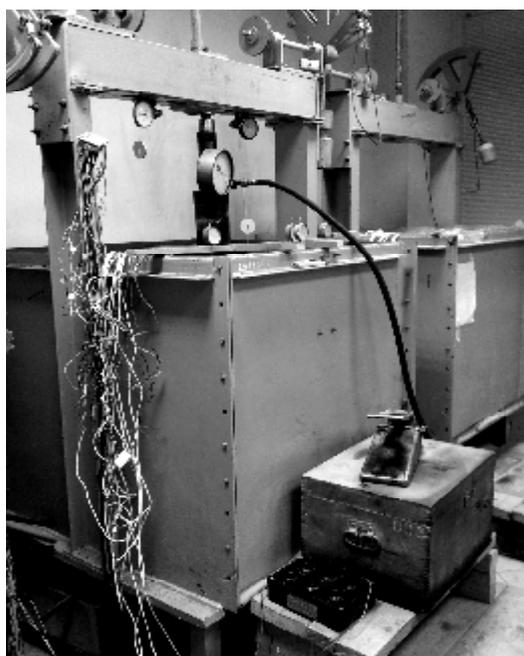


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки (иллюстрация авторов)

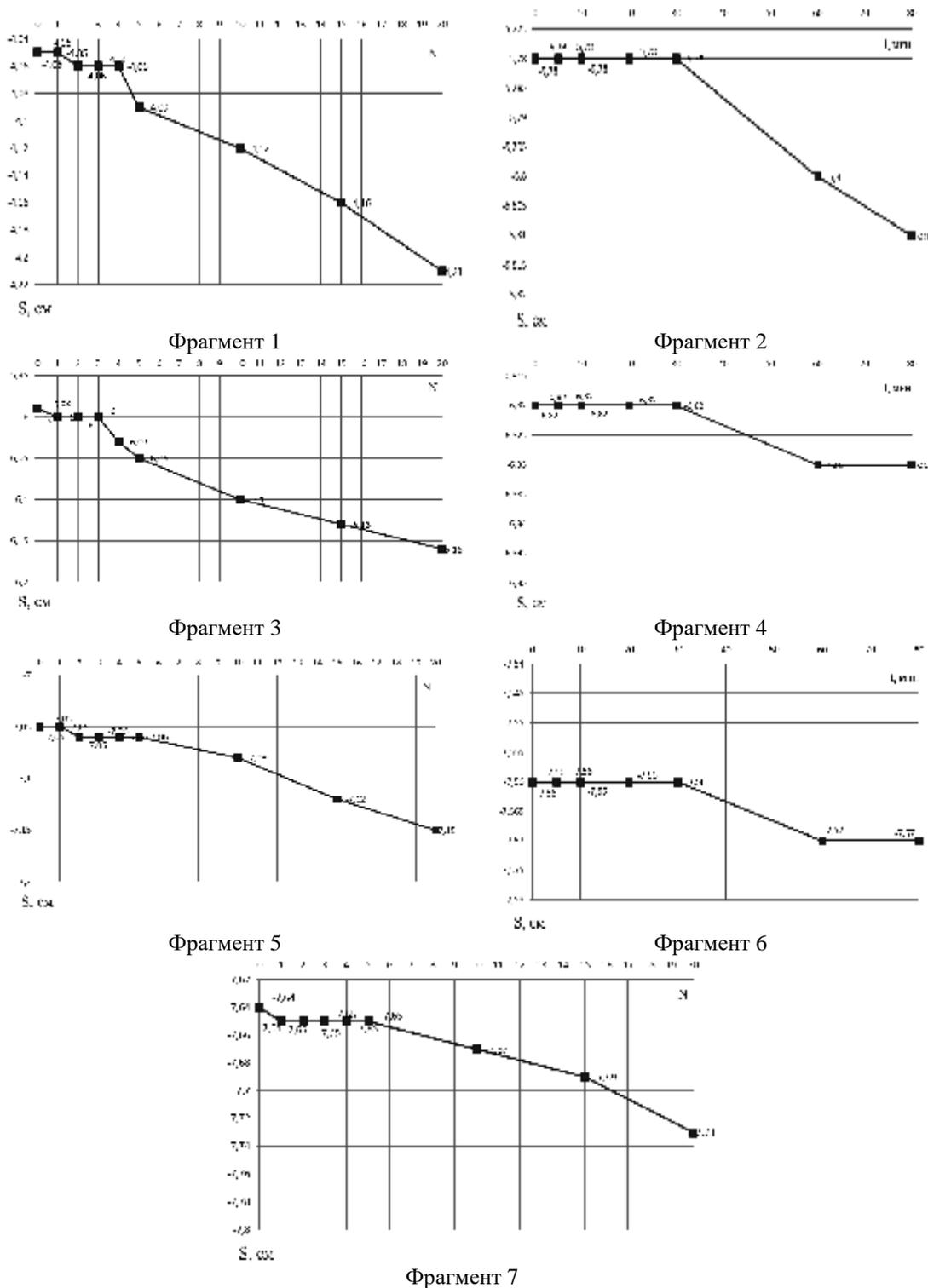


Рис. 5. Фрагменты графика развития осадки модели плитного фундамента при комбинированном чередующемся длительно статическом и циклическом нагружении (эксперимент № 1) (иллюстрация авторов)

Рассмотрим изменения вертикальной деформации эксперимента № 1 (рис. 4-5). Сначала к образцу ступенями прикладывалась вертикальная статическая нагрузка (блок 1) до $\sigma_{max}=100$ кПа. Каждая ступень нагружения выдерживалась в течение 15 минут согласно программе испытания, где после статического нагружения осадка основания составила 4,05 см.

После 1 блока статического нагружения переходим к блоку 2 с циклическим нагружением, где максимальное вертикальное напряжение составляет $\sigma^{\max}=100$ кПа. За весь 2 блок циклического нагружения было выполнено 500 циклов, где общая осадка основания составила 5,78 см.

Далее, при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 2) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 3), в момент изменения режима нагружения изменение осадки основания не происходило, только после 30 минут осадка увеличилась незначительно на 0,02 см и общая осадка составила 5,80 см. Блок 3 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,21 см и общая осадка основания составила 5,99 см.

При переходе от блока с длительно статического нагружения (блок 3) к циклическому нагружению (блок 4) в момент изменения режима нагружения, осадка основания до 3 циклов нагружения не изменяется, а затем, на 4 цикле нагружения (рис. 4-5), вертикальные деформации увеличились на 0,03 см. За весь 4 блок циклического нагружения было выполнено еще 500 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,83 см и общая осадка основания составила 6,82 см.

Далее, снова при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 4) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 5), в момент изменения режима нагружения изменение осадки основания не происходило, только после 50 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка составила 6,83 см. Блок 5 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,23 см и общая осадка основания составила 7,05 см.

