УДК 624.153.6 Сиразиев Ленар Фиргатевич кандидат технических наук, доцент E-mail: siraziev100@mail.ru Казанский государственный архитектурно-строительный университет Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1 Набиев Ринат Раулевич инженер E-mail: nabiev-rinat@mail.ru Компания Архитектурно Фасадные Технологии Адрес организации: 111524, Россия, г. Москва ул. Электродная, д. 2, стр. 32

Экспериментальные исследования влияния мощности слоев грунта на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявить особенности перераспределения напряжений в трехслойном грунтовом основании в зависимости от изменения толщины геологических слоев.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в определении зависимости напряженно-деформированного состояния грунтового массива от мощности слагающих его геологических слоев, отличающихся по литологическому составу, прочностным и деформативным свойствам, в установлении границ зон предельного равновесия в неоднородных грунтовых основаниях при наличии относительно слабых слоев.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в установлении закономерности перераспределения напряжений и деформаций на глубине и в горизонтальной плоскости в трехслойных грунтовых основаниях.

Ключевые слова: плитный фундамент, слоистое грунтовое основание, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Сиразиев Л. Ф., Набиев Р. Р. Экспериментальные исследования влияния мощности слоев грунта на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 15–22.

1. Введение

В связи со все большим строительством высотных зданий в настоящее время тема совместной работы грунтового основания и плитного фундамента стала все чаще привлекать внимание специалистов [1-5]. Часто недооцениваемым звеном становится грунтовое основание, которое является слоистым, неоднородным по литологическому составу, по деформативным и прочностным характеристикам, и в нем происходят сложные процессы перераспределения напряжений, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости [6-10]. Преобладающая же часть существующих методов расчета грунтовых оснований основана на предположении об однородном и изотропном грунте основания [11-12].

При проектировании плитных фундаментов необходимо учитывать напряженнодеформированное состояние, возникающее не только под самим фундаментом, но и на прилегающей территории, так как в условиях тесной городской застройки влияние вновь построенного высотного здания будет очень существенным [13-15]. Для чего необходимо всестороннее изучение деформирования слоистых оснований, в составе которых очень часто встречаются слабые или анизотропные грунты [16].

Целью работы является выявление закономерностей распределения напряжений в трехслойном грунтовом основании плитного фундамента при изменении мощности несущего и подстилающих слоев грунта.

Задачи исследования:

– сравнение распределения напряжений в многослойных основаниях с общепринятой классической схемой в однородных грунтах;

– определение места расположения и приближенных размеров зон предельного равновесия под плитным фундаментом в зависимости от мощности несущего и подстилающего слоев грунта.

2. Материалы и методы

Было проведено четыре эксперимента со слоистым грунтовым основанием, нагрузка на которое передавалась через квадратный штамп размерами 40×40 см, моделирующий плитный фундамент. Нагрузка создавалась гидравлическим домкратом, и прикладывалась ступенями по 250 кг до значения 1500 кг.

Во всех экспериментах неоднородное основание было смоделировано трехслойным (рис. 1) с подстилающим малосжимаемым слоем – суглинок полутвердый непросадочный со следующими характеристиками: W=19 %, $\rho=2,01$ г/см³, $I_L=0,15$, E=38 МПа, $\varphi=31,1^\circ$, c=15 кПа. Трехслойное основание было представлено из следующих грунтов:

- верхний слой ИГЭ-1 – супесь пластичная непросадочная (*W*=11-12,7 %, *I*_L=0,4, *ρ*=1,7 г/см³, *E*=4,0-5,4 МПа, *φ*=14-16 °, *c*=1 кПа);

- ИГЭ-2 – суглинок тугопластичный непросадочный (*W*=19-21 %, *I*_L=0,4, *ρ*=1,9 г/см³, *E*=10 МПа, *φ*=19-21 °, *c*=10-12 кПа);

- ИГЭ-3 — мелкий песок рыхлый средней степени водонасыщения (W=12-14 %, ρ =1,8 г/см³, E=6,1-7,9 МПа, φ =16-19 °, c=0 кПа).



