

УДК 624.153.6

Сиразиев Л.Ф. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: siraziev100@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтового основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявить влияние водонасыщенного слоя грунта на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания модели плитного фундамента.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в получении картины деформирования слоистого грунтового основания при наличии водонасыщенного слоя, подстилаемого водоупорным слоем. Получены эпюры распределения сжимающих напряжений в горизонтальной плоскости отдельно в каждом слое многослойного основания, а также в вертикальной плоскости по глубине. Определено направление вертикальной фильтрации воды в слоистом основании.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной области состоит в установлении влияния водонасыщенных слоев слоистого основания на неоднородное напряженно-деформированное состояние, которое изменяется во всем объеме в процессе нагружения. Поровая жидкость влияет на напряженно-деформированное состояние всего многослойного основания, включая вышележащие слои грунта, повышает в них капиллярное давление, вызывает горизонтальную и вертикальную фильтрацию.

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

Введение

Из-за большого количества затрагиваемых проблем тема совместной работы плитных фундаментов и слоистых оснований привлекает большое внимание специалистов. Причем грунтовое слоистое основание, а в частности и с водонасыщенным слоем, часто является недооцененным. Напряженно-деформированное состояние слоистого основания качественно и количественно влияет на физические процессы его деформирования, и зависит от физико-механических характеристик [1-11]. Основное направление исследований – теоретический прогноз поведения грунтового основания под влиянием внешних и внутренних воздействий: нагрузки от здания, распределения напряжений в неоднородной грунтовой толще, влияние водонасыщенных слоев и т.п. Необходимо также выяснить направление и интенсивность горизонтальной и вертикальной фильтрации поровой воды в процессе деформирования слоистого массива грунта.

С целью получения сведений о напряженно-деформированном состоянии в неоднородных грунтовых массивах в лаборатории «Механики грунтов» кафедры Оснований, фундаментов, динамики сооружений и инженерной геологии КГАСУ были проведены экспериментальные исследования трехслойного водонасыщенного грунтового основания модели плитного фундамента.

Экспериментальные исследования

Модель исследуемого слоистого грунтового основания сформирована в объемном металлическом лотке с размерами 1×1 м (рис. 1), [3-4], и представляет собой три слоя грунта с различными физико-механическими характеристиками, причем один из слоев является водонасыщенным.

Трехслойное грунтовое основание во всех четырех экспериментах состояло из следующих грунтов (мощность каждого 20 см, кроме эксперимента № 3):

– супесь пластичная непросадочная ($W=14\%$, $\rho=1,82\text{ г/см}^3$, $I_L=0,4$, $E=7-11\text{ МПа}$, $\varphi=13^\circ$, $c=3\text{ кПа}$);

– суглинок тугопластичный непросадочный ($W=19\%$, $\rho=1,68 \text{ г/см}^3$, $I_L=0,4$, $E=31 \text{ МПа}$, $\varphi=18^\circ$, $c=15 \text{ кПа}$);

– мелкий водонасыщенный песок средней плотности ($W=19\%$, $\rho=1,72 \text{ г/см}^3$, $S_R=0,83$, $E=11 \text{ МПа}$, $\varphi=19^\circ$, $c=3 \text{ кПа}$).

В качестве подстилающего слоя ИГЭ-4 под исследуемым основанием во всех экспериментах был использован суглинок полутвердый непросадочный ($W=19\%$, $\rho=2,01 \text{ г/см}^3$, $I_L=0,15$, $E=33 \text{ МПа}$, $\varphi=23^\circ$, $c=28 \text{ кПа}$).

