УДК 624.138; 624.131.23

В.Р. Мустакимов – кандидат технических наук, доцент Р.И. Шафигуллин – бакалавр Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС АРМИРОВАННОГО ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА, ПРОЯВЛЯЮЩЕГО ПРОСАДОЧНЫЕ СВОЙСТВА В ОБЪЕМНОМ ЛОТКЕ

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния искусственно созданной в объемном лотке модели грунта, выполненной при помощи отсыпки мелкого песка без уплотнения, способного проявлять просадочные свойства при его увлажнении. Проведен цикл лабораторных исследований деформативности модели песчаного грунта, армированного различными вертикальными элементами в объемном лотке.

V.R. Mustakimov – candidate of technical science, associate professor R.I. Shafigullin – bachelor Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

RESEARCH OF TENSELY-DEFORMED CONDITION REINFORCED WITH VERTICAL ELEMENTS OF THE SANDY GROUND, WHICH DISPLAYS DEPOSIT PROPERTIES IN A VOLUMETRIC TRAY

ABSTRACT

The results of experimental research of tensely-deformed condition of artificially created ground model in a volumetric tray. The model is designed by providing of fine sand without condensation, capable to show deposit properties during its humidifying. The cycle of laboratory investigations on deformability of the sandy ground model reinforced with various vertical elements in a volumetric tray is carried out.

Напряженно-деформированное состояние грунтового массива, армированного вертикальными элементами, при приложении внешней нагрузки, отличается от НДС грунтового массива без армирования и массива грунта с погруженными в него сваями [1].

Исследованиям армированных оснований посвящены труды: В.И. Крутова, И.К. Попсуенко, С.П. Клепикова, А.И. Маркова, В.Г. Федоровского, Л.М. Тимофеевой, Т. Yamanuchi, Д.К. Джоунса и др.

Вопросы прочности и деформативности грунтов, армированных вертикальными элементами, изучены недостаточно. Отсутствует единая теория и методика расчета грунтов, проявляющих просадочные свойства, армированных вертикальными элементами при природной влажности и после увлажнения. Изучение состояния вопроса позволило обосновать направление дальнейшего развития исследований.

Маломасштабное моделирование процесса просадки грунта, армированного массива в стесненных условиях одометра рассмотрено в [2]. Отбор монолита просадочного грунта с ненарушенной структурой, для проведения штамповых испытаний в объемном лотке

Известия КазГАСУ, 2008, №1 (9)

размером 1,0х1,0х1,0 м не представляется возможным и является проблемой многих исследователей. В настоящей работе приводится использованная авторами методика подготовки и проведения лотковых испытаний. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния искусственно созданной в объемном лотке модели грунта, выполненной при помощи отсыпки мелкого песка без уплотнения, способного проявлять просадочные свойства при его увлажнении.

Авторами проведен цикл лабораторных исследований деформативности модели песчаного грунта, армированного различными по геометрическим параметрам, материалу и жесткости вертикальными элементами-моделями в объемном лотке (рис. 1а). Исследовались качественные и количественные характеристики деформативности рыхлого песка, не армированного и армированного вертикальными элементами. Испытаниям был подвергнут мелкий песок в рыхлом состоянии плотностью Γ =1,41 г/см³; с коэффициентом пористости е=0,86; модулем деформации E=7,0 МПа;



Рис. 1. Объемные лотки размером 1,0x1,0x1,0 м с системой двухрычажных загрузочных устройств (а) и реперная система с размещением приборов ИЧ (б)

степенью влажности $S_r=0,4$; при различном проценте поперечного армирования грунта $\mu,\%$; диаметре d_{a_3} и длине l_{a_3} армоэлементов.

