

УДК 624.131.54

Хасанов Рубис Раисович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Галеев Рустам Ринатович

инженер II категории

E-mail: rusgal1973@gmail.com

АО «Казанский Гипронефтепром»

Адрес организации: 420127, Россия, г. Казань, ул. Дементьева, д. 1

Влияние режима сочетания циклического и статического нагружений на деформации и физико-механические характеристики водонасыщенных суглинистых грунтов

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является изучение влияния режима сочетания циклического и статического нагружений на деформации водонасыщенных суглинков, а также описание изменений деформативных свойств грунта после режимного циклического воздействия.

Для достижения поставленной цели было выполнено следующее:

- проведение экспериментальных исследований деформации глинистого грунта в условиях сочетания циклического и статического нагружений с фиксацией показаний индикаторов деформаций в непрерывном режиме;
- послойное определение деформативных характеристик грунтов под штампом и за его пределами в лабораторных условиях до и после проведения испытания;
- анализ полученных результатов проведённых экспериментальных исследований.

Результаты. В результате проведенных исследований выявлены некоторые закономерности деформирования и изменения характеристик водонасыщенных суглинистых грунтов при сочетании статического и циклического нагружений.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что установлено, что даже непродолжительное, по сравнению со статической, воздействие циклической нагрузки способно привести к ощутимому росту деформации грунтового основания и ее скорости.

Ключевые слова: физико-механические характеристики, объемный загрузочный лоток, статическое нагружение, циклическое нагружение, деформация грунта, скорость деформации.

Введение

Опыт строительства и эксплуатации сооружений и высотных зданий показывает, что воздействие циклических нагрузок может привести к накоплению дополнительных необратимых пластических деформаций в грунтах оснований и, в конечном счете, к дополнительным осадкам и кренам фундаментов сооружений [1]. Проблемы, в особенности, возникают, когда грунтовые основания представлены водонасыщенными глинистыми грунтами [2-5]. Зачастую основания фундаментов при эксплуатации сооружения наряду со статическими испытывают и циклическое нагружение, возникающее, к примеру, от воздействия нагрузок из-за скопления людей, работы массивного оборудования, движения транспорта и т.д. – эти нагрузки не постоянные, а периодические [6-10]. При этом режим нагружения, зависящий от доли статической и циклической составляющих, их амплитуды и т.п., может быть совершенно различным. На взгляд авторов, довольно распространенным сценарием нагружения представляется режим, схема которого приведена на рис. 1. Т.е. предполагается, что есть некая средняя статическая нагрузка на основание, действующая продолжительное время, включающая в себя постоянную и часть временных нагрузок, и периодически возникающая циклическая нагрузка, состоящая из временных нагрузок, которые могут как исчезать совсем, так и достигать максимальных значений.

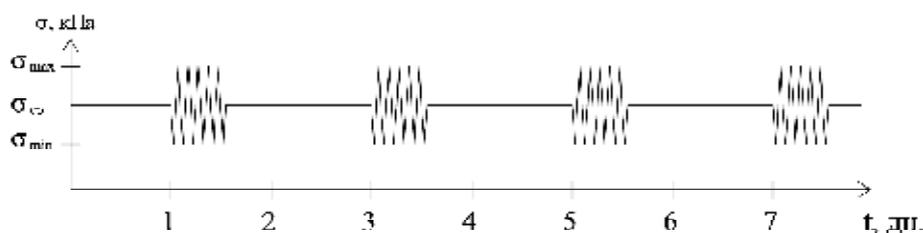


Рис. 1. Принципиальная схема режима нагружения грунта (иллюстрация авторов)

Описание грунта и методики экспериментальных исследований

В целях экспериментального изучения деформативности оснований, сложенных водонасыщенными суглинистыми грунтами, при воздействии на них циклических нагрузок, возникающих с определенной периодичностью, и установления закономерностей их поведения в лаборатории кафедры оснований и фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии были проведены испытания вышеупомянутых грунтов в объемном лотке с жесткими стенками при внутренних размерах $400 \times 400 \times 400$ мм.