При переходе от блока с длительно статического нагружения (блок 5) к циклическому нагружению (блок 6), в момент изменения режима нагружения осадка основания до 2 циклов нагружения не изменяются, а затем, на 3 цикле нагружения (рис. 4-5) вертикальные деформации увеличились на 0,01 см. За весь 6 блок циклического нагружения было выполнено еще 1200 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,51 см и общая осадка основания составила 7,56 см.

Далее снова при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 6) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 7), в момент изменения режима нагружения изменение осадки основания не происходило, только после 50 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка составила 5,57 см (рис. 4). Блок 7 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,08 см и общая осадка основания составила 7,64 см.

При переходе от блока с длительно статического нагружения (блок 7) к циклическому нагружению (блок 8), в момент изменения режима нагружения осадка основания до 5 циклов нагружения не изменяются, а за тем после 5 цикла нагружения (рис. 4-5) вертикальные деформации увеличились на 0,02 см. За весь 8 блок циклического нагружения было выполнено еще 1400 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,36 см и общая осадка основания составила 8,00 см.

При переходе от блока с длительно статического нагружения (блок 5) к циклическому нагружению (блок 6), в момент изменения режима нагружения осадка основания до 2 циклов нагружения не изменяются, а затем, на 3 цикле нагружения (рис. 4), вертикальные деформации увеличились на 0,01 см. За весь 6 блок циклического нагружения было выполнено еще 1200 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,51 см и общая осадка основания составила 7,56 см.

Далее, снова при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 6) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 7), в момент изменения режима нагружения изменение осадки основания не происходило, только после 50 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка составила 5,57 см (рис. 4). Блок 7 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,08 см и общая осадка основания составила 7,64 см.

