

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/12-38

Ссылка для цитирования этой статьи:

Трацевская Е.Ю. Экспериментальное исследование динамических характеристик неустойчивости трехфазных грунтов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2017. №2

УДК 539.3; 551.332.53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХФАЗНЫХ ГРУНТОВ

Трацевская Е.Ю.

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Гомель, Беларусь, eltrats@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC INSTABILITY OF THE CHARACTERISTICS OF THREE-PHASE SOIL

Tratsevsкая H. Yu.

Gomel State University named after F. Skorina,
Belarus, Gomel, eltrats@mail.ru

Аннотация. Установлены закономерности изменения некоторых основных показателей деформационных свойств образцов квазитиксотропных моренных грунтов, проявляющиеся при техногенных вибродинамических нагрузках. Экспериментально показано, что ускорения, возникающие в грунте, резко изменяются в начале опыта. Эти ускорения, отличаются от ускорений, передающихся от вибростола. В определенном интервале давления модуль общих деформаций квазитиксотропных моренных грунтов при динамическом режиме нагружения меньше аналогичного модуля при статическом нагружении в 4,7 раза. Полученное численное значение модуля упругих деформаций при динамическом режиме нагружения сопоставимо со значением модуля восстанавливающейся упругой деформации при статическом характере нагружения.

Ключевые слова: динамические характеристики, квазитиксотропный грунт, вибродинамические нагрузки, модули деформаций

Abstract. Laws of change of some of the main indicators of the deformation properties of the samples quasi thixotropic moraine soil, manifested in man-caused vibrodynamics loads are installed. It is shown experimentally that the acceleration occurring in the soil greatly change at the beginning of experiment. These accelerations are different from the accelerations calculated for perfectly elastic media. It was found that the overall deformation module quasi thixotropic moraine soil under dynamic loading conditions less than the same module under static loading. The resulting numerical value of the modulus of elastic deformation under dynamic loading operation is comparable with the value of the module recovering elastic deformation of the static nature of the load.

Keywords: dynamic properties, quasi thixotropic soil, vibrodynamics loads, deformation modules

Введение. Состояние геологической среды обуславливается целым рядом техноприродных факторов. Для снижения экономических рисков при ее освоении необходимо изучение процессов, происходящих, например, в зоне влияния различных инженерных сооружений, машин и механизмов, передающих вибродинамические нагрузки.

Влияние такого рода воздействий на изменение свойств грунтов имеет два аспекта изучения. С 30-х годов прошлого столетия их целенаправленно исследовали для улучшения инженерно-геологических условий строительства, например, при уплотнении грунтов в основаниях, погружении свай, шпунтов, оболочек и т.д. В меньшей степени изучено влияние техногенных динамических нагрузок на состояние и изменение свойств грунтов, что в свою очередь может обусловить дополнительные осадки сооружений и даже потерю их устойчивости при снижении сопротивления сдвигу или разжижении грунтов.

В настоящее время единственным национальным нормативным документом, регламентирующим определение динамических свойств грунтов, является технический кодекс установившейся практики (ТКП) «Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях» [1]. В нем в частности говорится о необходимости сбора данных, касающихся физико-механических свойств грунтов для определения их упругих характеристик и оценки возможности возникновения длительных осадок фундаментов в результате действия вибраций.

Термин «динамические свойства грунтов», используемый в специальной литературе, неоднозначен [2]. С одной стороны, динамические свойства грунтов характеризуют их как среду распространения колебаний (упругие, демпфирующие, фильтрующие свойства), а с другой – это различные формы реакции грунтов на динамические нагрузки, т.е. их динамическая неустойчивость, под которой понимают увеличение деформируемости и снижение прочности грунта при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями.

Целью представленной статьи является рассмотрение вопросов, связанных с установлением некоторых закономерностей изменения основных показателей деформационных свойств образцов слабосвязных неводонасыщенных моренных грунтов проявляющихся при техногенных вибродинамических нагрузках.