Нагрузка на испытуемый грунт прикладывалась через круглый жесткий штамп диаметром 160 мм, напряжения в грунте, под которым во время испытания изменялись от $\sigma_{\min} = 100$ кПа до $\sigma_{\max} = 180$ кПа. Продолжительность одного цикла нагружения (нагрузка-разгрузка) принималась равной 10 секундам, что соответствует частоте нагружения 0,1 Гц. Уменьшение и увеличение давления под штампом осуществлялось путём перемещения тележки с грузом вдоль загрузочного рычага (рис. 2а).



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальная установка для проведения опыта (иллюстрация авторов): а) общий вид установки; б) общий вид индикаторов, установленных в гнезда рамы

В процессе эксперимента проведена серия из трех испытаний, режим нагружения грунтов в которых включал в себя этапы испытаний, состоящие из порядка 300 циклов повторного нагружения в течение 50 минут с последующей выдержкой под средним статическим давлением σ_{cp} в течение 2-х суток (рис. 1).

Испытуемый грунт – суглинок нарушенной структуры со следующими физико-механическими характеристиками: $\rho = 1,9$ г/см³; $W_L = 32$ %; $W_p = 16$ %; $W = 24$ %, $I_p = 16$ %; $I_L = 0,26$; $S_r = 0,85$; $E = 4,4$ МПа. Грунт заданных параметров изготавливался в соответствии с приложением «В» ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения». Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Для измерения абсолютных деформаций осадки штампа и окружающего грунта применялись индикаторы часового типа ИЧ-10 МН и прогибомер с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы, установленные в гнезда специальной рамы, фиксировали

деформации поверхности грунта на расстоянии 20 и 70 мм от границ круглого штампа (рис. 2б). Прогибомер фиксировал осадку штампа посредством стальной нити, закрепленной на его поверхности. Показания индикаторов для последующей камеральной обработки записывались на видеокамеру в непрерывном режиме как при нагружении, так и при разгрузке штампа.

Испытания деформаций грунта в объемном лотке проводились в следующей последовательности:

1. Статическое нагружение испытуемого грунта до достижения давления под штампом среднего значения $\sigma_{cp} = 140$ кПа с фиксацией показаний индикаторов и прогибомера в течение суток до момента начала циклического нагружения.

2. Циклическое нагружение испытуемого грунта с нижеследующими параметрами: максимальное давление под штампом $\sigma_{max} = 180$ кПа; амплитуда цикла напряжений 80 кПа; частота приложения нагрузки $\omega = 0,1$ Гц; количество циклов нагружения – $N = 300$.

3. Повтор чередования этапов статического нагружения в течение двух суток и циклического нагружения в количестве 300 циклов в течение 50 минут до стабилизации деформаций осадки штампа.

4. Снятие нагрузки и послойное определение физико-механических характеристик исследуемого грунта после испытания.

Деформации грунта при режимном нагружении

Всего в каждом испытании было проведено по 4 этапа чередования статических и циклических нагрузок. По результатам экспериментальных исследований строились графики абсолютных деформаций осадки штампа во времени $S = f(t)$ (рис. 3).