При испытаниях были использованы стальные жесткие круглые штампы диаметром $d_{um} = 280 MM$, площадью $A_{um.l} = 615 cm^2$ и $d_{um.2} = 130 m$, площадью $A_{um.2} =$ 132*см*² расположенные по центру лотка (рис. 1б). Нагружение штампов осуществлялось посредством стального штока через раму, при помощи системы двухрычажных загрузочных устройств (рис. 1а). Для измерения вертикальных деформаций осадки S (до замачивания грунта S₂=0,4) и просадки S₂ (после замачивания грунта до полного водонасыщения S₂>0,8) использовались поверхностные «МП» и глубинные «МГ» марки. Глубинные и поверхностные марки располагались системно в левой или правой, по отношению к центральной оси симметрии, области объема массива исследуемого грунта с шагом по высоте и в плане, равным 100 мм (рис. 2). Перемещение марок «МП» и «МГ» совместно с массивом исследуемого грунта в лотке фиксировалось при помощи установленных на обрез каждой из марок индикаторов часового типа с соответствующим диапазоном измерений. Ожидаемые деформации до 10 мм фиксировались при помощи индикаторов часового типа ИЧ10МН.000ПС по ГОСТ 577-68 с ценой деления 0,01 мм, диапазоном измерения 0-10 мм. Для измерения деформаций грунта вместе маркой более 10мм при испытаниях использовались индикаторы часового типа ИЧ50000ПС по ТУ2-034-611-84 с диапазоном измерения 0-50 мм (рис.3, рис.6).

Статическое закрепление измерительных приборов производилось на реперную систему, выполненную из деревянных брусьев сечением 30x50 мм с жестким креплением к стенкам лотка. Реперная конструкция располагалась над рабочей областью объемного лотка. Размещение, крепление и фиксация измерительных приборов производилась к реперной конструкции, в соответствии с рис. 16.

В качестве армирующих элементов-моделей использовались цементогрунтовые армоэлементы сечением 40х40 мм, длиной $L_{apm} = 400$ мм и стальные диаметром d=6 мм длиной $L_{apm} = 350$ мм в пластиковой оболочке, создающей шероховатость по длине (рис. 2).

Программа исследований НДС грунта в объемном лотке включала испытание деформативности армированного грунта в зависимости: от принятой схемы вертикального армирования, включая расположение армоэлементов-моделей под контуром штампа (рис. 3) и за его пределами (рис. 4); от схемы передачи давления штампа на вертикально расположенные армоэлементы, включая, передачу давления непосредственно на обрез сжимаемого армоэлемента-модели, изготовленного из цементогрунта, а также через распределительную гравийно-песчаную подушку, армированную слоем нерастяжимой геоткани, на несжимаемые (стальные) армоэлементы-модели.

Нагружение штампов производилось статической нагрузкой, прикладываемой ступенями по 1,0 кг на каждый из секторных рычагов системы двухрычажного загрузочного устройства. Каждая последующая ступень нагружения прикладывалась



Рис. 2. Полость лотка с расположением армоэлементов и « $M\Pi$ », « $M\Gamma$ »: а – армирование только под штампом, б – армирование под штампом и за его контуром



Рис. 3. Схемы к испытанию армированного вертикальными элементами рыхлого песка в лотке, при армировании только под штампом: а – план лотка, *δ* и в – сечения 1-1 и 2-2

после полной стабилизации деформации армированного грунта от предыдущей ступени нагружения. При испытаниях армированного рыхлого песка опытная стабилизация деформации достигалась и фиксировалась в течение первых двух суток. Контактное давление «Р» под подошвой штампа площадью A_{ит 1} = 615 см² перед замачиванием составляло 0,02 $\kappa c/cm^2$, а под штампом площадью A_{um2} = 132*см*² – *Р*=0,09 кг/см². Это позволило более достоверно моделировать работу квазипросадочного (якобы просадочного) грунта с проявлением деформации просадки при незначительных давлениях, сопоставимых с начальным просадочным давлением Р_л. Графики зависимости изменения осадки-просадки от давления штампа на грунт в условиях объемного лотка приведены на рис. 5. На графиках участки а-б и в-г отображают процесс осадки армированного грунта S=f(P), а участок δ -e - стесненную просадку армированного массива [1].

