

ных конструкций, проведенное нами при непосредственном участии и консультировании д.т.н., профессора Б.И. Далматова, представлено в работах [3,4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Roy P.W. Notes of the Relative Principle Strains of Particle Assembly During Change in Mean Principle Stress at Constant Ratio in the Triaxial Cell // Prog. Manchester University. – 1964.

2. Reynolds O. Experiments Showing Dilatancy, a Property of Granular Material // Prog. Roy Institute. – 1886, P. 30–33.

3. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю.Соболевский. – Минск: Навука і тэхніка, 1994.– 232 с.

4. Sobolevsky D.Yu. Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations // Rotterdam/ A.A. Balkema publ., 1995 – 243p.

УДК 624.131.52

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УПРУГОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ГРУНТОВ

**Талецкий В. В.**, канд. техн. наук,  
(Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Беларусь)

Предлагается определять не традиционные механические характеристики ортотропных грунтов (модули упругости, модули сдвига и коэффициенты Пуассона), а постоянные коэффициенты упругости, непосредственно связывающие относительные деформации и напряжения в обобщенном законе Гука. Все испытания проводятся в одном приборе с независимо регулируемыми главными напряжениями. Повышается точность определения постоянных коэффициентов упругости за счет сокращения количества испытуемых образцов и проведения всех испытаний в одном приборе.

It is proposed to determine the conventional mechanical characteristics of orthotropic soils (elastic moduli, shear moduli and Poisson's ratios) and the constant coefficients of elasticity, directly linking the relative strain and stress in the generalized Hooke's law. All tests are performed in a single device with independently adjustable principal stresses. Increases the accuracy of determining the constant coefficients of elasticity by reducing the number of test specimens and all tests in a single instrument.

При объемном упругом напряженном состоянии связь между напряжениями и деформациями дает *обобщенный закон Гука*, по которому в любой точке упруго деформированного тела каждый из шести компонентов тензора напряжений является линейной функцией шести компонентов тензора деформаций и наоборот. В случае упругого *анизотропного материала* между напряжениями и деформациями при объемном напряженном состоянии будет иметь место система линейных уравнений, которую сокращенно можно записать в виде  $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ , где матрица величин  $C_{ijkl}$  называется тензором модулей (постоянных коэффициентов) упругости. Таким образом анизотропное тело характеризуется 36 упругими постоянными  $C_{ijkl}$ . Но если  $C_{ijkl} = C_{klij}$ , то остается 21 независимая постоянная. При этом направления главных напряжений и главных деформаций совпадают.

Если координатные плоскости совпадают с плоскостями симметрии свойств материала (то есть материал будет обладать одинаковыми свойствами по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ ), то количество независимых упругих постоянных еще уменьшится и станет равным девяти. Система уравнений примет вид

$$\begin{aligned} \sigma_x &= C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{13}\varepsilon_z; \quad \tau_{xy} = C_{44}\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= C_{21}\varepsilon_x + C_{22}\varepsilon_y + C_{23}\varepsilon_z; \quad \tau_{yz} = C_{55}\gamma_{yz}; \\ \sigma_z &= C_{31}\varepsilon_x + C_{32}\varepsilon_y + C_{33}\varepsilon_z; \quad \tau_{xz} = C_{66}\gamma_{xz}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  – нормальные и касательные напряжения;

$C_{ij}$  – постоянные коэффициенты упругости (для грунтов – коэффициенты деформации);

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$  – относительные осевые и сдвиговые деформации. Такой материал называется *ортотропным*.

