

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 624.131.52

В. В. ТАЛЕЦКИЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УПРУГОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ГРУНТОВ

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 регулируемые главными напряжениями. Повышается точность определения постоянных коэффициентов упругости за счет сокращения количества испытываемых образцов и проведения всех испытаний в одном приборе.

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]:

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

$$C_{33} = \frac{E'^2 - E'^2\mu}{E' - E'\mu - 2E\mu'^2}.$$

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 совпадают 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] определяют 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 регулируемые 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 $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$ (рисунок 1).

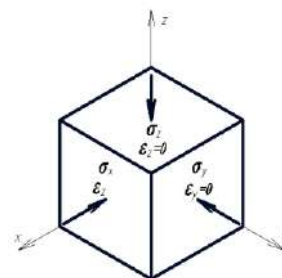


Рисунок 1 – Схема испытания образца грунта при определении коэффициента C_{11}

Уравнения (1) в этом случае будут иметь вид

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

Образец нагружается до напряжений $\sigma_x = \sigma_x'$, измеряются напряжения σ_z' и σ_y' и деформации ε_x . После этого образец разгружается до напряжений и $\sigma_x = 0$, измеряются напряжения σ_z и σ_y , полные деформации ε_x и остаточные деформации ε_{xp} . По полным и остаточным деформациям вычисляются упругие осевые деформации $\varepsilon_{xe} = \varepsilon_x - \varepsilon_{xp}$. Тогда $C_{11} = (\sigma_x' - \sigma_x) / \varepsilon_{xe}$, $C_{21} = (\sigma_y' - \sigma_y) / \varepsilon_{xe}$, $C_{31} = (\sigma_z' - \sigma_z) / \varepsilon_{xe}$.

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 деформаций 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 σ_x и σ_y был 45° (рисунок 2).

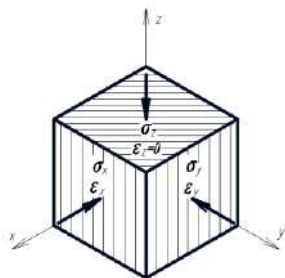


Рисунок 2 – Схема расположения образца в приборе при определении коэффициента C_{44}

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 $\sigma_x' = \sigma_y'$. Затем напряжение по оси x увеличиваются с постоянным приращением $\Delta\sigma_x$, а напряжения по оси y уменьшаются с такой же величиной приращения $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y$ до уровня напряжений σ_x'' и σ_y'' , после чего образец разгружается до напряжений $\sigma_z' = \sigma_x' = \sigma_y'$.

Напряженно-деформированное состояние образца приведено на рисунке 3.

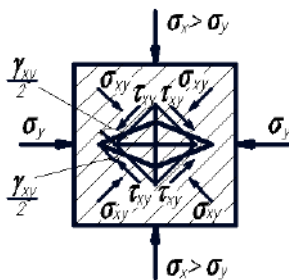


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние образца при определении коэффициента C_{44}

Измеряются полные деформации ε_x и ε_y при напряжениях σ_x'' и σ_y'' и остаточные деформации после разгрузки до $\sigma_x' = \sigma_y'$: ε_{xp} и ε_{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 τ_{xy} , определенных на площадках с максимальными касательными напряжениями $\tau_{xy} = [(\sigma_y'' - \sigma_y') - (\sigma_x'' - \sigma_x')] / 2$ и упругих сдвиговых деформаций этих площадок $\gamma_{xye} = \varepsilon_{ye} - \varepsilon_{xe} / C_{44} = \tau_{xy} / \gamma_{xye}$.

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 σ_y и σ_z был 45° . Образец нагружается по девиаторической траектории в плоскости xoz , ортогональной плоскости изотропии по оси y , 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 σ_x и σ_z был 45° . 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 $C_{55} = \tau_{yz} / \gamma_{yz e}$ и $C_{66} = \tau_{xz} / \gamma_{xz e}$.

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.

Список литературы

- 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 // 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 моноотропных глинистых грунтов / В. П. Писаненко // Труды НИИЖТа. – Вып. 180, 1977. – С. 74–79.
- 4 Способ определения коэффициентов упругости трансверсально-изотропного грунта / пат. № 5618, Респ. Беларусь / В. В. Талецкий.
- 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.

Получено 16.10.2017

V. V. Taletski. The method of determining the constant coefficients of elasticity of orthotropic soils.

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.