Методика исследований. Испытания грунтов проводились в лабораторных условиях. Были определены ускорения, возникающие в грунте a' при определенной амплитуде a_0 и частоте f возмущающей силы, передающейся от вибростола; вертикальные деформации грунтов обратимого ($\zeta_{обр.}$) и необратимого ($\zeta_{ост.}$) характера при компрессионных испытаниях в статическом и динамическом режимах нагружения образцов.

В статических условиях показатели деформационных свойств определялись по методике, рекомендованной ГОСТом «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости»[3].

При виброкомпрессионном уплотнении грунта использовали металлическую обойму диаметром 152 мм и высотой 410 мм, жестко закрепленную на вибростоле вибрационного электродинамического стенда. Амплитудно-частотный режим испытаний был выбран на основании обобщения данных, опубликованных в литературе [2], и полученных нами при полевых исследованиях. Амплитуды виброперемещений A_0 задавались постоянными ($0,3 \cdot 10^{-3}$ м), соответствующими максимальным, возникающим при работе железнодорожного транспорта. Частота гармонических колебаний f изменялась от 15 до 105 Гц (наиболее часто встречаемые значения для техногенных нагрузок) с шагом, равным 10 Гц. Каждый эксперимент проводился в течение полутора часов (до стабилизации деформаций), а виброускорения, возникающие в грунте; обратимые и необратимые деформации измерялись в течение первых пяти минут, через 30 минут и в конце эксперимента. Образцы испытывали без статического пригружения, масса каждого из них составляла 7,0 кг.

В экспериментах использовались грунты с нарушенной структурой, но в ходе подготовки плотность и влажность их доводились до значений, которые они имеют в естественном залегании. Для исследований были взяты ледниковые супеси днепровского подгоризонта (*gIIdn*), широко распространенные на территории Беларуси. Готовили грунты с двумя значениями влажности: $\omega_1 = 0,135$ (для изучения изменения показателей состояния грунтов при динамических нагрузках во времени) и $\omega_2 = 0,8$ (для определения деформируемости грунтов). Данные значения влажности попадают в интервал: $\omega_p < \omega_i < \omega_r$ ($i = 1, 2$), где ω_r – максимальная гигроскопическая влажность, ω_p – влажность нижнего предела пластичности, т.е. грунты представляли собой трехфазные системы. Плотности при соответствующих влажностях будут $\rho_1 = 1,64$ и $\rho_2 = 1,66$ г/см³. Во всех случаях плотность частиц $\rho_s = 2,65$ г/см³; число пластичности $I_p = 4,5$ %; коэффициент пористости $e_1 = 0,83$ и $e_2 = 0,72$.

Таким образом, изучаемые грунты по классификации дисперсных грунтов в целях изучения их динамических свойств [4] относятся к квазитиксотропным.

Изменение показателей состояния грунтов во времени при динамических нагрузках. В техническом кодексе [1] под динамической понимается нагрузка, характеризующаяся быстрым изменением значения, направления и точки приложения. Она вызывает в грунтах основания значительные силы инерции, оказывающие влияние на работу фундаментов. В данной статье динамической считается переменная нагрузка, изменяющаяся во времени быстрее, чем рассеиваются вызванные ею в грунте напряжения [4].

Из-за сложности процессов, происходящих в грунте при приложении динамической нагрузки, для формирования поля напряжения необходимо некоторое время [2], [5]. Из полученных нами данных следует, что при передаче динамической нагрузки на реальный грунт в нем возникают ускорения a' , отличающиеся от ускорений, передающихся вибростолом. Ускорения в грунте, резко меняются в первые пять минут опыта (таблица). Флуктуация значений обусловлена, вероятно, явлениями резонанса

