Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2014. № 4 (22). С. 188–192

А. В. Пилягин

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Чебоксарский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)"

Аннотация. Приводится методика определения модуля деформации грунтов по данным прессиометрических испытаний с использованием задачи Ламе о напряжениях и перемещениях толстостенного полог цилиндра под действием внутреннего и внешнего давлений.

Ключевые слова: задача Ламе, модуль деформации, напряжение, скважина, грунт, основание, перемещение.

УДК: 624.131.54: 624.131.38

Для определения напряженно-деформированного состояния оснований (грунтов) фундаментов используется математический аппарат теории упругости (закон Гука, законы: Буссинеска, Миндлина, Кельвина т.д.) с соответствующими оговорками. Грунт не является упругим материалом, но является линейно деформационным до определенного давления. Поэтому основная деформационная характеристика – модуль упругости заменяется модулем общей деформации, а грунт рассматривается как линейно деформируемая среда.

Существующие ГОСТы по определению модуля деформации грунтов включают и прессиометрический метод.

В пробуренную на площадке скважину опускают цилиндрический аппарат (прессиометр), имеющий эластичную камеру, давление в которой создается гидравлическим (вода) или пневматическим путем. При этом измеряется давление радиуса скважины.

Методика определения модуля деформации по данным прессиометрических испытаний изложена в ГОСТ 20276-99 [1]. В соответствии с данным ГОСТом модуль деформации определяется по линейному участку кривой зависимости изменения радиуса скважины в зависимости от приложенного давления по формуле

$$E = k_z r_0 \frac{\Delta \mathrm{P}}{\Delta \mathrm{r}}, \tag{1}$$

где r_0 – радиус скважины после приложенного давления, ΔP – приращение давления, Δr – увеличение радиуса скважины в интервале указанных давлений.

Коэффициент k_z рассматривается как корректирующий коэффициент, принимающий при испытании в медленном режиме следующие значения: для песка и супеси $k_z = 1,3$ для суглинка $k_z = 1,35$ и для глин $k_z = 1,42$. В быстром режиме значения k_z принимаются по таблице 1.

Поступила 10.11.2014

Таблица 1

Значение коэффициента k_z

Наименование грунта	Глубины испытаний	
	до 10 м	10÷20 м
Глинистый грунт при I_L равном:		
$I_L<0{,}25$	2	1,75
$0{,}25\leq I_L<0{,}5$	3	2,5
$I_L>0{,}5$	4	3,5

Анализ таблицы 1 показывает, что с ростом показателя текучести J_L увеличивается значение k_z, а следовательно, и модуль общей деформации, что не соответствует действительности.

Кроме того, значение k_z снижается с увеличением глубины скважины, что приводит к снижению модуля общей деформации. Фактически модуль общей деформации грунтов с увеличением глубины должен возрастать. Как известно, формула определения модуля общей деформации грунта по данным прессиометрических испытаний базируется на осесимметричной задаче Ламе о напряжениях и перемещениях толстостенного бесконечно длинного цилиндра под действием внутреннего и внешнего давлений.

Полное решение задачи Ламе можно найти в курсах теории упругости. Нас интересуют перемещения цилиндра под действием внутреннего давления $P_в$ и наружного давления $P_н$ от собственного веса грунта на глубине проведения испытаний.