Рис. 1. Схема испытания, расположения приборов и схема изменения мощностей грунтов во всех экспериментах (иллюстрация авторов): 1 – объемный лоток; 2 – домкрат;
3 – исследуемое грунтовое основание; 4 – модель плитного фундамента;
5 – индикаторы часового типа; 6 – грунтовые датчики; 7 – проводка датчиков давления в грунте;
8 – упорная конструкция домкрата

В экспериментах расположение слоев по глубине оставалось неизменным, варьировалась только их мощность от 10 см до 30 см (рис. 1).

Грунт в объемные металлические лотки размерами 1×1×1 м укладывался послойно по 5 см, уплотнялся трамбовкой до заданного значения плотности. После формирования всего трехслойного основания устанавливалась модель плитного фундамента – штамп в виде железобетонной плиты толщиной 4 см. Для определения относительных деформаций грунта в слоях устанавливались грунтовые датчики в один или два ряда в зависимости от мощности слоя.

3. Результаты

В результате анализа эпюр распределения напряжений по вертикали в эксперименте $\mathbb{N} \ge 1$ (рис. 2) при одинаковой мощности слоев 0,5*b* (*b* – ширина фундамента) видно, что в ИГЭ-1 наибольшие контактные напряжения возникают под центром штампа, но в пределах этого же слоя происходит перераспределение напряжений, так как на глубине 15 см наибольшие значения наблюдаются уже под краями штампа. Т.е. по классической теории деформирования оснований происходит образование зон предельного равновесия, площадок сдвига под краями штампа и уплотненного ядра под центром штампа, и с увеличением нагрузки это ядро углубляется до 20 см до контакта со вторым слоем. Во втором слое на глубине 25 см происходит постепенное увеличение напряжений под центром и уменьшение под краем штампа по сравнению с верхним слоем, что приводит к примерно равным значениям напряжений во втором слое, а также скачок напряжений под центром показывает на возникновение сдвигающих напряжений на контакте двух слоев. В этом же слое с глубиной наблюдается уменьшение напряжений по всей плоскости.



Рис. 2. Эпюры сжимающих напряжений по вертикали в слоистом основании экспериментов № 1 и № 2 (иллюстрация авторов)

В ИГЭ-3 (мелкий рыхлый песок) под центром модели плитного фундамента напряжения уменьшаются, а под краем – увеличиваются. Такая же тенденция развития напряжений наблюдалась в несущем слое, поэтому можно предположить, что в третьем слое образуется вторая область зон предельного равновесия и второе уплотненное ядро, тем более, что ниже располагается малосжимаемый слой, наличие которого вызывает концентрацию напряжений под краями штампа в вышележащем слое. В первом и третьем геологических слоях также наблюдаются похожие картины распределения напряжений по горизонтальной плоскости, т.е. седлообразная форма эпюр.

В эксперименте № 2 (рис. 2) с небольшой мощностью верхнего слоя 10 см (пластичная супесь) и значительной толщиной второго – 30 см (тугопластичный суглинок) в подстилающем слое ИГЭ-1 контактные напряжения под центром штампа увеличиваются постепенно, а под краем штампа напряжения концентрируются уже после начальной стадии нагружения, в отличии от эксперимента № 1. В работу активно

17

вступает также грунтовый массив за пределами штампа, т.к. напряжения в нем в 2 раза больше, чем в первом эксперименте, т.е. происходит активное рассеивание напряжений в горизонтальной плоскости. В верхней части второго слоя напряжения почти повторяют значения несущего слоя, и только под краем штампа они вдвое уменьшились. С глубиной во втором подстилающем слое наблюдается увеличение напряжений и под центром, и под краем плитного фундамента, можно предположить образование уплотненного ядра уже не только в первом слое, но также и переходящего во второй слой с увеличением глубины уплотненной зоны до 30-40 см. В ИГЭ-2 из-за большой мощности более прочного слоя, составляющей 0,75*b*, происходит значительное рассеивание напряжений от модели плитного фундамента не только в горизонтальной плоскости, но и в глубину. В ИГЭ-3 наблюдается только уменьшение напряжений с глубиной, даже несмотря на наличие ниже малосжимаемого слоя.

