

УДК 622 : 625.8

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ НАГРУЗКУ ПРИ ИСПЫТАНИИ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ СЫПУЧИХ СРЕД МЕТОДОМ КОСОГО СРЕЗА**

Шабает С.Н., *к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог и  
городского кадастра*

Иванов С.А., *к.т.н., доцент*

Дементьев В.А., *студент группы СДм-201, II курс*

Кузбасский государственный  
технический университет имени Т. Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Определение прочностных характеристик крупнозернистых сред является важной задачей, так как от них зависит несущая способность как слоев дорожной одежды из таких материалов в частности, так и всей конструкции в целом. Однако определение прочностных характеристик крупнообломочных грунтов, как типичного представителя крупнозернистых сред, сопряжено с определенными трудностями.

Еще во времена СССР прочностные характеристики крупнозернистых сред определяли на специальных (уникальных) установках (сдвиговой прибор ВНИИ ВОДГЕО, большая испытательная установка БСП-620, трехосный вакуумный прибор конструкции Я. Журека и Л.Н. Рассказова), имеющих размер кареток (обойм) от 150 до 500 мм [1]–[3], а в мире – на сдвиговых приборах с диаметрами обойм до 1130 мм [4], [5]. Обусловлено это тем, что для того, чтобы избежать пристенного эффекта необходимо, чтобы размер кареток (форм, обойм) был не менее чем в 5...7 раз больше максимального размера частиц крупнозернистой среды [6]–[9]. Следовательно, для того чтобы избежать пристенного эффекта при испытании крупнозернистой среды, имеющей, например, максимальный размер частиц 40 мм необходимо иметь обойму с горизонтальным размером не менее 200...280 мм.

Стандартные условия испытания грунтов на сдвиг по схеме одноплоскостного среза подразумевают использование форм (обойм) диаметром не менее 70 мм и высотой от 1/3 до 1/2 диаметра [10], а при использовании метода трехосного сжатия диаметр образца должен быть не менее 35 мм, а отношение высоты к диаметру от 1,85 до 2,25 [11]. То есть нормативными документами нормируются минимальные размеры образцов грунта, что позволяет разрабатывать и изготавливать установки с различным диаметром кареток (обойм).

Так, например, наиболее совершенной установкой по определению прочностных характеристик крупнообломочных грунтов, выпускаемой в России, на сегодняшний день является установка для комплексных испытаний на срез ГТ 1.2.15, имеющей горизонтальные размеры каретки 300 мм [12].

Тем не менее, существуют и другие методы, позволяющие определять прочностные характеристики крупнозернистых сред. Одним из таких методов является метод косого среза, реализуемый при помощи клиновой установки типа КУ-54 [13], которая впоследствии была усовершенствована [14]. Испытания, проведенные с использованием клиновой установки в целом сопоставимы с результатами исследований, полученных различными учеными на других приборах [15], а, значит, результаты, полученные методом косого среза, равноценны результатам, полученным методом одноплоскостного среза.

Нормативными документами предусматривается определение прочностных характеристик грунтов методом одноплоскостного среза в условиях консолидированно-дренированного среза, то есть после уплотнения грунта вертикальной нагрузкой до его полной консолидации. В усовершенствованной клиновой установке, имеющей диаметр обойм 300 мм, уплотнение крупнозернистой среды осуществляется виброуплотнением, что позволяет добиться плотности скелета грунта, сопоставимой с плотностью, достигаемой после уплотнения в реальных построечных условиях, то есть консолидация плотностью завершена [14].

Нормами предусмотрено испытания на одноплоскостной срез производить в статическом и кинематическом режимах в зависимости от вида приложения сдвигающей нагрузки [10], метод косого среза подразумевает испытания проводить только в статическом режиме [13].

Для сокращения временных затрат при определении прочностных характеристик крупнозернистых сред методом косого среза был проведен эксперимент по определению предельной нагрузки при двух схемах нагружения:

1. Неконсолидированно-дренированная, заключающаяся в том, что после приложения каждой ступени нагрузки, составляющей 10...20 кгс, выдерживалась короткая пауза, длительностью до 1 мин, в течение которой производилось фиксация величины усилия и оценка условий проведения эксперимента (сохранение зазора между обоймами, отсутствие недопустимых смещений форм и др.).