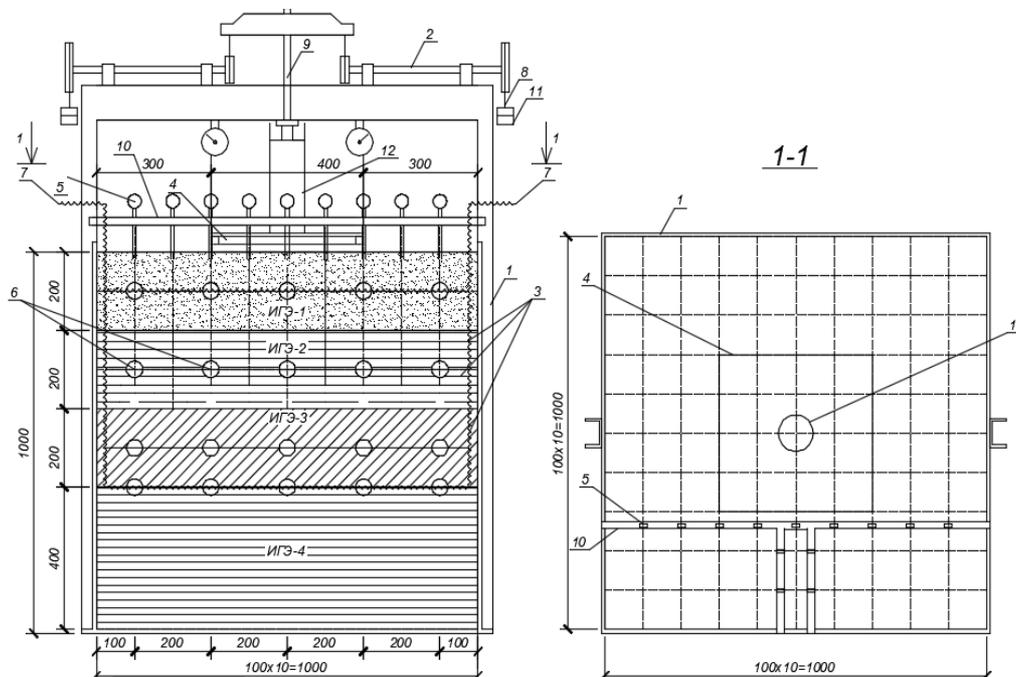


Рис. 1. Схема испытания и расположения приборов:

- 1 – объемный лоток; 2 – загрузочное устройство; 3 – слоистое грунтовое основание;
 4 – модель плитного фундамента; 5 – индикаторы часового типа; 6 – грунтовые датчики;
 7 – проводка датчиков; 8 – подвес нагружающего устройства; 9 – упорная конструкция;
 10 – траверса индикаторов часового типа; 11 – грузы; 12 – домкрат

Были проведены четыре эксперимента моделей трехслойного грунтового основания с малосжимаемым подстилающим слоем:

- 1-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная; песок мелкий водонасыщенный средней плотности; суглинок тугопластичный непросадочный.

- 2-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная; суглинок тугопластичный непросадочный; песок мелкий водонасыщенный средней плотности.

- 3-й эксперимент: супесь пластичная непросадочная (мощность 30 см); суглинок тугопластичный непросадочный (10 см); песок мелкий водонасыщенный средней плотности (20 см).

- 4-й эксперимент: суглинок тугопластичный непросадочный; супесь пластичная непросадочная; песок мелкий водонасыщенный средней плотности.

Грунт в объемные лотки укладывался слоями по 5 см, уплотнялся трамбовкой до заданного значения плотности. После формирования всего трехслойного основания в середине лотка устанавливалась модель плитного фундамента – штамп в виде железобетонной плиты с размерами в плане $0,4 \times 0,4$ м и толщиной 4 см. Нагружение осуществлялось ступенями с помощью гидравлического домкрата с шагом 250 кг до предельной нагрузки 1750 кг. В середине каждого слоя устанавливались грунтовые датчики в цепочку под центром плитного фундамента, под краем плиты и за пределами (рис. 1). По показаниям датчиков определялись относительные деформации в слоях исследуемого массива, а также в процессе измерялась осадка модели плитного фундамента и осадка каждого слоя.

В результате анализа форм деформирования слоистых оснований (рис. 2-3) можно заметить, что в первых трех экспериментах наибольшие осадки слоев происходили над водонасыщенным слоем песка, и составляли от 30 до 50 мм, что несколько больше, чем в других исследованиях слоистых оснований без водонасыщенного слоя [3-4]. Это указывает на интенсивный процесс уплотнения водонасыщенного слоя в результате процессов кратковременной консолидации. В эксперименте № 4 наибольшая осадка наблюдалась в подстилающем слое фундамента – тугопластичного суглинка (рис. 2), что связано с податливостью и большой деформативностью нижележащих слоев. Наибольшая осадка модели плитного фундамента наблюдалась в эксперименте № 3 (110 мм), что связано с небольшим модулем деформаций подстилающего слоя супеси ($E = 7$ МПа).

