



# ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ОТ СТЕПЕНИ ИХ НЕОДНОРОДНОСТИ

## DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS ON THE DEGREE OF THEIR HETEROGENEITY

**ТЕР-МАРТИРОСЯН З.Г.**

*Заведующий кафедрой механики грунтов и геотехники (МГГ) Московского государственного строительного университета (МГСУ), д.т.н., профессор, г. Москва, mgroif@mail.ru*

**МИРНЫЙ А.Ю.**

*Старший преподаватель кафедры механики грунтов и геотехники (МГГ), научный сотрудник НОЦ «Геотехника» МГСУ, г. Москва, reg@oconnor.ru*

**TER-MARTIROSIAN Z.G.**

*The head of the department of soil mechanics and geotechnics of the Moscow State University of Civil Engineering, PhD (doctor of science in Technics), professor, Moscow, mgroif@mail.ru*

**MIRNIY A.YU.**

*Senior lecturer of the department of soil mechanics and geotechnics of the Moscow State University of Civil Engineering, scientific associate of the «Geotechnics» Research and Educational Center, Moscow, reg@oconnor.ru*

### **Ключевые слова:**

*гранулометрический состав; классификация грунтов; механические свойства оснований.*

### **Key words:**

*granulometric composition; soil classification; mechanical properties of ground bases.*

### **Аннотация**

**В статье приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований механических свойств неоднородных грунтов. Описываются механизмы формирования напряженно-деформированного состояния при различных комбинациях компонентов грунта. Предлагается методика прогнозирования механических свойств естественных и искусственных оснований исходя из данных об их гранулометрическом составе. Приводится классификация грунтов по степени их неоднородности. Рассматривается зависимость модуля деформации от гранулометрического состава и плотности.**

### **Введение**

Неоднородные по гранулометрическому составу и строению грунты естественного и искусственного происхождения часто используются в качестве оснований и материалов для создания сооружений (подушек, насыпей, дамб, плотин и пр.), однако в настоящее время не существует методов определения их механических свойств.

Известно, что механические свойства грунтовой среды существенно зависят от ее гранулометрического и минералогического состава. В неоднородных грунтах влияние гранулометрического состава существеннее, и его необходимо учитывать при определении их механических свойств. Очевидно, что в зависимости от степени неоднородности и процентного содержания фракций крупнее 2 мм могут формироваться разные структуры, которые определяют механические свойства неоднородного грунта. Взаимодействие между крупными и мелкими фракциями в таком грунте существенно зависит от его структуры.

Очевидно, что при воздействии внешней нагрузки взаимодействия между крупными и мелкими фракциями в представленных на рис. 1, а и 1, б структурах существенно различаются и, следовательно, они по-разному сопротивляются объемным изменениям и формоизменениям.

Количественная оценка свойств эквивалентной гомогенной среды является одной из важных задач теоретической и прикладной механики неоднородных грунтов. Она может быть осуществлена на основе экспериментальных и теоретических исследований, а также виртуальных экспериментов путем численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) неоднородного грунта в условиях компрессии, трехосного сжатия и др. Неоднородность грунтов вызывает неоднородность НДС в любом плоском сечении грунта, обусловленную концентрацией и декон-

### **Abstract**

**The article presents results of experimental and theoretical investigations of mechanical properties of heterogeneous soils. The mechanisms of stress-strain state formation at various combinations of soil components are described. A technique of prediction of mechanical properties of natural and artificial ground bases on the basis of their granulometric composition data is suggested. A classification of soils according to their heterogeneity degree is presented. Dependence of the deformation modulus on the granulometric composition and density is considered.**

центрацией напряжений вокруг твердых включений, пустот или дефектов структуры.

Первая попытка количественной оценки НДС двухкомпонентного грунта была сделана К. Терцаги в 1923 г. Она позволила ему разделить общее напряжение между скелетом и поровой водой без учета сжимаемости последней. Учет сжимаемости поровой воды и ползучести скелета при их взаимодействии для описания грунта привел к качественно новым результатам [8]. В работах С.С. Вялова и его сотрудников [1] было показано, что деформации глинистого грунта могут привести к неоднородному НДС и его развитию в пространстве и времени вплоть до разрушения. Учету неоднородности гранулометрического состава и строения дисперсного и скального грунта посвящены работы З.Г. Тер-Мартirosяна, С.Б. Ухова и др. [8, 9]. В работе Кристенсена Р. [10] приводится математическое описание НДС композитов, которое позволяет определить их эквивалентные характеристики.

Настоящая работа посвящена экспериментально-теоретическим исследованиям механических свойств неоднородных грунтов, на основе которых рекомендованы методы количественной оценки их эквивалентных характеристик с учетом известных характеристик их составных частей в целом. Кроме того, анализ выполненных исследований позволил авторам составить классификацию неоднородных грунтов, используя треугольник Ферре, и на этой основе составить номограмму для определения их модулей деформации в зависимости от гранулометрического состава и плотности.