При переходе от блока с длительно статического нагружения (блок 7) к циклическому нагружению (блок 8), в момент изменения режима нагружения осадка основания до 5 циклов нагружения не изменяются, а затем, после 5 цикла нагружения (рис. 4-5), вертикальные деформации увеличились на 0,02 см. За весь 8 блок

циклического нагружения было выполнено еще 1400 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,36 см и общая осадка основания составила 8,00 см.

Далее, при переходе на блоки с циклическим нагружением, наблюдается увеличение скорости накопления деформаций. Необходимо отметить, что накопление общих деформаций происходит, в основном, за счет пластической (неупругой) составляющей. Упругие деформации в пределах блоков нагружений практически не изменяются (рис. 4-5).

Также, по полученным показаниям грунтовых датчиков, размещенных в массиве глинистого основания (рис. 3) модели плитного фундамента, для каждого этапа нагружения построены эпюры деформаций (рис. 6).

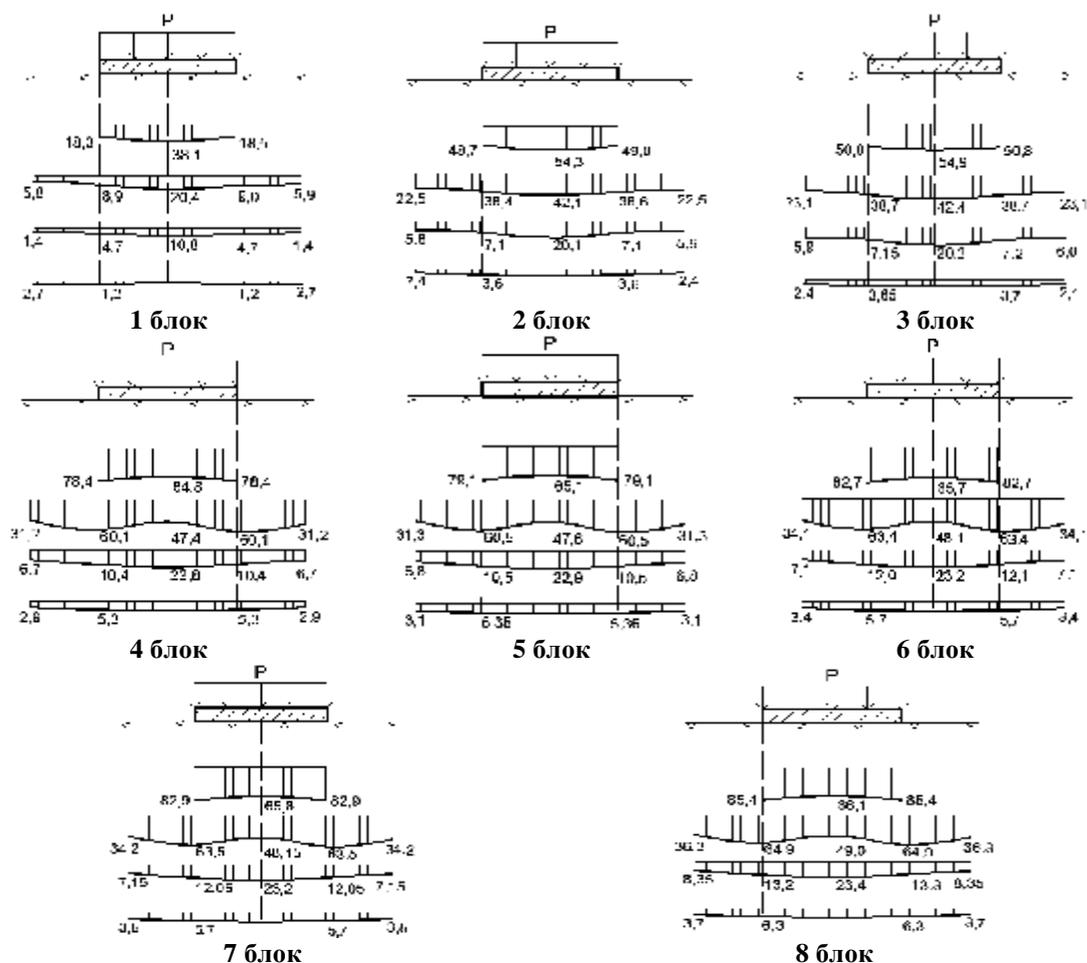


Рис. 6. Эпюры деформаций под моделью плитного фундамента при комбинированном чередующемся длительно статическом и циклическом нагружении (эксперимент № 1) (иллюстрация авторов)

Как видно из эпюр (рис. 6), происходит изменение деформаций во всех зонах грунта по мере увеличения количества циклических нагружений и продолжительности выдержки испытываемого образца при длительном статическом нагружении. При этом необходимо отметить, что наибольшее увеличение напряжений происходит под моделью плитного фундамента при действии циклических нагружений.