В эксперименте № 3 проводились испытания с небольшой мощностью второго прочного слоя 10 см (0,25*b*) и значительной мощностью третьего слоя рыхлого песка. Анализируя эпюры распределения напряжений по вертикали (рис. 3), можно наблюдать увеличение напряжений в контактной зоне несущего слоя по сравнению с экспериментом № 1, хотя и толщина этого слоя в обоих экспериментах одинаковая. А с глубиной напряжения уменьшаются, а не увеличиваются, т.е. область зон предельного равновесия имеет глубину меньше 15 см, но расширилась в горизонтальной плоскости, а уплотненное ядро имеет значительно меньшую площадь, чем в первом эксперименте. Таким образом, рассеивание напряжений произошло уже в первом несущем слое. Из-за рассеивания напряжения в нем в 2 раза меньше, чем в первом эксперименто, напряжения значительно меньше, чем в предыдущих экспериментах.



Рис. 3. Эпюры напряжений по вертикали в слоистом основании экспериментов № 3 и № 4 (иллюстрация авторов)

В эксперименте № 4 (рис. 3) с большой мощностью верхнего слоя 30 см и незначительной толщиной второго 10 см, распределение напряжений по глубине сравнимо с первым экспериментом: такое же в несущем слое, только из-за большей мощности слоя значения напряжений под краем штампа в 2 раза меньше, т.к. они распределяются на большую площадь по глубине, и граница зон предельного равновесия достигает контакта со вторым слоем на глубине 30 см. Во втором слое напряжения концентрируются к центру модели фундамента, а на краях они имеют незначительные значения. Поэтому при переходе на третий менее прочный слой напряжения распределяются таким образом, как будто сверху располагается штамп, и под его краями образуются новые зоны предельного равновесия.

4. Обсуждение

Во всех экспериментах при существенном различии в прочностных и деформативных свойствах грунтов, образующих слоистое основание, наблюдается неоднородное распределение напряжений. Под центром модели плитного фундамента в пределах несущего пылевато-глинистого слоя происходит уменьшение напряжений к контакту между слоями, во втором более прочном слое напряжения увеличиваются, т.е. на контакте слоев проявляются сдвигающие напряжения из-за разности деформативных свойств грунтов. Затем в пределах второго слоя в зависимости от его мощности напряжения уменьшаются или остаются примерно на одном уровне. В третьем слое, менее прочном по сравнению со вторым, на начальной стадии нагружения напряжения практически не изменяются, но, по мере увеличения нагрузки и уплотнения рыхлого песка, напряжения в основном увеличиваются из-за наличия ниже малосжимаемого слоя грунта, который вызывает концентрацию напряжений.

Под краем модели плитного фундамента напряжения в несущем слое, в зависимости от его мощности и мощности подстилающего более прочного грунта, распределяются двумя способами. В первом случае в контактной зоне под штампом напряжения небольшие (30-50 кПа), а с глубиной они увеличиваются в несколько раз. Во втором случае напряжения в контактной зоне уже на начальной стадии нагружения имеют значения порядка 100 кПа и с увеличением нагрузки они еще больше увеличиваются, но, по мере распространения на глубину, напряжения под краем штампа уменьшаются.



Рис. 4. Схемы расположения зон предельного равновесия в зависимости от изменения мощностей слоистого грунтового основания (иллюстрация авторов)

Во втором прочном и третьем слабом слоях в зависимости от их мощностей под краем штампа напряжения распределяются также двумя способами. В первом случае напряжения

во втором слое уменьшаются, а в третьем слое они увеличиваются, во втором случае они находятся примерно на одном уровне в пределах второго слоя, а затем уменьшаются.

За пределами модели плитного фундамента близко от поверхности напряжения могут отличаться в два раза в зависимости от мощности неоднородных по прочности и деформативности слоев, и с глубиной они в основном уменьшаются.

Таким образом, анализируя эпюры распределения напряжений, можно предположить следующее расположения зон предельного равновесия (рис. 4).

Если близко от поверхности, не глубже 0,75b, залегают два слоя грунта, отличающиеся друг от друга по прочности и мощности более чем в два раза, то рассеивание напряжений в слоистом основании происходит больше в горизонтальной плоскости. Если же основание сложено одинаковыми по мощности грунтами или сверху залегает большой по мощности слабый слой $\geq 0,75b$, то распределение напряжений происходит в основном на глубину с образованием второй зоны предельного равновесия в нижележащих слабых слоях.

5. Заключение

1. В слоистых грунтовых основаниях, при существенном различии в прочностных и деформативных характеристиках, сжимающие напряжения по глубине изменяются по схеме, отличающейся от общепринятой, в однородных грунтах. В общепринятой классической схеме напряжения под центром фундамента с глубиной постоянно уменьшаются, а в проведенных экспериментах наблюдается не только уменьшение напряжений, но и увеличение на контактах слоев или вблизи от малосжимаемого слоя.

