

И.Т. МИРСАЯПОВ, д.т.н., профессор  
И.В. КОРОЛЕВА, к.т.н., ст. преподаватель  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Россия)

УДК 624.154.1

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ОСАДКА АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ

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

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 грунтов на 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, заземленных 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.

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, заземлених 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 навоколишнього ґрунтового масиву і спільної деформації ґрунту та армуючих елементів.

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.

### 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).

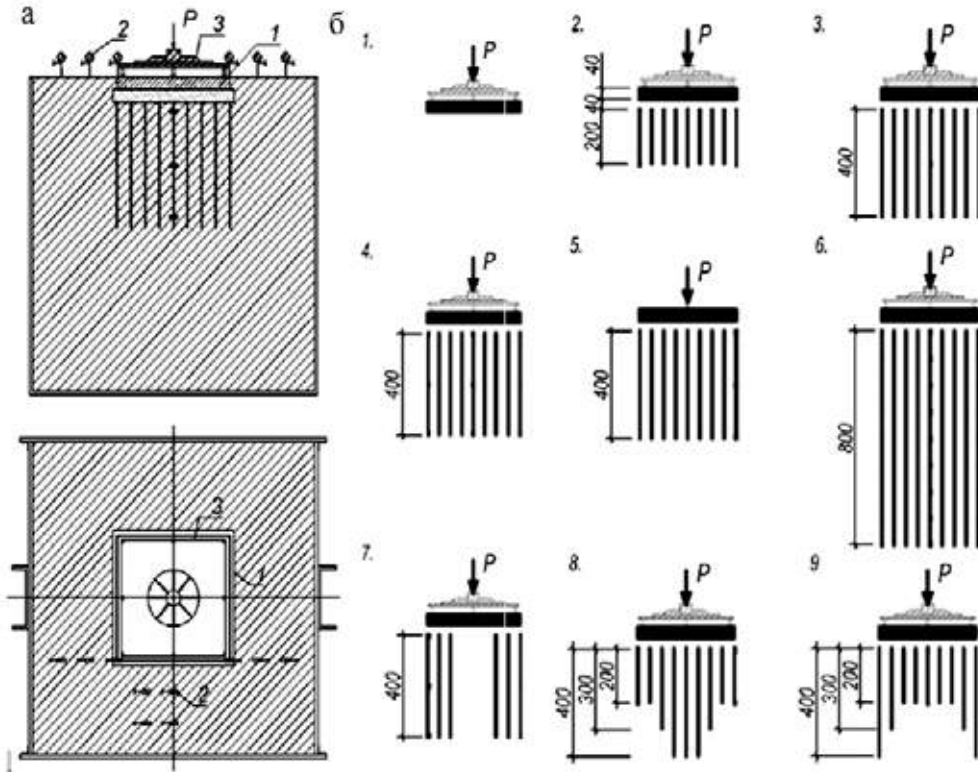


Рис. 1 Лабораторні випробування: а – схема лабораторної установки; б – програма експериментальних досліджень