### Экспериментальные исследования

На рисунке 2 приводятся результаты испытаний неоднородных грунтов в условиях компрессионного и трехосного сжатия при различной степени их неоднородности в виде зависимостей « $\sigma$  —  $\epsilon$ », где  $\sigma$  — уплотняющая нагрузка, кПа;  $\epsilon$  — относительная деформация, д.ед.

Анализ смеси песчаных грунтов показал, что неоднородность их гранулометрического состава оказывает существенное влияние на деформационные и прочностные свойства. Обработка результатов более чем 90 испытаний образцов песчаного грунта в условиях компрессионного и трехосного сжатия методами математической статистики показала, что коэффициент неоднородности влияет на модуль деформации и угол внутреннего трения.

Модуль деформации увеличивается пропорционально процентному содержанию включений, что объясняется большей жесткостью включений и их армирующим действием. При этом наибольшая его величина наблюдается при 30% включений от общего объема, что объясняется более устойчивой структурой грунта, в которой мелкие частицы препятствуют перекомпоновке крупных включений.

Угол внутреннего трения снижается с ростом содержания включений, что объясняется концентрацией напряжений на контактах между включениями и более ранним переходом вмещающего грунта в предельное состояние. Однако из анализа экспериментальных данных видно, что при введении включений ярко проявляется пиковая и остаточная прочность. Это может быть связано с тем, что жесткие включения большого размера пре-

пятствуют образованию поверхностей скольжения и увеличивают пиковую прочность, однако после образования таких поверхностей скольжение идет уже по вмещающему грунту и остаточная прочность не меняется.

### Математическое моделирование НДС неоднородного грунта с помощью виртуального эксперимента

Виртуальные эксперименты позволяют существенно упростить исследования механических свойств неоднородных грунтов с любыми коэффициентами неоднородности и соотношениями механических свойств составных частей вмещающего грунта и заполнителя (рис. 3).

Как и следовало ожидать, образцы (модели) с включениями (кривые 2, 3 на рис. 4) показали меньшую деформацию, чем образец сплошного вмещающего грунта (кривая 1 на рис. 4). Это обусловлено армирующим эффектом крупных фракций и их высокой жесткостью по отношению к сравнительно слабому вмещающему грунту. Кривые 4 и 5 на рисунке 4 соответствуют случаю, когда в однородном грунте имеются пустоты крупного размера, которые при определенной нагрузке «схлопываются», при этом деформации интенсивно возрастают при неизменной нагрузке. Отме-

