

**БОЛДЫРЕВ Г.Г.**

Профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по науке и инновациям ООО «НПП Геотек», г. Пенза  
g-boldyrev@geotek.ru

**МЕЛЬНИКОВ А.В.**

Аспирант Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза  
alexvmuller@gmail.com

**НОВИЧКОВ Г.А.**

Аспирант Пензенского государственного университета архитектуры и строительства  
gn@s-teh.biz

**КОЛЕСНИКОВ А.С.**

Аспирант Пензенского государственного университета архитектуры и строительства  
kolart91@gmail.com

УДК 624.131

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ИЗ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

*Ключевые слова: лабораторные испытания; интерпретация результатов испытаний; компрессионные испытания; трехосные испытания; расчетный модуль деформации; нормативный модуль деформации; упругий модуль деформации; коэффициенты надежности; осадка фундамента; методы расчета.*

*У статті розглянуті методи інтерпретації результатів лабораторних випробувань дисперсних ґрунтів з метою визначення їх деформаційних характеристик. Описано процедури визначення модулів деформації за даними компресійних і тривісних випробувань. Розглянуто застосування модулів деформації при розрахунку осідання фундаментів.*

*В статье рассмотрены методы интерпретации результатов лабораторных испытаний дисперсных грунтов с целью определения их деформационных характеристик. Описаны процедуры определения модулей деформации по данным компрессионных и трехосных испытаний. Рассмотрено применение модулей деформации при расчете осадок фундаментов.*

*The article describes interpretation methods of laboratory test results to determine deformation characteristics of dispersed soils. Procedures of determination of the deformation moduli using compression and triaxial test data are described. Application of the elastic and deformation modulus for calculation of foundation settlements is considered.*

Основным параметром, характеризующий сжимаемость грунтов, является модуль общей деформации  $E$ . Он используется при расчетах осадок фундаментов методом послойного элементарного суммирования [7] и называется нормативным модулем деформации, который определяют с коэффициентом надежности  $\gamma_g=1$  [5].

Кроме модуля деформации к параметрам, характеризующим сжимаемость и начальное напряженное состояние грунта, относятся: коэффициент Пуассона  $\nu$ ; давление предварительного уплотнения  $\sigma_p$ ; степень

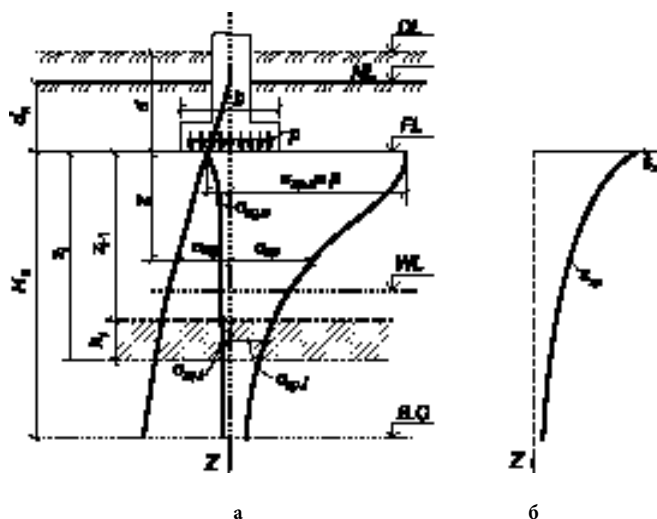
переуплотнения  $OCR$ ; модуль сдвига  $G$ ; модуль объемной деформации  $K$ ; коэффициент бокового давления в состоянии покоя  $K_0$ ; коэффициент первичной консолидации  $c_v$ ; коэффициент вторичной консолидации  $c_{\alpha}$ ; предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов  $R_c$ . Эти характеристики определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 12248 [4] и СП 47.13330 [11]. В то же время СП 22.13330 [7], СП 23.1330 [8], СП 24.13330 [9], СП 25.13330 [10], МДС [13] и ПиНАЭ 5.10-87 [6] допускают применение других параметров, характеризующих взаимодействие фундамента с грунтом основания и установленных опытным путем (удельных сил пучения при промерзании, коэффициента жесткости основания и др.). В некоторых случаях, когда применяются численные методы расчета оснований, требуются иные параметры, количество и вид которых зависят от принятой модели грунта и используемой программы [1, 12, 17].

