

Н. Д. КРАСНИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В работе приводится анализ различных методов испытаний деформационных свойств грунтов; описываются результаты лабораторных и полевых исследований деформационных свойств песчаных и глинистых грунтов.

Для решения задач, связанных с оценкой сейсмоустойчивости и прочности сооружений при воздействии на них динамических нагрузок, вызванных землетрясениями, крупными промышленными взрывами и т. п., необходимо располагать данными о деформационных свойствах грунтов оснований сооружений.

Исследования показывают, что деформационные свойства грунтов изменяются в очень широких пределах, в зависимости от различных факторов: условий образования и характера залегания грунтов, их состава и физических свойств (пористости, влажности и т. д.), характера и интенсивности действующей нагрузки и др. Закономерности деформирования многих грунтов даже при воздействии статических нагрузок являются весьма сложными и недостаточно хорошо изученными. Еще менее исследован вопрос о деформационных свойствах грунтов при динамических нагрузках, и в настоящее время не существует единой, общепринятой методики исследования деформационных свойств грунтов при динамических нагрузках. Поэтому при решении многих задач, связанных с оценкой прочности и сейсмоустойчивости сооружений при воздействии на них динамических нагрузок, применяются различные как статические, так и динамические методы исследования деформационных свойств грунтов. В частности, широко применяются статические методы исследования: а) лабораторные испытания образцов грунта ненарушенной структуры в приборах одноосного [1] и трехосного сжатия; б) полевые испытания с помощью пробных нагрузок штампов [1, 2]. Они заключаются в получении диаграмм сжатия образцов грунта и кривых осадок опытных штампов при их последовательном нагружении и разгрузении. По результатам этих испытаний определяются: модули упругости и модули общей деформации грунтов, обобщенные коэффициенты жесткости основания [1, 2]. При использовании обоих этих методов значения коэффициента поперечной деформации (коэффициента Пуассона) определяются по данным других исследований.

Очень широкое распространение получили динамические методы исследования деформационных свойств грунтов, основанные на применении вибрационных нагрузок: а) метод Дедево (Германское общество механики грунтов), основанный на измерении резонансных частот вертикальных колебаний системы вибратор—грунт и определении по ним постоянной упругости грунта [3, 4]; б) способ, предложенный О. А. Савиновым и заключающийся в исследовании собственных или резонансных частот колебаний системы сборный штамп—грунт [2]. При этом

Одновременно используются два вида штампов, имеющих в собранном виде одинаковый вес (около 1,0 т) и одинаковую площадь основания ($F_{\text{осн.}} = 0,5 \text{ м}^2$), но различающихся по высоте («низкий» штамп имеет высоту 0,32 м, а «высокий»—0,86 м). Благодаря этому при горизонтальных ударах по штампам удается определить в одном случае частоту собственных горизонтальных колебаний («низкий» штамп), а в другом — вращательных колебаний («высокий» штамп). По измеренным значениям частот собственных колебаний штампов находятся обобщенные коэффициенты жесткости основания, а затем модуль упругости грунтов [2]; в способ, основанный на измерении частот собственных и резонансных колебаний системы массивный фундамент (или бетонный блок)—грунт, с последующим определением по ним обобщенных коэффициентов жесткости основания.

Все более широкое распространение при инженерно-геологических изысканиях площадок под различные сооружения получают способы, основанные на изучении сейсмогеологического разреза и определении скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в грунтах с помощью методов сейсморазведки и сейсмокартажа буровых скважин. По измеренным значениям скоростей распространения упругих волн и плотности грунтов в условиях естественного залегания могут быть найдены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона грунтов.

Существуют также другие, практически реже употребляемые методы исследования деформационных свойств грунтов. Например, лабораторные испытания, основанные на определении частот резонансных колебаний образцов грунта [5], на измерении скоростей распространения в них ультразвуковых волн [6] и др. В настоящее время производятся исследования с целью разработки методов определения динамических диаграмм сжатия при нагрузках типа ударной волны как в лабораторных [7], так и в полевых условиях.

Из анализа приведенных выше методов исследования деформационных свойств грунтов видно, что между ними имеются довольно существенные различия. Так, при статических испытаниях модуль упругости грунтов определяется по величине упругой (обратимой) деформации образца или обратимой осадке штампа при их разгрузке. В то же время при исследовании деформационных свойств грунтов с помощью методов, основанных на применении вибрационных нагрузок (методы Дедево, О. А. Савинова и др.) для определения упругих характеристик грунтов используются периоды собственных и резонансных колебаний, полученные при полном цикле «нагрузка-разгрузка» грунта основания. Скорости нагружения и последующей разгрузки испытуемых грунтов, интенсивность действующих давлений при использовании разных методов исследования также неодинаковы.