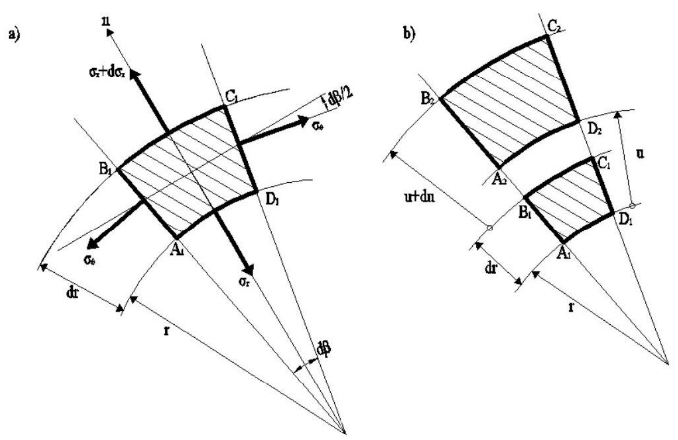

Рис. 1. Схема нагруженного (a) и деформированного (b) состояния части цилиндра

Обратимся к выводу формулы Ламе (рис. 1a), для чего рассмотрим равновесие элементарной трапеции $A_1B_1C_1Д_1$ сечения цилиндра с центральным углом $d\beta$. На боковых гранях A_1B_1 и $C_1Д_1$ будут действовать окружные напряжения σ_θ; а на внутренней поверхности элемента $A_1Д_1$ радиальные – σ_r. На внешней границе B_1C_1 радиальные напряжения будут равны $\sigma_r+d\sigma_r$. В виду симметрии кольца и нагрузок выделенный элемент не будет перекашиваться, следовательно, на его гранях будут отсутствовать касательные напряжения. Поэтому напряжения σ_r и σ_θ будут главными, а величина σ_θ не будет зависеть от полярного угла β.

Уравнение равновесия для элемента $А_1В_1С_1Д_1$ в виде суммы всех сил на нормаль к цилиндрической поверхности выглядит следующим образом:

$$-\sigma_r \cdot r \cdot d\beta + (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\beta - 2\sigma_\theta \cdot dr \cdot \sin\frac{d\beta}{2} = 0, \tag{2}$$

Данное выражение приводится к виду

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0\sigma. \tag{3}$$

Рассмотрим деформации элемента $А_1В_1С_1Д_1$ (рис. 1b). Ввиду симметрии увеличение внутреннего давления приведет к радиальному перемещению всех точек цилиндра. Так, точки $А_1$ и $Д_1$ сместятся в радиальном направлении на величину (u) в положения $А_2$ и $Д_2$, а точки $В_1$ и $С_1$ – на величину $u + du$ в положения $В_2$ и $С_2$.

Тогда относительная радиальная деформация грани $А_1В_1$ будет равна

$$\varepsilon_r = \frac{А_1В_1 - АВ}{АВ} = \frac{ВВ_1 - АА_1}{АВ} = \frac{(u + du) - u}{dr} = \frac{du}{dr}, \tag{4}$$

относительная окружная деформация грани $А_1Д_1$ равна

$$\varepsilon_\theta = \frac{А_2Д_2 - А_1Д_1}{А_1Д_1} = \frac{(r+u) \cdot d\beta - r \cdot d\beta}{r \cdot d\beta} = \frac{u}{r}. \tag{5}$$

В соответствии с законом Гука для плоского напряженного состояния можно записать

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-\mu^2)}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta). \tag{6}$$

С учетом вышеизложенного получим линейное дифференциальное уравнение 2-го порядка с переменными коэффициентами относительно радиальных перемещений, т. е.

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0. \tag{7}$$

Общее решение данного уравнения сводится к виду

$$u = A \cdot r + B/r, \tag{8}$$

где А и В – постоянные интегрирования, вычисляемые с учетом граничных условий.

Постоянные интегрирования А и В вычисляются при совместном решении следующих уравнений:

$$\begin{aligned} &\text{при } r = r_{\text{н}}, \quad \sigma_r = \tfrac{E}{1-\mu^2}\left[\text{А}(1+\mu) - \text{В}\tfrac{1-\mu}{r_{\text{н}}^2}\right] = \sigma_{\text{н}}, \\ &\text{при } r = r_{\text{в}}, \quad \sigma_r = \tfrac{E}{1-\mu^2}\left[\text{А}(1+\mu) - \text{В}\tfrac{1-\mu}{r_{\text{в}}^2}\right] = \sigma_{\text{в}}. \end{aligned} \tag{9}$$

Решение данных уравнений дает следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{А} &= \tfrac{1-\mu}{E}\left(\tfrac{r_{\text{в}}^2 \cdot \sigma_{\text{в}} - r_{\text{н}}^2 \cdot \sigma_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2}\right), \\ \text{В} &= \tfrac{1-\mu}{E}\left(\tfrac{r_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{н}}^2(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}})}{r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2}\right). \end{aligned} \tag{10}$$