В соответствии с основными нормативными [7–10] и ведомственными документами [6, 13] расчет оснований зданий и сооружений следует выполнять по двум группам предельных состояний – по несущей способности и по деформациям. Расчет деформаций обязателен во всех случаях, за исключением скальных оснований. Он заключается в определении осадки фундамента и согласно СП 22.13330 выполняется с использованием расчетной схемы, представленной на рисунке 1, и следующего выражения:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zpi} - \sigma_{zpi-1}) h_i}{E_{z,i}} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zpi} h_i}{E_{z,i}}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент, характеризующий поперечное расширение грунта, равный 0,8;  $\sigma_{zpi}$  – среднее значение вертикального напряжения в  $i$ -ом слое грунта по верти-

кали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при отрывке котлована грунта, кПа;  $\sigma_{\tau, i}$  - среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в  $i$ -ом слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа;  $h_i$  - толщина  $i$ -го слоя грунта, см;  $n$  - количество элементарных слоев грунта в пределах сжимаемой толщи;  $E_i$  - модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа;  $E_{e, i}$  - модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения, кПа



**Рис.1.** Расчетная схема к определению осадки фундамента (а) и эпюра вертикальной деформации (б):  $d$  - глубина заложения подошвы фундамента;  $b$  - ширина фундамента;  $p$  - давление под подошвой фундамента;  $H_c$  - глубина сжимаемой толщи;  $DL$  - отметка природного рельефа;  $NL$  - отметка планировки;  $FL$  - отметка подошвы фундамента;  $WL$  - отметка уровня грунтовых вод;  $V.C.$  - нижняя граница сжимаемой толщи.

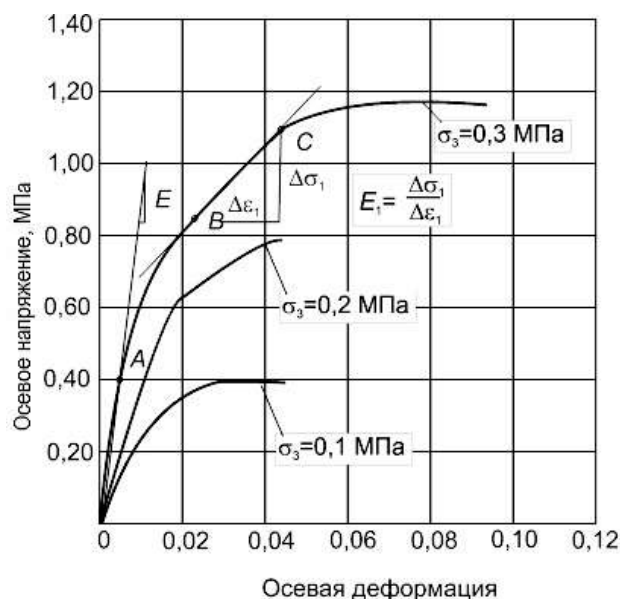
Как следует из формулы (1), для расчета осадки методом послойного суммирования необходимо не только знать напряжения от нагрузки и от собственного веса грунта, но и определить два модуля деформации. Уравнение (1) используется в том случае, если давление под подошвой фундамента не превышает расчетного сопротивления грунта. Последнее находится согласно СП 22.13330 с использованием прочностных характеристик грунта (угла внутреннего трения  $\varphi$ , удельного сцепления  $c$ ) и удельного веса  $\gamma$ . Таким образом, для расчета осадки с использованием формулы (1) необходимо определить характеристики грунтов, приведенные в таблице 1, на глубину, которая не меньше мощности сжимаемой толщи грунта  $H_c$  (см. рис. 1, а).

В последние годы чаще стали выполнять расчеты осадок фундаментов с использованием законов нелинейной

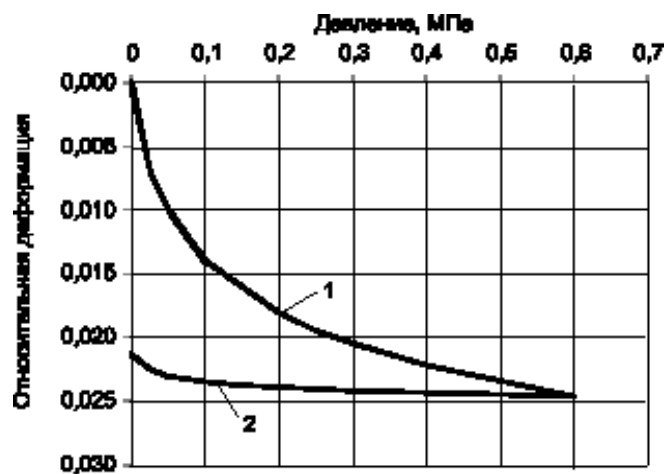
Таблица 1. Характеристики грунтов, необходимые для расчета осадки по СП 22.13330

Характеристика	Обозначение	Размерность
Модуль деформации	$E$	кПа
Модуль деформации при разгрузке	$E_e$	кПа
Коэффициент Пуассона	$\nu$	безразм.
Угол внутреннего трения	$\varphi$	град.
Удельное сцепление	$c$	кПа
Удельный вес грунта	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>

механики грунтов. Основным преимуществом по сравнению с применением метода послойного суммирования (1) здесь является возможность определения осадки фундамента при давлении под его подошвой, превышающем расчетное сопротивление грунта. В этом случае используются более сложные модели грунта, с большим количеством характеристик, определяемых опытным путем [12]. Для примера в таблице 2 представлены показатели свойств грунтов (параметры модели), которые необходимо определить для расчета осадки с использованием модели упрочняющегося грунта (на однородном песчаном основании) при дренированном типе его поведения в программе PLAXIS [17], а на рисунке 2,3 - результаты испытаний песка в условиях трехосного и компрессионного сжатия.