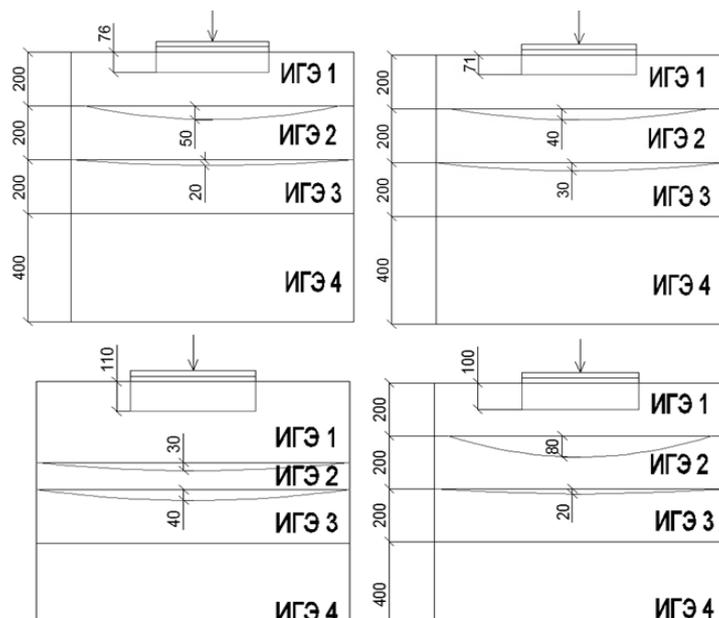


Рис. 2. Форма деформирования слоистого грунтового основания

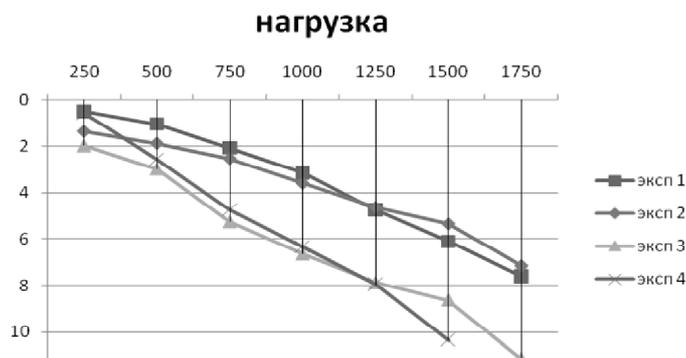


Рис. 3. График зависимости осадки плитного фундамента от нагрузки

Из горизонтальных эпюр распределения напряжений в экспериментах № 1-3 (рис. 4-5) видно, что в верхних слоях слоистого основания (подстилающим слоем является пластичная супесь) эпюры имеют седлообразную классическую форму с максимальными значениями под краями модели плитного фундамента, особенно на ранних стадиях нагружения, а на последних стадиях напряжения выравниваются, и приобретают параболическую форму. В эксперименте № 4, где верхним слоем является суглинок, горизонтальная эпюра наоборот сначала имеет параболическую форму с максимумом (60 кПа) под центром штампа, а затем седлообразную с уменьшением напряжения под центром до 10 кПа.