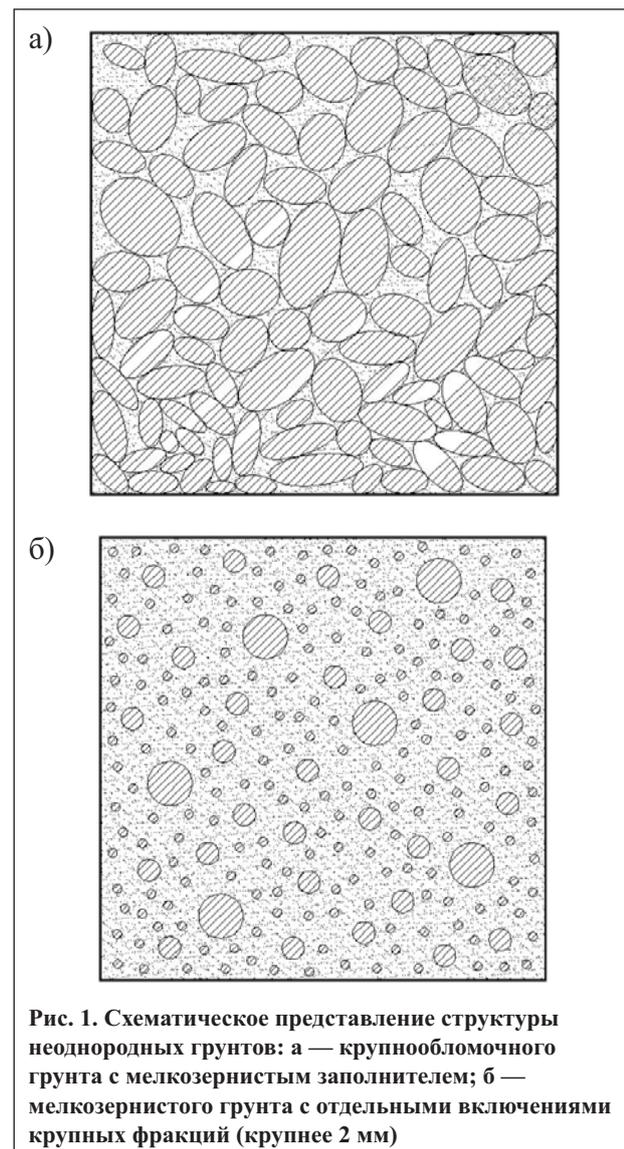
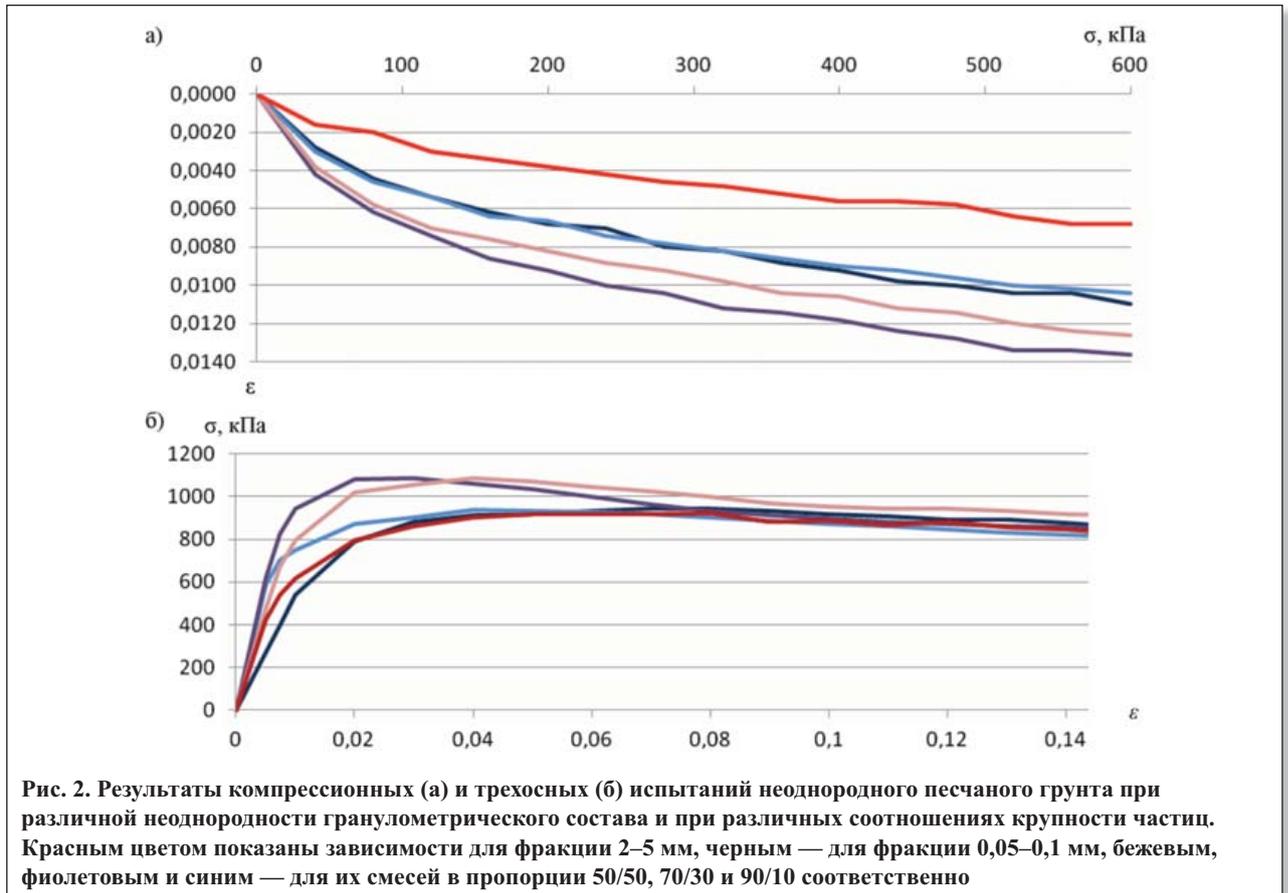


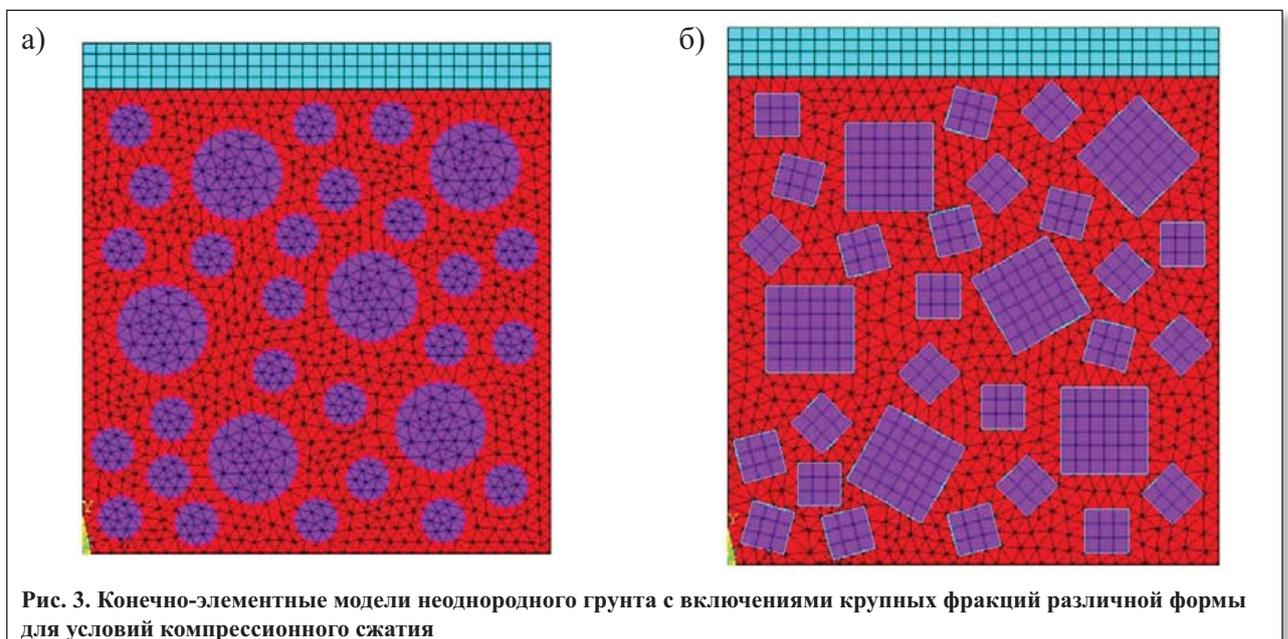
Рис. 1. Схематическое представление структуры неоднородных грунтов: а — крупнообломочного грунта с мелкозернистым заполнителем; б — мелкозернистого грунта с отдельными включениями крупных фракций (крупнее 2 мм)



