

В.А. Козионов

УДК 624.131.22:519.87

Павлодарский государственный
университет им. С. Торайгырова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПРЕССИОННОЙ СЖИМАЕМОСТИ ВАЛУННО-ГЛЫБОВЫХ ГРУНТОВ С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Талдаудың математикалық модельдеуі әдісі арқылы құзды және балшықты топырақтағы геокомпозиттердің тығыздығын зерттеу нәтижелері келтіріледі. Геокомпозиттердің олардың құрылымдарының параметрлерімен және механикалық қасиеттерімен модулінің байланыс теңдеуі алынады.

The results of compressibility of rocky and argillaceous soil geocomposites researches by the method of experimental mathematic modeling are introduced in the article. The equation that connects compressive module of geocomposites deformation with the parameters of their structures and mechanical characteristics of components is derived

При геотехнических исследованиях для различных видов строительства часто возникает необходимость определения механических характеристик грунтов, представляющих собой природные смеси включений из крупных скальных обломков различной формы, ориентации в пространстве, степени трещиноватости и выветрелости с неоднородным песчаным или глинистым заполнителем, например, в виде щебенистого суглинка или супеси. Типичным примером таких массивов являются валунно-глыбовые отложения. Выделяемые из них объемы разных размеров характеризуются различным строением, состоянием и часто составом, т.е. представляют собой масштабно неоднородные тела. С позиций механики такие массивы грунтов можно рассматривать как геокомпозитную среду природного образования. Стандартные методы определения их свойств оказываются малоэффективными, так как в масштабах обычных лабораторных и полевых испытаний не удается обеспечить представительность, т.е. однородность образца грунта. В последние годы для исследования этих грунтов используется метод математического моделирования эксперимента [1], позволяющий определять механические параметры грунтов по показателям свойств их компонент на основе метода конечных элементов (МКЭ). Такой подход дает возможность исследовать значительные объемы массива грунтов и удовлетворять условию представительности при любом размере элементов неоднородности. Основной объем выполненных к настоящему времени данным методом исследований относится к изучению плоской деформации грунтов типа двухосное сжатие.

Постановка задачи и метод исследования. В работе ставится задача исследования компрессионной сжимаемости представительного объема геокомпозита из валунно-глыбовых грунтов с учетом выделенных элементов структурной неоднородности заполнителя и включений. Для решения задачи использован метод математического моделирования эксперимента, модифицированный применительно к условиям компрессионного испы-

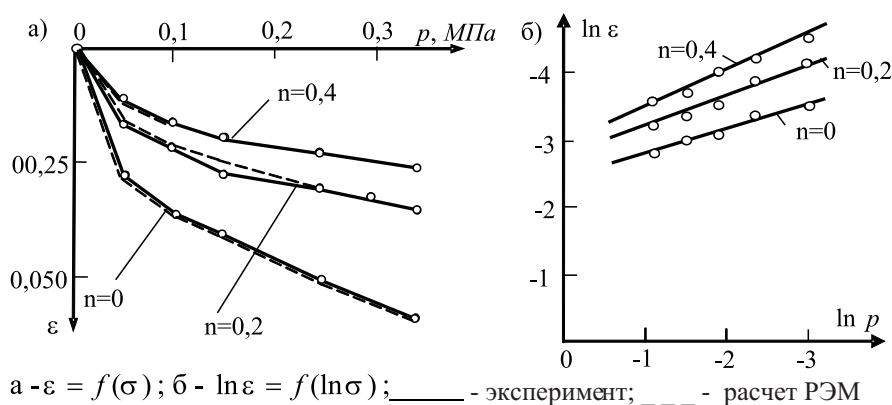
тания грунтов. Определение механических характеристик включений и заполнителя производилось экспериментальным путем. Далее с помощью МКЭ моделировалось по расчетной схеме компрессионное сжатие представительного объема всего геокомпозиата, и определялись его эффективные (осредненные по объему) характеристики деформируемости.

Результаты определения механических свойств включений. Экспериментальные исследования включений проводились на крупномасштабных монолитах трещиноватого мергеля размером в плане до 0,5×0,5м методом кольцевого нагружения [2]. По результатам испытаний получены следующие характеристики [3]: модуль деформации $E = 212000 \text{ кПа}$; сцепление $C = 600 \text{ кПа}$; угол внутреннего трения $\varphi = 29^\circ$; коэффициент относительной поперечной деформации $\nu = 0,128$. Наряду с прямыми экспериментами проводились параллельные опыты по измерению ультразвуковым прибором скорости прохождения через монолит продольных упругих волн V_p . По их результатам построена корреляционная зависимость [2] для определения модуля деформации E , МПа

$$E = 11,5 \cdot v_p^{5,2}. \quad (1)$$

Использование (1) позволяет снизить трудоемкость испытаний включений и проводить их в условиях естественного залегания грунтов.