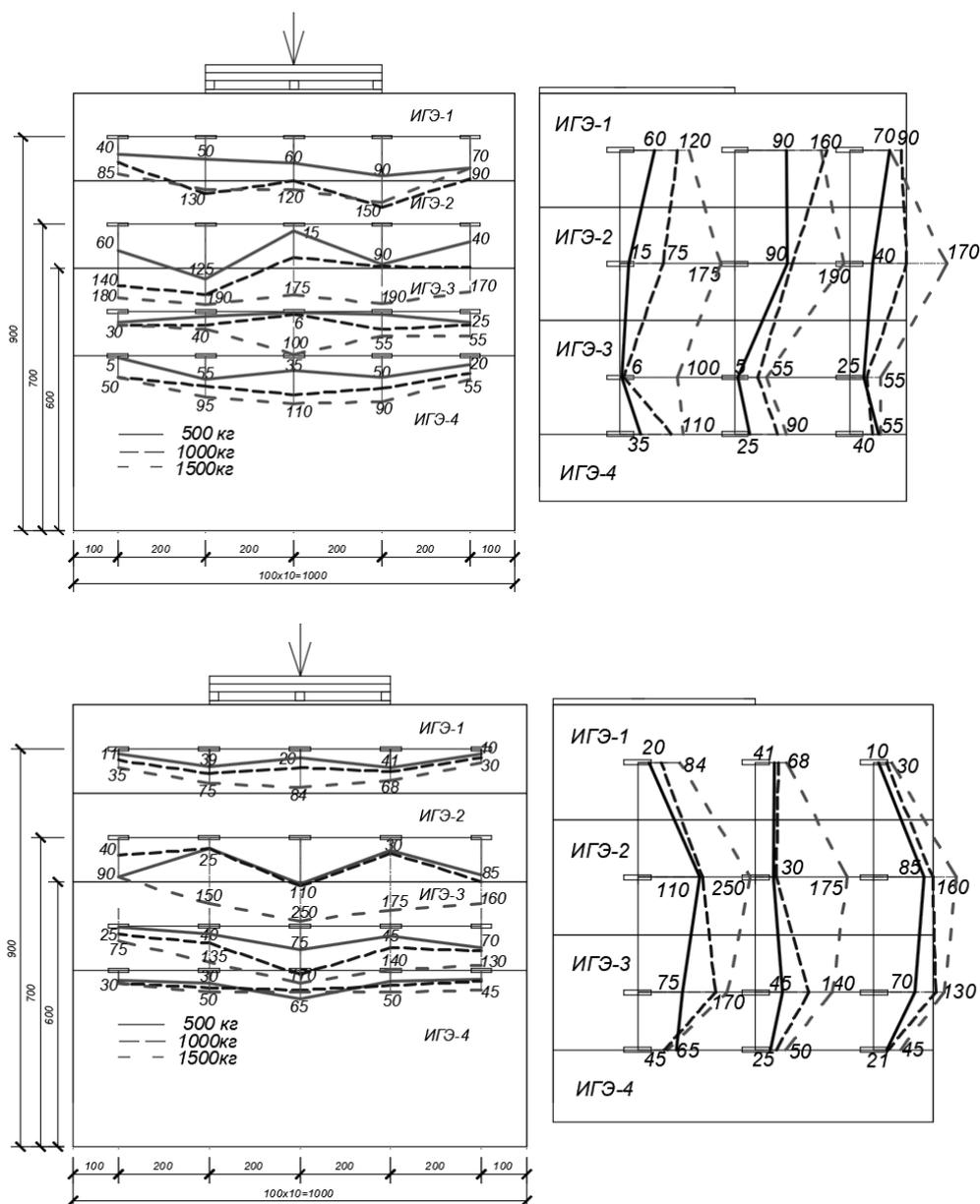


Рис. 4. Эпюры напряжений по горизонтали и вертикали в слоях грунта слоистого основания в экспериментах № 1 и № 2

По вертикальным эпюрам распределения напряжений эксперимента № 1 (рис. 4) видно, что на первых стадиях нагружения наибольшие напряжения возникали в первом верхнем слое, а по мере его уплотнения и увеличения нагрузки напряжения во втором водонасыщенном слое песка увеличились в 2-10 раз до 170-190 кПа. Во втором эксперименте (рис. 4), где водонасыщенный слой являлся третьим сверху, наибольшие напряжения на ранних стадиях возникали во втором слое (суглинок), и с увеличением нагрузки напряжения в водонасыщенном слое увеличились в 2-3 раза до 130-170 кПа.

В эксперименте № 3 (рис. 5), который отличается от № 2 толщинами первого и второго слоев, на ранних стадиях нагружения большие напряжения возникали в первом слое, особенно, под краями плиты (75 кПа), а во втором слое напряжения в несколько раз меньше. С увеличением нагрузки напряжения в первом слое под краями плиты уменьшились на 65 %, под центром плиты увеличились в 4 раза, в ИГЭ-2 напряжения увеличились 2-8 раз, а в третьем водонасыщенном слое напряжения увеличились в 2-5,6 раз.

