

УДК 624.131

Е.В. Пиоро¹, А.Н. Ошкин²

ВЗАИМОСВЯЗЬ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Поиск взаимосвязей деформационных характеристик грунтов, полученных инженерно-геологическими (прямыми) и сейсмоакустическими (косвенными) методами, — актуальная задача современной науки. Предпринята попытка анализа влияния ряда отдельных факторов на величину скорости упругих волн и получаемые деформационные характеристики модельных глинистых грунтов.

Ключевые слова: динамический модуль упругости, модуль общей деформации, коэффициент поперечного расширения, коэффициент Пуассона, глинистые грунты, скорость продольных волн.

Search of interrelations of deformation characteristics of soil received by engineering-geological (direct) and seismoacoustic (indirect) methods is an actual problem of a modern science. In the given work attempt of the analysis of influence of some separate factors on sizes of speeds of elastic waves and received deformation characteristics modeling clay is undertaken.

Key words: young's modulus, the module of the general deformation, module of cross-section expansion, Poisson's ratio, soils, P-wave.

Введение. Деформационные характеристики — одни из наиболее важных показателей свойств, используемых при проектировании и строительстве практически любых зданий и сооружений. Традиционные виды испытаний — длительные и трудоемкие, поэтому определение показателей деформационных свойств глинистых грунтов при одноосном сжатии представляется довольно перспективным направлением исследований. В последнее время все более распространены методы геофизических сейсмоакустических исследований. Их преимущество заключается в простоте эксперимента и малых временных затратах. Литературные данные немногочисленны и относятся преимущественно к 70–80-м гг. прошлого века, в то время как аппаратура и методика исследований значительно усовершенствованы. Поэтому проведение исследований в этой области весьма актуально.

Авторами предпринята попытка проанализировать влияние отдельных факторов, характеризующих свойства глинистых грунтов, на величины скорости упругих волн и деформационные характеристики глинистых грунтов, а также установить эмпирическую зависимость между динамическим модулем упругости и модулем общей деформации на примере модельных глинистых грунтов.

Теоретический анализ. Применяемые инженерно-геологические методы исследования деформационных свойств глинистых грунтов (прямые и косвенные) довольно длительное время используются для практических целей, методики исследований разработаны, апробированы и прописаны в нормативных документах. Однако для каждого метода инженер-

но-геологических исследований глинистых грунтов существует ряд допущений и недостатков, поэтому даже для одного грунта значения получаемых деформационных характеристик могут отличаться.

Основная задача исследований заключается в попытке установить корреляционные зависимости между показателями деформационных свойств модельных глинистых грунтов, полученных по результатам одноосного сжатия и ультразвукового просвечивания.

Выбор модельных глинистых грунтов обоснован необходимостью зафиксировать физические свойства при минимизации неточностей, обусловленных влиянием неучтенных факторов.

Для скальных грунтов, которые можно отнести к телам идеально упругим, связь между динамическими характеристиками, получаемыми на основе измерения упругих волн, прошедших через образец грунта, и статическими, получаемыми прямыми методами, обусловлена единством протекающего в обоих случаях процесса — деформирования, достаточно подробно описанного для упругих тел, например, в [Савич, Ященко, 1979]. Получение подобных характеристик для глинистых грунтов, которые иногда даже в первом приближении нельзя называть телами упругими, — вопрос более сложный, требующий глубокого изучения.

В работах ряда авторов [Миндель, 1970; Никитин, 1981] установлена корреляционная связь между модулем общей деформации E_0 и динамическим модулем упругости E_d , которая в общем виде описывается логарифмической или линейной зависимостью.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, аспирант, e-mail: piorok@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ассистент, канд. физ.-мат. н., e-mail: a.oshkin@mail.ru

Нами установлено, что для изучаемых модельных глинистых грунтов уравнение имеет вид

$$E_0 = aE_d + b,$$

где параметры a и b практически не зависят от влажности.

Методика исследований. Исследования проводились на модельных глинистых грунтах, сформированных из перемолотого моренного суглинка (gIdns), отобранного на территории Москвы. Растертый грунт соответствовал суглинку тяжелому пылеватому по ГОСТ 25100-95 (модельный грунт М1). Для создания второго модельного грунта — суглинка тяжелого песчаного (М2) — к исходному грунту было добавлено 10% среднеспесчаной фракции. Третий модельный грунт (М3) содержал 25% той же песчаной добавки и соответствовал супеси песчаной по ГОСТ 25100-95. Образцы формовались при значениях влажности 10, 15 и 20%, а нагрузки уплотнения изменялись от 2 до 14 кг.

На изготовленных образцах измеряли скорость продольных V_p и поперечных V_s волн по методике прямого просвечивания на переменной базе: излучатель и приемник располагали на противоположных гранях образца на одной оси, при этом образец несколько раз укорачивали. Это позволяло построить годограф — зависимость времени прихода волны от пройденного расстояния, по наклону которого рассчитать скорость. Такой метод существенно повышает точность расчета скорости V_s , так как по единичному измерению не всегда удается выделить вступление S-волны в интерференционной картине.