Обычно при исследованиях грунтов определяют традиционные механические постоянные: модули упругости по направлениям, совпадающим с плоскостями изотропии; коэффициенты Пуассона, характеризующие деформации в плоскости изотропии при сжатии в этой же плоскости и при сжатии в направлении нормальном к этой плоскости изотропии; модули сдвига в плоскостях изотропии нормальных к другим плоскостям изотропии. А для расчетов используют постоянные коэффициенты упругости  $C_{ij}$ , которые вычисляют через эти постоянные. Например, в работе [1]:

$$\tilde{N}_{11} = \frac{EE' - E^2\mu'^2}{(1 + \mu)(E' - E'\mu - 2E\mu'^2)}; \quad \tilde{N}_{13} = \frac{EE'\mu'}{E' - E'\mu - 2E\mu'^2};$$

$$\tilde{N}_{33} = \frac{E'^2 - E'^2\mu}{E' - E'\mu - 2E\mu'^2}.$$

Механические свойства грунтов определяются деформационными характеристиками, относящимися к общей деформации грунта. Известные методы определения деформационных характеристик, как, например, в работах [2, 3], заключаются в следующем: модули деформации определяются при испытании на сжатие в стабилометре компрессорного типа цилиндрических образцов с осями, совпадающими с плоскостями изотропии; коэффициенты Пуассона определяют при испытании цилиндрических образцов на одноосное сжатие вдоль плоскостей изотропии и нормально к ним с измерением осевых и поперечных деформаций; модули сдвига определяют при кручении цилиндрических образцов, оси которых совпадает с плоскостями изотропии.

Недостатком этих методов является большое количество испытаний при определении деформационных характеристик данного грунта и проведение испытаний в разных приборах.

В соответствии с методикой работы [4], определяются не традиционные механические постоянные, а коэффициенты  $C_{ij}$ , непосредственно связывающие напряжения и упругие деформации.

Для определения постоянных коэффициентов упругости ортотропного грунта проводятся испытания шести образцов в одном приборе с независимо регулируемыми главными напряжениями [5].

При определении коэффициентов  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{13}$  один образец грунта испытывается на осевое сжатие в направлении оси  $x$ , при ограничении деформаций в направлении осей  $y$  и  $z$ , то есть  $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$ , (рис. 1).

Уравнения (1) в этом случае будут иметь вид

$$\sigma_x = C_{11}\varepsilon_x; \sigma_y = C_{21}\varepsilon_x; \sigma_z = C_{31}\varepsilon_x. \quad (2)$$

Образец нагружается до напряжений  $\sigma'_\delta = \sigma'_\delta$ , измеряются напряжения  $\sigma'_z$  и  $\sigma'_y$  и деформации  $\varepsilon_x$ . После чего образец разгружается до напряжений  $\sigma_x = 0$ , измеряются напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_y$ , полные деформации  $\varepsilon_x$  и остаточные деформации  $\varepsilon_{xp}$ . По полным и остаточным деформациям вычисляются упругие осевые деформации  $\varepsilon_{xe} = \varepsilon_x - \varepsilon_{xp}$ .

Тогда  $C_{11} = \frac{(\sigma'_x - \sigma_x)}{\varepsilon_{xe}}$ ,  $C_{21} = \frac{(\sigma'_y - \sigma_y)}{\varepsilon_{xe}}$ ,  $C_{31} = \frac{(\sigma'_z - \sigma_z)}{\varepsilon_{xe}}$ .

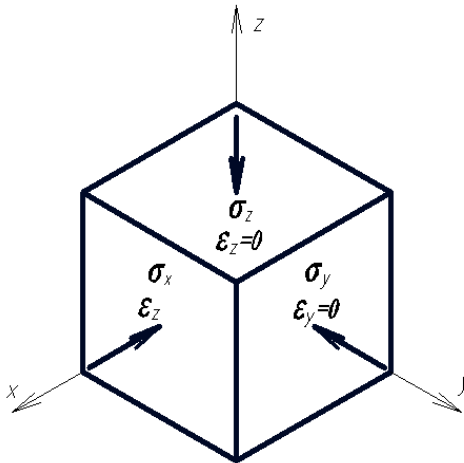


Рис. 1. Схема испытания образца грунта при определении коэффициента  $C_{11}$

Аналогичными испытаниями второго и третьего образцов ортотропного грунта при нагружении по оси  $y$  и ограничении деформаций по осям  $x$  и  $z$ , и при нагружении по оси  $z$  и ограничении дефор-

маций по осям  $x$  и  $y$  определяем соответственно постоянные коэффициенты упругости  $C_{12}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{32}$  и  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  и  $C_{33}$ .