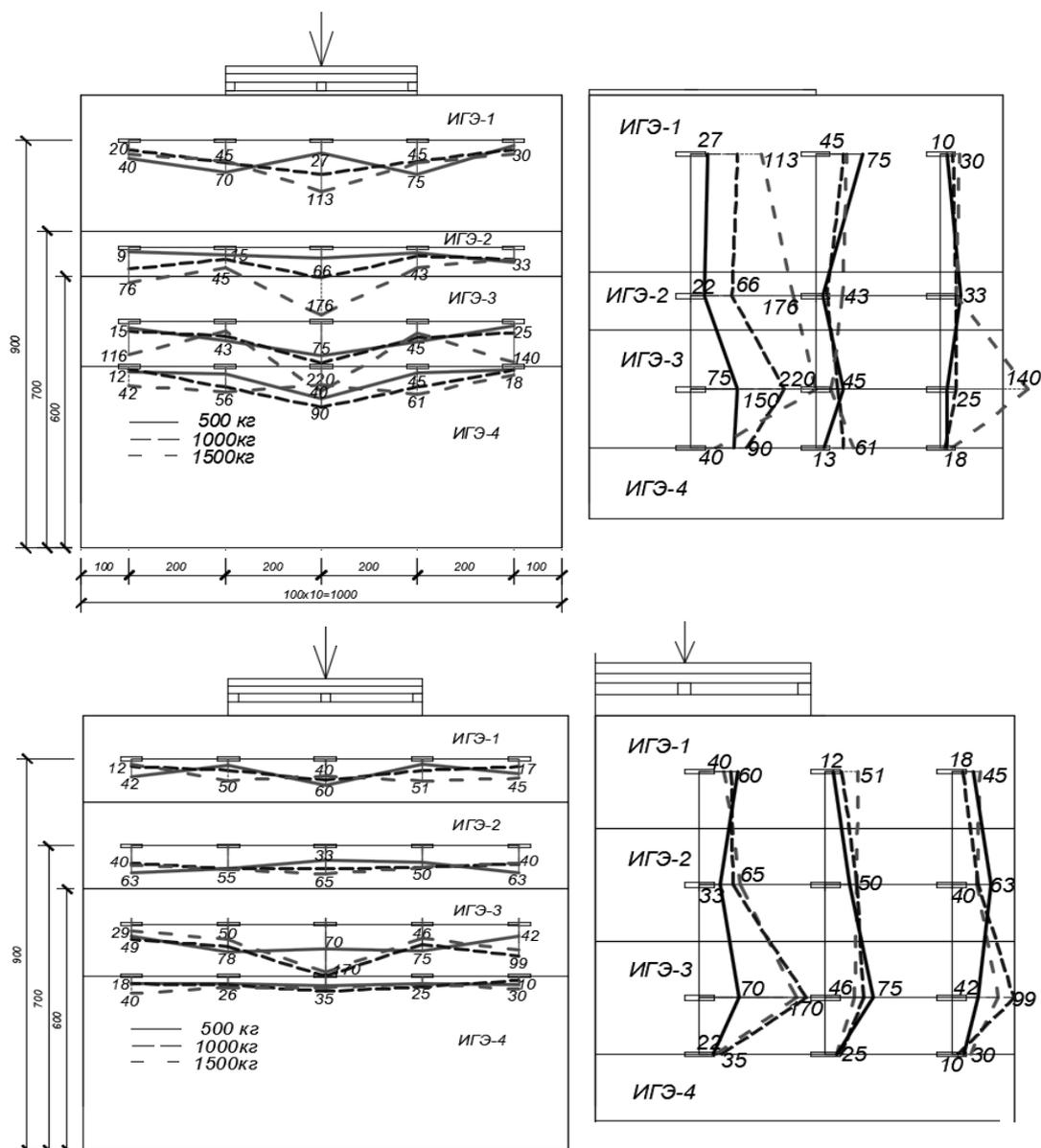


Рис. 5. Эпюры напряжений по горизонтали и вертикали в слоях грунта слоистого основания в экспериментах № 3 и № 4