Испытания образцов грунта методом одноосного сжатия проводили с помощью измерительно-вычислительного комплекса АСИС, который позволяет измерять продольные и поперечные деформации, осуществлять автоматическую запись измеряемых параметров и проводить компьютерную обработку получаемых данных. Скорость нагружения для разных групп образцов менялась от 0,5 до 2 мм/мин. Согласно ГОСТ 12248-96, скорость нагружения выбирают в зависимости от предполагаемой прочности грунта таким образом, чтобы время проведения испытания составило 5–7 мин. По результатам испытаний получены модуль общей деформации E_0 (при нагрузках 0,1–0,3 МПа) и значения коэффициента поперечного расширения μ_0 .

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. В результате различных условий уплотнения образцов и проведения на них ультразвуковых исследований получены значения физических характеристик и скорости распространения упругих волн глинистых грунтов разных модельных грунтов (табл. 1). При переходе от суглинка тяжелого пылеватого (М1) к суглинку тяжелому песчаному (М2), а затем к супеси песчаной (М3) наблюдается снижение разброса значений плотности и плотности скелета

образцов грунта при одинаковых нагрузках уплотнения. Это свидетельствует о большей уплотняемости высокодисперсных грунтов по сравнению с более песчанистыми разностями. При этом средние значения плотности и плотности скелета грунта увеличиваются с уменьшением дисперсности.

Таблица 1

Физические характеристики модельных глинистых грунтов

Образцы	Плотность, ρ , г/см ³	Плотность скелета, ρ_d , г/см ³	Влажность конечная, %	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p
М1	1,42–2,06	1,42–2,02	8–16	450–1800	200–600	0,20–0,54
М2	1,77–2,20	1,63–2,04	7–14	850–1850	300–500	0,16–0,50
М3	2,15–2,28	1,92–2,13	7–12	700–1400	250–400	0,18–0,30

Как показали опыты, в процессе формования и дальнейших исследований образцы теряют, как правило, от 2 до 7% влаги, что связано с отжимом жидкости при изготовлении образца и подсыханием образцов во время экспериментов. Наименьшие потери влаги характерны для более дисперсных грунтов, что связано с повышенным содержанием связанной и переходного типа воды, с их большей влагоемкостью.

Значения скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн сначала возрастают при переходе от М1 к М2, а затем снижаются в образцах М3. Это объясняется, с одной стороны, более высоким распространением волн в частицах песка, имеющих непосредственные контакты, по сравнению с глинистыми, а с другой — высокой скоростью распространения продольных волн в жидкой среде по сравнению с воздухом. Разброс значений уменьшается при переходе от более дисперсных грунтов к менее дисперсным. В этом же направлении уменьшается диапазон изменения отношения V_s/V_p .

По результатам ультразвуковых исследований рассчитаны динамический модуль упругости (E_d) и коэффициент Пуассона (μ). Полученные значения коэффициента Пуассона (μ) и коэффициента по-

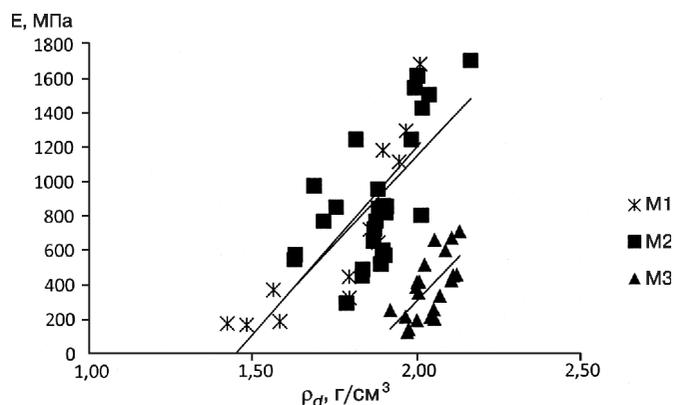
Рис. 1. Взаимосвязь модуля упругости (E_d) и плотности скелета грунта (ρ_d)