Рассмотрим изменения вертикальной деформации эксперимента № 2 (рис. 7, 8). Сначала к образцу ступенями прикладывалась вертикальная статическая нагрузка (блок 1) до $\sigma^{\max}=100$ кПа. Каждая ступень нагружения выдерживалась в течение 15 минут согласно программе испытания, где, после статического нагружения, осадка основания составила 3,37 см. После 1 блока статического нагружения переходим к блоку 2 с циклическим нагружением, где максимальное вертикальное напряжение составляет $\sigma^{\max}=100$ кПа. При действии циклических нагрузок, в пределах каждого блока,

происходило увеличение осадки основания. Деформации с различной интенсивностью развивались на всем протяжении испытаний. Наиболее интенсивное развитие деформаций происходило в блоке 2 в начальный период нагружений (до 1000 циклов). За весь 2 блок циклического нагружения было выполнено 1000 циклов, где осадка основания увеличилась на 2,12 см и общая осадка основания составила 5,49 см.

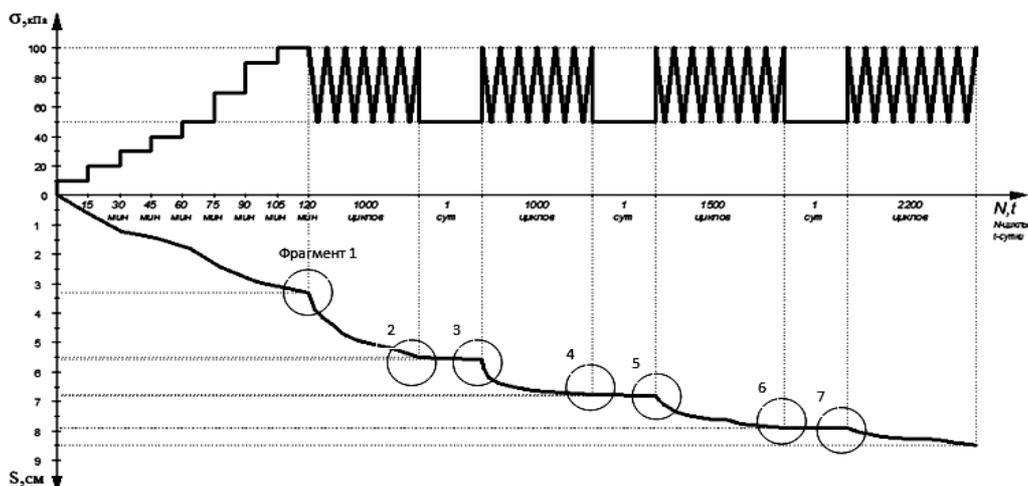


Рис. 7. График развития осадки модели плитного фундамента при комбинированном чередующемся длительно статическом и циклическом нагружении (эксперимент № 2) (иллюстрация авторов)

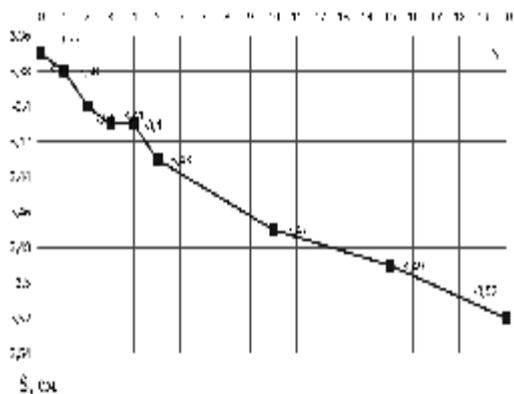
Далее при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 2) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 3) в момент изменения режима нагружения $\sigma^{\max}=50$ кПа значение осадки основания уменьшилось на 0,03 см и общая осадка основания составила 5,46 см, затем в течение 50 минут изменения осадки не происходили, только после 50 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка основания составила 5,47 см. Блок 3 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,10 см и общая осадка основания составила 5,59 см.