тим, что в случае пор квадратной формы арочный эффект на начальном этапе нагружения проявляется слабее и интенсивность деформаций в предельном состоянии выше, чем в случае пор круглой формы.

Виртуальные испытания образцов неоднородного грунта (см. рис. 3) проводились в условиях простого сдвига (перекашивания до достижения угловой деформации  $\gamma = 0,12 \div 0,15$ ). Из результатов испытаний, представленных на рис. 5, следует, что сопротивление образца с круглыми включениями (кривая 2) больше, чем у однородного (кривая 1), но меньше, чем у образца с включениями квадратной формы (кривая 3).

Анализ виртуальных экспериментов в условиях компрессионного сжатия и простого сдвига показал, что напряженно-деформированное состояние неоднородного образца также является неоднородным, имеющим экстремальные значения напряжений вокруг крупных включений конечной жесткости и пустот различной формы. Кроме того, крупные включения угловатой формы влияют на деформируемость и сопротивление сдвигу больше, чем включения круглой формы. Жесткость крупных фракций также оказывает существенное влияние, которое зависит от соотношения жесткости крупных включений и вмещающего сравнительно однород-





ного грунта и может привести к армированию вмещающего грунта при  $E_1 < E_2$  и к расслаблению при  $E_1 > E_2$ , особенно при  $E_2 \rightarrow 0$  (где  $E_1, E_2$  — модули деформации вмещающего грунта и включений соответственно).

Численный метод анализа виртуальных экспериментов неоднородного образца грунта можно распространить также на случай штамповых испытаний. Выполненный виртуальный эксперимент со штампом в условиях плоской задачи показал, что контактные напряжения неоднородны и имеют многочисленные пики на контактах с крупными включениями, причем огибающая контактных напряжений по средним значениям имеет седлообразную форму, что соответствует решению для однородного грунта. Кроме того, изополя компонентов напряжений и деформаций в основании штампа для неоднородных грунтов качественно соответствуют изополям для однородных грунтов. Однако осадки штампов различаются пропорционально разнице модулей деформации однородного (вмещающего) и неоднородного грунта. Следовательно, для проектирования оснований и грунтовых сооружений из неоднородных грунтов можно использовать теорию линейно деформируемой среды. Поэтому определение эквивалентного модуля деформации и прочностных характеристик имеет важное практическое значение.

### Определение эквивалентных характеристик неоднородных грунтов аналитическим методом

Количественная оценка эквивалентных характеристик неоднородных грунтов на основе теории линейно деформируемых сред возможна при определенных допущениях и предположениях и при определенных структурах.

Рассмотрим структуру неоднородного грунта типа представленной на рис. 1, а. Обозначим модули объемной и сдвиговой деформаций скелета из крупнообломочного грунта соответственно  $K_1$  и  $G_2$ , заполнителя —  $K_2$  и  $G_2$ , эквивалентного гомогенного грунта (в целом) —  $K$  и  $G$ . Среднее действующее на эквивалентный гомогенный грунт напряжение  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  (где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения) представим как сумму средних значений, действующих на скелет ( $\bar{\sigma}_1$ ) и на заполнитель ( $\bar{\sigma}_2$ ), т.е.  $\sigma = \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2$ . Относительные объемные деформации грунта в целом ( $\varepsilon$ ), скелета грунта ( $\varepsilon_1$ ) и заполнителя ( $\varepsilon_2$ ) связаны между собой известной зависимостью вида  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot n_1$ , где  $n_1$  — пористость скелета грунта. Учитывая, что объемные деформации каждого из составляющих элементов определяются зависимостью вида  $\varepsilon = \sigma/K$ , а также принимая во внимание исходные уравнения, получаем:

$$K = K_1 + K_2/n_1 \tag{1}$$

причем  $\bar{\sigma}_1 = \sigma K_1/K$ ;  $\bar{\sigma}_2 = \sigma K_2/Kn_1$

Очевидно, что при  $K_2 \rightarrow 0$  будет выполняться равенство  $K = K_1$ , что соответствует случаю модуля деформации крупнообломочного грунта без заполнителя. Для оценки влияния заполнителя пор можно принять, например,  $K_1 = K_2, n_1 = 0,5$ . Тогда  $K = 3K_1$ , что существенно.

