

*И.Т. Мирсаяпов, д.т.н., профессор  
И.В. Королева, к.т.н., ст. преподаватель*

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

## **НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ОСАДКА АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ**

*Рассмотрены расчетные модели несущей способности и деформирования армированного вертикальными элементами грунтового основания. Разработаны новые аналитические выражения механического состояния армированного основания с учетом совместного деформирования грунтов и армирующих элементов. Сопротивление армированного основания сдвигу в краевых зонах формируется сопротивлением грунтовна сжатие под армирующими элементами и сопротивлением изгибу армирующих элементов. Несущая способность грунта под армирующими элементами определяется из условия трехосного сжатия. Величина силы сдвига, воспринимаемая армирующими элементами, определяется из уравнения равновесия моментов внешних и внутренних сил наиболее нагруженных частей армирующего элемента, зацементированных по плоскости сдвига грунта. Сопротивление сжатию армированного основания в средней части определено, исходя из требований прочности в условиях трехосного сжатия. Деформация армированного основания определяется методом послойного суммирования с учетом напряженного состояния окружающего грунтового массива и совместной деформации грунта и армирующих элементов.*

**Ключевые слова:** армированное основание, расчет осадки, несущая способность, вертикальное армирование, объемное напряженное состояние грунта.

*I.T. Mirsayapov, d.t.n., professor  
I.V. Korolyova, k.t.n., st. vkladach*

*Kazan'skiy derzhavniy arkhitekturno-budivельniy universitet*

## **НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ОСІДАННЯ АРМОВАНИХ ГРУНТОВИХ ОСНОВ**

*Розглянуто розрахункові моделі несучої здатності й деформування армованої вертикальними елементами ґрунтової основи. Розроблено нові аналітичні вирази механічного стану армованої основи з урахуванням спільного деформування ґрунтів та армуючих елементів. Опір армованої основи зрушенню в крайових зонах формується опором ґрунтів на стиск під армуючими елементами й опором згину армуючих елементів. Несуча здатність ґрунту під армуючими елементами визначається з умови трьохосового стиснення. Величина сили зрушення, що сприймається армуючими елементами, визначається з рівняння рівноваги моментів зовнішніх і внутрішніх сил найбільш навантажених частин армуючого елемента, затиснених по площині зсуву ґрунту. Опір стиску армованого масиву в середній частині визначено, виходячи з вимог міцності в умовах трьохосового стиснення. Деформація армованої основи визначається методом пошарового підсумовування з урахуванням напруженого стану навколишнього ґрунтового масиву і спільної деформації ґрунту та армуючих елементів.*

**Ключові слова:** армована основа, розрахунок осідання, несуча здатність, вертикальне армування, об'ємний напружений стан ґрунту.

*I.T. Mirsayapov, Prof.  
I.V. Korolyova, PhD*

*Kazan State University of Architecture and Engineering*

## **BEARING CAPACITY AND SETTLEMENTS OF REINFORCED SOIL BASES**

The article discusses design models bearing capacity and deformation of reinforced soil base vertical elements. Development of new analytical expressions of the mechanical condition of reinforced base with a joint deformation of the soil and reinforcing elements. Resistance reinforced base shift in the boundary zones formed of earth resistance by compression reinforcing elements and the resistance to bending of reinforcing elements. The bearing capacity of the soil under the reinforcing elements is determined from the strength of triaxial compression. The value of shear force, the perceived reinforcing elements is determined from the equation of equilibrium moments of the external and internal forces of the most loaded section of the reinforcing element, clamped through the shear plane of the soil. The resistance of reinforced soil compression in the middle part defined of the requirements of strength under triaxial compressive. Deformation of the reinforced base determined by the method of layer-stack surround the stress-strain state and joint deformation of the soil and reinforcing elements.

**Keywords:** reinforced base, the calculation of the deformation, load-bearing capacity, the vertical reinforcement, three dimensional stress of soil.