Учитывая, что  $C_{12} = C_{21}$ ,  $C_{13} = C_{31}$ ,  $C_{23} = C_{32}$ , мы по испытанию трех образцов определяем шесть постоянных коэффициентов упругости.

Для определения коэффициента  $C_{44}$ , четвертый образец вырезается и помещается в прибор таким образом, чтобы угол наклона плоскости изотропии по оси  $z$ , к направлению действия напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , был  $45^\circ$  (рис. 2).

Образец нагружается по девиаторической траектории в плоскости  $xoy$ , ортогональной плоскости изотропии по оси  $z$ , при этом деформации в направлении оси  $z$  ограничиваются. Производится равномерное сжатие образца напряжениями  $\sigma'_\delta = \sigma'_y$ . Затем напряжения по оси  $x$  увеличиваются с постоянным приращением  $\Delta\sigma_x$ , а напряжение по оси  $y$  уменьшаются с такой же величиной приращения  $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y$  до уровня напряжений  $\sigma''_\delta$  и  $\sigma''_y$  после чего образец разгружается до напряжений  $\sigma'_z = \sigma'_x = \sigma'_y$ .

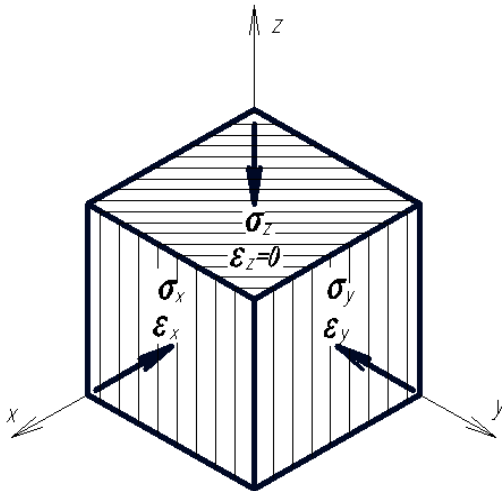


Рис. 2. Схема расположения образца в приборе при определении коэффициента  $C_{44}$

Напряженно-деформированное состояние образца приведено на рис. 3.

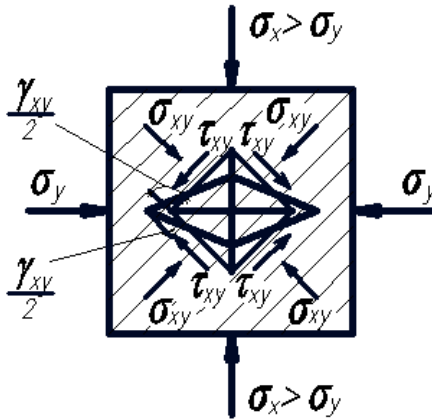


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние образца при определении коэффициента  $C_{44}$

Измеряются полные деформации  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  при напряжениях  $\sigma''_x$  и  $\sigma''_y$  и остаточные деформации после разгрузки до  $\sigma'_x = \sigma'_y$ :  $\varepsilon_{xp}$  и  $\varepsilon_{yp}$ . По полным и остаточным деформациям вычисляются упругие осевые деформации  $\varepsilon_{ye} = \varepsilon_y - \varepsilon_{yp}$  и  $\varepsilon_{xe} = \varepsilon_x - \varepsilon_{xp}$ . Коэффициент упругости  $C_{44}$  определяется из отношения касательных напряжений  $\tau_{xy}$ , определенных на площадках с максимальными касательными напряжениями  $\tau_{xy} = \frac{(\sigma''_y - \sigma'_y) - (\sigma''_x - \sigma'_x)}{2}$  и упругих сдвиговых деформаций

$$\text{этих площадок } \gamma_{xye} = \varepsilon_{ye} - \varepsilon_{xe}; \quad C_{44} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xye}}.$$

