

7. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., «Наука», 1966.
8. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. М., «Наука», 1968.
9. Угодчиков А. Г., Длугач М. И., Степанов А. Е. Решение краевой задачи теории упругости на цифровых и аналоговых машинах. М., «Выш. школа», 1970.
10. Ромалис Н. Б. Применение методов Н. И. Мухелишвили к решению задач деформирования стохастически неоднородных тел.— В кн.: Исследования по прикладной математике. Вып. 2. Воронеж, изд. Воронежск. ун-та, 1974.

УДК 624.131 + 539.24

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

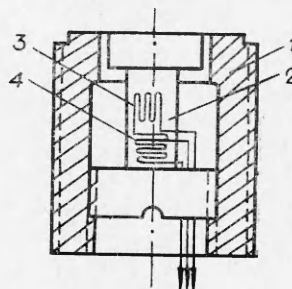
Ю. М. Глухов, Ю. В. Кулинич, Г. В. Рыков

(Москва)

Излагаются результаты экспериментальных исследований сжимаемости песчаного грунта различной влажности при статических нагрузках интенсивностью до  $\sigma_1 = 400-600$  кг/см<sup>2</sup>. Рассмотрена методика и описана конструкция датчика для измерения таких напряжений. Показано, что траектория нагружения при одноосном сжатии воздушно-сухого песка в случае нагрузки и разгрузки не совпадает. Для влажных песчаных грунтов показано, что условие пластичности [1] пригодно вплоть до нагрузок  $\sigma_1 = 400-600$  кг/см<sup>2</sup> как при однократном, так и при повторных нагружениях.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории динамических испытаний отдела динамики неупругих сред ИПМ АН СССР на установке одноосного сжатия УДН-100, представлявшей собой дальнейшую модернизацию установки УДН-150, описанной в [2]. В отличие от УДН-150 диаметр образца в установке УДН-100 составляет  $D=100$  мм, а высота  $h_0 = 20$  мм. Новая конструкция обоймы, в которой размещается образец, поршня, передающего нагрузку на образец, и датчиков для измерения компонента тензора напряжения в образце позволяет расширить диапазон исследуемых напряжений и деформации до  $10^3$  кг/см<sup>2</sup> и 0,5 соответственно. Конструктивная схема разработанных к установке УДН-100 тензометрических датчиков стержневого типа для измерения нормальных напряжений интенсивностью до  $10^3$  кг/см<sup>2</sup> показана на фиг. 1, где 1 — корпус датчика, 2 — измерительный элемент-стержень, 3, 4 — рабочее и компенсационное тензосопротивления. Измерительный элемент выполнен из титанового сплава ВТ-12 с пределом прочности  $[\sigma] = 165$  кг/мм<sup>2</sup>, модулем упругости  $E = 2,4 \times 10^4$  кг/см<sup>2</sup> и предельной деформацией  $[\epsilon] = 0,15$ .

Для измерения меньших главных напряжений  $\sigma_2$  применялись аналогичные по конструкции датчики, вмонтированные в обойму. Контактная поверхность такого датчика имела