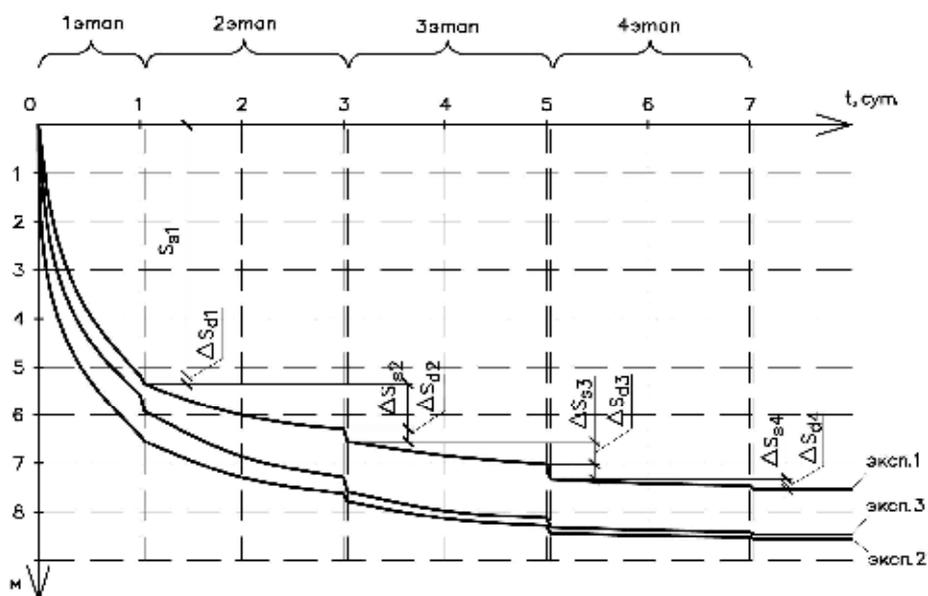


Рис. 3. График развития осадки грунта под штампом во времени (иллюстрация авторов)

Поэтапный анализ графиков осадки грунта под штампом, приведенных на рис. 3 для всех 3 испытаний, показал следующее:

- на 1 этапе статического нагружения продолжительностью в 24 часа осадка грунта под штампом составила $s_{s1} = 5,19 \dots 6,43$ мм (сред. 5,73 мм), скорость развития осадок при этом составила $V_{s1} = 0,22 \dots 0,27$ мм/ч (сред. 0,24 мм/ч). Последующий этап приложения циклических нагрузок длительностью 50 минут (300 циклов) вызвал дополнительную осадку величиной $\Delta s_{d1} = 0,12 \dots 0,34$ мм (сред. 0,21 мм) при скорости развития осадок $V_{d1} = 0,19 \dots 0,408$ мм/ч (сред. 0,248 мм/ч). Таким образом, на 1 этапе скорость развития осадок от циклических нагрузок была соизмерима со средней скоростью развития осадок от предшествующего статического нагружения.

- на 2 этапе выдержка под статической нагрузкой длительностью в 47 часов приводила к дополнительной осадке равной $\Delta s_{s2} = 0,94 \dots 1,37$ мм (сред. 1,13 мм), при этом

скорость развития осадок составила $V_{s2} = 0,02...0,029$ мм/ч (сред. 0,024 мм/ч), что в 10 раз меньше скорости осадки на 1 этапе. Приложение 2-го этапа циклических нагружений привело к развитию дополнительных осадок, равных $\Delta s_{d2} = 0,16...0,29$ мм (сред. 0,27 мм). Скорость развития осадок, равная $V_{d2} = 0,192...0,468$ мм/ч (сред. 0,327 мм/ч), на этот раз превысила скорость деформаций при статическом нагружении 2-го этапа в 13,6 раза.

- 3-й этап статического нагружения приводил к дополнительной осадке, равной $\Delta s_{s3} = 0,44...0,64$ мм (сред. 0,53 мм). Скорость развития осадок уменьшилась и составила $V_{s3} = 0,01...0,014$ мм/ч (сред. 0,011 мм/ч). 3-й этап циклических нагружений приводил к дополнительному развитию осадок под штампом, равных $\Delta s_{d3} = 0,13...0,2$ мм (сред. 0,16 мм), при скорости соответственно $V_{d3} = 0,156...0,24$ мм/ч (сред. 0,19 мм/ч).

- на последнем 4-м этапе статического нагружения по истечении 7 суток с момента начала нагружения значение дополнительной осадки составило $\Delta s_{s4} = 0,08...0,13$ мм (сред. 0,103 мм), скорость развития осадок $V_{s4} = 0,003...0,0056$ мм/ч (сред. 0,0045 мм/ч), циклические нагружения привели к дополнительным осадкам в $\Delta s_{d4} = 0,04...0,08$ мм (сред. 0,06 мм) при скорости соответственно $V_{d3} = 0,048...0,096$ мм/ч (сред. 0,072 мм/ч). Стоит отметить, что на этом этапе испытания в промежутке между 1100 и 1200 циклами нагружения прирост деформаций осадок от циклического воздействия был равен нулю. Последующее статическое нагружение также не привело к развитию осадок, следовательно, произошла относительная стабилизация деформаций грунта.

После проведения всех 4-х этапов режимного нагружения общая осадка штампа составила 7,54...8,47 мм (средняя для всех испытаний 8,2 мм).