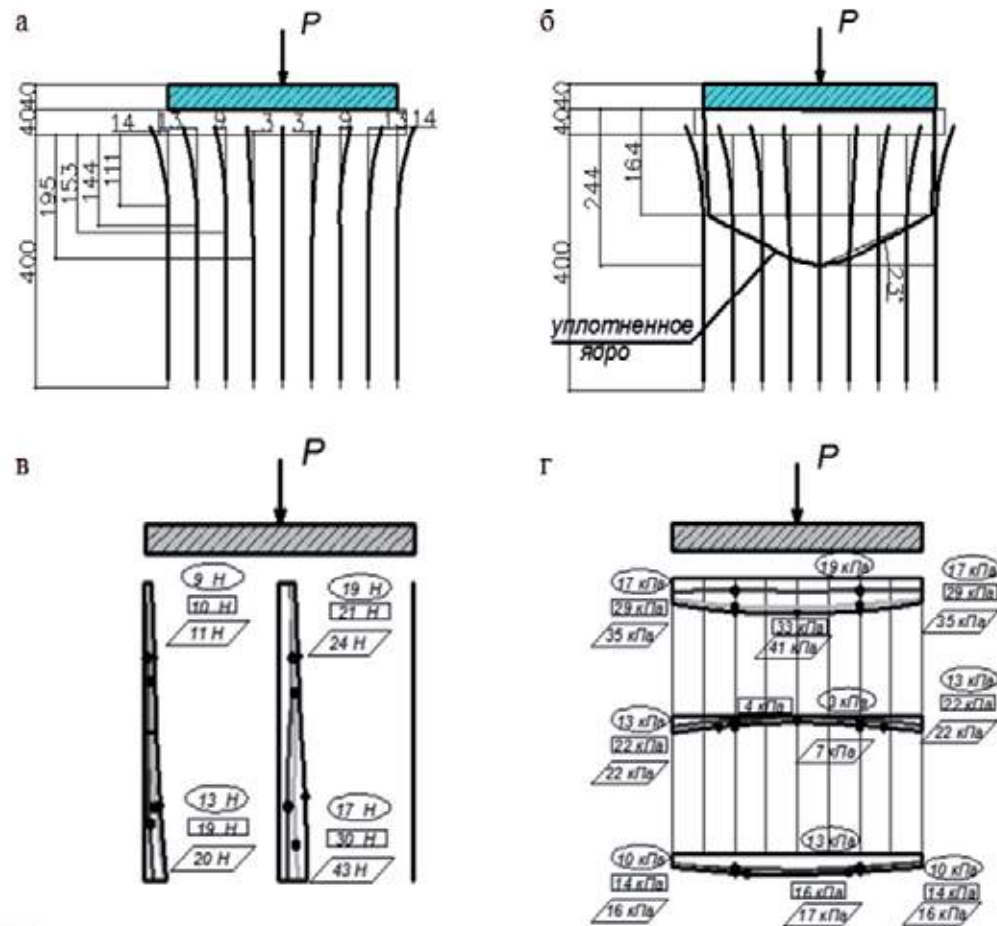


Рис. 2 Результати лабораторних експериментів: а – схема деформування армуючих елементів; б – схема утворення ущільненого ядра; в – сили в армуючих елементах; г – епюра напружень в ґрунті основи

**Постановка задачі.** В процесі експериментальних досліджень вивчені змінення напружено-деформованого стану в різних зонах армованого ґрунтового основи [3]:

- напруження в ґрунті і сили в армуючих елементах з різною інтенсивністю розвиваються на всьому протяженні випробувань, при цьому найбільш помітні змінення відбуваються на стадії неупругого деформування ґрунту;
- армуючі елементи крім осевого стиснення випробували вигин і отримували відхилення від вертикалі, в цьому випадку найбільші горизонтальні переміщення, пов'язані з вигином, спостерігалися в армуючих елементах, розташованих в крайніх зонах, а мінімальні горизонтальні переміщення були зафіксовані в центральній зоні;
- відхилення армуючих елементів від вертикалі пов'язані з формуванням і розвитком областей сдвигу при навантаженні основи і тиском пластично деформованих зон ґрунту.

Виходячи з аналізу результатів експериментальних досліджень, прийнята робоча гіпотеза, згідно з якою опір армованого масиву стисненню складається з опору ґрунту стисненню під армуючими елементами, опору армуючих елементів вигину в крайніх зонах і опору армованого масиву трохосному стисненню в центральній зоні.

**Основний матеріал і результати.** Оцінка несучої здатності армованого ґрунтового основи. Виходячи з аналізу

результатов експериментальних досліджень, прийнята робоча гіпотеза, в відповідності з якою опір армованого масива в сжимаючому силовому потоці складається з опору трьохосному стисненню в середній зоні та опору сдвигу в крайових зонах (рис. 2).

Основою на видвинутій гіпотезі про механізм опору, умовою несущої здатності армованого ґрунтового основи записують в вигляді

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

де  $T$  – опір армованого ґрунтового масива сдвигу;  $N_c$  – опір армованого ґрунтового масива стисненню в центральній частині;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя армованого ґрунту.

Прочність армованого ґрунтового масива сдвигу в крайових зонах складається з опору вигибу армуючих елементів, перетинаючих площину ковзання ґрунту, та опору стисненню ґрунту під армуючими елементами. В цьому випадку опір крайових зон на сдвиг описується рівнянням

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

де  $R_a$  – опір армуючого елемента вигибу;  $R_{\varphi}$  – опір ґрунту стисненню під армуючими елементами.

Сила, що сприймається за рахунок нагельної роботи армуючого елемента, напряму залежить від умов спільного деформування цього елемента з оточуючим ґрунтом і їх механічних та деформаційних характеристик. При цьому армуючий елемент розглядається як консольна балка, закріплена на рівні лінії сдвигу ґрунту основи. Деформування армуючого елемента нижче лінії сдвигу визначається як для балки на пружному основанні, для якої дуже важливими є деформаційні властивості основи. Одним з показників цих властивостей є коефіцієнт постели основи. Коефіцієнт постели ґрунтового основи під армуючим елементом залежить від діаметра армуючого елемента, модуля деформації ґрунту та рівня напружень. Крім того, названий коефіцієнт змінюється по довжині армуючого елемента.