**Рис.2.** Результаты испытаний в условиях трехосного сжатия:  $\sigma_3$  - боковое давление;  $E$  - начальный модуль деформации;  $E_i$  - секущий модуль деформации;  $\Delta \epsilon_i$  - приращение осевой деформации;  $\Delta \sigma_i$  - приращение осевого напряжения.



**Рис.3.** Результаты испытаний в условиях компрессионного сжатия: 1 - ветвь первичного нагружения, 2 - ветвь разгрузки.

Таблица 2. Параметры модели упрочняющегося грунта (Hardening soil model [12, 17]) при дренированном типе его поведения

Группа параметров	Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Общие свойства	Удельный вес грунта выше уровня грунтовых вод	$\gamma_{\text{нашл}}$	15,2	кН/м <sup>3</sup>
Параметры грунта	Секундный модуль деформации при консолидации в одно- или дренированном состоянии при трехосном сжатии	$E_{30}^{\text{ref}}$	26000	кПа
	Касательный модуль деформации при испытаниях в одометре	$E_{\text{сод}}^{\text{ref}}$	19000	кПа
	Модуль деформации при разгрузке	$E_{\text{р}}^{\text{ref}}$	110000	кПа
	Показатель степени зависимости модуля деформации от напряжений	$m$	0,80	-
	Сцепление	$c'_{\text{ref}}$	1,0	кПа
	Угол внутреннего трения	$\varphi'$	35,0	град.
	Угол дилатансии	$\psi'$	4,7	град.
	Коэффициент Пуассона	$\nu$	0,3	-
	Максимально возможное растягивающее напряжение	$\sigma_{\text{растяж}}$	0,0	кПа
	Начальный коэффициент пористости	$e_0$	0,750	-
	Минимальный коэффициент пористости	$e_{\text{min}}$	0,563	-
	Максимальный коэффициент пористости	$e_{\text{max}}$	0,850	-
Параметр асимптоты девиатора напряжений	$R_f$	0,85	-	
Параметры интерфейсного элемента	Коэффициент снижения прочности в интерфейсе	$R_{\text{inter}}$	0,29	-
Параметры начального напряженного состояния	Коэффициент бокового давления грунта	$K_0$	0,426	-
	Коэффициент переплотнения	$\alpha_{CR}$	1,0	-
	Давление предварительного уплотнения	$\sigma_p$	0,0	кПа

Секундный модуль упругости  $E_{30}^{\text{ref}}$  и модуль упругости в цикле «разгрузка – повторное нагружение»  $E_{\text{р}}^{\text{ref}}$  являются величинами, зависящими от удельного сцепления  $c$ , угла внутреннего трения  $\varphi$ , наименьшего главного напряжения  $\sigma_3$ , и определяются по данным трехосных испытаний по формулам:

$$E_{30} = E_{30}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \varphi + \sin \varphi \sigma_3}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m, \quad (2)$$

$$E_{\text{сод}} = E_{\text{сод}}^{\text{ref}} \left( \frac{c \cos \varphi + \sin \varphi \sigma_1}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m, \quad (3)$$

где  $m$  – показатель степени, предложенный в работе [16] для оценки изменения модуля деформации при изменении действующего напряжения по отношению к атмосферному давлению  $p_{\text{ref}}=100\text{кПа}$ . Параметр  $m$  для большинства грунтов изменяется в пределах от 0 до 1.

На рисунках 4, 5 приведены значения модулей деформации, определенные с использованием формул (2)

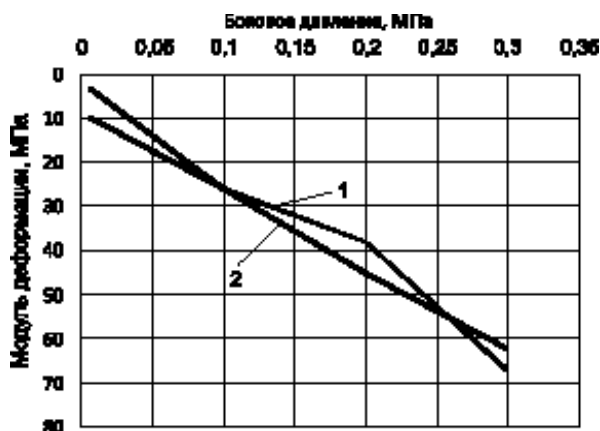


Рис.4. Трехосные модули деформации: 1 – полученный по лабораторным данным; 2 – вычисленный по формуле (2).



Рис.5. Одометрические модули деформации: 1 – полученный по лабораторным данным; 2 – вычисленный по формуле (3).