Для возможности использования решения данной задачи применительно к прессиометрическим испытаниям необходимо принять значение наружного радиуса $r_{\text{н}} = \infty$ (бесконечное распространение грунта) и вычислить пределы выражений

$$\begin{aligned} &\lim_{r_{\text{Н}} \to \infty} (\sigma_{\text{в}} \cdot r_{\text{в}}^2 - \sigma_{\text{н}} \cdot r_{\text{н}}^2)/(r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2) = \sigma_{\text{н}}, \\ &\lim_{r_{\text{Н}} \to \infty} (r_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{н}}^2)(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}})/(r_{\text{н}}^2 - r_{\text{в}}^2) = r_{\text{в}}^2(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}}). \end{aligned} \tag{11}$$

Тогда радиальные перемещения можно вычислить по формуле

$$u = \frac{r_{\text{в}}}{E}\left[(1+\mu)(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}}) - \sigma_{\text{н}}(1-\mu^2)\right]. \quad (12)$$

Зная горизонтальные перемещения стенок камеры прессиометра (увеличение радиуса скважины) и давление внутри камеры $\sigma_{\text{в}}$ и снаружи $\sigma_{\text{н}}$ (давление грунта), модуль деформации грунта можно определить по следующей формуле

$$E = \frac{(1+\mu)(\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{н}}) - \sigma_{\text{н}}(1-\mu^2)}{u}. \quad (13)$$

В качестве наружного давления $P_{\text{н}}$ принимали величину природного давления от собственного веса грунта на глубине расположения прессиометра. При горизонтальной поверхности грунта вертикальные и горизонтальные напряжения от собственного веса грунта будут равны

$$\sigma_{zy} = \sigma_{zg} = \gamma \cdot h, \quad (14)$$

где γ – удельный вес грунта в пределах глубины расположения (h) прессиометра.

Полученная формула учитывает коэффициент Пуассона грунта и глубину погружения прессиометра путем приложения внешнего давления, равного природному. Природное давление увеличивается пропорционально глубине погружения прессиометра, что ведет к снижению горизонтальных (радиальных) перемещений, а следовательно, и увеличению модуля деформации грунта. Следовательно, в однородных грунтах модуль деформации грунта должен возрастать с увеличением глубины скважины (расположение прессиометра). В существующем ГОСТе эта зависимость обратная.

Выводы:

1. Аналитически показано увеличение модуля деформации однородного грунта от глубины проведения прессиометрических испытаний.

2. Внешнее давление при проведении прессиометрических испытаний равно природному давлению на глубине расположения прессиометра.

3. Прессиометрические испытания характеризуют сжимаемость грунта в горизонтальном направлении. Сжимаемость грунта в вертикальном направлении может быть оценена с учетом коэффициента анизотропии, полученного по данным компрессионных испытаний для образцов грунта, взятых в указанных направлениях (горизонтальное и вертикальное).

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Грунты.* Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – 86 с.

[2] *Пилягин, А. В.* Определение модуля общей деформации грунтов с использованием задачи Ламе / А. В. Пилягин // Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Чебоксары, 16–21 июня 2014 г.): в 2 ч. Ч. 2. – С. 143–149.

Пилягин Алексей Васильевич,

доктор технических наук, профессор, Чебоксарский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВПО "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)", г. Чебоксары

`e-mail:` pilyagin.alexei@yandex.ru

A. V. Pilyagin

IMPROVING THE OF DETERMINATION OF MODULUS OF DEFORMATION OF SOILS ACCORDING TO TESTS IN WELLS

Cheboksary Polytechnical Institute (Branch) of "Moscow state machine-building university (MAMI)"

Abstract. The methods of determining the modulus of deformation of soils tests results in welles using tasks Lama about the stresses and displacements of a hollow cylinder under internal and external pressures.

Keywords: task Lama, the modulus of deformation, stress, dispalacements, well, soil.

REFERENCES

[1] *Soil.* Methods of field definition of characteristics of durability and deformability. – M. : STATE UNITARY ENTERPRISE OF TSPP, 2000. – 86 p.

[2] *Pilyagin, A. V.* Definition of the module of the general deformation of soil with use of a task to Lama / A. V. Pilyagin // Materials VIII of the All-Russian conference on mechanics of a deformable solid body (Cheboksary, on June 16–21, 2014): в 2 p. Part 2. – P. 143–149.

Pilyagin, Alexey Vasilyevich

Doctor of Engineering, Professor, Cheboksary Polytechnical Institute (Branch) of "Moscow state machine-building university (MAMI)", Cheboksary