**Введение.** При высоких уровнях нагрузок на грунтовые основания в процессе реконструкции и усилении зданий и при неблагоприятных инженерно-геологических условиях площадок строительства одним из способов увеличения несущей способности и уменьшения осадок оснований является вертикальное армирование грунтов в основании зданий и сооружений.

Армированное грунтовое основание представляет собой комбинацию грунта и армирующих элементов, при этом армирующие элементы меняют условия деформирования основания, ограничивая деформации грунтов как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, повышая общую устойчивость основания в целом.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** Проведенные лабораторные и полевые экспериментальные исследования позволили установить, что армирование вертикальными элементами увеличивает несущую способность грунтового основания в 1,42 – 2,42 раза и снижает осадки грунтового основания в 1,25 – 3,15 раза в зависимости от характера армирования по сравнению с неармированным основанием [4] (рис. 1, 2).

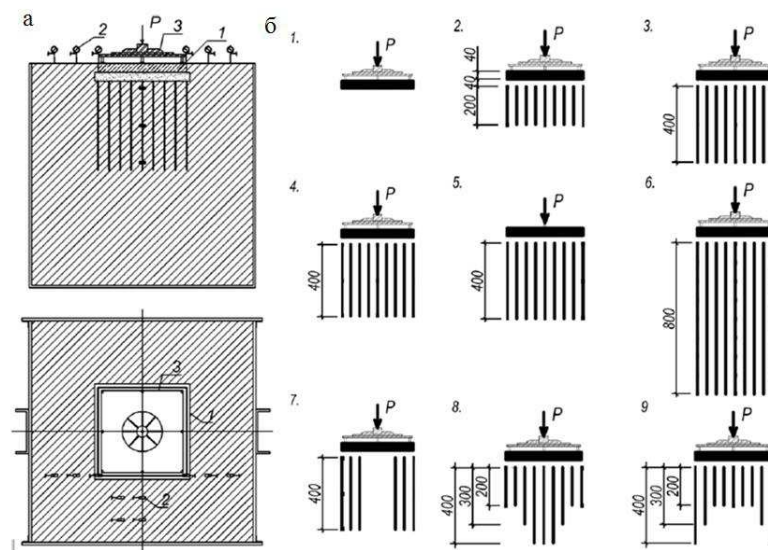


Рис. 1. Лабораторные испытания: а – схема лабораторной установки; б – программа экспериментальных исследований

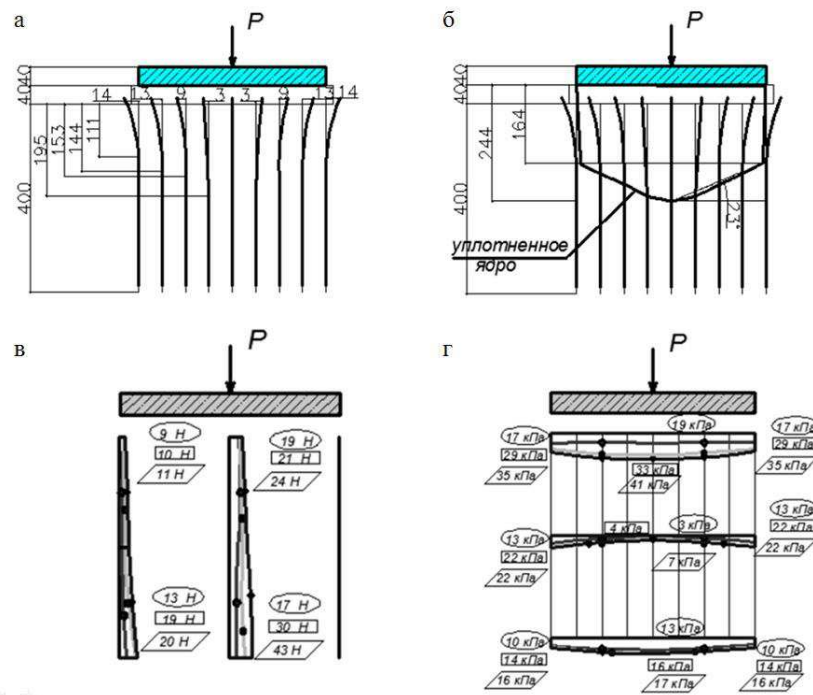


Рис. 2. Результаты лабораторных экспериментов:  
 а – схема деформирования армирующих элементов;  
 б – схема образования уплотненного ядра; в – усилия в армирующих элементах;  
 г – эпюра напряжений в грунте основания