Таблица-Ускорения, передающиеся от вибростола и замеренные в грунте

Частота колебаний вибростола, f , Гц	Ускорения, передающиеся от вибростола, a_0 , м/с ²	Виброускорения, замеренные в грунте, a' , м/с ²			
		максимальные в начале эксперимента	через 5 минут после начала опыта	через 30 минут после начала опыта	установившиеся
15	2,7	11,0	11,0	11,0	10,0
25	7,4	27,0	27,0	27,0	27,0
35	15,0	128,0	128,0	121,0	118,0
45	24,0	188,0	122,0	47,0	38,0
55	36,0	232,0	121,0	60,0	42,0
65	50,0	225,0	120,0	52,0	43,0
75	67,0	206,0	102,0	40,0	47,0
85	85,0	202,3	80,0	76,0	43,3
95	107,0	200,0	95,0	100,0	93,3
105	130,0	214,8	100,0	118,0	86,5

Как показано И. Ишибаси, Дж. Ченом и Дж. Дженкинсом [6], во временном отношении изменение структуры грунта происходит медленнее, чем изменение напряжений, еще медленнее изменяются деформации, что соответствует гипотезе запаздывания пластических свойств материалов А.А. Ильюшина [5]. При приложении нагрузки грунт из равновесия состояния переходит в нестабильное. Распределение нормальных напряжений меняется в течение цикла. На стадии разгрузки происходит ослабление и разрушение связей между структурными элементами, возрастает их подвижность. На стадии нагружения увеличивается количество и площадь межчастичных контактов и происходит уплотнение грунта. В результате уменьшение сил сцепления при растяжении компенсируется увеличением числа контактов при сжатии настолько, что деформируемость уменьшается [2]. Например, для супеси легкой ($\omega_1 = 0,135$) при изменении коэффициента пористости от 0,83 до 0,59 при одних и тех же амплитудах и частотах динамического воздействия амплитуда перемещений уменьшилась от $2,00 \times 10^{-3}$ м до $0,44 \times 10^{-3}$ м. Это говорит о том, что процесс уплотнения имеет затухающий характер. Стабилизация вертикальных деформаций в грунте по нашим данным наступает через 30–40 минут после начала испытаний в зависимости от интенсивности динамической нагрузки. Грунт переходит в метастабильное состояние, которое может быть нарушено увеличением интенсивности динамического воздействия.

Деформируемость грунтов при статических и динамических нагрузках.

В зависимости от характера деформаций грунтов (обратимая, остаточная и т.д.) и условий нагружения (статическое, динамическое) в грунтоведении

используются различные показатели модуля деформации. Особый интерес представляют их взаимозависимости, позволяющие косвенными методами устанавливать показатели, определение которых прямыми методами затруднено по различным причинам.

В моделях упругопластических сред (модель Фусса, модель С.Н. Клепикова) общие деформации грунта (как при статическом, так и динамическом режимах) $\zeta_{\text{общ}}$ складываются из деформаций (упругих $\zeta_{\text{обр}}$) и необратимых (остаточных $\zeta_{\text{ост}}$) обратимых. Слабосвязным неводонасыщенным грунтам свойственны смешанные структуры. В них кулоновское трение между частицами меньше, чем в чистых песках, а коагуляционная сетка слабая и прерывистая. Ввиду неоднородности структурных связей, даже при небольших напряжениях в пределах упругих деформаций появляются необратимые деформации, т.е. предел упругости принимается условно [2].

Рассмотрим линейные механические деформации сжатия грунта, вызванные нормальными напряжениями. Согласно закону уплотнения глинистых грунтов [7], относительное изменение объема пор породы прямо пропорционально изменению давления, т.е. $de = a d\sigma$ (de – приращение коэффициента пористости при приращении давления $d\sigma$, МПа; a – коэффициент сжимаемости, МПа^{-1}). В общем случае для пылеватых и глинистых неводонасыщенных пород, как частного случая дисперсных грунтов, указанные зависимости являются нелинейными, на них влияют многочисленные факторы и поэтому не существует универсальных уравнений, описывающих эти взаимосвязи [2]. Однако в определенных условиях эти зависимости являются линейными и описываются простыми линейными уравнениями, известными в механике как закон Гука. Для нормальных напряжений он записывается в виде:

$$\sigma = E\zeta,$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга), МПа; ζ – линейные деформации, вызванные нормальными напряжениями σ , МПа).