В эксперименте № 4 (рис. 5) в ИГЭ-1 (тугопластичный суглинок) напряжения под центром плиты и за ее пределами на первых этапах нагружения достигли 45-60 кПа, а затем с увеличением нагрузки они уменьшились 2-6 раз. В ИГЭ-2 (супесь) напряжения увеличились в 1,5-2 раза. В ИГЭ-3 (водонасыщенный песок) под центром плиты и за ее пределами напряжения были соответственно 132 кПа и 42 кПа, на последней стадии нагружения они увеличились в 1,3 и 2 раза до 170 кПа и 99 кПа. В том же слое, но под краями плиты напряжения были максимальными 75 кПа на первых этапах, а затем они уменьшились до 46 кПа.

Сжимающие напряжения в слоях грунта, полученные экспериментальным путем, отличаются от классической формы распределения, принятой для однородных грунтов (рис. 6), они распределяются неравномерно в зависимости от деформативных свойств грунтов, концентрируются в слабых и водонасыщенных грунтах. Поэтому осадка и деформации в слоистых основаниях значительно больше, чем в однородных грунтах. В экспериментах № 1, № 2 и № 3 в отличие от классической формы распределения на конечных этапах нагружения напряжения во втором слое больше, чем в первом слабом слое, так как им является супесь пластичная, а вторым слоем является прочный тугопластичный суглинок или водонасыщенный слой песка. В эксперименте № 4

верхним слоем является прочный суглинок, вторым супесь, и поэтому напряжения в этих слоях в 2-4 раза меньше, чем в других экспериментах, сравнимы с классическими, но третий слой – водонасыщенный и в нем происходит значительное увеличение напряжений, что не соответствует классике.

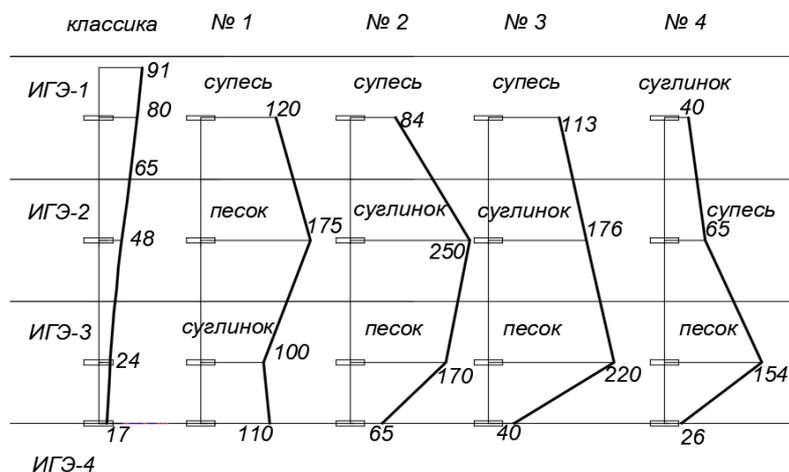


Рис. 6. Эпюры распределения сжимающих напряжений по глубине по центру штампа: классика – в однородном массиве грунта, № 1-4 – в экспериментах

Таким образом, в слоистом основании в зависимости от места расположения происходит значительное изменение напряжений: под центром штампа, под его краем или за пределами в процессе нагружения может происходить увеличение напряжений или их уменьшение. Разница в напряжениях между отдельными слоями обуславливается различием в деформативных характеристиках грунтов в 3-4 раза, а также зависит от верхнего подстилающего слоя: если им является относительно слабый грунт (супесь пластичная $E=7-11$ МПа), то пластические зоны, возникающие под краями штампа уже на ранних стадиях, расширяются, «передают» свои напряжения в соседние с ними области, влияют на распределение напряжений под центром штампа, за его пределами, в нижних слоях, и поэтому напряжения оказываются уже не пропорциональными величине внешней нагрузки. Полные напряжения в водонасыщенных слоях на начальных стадиях нагружения в 3-10 раз меньше, чем на завершающих этапах. Это связано с тем, что нагрузка передаваемая вышележащими слоями грунта, воспринимается сначала поровой несжимаемой водой (так как песок не обладает значительной структурной прочностью), а затем постепенно передается на скелет грунта.