**Постановка задачи.** В процессе экспериментальных исследований изучены изменения напряженно-деформированного состояния в различных зонах армированного грунтового основания [3]:

- напряжения в грунте и усилия в армирующих элементах с различной интенсивностью развиваются на всем протяжении испытаний, при этом наиболее заметные изменения происходят на стадии неупругого деформирования грунта;

- армирующие элементы помимо осевого сжатия испытывали изгиб и получали отклонения от вертикали, в этом случае наибольшие горизонтальные перемещения, связанные с изгибом, наблюдались в армирующих элементах, расположенных в крайних зонах, а минимальные горизонтальные перемещения были зафиксированы в центральной зоне;

- отклонение армирующих элементов от вертикали связано с формированием и развитием областей сдвига при нагружении основания и давлением пластически деформированных зон грунта.

Исходя из анализа результатов экспериментальных исследований, принята рабочая гипотеза, в соответствии с которой сопротивление армированного массива сжатию складывается из сопротивления грунта сжатию под армирующими элементами, сопротивления армирующих элементов изгибу в краевых зонах и сопротивления армированного массива трехосному сжатию в центральной зоне.

**Основной материал и результаты.** Оценка несущей способности армированного грунтового основания. Исходя из анализа результатов экспериментальных исследований, принята рабочая гипотеза, в соответствии с которой сопротивление армированного массива в сжимающем силовом потоке складывается из сопротивления трехосному сжатию в средней зоне и сопротивления сдвигу в краевых зонах (рис. 2).

Основываясь на выдвинутой гипотезе о механизме сопротивления, условие несущей способности армированного грунтового основания записывают в виде

$$P \leq ctg \varphi \cdot T + N_c, \quad (1)$$

где  $T$  – сопротивление армированного грунтового массива сдвигу;  $N_c$  – сопротивление армированного грунтового массива сжатию в центральной части;  $\varphi$  – угол внутреннего трения армированного грунта.

Прочность армированного грунтового массива сдвигу в краевых зонах складывается из сопротивления изгибу армирующих элементов, пересекающих плоскость скольжения грунта, и сопротивления сжатию грунта под армирующими элементами. В этом случае прочность краевых зон на сдвиг описывается уравнением

$$T = R_a + R_{cp}, \quad (2)$$

где  $R_a$  – сопротивление армирующего элемента изгибу;  $R_{cp}$  – сопротивление грунта сжатию под армирующими элементами.

Усилие, воспринимаемое за счет нагельной работы армирующего элемента, напрямую зависит от условий совместного деформирования этого элемента с окружающим грунтом и их прочностных и деформационных характеристик. При этом армирующий элемент рассматривается как консольная балка, заземленная на уровне линии сдвига грунта основания. Деформирование армирующего элемента ниже линии сдвига определяется как для балки на упругом основании, для которой очень важными являются деформационные свойства основания. Одним из показателей этих свойств является коэффициент постели основания. Коэффициент постели грунтового основания под армирующим элементом зависит от диаметра армирующего элемента, модуля деформации грунта и уровня напряжений. Кроме того, названный коэффициент меняется по длине армирующего элемента.

При определении коэффициента постели грунтового основания под армирующим элементом используется выражение

$$K = \frac{q}{\int_{0,5d_a}^r \frac{2q \cdot d_a}{\pi \cdot r \cdot E_0} \cdot dr}, \quad (3)$$

где  $q = Q_{cd}/d_a$ ;  $d_a$  – диаметр армирующего элемента;  $Q_{cd}$  – сдвигающее усилие по плоскости сдвига;  $E_0$  – модуль общих деформаций грунта.