Все это дает основание предполагать, что между результатами испытаний деформационных свойств грунтов с применением различных методов исследования могут наблюдаться значительные расхождения. Вместе с тем следует отметить, что специальные исследования с целью проверки сходимости результатов, получаемых при использовании различных методов испытаний деформационных свойств грунтов, а также определения области применимости рассмотренных выше методов до настоящего времени не проводились. Ниже сообщаются некоторые данные по рассматриваемому вопросу, полученные при полевых и лабораторных экспериментальных исследованиях деформационных свойств песчаных и глинистых грунтов. В проведении опытов помимо автора принимали участие В. И. Бибанов, Н. В. Жилин, В. Г. Тищенко, Л. А. Гончаров, Б. Б. Константинов, Г. А. Аридов, Г. М. Ерш и др.

Исследования проводились на двух опытных площадках, расположенных в поймах рек. Одна из площадок на глубину свыше 25—30 м была сложена тонко- и мелкозернистыми песками (фракций 0,25—0,05 мм—до 90%), включавшими на глубине от 6 до 8 м ниже дневной поверхности тонкий слой (мощностью около 1 м) темно-серого мягко-пластического суглинка. Объемный вес песков в условиях естественного залегания изменялся от 1,51 до 1,75 т/м³ и составлял в среднем 1,61 т/м³; их естественная влажность равнялась примерно 10,6%. Вторая площадка на глубину до 15 м была сложена однородными кембрийскими глинями. По механическому составу они характеризовались большим содержанием мелкопылеватых (от 28 до 37%) и глинистых (от 34 до 46%) фракций. Объемный вес глин $\gamma_{\text{гл}}$ изменяется в пределах от 2,10 до 2,17 т/м³ и в среднем мог быть принят равным 2,14 т/м³. Их естественная влажность изменялась от 16,7 до 22,1%. Исследуемые глины отличались большой пластичностью (число пластичности находилось в пределах от 26 до 35%). Какого-либо изменения свойств глин с глубиной не отмечалось. Экспериментальные исследования деформационных свойств грунтов проводились различными методами: а) путем статических лабораторных испытаний образцов грунта в компрессионных приборах и полевых испытаний по методу пробных нагрузок штампов; б) с помощью динамических методов, основанных на применении вибрационных нагрузок (способ О. А. Савинова, исследование собственных и вынужденных колебаний массивных бетонных блоков); в) с помощью определения скоростей распространения в грунте упругих продольных и поперечных волн.

Лабораторные испытания образцов грунта и полевые испытания с помощью пробных нагрузок опытных штампов производились по общепринятой методике. При этом начальная плотность (объемный вес) образцов песчаных грунтов принималась близкой к их объемному весу в условиях естественного залегания. Компрессионные испытания глинистых грунтов производились на образцах с ненарушенной структурой.

При полевых испытаниях по методу пробных нагрузок применялись квадратные в плане штампы с площадью основания, равной 0,5 и 1 м².

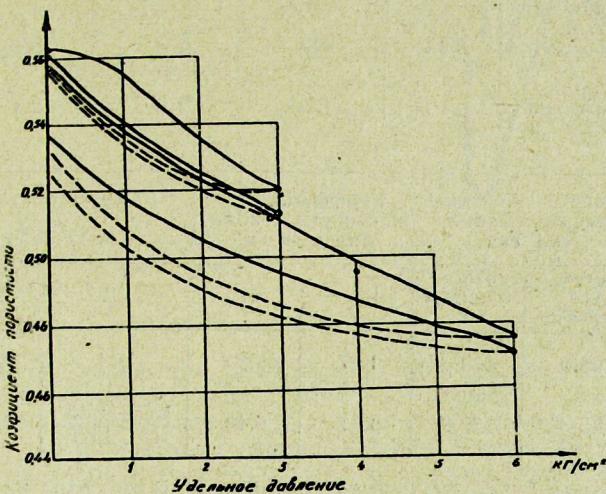
Максимальные значения удельных давлений по подошве штампов составляли от 0,15 до 1,75 кг/см². По результатам испытаний строились диаграммы циклического сжатия образцов грунта и кривые осадок штампов при их нагружении и разгрузке. Характер диаграмм сжатия образцов глинистых грунтов в компрессионном приборе показан на фиг. 1, а характер кривых осадок штампа с площадью подошвы $F_{\text{осн}}=0,5\text{m}^2$, установленного на песчаном основании, показан на фиг. 2.