При визначенні коефіцієнта постели ґрунтового основи під армуючим елементом використовується вираження

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

де  $q = Q_{co}/d_a$ ;  $d_a$  – діаметр армуючого елемента;  $Q_{co}$  – сдвигаюча сила по площині ковзання;  $E_0$  – модуль об'ємних деформацій ґрунту.

Зона виникнення максимальних нормальних напружень в армуючому елементі від вигибу знаходиться на відстані  $L_z$  від площини ковзання (рис. 3). Це відстань також є зоною передачі сил від армуючих елементів на ґрунт. Згідно з рішенням задачі про напівбесконечно довгий стержень в пружному напівпространстві при прийнятті сили, що діє на стержень, активна частина основи має довжину  $L_z$ .

Довжина зони активного деформування ґрунту має суттєве значення при оцінці несущої здатності армуючого елемента і залежить від його геометричних та деформаційних характеристик, коефіцієнта постели ґрунтового основи і визначається за формулою

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

де  $E_a$  – модуль пружності матеріалу армуючого елемента;  $I_a$  – момент інерції поперечного перерізу армуючого елемента.

Якщо припустити, що напруження в ґрунті під армуючим елементом розподіляються по зоні  $L_z$  рівномірно, то рівнодійствующою епюри напружень, т.е. сила, що сприймається ґрунтовым основи під армуючим елементом, можна визначити за вираженням

$$R_{\varphi} = q_{ult} \cdot L_z. \quad (5)$$

Величина  $q_{ult}$  для кожної зони по довжині площини ковзання визначається за вираженням

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

де  $\sigma_{\varphi}$  – функція об'ємних напружень в ґрунті під армуючими елементами, що залежить від об'ємних деформацій ґрунту під армуючими елементами.

Підставляючи вираження (6) в вираження (5) можна отримати

$$R_{\varphi} = \sigma_{\varphi}(\varepsilon_{\varphi}) \cdot d_a \cdot L_z, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_{\varphi}$  – об'ємні деформації ґрунту, що відповідають спільному деформуванню ґрунту та армуючого елемента.

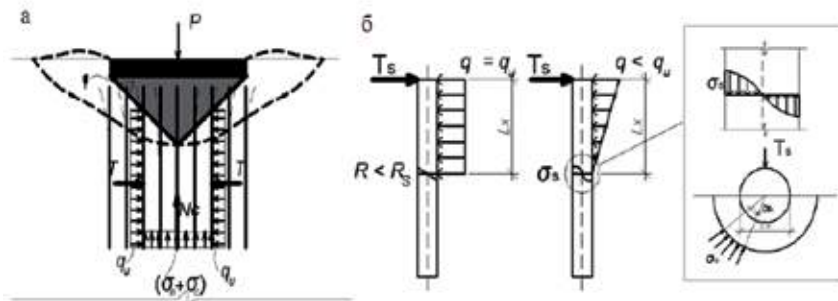


Рис. 3. Расчетные схемы: а – схема для определения несущей способности армованного основания, б – схема для определения несущей способности армующего элемента

Предельную несущую способность ґрунту під армуючим елементом можна визначити за межею міцності в умовах об'ємного напруженого стану, так як ґрунт під армуючим елементом працює в стисненому стані, внаслідок чого буде спостерігатися підвищення опору стисненню ґрунту.

Виходячи з запропонованої авторами моделі деформування ґрунту при трьохосному стисненні [1, 2] та результатів експериментальних досліджень [3, 4] (рис. 1 – 3) умова міцності ґрунту під армуючими елементами при трьохосному стисненні представляється в вигляді

$$4 \cdot [\sigma_v(t) \cdot A_m \cdot \cos \alpha_1(t) + \tau_v(t) \cdot A_m \cdot \sin \alpha_1(t)] \geq \sigma_1 \cdot A_1 \quad (8)$$

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

$$\omega = \frac{\int_0^{L_z} \sigma_{\varphi}(\varepsilon_{\varphi}) dL}{\sigma_{\varphi}^{max}(\varepsilon_{\varphi}^{max}) \cdot L_z} \quad (9)$$

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

Величина предельной сдвигающей силы, воспринимаемая армирующими элементами, определяется из уравнения равновесия моментов внешних и внутренних сил нагруженного сечения консольной балки, защемленной по линии сдвига грунта. Эта балка имитирует армирующий элемент в краевой зоне, пересекающей 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

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

где  $M_u = \frac{\sigma_u(\varepsilon_u) \cdot A_u \cdot \omega_u \cdot d_u}{4}$  – предельный изгибающий момент, воспринимаемый армирующим элементом, пересекающим плоскость сдвига армированного массива, где  $A_u$  – площадь поперечного сечения армирующего элемента;  $n$  – количество армирующих элементов, пересекающих плоскость сдвига;  $\sigma_u(\varepsilon_u)$  – функция напряжений в армирующем элементе, зависящая от совместных деформаций армирующего элемента  $\varepsilon_u$  и грунта под армирующим элементом ( $\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_u$ );  $\omega_u$  – коэффициент полноты эпюры напряжений в поперечном сечении армирующего элемента.

