Метод косого среза для определения прочностных характеристик предварительно уплотненных крупнообломочных грунтов

Сергей Николаевич ШАБАЕВ*,
Наталья Васильевна КРУПИНА**,
Виктор Александрович ШАЛАМАНОВ***,
Никита Александрович МАРТЕЛЬ,
Артем Иванович ШТАРК

Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

Аннотация

Актуальность работы. При строительстве карьерных автомобильных дорог наибольшее распространение получили щебеночные материалы, раздробленные горные породы и крупнообломочные (преимущественно щебенистые) грунты. Однако прочностные характеристики данных сред изучены в недостаточном объеме, что обусловлено тем, что отсутствуют достоверные методы их определения.

Цель исследований – разработка надежного метода определения прочностных характеристик предварительно уплотненных щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов.

Методы проведения исследований. Для достижения поставленной цели проведен анализ конструктивных особенностей существующей клиновой установки, выявлены элементы и узлы, требующие доработки для обеспечения возможности предварительного уплотнения испытываемой среды, выполнен статистический анализ полученных на усовершенствованной клиновой установке данных, а также их сопоставление с результатами, полученными при испытании по стандартной методике.

Результаты исследований. Разработана конструкция усовершенствованной клиновой установки, позволяющей определять прочностные характеристики предварительно уплотненных статическим или динамическим методом щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов. Определены требуемые геометрические параметры ее отдельных элементов в зависимости от максимального размера частиц испытываемой среды, а также приведен порядок подготовки к эксперименту и его проведения.

Выводы. Предложенная конструкция усовершенствованной клиновой установки позволяет определять прочностные характеристики предварительно уплотненных щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов с размером частиц до 20–30 мм. Во избежание возникновения шпоночного эффекта и получения хаотических результатов оптимальный зазор между верхней и нижней обоймами должен составлять 0,3 от максимального размера частиц. Для получения достоверного интервала измеряемой величины разрушающей нагрузки ± 10 % от средневзвешенного значения при достоверной вероятности 90 % при реализации метода косого среза с учетом возможных промахов требуется повторение опыта при одних и тех же факторах не менее 5 раз.

Ключевые слова: щебеночные материалы, раздробленные горные породы, крупнообломочные грунты, прочностные характеристики, косой срез, клиновая установка.

Введение

Одной из важнейших технологических операций при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом является транспортирование горной массы, которое осуществляется в подавляющем большинстве карьерным автотранспортом. Для снижения удельной себестоимости добычи полезного ископаемого, в том числе и за счет транспортных затрат, промышленные предприятия стремятся использовать автосамосвалы особо большой грузоподъемности, достигающей 500 т. Это не может не отражаться на состоянии

карьерных автомобильных дорог. Несмотря на то, что для устройства дорожной одежды могут предусматриваться покрытия усовершенствованного и капитального типов [1, 2], устройство основания, а также покрытия временных дорог все равно осуществляется преимущественно из щебеночных материалов, раздробленных горных пород или щебенистых крупнообломочных грунтов. Чтобы обеспечить прочность дорожных одежд, необходимо не допустить деформаций формоизменения этих зернистых сред, вызванных сдвиговыми (касательными)

*shsn.ad@kuzstu.ru

https://orcid.org/0000-0002-2059-6169

**krupinanv@kuzstu.ru

***shalamanovva@kuzstu.ru

Рисунок 1. Схема усовершенствованной клиновой установки: 1 – винт осевого давления; 2 – днище; 3 – каретка основания; 4 – кронштейн; 5 – обойма верхняя; 6 – обойма нижняя; 7 – переходник; 8 – полуцилиндр обжимного устройства; 9 – пригруз; 10 – рама; 11, 13, 16 – болтовые соединения; 12, 14 – регулировочные винты; 15 – динамометр сжатия.

Figure 1. Diagram of the improved wedge unit: 1 – external screw of abutment pressure; 2 – bottom; 3 – foundation platform; 4 – angle bracket; 5 – upper socket; 6 – lower socket; 7 – adaptor; 8 – semicylinder of compacting machine; 9 – balance weight; 10 – frame; 11, 13, 16 – connected joints; 12, 14 – leveling screws; 15 – loadometer.

напряжениями, возникающими от нагрузок от карьерного автотранспорта.