2. При одинаковой мощности геологических слоев, равной полуширине фундамента (0,5*b*), и наличии слабого несущего глинистого слоя, зона значительных напряжений (150-200 кПа) наблюдается в основном под штампом. В результате образуется уплотненная зона, которая концентрируется под центром, и передает нагрузку на нижележащий более слабый слой. В результате в слоистом неоднородном основании может образовываться несколько зон предельного равновесия и уплотненного ядра в относительно слабых слоях, расположенных на разной глубине. Такая же схема распределения напряжений наблюдается и при мощности несущего слоя, превышающей 0,5*b* до 0,75*b*.

3. При мощностях несущего или подстилающего слоев 0,25*b*-0,5*b* зона значительных сжимающих напряжений распространяется больше в горизонтальной плоскости. В совместную работу вовлекается грунт, расположенный за пределами плитного фундамента, на что указывают напряжения за пределами фундамента порядка 90-120 кПа. Грунты вокруг фундамента в этом случае испытывают напряжения на расстоянии от края большем, чем полуширина фундамента (0,5*b*).

4. Таким образом, на распределение напряжений в неоднородном грунтовом основании основное влияние оказывает мощность несущего и подстилающего слоев, причем несущий слой, как правило, является менее прочным, чем подстилающий.

Список библиографических ссылок

- 1. Мирсаяпов Илизар Т., Хасанов Р. Р., Сафин Д. Р. Проектирование ограждающей конструкции глубокого котлована при реконструкции здания Шамовской больницы г. Казани // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 1 (54). С. 89–98.
- 2. Киселев Н. Ю. Экспериментальные исследования работы плитного фундамента с демпфирующим слоем на грунтовом основании // Геотехника. 2016. № 1. С. 51–59.
- 3. Баймахан А. Р., Сейнасинова А. А., Копенбаева А. С., Баймахан Р. Б. Анализ влияния водонасыщенности анизотропной грунтовой толщи основания на деформацию фундамента со зданием // Перспективы науки. 2015. № 10 (73). С. 56–59.
- 4. Ширунов Г. Н. Метод начальных функций в модели упруго-многослойного основания под действием нормальной локальной нагрузки // Инженерностроительный журнал. 2015. № 1 (53). С. 91–96. DOI: 10.5862/MCE.53.9.
- 5. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Energy geotechnics proceedings of the 1st

international conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel, 2016. P. 423–428. DOI: 10.1201/b21938-67.

- 6. Бобылева Т. Н., Шамаев А. С. Эффективный алгоритм расчета усредненных характеристик слоистых грунтов, состоящих из упруго-ползучих материалов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 4. С. 7–12.
- 7. Баданин А. Н., Демченко Ю. К. Анизотропные фундаменты мелкого заложения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3 (18). С. 117–134.
- Суходоев Ю. Ф. Влияние параметров круглого фундамента и верхнего слоя на распределение напряжений в двухслойном основании // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2010. № 2 (9). С. 65–70.
- 9. Lee J. K., Jeong S., Shang J. Q. Undrained bearing capacity if ring foundations on two-layered clays // Ocean engineering. 2016. № 119. P. 47–57. DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2016.04.019.
- Zhao H. F., Zhang L. M. Instability of saturated and unsaturated coarse granular soils // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. ASCE. 2014. Vol. 140. P. 25–35. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000976.
- 11. Тетиор А. Н. Фундаменты. М. : Академия, 2010. 400 с.
- 12. Цытович Н. А., Тер-Мартиросян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981. 318 с.
- 13. Курочкина 3. О., Ильин А. Н. Экономичные конструктивные решения фундаментных плит высотных зданий : сб. ст. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования / МГТУ. Магнитогорск, 2012. С. 209–212.
- Mirsayapov Ilizar T., Aysin N. N. Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings : dig. of art. International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations / GFAC 2019. Saint Petersburg. 2019. P. 197–201. DOI: 10.1201/9780429058882-38.
- 15. Кудрявцев С. Г., Булдакова Ю. М. Напряженное и деформированное состояние двухслойного анизотропного основания // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. С. 9–20.
- 16. 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.