В соответствии с полученными диаграммами сжатия образцов грунта и кривыми осадок штампов определялись по известным формулам [1, 2] значения обобщенных коэффициентов жесткости C_z и модуля упругости E грунтов основания. Значения модулей упругости приведены в табл. 1.

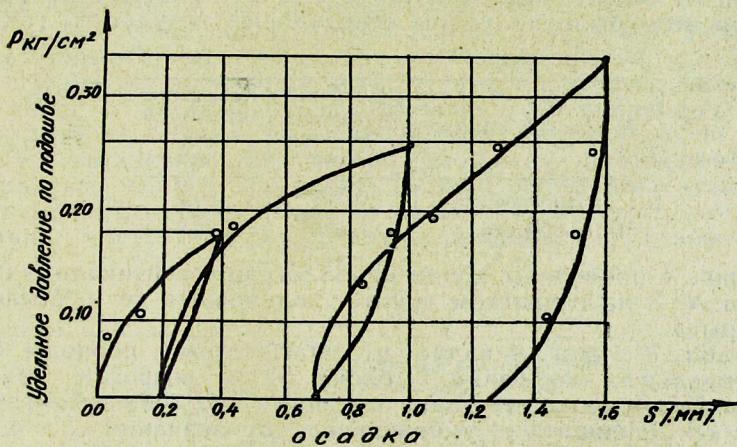
В табл. 1 значения коэффициента Пауссона μ для песчаных и глинистых грунтов были приняты по данным динамических испытаний (по результатам измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн).

При исследовании деформационных свойств песчаных и глинистых грунтов по способу О. А. Савинова, как уже отмечалось, использовались два вида сборных штампов: «высокий» и «низкий». Возбуждение собственных колебаний опытных штампов и массивных бетонных блоков, имевших размеры 5,0×5,0×2,0 м (блок № 1); 2,56×2,56×1,0 м (блок № 2); 2,0×2,0×0,8 м (блок № 3) и 1,5×1,5×0,6 м (блок № 4), осущес-

ствлялось с помощью нанесения по ним ударов кувалдой или деревянной бабой весом 30—40 кг. Запись колебаний опытных блоков и штампов производилась с помощью сейсмоприемников ВЭГИК и СПМ-16 на осциллографах. На фиг. 3 приведены образцы записей колебаний, полученные при горизонтальных ударах по «высокому» и «низкому» штампам, установленным на глинистом грунте.



Фиг. 1. Компрессионные кривые для кембрийской глины.



Фиг. 2. Кривые осадки штампа ($F=0,5 \text{ м}^2$) на песчаных основаниях.

В результате обработки опытных осциллограмм и определения обобщенных коэффициентов жесткости основания C_φ , C_x , C_o , D_o , а также модуля упругости грунтов E по методике, изложенной в работе [2], были получены данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 1

Грунт	Коэффициент Пуассона μ	Модуль упругости E в кг/см ²		
		наименьший	наибольший	среднее
Песок тонко- и мелкозернистый, кварцевый	0,33	490	640	560
Кембрийская глина	0,49	170	210	200

Таблица 2

Грунт	Частота собственных колебаний в 1 сек.		Коэффициент жесткости основания в кг/см ³		Коэффициенты C_o, D_o в кг/см ³		Модуль упругости в кг/см ²
	"высоко-го" штампа		C_ϕ	C_x	C_o	D_o	
	"низко-го" штампа						
Песчаный	96,0	143,0	17,7	5,90	1,44	0,89	580—760 670
Кембрийская глина	85,3	137,0	12,7	6,40	1,05—1,35 Ср. 1,20	0,955	540—630 580

Кроме того, были получены значения периодов собственных вертикальных колебаний опытного блока № 3 на глинистом грунте до проведения на опытной площадке взрывов и после взрыва заряда ВВ весом 10 кг в скважине глубиною 3,6 м (30 r_0), расположенной на расстоянии от блока около 5 м (60 r_0 , где r_0 —приведенный радиус заряда). При этом были получены осредненные результаты (табл. 3).