Закономерностью для всех этапов нагружения является то, что амплитуда упругих деформаций, восстанавливающихся при уменьшении давления внутри цикла, оставалась постоянной на всем протяжении испытания и составляла 0,04...0,06 мм.

Таким образом, при испытаниях скорость развития деформации осадки грунта при циклическом приложении нагрузки в разы превышала скорость развития деформации при статическом. По графику, представленному на рис. 4, также можно сделать вывод, что в процессе чередующихся статических и циклических нагружений деформации грунта носят затухающий характер, т. е. на всех этапах нагружения имеет место процесс затухающей ползучести.

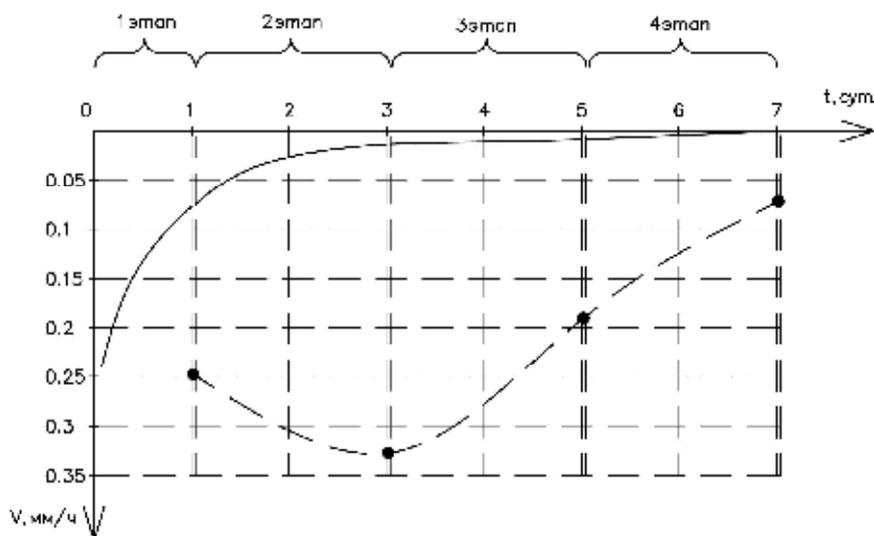


Рис. 4. Графики изменения скорости развития деформации осадки грунта во времени (иллюстрация авторов):

сплошной линией – при статическом приложении нагрузки; штриховой – при циклическом

Присущей для всех испытаний закономерностью, заслуживающей внимания, является то, что осадка штампа на 2-ом этапе циклического нагружения была больше, чем на 1-ом. Объяснение этому, по мнению авторов, можно найти, проанализировав график деформации поверхности грунта за пределами штампа в зависимости от количества циклов нагружения, построенный на основании показаний индикаторов

часового типа, приведенный на рис. 5. На основе анализа графика установлена следующая картина, характерная для всех испытаний:

- 1 этап статического нагружения приводит к осадке поверхности грунта за пределами штампа, о чем свидетельствуют возрастающие показания индикаторов часового типа, установленных в гнезда специальной рамы, фиксирувавших деформации грунта на расстоянии 20 и 70 мм от его границ. Последующее циклическое нагружение на 1-ом этапе также приводит к увеличению деформации осадки поверхности грунта.

- на 2-ом этапе выдерживание штампа под статической нагрузкой уже, напротив, вызывает подъем поверхности грунта (показания индикаторов во время статического нагружения уменьшались), что можно объяснить завершением фазы уплотнения грунта под штампом и началом перехода в фазу сдвигов. Последующее циклическое нагружение на 2-ом этапе вызывает более интенсивный по сравнению с предшествующим статическим нагружением подъем поверхности грунта.