2. Консолидированно-дренированная, которая заключалась в том, что после приложения каждой ступени нагрузки, выдерживается пауза 20 минут, необходимая для затухания деформаций.

Результаты определения предельной нагрузки, при превышении которой наблюдалось разрушение образца из крупнозернистой среды (щебня), а также статистический анализ полученных результатов приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Из данных табл. 2 видно, что коэффициент вариации, как правило, ниже 0,15 и только в двух случаях превышает эту величину, следовательно, средневзвешенные значения предельной нагрузки типичны для каждой совокупности отдельных случайных значений. При этом относительное превышение средневзвешенного значения предельной нагрузки по неконсолидированно-дренированной схеме по сравнению со значением предельной нагрузки по консолидированно-дренированной схеме имеет стохастический характер.

Таблица 1

**Результаты отдельных измерений предельной нагрузки при испытании щебня  
по консолидированно-дренированной (К)  
и неконсолидированно-дренированной (Н) схеме нагружения**

Фракция щебня, мм	Схема нагружения	№ испы- тания	Значение предельной нагрузки, кН, при угле линии реза, град.:					
			40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5
2,5...5	К	1	15,33	9,67	6,03	1,48	-	-
		2	13,95	11,34	5,47	1,44	-	-
		3	15,80	11,66	5,04	1,41	-	-
		4	13,30	10,05	4,70	1,21	-	-
		5	12,62	11,52	4,88	2,06 <sup>1</sup>	-	-
	Н	1	14,25	10,48	5,01	1,39	-	-
		2	13,25	12,27	4,92	1,47	-	-
		3	16,37	11,34	5,16	1,28	-	-
		4	14,92	12,29	5,76	1,08	-	-
		5	14,49	10,27	4,96	1,49	-	-
5...10	К	1	-	-	15,33	10,67	2,16	-
		2	-	-	14,58	10,36	3,92	-
		3	-	-	16,20	12,76	3,24	-
		4	-	-	13,30	9,70	3,43	-
		5	-	-	12,01	8,83	2,86	-
	Н	1	-	-	14,13	10,79	6,33 <sup>1</sup>	-
		2	-	-	13,51	12,27	2,84	-
		3	-	-	14,82	10,12	2,45	-
		4	-	-	15,16	9,61	3,43	-
		5	-	-	16,54	8,34	2,94	-
10...20	К	1	-	-	-	13,73	8,14	3,45
		2	-	-	-	15,20	7,94	3,30
		3	-	-	-	12,16	7,16	5,02
		4	-	-	-	11,28	6,57	3,20
		5	-	-	-	12,75	8,83	4,21
	Н	1	-	-	-	15,49	7,69	4,12
		2	-	-	-	13,14	6,77	3,95
		3	-	-	-	15,79	5,79	3,48
		4	-	-	-	14,22	9,22	4,32
		5	-	-	-	10,79	6,37	4,08

**Примечание:**

<sup>1</sup> На основе проведенного анализа по критерию Диксона, полученные отдельные результаты признаны грубыми погрешностями (промахами) и поэтому исключены при проведении последующего статистического анализа

Таблица 2

Статистический анализ результатов отдельных измерений предельной нагрузки при испытании щебня по консолидированно-дренированной (К) и неконсолидированно-дренированной (Н) схеме нагружения