Соппротивление армированного грунта сжатию в средней части определяется по формуле

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

где  $\sigma_u$  – предельные напряжения в грунте в условиях пространственного напряженного состояния, они определяются, исходя из уравнения (8);  $\sigma_c = c \operatorname{ctg} \varphi$  – давление связности;  $A_j$  – площадь ядра сжатия, м<sup>2</sup>;  $\sigma_u$  – напряжение в армирующем элементе;  $A_{\varphi}$  – площадь поперечного сечения армирующих элементов, расположенных в ядре сжатия, м<sup>2</sup>;  $n_1$  – 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 арми-

рованных 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)

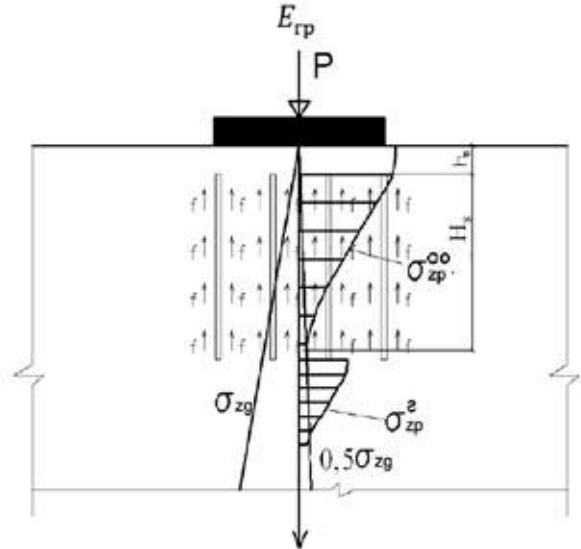


Рис. 4 Схема для расчета осадки армированного вертикальными элементами грунтового основания

$$S = S_n + S_{os} + S_j \quad (12)$$

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

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

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

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

$$K_{\varphi}^{os} = \left[ \frac{K_{\varphi} (V_{\varphi} - V_a) (\gamma_w + \gamma_w)}{V_{\varphi}} + \frac{(\gamma_w + \gamma_w) \sum f_i \cdot u_i \cdot l_i^{os}}{\varepsilon_{\varphi}^{os}} \cdot \frac{\alpha_k}{V_{\varphi}} \right] \cdot \gamma_n \quad (14)$$

где  $K_{\varphi}$  – объемный модуль деформации грунта в армированной зоне;  $V_{\varphi}$  – 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;  $\gamma_{os}$ ;  $\gamma_{os}$  – коэффициенты, учитывающие длину армирующих элементов и процент армирования в объеме грунта соответственно

$$\gamma_{\omega} = 1,6 + 0,3 \frac{l_{\omega}}{H_s}, \quad \gamma_{\omega} = 1,07 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1}, \quad (15)$$

где  $l_{\omega}$  – длина армирующих элементов, м;  $H_s$  – высота сжимаемой толщи, м;  $\mu_1$  – процент армирования грунтового основания;  $\mu_2$  – 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 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

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

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

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

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

$$K_{\nu} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\nu}}; \quad G_{\nu} = \frac{\Delta\sigma_1}{3\Delta\varepsilon_1}. \quad (21)$$

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

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z}{G_{\nu}} - \Delta\sigma \cdot \frac{3K_{\nu} - G_{\nu}}{3K_{\nu} \cdot G_{\nu}}. \quad (22)$$

Затем учитывается влияние неупругих деформаций. Для этого модули  $K_{\nu}(t)$  и  $G_{\nu}(t)$  представляются в виде

$$K_{\nu}(t) = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\nu} + \Delta\varepsilon_{\nu}(t)}; \quad G_{\nu}(t) = \frac{\Delta\sigma_1}{3(\Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_1(t))}; \quad (23)$$

где  $\Delta\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i \cdot K_{\nu}(t, \tau)$ ;  $\Delta\varepsilon_{\nu}(t) = \sigma \cdot K_{\nu}(t, \tau)$

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.

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

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

#### ВЫВОДЫ:

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

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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.