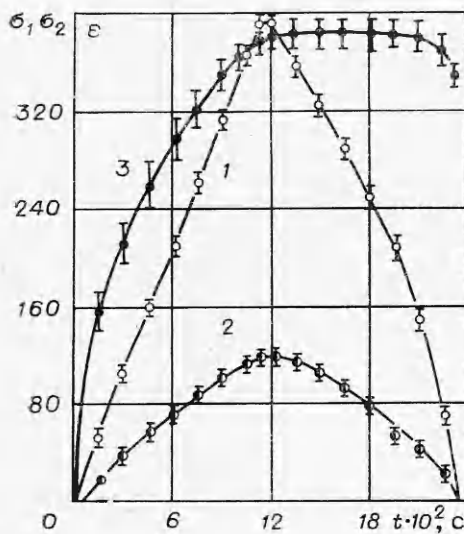


Фиг. 1

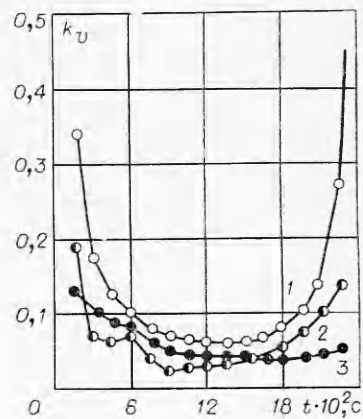
кривизну, равную кривизне внутренней поверхности обоймы. Регистрация показаний датчиков производилась через усилитель УТС-ВТ-12/35 на осциллографе Н-115. Производилась оценка случайных погрешностей, связанных с градуировкой датчиков. Датчики подвергались многократному нагружению до  $600 \text{ кг/см}^2$  с последующей разгрузкой. Коэффициент вариации при различных ступенях нагрузки ( $\sigma_1 > 50 \text{ кг/см}^2$ ) не превышал  $k_v = 0,013-0,017$ . Нагрузка на образец создавалась с помощью испытательной машины ЗДМ-30. Большие главные напряжения  $\sigma_1(t)$  измерялись одновременно шестью датчиками,  $\sigma_2(t)$  — двумя датчиками, перемещения поршня  $u(t)$  — тремя датчиками. Деформация образца определялась как  $\epsilon(t) = u(t)/h_0$ . Нагружение образца производилось с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}_1 = 0,32 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$ , скорость деформирования в опытах не превышала  $\dot{\epsilon} = 1-2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$ . Предусматривалось трехкратное нагружение одного и того же образца и пятикратная повторяемость эксперимента в одних и тех же условиях. Исследованиям подвергался воздушно-сухой песок с объемным весом  $\gamma_0 = 1,54 \text{ г/см}^3$  и влажностью  $w = 0,003$ , а также увлажненный песок с  $\gamma_0 = 1,48 \text{ г/см}^3$  и  $w = 0,05; 0,1; 0,15$ . Производилась статистическая обработка результатов опытов. Проверка приемлемости гипотезы о нормальном законе распределения напряжений и деформаций для каждого момента времени  $t$  осуществлялась с помощью  $W$  — критерия Уилка [3].

На фиг. 2 представлены результаты измерений напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и деформации  $\epsilon$  соответственно кривыми 1—3 для образца песчаного грунта с  $\gamma_0 = 1,48$  и  $w = 0,05$  с соответствующими доверительными интервалами, определенными с надежностью  $\beta = 0,9$ . Анализ полученных результатов испытаний образцов грунта с  $w = 0,003; 0,05; 0,1; 0,15$  показывает, что закон распределения для напряжений и деформаций для фиксированных моментов времени  $t$  может быть принят нормальным.

Представление о точности измерений дает фиг. 3, где приведены коэффициенты вариации  $k_v$ , соответствующие величинам  $\sigma_1(t)$ ,  $\sigma_2(t)$  и  $\epsilon(t)$  (фиг. 2, кривые 1—3). Из этих данных следует, что для основной части процесса, за исключением малых (по сравнению с их максимальными значениями) величин напряжений и деформаций, коэффициенты вариации не превышают  $0,05-0,10$ . Для серии экспериментов относи-



Ф и г. 2



Ф и г. 3

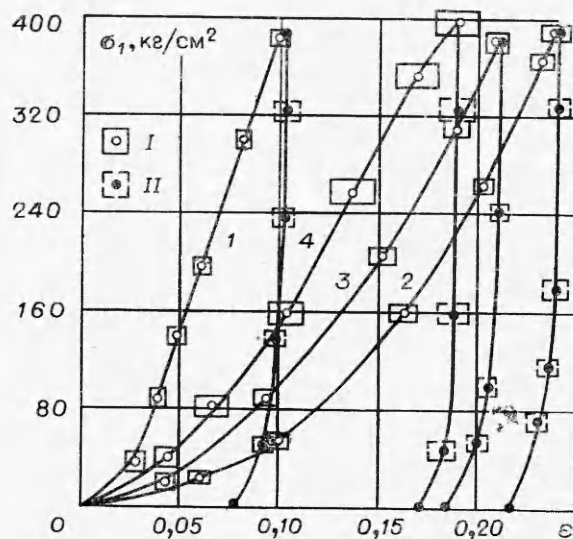
тельный доверительный интервал для математических ожиданий напряжений и деформаций находится в пределах 5—6%.

Отметим, что при динамических испытаниях со скоростями нагружения  $\dot{\sigma}_1 = 0,32 \cdot 10^4$  кг/(см<sup>2</sup>·с) таких же образцов грунта в установке УДН-100 коэффициенты вариации, соответствующие величине  $\sigma_1(t)$ , не превышали 0,10—0,12 [4]. Сравнение этих данных с данными о точности измерений напряжений в образце грунта датчиками, чувствительным элементом которых является тонкая пластинка, при статических и динамических испытаниях [4] показывает, что при больших нагрузках датчики стержневого типа позволяют значительно увеличить диапазон и точность измерения напряжений.