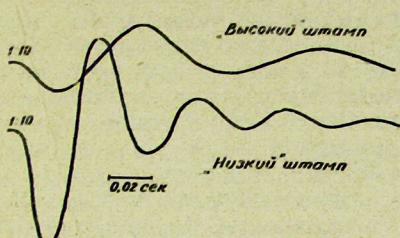
Таблица 3

Условия опыта	Период вертикальных колебаний T_z сек.	Коэффициент затухания n_z [сек. ⁻¹]	
		До взрыва	После взрыва
		0,043	20,1
		0,053	25,8

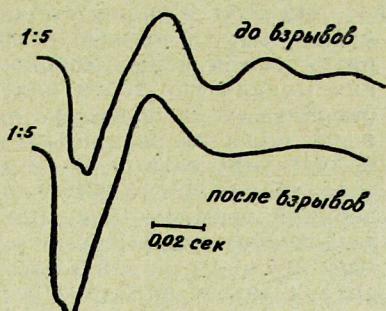
На фиг. 4 приведены копии осциллограмм вертикальных колебаний блока № 3 на глинистом грунте, полученные до и после проведения взрыва.

Из табл. 3 и фиг. 4 видно, что после взрыва периоды собственных вертикальных колебаний T_z блока № 3 возросли примерно на 20%, а коэффициенты затухания n_z —почти на 30%. Соответственно величина коэффициента c_z уменьшилась от значения $c_{z_1} = 4,18$ кг/см³ до $c_{z_2} = 2,85$ кг/см³, т. е. примерно на 30%. При этом амплитуды колебаний блока при практически одинаковой силе ударов по нему возросли после взрыва в 1,5—2,0 раза. Отсюда можно сделать вывод, что сотрясения связных грунтов, вызванные взрывами, могут привести к значительному увеличению их деформативной способности и снижению прочности (по-видимому, за счет некоторого нарушения связности между частицами грунта при прохождении по нему коле-

баний от волн взрыва). Тем самым может быть вызвано значительное ухудшение условий устойчивости оснований сооружений.



Фиг. 3. Образцы записей колебаний при горизонтальных ударах по штампам на глинистом основании.



Фиг. 4. Образцы записей вертикальных колебаний блока № 3 на глинистом основании до и после проведения взрывов.

Определение скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в песчаных и глинистых грунтах производилось с помощью обычной сейсмоаппаратуры. Для возбуждения упругих волн использовались направленные (вертикальные и горизонтальные — касательные к поверхности грунта) удары, а также взрывы небольших зарядов ВВ. Регистрировались прямые продольные и поперечные упругие волны, распространяющиеся в верхнем слое грунтов. Регистрация продольных волн осуществлялась по методу первых вступлений. При определении скоростей распространения поперечных волн применялась методика наблюдений по схеме УУ [8].

В этом случае волны возбуждаются с помощью горизонтального, касательного к поверхности грунта и направленного по оси ОУ удара. Наблюдения же производятся по лучам, перпендикулярным направлению удара с помощью горизонтальных сейсмоприемников, которые ориентируются параллельно направлению удара (т. е. по направлению оси ОУ). Установлено [8], что при такой схеме наблюдений существуют оптимальные условия для возбуждения и регистрации поперечных волн.

В результате обработки и анализа опытных данных были получены значения упругих характеристик песчаных и глинистых грунтов (табл. 4).

Таблица 4

Грунт	Объем-ный вес $\gamma_{\text{ест}}$ в т/м ³	Плот-ность $\rho_{\text{ест}}$ в т·сек ² /м ³	Скорости распростране-ния упругих волн в м/сек,		Коэффици-ент Пуассо-на μ	Модуль упругос-ти Е в кг/см ²
			продольных v_p	поперечных v_s		
Песчаный	1,78	0,181	$\frac{200-240}{220}$	$\frac{100-120}{110}$	0,33	$\frac{530-640}{580}$
Кембрий-ская глина	2,14	0,218	Ср. 1650	Ср. 170	0,49	1670

Приведенные результаты (табл. 4) экспериментального определения упругих характеристик песчаных и глинистых грунтов для их лучшего сопоставления сведены в общую табл. 5.

Из табл. 5 видно, что значения модуля упругости песчаных грунтов, найденные с помощью статических и динамических испытаний, мало различаются между собой: по данным динамических испытаний значения модуля упругости получаются на 10—15% выше, чем по данным статических. В случае же пластичных глинистых грунтов наблюдается очень большая разница между их значениями. Так, средние значения модуля упругости исследуемых глин, по данным статических испытаний, оказались равными $200 \text{ кг}/\text{см}^2$, по данным исследования собственных колебаний штампов—равными $580 \text{ кг}/\text{см}^2$ (т. е. почти в 3 раза больше) и по результатам измерения скоростей распространения упругих волн— $1670 \text{ кг}/\text{см}^2$ (т. е. в 8,5 раз больше, чем по данным статически испытаний). Следует при этом подчеркнуть, что методика экспериментов как в случае песчаных, так и глинистых грунтов была совершенно одинаковой.