Для определения эквивалентного модуля сдвига воспользуемся условием равенства угловых деформаций  $\gamma = \gamma_1 \pm \gamma_2$ , а также условием  $\tau = \tau_1 \pm \tau_2$  (где  $\tau$  — эквивалентное касательное напряжение;  $\bar{\tau}_1$  — среднее касательное напря-

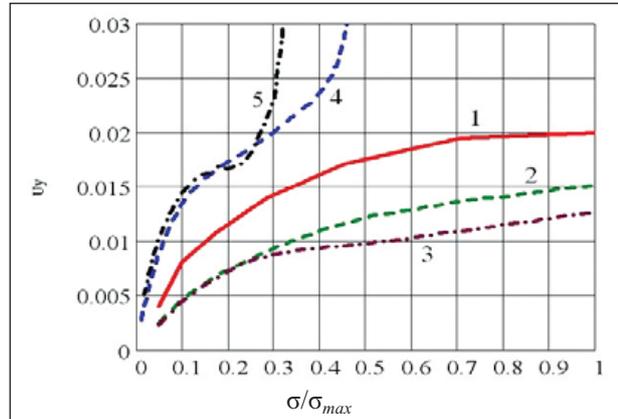


Рис. 4. Зависимости осадки  $U_y$  от относительной нагрузки  $\sigma/\sigma_{max}$  по результатам виртуальных компрессионных испытаний неоднородного грунта: 1 — без включений; 2, 3 — с включениями различной формы; 4, 5 — с порами различной формы

жение во вмещающем грунте;  $\bar{\tau}_2$  — среднее касательное напряжение во включениях). На основании этих равенств и известной зависимости  $\gamma = \tau/G$  можно показать, что:

$$G = G_1 + G_2 \tag{2}$$

причем  $\bar{\tau}_1 = \tau \frac{G_1}{G}$ ;  $\bar{\tau}_2 = \tau \frac{G_2}{G}$ .

Очевидно, что при  $G_2 \rightarrow 0$  будут выполняться условия:  $G = G_1, \tau \rightarrow 0$ , что соответствует случаю заполнения пор водой.

Воспользовавшись известными выражениями вида  $E = G/2(1 + \nu)$  и  $E = K/(1 - 2\nu)$  (где  $\nu$  — коэффициент Пуассона), можно через  $K$  и  $G$  определить эквивалентные модули деформации неоднородного грунта.

Рассмотрим структуру неоднородного грунта типа представленной на рисунке 1, б. В этом случае вмещающим является мелкозернистый песок или глинистый грунт с характерными значениями  $K_1$  и  $G_1$ , занимающий объем  $(1 - m_2)$  (где  $m_2$  — относительный объем отдельных крупных включений в единице объема грунта). Объемная деформация грунта в целом будет равна сумме объемных деформаций его составных частей:  $\varepsilon = \varepsilon_1(1 - m_2) + \varepsilon_2 \cdot m_2$ . Полагая, что  $\sigma = \bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2 = \alpha \sigma$  (где  $\alpha$  — коэффициент концентрации/деконцентрации среднего напряжения вокруг включений) и что, как и прежде,  $\varepsilon = \sigma/K$ , получаем:

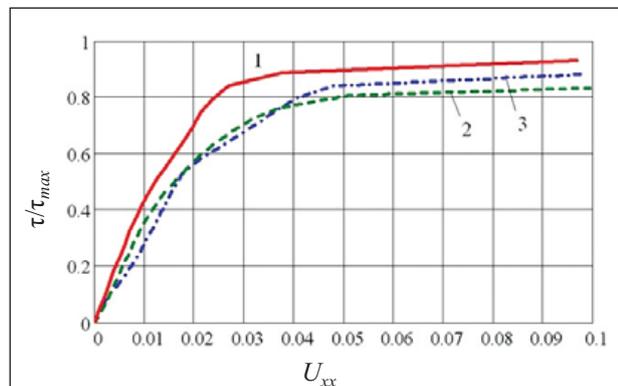


Рис. 5. Зависимости горизонтальных перемещений  $U_{xx}$  от относительной касательной нагрузки  $\tau/\tau_{max}$  при перекашивании в неоднородном грунте: 1 — без включений; 2, 3 — с включениями различной формы

$$K = \frac{K_1 \cdot K_2}{\alpha K_1 \cdot m_2 + K_1 \cdot m_2} \quad (3)$$

причем при  $K_2 \rightarrow \infty K \rightarrow K_1 / (1 - m_2)$ .