На сегодняшний день прочностные характеристики крупнозернистых (будем называть грунты, материалы, раздробленные горные породы с преобладающим содержанием частиц размером свыше 2 мм) сред изучены в недостаточном объеме для того, чтобы их можно было прогнозировать или использовать в качестве справочных или нормативных данных. Обусловлено это в числе прочего тем, что, несмотря на достаточно большое количество существующих методов, в том числе одноплоскостного среза, трехосного сжатия, шарового штампа, вращательного среза, среза целиков и косого среза, для данных сред наиболее подходящими являются лишь два последних. Прочностные характеристики подобных сред как нарушенной, так и ненарушенной структуры допускается также определять на крупногабаритной срезной установке по типу лабораторного срезного прибора. Однако если зернистая среда используется в качестве материала для строительства дорожных одежд карьерных автомобильных дорог, то при производстве работ она подлежит уплотнению, что позволяет достичь плотности, превышающей плотность в условиях естественного залегания, которая и моделиру-

ется с использованием данных установок. В этом случае все известные методы становятся неприменимы в связи с тем, что не позволяют обеспечить требуемую степень уплотнения в ходе подготовки к эксперименту. При этом известно, что механические характеристики крупнообломочных грунтов зависят от их физических параметров, в том числе и плотности (пористости, коэффициента пористости) [3–8].

Если остановиться только на лабораторных методах определения прочностных характеристик крупнообломочных грунтов, позволяющих моделировать их гранулометрический состав, степень влажности и уплотнения, то в рассмотрение могут быть приняты только лабораторный срезной прибор, реализующий метод одноплоскостного среза, и клиновая установка типа КУ-54, при помощи которой реализуется метод косого среза. Клиновая установка с учетом требуемых технических доработок значительно проще в изготовлении, при ее использовании повышается достоверность результатов испытаний [9], однако для обеспечения работы с ней требуется большое количество обойм, обеспечивающих различный угол наклона площадки сдвига. Несмотря на данный недостаток, было принято решение произвести доработку именно

клиновой установки с целью возможности определения прочностных характеристик щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов, уплотняемых специальной техникой в процессе строительства из них конструктивных слоев дорожных одежд карьерных автодорог.

Методы проведения исследований

Усовершенствованная клиновая установка (рис. 1) состоит из двух основных блоков. Первый блок представляет собой раму с жестко закрепленным кронштейном, имеющим внутреннюю резьбу для обеспечения возможности хода винта осевого давления. Второй блок в собранном состоянии представляет собой форму, в которой непосредственно размещается испытываемая зернистая среда при подготовке к испытанию и его проведению.

При подготовке к испытанию нижняя обойма устанавливается на днище, поверх нее накладываются два полых полуцилиндра с ребрами жесткости, которые закрепляются болтовыми соединениями без затяжки и в собранном состоянии представляют собой обжимное устройство. Далее устанавливается верхняя обойма и за счет регулировочных винтов выставляется зазор между верхней и нижней обоймами с последующим затягиванием болтовых соединений. После этого в собранную форму засыпается испытываемая крупнозернистая среда до верхней грани верхней обоймы, на нее устанавливается пригруз, обеспечивающий вертикальное давление 40 г/см^2 , и форма помещается на стандартную виброплощадку, обеспечивающую амплитуду колебаний $0,40 \pm 0,05 \text{ мм}$ и частоту колебаний $48 \pm 3 \text{ Гц}$, или на плиту пресса. При заданном режиме воздействия крупнозернистая среда уплотняется в течение трех минут, после чего форма помещается на каретку основания под винт осевого давления. Полуцилиндры обжимного устройства снимаются, на пригруз устанавливаются переходник и динамометр сжатия и винт осевого давления путем вращения доводится до соприкосновения с последним.

В ходе проведения испытания винтом осевого давления ступенями $100\text{--}200 \text{ Н}$ передается усилие на испытываемую среду с выдерживанием каждой ступени в течение $3\text{--}5 \text{ мин}$ для схемы консолидированно-дренированного или непрерывно для условия неконсолидированно-недренированного среза. Момент сдвига фиксируется по индикатору динамометра обратным возрастанию нагрузки вращением стрелки индикатора.

Несмотря на то, что при испытании грунтов в условиях консолидированно-дренированного среза производят их предварительное уплотнение до завершения 100%-ной фильтрационной консолидации, в данной методике это не предусматривается, так как величина нормального давления по нормированной методике составляет от $0,1$ до

$0,5 \text{ МПа}$, а при уплотнении с использованием пресса для щебеночных материалов может достигать $20\text{--}25 \text{ МПа}$ [10]. Такое большое давление в ходе предварительного уплотнения приводит к более плотной упаковке частиц, и при расчетном нормальном давлении при определении прочностных характеристик $0,1\text{--}0,5 \text{ МПа}$ крупнообломочные грунты работают преимущественно в упругой стадии, а не в упруго-вязко-пластической [11].