Таблица 2

Диапазоны изменения и средние значения деформационных характеристик

Модельные грунты	Динамический модуль упругости, E_d , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Модуль общей деформации E_0 , МПа	Коэффициент поперечного расширения, μ_0
M1-10	(170-1680)/635	(0,20-0,43)/0,38	(15-130)/63	(0,20-0,42)/0,32
M1-15	(190-2150)/900	(0,33-0,46)/0,43	(10-90)/54	(0,32-0,48)/0,40
M1-20	(170-650)/390	(0,44-0,48)/0,46	(15-30)/21	(0,40-0,48)/0,45
M2-10	(550-1700)/845	(0,33-0,45)/0,40	(26-87)/52	(0,28-0,38)/0,33
M2-15	(500-1600)/1165	(0,46-0,47)/0,47	(14-110)/56	(0,26-0,35)/0,30
M2-20	(300-860)/670	(0,48-0,49)/0,48	(16-53)/31	(0,32-0,45)/0,38
M3-10	(435-1060)/640	(0,45-0,46)/0,45	(23-65)/40	(0,27-0,45)/0,37
M3-15	(230-1010)/680	(0,46-0,47)/0,46	(24-82)/45	(0,33-0,44)/0,41
M3-20	(260-670)/480	(0,47-0,48)/0,47	(18-48)/30	(0,40-0,43)/0,41

Примечание. В номере модельного грунта отражены его дисперсность и задаваемая влажность; интервал нагрузок при определении E_0 составляет 0,1-0,3 МПа.

перечного расширения (μ_0) для образцов одного модельного грунта увеличиваются практически во всех случаях при переходе к более влажному состоянию (табл. 2). Широкий диапазон значений модулей преимущественно связан с сильным изменением плотности и плотности скелета изготовленных образцов и в меньшей мере с изменением их влажности. При переходе к менее дисперсным разностям уменьшается диапазон изменения плотности и плотности скелета модельных глинистых грунтов, соответственно уменьшается интервал изменения деформационных характеристик (рис. 1).

При сопоставлении модуля упругости и модуля общей деформации получена их взаимосвязь, которая описывается линейным законом, с коэффициентом $R^2=0,72$ (рис. 2). По данным других авторов, эта связь описывается как экспоненциальной [Никитин, 1981], так и линейной зависимостью [Миндель, 1970]. В нашем эксперименте максимальное значение величины достоверности аппроксимации R^2 соответствует линейной зависимости.

Сопоставление значений коэффициента Пуассона и коэффициента поперечного расширения не выяви-

ло корреляционных уравнений и скорее представляет собой облако точек. Однако следует заметить, что значения коэффициента Пуассона всегда выше, чем коэффициента поперечного расширения.

Выводы. 1. Значения скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн с увеличением дисперсности грунтов сначала возрастают при переходе от суглинка тяжелого пылеватого к суглинку тяжелому песчанистому, а затем снижаются для песчанистой супеси, причем разброс значений скоростей уменьшается при переходе к менее дисперсным грунтам. Это объясняется, с одной стороны, более высоким распространением волн между песчаными частицами, имеющими непосредственные контакты, чем в глинистых, а с другой — высокой скоростью распространения продольных волн в жидкой среде по сравнению с воздухом.

2. Получены похожие зависимости изменения динамических (косвенных) и статических (прямых) показателей деформационных свойств от дисперсности, плотности, плотности скелета и влажности при содержании песчаной фракции не более 25% и влажности 7-16%.

3. Полученное линейное уравнение связи $E_0 = 0,052E_d + 4$ для модельных глинистых грунтов позволяет оценить значения модуля общей деформации при известном значении динамического модуля упругости в диапазоне плотности 1,42-2,28 г/см³.

Полученные результаты следует считать промежуточным этапом в изучении глинистых отложений. Работа требует дальнейшего изучения реальных, а не модельных грунтов. Кроме того, известно, что для глинистых грунтов зависимость скорости упругих волн от частоты существенна, что позволяет ожидать некоторого изменения уравнения связи модуля общей деформации с упругими характеристиками грунтов на более низких частотах, используемых в полевой сейсморазведке.

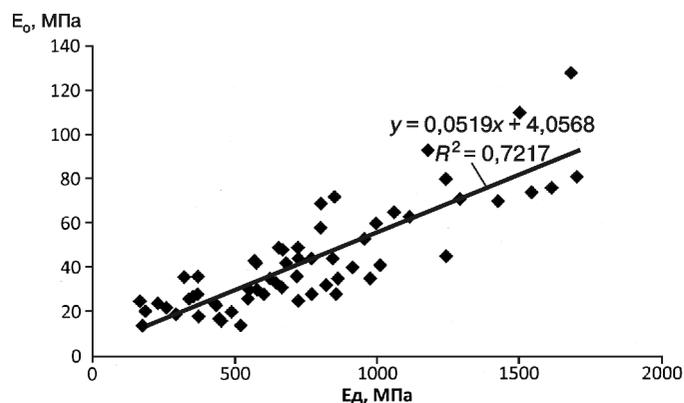


Рис. 2. Соотношение модуля упругости (E_d) и модуля общей деформации (E_0) образцов глинистых грунтов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 25100-95.

Миндель И.Г. Изучение физико-механических свойств лёссовых пород сейсмоакустическими методами // Тр. ПНИИИС. М., 1970. Т. 4. С. 278–297.

Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 176 с.

Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 214 с.

Поступила в редакцию
25.05.2011