При ступени нагружения $N = 12,50 \ \kappa_2$ на жесткие круглые штампы площадью $A_{um} = 615 \ cm^2$ и $A_{um} = 132 \ cm^2$,

производилось замачивание массива армированного грунта, до полного его водонасыщения ($S_{=}=1$), по схеме сверху-вниз, из локального источника замачивания. Из графиков (рис. 5) видно, что при увлажнении квазипросадочного грунта происходит скачкообразная деформация грунта, аналогичная реальному процессу стесненной деформации просадки, происходящему в просадочных грунтах при их замачивании [1]. Следовательно, искусственно созданная в лабораторных условиях модель грунта из рыхлого мелкозернистого песка, с определенными допущениями, может быть использована в качестве массива при лабораторных исследованиях просадочных грунтов в лотке, с заданной величиной коэффициента относительной просадочности Е, и начальным просадочным давлением $P_{\rm el}$.

В результате проведенных экспериментов были получены данные о деформации моделируемого массива, армированного вертикальными и горизонтальными элементами квазипросадочного грунта, составлены таблицы значений осадки и



Рис. 4. Схемы к испытанию армированного вертикальными и горизонтальными элементами рыхлого песка в объемном лотке при армировании под штампом и за его контуром: а – план лотка с размещением штампа, глубинных марок, б и в – сечения 1-1 и 2-2

Давление Р(кг/см2) Давление Р(кг/см2) Деформации S и просадки S_{si}(мм) (WW)^{2.5} S^{2.5} **D**шт=13см 1.0 **D**шт=28см 2.0 Ашт=132.67см2 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 3.0 Ашт=615.44см2 4.0 5.0 6.0 7.0 **S** 20.0 8.0 **Зеформации S** 30.0 32.0 35.0 37.0 9.0 25.0 10.0 27.5 11. 30.0 12. б) a)



просадки, по которым построены изолинии осадки до замачивания (рис. 6) и стесненной просадки после замачивания (рис. 7) армированного массива.

при нагрузке на штамп N=12,5 кг

Экспериментально полученные значения вертикальных деформаций осадки и стесненной просадки массива армированного грунта в характерных точках, расположенных с принятым шагом 100х100х100 мм в пределах объема лотка 1000х1000х1000 мм, позволили построить объемные линии равных нормальных напряжений S_z [3]. Схемы развития линий равных вертикальных напряжений S_z , построенных по результатам эксперимента, в массиве рыхлого песчаного грунта, проявляющего просадочные свойства, армированного вертикальными элементами только под штампом, а также армированного вертикальными под штампом и за его контуром, при нагрузках на штамп

 $N = 6,0 \ \kappa c$ (*a*), $N = 12,5 \ \kappa c$ и $S_r = 0,4$ (б) до увлажнения и при $N = 12,5 \ \kappa c$ после замачивания сверху, до полного водонасыщения $S_r = 1$ (*b*), приведены на рис. 8 и 9. Анализ построенных линий равных напряжений позволяет представить пространственную работу модели грунта, армированного вертикальными армоэлементами-моделями.

при нагрузке на штамп N=12,5 кг

При вертикальном армировании грунта по схеме «армоэлемент-трения» только под подошвой штампа, без промежуточной подушки, с увеличением нагрузки на штамп происходит деформация осадки-стесненной просадки. По внешнему контуру, на боковой поверхности вертикально расположенных армоэлементов трения, за счет сил трения-сцепления окружающего их массива грунта, вовлекаясь в совместную работу, формируется симметричный пирамидально-конусообразный усеченный массив



Рис. 6. Изолинии вертикальных деформаций осадки *S* поверхностных и глубинных марок № 1-14, до увлажнения грунта массива при нагрузках на штамп *N*=6,0 *кг* (а), *N*=12,5 *кг*, *S*_{*r*}=0,4 (б) и просадки *S*_{*sl*} после замачивания сверху рыхлого массива песчаного грунта, проявляющего просадочные свойства, при *N*=12,5 *кг* и степени влажности *S*_{*sl*}=1 (в)