Зона возникновения максимальных нормальных напряжений в армирующем элементе от изгиба находится на расстоянии  $L_x$  от плоскости сдвига (рис. 3). Это расстояние также является и зоной передачи усилий от армирующих элементов на грунт. Согласно решению задачи о полубесконечно длинном стержне в упругом полупространстве в восприятии силы, действующей на стержень, активное участие принимает только часть основания длиной  $L_x$ .

Длина зоны активного деформирования грунта имеет существенное значение при оценке несущей способности армирующего элемента и зависит от его геометрических и деформационных характеристик, коэффициента постели грунтового основания и определяется по формуле

$$L_x = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4E_a \cdot I_a}{K \cdot d_a}}, \quad (4)$$

где  $E_a$  – модуль упругости материала армирующего элемента;  $I_a$  – момент инерции поперечного сечения армирующего элемента.

Если предположить, что напряжения в грунте под армирующим элементом распределяются по зоне  $L_x$  равномерно, то равнодействующую эпюры напряжений, т.е. усилие, воспринимаемое грунтовым основанием под армирующим элементом, можно определить по выражению

$$R_{zp} = q_{ult} \cdot L_x. \quad (5)$$

Величина  $q_{ult}$  для каждой зоны по длине плоскости сдвига определяется из выражения

$$q_{ult} = \sigma_{zp}(\varepsilon_{zp}) \cdot d_a, \quad (6)$$

где  $\sigma_{zp}$  – функция объемных напряжений в грунте под армирующими элементами, зависящая от объемных деформаций грунта под армирующими элементами.

Подставляя выражение (6) в выражение (5) можно получить

$$R_{zp} = \sigma_{zp}(\varepsilon_{zp}) \cdot d_a \cdot L_x, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{zp}$  – объемные деформации грунта, соответствующие совместному деформированию грунта и армирующего элемента.

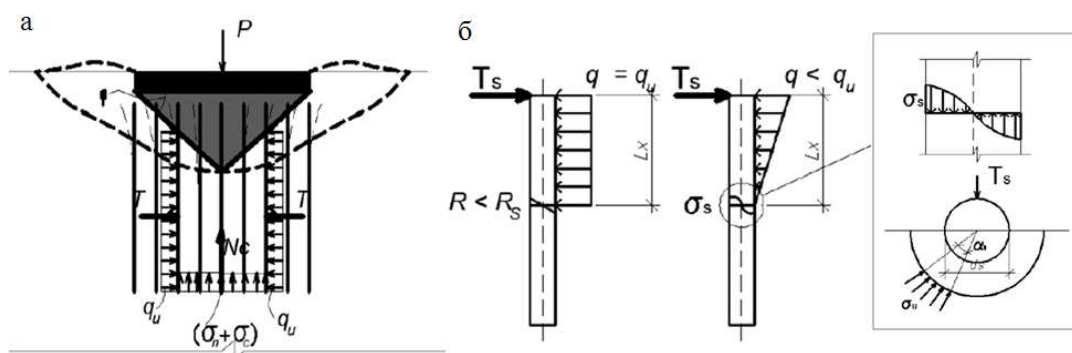


Рис. 3. Расчетные схемы: а – схема для определения несущей способности армированного основания, б – схема для определения несущей способности

*армирующего элемента*

Предельную несущую способность грунта под армирующим элементом можно определить по пределу прочности в условиях объемного напряженного состояния, так как грунт под армирующим элементом работает в стесненных условиях, вследствие чего будет наблюдаться повышение сопротивления грунта сжатию.