Результаты исследований

При реализации метода косого среза важным является внутренний диаметр обойм $d_{\text{об}}$ клиновой установки, значения которого зависят от максимальной крупности частиц, входящих в состав испытываемой зернистой среды. Несмотря на то, что по ГОСТ 12248 максимальный размер частиц ограничивается $1/5$ высоты образца, составляющей от $1/3$ до $1/2$ от внутреннего диаметра, т. е. высота образца меньше его диаметра, при реализации метода косого среза ситуация обратная – диаметр образца меньше его высоты. Принимая во внимание результаты исследований [12–14], можно сказать, что для уменьшения влияния пристенного эффекта внутренний диаметр обойм должен быть не менее чем в $5\text{--}7$ раз больше максимального размера частиц, входящих в состав щебеночного материала, раздробленной горной породы или крупнообломочного грунта.

Понятно, что общая рабочая высота обойм $h_{\text{раб}}$ в собранном состоянии будет зависеть как от внутреннего (внешнего) диаметра обойм, так и от величины угла наклона площадки сдвига (угла линии реза) α . Известно, что максимальный угол наклона площадки сдвига составляет 60° [5], в связи с чем с учетом обеспечения дополнительного расстояния $h_{\text{доп}}$, равного 30 мм , можно определить общую рабочую высоту обойм. Рекомендуемые значения внутреннего диаметра и общей рабочей высоты обойм приведены ниже.

Рекомендуемые значения внутреннего диаметра и общей рабочей высоты обойм клиновой установки свидетельствуют о том, что общая рабочая высота обойм при максимальном размере частиц свыше 20 мм может превышать максимально допустимую толщину уплотняемого слоя, составляющую, как правило, не более $30\text{--}50 \text{ см}$, даже несмотря на то, что активная зона может достигать более 3 м [15]. Поэтому чтобы избежать вероятности недоуплотнения щебеночных материалов, раздробленных горных пород или крупнообломочных грунтов, содержащих в своем составе частицы размером свыше 20 мм , в собранную форму испытываемые среды целесообразно засыпать в два этапа. На первом этапе производится засыпка приблизительно половины расчетного объема испытываемой среды с уплотнением при заданном режиме воздействия. На втором этапе производится разрыхление

Рекомендуемые значения внутреннего диаметра и общей рабочей высоты обойм клиновой установки.

Recommended values of inner diameter and total working height of sockets of wedge units.

Максимальный размер частиц, мм	10	20	40	80
Рекомендуемый внутренний диаметр обойм, мм	70	140	280	560
Рекомендуемая общая рабочая высота обойм, мм, не менее	200	320	560	1050

Таблица 1. Результаты эксперимента по оценке влияния величины зазора между верхней и нижней обоймой на шпоночный эффект.

Table 1. Results of the experiment to assess the influence of the size of the gap between the upper and lower socket on the splined effect.

№ п/п	Угол линии реза, град.	Величина зазора, мм	Разрушающая нагрузка, кН	Примечания
Размер частиц от 10 до 20 мм				
1	50	8	1,86	
2			8,04	
3			Не определялась	Сдвиг при снятии обжимного устройства
4			4,51	
5			Не определялась	Неравномерный зазор между обоймами
6		6	9,23	
7			9,35	
8			9,05	
9			5,24	Признан промахом
10			8,18	
11		4	Более 15	Звуковые волны, характеризующие работу частиц на излом
12				
13				
Размер частиц от 5 до 10 мм				
14	47,5	4	Не определялась	Неравномерный зазор между обоймами
15			Не определялась	Неравномерный зазор между обоймами
16			0,78	
17		3	7,48	
18			8,98	
19			8,42	
20			7,82	
21			8,00	
22		2	Более 15	Звуковые волны, характеризующие работу частиц на излом
23			Более 15	
24			Более 15	
Размер частиц от 2,5 до 5 мм				
25	45	2	Не определялась	Сдвиг при снятии обжимного устройства
26			1,59	
27			Не определялась	Сдвиг при снятии обжимного устройства
28			0,46	
29		1,5	2,52	
30			Не определялась	Неравномерный зазор между обоймами
31			2,49	
32			2,67	
33			2,31	
34			Не определялась	Сдвиг при снятии обжимного устройства
35			2,18	
36		1	Более 15	Звуковые волны, характеризующие работу частиц на излом
37				
38				

верхней части уже уплотненной среды на глубину, соответствующую максимальному размеру частиц, и засыпка второй половины с окончательным уплотнением при том же режиме уплотняющего воздействия.