При переходе от блока длительно статического нагружения (блок 3) к циклическому нагружению (блок 4) в момент изменения режима нагружения значение осадки основания увеличилось на 0,03 см и общая осадка основания составила 5,62 см. Деформации до 5 циклов нагружения не изменяются, а затем, на 6 цикле нагружения, (рис. 7-8) осадка основания увеличилась на 0,02 см. Наиболее интенсивное развитие деформаций происходило до 500 циклов и общая осадка основания составила 6,60 см. За весь 4 блок циклического нагружения было выполнено 1000 циклов, где осадка основания увеличилась на 1,23 см и общая осадка основания составила 6,82 см.

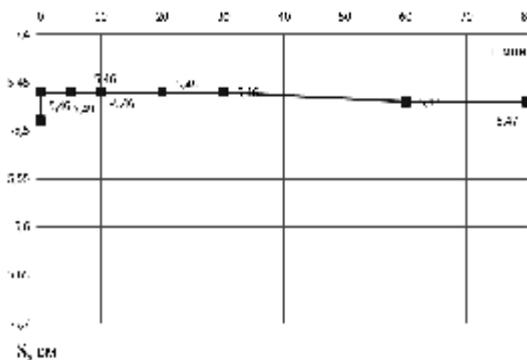
Далее при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 4) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 5) в момент изменения режима нагружения $\sigma^{\max}=50$ кПа значение осадки основания уменьшилось на 0,03 см и общая осадка основания составила 6,79 см, затем в течении 50 минут изменения осадки не происходили, только после 50 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка основания составила 6,80 см. Блок 5 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,06 см и общая осадка основания составила 6,88 см.

При переходе от блока длительно статического нагружения (блок 5) к циклическому нагружению (блок 6) в момент изменения режима нагружения значение осадки основания увеличилось на 0,04 см и общая осадка основания составила 6,92 см. Деформации до 6 циклов нагружения не изменяются, а затем на 10 цикле нагружения осадка основания увеличилась на 0,01 см и общая осадка основания составила 6,93 см. Наиболее интенсивное развитие деформаций происходило до 480 циклов, и общая осадка основания составила 7,67 см. За весь 6 блок циклического нагружения было выполнено

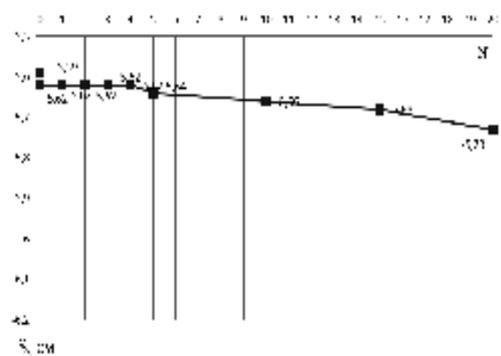
1500 циклов, где осадка основания увеличилась на 1,03 см и общая осадка основания составила 7,91 см.