Исходя из предложенной авторами модели деформирования грунта при трехосном сжатии [1, 2] и результатов экспериментальных исследований [3, 4] (рис. 1 – 3) условие прочности грунта под армирующими элементами при трехосном сжатии представляется в виде

$$4 \cdot [\sigma_V(t) \cdot A_{sh} \cdot \cos \alpha_1(t) + \tau_V(t) \cdot A_{sh} \cdot \sin \alpha_1(t)] \geq \sigma_1 \cdot A_1. \quad (8)$$

При определении несущей способности армированного грунтового основания также необходимо обратить внимание на форму эпюры напряжений в грунте вдоль армирующего элемента. В реальных случаях данная эпюра отличается от прямоугольной, которая была принята в начале. В зависимости от стадии, в которой деформируется грунт, форма эпюры может быть различной. Это изменение учитывается введением коэффициента полноты эпюры  $\omega$ , которая определяется по формуле

$$\omega = \frac{\int_0^{L_x} \sigma_{zp}(\varepsilon_{zp}) dL}{\sigma_{zp}^{max}(\varepsilon_{zp}^{max}) \cdot L_x}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{zp}^{max}$  – максимальные напряжения, соответствующие предельным деформациям в грунте;  $\varepsilon_{zp}^{max}$  – предельные деформации в грунте.

Величина предельной сдвигающей силы, воспринимаемая армирующими элементами, определяется из уравнения равновесия моментов внешних и внутренних сил нагруженного сечения консольной балки, заземленной по линии сдвига грунта. Эта балка имитирует армирующий элемент в краевой зоне, пересекающий плоскость сдвига. При расчете принимается криволинейная эпюра погонных сжимающих напряжений в грунте под армирующим элементом с максимальным значением  $q \leq q_{ult}$ , исходя из условий совместного деформирования армирующего элемента и грунта,

$$R(a) = 3 \frac{M_u}{L_x} n, \quad (10)$$

где  $M_u = \frac{\sigma_a(\varepsilon_a) \cdot A_a \cdot \omega_a \cdot d_a}{4}$  – предельный изгибающий момент, воспринимаемый армирующим элементом, пересекающим плоскость сдвига армированного массива,

где  $A_a$  – площадь поперечного сечения армирующего элемента;  $n$  – количество армирующих элементов, пересекающих плоскость сдвига;  $\sigma_a(\varepsilon_a)$  – функция напряжений в армирующем элементе, зависящая от

совместных деформаций армирующего элемента  $\varepsilon_a$  и грунта под армирующим элементом ( $\varepsilon_{zp} = \varepsilon_a$ );  $\omega_a$  – коэффициент полноты эпюры напряжений в поперечном сечении армирующего элемента.

Соппротивление армированного грунта сжатию в средней части определяется по формуле

$$N_c = (\sigma_u + \sigma_c) \cdot \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot A_f + \sigma_a \cdot A_{ap} \cdot n_1, \quad (11)$$

где  $\sigma_u$  – предельные напряжения в грунте в условиях пространственного напряженного состояния, они определяются, исходя из уравнения (8);  $\sigma_c = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi$  – давление связности;  $A_f$  – площадь ядра сжатия,  $\text{м}^2$ ;  $\sigma_a$  – напряжение в армирующем элементе;  $A_{ap}$  – площадь поперечного сечения армирующих элементов, расположенных в ядре сжатия,  $\text{м}^2$ ;  $n_1$  – количество армирующих элементов в ядре сжатия.

*Осадка армированного грунтового основания.* Инженерные методы расчета должны включать элементы учета траектории нагружения основания, при этом рассматривая не только особенности деформирования грунта, которые можно определить по компрессионным зависимостям, но и те, которые обусловлены пространственным состоянием грунта.

Предлагается инженерный метод расчета осадок армированных оснований, в основу которого положен метод послойного суммирования с учетом пространственного напряженно-деформируемого состояния армированного грунтового массива [1].

Общая осадка армированного основания записывается (рис. 4)

$$S = S_n + S_{az} + S_y, \quad (12)$$

где  $S_n$  – осадка грунтовой подушки;  $S_{az}$  – осадка в пределах армированной зоны;  $S_y$  – осадка ниже зоны армирования.