Общая линейная деформация $\zeta_{\text{общ}}$, как упоминалось выше, при компрессионной сжимаемости грунтов складываются из двух частей – обратимой ($\zeta_{\text{обр}}$) и необратимой ($\zeta_{\text{ост}}$) (остаточной) [2]. Остаточные деформации возникают из-за уменьшения пористости и увеличения плотности сложения породы в результате нарушения структурных связей и перемещения частиц и их агрегатов друг относительно друга. Такие деформации называются структурными $\zeta_{\text{стр}}$ [7].

Обратимые деформации в свою очередь формируются из истинно упругих (идеально упругих) ($\zeta_{\text{ид}}$) и структурно адсорбционных (восстанавливающихся) ($\zeta_{\text{восст}}$) деформаций, природа которых различна. Истинно упругие деформации ($\zeta_{\text{ид}}$) обуславливаются силами упругости минеральных частиц, водных и коллоидных пленок, облегающих минеральные частицы, а также замкнутых пузырьков воды, воздуха или газов. Они протекают мгновенно. Структурно адсорбционные деформации ($\zeta_{\text{восст}}$) связаны с изменением толщины гидратных

оболочек, характерных для глинистых грунтов. Когда внешнее давление превышает сорбционные силы взаимодействия грунта с водой, толщина гидратных оболочек уменьшается. Структурно-адсорбционные деформации обратимы, развиваются медленно и, для их завершения требуется время.

При уплотнении глинистых пород происходят одновременно и обратимые и необратимые деформации – истинно упругие, структурно-адсорбционные и структурные. Для достижения равновесных деформаций под действием давления требуется определенное время. В связи с этим, квазиравновесное состояние (деформация–давление) не означает, что все деформации в грунте произошли за время опыта, т.к. обычно за равновесное принимается такое состояние, которое удовлетворяет определенному критерию скорости деформации, регламентированному нормативными документами [8]. Однако в механике грунтов считается, что при достаточно большом числе циклов нагрузок и разгрузок остаточные деформации в породах постепенно затухают, а проявляются лишь упругие. Порода приобретает упругое уплотненное состояние и становится малосжимаемой [7].

В результате проведенных исследований нами было установлено, что в пределах линейной зависимости $\zeta - \sigma$, например, в интервале давления от 0,06 до 0,07 МПа, при статическом режиме нагружения модуль общих деформаций $E_{\text{общ}}^{\text{ст}}$ составил 1,7 МПа; а при динамическом нагружении в том же интервале давления $E_{\text{общ}}^{\text{ст}}$ – соответственно 0,36 МПа, т.е. его численное значение уменьшилось в 4,7 раза. В статических условиях модули упругих деформаций определяли по методике, описанной В.И. Осиповым [9]. Модуль восстанавливающейся упругой деформации $E_{\text{восст}}$ оказался равным 16,8 МПа; модуль истинной упругой деформации $E_{\text{ист}}$ – 126,0 МПа. При динамическом режиме нагружения модуль упругих деформаций $E_{\text{упр}}^{\text{дин}}$ рассчитывался по значениям собственных частот образцов грунтов и составил 11,75 МПа [10]. Таким образом, полученное численное значение модуля упругих деформаций при динамическом режиме нагружения $E_{\text{упр}}^{\text{дин}}$ сопоставимо со значением модуля восстанавливающейся упругой деформации $E_{\text{восст}}$ при статическом характере нагружения, что по-видимому связано со сложными процессами структурной перестройки квазитиксотропных грунтов.

Выводы. Из полученных нами экспериментальных результатов следует, что при передаче динамической нагрузки на грунт в нем возникают ускорения, отличающиеся от ускорений, передающихся вибростолом. Ускорения, возникающие в грунте, резко изменяются в первые пять минут опыта.

В определенном интервале давления модуль общих деформаций квазитиксотропных моренных грунтов при динамическом режиме нагружения меньше аналогичного модуля при статическом нагружении в 4,7 раза.