и (3), соответственно. Как видно из рисунков модули деформации изменяются линейно с ростом бокового (рис.4) или вертикального (рис. 5) давления.

Как следует из выражения (1), для расчета осадки фундаментов следует определить два модуля деформации – на ветвях первичного ( $E$ ) и вторичного ( $E_e$ ) нагружения (на OABE и BCD соответственно на рис. 6, в). Модули деформации определяют путем испытаний образцов грунта в условиях одномерной (при компрессионном сжатии) и осесимметричной (при трехосном сжатии) деформации. При испытании в условиях плоской деформации получится значение модуля, отличающееся от предыдущих. Если дополнительно выполнить тест на истинное трехосное сжатие, то получим еще одно значение. Эти различия обусловлены разными видами напряженного состояния, возникающего в образцах грунта при их испытаниях в неодинаковых условиях [1]. Таким образом, мы насчитали шесть модулей деформации. Однако это еще не все. Если провести испытания в условиях трехосного сжатия по траектории сжатия и расширения (рис. 6, а, б), то получим различные значения модулей деформации для одного и того же грунта.

Полевые испытания также дают различные значения модуля деформации. Наибольшее значение получим, если проведем испытания плоским круглым штампом с кольцевой пригрузкой. При этом модуль деформации зависит от площади штампа, возраста с ее увеличением. Испытания другими полевыми методами (с использованием прессиометра, динамического или статического зондирования, винтового или плоского штампа в скважине) также показывают неэквивалентные значения. Если учесть, что на практике наибольшее применение находят испытания винтовым штампом, пресси-

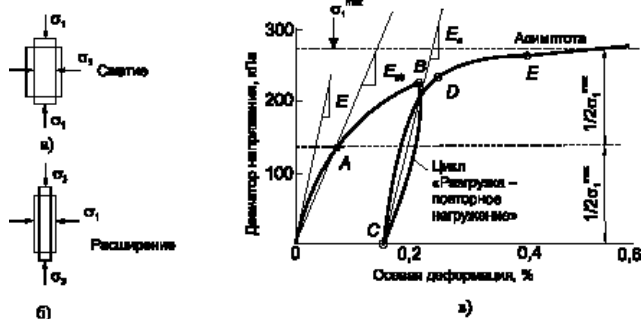


Рис.6. К определению модулей деформации в условиях трехосного сжатия: а – траектория сжатия; б – траектория расширения; в – зависимость деформации от напряжения..

ометром и статическое зондирование, то добавится еще три значения. Таким образом, имеем девять величин модуля деформации. Однако, если учесть что грунты по своей природе являются анизотропной средой, то следует добавить еще два модуля деформации, характеризующие сжимаемость грунта в горизонтальных направлениях.

Отсюда и вытекает основной вопрос: какие же модули деформации следует определять и применять при расчетах осадок фундаментов?

В теоретической механике грунтов, как и в механике сплошной среды, также используется несколько модулей деформации. Общим для них является то, что они являются параметрами закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная линейная деформация;  $\sigma$  – напряжение (кПа);  $E$  – модуль деформации (кПа).

Как видно из уравнения (4), модуль деформации является коэффициентом пропорциональности в зависимости деформации от напряжения и его можно найти из опытов, используя выражение:

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{E} \Delta \sigma, \quad (5)$$

где  $\Delta \varepsilon$  – приращение линейной деформации;  $\Delta \sigma$  – приращение напряжения.

Зависимость  $\varepsilon_i = f(\sigma_i)$  (где  $\varepsilon_i$  – осевая деформация,  $\sigma_i$  – осевое напряжение) только на начальном участке (см. рис. 2) показывает линейную связь между напряжениями и деформациями, которая имеет вид, подобный уравнению (4). При определенном уровне напряжений деформирование становится нелинейным (например, в точке А на рис. 2) и каждому последующему приращению деформации соответствует свой модуль деформации. Например, на участке ВС на рисунке 2 это модуль  $E_1$  и т.д. Эти модули называются секущими модулями деформации в определенном диапазоне наибольшего главного напряжения. Чем больше напряжение, тем ниже модуль. Наибольший модуль получают при уровне деформации, соответствующем начальному участку кривой деформирования. Его называют упругим модулем деформации и находят как тангенс угла наклона касательной к начальному линейному участку зависимости  $\varepsilon_i = f(\sigma_i)$ . Обычно его обозначают индексом  $E$  (см. рис. 2, б, в). В зарубежных источниках его часто называют модулем Юнга.

Таким образом, упругий, или начальный, модуль

деформации находят в пределах линейного участка зависимости «деформация – напряжение» исходя из предположения, что при уровне относительной деформации менее  $10^{-2}$  грунт ведет себя как упругое тело без возникновения остаточных деформаций, как на цикле «разгрузка – повторное нагружение».