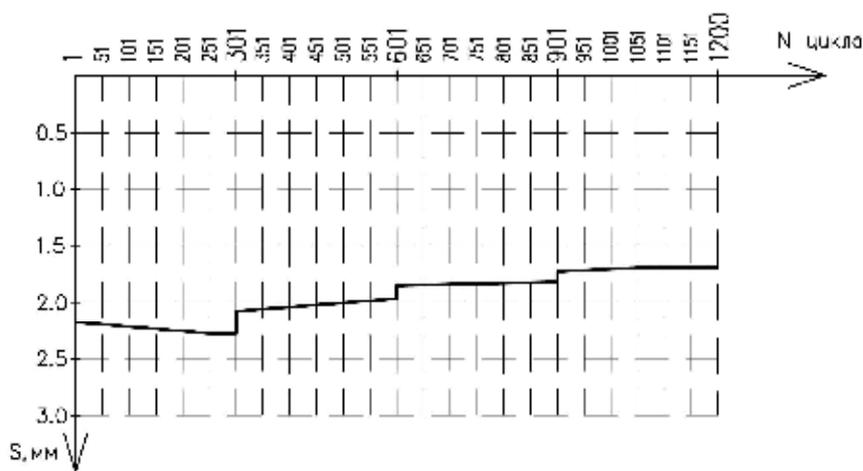


Рис. 5. Деформации поверхности грунта за пределами штампа по показаниям индикатора 1 (иллюстрация авторов)

Резюмируя, можно сказать, что циклическое нагружение на 2-ом этапе способствовало к переходу в фазу сдвигов грунта из-под подошвы штампа, вызывая, в свою очередь, более интенсивное по сравнению с 1-ым этапом циклического нагружения нарастание осадки штампа на 2-ом этапе (рис. 3).

Изменение физико-механических характеристик грунта при испытаниях

Кроме деформаций осадок исследованию подвергались также и физико-механические характеристики испытуемого грунта по слоям. Результаты испытаний в виде графического изображения изменения плотности, влажности и модуля деформации грунта по глубине лотка до и после испытания представлены на рис. 6.

На основании анализа результатов проведенных экспериментов (рис. 6) установлено, что влажность верхних слоев грунта под штампом уменьшилась при испытаниях на $3,4 \div 4,7\%$, средних – увеличилась на $2,5 \div 3,3\%$, влажность последнего нижнего слоя практически не изменилась. Влажность верхних слоев грунта, расположенных на расстоянии в 60 мм от границ штампа, по результатам всех проведенных экспериментов также уменьшилась в среднем на $1 \div 3,3\%$, влажность нижних слоев увеличилась в среднем на $1 \div 2\%$. Таким образом, миграция воды при испытаниях происходит, в основном, в средние слои грунта под штампом, а также в стороны, что, определенно, связано с уменьшением водопроницаемости образующегося под штампом уплотненного ядра, т. е. свободная вода, выдавливаясь из пор, мигрирует в менее уплотненные и более водопроницаемые зоны грунта. Стоит добавить, что увеличение влажности ускоряет снижение прочности при многократно повторяющихся нагружениях. Это объясняется ослаблением структурных связей и увеличением подвижности частиц по мере утолщения гидратных оболочек [2, 6, 7].

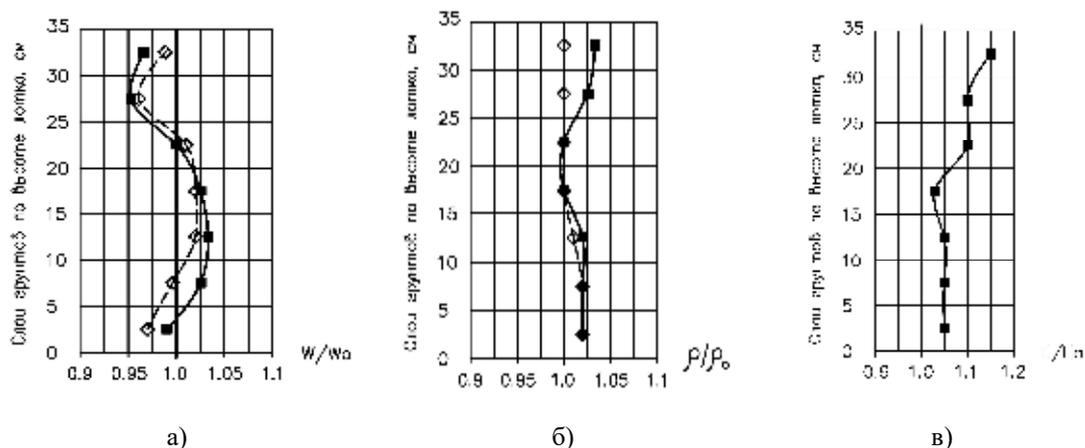


Рис. 6. Графики относительного изменения влажности (а), плотности (б) и модуля деформации (в) грунта по глубине лотка до и после испытания (сплошной линией обозначены характеристики грунта по глубине по линии оси штампа, штриховой – за пределами штампа) (иллюстрация авторов)