Полученное численное значение модуля упругих деформаций при динамическом режиме нагружения сопоставимо со значением модуля восстанавливающейся упругой деформации при статическом характере

нагрузки, что по-видимому связан с сложными процессами структурной перестройки квазитекстурных грунтов.

Представленные результаты могут быть полезными при расчетах фундаментов зданий и сооружений передающих вибродинамические воздействия на естественные основания, при расчетах элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями, например [11–21].

Литература

1. Технический кодекс установившейся практики (ТКП) 45-5.01-264-2012 (02250) Основания и фундаменты зданий и сооружений. Фундаменты при вибродинамических воздействиях. Правила проектирования. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2013. 114 с.
2. Грунтоведение / В.Т. Трофимов. – М.: Изд-во Московского университета, 2005. 1023 с.
3. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости, 2010. 108 с.
4. ГОСТ Р 56353-2015 Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов М., Стандартинформ, 2015. 34 с.
5. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 416 с.
6. Jahibashi J., Chen C.-C., Genkins G.T. Dynamic shear modulus and fabric. 1988, 1. P. 33-37
7. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1984. 511 с.
8. Зиангиров Р.С. К вопросу об определении модуля деформации грунтов / Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве Российской Федерации // Материалы девятой общероссийской конференции изыскательских организаций.-М.: ООО «Геомаркетинг», 2013. С. 17-23
9. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Том 1. Полевые методы. М.: Недра, 1984. 422 с.
10. Трацевская Е.Ю. Изменения динамических свойств неводонасыщенных супесчаных грунтов в основаниях инженерных сооружений / Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. Днепропетровск, 2010. С. 326-332
11. Плещачевский Ю.М., Старовойтов Э.И., Яровая А.В. Динамика металлополимерных систем. Минск: Бел. наука. 2004. 386 с.
12. Могилевич Л.И., Попов В.С., Старовойтов Э.И. Гидроупругость виброопоры с трехслойной круглой упругой пластиной с несжимаемым наполнителем // Наука и техника транспорта. 2006. № 2. С. 56–63.

13. Kuznetsova E.L., Leonenko D.V., Starovoitov E.I. Natural vibrations of three-layer circular cylindrical shells in an elastic medium // *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No. 3. P. 359-366.
14. Starovoitov, E.I. Leonenko D.V. Resonant effects of local on circular sandwich plates on an elastic foundation // *International Applied Mechanics*. 2010. Vol. 46, No 1. P. 86-93.
15. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Яровая А.В. Гармоническое нагружение слоистых вязкоупругопластических систем // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2000. № 6. С. 91–98.
16. Leonenko D. V., Starovoitov E.I. Thermal impact on a circular sandwich plate on an elastic foundation // *Mechanics of Solids*. 2012. Vol. 47. No 1. P. 111-118.
17. Starovoitov E.I., Leonenko D.V. Impact of thermal and ionizing radiation on a circular sandwich plate on an elastic foundation // *International Applied Mechanics*. 2011. Vol. 47. No. 5. P. 580-589. doi: 10.1007/s10778-011-0481-y.
18. Starovoitov E.I., Leonenko, D.V., Yarovaya, A.V. Elastoplastic bending of a sandwich bar on an elastic foundation // *International Applied Mechanics*. 2007. Vol. 43. N 4. P. 451-459.
19. Leonenko D.V., Starovoitov, E.I. Deformation of a three-layer elastoplastic beam on an elastic foundation // *Mechanics of Solids*. 2011. Vol. 46. No 2. P. 291-298. doi: 10.3103/S002565441102018X.
20. Старовойтов Э. И., Леоненко Д. В., Сулейман М. Деформирование локальными нагрузками композитной пластины на упругом основании // *Механика композитных материалов*. 2007. Т. 43. № 1. С. 109-120.
21. Starovoitov E.I., Dorovskaya E. P., Starovoitov S. A. Cylindrical bending of elastic rectangular three-layer plate on deformed base // *Mechanics of composite materials*. 2010. Vol. 46, No 1. P. 57-72.