причем при  $K_2 \rightarrow \infty$  будет выполняться условие  $K \rightarrow K_1 / (1 - m_2)$ . В случае  $m_2 = 0$  будет выполняться равенство  $K = K_1$ .

Рассмотрим количественную оценку концентрации напряжений вокруг крупных включений или пустот. Известно, что твердые включения, пустоты и локальные дефекты в структуре однородного материала вызывают концентрацию напряжений в однородном поле напряжений, созданном внешним воздействием. Решения таких задач наиболее часто встречаются при количественной оценке НДС сложных конструкций, деталей машин и оборудования на основе теории упругости и упругопластичности [5]. В качестве предела прочности в таких задачах принимается либо условие постоянства максимальных касательных напряжений Треска — Сен-Венана, либо условие постоянства интенсивности касательных напряжений Мизеса, которые не учитывают внутреннее кулоновское трение [5]. В приведенных ниже задачах в качестве расчетного будем рассматривать предельное состояние по теории Кулона — Мора, которое в условиях трехосного осесимметричного напряженного состояния записывается в виде:

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\sigma_\theta + \sigma_r + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} \quad (4)$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  — максимальное и минимальное напряжения соответственно;  $\varphi$  — угол внутреннего трения;  $c$  — удельное сцепление.

Это условие позволяет оценить начальную критическую нагрузку на контактной поверхности твердых включений или на контуре пустот круглой формы при известных решениях таких задач в упругой постановке аналогично тому, как это использовалось Пузыревским при определении начальной критической нагрузки. Рассмотрим некоторые задачи по определению начальной критической нагрузки, приложенной к однородному телу на основе имеющихся решений соответствующей краевой задачи теории упругости.

Всестороннее осесимметричное сжатие круглой пластины с круглым отверстием в центре диаметром

$2a$  вызывает тангенциальное напряжение сжатия на контуре отверстия, определяемое выражением [5]:

$$\sigma_\theta = 2p \quad (5)$$

где  $p$  — нагрузка, действующая на внешней границе пластины.

Учитывая, что на контуре отверстия радиальное напряжение  $\sigma_r = 0$ , а продольное напряжение  $\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$ , где  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\sigma_\theta$  — тангенциальное напряжение, можем определить критическое значение нагрузки  $p^{*?}$ , при котором на контуре отверстия начинает образовываться кольцевая зона пластического течения. Подставляя выражение (5) в формулу (4) и принимая  $\sigma_r = 0$ , получаем:

$$p_{ц}^* = c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

Всестороннее сжатие пространства вокруг полости в форме шара диаметром  $2a$  вызывает тангенциальное напряжение сжатия на поверхности шаровой полости, определяемое выражением:

$$\sigma_\theta = 1,5p \quad (7)$$

При этом очевидно, что  $\sigma_r = 0$ .

В этом случае критическое значение нагрузки  $p^{*?}$  определяется с помощью следующего выражения, полученного на основе формулы (4):

$$p_{ш}^* = \frac{4c}{3} \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (8)$$

Сравнивая формулы (6) и (8), следует отметить, что для разрушения стенок шарообразной полости требуется в 4/3 раза большее напряжение, чем для разрушения стенок отверстия круглой формы (плоская задача), то есть:

$$p_{ш}^* = 1,33p_{ц}^* \quad (9)$$

Двухосное сжатие квадратной пластины с круглым включением в центре вызывает концентрацию тангенциального напряжения на контуре отверстия, определяемую выражением:

$$\sigma_\theta = 2p \quad (10)$$

В этом случае критическое значение нагрузки определяется по формуле типа (6).

Всестороннее сжатие круглого диска с жестким цилиндрическим включением в центре вызывает концентрацию радиальных сжимающих напряжений на контактной поверхности  $\sigma_r = \sigma \cdot \alpha$  (где  $\alpha$  — коэффициент концентрации, определяемый с учетом взаимодействия двух цилиндров на основе задачи Ляме). В связи с громоздкостью этого решения приводить его здесь не будем. Целесообразнее такие контактные задачи решать численным методом конечных элементов. Анализ таких решений с помощью программного комплекса ANSYS показал, что при наличии твердых включений круглой формы в условиях всестороннего сжатия, чистого сдвига, несимметричного двухосного сжатия возникают концентрации радиальных и касательных на-

Таблица 1

Результаты численного решения контактных задач методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS (интенсивность напряжений  $\sigma'$ , кПа)

Вид задачи	Одноосное сжатие при $p_y = 1$ ; $p_x = 0^{**}$	Всестороннее сжатие при $p_y = p_x = 1$	Чистый сдвиг при $p_y = 1$ ; $p_x = -1$
Круглое отверстие	3,00	2,04	3,98
Круглое включение $\mu = 0,5^*$	2,02	1,43	4,55
Круглое включение, $\mu = 0,7$	1,94	1,42	4,76
Круглое включение $\mu = 1,0$	1,88	1,42	4,45
Круглое включение, полное слипание	2,51	2,66	2,85

\*  $\mu$  — коэффициент трения;  $p_x, p_y$  — нагрузка на внешних границах пластины по осям  $x$  и  $y$  соответственно.