Как видно из графика, приведенного на рис. 6б, плотность верхних слоев грунта после испытания увеличилась в среднем на 2,5 % по сравнению с исходным значением. При этом практически во всех экспериментах плотность грунта, залегающего в середине по высоте испытательного лотка, оставалась без изменений.

Модуль деформаций E , после испытания в верхних слоях, увеличился в среднем на 11 %; в нижних – на 5 %.

Развитие пластических деформаций грунта при испытаниях затухало в среднем ближе к 1100-му циклу «нагрузка-разгрузка», при этом максимальные абсолютные значения (амплитуда) упругих деформаций грунта внутри каждого цикла нагружения не превышали 0,06 мм.

Заключение

На основании анализа результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований деформаций водонасыщенных суглинистых грунтов при чередующихся статических и циклических нагружениях в объемном лотке, можно сделать следующие основные выводы:

1. Количественный анализ графиков осадки позволяет сделать вывод, что циклическое нагружение, несмотря на непродолжительное воздействие (200 минут циклического нагружения против 9900 минут статического), приводит к ощутимому увеличению осадок, составляющих до 12 % от общей осадки.

2. Скорость развития деформации осадок грунта при циклическом нагружении может превосходить скорость при статическом нагружении до 10-15 раз.

3. Затухание деформаций водонасыщенных суглинистых грунтов при статическом нагружении происходит за более короткий промежуток времени, чем при циклических нагружениях, т. к. консолидация грунтов при циклических испытаниях за счет непродолжительного действия нагрузки в каждом цикле достигается гораздо дольше.

4. Скорость деформирования при циклических нагружениях зависит от параметров нагружения, вида и характеристик грунта. С увеличением количества циклов грунтовое основание приближается к упругому состоянию.

5. Статическое догружение после 1200 циклов повторных нагрузок не вызывает заметных дополнительных перемещений. Однако даже после выдержки основания под постоянной нагрузкой в течение определенного времени периодические циклические воздействия могут привести к дальнейшему увеличению деформаций.

6. Принимая во внимание качественную картину развития деформаций осадок штампа, полученную в эксперименте, и основываясь на принципе суперпозиции, для определения деформаций осадки грунта за заданный промежуток времени при

чередующихся статических и циклических нагрузениях может быть предложена зависимость следующего вида:

$$S_{\text{общ}} = S_t + S_N,$$

где $S_{\text{общ}}$ – значение общей деформации осадки;

S_t – деформация осадки от статического нагружения;

S_N – деформация осадки от циклического нагружения.

Список библиографических ссылок

1. Кутергин В. Н., Манукин В. Б., Панков К. В., Кальбергенев Р. Г., Карпенко Ф. С. Оценка изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия штормовых волн на сооружение // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 5. С. 450–459.
2. Хасанов Р. Р., Смирнова А. Р. Экспериментальные исследования физических характеристик предварительно обжатых глинистых грунтов при замачивании // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 12-5 (66). С. 178–182.
3. Сафин Д. Р., Груздева В. А. Исследование несущей способности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами : сб. ст. Международной научно-практической конференции – Методы проектирования и оптимизации технологических процессов / OMEGA SCIENCE. Уфа, 2017. С. 54–56.
4. Konovalov P. A., Bezvolev S. G. Analysis of results of consolidation tests of saturated clayey soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2005. Т. 42. № 3. Р. 81–85.
5. Konovalov V. P., Bezvolev S. G., Konovalov P. A. Preconstruction consolidation of weak saturated clayey soils by reinforcing limestone drains // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2012. Т. 48. № 6. Р. 256–265.
6. Деревянных А. В., Мирсаяпов Илизар Т. Прочность и деформативность глинистых грунтов в условиях трехосного сжатия при циклическом нагружении // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2016. Т. 1. С. 153–159.
7. Панов С. И., Гольдин А. Л. Деформации глинистых грунтов при циклическом нагружении // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 280. С. 79–86.
8. Bensallam S., Bahi L., Alaoui M., Ejjaouani H., Shakhirev V. The effect of surcharge pressure on the cyclic vertical deformations for expansive clayey soils in Morocco // Geosciences Journal. 2014. Т. 18. № 1. Р. 81–87.
9. Сиразиев Л. Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния слоистых грунтовых оснований под центром штампа при кратковременных испытаниях // Инновации и инвестиции. 2018. № 11. С. 225–228.
10. Азберген М. И., Инкарбек Н. М. Закономерности деформирования грунтов с учетом частоты приложения циклической нагрузки // Наука и Мир. 2016. Т. 1. № 1 (29). С. 42–45.