При определении коэффициента  $C_{55}$ , пятый образец вырезается и помещается в прибор таким образом, чтобы угол наклона плоскости изотропии по оси  $x$ , к направлению действия напряжений  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$ , был  $45^\circ$ . Образец нагружается по девиаторической траектории в

плоскости  $uox$ , ортогональной плоскости изотропии по оси  $x$ , при этом деформации в направлении оси  $x$  ограничиваются.

Шестой образец для определения коэффициента  $C_{66}$  вырезается и помещается в прибор таким образом, чтобы угол наклона плоскости изотропии по оси  $y$ , к направлению действия напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , был  $45^\circ$ . Образец нагружается по девиаторической траектории в плоскости  $xoz$ , ортогональной плоскости изотропии по оси  $y$ , при этом деформации в направлении оси  $y$  ограничиваются. Нагружение и разгрузка образцов, измерение деформаций и определение максимальных касательных напряжений и сдвиговых деформаций производится аналогично испытанию четвертого образца, а коэффициенты упругости определяются соответственно по формулам:

$$C_{55} = \frac{\tau_{yz}}{\gamma_{yze}} \text{ и } C_{66} = \frac{\tau_{xz}}{\gamma_{xze}}.$$

Предлагаемая методика повышает точность определения постоянных коэффициентов упругости ортотропного материала за счет меньшего количества испытываемых образцов (по шести образцам определяются девять постоянных коэффициентов упругости), а также за счет проведения всех испытаний в одном приборе.

Приведенную методику можно использовать при определении, как коэффициентов упругости, так и коэффициентов деформации, связывающих напряжения и полные деформации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров, Е. Ф. Строительство на пойменно-намывных основаниях / Е. Ф. Винокуров, А. С. Карамышев. – Минск: Выш. шк., 1980. – 206 с.
2. Кузьмицкий, В. А. К вопросу об определении деформационных характеристик анизотропных грунтов / В. А. Кузьмицкий. – В кн. Строительные конструкции и теория сооружений. Основания, фундаменты и механика грунтов. Вып. 2. – Минск: Выш. шк., 1973. – С. 243–251.

3. Писаненко, В. П. Исследование коэффициентов Пуассона монотропных глинистых грунтов / В. П. Писаненко. – Тр. НИИЖТа, 1977. – Вып. 180. – С.74–79.

4. Способ определения коэффициентов упругости трансверсально-изотропного грунта : пат. 5618 Респ. Беларусь / Галецкий В. В.

5. Прибор для исследования свойств грунтов : а. с. 302665 СССР: МКИ G01n 33/24 / А. Л. Крыжановский, Э. И. Воронцов, А. А. Музафаров., Б. Л. Морозов. – № 1409204/29-14; заявл. 02.03.70; опубл., Бюл. № 15 // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. – 1971. – № 15. – С. 162.

УДК 624.131.37:624.131.43

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУППЫ СВАЙ С УЧЕТОМ ОБЪЕМНОГО «СТЕСНЕНИЯ» НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА**

**Уласик Т. М.**, канд. техн. наук., **Балыш А.В.**, маг. техн. наук  
(Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь)

В статье приведены результаты исследований моделирования работы группы свай в определенном объеме «стеснения», который предполагает реализацию несущей способности свай с учетом дилатансии. Выполнен сравнительный анализ полученных данных и результатов ранее проведенных исследований. Показано, как реализуется несущая способность свай в условиях различных комбинаций нагружения свай в группе.

The article presents the results of research of modeling the work of a group of piles in a certain amount of "constraint", which involves the realization of the bearing capacity of piles, taking into account dilatancy. The article presents a comparative analysis of the obtained data and the results of previous research. It is shown how the bearing capacity of piles is realized in conditions of various combinations of loading of piles in a group.