Модулем деформации называют тот же коэффициент пропорциональности в зависимости (4), но при большем уровне деформации, когда при разгрузке возникает остаточная деформация. Если провести секущую из начала координат к любой точке кривой деформирования, то на начальном участке она будет совпадать с линейной частью зависимости «деформация – напряжение», а далее будет иметь различные углы наклона и, соответственно, из выражения (3) мы получим различные значения модуля деформации. Этот модуль зависит от величины действующего напряжения и уменьшается с ростом последнего. Его называют модулем деформации, иногда модулем общей деформации или секущим модулем деформации (см. рис. 2, в). Обозначают его по-разному, в зависимости от используемого решения. В СП 22.13330 он обозначен как  $E$  и называется модулем деформации.

Если теперь на какой-то ступени нагружения полностью разгрузить образец грунта, уменьшив напряжения до нуля, а затем увеличить их до прежнего уровня, то угол наклона секущей характеризует так называемый модуль деформации на вторичной ветви нагружения  $E_e$  (СП 22.13330). Его значение практически равно величине упругого модуля деформации. С большой осторожностью можно принять, что  $E_e = 5 \div 6E$  (по СП 22.13330).

Модуль деформации по данным испытаний на трехосное сжатие может быть найден с использованием зависимости, которая показана на рисунке. 2. В зависимости от схемы трехосных испытаний, данная зависимость может быть получена в консолидированно-дренированных, консолидированно-недренированных или неконсолидированно-недренированных условиях. На практике используются только результаты первых двух типов испытаний. В последнем случае начальные значения модулей деформации  $E$  совпадают.

Для того чтобы найти модуль деформации  $E_0$ , необходимо знать значения напряжений разгрузки, при достижении которых следует выполнить разгрузку образца грунта, а затем вновь его нагрузить (провести вторичное нагружение). В СП 22.13330 говорится, что разгрузку грунта следует учитывать, если глубина котлована более 5 м. На рисунке 6 (в) цикл «разгрузка – повторная нагрузка» обозначен петлей BCD. Напряжения разгрузки являются функцией собственного веса грунта, вынутого при устройстве котлована (рис. 7) и определяются произве-

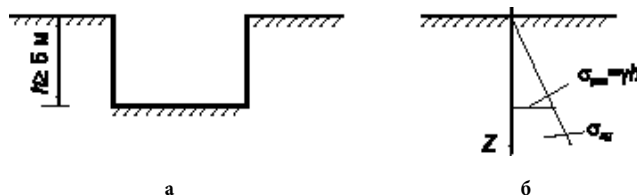


Рис.7. К определению напряжений разгрузки: а – котлован в разрезе; б – эпюра напряжений  $\sigma_{zg}$  от собственного веса грунта;  $\sigma_{раз}$  - напряжения от веса грунта удаленного при разработке котлована;  $h$  - глубина котлована;  $\gamma$  - удельный вес грунта, при наличии грунтовых вод находится с учетом взвешивающего действия воды.



дением удельного веса  $\gamma$  грунта и глубины  $h$ , т.е.  $\sigma_p = \gamma h$ .

Из рассмотренного следует, что модуль деформации не является физической характеристикой грунта и для одного и того же грунта будет иметь различные значения в зависимости от уровня действующего напряжения или деформации. Можно, конечно, сказать, что начальный, или упругий, модуль деформации характеризует жесткость грунта и чем больше жесткость (например, для твердой глины), тем больше его величина.

Модули деформации допускается определять, используя различные методы лабораторных [1] и полевых [2] испытаний грунтов. По данным испытаний в условиях компрессионного сжатия находим компрессионный

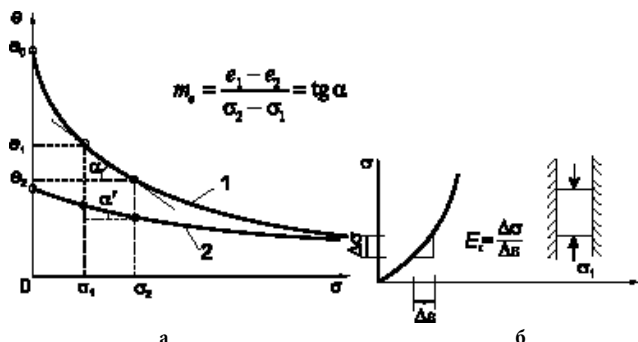


Рис.8. К определению компрессионного (а) и одометрического (б) модулей деформации по данным испытаний в условиях компрессионного сжатия: 1 – ветвь первичного нагружения; 2 – ветвь разгрузки.

сионный ( $E_k$ , рис. 8, а) и одометрический ( $E_{од}$ , рис. 8, б) модули деформации.

Все остальные обозначения приведены ниже.

$$E_k = \frac{\beta}{m_v}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий поперечное расширение грунта в основании под фундаментом,  $\beta = \frac{1-2\nu}{1-\nu}$ ;  $m_v = \frac{m_o}{1+e_o}$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $m_o$  – коэффициент сжимаемости;  $e_o$  – начальное значение коэффициента пористости.