пряжений на контактной зоне, которые зависят от граничного условия (полного прилипания или трения). Результаты расчетов НДС для этих случаев приводятся в табл. 1. Анализ результатов численного моделирования НДС и аналитического решения для осесимметричных задач показал их полное совпадение.

**Классификация неоднородных грунтов и зависимость их механических свойств от гранулометрического состава**

Свойства грунта как гетерогенной среды определяются взаимодействием ее составляющих, а именно твердой, жидкой и газообразной фаз. От их соотношения зависят свойства всего массива, а от вида упаковки — поведение грунта под нагрузкой. Многофазность грунта и зависимость его свойств от соотношения фаз делают задачу определения свойств многофакторной и сложной для рассмотрения. В то же время последовательное рассмотрение различных комбинаций сред от простых к сложным позволяет определить факторы, влияющие на сжимаемость и прочность массива.

В действующей нормативной документации предусмотрено определение предварительных значений прочностных и деформационных характеристик грунта на основании классификационных показателей, таких как коэффициент пористости, число пластичности, число текучести, степень водонасыщения, а для песчаных грунтов — еще и крупности частиц. При этом влияние частиц различного размера и их процентного содержания не учитывается.

Для анализа влияния размера частиц и их количественного содержания на механические свойства неоднородных грунтов была проведена серия лабораторных экспериментов, в ходе которых выполнялись испытания в одометре и стабилометре искусственных смесей частиц различного размера с известным процентным содержанием. В результате была получена зависимость угла внутреннего трения, сцепления и модулей деформации от неоднородности состава образца.

На основании анализа результатов выполненных исследований можно сделать вывод о наличии связи между гранулометрическим составом грунта и его механическими характеристиками. Эта связь объясняется различными видами упаковки частиц и принципиально разными НДС в элементарных объемах грунта.

На основе полученных зависимостей была разработана классификация неоднородных грунтов в зависимости от процентного содержания частиц различной крупности (рис. 6).

Для наглядного отображения предлагаемой классификации грунтов была разработана графическая интерпретация, основанная на треугольнике Ферре. Треугольник Ферре позволяет нанести на схему точку, имеющую три координаты, сумма которых составляет 100%. В предлагаемой классификации по координатам откладывается процентное содержание крупных (>2,0 мм), мелких (0,1–2,0 мм) частиц и заполнителя (пылеватых и глинистых частиц).

На рисунке 6 отдельные категории предложенной классификации представлены в виде областей на треугольнике Ферре. Границы между областями опреде-



Рис. 6. Классификация грунтов с неоднородным гранулометрическим составом в зависимости от процентного содержания частиц различного размера

лены по результатам лабораторных испытаний и представленных выше зависимостей механического поведения образцов от гранулометрического состава. Нижняя граница зоны фазового перехода отсекает математический предел максимальной плотности упаковки шарообразных частиц, при котором объем пор между ними составляет 26%. Это значение установлено по результатам аналитического решения задачи о максимальной плотности упаковки шарообразных частиц.

Предложенная классификация позволяет на основании данных о гранулометрическом составе грунта сделать предварительный вывод об особенностях поведения элементарного объема грунта и формирующемся в нем НДС. Эта информация позволяет смоделировать поведение такого массива и получить его характеристики методом конечных элементов.

Очевидно, что в настоящее время не применяется подобной классификации, а все образцы условно помещаются в вершины треугольника. При этом оценка их свойств производится ошибочно.

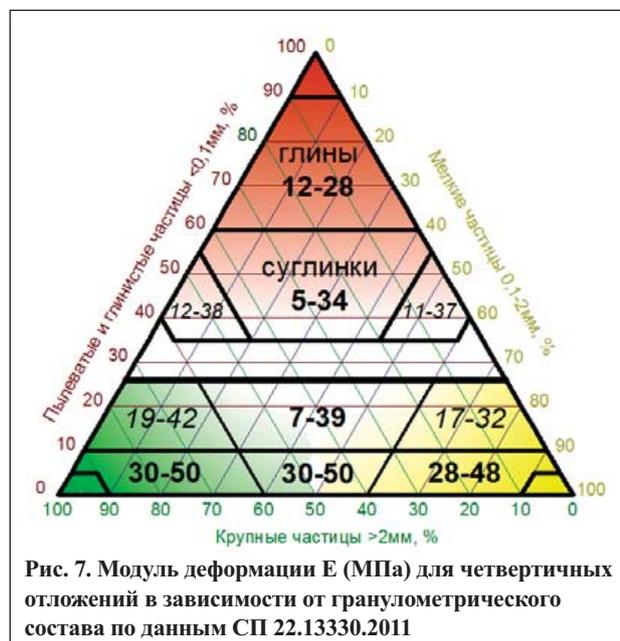
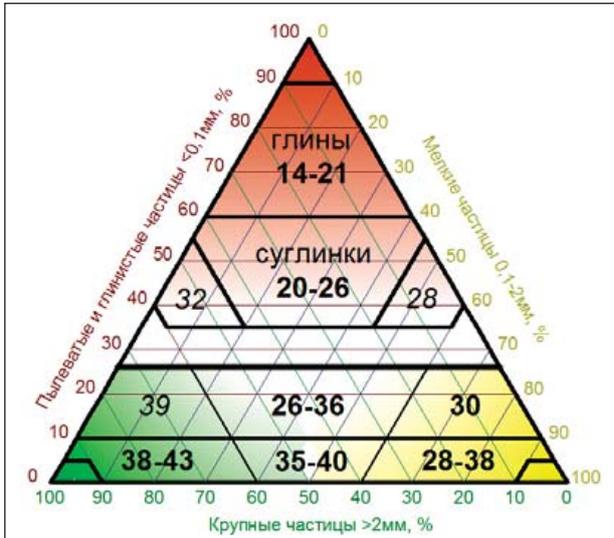