92



Рис. 7. Изолинии вертикальных деформаций осадки *S* поверхностных и глубинных марок № 1-14, до увлажнения грунта массива армированного вертикальными и горизонтальными элементами под штампом и за его контуром, при нагрузке на штамп *N* = 12,5 *кг*, *S_r* = 0,4 (а) и просадки *S_{sl}* после замачивания сверху рыхлого массива песчаного грунта, проявляющего просадочные свойства, при *N* = 12,5 *кг* и степени влажности *S_r* = 1 (б)

(рис. 8). Экспериментально установлено, что геометрическая форма развития линий равных напряжений s_z в массиве армированного грунта не постоянна, а изменяется в зависимости от уровня нагружения и изменения физико-механических свойств массива грунта в процессе его обжатия, вызванного увлажнением и следующими за этим процессами. В формировании линий равных напряжений, кроме сил трения-сцепления, участвует сопротивление сжатию массива грунта, расположенного ниже армированной по высоте зоны. На начальных стадиях нагружения (при $N = 6,0 \ {\kappa_2} \ {\rm u} \ {\rm S}_r = 0,4$) линии равных напряжений имеют переменную по высоте армирования форму,

переходящую от бочкообразного вида сверху, к усеченному конусу в основании армированного массива (рис. 8а). Это можно объяснить сжимаемостью вертикальных моделей армоэлементов, изготовленных из цементно-песчаного раствора. С дальнейшим увеличением нагрузки на штамп (при $N = 12,5 \kappa c$ и $S_r = 0,4$) и завершением сжатия армоэлементов, в совместную работу с моделями армирования включается окружающий массив грунта за счет сил трения-сцепления на боковой поверхности. При этом происходит смыкание двух зон (бочкообразной и конусной) в единую по форме конусноцилиндрическую (рис. 8б). После увлажнения





при нагрузке на штамп N=12,5 кг



Рис. 9. Схемы развития экспериментальных линий равных напряжений *s*, в массиве рыхлого песчаного грунта, армированного вертикальными и горизонтальными элементами под штампом и за его контуром: а и б – до увлажнения, в – после замачивания

армированного массива грунта ($N = 12,5 \ \kappa z \ u \ S_r = 1$), при всех прочих условиях происходит перераспределение напряжений в массиве армированного грунта. Концентрация напряжений в нижней зоне армированного массива после увлажнения вызывает деформацию просадки S_{sl} под подошвой армированного массива и стесненную

просадку S_{sl,a_i} в пределах зоны армирования. Увеличение деформативности массива грунта после его замачивания приводит к некоторому развитию по глубине зоны распространения напряжений с формированием линий равных напряжений, изображенных на рис. 8в. Это объясняется тем, что замачивание производилось сверху вниз из локального источника, расположенного по оси симметрии штампа. Следовательно, форма линий равных напряжений после увлажнения соответствует закономерности фильтрации и распространения воды замачивания в песчаном грунте и имеет вытянутую по высоте «грушу увлажнения».

Несколько иная картина наблюдается при испытании модели песчаного грунта, армированного вертикальными и горизонтальными элементами под штампом и за его контуром, при маловлажном состоянии песка $S_r = 0,4$ и после замачивания сверху от локального источника $S_r = 1$ (рис. 9). Здесь наблюдается эффект перераспределения контактных напряжений от штампа на большую часть вертикальных армоэлементов, расположенных как под штампом, а также и за его контуром за счет имеющейся под подошвой штампа распределительной песчаногравийной подушки толщиной 50 *мм*, горизонтально

94

армированной нерастяжимой геотканью толщиной 0,7 мм. Распределительный эффект вовлечения в совместную работу грунта и вертикальных армоэлементов возрастает в зависимости от уровня и времени включения в работу горизонтально армированной геотканью распределительной подушки.