Одновременно с компрессионным можно найти одометрический модуль деформации, используя для этого зависимость осевой деформации от нормального давления  $\epsilon = f(p)$ , которая показана на рисунке 8, б. Этот модуль также находится в выбранном интервале нормального давления:

$$E_{од} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}. \quad (7)$$

Между компрессионным и одометрическим модулями деформации существует следующая связь:

$$E_k = \beta E_{од}. \quad (8)$$

Так как и компрессионный, и трехосный модули деформации зависят от выбранного интервала нормального давления, их значения в  $i$ -м слое грунта (см. рис. 1, а) следует определять используя значения вертикальных сжимающих напряжений  $\sigma_p$  от давления  $p$  под подошвой проектируемого фундамента. Как видно из рисунка 9, модули деформации определяют с учетом напряжений как от собственного веса грунта ( $z\gamma$ ), так и от внешней нагрузки ( $\sigma_p$ ) на заданной глубине под фундаментом.

Так как на стадии лабораторных испытаний грунтов напряжения  $\sigma_p$  неизвестны, то в отчете следует приво-

дить значения модуля деформации для всех интервалов нормального давления (при компрессионных испытаниях) и вертикального напряжения  $\sigma_i$  (при трехосном сжатии). Это позволит использовать в расчетах осадок фундаментов различные значения модулей деформации, как показано на рисунке 9.

Компрессионный модуль деформации  $E_k$  является величиной переменной, зависящей от значения нормального давления  $\sigma$ . При расчете осадки с использованием этого модуля его значение принимают из интервала нормального давления, равного дополнительным напряжениям  $\sigma_p$  в рассматриваемом слое грунта в пределах сжимаемой толщи (по п. 5.6.31 СП 22.13330). Поэтому в инженерно-геологических отчетах следует приводить не одно значение компрессионного модуля деформации в интервале нормального давления 0,1÷0,2 МПа, а во всех исследованных интервалах нормального давления.

Из лабораторных методов испытаний только метод трехосного сжатия более реально моделирует поведение грунта под действием внешней нагрузки, так как при испытаниях учитывается начальное напряженное состояние от собственного веса. Если провести испытания образцов грунта при различном всестороннем давлении (среднем напряжении  $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – максимальное и минимальное главные напряжения соответственно), то результаты испытаний можно представить в виде следующей зависимости:

$$E = E_o \left( \frac{\sigma_{cp}}{p_a} \right)^\alpha, \quad (9)$$

где  $E_o$  – модуль упругости;  $\sigma_{cp}$  – среднее нормальное напряжение;  $p_a$  – атмосферное давление;  $\alpha$  – параметр, зависящий от плотности грунта (коэффициента пористости).

Зависимость (9) показывает влияние среднего напряжения на модуль деформации грунта, который нелинейно возрастает с ростом среднего напряжения или глубины отбора монолитов грунта.

Как уже было отмечено ранее, модуль деформации изменяется с ростом напряженного состояния в рассматриваемой точке грунта, что наглядно видно из рисунка 10. На нем показано изменение модуля сдвига от начального ( $G_o$ ) до минимального значения при деформации сдвига более 0,1%. В области малых деформаций сдвига «жесткость» грунта характеризуется наибольшим значением модуля сдвига, который является чисто упругим модулем. С ростом сдвиговых деформаций модуль сдвига уменьшается до минимального значения при достижении предельной нагрузки.

Упругий модуль сдвига можно найти по данным лабо-

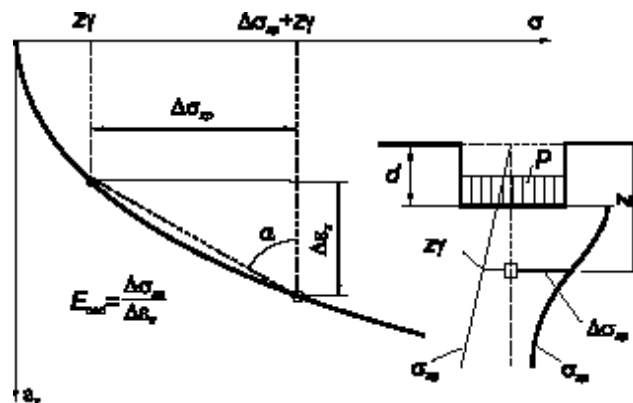


Рис.9. К определению одометрического модуля деформации.