Khasanov Rubis Raisovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: rubis.hasanov@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Galeev Rustam Rinatovich

engineer of the second category

E-mail: rusgal1973@gmail.com

JSC «Kazan Giproniaviaprom»

The organization address: 420127, Russia, Kazan, Dementyeva st., 1

The influence of the combination of cyclic and static loading on deformations and physico-mechanical characteristics of water-saturated loamy soils

Abstract

Problem statement. The aim of the work is to study the influence of the combination of cyclic and static loading on the deformation of water-saturated loams, as well as a description of the changes in the deformative properties of the soil after cyclic exposure.

To achieve this goal, the following was completed:

– carrying out experimental studies of clay soil deformation under conditions of a combination of cyclic and static loading with fixing the readings of strain indicators in a continuous mode;

– layered determination of the deformation characteristics of soils under the stamp and beyond in laboratory conditions before and after the test;

– analysis of the results of experimental studies.

Results. As a result of the studies, some patterns of deformation and changes in the characteristics of water-saturated loamy soils with a combination of static and cyclic loading were revealed.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that it has been established that even a short cyclic load compared with a static one can lead to a noticeable increase in the deformation of the soil base and its speed.

Keywords: physical-mechanical features, volume loading tray, static loading, cyclic loading, soil deformation, strain rate.

References

1. Kutergin V. N., Manukin V. B., Pankov K. V., Kal'bergenov R. G., Karpenko F. S. Estimation of soil degradation under prolonged cyclic loading, modeling the storm wave effects on a structure // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2015. № 5. P. 450–459.
2. Khasanov R. R., Smirnova A. R. Experimental studies of physical characteristics of precompressed clay soils with soaking // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. № 12-5 (66). P. 178–182.
3. Safin D. R., Gruzdeva V. A. A study of the bearing capacity of weak water-saturated clayey soils reinforced by vertical reinforcing elements : dig. art. of International scientific-technical conference. «Methods for the design and optimization of technological processes» / OMEGA SCIENCE. Ufa, 2017. P. 54–56.
4. Konovalov P. A., Bezvolev S. G. Analysis of results of consolidation tests of saturated clayey soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2005. V. 42. № 3. P. 81–85.
5. Konovalov V. P., Bezvolev S. G., Konovalov P. A. Preconstruction consolidation of weak saturated clayey soils by reinforcing limestone drains // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012. V. 48. № 6. P. 256–265.
6. Derevyannykh A. V., Mirsayapov Ilizar T. The strength and deformability of clay soils under triaxial compression under cyclic loading // *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2016. V. 1. P. 153–159.
7. Panov S. I., Goldin A. L. Deformation of clay soils under cyclic loading // *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.Ye. Vedenev*. 2016. V. 280. P. 79–86.
8. Bensallam S., Bahi L., Alaoui M., Ejjaouani H., Shakhirev V. The effect of surcharge pressure on the cyclic vertical deformations for expansive clayey soils in Morocco // *Geosciences Journal*. 2014. V. 18. № 1. P. 81–87.
9. Siraziev L. F. The stressed-stained state experimental researches of multilayered soilbases under the stamp center at short term tests // *Innovatsii i investitsii*. 2018. № 11. P. 225–228.
10. Azbergen M. I., Inkarbek N. M. Regularities of soil deformation taking into account the frequency of cyclic loading // *Nauka i Mir*. 2016. V. 1. № 1 (29). P. 42–45.