Siraziev Lenar Firgatevich

candidate of technical sciences, associate professor E-mail: siraziev100@mail.ru **Kazan State University of Architecture and Engineering** The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1 **Nabiev Rinat Raulevich** engineer E-mail: nabiev-rinat@mail.ru **Architectural and Facade Technologies Company** The organization address: 111524, Russia, Moscow, Electrodnaya st., 2, build. 32

Experimental studies of the soil layers thickness influence on the stress-strain state of a layered soil base of slab foundation

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to identify the features of stress redistribution in a three-layer soil base depending on the changes in the thickness of geological layers.

Results. The main results of the study are to determine the dependence of the stress-strain state of the soil mass on the thickness of the geological layers composing it, which differ in lithological composition, strength and deformation properties; to establish the boundaries of zones of limiting equilibrium in heterogeneous soil bases in the presence of relatively weak layers.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in establishing the regularity of the redistribution of stresses and deformations at depth and in a horizontal plane in three-layer soil foundations.

Keyword: slab foundation, layered ground basis, stress-strain state.

For citation: Siraziev L. F., Nabiev R. R. Experimental studies of the soil layers thickness influence on the stress-strain state of a layered soil base of slab foundation // Izvestija KGASU. 2020. $N_{0.4}$ (54). P. 15–22.

References

- 1. Mirsayapov Ilizar T., Khasanov R. R., Safin D. R. Designing an enclosing structure of deep underground pit at the reconstruction of the Shamovskiy hospital in the city of Kazan // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2016. № 1 (54). P. 89–98.
- 2. Kiselev N. Yu. Experimental research of a slab foundation with a damping layer on the ground base // Geotechnika. 2016. № 1. P. 51–59.
- 3. Baymakhan A. R., Seynasinova A. A., Kopenbaeva A. S., Baymakhan R. B. Analysis of the impact of water-saturated anisotropic ground thickness on deformations of the building foundation // Perspektivi nauki. 2015. № 10 (73). P. 56–59.
- Shirunov G. N. Method of initial functions in model of compression linearly deformable layered foundation under normal local load // Inzhenerno-stroitelniy zhurnal. 2015. № 1 (53). P. 91–96. DOI: 10.5862/MCE.53.9.
- Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Energy geotechnics – proceedings of the 1st international conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel, 2016. P. 423–428. DOI: 10.1201/b21938-67.
- 6. Bobyleva T., Shamaev A. Effective algorithm for calculating the average characteristics of layered soils consisting of elastic-creeping materials // Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov. 2017. № 4. P. 7–12.
- 7. Badanin A. N., Demchenko Y. K. Anisotropic shallow foundation // Stroitelstvo unikalnich zdanii i soorugenii. 2014. № 3 (18). P. 117–134.
- 8. Suhodoev Y. Effect parameters circular foundation of the upper layer and allocation to stress in two-layered foundation // Suchasni technologii, materiali i konstruktsii v budivnitsvi. 2010. № 2 (9). P. 65–70.
- 9. Lee J. K., Jeong S., Shang J. Q. Undrained bearing capacity if ring foundations on twolayered clays // Ocean engineering. 2016. № 119. P. 47–57. DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2016.04.019.
- Zhao H. F., Zhang L. M. Instability of saturated and unsaturated coarse granular soils // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. ASCE. 2014. Vol. 140. P. 25–35. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000976.
- 11. Tetior A. N. Foundation. M. : Akademiya, 2010. 400 p.
- 12. Tsytovicg N. A., Ter-Martirosyan Z. G. Fundamental of applied geomechanics in construction. M. : Vishaya shkola, 1981. 318 p.
- Kurochkin Z. O., Ilin A. N. Economical design solutions of foundation slab of high-rise buildings : dig. of art. Actual problems of modern science, technology and education / MSTU. Magnitogorsk, 2012. P. 209–212.
- Mirsayapov Ilizar T., Aysin N. N. Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings : dig. of art. International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations / GFAC 2019. Saint Petersburg. 2019. P. 197–201. DOI: 10.1201/9780429058882-38.
- 15. Kudryavtsev S. G., Buldakova J. M. Stress-strain state of two-layered anisotropic foundation // Stroitelnaya mechanika ingenernich konstruktsii i sooruzhenii. 2015. № 5. P. 9–20.
- 16. 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.