Результаты определения механических свойств заполнителя. Экспериментальные исследования заполнителя проводились на смесях суглинка с дресвой. Физические характеристики суглинка: влажность $W = 0,205$; влажность на границе раскатывания $W_p = 0,158$ и на границе текучести $W_L = 0,296$. Сжимаемость заполнителя изучалась на компрессионных приборах. Определялись также параметры прочности заполнителя на срез. При выполнении испытаний была использована теория планирования многофакторного физического эксперимента. Число факторов было принято равным трем, их численные значения варьировались на двух уровнях (+1 и -1): $Z_1(n)$ – процентное содержание включений (-1 – 0,2; +1 – 0,4); $Z_2(d)$ – крупность включений дресвы (-1 – d 0,5; +1 – d 1,0); $Z_3(W)$ – влажность заполнителя (-1 – $W = 0,205$; +1 – $W = 0,255$). Некоторые данные этих испытаний были опубликованы ранее в работе [4]. На рисунке 1а приведены характерные компрессионные кривые исследованных грунтов при различном содержании включений размером $d=5$ мм. Их анализ показывает, что зависимости $\varepsilon = f(p)$ в диапазоне $p = 0 \dots 0,35 \text{ МПа}$ имеют нелинейный характер.



а - $\varepsilon = f(\sigma)$; б - $\ln \varepsilon = f(\ln \sigma)$; _____ - эксперимент; - - - - расчет РЭМ
Рисунок 1 – Компрессионные зависимости для исследованных грунтов

Анализ компрессионных зависимостей относительной деформации сжатия заполнителя ε от давления на образец p , т.е. $\varepsilon = f(p)$ показал, что они удовлетворительно аппроксимируются степенной зависимостью при всех исследованных значениях параметров n, d, w

$$\varepsilon = A \cdot p^K \quad (2)$$

где A, K – параметры компрессионной кривой.

Результаты обработки $\varepsilon = f(p)$ в логарифмических координатах $\ln \varepsilon - \ln p$ показали, что параметры A и K зависят, в общем случае, от всех исследованных параметров n, p, d, w . Таким образом, для величины модуля деформации заполнителя E_S^3 существует зависимость вида $E_S^3 = f(n, p, d, w)$. Так, для начального интервала давлений $p = 0,00 - 0,05$ МПа и стабилизированных во времени деформаций ε получено следующее уравнение

$$E_S^3 = 1,7 + 0,2 * z_1 - 0,1 * z_2 - 0,33 * z_3 + 0,05 * z_1 * z_2 + - 0,075 * z_1 * z_3 + 0,625 * z_2 * z_3 + 0,125 * z_1 * z_2 * z_3, \quad (3)$$

где $z_i = (Z_i - Z_{i0}) / \Delta Z_i$ – кодированные значения факторов Z_i ;
 $Z_i, \Delta Z_i$ – натуральные значения факторов и интервал их варьирования;
 Z_{i0} – нулевой уровень факторов Z_i .

В дальнейшем исследовании использовались экспериментальные зависимости вида $E_{Si}^3 = f(n, p)$. В этом случае, как показали результаты вычислений, параметр K в (2) изменяется в узких пределах $0,384 \dots 0,466$, а значение параметра A составляет $11,031 \dots 22,010$ и существенно зависит от содержания включений n .

Результаты математического моделирования компрессионного сжатия. На рисунке 2 приведены варианты расчетной схемы типового фрагмента массива валунно-глибового грунта размером $2,8 \times 1,4$ м, состоящего из включений мергеля (1) и заполнителя – суглинка с дресвой (2). Размер включений составляет $0,1 - 0,2$ м, что позволяет рассматривать представленный фрагмент «типовой структуры» как квазиплоский образец грунта.