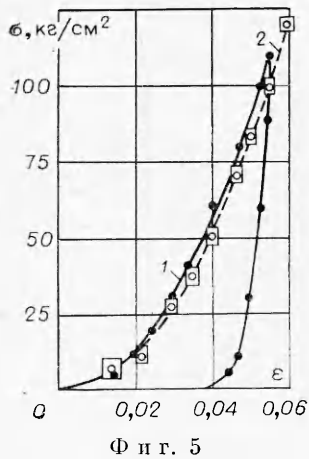
На фиг. 4 представлены результаты исследования сжимаемости песчаного грунта различной влажности, полученные путем исключения времени  $t$  из записей  $\sigma_1(t)$  и  $\epsilon(t)$ . Здесь кривая 1 соответствует воздушно-сухому грунту с  $\gamma_0 = 1,54$  г/см<sup>3</sup> и  $w = 0,003$ , кривые 2—4 — увлажненному грунту с  $\gamma_0 = 1,48$  г/см<sup>3</sup>,  $w = 0,05$ ; 0,1 и 0,15 соответственно. Обозначение  $I$  соответствует нагружению,  $II$  — разгрузке с соответствующими доверительными интервалами при  $\beta = 0,9$ . Из фиг. 4 видно, что с увеличением влажности с  $w = 0,05$  до 0,15 деформации грунта убывают. Изменение кривизны кривой  $\sigma_1(\epsilon)$  для грунта с  $w = 0,15$  вызвано тем, что при  $\sigma_1 \cong 250$ —280 кг/см<sup>2</sup> влага, содержащаяся в образце, полностью заполняет поры грунта и при дальнейшем увеличении нагрузки вытесняется из пор грунта (испытания проводились по открытой схеме). Тот факт, что деформации воздушно-сухого грунта оказались меньше, чем деформации увлажненного грунта, в первую очередь обусловлен меньшим объемным весом скелета последнего.

Повторные нагружения песчаных грунтов при  $\dot{\sigma}_1 = 3,2 \cdot 10^{-1}$  кг/(см<sup>2</sup>·с),  $\dot{\epsilon} \cong 1 \cdot 10^{-4}$  1/с показали, что ветви диаграммы  $\sigma_1(\epsilon)$  для разгрузки и последующего нагружения не совпадают. При повторных нагружениях происходит некоторое увеличение деформаций для одних и тех же нагрузок. Так, для грунтов с  $\gamma_0 = 1,48$  г/см<sup>3</sup> и  $w = 0,05$  при повторном нагружении при  $\sigma_{1\max} = 400$  кг/см<sup>2</sup> максимальные деформации возрастают по сравнению с первым нагружением на 10%, а при третьем — на 14%, остаточные деформации возрастают соответственно на 12 и 15%.

Представляет интерес сопоставление объемных деформаций песчаного грунта, полученных в установке УДН-100 с результатами, полученными для того же грунта в установке объемного сжатия, где образец подвергался равномерно всестороннему давлению. Установка для таких испытаний приведена в [5]. Соответствующие данные для воздушно-сухого песчаного грунта приведены на фиг. 5. Здесь по оси абсцисс отло-



Фиг. 4

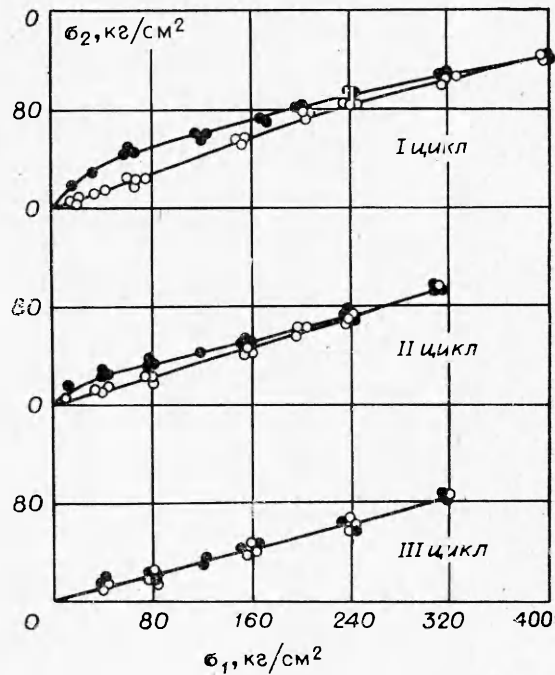


Ф и г. 5

жена деформация  $\varepsilon$ , а по оси ординат — среднее напряжение  $\sigma = (1/3)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ . Кривая 1 получена в приборе объемного сжатия,  $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , кривая 2 — по результатам описанных опытов. Видно, что в пределах точности эксперимента эти кривые совпадают. Следовательно, для воздушно-сухого песчаного грунта  $w = 0,003$  влияние сдвига, имеющего место в установке УДН-100, на объемные деформации при одноосном сжатии несущественно.