Таблица 5

Грунт	Объемный вес $\gamma_{\text{ест}}$ в $\text{т}/\text{м}^3$	Естественная влажность $W_{\text{ест}}$ в %	Коэффициент Пуассона μ	Модуль упругости E в $\text{кг}/\text{см}^2$		
				статические испытания	собственные колебания штампов	по скорости распространения упругих волн
Песчаный	1,78	10,6	0,33	490—640 560	580—760 670	530—640 580
Кембрийская глина	2,14	16,7—22,1 Ср. 19,1	0,49	170—220 200	540—630 580	1670

При исследовании деформационных свойств полностью водонасыщенных песчаных грунтов наблюдается такая же картина, как и при испытаниях пластичных связных грунтов. Известно [1], что при статических испытаниях модуль упругости песчаных грунтов с увеличением их водонасыщенности почти не изменяется. В то же время скорости распространения упругих продольных волн с увеличением водонасыщения песчаных грунтов резко возрастают [9 и др.]. При этом резко возрастает также модуль упругости песчаных грунтов.

Такое значительное различие между результатами статических и динамических испытаний водонасыщенных песчаных грунтов и пластичных глин может быть, по-видимому, объяснено, в основном, неодинаковыми условиями их деформирования при проведении испытаний. Так, при статических испытаниях, в процессе длительного нагружения и последующей разгрузки образцов грунтов или оснований штампов деформации грунта успевают произойти полностью.

При использовании динамических методов, основанных на исследовании собственных или резонансных колебаний опытных штампов, блоков и т. п. происходит более быстрое нагружение и разгружение грунта основания (в наших опытах длительность цикла «нагрузка-разгрузка» грунта в основании штампов составляла 0,06—0,05 сек.). За это время деформации водонасыщенных песков и пластичных глин не успевали произойти полностью и жесткость этих грунтов как бы возрастила.

Еще большая разница наблюдается между результатами испытаний деформационных свойств грунтов с помощью статических методов

и методов, основанных на определении скоростей распространения в грунтах упругих волн, так как в последнем случае длительность цикла «нагрузка-разгрузка» грунта будет еще меньше. В случае маловлажных, воздухонасыщенных песчаных грунтов при приложении к ним внешней нагрузки деформации протекают очень быстро. Поэтому для таких грунтов наблюдается менее значительное различие между данными статических и динамических испытаний.

Таким образом, рассматриваемые опыты показывают, что расчетные деформационные характеристики некоторых грунтов (пластичных суглинков и глин, водонасыщенных песков) могут существенно меняться в зависимости от применяемой методики их определения. Поэтому вопросы выбора правильной, должным образом обоснованной методики исследования деформационных свойств грунтов, применительно к решению задач о прочности и сейсмоустойчивости сооружений при воздействии на них динамических нагрузок, имеют очень важное значение и им должно уделяться соответствующее внимание. При этом должен учитываться ряд факторов, в первую очередь таких, как вид и физическое состояние исследуемых грунтов, характер и интенсивность динамической нагрузки и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Д. Баркан. Динамика оснований и фундаментов. Стройвоенмориздат, М., 1948.
2. О. А. Савинов. Фундаменты под машины, Госстройиздат, Л., 1955.
3. Н. Зогенз. Grundbegriffe der Bodenmechanik. Duncker & Humblot, Berlin, 1960.
4. К. Терцаги. Основы механики грунтов, Госстройиздат, М., 1961.
5. Р. З. Ляндрес. Лабораторные исследования упругих свойств грунтов. Тр. НИИ по основаниям и фундаментам, № 16, 1960.
6. Н. В. Царева. О распространении упругих волн в песке. Известия АН СССР, серия геофизическая, № 9, 1956.
7. Н. А. Алексеев. Метод определения динамических характеристик грунтов при больших давлениях. Сб. трудов № 44 НИИ оснований и подземных сооружений, М., 1961.
8. А. П. Волин, А. Г. Рудаков. О сейсморазведочных работах на поперечных волнах. Прикладная геофизика, в. 15, 1956.
9. Г. М. Ляхов, Г. И. Покровский. Взрывные волны в грунтах, Госгортехиздат, М., 1962.