Фракция щебня, мм	Схема нагружения	Показатель	Значение показателя, при угле линии реза, град.:					
			40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5
2,5...5	К	$\bar{X}_K$	14,20	10,85	5,22	1,39	-	-
		$k_V$	0,095	0,085	0,102	0,087	-	-
	Н	$\bar{X}_H$	14,66	11,33	5,16	1,34	-	-
		$k_V$	0,078	0,084	0,067	0,125	-	-
		$\frac{\bar{X}_H - \bar{X}_K}{\bar{X}_H}$	0,031	0,042	-0,012	-0,037	-	-
5...10	К	$\bar{X}_K$	-	-	14,28	10,46	3,12	-
		$k_V$	-	-	0,116	0,140	0,211	-
	Н	$\bar{X}_H$	-	-	14,83	10,23	2,91	-
		$k_V$	-	-	0,077	0,142	0,138	-
		$\frac{\bar{X}_H - \bar{X}_K}{\bar{X}_H}$	-	-	0,037	-0,022	-0,072	-
10...20	К	$\bar{X}_K$	-	-	-	13,02	7,73	3,84
		$k_V$	-	-	-	0,116	0,114	0,201
	Н	$\bar{X}_H$	-	-	-	13,89	7,17	3,99
		$k_V$	-	-	-	0,146	0,187	0,079
		$\frac{\bar{X}_H - \bar{X}_K}{\bar{X}_H}$	-	-	-	0,063	-0,078	0,038

**Примечания:**

$\bar{X}$  – средневзвешенное значение предельной нагрузки, кН;

$k_V$  – коэффициент вариации средневзвешенного значения предельной нагрузки.

Таким образом, проведенное исследование показало, что при испытании крупнозернистых сыпучих сред методом косого среза с использованием усовершенствованной клиновой установки условия нагружения не оказывают никакого влияния на предельную нагрузку, а, значит, для значительной экономии временных ресурсов прочностные характеристики таких сред целесообразно определять по неконсолидированно-дренированной схеме нагружения.

### Список литературы:

1. Пахомов, О. А. Сопротивление сдвигу камней различной крупности // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Т. 109. – 1975.
2. Петров, Г. Н. Экспериментальные исследования сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов Чарвакской плотины / Г. Н. Петров, В. Г. Радченко, Л. С. Рейфман // Гидротехническое строительство. – № 9. – 1970.
3. Рассказов, Л. Н. Сопротивление каменной наброски сдвигу. Вопросы проектирования водонапорных сооружений : Госстройиздат, 1963.
4. Ничипорович А. А., Рассказов Л. Н. Сопротивление сдвигу крупнообломочных материалов. Доклады на Европейской конференции по сопротивлению сдвигу грунтов из горных пород. (Сентябрь, 1967, Осло, Норвегия). – М., 1967.
5. Roscol K. H., Schofield A. N., Wroth C. R. On the yielding of soils // Geotechnique, vol. 8, No 1, 1958.
6. Mueller, G. E. Radial porosity in packed beds of spheres // Powder Technology. 2010, no. 203, pp. 626-633.
7. Roozbahani, M. M. Effect of rectangular container's sides on porosity for equal-sized sphere packing / M. M. Roozbahani, B. B. K. Huat, A. Asadi // Powder Technology. 2012, no. 224, pp. 46-50.
8. Wensrich, C. M. Boundary structure in dense random packing of monosize spherical particles // Powder Technology. 2012, no. 219, pp. 118-127.
9. Бондарев, В. Г. Математическое моделирование пристенного эффекта в случайных упаковках систем частиц // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 2-1. С. 12-15.
10. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.
11. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия.
12. <https://npp-geotek.com/catalog/special/ustanovka-dlya-kompleksnykh-ispytaniy-na-srez-gt-1-2-15/>
13. ВСН 29-76. Технические указания по оценке и повышению технико-эксплуатационных качеств дорожных одежд и земляного полотна [Текст]. – М.: Транспорт, 1977.
14. Шабаев С. Н. Метод косо́го среза для определения прочностных характеристик предварительно уплотненных крупнозернистых сред / С. Н. Шабаев, Н. В. Крупина, В. А. Шаламанов, Н. А. Мартель, А. И. Штарк // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Выпуск 3 (59). – С. 115-121 (DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2020-3-115-122>).
15. Шабаев С. Н. Влияние крупности частиц однородной сыпучей зернистой среды на прочностные характеристики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 62–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-62-70>.