На основе данных рекомендуемых значений внутреннего диаметра и общей рабочей высоты обойм также понятно, что общая масса формы вместе со щебеночным материалом, раздробленной горной породой или

крупнообломочным грунтом, содержащими в своем составе частицы размером свыше 20 мм, будет достаточно большой для того, чтобы иметь возможность перемещать ее только усилиями человека, в связи с чем в этом случае необходимо предусматривать приспособления для механизации данных процессов. Кроме того, не все прессы и виброплощадки способны размещать формы подобного размера, а значит, при реализации метода косого среза с

Таблица 2. Результаты расчета требуемого числа повторения опытов при определении прочностных характеристик крупнозернистых сред методом косого среза.**Table 2. Results of calculating the required number of repetitions of experiments in determining the strength characteristics of coarse-grained media by the method of slanting cut.**

Размер частиц, мм	Средневзвешенное значение разрушающей нагрузки по результатам эксперимента, кН	Допустимое отклонение случайной величины, кН	Доверительная вероятность	Требуемое число повторения опытов без учета промахов	Рекомендуемое число повторения опытов с учетом возможных промахов
От 10 до 20	8,953	±0,90		3	4
От 5 до 10	8,140	±0,81	0,90	4	5
От 2,5 до 5	2,434	±0,25		4	5

обеспечением предварительного уплотнения испытываемых сред до степени, сопоставимой со степенью уплотнения, достигаемой в реальных построечных условиях, максимальный размер частиц целесообразно ограничивать 20–30 мм. При необходимости испытания щебеночных материалов, раздробленных горных пород или крупнообломочных грунтов, содержащих более крупные частицы, целесообразно всю установку размещать непосредственно на прессе с большой плитой основания и обеспечением возможности вынимания испытываемой среды из форм после ее испытания.

Также немаловажным является назначение зазора между верхней и нижней обоймами, так как от него зависит, с одной стороны, вероятность во время предварительного уплотнения попадания частиц в зазор между формами с последующим возникновением расклинивающего эффекта, приводящего к искривлению зазора между противоположными частями форм, а с другой – к возникновению шпоночного эффекта. И если искривление форм можно избежать путем предварительной закладки в зазор между обоймами податливого, но достаточно плотного и прочного материала, например джута, то шпоночный эффект может исказить результаты эксперимента с получением абсолютно неверных данных, в связи с чем его учет обязателен. В существующих методиках для связных грунтов величину данного зазора назначают 0,5 мм, а для песчаных грунтов – 1 мм. Понятно, что для щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов величина данного зазора будет неприемлема, так как при сдвиге возможно как перемещение одних частиц относительно других после преодоления действующих между ними сил трения (сцепления), так и их пережат. И если зазор будет недостаточен, то частицы, упираясь в краевых частях формы как в верхнюю, так и в нижнюю обоймы, будут препятствовать сдвигу, работая на излом.

Для определения влияния величины зазора между верхней и нижней обоймой усовершенствованной клиновой установки с внутренним диаметром формы 149 мм и высотой формы 400 мм на шпоночный эффект был поставлен соответствующий эксперимент. Несмотря на общепринятые требования, предъявляемые к параметру оптимизации, в данном случае он не являлся только однозначным статистически значимым числовым значением, так как при его определении в том числе использовались

органы чувств. Результаты проведенного эксперимента представлены в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что при повышенном значении величины зазора (более 0,35 от максимального размера частиц) получаемые результаты не могут быть подвержены статистической обработке, так как хаотичны. Кроме того, достаточно высока вероятность проведения неудачного опыта из-за возможного сдвига обойм друг относительно друга при снятии обжимного устройства или формирования неравномерного зазора между противоположными частями обойм после уплотнения испытываемой среды. Если зазор недостаточный (менее 0,25 от максимального размера частиц), то ярко выражен шпоночный эффект, влияющий на изменение гранулометрического состава щебеночных материалов, раздробленных горных пород или крупнообломочных грунтов в связи с измельчением частиц и получением заведомо ложных результатов.