раторных испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия. Аналитическое выражение для определения  $G_o$  (кПа) песчаных грунтов имеет следующий вид:

$$G_o = A \frac{(B - e)}{1 + e} (\sigma'_c)^{1/2}, \quad (10)$$

где  $\sigma'_c$  – среднее (октаэдрическое) напряжение, кПа;  $e$  – коэффициент пористости;  $A, B$  – эмпирические параметры ( $A = 6908, B = 2,17$  для песка с окатанными частицами;  $A =$

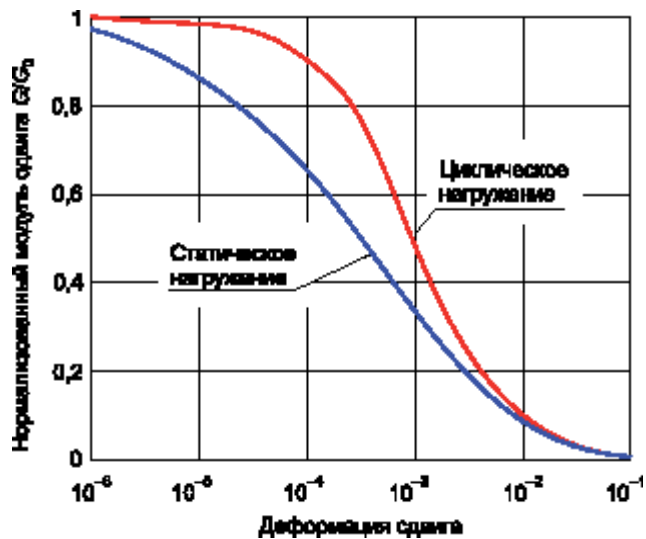


Рис.10. Изменение нормированного модуля сдвига  $G/G_o$  с ростом деформации сдвига [15, 18]:  $G$  – модуль сдвига;  $G_o$  – начальное значение модуля сдвига.

3230,  $B = 2,97$  для песка с угловатыми частицами).

Для глинистых грунтов подобное выражение было предложено в работе [14]:

$$G_o = A \frac{(B - e)}{1 + e} OCR^n (\sigma'_c)^{1/2}, \quad (11)$$

где OCR – коэффициент переуплотнения;  $n$  – коэффициент, зависящий от числа пластичности.

Далее, зная начальное значение упругого модуля сдвига  $G_o$  и уровень деформации сдвига в  $i$ -м слое грунта под фундаментом, из рисунка 5 можно найти соответствующее значение упругого модуля деформации  $E_o$  по формуле:

$$E_o = 2G_o(1 + \nu), \quad (12)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Данную процедуру можно применять на практике, но при условии, что вы имеете зависимость, которая приведена на рисунке 10 и знаете уровень деформации сдвига в основании проектируемого здания или сооружения. Естественно, что эта задача не для геолога, а для геотехника, и ее несложно решить, имея результаты испытаний.

В большинстве случаев геологам не приходится определять упругие модуль деформации и модуль сдвига, так как при проектировании оснований зданий и сооружений преимущественно применяются стандартные методы расчетов, приведенные в соответствующих сводах правил [7–11]. Как видно из формулы (1), осадку можно рассчитать, если известны два модуля: модуль деформации  $E$  по ветви первичного нагружения и для случая зданий с подземной частью; модуль деформации по ветви вторичного нагружения  $E_e$ . Эти модули можно найти по данным испытаний образцов грунта в компрессионном приборе или в установ-

ке трехосного сжатия.

Остается нерешенным еще один вопрос: как получить расчетный модуль деформации по результатам лабораторных испытаний?

Нормативные и расчетные значения характеристик грунтов определяются путем испытаний их образцов в лабораторных условиях и прямым способом в полевых условиях. В расчетах оснований по деформациям используют нормативные значения характеристик [5, 7].

Нормативные значения определяют как среднестатистические, получаемые осреднением их частных значений, или по аппроксимирующим зависимостям между измеряемыми в опытах (или функционально с ними связанными) величинами.

Расчетное значение получают делением нормативного значения на коэффициент надежности по грунту.

Коэффициент надежности по грунту должен устанавливаться с учетом изменчивости и числа определений параметра (числа испытаний) при заданной доверительной вероятности.

В СП 22.13330 для нормативных характеристик коэффициент надежности  $\gamma_g$  равен единице, т.е. статистический разброс не учитывается. Однако это неверно, т.к. при расчете, например, кренов фундамента коэффициент надежности под одной частью фундамента следует принимать большим, чем единица, а под противоположной – меньшим [3]:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 \pm \rho_a}, \quad (13)$$

где  $\rho_a$  – показатель точности определяемой характеристики.

Знак перед  $\rho_a$  принимают таким, чтобы обеспечивалась большая надежность основания или сооружения. На практике, используя формулу (13), в знаменателе применяют знак «+», полагая, что заниженные значения определяемых характеристик обеспечивают более высокую надежность оснований или сооружений (как отмечено в ГОСТ 20522). Это верно для расчетов оснований по первому предельному состоянию, но не всегда верно для расчетов по второму предельному состоянию.

В СП 22.13330 расчеты оснований по деформациям выполняются с использованием нормативных значений характеристик грунтов, а по несущей способности – с использованием их расчетных значений  $X$ , определяемых по формуле:

$$X = \frac{X_n}{\gamma_g}, \quad (14)$$

где  $X_n$  – нормативное значение данной характеристики;  $\gamma_g$  – коэффициент надежности по грунту.