На фиг. 6 в плоскости главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) показаны траектории нагружения воздушно-сухого песчаного грунта при одноосном сжатии для трех последовательных циклов «нагрузка-разгрузка». Видно, что при первых двух циклах траектории нагружения в случае нагрузки и разгрузки образца не совпадают. Различие этих двух ветвей траектории нагружения особенно значительно при малых  $\sigma_1$ , и оно уменьшается от цикла к циклу. Так, для третьего цикла ветви траектории в пределах точности экспериментальных данных совпадают. Для второго и третьего циклов нагрузочная ветвь траектории нагружения достаточно хорошо описывается линейной зависимостью. В первом цикле линейная зависимость между  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  прослеживается при  $100 \text{ кг/см}^2 \leq \sigma_1 \leq 400 \text{ кг/см}^2$ . При  $\sigma_1 < 100 \text{ кг/см}^2$  эта зависимость становится нелинейной при разгрузке и существенно отличается от траектории нагружения. Следовательно, часто используемое предположение о простых траекториях нагружения при одноосном деформировании воздушно-сухого грунта, строго говоря, является не точным и нуждается во всесторонней экспериментальной проверке.

Для увлажненных песчаных грунтов с  $w = 0,05-0,15$  было получено, что ветви траектории, соответствующие нагружению и разгрузке образца, практически везде совпадают, за исключением небольшой области малых величин  $\sigma_2$ , и зависимость между  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в области пластических деформаций имеет линейный характер в диапазоне  $0 \leq \sigma_1 \leq 400 \text{ кг/см}^2$ . Полученные результаты измерений  $\sigma_2(t)$  и  $\sigma_1(t)$  позволяют, таким образом, построить функции пластичности для исследованных песчаных грунтов. Условие пластичности при обработке экспериментальных результа-



Ф и г. 6

тов принималось в виде условия Мизеса—Шлейхера [1]

$$I_2 = (1/6)F^2(\sigma).$$

Результаты исследований показали, что при  $\sigma_1 > 25$  кг/см<sup>2</sup> с достаточной для практических приложений точностью нагружено и разгружено соответствует одна и та же зависимость  $F(\sigma) = k\sigma + b$ , где  $k$  и  $b$  — коэффициенты, характеризующие внутреннее трение и сцепление. Соответствующие величины коэффициентов  $k$ , коэффициентов бокового давления  $\xi = \sigma_2/\sigma_1$ , а также коэффициентов корреляции  $r$  и их доверительных интервалов  $r_1, r_2$  для линейной регрессии  $F$  на  $\sigma$  для трех последовательных нагружений образцов грунта различной влажности приведены в таблице. Величины коэффициентов  $b$  с точностью до случайных погрешностей опытов равны нулю.

$w$	$N$	$k$	$\xi$	Коэффициент корреляции		
				$r$	$r_1$	$r_2$
0,003	1	1,61	0,353	0,427	-0,397	0,841
	2	1,826	0,307	0,984	0,897	0,996
	3	1,855	0,301	0,974	0,841	0,994
0,05	1	1,767	0,319	0,987	0,952	0,994
	2	1,869	0,297	0,985	0,946	0,994
	3	1,907	0,289	0,988	0,956	0,995
0,1	1	1,851	0,302	0,870	0,816	0,992
	2	2,052	0,263	0,983	0,891	0,996
	3	2,02	0,268	0,923	0,858	0,981

Из приведенных данных видно, что с увеличением влажности от 0,003 до 0,1 величина коэффициента  $k$  при первых нагружениях увеличивается в 1,2 раза. Повторные нагружения также приводят к некоторому повышению величины  $k$  от первого цикла ко второму. Однако эти различия в величинах  $k$  для песчаных грунтов с  $w = 0,05-0,1$  составляют 9—10%, что практически находится в пределах точности. Для песка с  $w = 0,003$  это изменение несколько больше и составляет 13%. Малые значения коэффициентов корреляции для этого песка подтверждают сделанные ранее выводы о различии траекторий нагружения и разгрузки в плоскости  $(\sigma_1, \sigma_2)$ . Различий в величинах  $k$  при втором и третьем нагружениях практически не наблюдается.

Поступила 3 VI 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов.— ПММ, 1960, т. 24, № 6.
2. Рыков Г. В. Влияние скорости деформирования на сжимаемость и сдвиг песчаных грунтов при кратковременных нагрузках.— ПМТФ, 1969, № 3.
3. Шапиро Г., Хан С. Статистические модели в инженерных задачах. М., «Мир», 1969.
4. Кулинич Ю. В., Нарожная З. В., Рыков Г. В. Механические характеристики песчаных и глинистых грунтов с учетом их вязкопластических свойств при кратковременных динамических нагрузках. Препринт № 69 ИПМ АН СССР, 1976.
5. Козаченко Л. С., Кулинич Ю. В. Физико-механические свойства песка под давлением.— ФТПРПИ, 1972, № 1.