В результате анализа напряженно-деформированного состояния слоистого основания с водонасыщенным слоем песчаного грунта можно заключить, что наличие водонасыщенного слоя в пределах сжимаемой толщи значительно влияет на перераспределение напряжений в грунтовом основании: в процессе нагружения и деформирования в водонасыщенном слое наблюдается увеличение напряжений по отношению к вышележащим слоям в среднем на 1,2-2,5 раза, в вышележащих слоях увеличение напряжений происходит меньше, а в некоторых случаях наблюдается уменьшение напряжений. Это связано с процессами уплотнения грунта в результате фильтрации поровой воды и со сдвиговыми процессами между отдельными слоями слоистого основания.

Для наблюдения за процессом кратковременной фильтрации поровой воды в грунтовом основании в каждом слое в разных точках по глубине и по горизонтали производился отбор проб грунта для определения изменения влажности в ходе нагружения. Из рис. 7 видно, что в процессе проведения экспериментов происходило уменьшение влажности водонасыщенного слоя песка с 19 % до 16 % в эксперименте № 2 и до 13 % в эксперименте № 4, причем уменьшение влажности за пределами штампа происходило менее интенсивно до 17 % и 14 % соответственно. В грунтах, расположенных выше водонасыщенного слоя, в эксперименте № 2 влажность тугопластичного суглинка увеличилась в пределах модели плиты на 1-2 % до 21 %, в

эксперименте № 4 в пластичной супеси влажность увеличилась на 2-3 % до 16-17 %. Таким образом, движение поровой воды из водонасыщенного слоя мелкого песка, подстилаемого водоупорным слоем (полутвердый суглинок) происходит в верхние слои за счет предположительно повышения капиллярного давления в порах грунтов под моделью плитного фундамента, а также в стороны от центра оси нагружения. Судя по изменению влажности в ходе эксперимента за пределами модели плиты (рис. 7) горизонтальная фильтрация происходит меньше в 1,5 раза, т.к. в направлении от центра количественное изменение влажности уменьшается.

Эксперимент 2				Эксперимент 4			
ИГЭ-1 супесь				ИГЭ-1 суглинок			
	+1%	+1%	+0.5%	+1%	+1%	+1%	
ИГЭ-2 суглинок	+2%	+2%	+1%	+3%	+2.5%	+2%	
	-5%	-4.5%	-3%	-6%	-6%	-5.5%	
ИГЭ-3 песок насыщенный водой	-3%	-3%	-2%	-5%	-5%	-4.5%	
	-1%	-1%	-0.5%	-2%	-1.5%	-1.5%	
ИГЭ-4				-1%	-1%	-0.5%	
ИГЭ-4				ИГЭ-4			

Рис. 7. Схема мест отбора проб грунта для определения влажности с указанием изменения влажности в ходе экспериментов № 2 и № 4

Заключение

Процесс деформирования слоистого основания модели плитного фундамента сопровождается перераспределением напряжений между слоями основания, возникновением сил взаимодействия между скелетом грунта и поровой водой в виде объемных сил, которые определяются возникающими давлениями в поровой жидкости. Поровая вода влияет на напряженно-деформированное состояние всего многослойного основания, включая вышележащие слои грунта, повышает в них капиллярное давление.

В слоистых водонасыщенных грунтовых основаниях формируется сложное и неоднородное напряженно-деформированное состояние, которое изменяется во всем объеме в процессе нагружения вследствие процессов кратковременной консолидации.

В результате деформирования слоистого основания происходит вертикальная фильтрация поровой воды в верхние слои, расположенные над водонасыщенным слоем, а также в стороны по горизонтали.

Список библиографических ссылок

1. Тетиор А. Н. Фундаменты. М. : Академия, 2010. 400 с.
2. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981. 318 с.
3. Сиразиев Л. Ф., Богданов Р. Р. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния двухслойного грунтового основания плитного фундамента при жестком подстилающем слое // Известия КГАСУ. 2012. № 1 (19). С. 67–73.
4. Сиразиев Л. Ф., Сергеев Д. Н. Экспериментальные исследования влияния напластования различных грунтов на напряженно-деформированное состояние слоистого грунтового основания плитного фундамента // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 153–159.

5. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Физико-механические свойства глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 82–87.
6. Тезисы докладов : сб. научных трудов 66-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2014. 346 с.
7. Тезисы докладов : сб. научных трудов 67-й Всероссийской научной конференции, Казань, 2015. 349 с.
8. Андреев В. И., Барменкова Е. В. Расчет двухслойной плиты на упругом основании с учетом собственного веса : сб. трудов XIX Польско-словацко-российского семинара «Теоретические основы строительства» / University of Zilina. Жилина, 2010. С. 39–44.
9. Kim C. K., Hwang M. H. Non-linear analysis of skew thin plate by finite difference method // Journal of mechanical science and technology. 2012. Vol. 26. № 4. P. 1127–1132.
10. Malekzadeh K., Khalili S. M. R., Abbaspour P. Vibration of non-ideal simply supported laminated plate on an elastic foundation subjected to in-plane stresses // Composite Structures, 2010. P. 1478–1484.
11. Kotrasova K., Kormanikova E. The ground plate on the Winkler foundation In // Modelovani v mechanice. 2010. № 92. P. 1–6.

Siraziev L.F. – 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

Experimental studies of the stress-strain state of the three-layer soil base under short-term plate-bearing test and the presence of the water saturated layer

Abstract

Problem statement. The purpose of the study is to reveal the effect of water saturated layer to stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation.

Result. The main results of the study consist in obtaining a picture of deformation for layered subsoil base in the presence of water saturated layer with an underlain by a waterproof layer. Compressive stress distribution diagrams in the horizontal plane of each layer of layered subsoil base and in the vertical plane in depth are obtained. Direction of a vertical filtration water in the subsoil base are determined.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction area is to establish the influence water saturated layers on inhomogeneous stress-strain state that changing in the all of volume in the process of loading. Pore water influences to stress-strain state all of multilayered base including overlying layers of the soil, increases capillary pressure, causes deformation of form change.

Keywords: slab foundation, water saturated subsoil bas, stress-strain state.

References

1. Tetior A. N. Foundations. M. : Academy, 2010. 400 p.
2. Tsytoovich N. A., Ter-Martirosyan Z. G. Fundamental of applied geomechanics in construction. M. : Higher School, 1981. 318 p.
3. Siraziev L. F., Bogdanov R. R. Experimental researches of deflected mode of double layered soil basis of slab foundation with rigid underlay // Izvestiya KGASU. 2012. № 1 (19). P. 67–73.
4. Siraziev L. F., Sergeev D. N. Experimental studies of the influence of the bedding of various soil on the stress-strain state of a layered subsoil base of the slab foundation // Izvestiya KGASU. 2017. № 2 (40). P. 153–159.

5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Physical and mechanical properties of clay soils with prolonged triaxial compression // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2011. № 1 (26). P. 82–87.
6. Theses of reports : dig. of art. of the 66th All-Russian scientific conference, Kazan, 2014. 346 p.
7. Theses of reports : dig. of art. of the 67th All-Russian scientific conference, Kazan, 2015. 349 p.
8. Andreev V. I., Barmenkova E. V. Calculation of a two-layer slab on an elastic foundation with allowance for its own weight: dig. of art. of the XIX Polish-Slovak-Russian seminar «Theoretical basis of construction» / University of Zilina. Zilina, 2010. P. 39–44.
9. Kim C. K., Hwang M. H. Non-linear analysis of skew thin plate by finite difference method // Journal of mechanical science and technology. 2012. Vol. 26. № 4. P. 1127–1132.
10. Malekzadeh K., Khalili S. M. R., Abbaspour P. Vibration of non-ideal simply supported laminated plate on an elastic foundation subjected to in-plane stresses // Composite Structures, 2010. P. 1478–1484.
11. Kotrasova K., Kormanikova E. The ground plate on the Winkler foundation In // Modelovani v mechanice. 2010. № 92. P. 1–6.