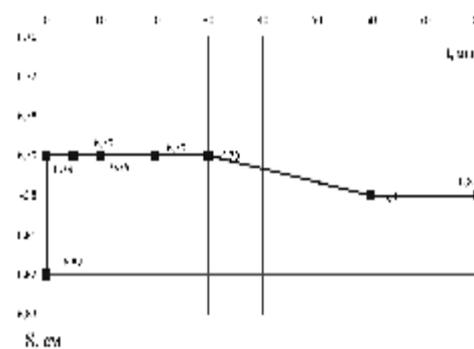
Фрагмент 1



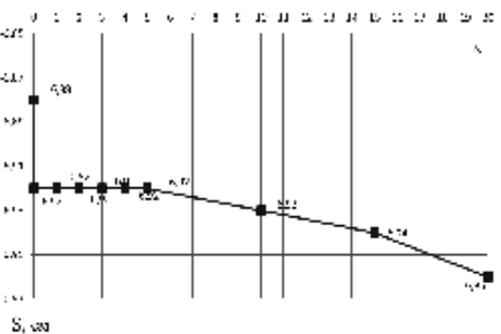
Фрагмент 2



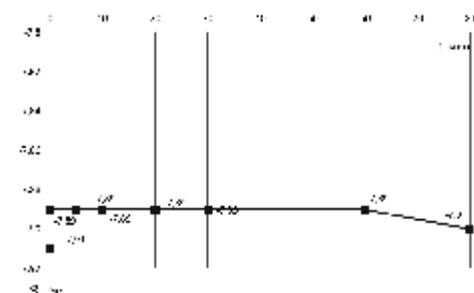
Фрагмент 3



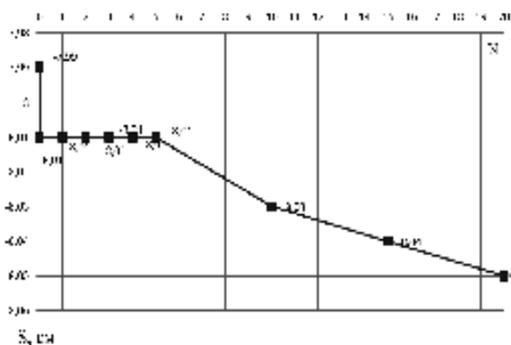
Фрагмент 4



Фрагмент 5



Фрагмент 6



Фрагмент 7

Рис. 8. Фрагменты графика развития осадки модели плитного фундамента при комбинированном чередующемся длительно статическом и циклическом нагружении (эксперимент № 1) (иллюстрация авторов)

Далее при переходе от блока с циклическим нагружением (блок 6) к блоку с длительно статической нагрузкой (блок 7) в момент изменения режима нагружения $\sigma^{\max}=50$ кПа значение осадки основания уменьшилось на 0,03 см и общая осадка основания составила 7,89 см, затем в течение 70 минут изменения осадки не происходили, только после 70 минут осадка увеличилась незначительно на 0,01 см и общая осадка основания составила 7,90 см. Блок 7 с длительно статическим нагружением продолжился 1 сутки, где осадка основания увеличилась на 0,08 см и общая осадка основания составила 7,99 см.

При переходе от блока длительно статического нагружения (блок 7) к циклическому нагружению (блок 8) в момент изменения режима нагружения значение осадки основания увеличилась на 0,02 см и общая осадка основания составила 8,01 см. Деформации до 5 циклов нагружения не изменяются, а затем на 10 цикле нагружения осадка основания увеличилась на 0,02 см и общая осадка основания составила 8,03 см. За весь 6 блок циклического нагружения было выполнено 2200 циклов, где осадка основания увеличилась на 0,51 см и общая осадка основания составила 8,50 см.

Заключение

На основании анализа результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Характер развития деформаций в блоках с длительно действующей статической нагрузкой при комбинированном чередующемся длительно статическом и циклическом нагружении зависит от продолжительности действия циклической нагрузки в предыдущем блоке и продолжительности рассматриваемого блока нагружения. Таким образом, при переходе от циклического нагружения в блок с длительно статической нагрузкой в момент изменения режима нагружения, происходит незначительное уменьшение осадки на 0,01-0,02 см за счет упругой составляющей, и деформации стабилизируются. Затем, по мере увеличения времени выдержки под длительно статической нагрузкой, происходит дальнейшее нарастание деформаций на величину 0,05-0,3 см. При переходе от блока длительно статического нагружения к циклическому нагружению, в зависимости от режима нагружения, в момент изменения режима, осадка основания увеличивается на 0,01-0,03 см. Далее, в зависимости от количества приложенных циклических нагружений, осадка увеличивается на 0,5-2,3 см. Наиболее интенсивное развитие деформаций происходит в первых блоках нагружения, т.е. при циклическом нагружении развитие наблюдалось до 1000 циклов, при длительном статическом нагружении до 3 суток.

2. При характере развития деформаций в блоках необходимо учитывать два характерных случая, когда:

- сначала действует длительное статическое нагружение $\sigma_I(t)$, а затем циклическое нагружение;

- сначала действует циклическая нагрузка $\sigma_I(N)$, а затем длительное статическое нагружение.

В первом случае общая долговечность увеличивается по сравнению с тем, когда ведется циклическое нагружение со значением напряжения $\sigma_I(N)$. Это связано с увеличением эффективной поверхности энергии разрушения грунта на первой ступени нагружения вследствие восстановления и увеличения коагуляционных связей [6-10].

Во втором случае снижение прочности при переходе на блок с длительной статической нагрузкой будет чрезвычайно медленным. Это объясняется «эффектом задержки» усталостных трещин в плоскостях предельного равновесия в расчетном объеме грунта [6-10].

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Аналитические зависимости расчета осадок основания фундаментов при режимном длительно-статическом и циклическом нагружении // Геотехника. 2016. № 6. С. 34–41.

2. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 1. С. 16–23.
3. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Прочность и деформации глинистых грунтов при трехосном режимном чередующемся статическом и циклическом нагружении // Геотехника Беларуси: Наука и практика. 2013. С. 297–304.
4. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Деформации глинистых грунтов при режимном комбинированном длительном и циклическом нагружении: перспективные направления развития теории и практики в реологии и в механике грунтов – Материалы XIV Международного симпозиума по реологии / КГАСУ. Казань, 2014. С. 130–135.
5. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В., Сабирзянов Д. Д. Моделирование поведения глинистых грунтов в условиях режимного трехосного сжатия : сб. тр. XVII международной научной конференции «Формирование среды жизнедеятельности» / МГСУ. Москва, 2014. С. 402–407.
6. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Analytical dependence for calculating of foundation base settlement at the regime for a long-static and cyclic loading // ISSMGE Bulletin. London. 2016. № 5. P. 53–62.
7. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Calculation model of foundation base settlement at the static and cyclic regime loading // Energy Geotechnics. Kiel, Germany. 2016. V. 723. P. 429–434.
8. Mirsayapov Ilizar T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading // FORM2018: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 365 (2018) 042082. M. 2018. P. 1–10.
9. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Prediction of deformations of foundation beds with a consideration of long-term nonlinear soil deformation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. T. 48. № 4. P. 148–157.
10. Каюмов Р. А., Шакирзянов Ф. Р., Гаврюшин С. С. Моделирование процесса деформирования и оценка несущей способности системы грунт – тонкостенная конструкция // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. № 6. 2014. С. 20–24.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru**Sabirzyanov Danil Damirovich**

assistant

E-mail: danil198900@mail.ru**Kazan State University of Architecture Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Experimental researches of clay soils in large trays of the regime static-cyclic loading**Abstract**

Problem statement. The purpose of conducting experimental research is the development of the theory of strength and deformation of clay soils under conditions of triaxial compression with combined alternating long-term static and cyclic loading.

Results. As a result of the research, new experimental data were obtained on the peculiarities of the stress-strain state of clay soils under conditions of triaxial compression under combined alternating long-term static and cyclic loading, as well as the development of base sediments of foundation models in laboratory conditions.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the fact that in experimental studies of determining changes in the strength and deformability of clay soils with combined alternating long-term static and cyclic loading, it is necessary to modernize engineering methods for calculating sediment and bearing capacity of foundations.

Keywords: triaxial compression, clay ground, static loading, cyclic loading, combined loading, bearing capacity, strength, specific cohesion, hardening.

References

1. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Analytical dependencies of the calculation of the foundation base sediment under the regime of long-static and cyclic loading // *Geotechnica*. 2016. № 6. P. 34–41.
2. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Strength and deformability of clay soils under the regime of a spatial stress state with allowance for crack formation // *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2016. № 1. P. 16–23.
3. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Strength and deformation of clayey soils under triaxial regime alternating static and cyclic loading // *Geotekhnika Belarusi: Nauka i praktika*. 2013. P. 297–304.
4. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Deformations of clay soils with regime combined long-term and cyclic loading: perspective directions of the development of theory and practice in rheology and soil mechanics – Proceedings of the XIV International Symposium on Rheology / KГASU. Kazan, 2014. P. 130–135.
5. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Modeling the behavior of clay soils under conditions of triaxial compression: collection of works of the XVII International Scientific Conference «Formation of the environment of vital activity» / MGSU. Moscow, 2014. P. 402–407.
6. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Analytical dependence for calculating of foundation base settlement at the regime for a long-static and cyclic loading // *ISSMGE Bulletin*. London. 2016. № 5. P. 53–62.
7. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Sabirzyanov D. D. Calculation model of foundation base settlement at the static and cyclic regime loading // *Energy Geotechnics*. Kiel, Germany. 2016. V.723. P. 429–434.
8. Mirsayapov Ilizar T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading // *FORM2018: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 365 (2018) 042082. M. 2018. P. 1–10.
9. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Prediction of deformations of foundation beds with a consideration of long-term nonlinear soil deformation // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. T. 48. № 4. P. 148–157.
10. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R., Gavryushin S. S. Modeling of the deformation process and evaluation of the load-bearing capacity of the soil system – thin-walled construction // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mechanical engineering*. № 6. 2014. P. 20–24.