В СП 22.13330 при расчетах по второму предельному состоянию коэффициент надежности для модуля деформации грунта принимается равным единице. При этом не учитывается статистическая неоднородность модуля деформации. Эту неоднородность можно отразить следующим образом: коэффициент надежности под одной частью фундамента больше, а под другой меньше единицы.

Следует иметь в виду, что при расчете осадки методом последнего суммирования (1) используется не компрессионный ( $E_k$ ), а расчетный ( $E$ ) модуль деформации, который определяется путем умножения  $E_k$  на повышающий коэффициент  $m_k$ . То же справедливо и для трехосных испытаний. Несмотря на то что трехосный модуль деформации больше компрессионного, он не равен штамповому. Поэтому для перехода от трехосного модуля к расчетному необходимо также использовать коэффициент перехода,

значение которого можно найти из сопоставительных опытов винтовым или плоским штампами.

В п. 5.3.6 СП 22.13330 даны следующие рекомендации: «Для сооружений I и II уровней ответственности значения  $E$  по лабораторным данным должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами, прессиометрами..., а также в приборах трехосного сжатия. Для сооружений III уровня ответственности допускается определять значения  $E$  только по результатам компрессионных испытаний, корректируя их с помощью повышающих коэффициентов  $m_k$ , приведенных в табл. 5.1 СП 22.13330. Эти коэффициенты распространяются на четвертичные глинистые грунты с показателем текучести  $0 < I_L \leq 1$ , при этом значения модуля деформации по компрессионным испытаниям следует вычислять в интервале давлений 0,1–0,2 МПа, а значение коэффициента  $\beta$ , учитывающего отсутствие поперечных деформаций грунтов, принимать в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248».

В связи с тем что большинство проектируемых зданий и сооружений относится к I или II уровню ответственности, на практике применять таблицу 5.1 СП 22.13330 следует с большой осторожностью. Кроме того, в ней даются коэффициенты перехода для давлений в интервале 0,1–0,2 МПа, что значительно меньше давления под подошвой фундаментов зданий и сооружений, проектируемых в настоящее время. Поэтому значение модуля деформации следует определять по данным полевых испытаний штампом или прессиометром или лабораторных испытаний в условиях трехосно-

го сжатия. При этом следует иметь в виду, что значение модуля, найденное по данным трехосных испытаний, будет ниже, чем по результатам полевых испытаний штампом. В свою очередь, штамповый модуль деформации зависит от площади штампа, поэтому надо стремиться проводить полевые испытания штампами большой площади (от 5000 см<sup>2</sup> и более).

#### **ВЫВОДЫ:**

1. Модуль деформации не является постоянной характеристикой грунта. Величина модуля деформации зависит как от уровня деформации/напряжений в основании проектируемых зданий и сооружений, так и метода его определения.
2. Упругий или начальный модуль деформации можно найти из испытаний методом трехосного сжатия из наклона прямолинейного участка зависимости осевого напряжения – осевая деформация. Это значение модуля деформации может быть использовано при расчете осадки фундаментов методом послойного элементарного суммирования.
3. Одометрический или компрессионный модуль деформации должны быть приведены к расчетному модулю деформации путем сопоставительных испытаний штампом или прессиометром. Использование для этой цели данных трехосных испытаний дает заниженное значение коэффициента перехода.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.
2. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). Саратов: ПАТА, 2013. 356 с.
3. Болдырев Г.Г., Барвашов В.А., Кошкина Н.В. Происхождение и состав грунтов. Физические и механические свойства грунтов // Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения (под. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева). М.: АСВ, 2014. С. 31–68.
4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
5. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: МНТКС, 2013.
6. ПиНАЭ 5.10-87. Основания реакторных отделений атомных станций. М.: Минатомэнерго СССР, 1987.
7. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011.
8. СП 23.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85). Основания гидротехнических сооружений. М.: Минрегион России, 2011.
9. СП 24.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85). Свайные фундаменты. М.: Минрегион России, 2011.
10. СП 25.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88). Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минрегион России, 2011.
11. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2012.
12. Строкова Л.А. Определение параметров деформируемости грунтов для упругопластических моделей // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 367. С. 190–194.
13. МДС 50-1.2007. Проектирование и устройство оснований, фундаментов и подземных частей многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов. М.: ФГУП «НИИЦ "Строительство"», 2007.
14. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils; design equations and curves // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, 1972. V. 98. SM7. P. 667–692.
15. Mayne P.W. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests // Proceedings of the International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, 21–24 May 2001. P. 27–48.
16. Ohde J. Zur theorie der druckverteilung im baugrund // Der Bauingenieur. 1939. № 20. H. 33/34. S. 451–459.
17. Plaxis 3D Tunnel Material models Manual. 2001. P. 110.
18. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K. Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesive soils // Journal of Geotechnical Engineering. 1986. V. 112. P. 1016–1032.