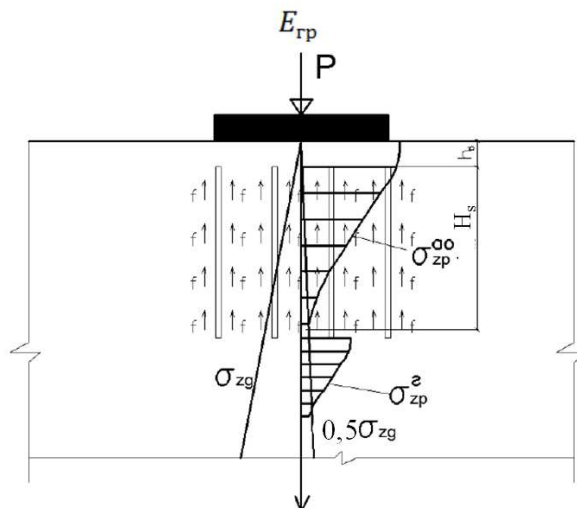


Рис. 4. Схема для расчета осадки армированного вертикальными элементами грунтового основания

Осадка грунтовой подушки определяется методом послойного суммирования с учетом ограничения сжимаемой толщи мощностью грунтовой подушки

$$S_n = \frac{0,8 \sum_{i=1}^m \sigma_{zp,i}^{cp} \Delta_{n,i}}{E_n}, \quad (13)$$

где  $\Delta_{n,i}$  – толщина элементарного слоя в пределах грунтовой подушки;  $m$  – число элементарных слоев в пределах грунтовой подушки.

Осадка в пределах армированной зоны и ниже зоны армирования устанавливается по следующей методике.

Объемный модуль армированного грунтового массива определяется по формуле

$$K_{v_{zp}}^{экс} = \left[ \frac{K_{v_{zp}} (V_{zp} - V_a) (\gamma_{ei} + \gamma_{\mu i})}{V_{zp}} + \frac{(\gamma_{ei} + \gamma_{\mu i}) \sum f_i \cdot u_i \cdot l_i^{a_0}}{\varepsilon_{v_{zp}}^{экс}} \cdot \frac{\alpha_k}{V_{zp}} \right] \cdot \gamma_n, \quad (14)$$

где  $K_{v_{zp}}$  – объемный модуль деформации грунта в армированной зоне;  $V_{zp}$  – объем грунта в армированной зоне;  $V_a$  – объем армирующих элементов в армированной зоне;  $f_i$  – сопротивление трению между грунтом и армирующим элементом;  $u_i$  – периметр армирующего элемента;  $\alpha_k$  – коэффициент, показывающий соотношение модулей деформации армирующего элемента и грунта;  $\gamma_n$  – коэффициент, учитывающий неупругие свойства армирующих материалов и грунтов;  $\gamma_{ei}$ ,  $\gamma_{\mu i}$  – коэффициенты, учитывающие длину армирующих элементов и процент армирования в объеме грунта соответственно

$$\gamma_{ei} = 1,6 + 0,3 \frac{l_{a_0}}{H_s}, \quad \gamma_{\mu i} = 1,07 \frac{\mu_1 - \mu_i}{\mu_1}, \quad (15)$$

где  $l_{a_0}$  – длина армирующих элементов, м;  $H_s$  – высота сжимаемой толщи, м;  $\mu_i$  – процент армирования грунтового основания;  $\mu_1$  – процент армирования при длине армирующих элементов, равной ширине подошвы штампа.

При расчете осадки армированного массива в пределах армированной зоны высота сжимаемой толщи принимается равной длине армирующих элементов. Высота сжимаемой толщи ниже зоны армирования определяется нормативной методикой

$$H_s = Z; \quad \sigma_z = 0,5 \sigma_{zg}, \quad (16)$$

где  $H_s$  – мощность сжимаемой толщи, принимаемой на глубине  $Z$ ;  $\sigma_z$  – вертикальное нормальное напряжение на глубине  $Z$  от дополнительной нагрузки на основание по оси сооружения;

$\sigma_{zg}$  – вертикальное нормальное напряжение от собственного веса грунта основания на глубине  $Z$ .