УДК 624.01/04

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ БЕТОНОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И КОНСТРУКЦИЯХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

Приведены результаты исследований применимости бетонов различных классов по прочности для разных эксплуатационных условий с учетом процессов карбонизации бетона и ее влияния на развитие коррозионных процессов в стальной арматуре. Показано, что при назначении в нормативных документах минимального класса бетона по прочности для планируемых сроков и условий эксплуатации необходимо учитывать граничные условия по карбонизации бетона и толщину защитного слоя бетона.

Введение. Основным процессом нейтрализации бетона железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК) в различных атмосферных условиях, вызывающим его структурные изменения, снижая защитные свойства по отношению к стальной арматуре, является карбонизация. Она создает условия для возникновения и развития коррозии стальной арматуры, приводя со временем к снижению несущей способности ЖБЭ (ЖБК) и созданию аварийных ситуаций.

Агрессивность эксплуатационных сред характеризуется не только постоянным содержанием в них углекислого газа воздуха различных концентраций. Так, для основных эксплуатационных условий агрессивность воздушных сред определяется следующими факторами:

– сельскохозяйственные здания: концентрация CO_2 – 0,1–1,0 %; относительная влажность – до 100 %; положительная температура в помещениях в течение всего года; наличие зон с повышенным содержанием CO_2 и влажности; длительные промежутки времени с учетом специфики вентиляции; постоянное длительное воздействие CO_2 и влажности в зимний период;

– общественные здания и промышленные – с неагрессивной эксплуатационной средой: концентрация CO_2 – 0,03–0,12 %; относительная влажность – до 100 %; положительная температура в помещениях в течение всего года;

– открытая атмосфера: концентрация CO_2 – 0,03–1,20 %; относительная влажность – до 100 %; периодический переход температуры через 0 °С; увлажнение атмосферными осадками различной степени интенсивности.

Обуславливая степень агрессивности эксплуатационных сред, вышеприведенные факторы ускоряют либо снижают скорость карбонизации, определяя элементы и конструкции (их участки) либо зоны зданий с обычным течением карбонизации, либо ускоренным.

Основная часть. Для оценки применимости бетонов различных классов по прочности (при обеспечении требуемой долговечности) в соответствующих эксплуатационных условиях исследовали совместно зависимости распределения по сечению бетона степени карбонизации бетона (показателя СК) и щелочности поровой жидкости (показателя pH) образцов бетона, отобранных из ЖБЭ, эксплуатировавшихся различные длительные сроки. Устанавливали взаимосвязь показателей pH и СК и их граничные значения. Максимальные значения карбонатной составляющей (показателя K_{Cmax}) устанавливали с учетом предельной величины карбонизации (показателя ПВК) и изменения степени гидратации цемента (показателя α).

Показатели K_{C} , K_{Cmax} , pH, СК и ПВК определяли по методикам [1]. Степень гидратации цемента и его изменение во времени находили по методикам докт. техн. наук, проф. В. В. Бабицкого.

В качестве граничных значений приняты: планируемый срок эксплуатации – 50 лет (СТБ EN 206-1-2011); степень карбонизации бетона – 13 % (pH = 11,8 – граничное значение потери бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре [2]); СК = 18 % (pH = 11,3 – граничное значение показателя pH, при котором наблюдается начало поверхностной коррозии стальной арматуры в условиях переменной влажности); СК = 26 % (pH = 10,8 – граничное значение показателя pH, при котором развивается критическая коррозия (уменьшение площади поперечного сечения стальной арматуры диаметров $\varnothing \leq 10$ мм более, чем на 25 %)); СК = 36 % (pH = 10,3 – граничное значение изменения окраски цементно-песчаной фракции бетона при использовании фенолфталеинового теста, используемого по современным нормативам для оценки толщины карбонизированного бетона).

Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ применения рекомендуемых классов бетона по прочности для планируемого срока службы 50 лет

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации (авторские)	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый минимальный класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2011	СНБ 5.03.01-02	Авторский
СК = 13 %; pH = 11,8					
XC1	ОПЗ О	10	$\text{C}^{20}_{/25}$	$\text{C}^{12}_{/15}$	$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		15			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		20			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		25			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
XC2	А О	10	$\text{C}^{25}_{/30}$	$\text{C}^{16}_{/20}$	$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		15			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		20			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$
		25			$\gg \text{C}^{30}_{/37}$