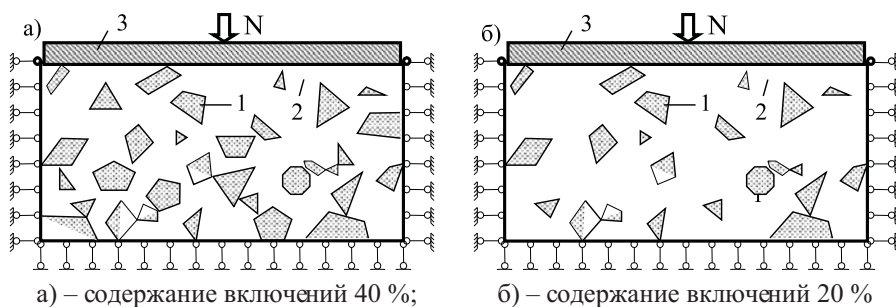


Рисунок 2 – Расчетная схема фрагмента массива неоднородного грунта

Такие структуры разрабатываются по результатам инженерно-геологических изысканий участка строительства. На них отражаются особенности состава и расположения структурных элементов (твердые включения, заполнитель, зоны контактов элементов),

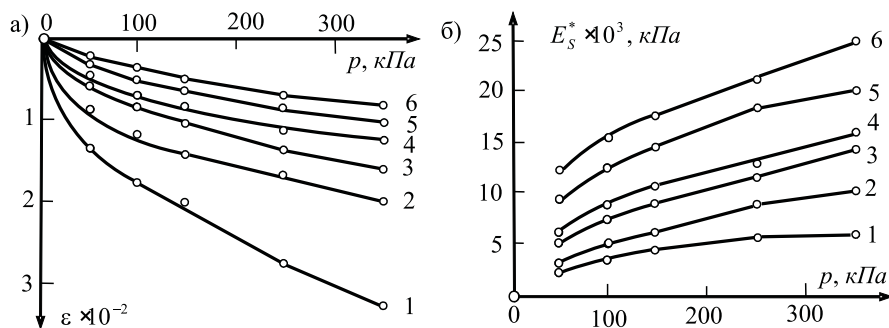
их размеры, форма и содержание. Эти работы выполняются путем фотографирования площадок массива, анализа гранулометрического состава грунтов и другими методами, изложенных в работе [5].

При математическом моделировании компрессионного испытания нагрузка на образец грунта N передавалась через штамп 3 (рисунок 2) ступенями 50...100 кПа. На боковых гранях образца ставилось условие отсутствия горизонтальных перемещений, а на нижней границе – отсутствие вертикальных перемещений. Задача решалась МКЭ по программе SCAD. Расчеты выполнялись в условиях плоской деформации с разбивкой заполнителя и включений на конечные элементы треугольной формы.

По данным расчетов МКЭ сначала устанавливались абсолютные вертикальные перемещения штампа компрессионного прибора S_p , а затем относительные деформации грунта $\varepsilon_i = S_p/h$, где h – высота образца грунта. Для определения S_i по данным физических экспериментов с образцами заполнителя определялись текущие значения компрессионного модуля деформации грунта E_{Si}^3 для каждой ступени нагрузки P_i . Полученные значения E_{Si}^3 использовались в расчетах типовых структур грунта МКЭ для определения их эффективных характеристик сжимаемости: текущего компрессионного модуля деформации E_s^* ; коэффициента Пуассона ν_s^* ; параметров нелинейности A_s^* и K_s^* (аналоги формулы 1).

Математическое моделирование выполнялось с применением теории планирования вычислительного эксперимента. Варьировались на нижних и верхних уровнях факторы: $X_1 = n$ – содержание дресвы в заполнителе (0,2 и 0,4); $X_2 = m$ – содержание включений мергеля (0,2 и 0,4); $X_3 = r$ – отношение модулей деформации включения E_a и суглинка E_c (50 и 116). Проведены также дополнительные вычисления при значениях $r = 10, 25$ и 75.

Характерные зависимости $\varepsilon = f(p)$ и $E_s^* f(p)$ построенные по результатам математического эксперимента, приведены на рисунке 3. Их анализ показывает, что они также имеют нелинейный характер и существенно зависят от содержания включений мергеля и дресвы. В результате обработки зависимостей $\varepsilon = f(p)$ в логарифмических координатах $\ln \varepsilon - \ln p$ по формуле (1) получено, что параметр K_s изменяется в пределах 0,40...0,64, а значение параметра A_s существенно зависит от факторов X_i и составляет 0,0014...1,8410.