Значения для эпюр дополнительных вертикальных напряжений по оси фундамента (квадратного штампа) на глубине  $Z$  можно определить по



общепринятой нормативной методике. Значения горизонтальных составляющих напряжений по центральной оси могут быть определены из решений теории упругости. Следует отметить, что для центральной оси вертикальные и горизонтальные напряжения являются главными.

Зная компоненты вертикальных напряжений в различных точках основания, можно определить среднее напряжение и интенсивность напряжений

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}; \quad (17)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (18)$$

По значениям среднего напряжения и интенсивности напряжений определяем приращения инвариантов тензора деформаций: приращение объемной деформации и интенсивности деформаций.

Переход от инвариантов тензора деформаций к осевой деформации  $\varepsilon_z$  в случае расчета деформаций по центральной оси фундамента, учитывая совпадение осей главных напряжений и главных деформаций с центральной осью фундамента, можно осуществить:

– при совпадении осей главных напряжений и деформаций с центральной осью штампа

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3; \quad \varepsilon_i = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3); \quad (19)$$

– в иных случаях используем условие соосности тензоров приращений напряжений и деформаций

$$\frac{\Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)}{\Delta(\sigma_x - \sigma_y)} = \frac{\Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)}{\Delta(\sigma_y - \sigma_z)} = \frac{\Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)}{\Delta(\sigma_z - \sigma_x)} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma_i} = \chi. \quad (20)$$

Определяем условные модули, характеризующие переход из природного состояния основания в состояние после приложения местной нагрузки

$$K_V = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_V}; \quad G_V = \frac{\Delta\sigma_i}{3\Delta\varepsilon_i}. \quad (21)$$

Модули (21) могут быть представлены параметрами закона Гука в приращениях напряжений и деформаций для шага нагружения.

Тогда приращение осевой деформации, полученное из закона Гука, в приращениях

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \Delta\sigma}{G_V} \cdot \frac{3K_V - G_V}{3K_V \cdot G_V}. \quad (22)$$

Затем учитывается влияние неупругих деформаций. Для этого модули  $K_V(t)$  и  $G_V(t)$  представляются в виде

$$K_V(t) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_V + \Delta\varepsilon_V(t)}; \quad G_V(t) = \frac{\Delta\sigma_i}{3(\Delta\varepsilon_i + \Delta\varepsilon_i(t))}; \quad (23)$$

где  $\Delta\varepsilon_i(t) = \sigma_i \cdot K_\gamma(t, \tau)$ ;  $\Delta\varepsilon_v(t) = \sigma \cdot K_v(t, \tau)$ .

Полученные значения приращений деформаций для центральной оси и под угловой точкой являются следствием действия местной нагрузки как догружения основания, находящегося под действием начального напряженного состояния, обусловленного собственным весом грунта.

Осадка основания, разделенного на равные слои до условной глубины сжимаемой толщи,

$$S_{aэ} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{zi} \cdot h_i. \quad (24)$$

**Выводы.** Вертикальное армирование меняет условия деформирования грунтового массива, что приводит к увеличению несущей способности и снижению деформируемости оснований.

#### *Литература*

1. Мирсаяпов, И.Т. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов / И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2011. – № 4. – С.16 – 23.
2. Мирсаяпов, И.Т. Расчетная модель длительного нелинейного деформирования глинистых грунтов при сложном напряженном состоянии / И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева // *Известия КГАСУ*. – 2011. – № 2(16). – С.121 – 128.
3. Мирсаяпов, И.Т. Оценка прочности и деформативности армированных грунтовых оснований / И.Т. Мирсаяпов, А.О. Попов // *Геотехника*. – 2010. – № 4. – С.58 – 67.
4. Мирсаяпов, И.Т. Экспериментально-теоретические исследования работы армированных грунтовых массивов / И.Т. Мирсаяпов, А.О. Попов // *Известия КГАСУ*. – 2008. – № 2(10). – С.75 – 80.

*Надійшла до редакції 08.10.2013  
© І.Т. Мірсаяпов, І.В. Корольова*