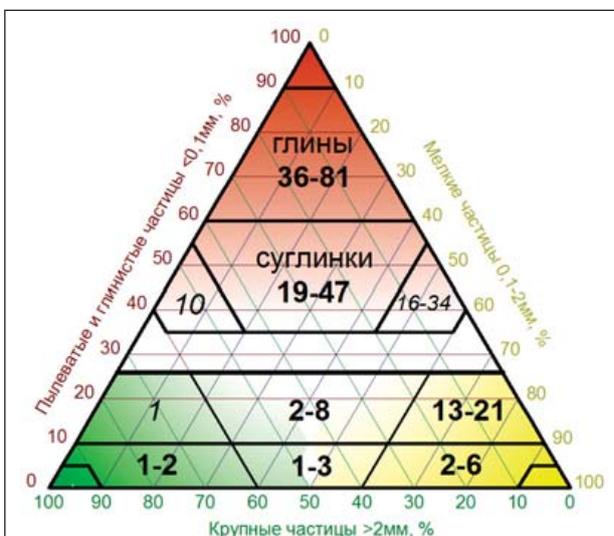
Рис. 7. Модуль деформации E (МПа) для четвертичных отложений в зависимости от гранулометрического состава по данным СП 22.13330.2011



**Рис. 8.** Угол внутреннего трения  $\phi$  (град.) для четвертичных отложений в зависимости от гранулометрического состава по данным СП 22.13330.2011

В качестве дальнейшего развития предложенной классификации на диаграмму были нанесены рекомендуемые значения механических характеристик — модуля деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения для четвертичных отложений в соответствии с действующим нормативным документом [7]. Эти величины были приняты для максимальной плотности упаковки (в случае более рыхлой упаковки все эти значения пропорционально снижаются). На рисунке 7 представлена диаграмма распределения модуля деформации в зависимости от гранулометрического состава частиц. Жирным шрифтом выделены значения из нормативной документации, курсивом — величины, полученные методом интерполяции. Аналогичные диаграммы могут быть получены и для сцепления и угла внутреннего трения (рис. 8, 9).

Из рисунка 7 видно, что по мере увеличения среднего размера частиц модуль деформации равномерно возрастает. Однако вокруг зоны фазового перехода на-



**Рис. 9.** Сцепление с (кПа) для четвертичных отложений в зависимости от гранулометрического состава по данным СП 22.13330.2011

блюдается значительное снижение модуля, которое можно объяснить нестабильным поведением скелета грунта и возможным лавинообразным разрушением цепочек частиц вследствие местной потери устойчивости в элементарном объеме.

Угол внутреннего трения снижается вместе с уменьшением размера частиц (см. рис. 8), что вполне закономерно, т.к. мелкие и пылеватые частицы, как правило, имеют менее шероховатую поверхность — следовательно, внутреннее трение в элементарном объеме для них меньше, чем для крупных частиц.

Величина сцепления, напротив, нелинейно возрастает с увеличением содержания пылеватых и мелких частиц (см. рис. 9), что объясняется увеличением удельного числа контактов между частицами и образованием водно-коллоидных связей.

Введение предлагаемой классификации позволяет более точно прогнозировать свойства грунтового основания с учетом неравномерности его гранулометрического состава. Кроме того, с помощью приведенных диаграмм предварительные значения механических характеристик грунта могут быть определены только по результатам определения гранулометрического состава, что позволяет быстрее приступить к предварительному проектированию. При этом определение гранулометрического состава обычно проводится с высокой точностью, в отличие от прочих классификационных показателей, таких как, например, число пластичности.

Механические свойства неоднородных грунтов в целом существенно зависят от степени неоднородности. Она влияет на формирование неравномерного НДС, переход материала в предельное состояние в отдельных зонах, а также на механические характеристики таких грунтов. Учет неоднородности позволяет повысить достоверность расчетов оснований и сооружений из неоднородных грунтов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
2. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
3. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Госстрой СССР, 1979.
4. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Госстрой СССР, 1984.
5. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 336 с.
7. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2010.
8. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 309 с.
9. Ухов С.Б., Конвиз А.В., Семенов В.В. Механические свойства крупнообломочных песков с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. № 1. С. 2–7.
10. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов: учебное пособие. М.: Недра. 1975. 304 с.