при нагрузке на штамп N=12,5 кг

Вертикальные напряжения S_i в каждой исследуемой точке массива грунта объемного лотка рассчитывались по формулам (1) и (2) с использованием экспериментально полученных значений деформаций глубинных марок. Исследовались деформации осадки $S_{a,i}$ при природной влажности насыпного песка, проявляющего просадочные свойства и просадки $S_{sl,ai}$ при замачивании массива грунта до полного водонасыщения по схеме сверху вниз.

$$\mathbf{s}_{i} = \frac{S_{a,i} \cdot E_{a,i}}{\boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{h}_{i}},\tag{1}$$

где $S_{a,i}$ – экспериментально полученные деформации осадки рыхлого песка, армированного вертикальными элементами, от ступенчато прикладываемой к штампу статической нагрузки в объемном лотке до замачивания; $E_{a,i}$ – эквивалентный модуль деформации

грунта в основании штампа [1];
$$b = \frac{1-2m_0^2}{1-m_0}$$

коэффициент, характеризующий боковое расширение грунта; m_0 – коэффициент относительной поперечной деформации, принимаемый по опытным данным (для песков $m_0 = 0,20$ -0,25, глин и суглинков твердых и полутвердых $m_0 = 0,10$ -0,15, тугопластичных $m_0 = 0,20$ -0,25,

пластичных и текучепластичных $m_0 = 0,30-0,40$, текучих $m_0 = 0,45-0,50$, супеси $m_0 = 0,15-0,30$) [3]; $h_i =$ толщина слоя грунта.

$$\boldsymbol{S}_{i} = \frac{\boldsymbol{S}_{sl,a_{i}} \cdot \boldsymbol{E}_{a,i}}{\boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{h}_{i}}, \qquad (2)$$

где S_{sl,a_i} – экспериментально полученная деформация стесненной просадки массива рыхлого, армированного вертикальными элементами песка, проявляющего просадочные свойства при замачивании, или рассчитываемая по [1].

$$S_{sl,a_{i}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\frac{\left(S_{zg} + S_{zp}\right)}{E_{o}^{I}} \left[1 + \frac{d}{1 - a_{o}} t^{1 - a_{o}}\right]}{\left(\frac{E_{as}}{E_{o}^{I}} + \frac{1}{m}\right)} m \qquad (3)$$

В результате проведенных экспериментов по исследованию изменения НДС армированного вертикальными элементами песчаного грунта, проявляющего просадочные свойства в объемном лотке, можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально апробировано и установлено, что мелкий песок в рыхлом состоянии, как экспериментальная модель грунта, способен проявлять просадочные свойства при его замачивании, адекватные просадке грунта природного происхождения. Использование песка в рыхлом состоянии позволяет моделировать работу просадочного грунта, при испытании в объемном лотке большого размера.

2. Исследование деформированного состояния модели массива рыхлого песчаного грунта, армированного вертикальными и горизонтальными элементами с использованием системы поверхностных «МП» и глубинных «МГ» марок, расположенных в массиве грунта по регулярной схеме с расчетным шагом 100 мм в объемном лотке размером 1000х1000х1000 мм, позволяет с достаточной достоверностью определить вертикальные напряжения в любой точке исследуемого массива грунта методом расчета по формулам (1, 2 из [3] и 3 из [1]) на любой ступени нагружения штампа.

3. При комбинированном армировании массива грунта вертикальными и горизонтальными элементами под штампом и за его контуром наблюдается эффект перераспределения контактных напряжений на большую часть вертикальных армоэлементов, за счет имеющейся под подошвой штампа распределительной песчано-гравийной подушки, горизонтально армированной нерастяжимой геотканью. Распределительный эффект вовлечения в совместную работу грунта и вертикальных армоэлементов возрастает в зависимости от уровня и времени включения в работу горизонтально армированной подушки, соризонтально возрастает в работу горизонтально армированной распределительный эффект вовлечения и времени включения в работу горизонтально армированной распределительной подушки (рис. 9).

Литература

- Мустакимов В.Р. Прочность и деформативность просадочных грунтов оснований, армированных вертикальными армоэлементами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГСУ, 2004. – 24 с.
- Мустакимов В.Р., Шафигуллин Р.И., Иванова Е.В. Экспериментальные исследования стесненной просадки квазипросадочного и сжимаемости рыхлого песчаного грунтов, армированных вертикальными элементами. // Известия КГАСУ, 2007, №1(7). – С. 29-34.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 177 с.