1 – $m=0,2, n=0$; 2 – $m=0,2, n=0,2$; 3 – $m=0,2, n=0,4$; 4 – $m=0,4, n=0$;
5 – $m=0,4, n=0,2$; 6 – $m=0,4, n=0,4$

Рисунок 3 – Зависимости для типовых структур: а) $\varepsilon = f(p)$; б) $E_s^* = f(p)$

Методом факторного анализа получено следующее эмпирическое уравнение для модуля деформации E_s^* в интервале $p = 0...0,10$ МПа

$$E_s^* / E_c = -0,5322 + 2,9215X_1 + 7,4713X_2 - 0,0066X_3 + 0,3278X_1X_2 - 0,0010X_1X_3 + 0,0761X_2X_3 + 0,1279X_1X_2X_3. \quad (4)$$

Зависимость (4) может быть построена для иных интервалов давления P . На рисунке 4 приведены данные вычислений E_s^* типовых структур по формуле (4) с учетом дополнительных расчетов по оценке влияния жесткости мергеля на сжимаемость грунтов.

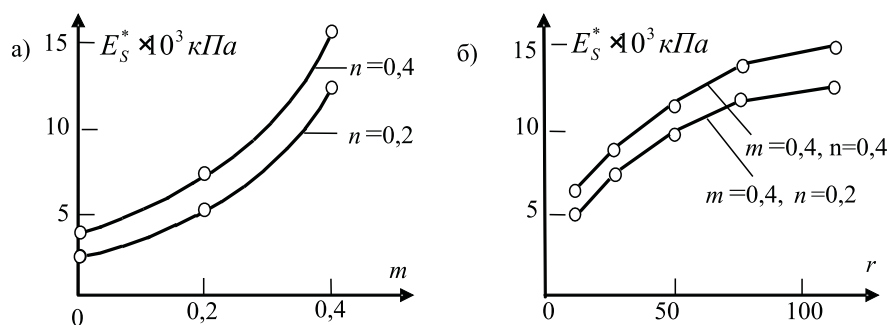


Рисунок 4 – Графики зависимости: а) $E_s^* f(m)$; б) $E_s^* = f(r)$ при $P = 100$ кПа

Результаты вычислений указывают на наличие сложной функции $E_s^* = (f(n, m, r, p))$ и подтверждают «армирующее» влияние включений на сжимаемость грунтов. Данные определений E_s^* по формуле (4) и по другим методикам в сопоставимых условиях не противоречат друг другу. Так, при $m = 0,4$ и значениях $n = 0,2$ и $n = 0,4$ расчетом по формуле (4) получено соответственно $E_s^* = 12653$ кПа и $E_s^* = 15500$ кПа, а по методике ДальНИИСа для предварительных оценок $E_s^* = 17000$ кПа. Данные рисунка 4б хорошо согласуются с результатами работы [1], где получено, что при величине $r > 100$ включения можно считать абсолютно жесткими телами. Зависимость (4), в отличие от соотношений механики композитов [6] и отмеченных выше работ отражает структурную неоднородность заполнителя и включений. При наличии в заполнителе крупных неоднородностей эффективные его характеристики E_s , V_s , A_s и K_s могут быть также определены методом математического моделирования эксперимента. В качестве примера на рисунке 1а приведены кривые $\varepsilon = f(p)$ (пунктир) построенные по результатам математического моделирования компрессионного сжатия суглинка с дресвой. Их отличие от физических экспериментов не превысило 3...9 %.

Выводы

1. Обоснована методика определения характеристик нелинейного деформирования валунно-глыбовых грунтов с заполнителем в условиях компрессионного сжатия с учетом их структурно-механических особенностей.

2. Представленная методика рекомендуется в качестве дополнения к существующим способам оценки характеристик деформируемости валунно-глыбовых грунтов, когда использование типовых испытаний затруднено или невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ухов С.Б., Конвиз А.В., Семенов В.В. Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993. – № 1. – С. 2 – 7.
2. Рекомендации по определению характеристик реологических свойств скальных и полускальных грунтов методом кольцевого нагружения. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. – 111 с.
3. Козионов В.А. Методы испытаний трещиноватых скальных грунтов: учебное пособие. – Павлодар : Издательство Кереку, 2006. – 118 с.
4. Козионов В.А., Кудерин М.К., Варламова Л.А., Искужанов А.Е. Прогноз сжимаемости глинистых грунтов с древесно-щебенистыми включениями // Наука и техника Казахстана, 2007. – № 2. – С. 46 – 59.
5. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. – М. : Недра, 1986. – 256 с.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М. : Мир, 1982. – 334 с.