При проведении эксперимента наиболее стабильные результаты получены при величине зазора 0,3 от максимального размера частиц, входящих в состав испытываемой среды. Но даже при такой величине зазора отдельно взятый опыт может оказаться неудачным из-за причин, описанных ранее, или получения отдельных результатов, которые могут быть признаны грубой ошибкой (грубой погрешностью, промахом). В связи с этим важным является определение необходимого числа повторения опытов для получения доверительного интервала с заданной надежностью. Для этого воспользуемся критерием согласия Стьюдента при доверительном интервале ±10 % от средневзвешенного значения при доверительной вероятности 90 %. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Для оценки адекватности получаемых результатов произведено сравнение прочностных характеристик, полученных на усовершенствованной клиновой установке и приборе ПСГ-3М, при помощи которого реализуется нормированный ГОСТ 12248 метод одноплоскостного среза. Значения прочностных характеристик отсевов дробления узких фракций приведены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что значения угла внутреннего трения практически идентичны, в то время как удельное сцепление при размере частиц от 2,5 до 5 мм имеет значительное отклонение. Обусловлено это, возможно, тем, что при определении прочностных характеристик методом

Таблица 3. Результаты определения прочностных характеристик отсевов дробления узких фракций.
Table 3. Results of determining the strength characteristics of crushing screenings of narrow cuts.

Размер частиц, мм	Значение угла внутреннего трения, град., полученного по результатам испытаний		Относительное отклонение значений угла внутреннего трения, %	Значение удельного сцепления, полученного по результатам испытаний, кПа		Относительное отклонение значений удельного сцепления, %
	на усовершенствованной клиновой установке	на приборе одноплоскостного среза		на усовершенствованной клиновой установке	на приборе одноплоскостного среза	
От 1,25 до 2,5	39,7	40,7	2,5	6,6	6,3	4,8
От 2,5 до 5	41,7	42,2	1,2	12,0	14,2	18,3

одноплоскостного среза величина зазора между верхней и нижней кареткой нормирована и должна составлять 1 мм (применительно к пескам, к которым также относятся и отсевы дробления). Но приведенные ранее результаты показывают, что оптимальная величина зазора между каретками (обоймами) зависит от размера частиц и составляет 0,3 от их максимального размера. Так, для фракции 1,25–2,5 мм данная величина должна быть равна 0,75 мм, а для фракции 2,5–5 мм – 1,5 мм. В связи с этим можно предположить, что повышенное значение удельного сцепления, полученного на приборе одноплоскостного среза, относительно значения, полученного на усовершенствованной клиновой установке, при размере частиц от 2,5 до 5 мм обусловлено возникающим шпоночным эффектом из-за недостаточной величины зазора между верхней и нижней обоймами. В прочих случаях отклонения значений прочностных характеристик незначительны, что подтверждает адекватность результатов, полученных на усовершенствованной клиновой установке.

Выводы

1. Прочностные характеристики щебеночных материалов, раздробленных горных пород и крупнообломочных грунтов, уплотненных до степени, сопоставимой со степенью уплотнения, достигаемой в реальных построечных условиях, можно определить методом косого среза с использованием усовершенствованной переносной клиновой установки, если они содержат в своем составе частицы размером до 20–30 мм.

2. Во избежание возникновения шпоночного эффекта и получения хаотических результатов оптимальный зазор между верхней и нижней обоймами должен составлять 0,3 от максимального размера частиц, входящих в состав испытываемой среды.

3. Для получения доверительного интервала измеряемой величины разрушающей нагрузки $\pm 10\%$ от средневзвешенного значения при доверительной вероятности 90 % при реализации метода косого среза с учетом возможных промахов требуется повторение опыта при одних и тех же факторах не менее 5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

- Борисова А. А., Соколова М. Д., Заровняев Б. Н., Акишев А. Н. Анализ возможности применения покрытий усовершенствованного типа на дорогах кимберлитовых карьеров Якутии // Горный журнал. 2019. № 2. С. 74–77. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.15>
- Христофорова А. А., Соколова М. Д., Заровняев Б. Н., Акишев А. Н. Перспективы применения модифицированных битумов для строительства крутонаклонных карьерных дорог // Горный журнал. 2016. № 3. С. 47–49. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.03.10>
- Vallerga B. A., Seed H. B., Monismith C. L., Cooper R. S. Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials // ASTM Special technical publication. 1957. № 212. P. 63–76.
- Гордиенко П. И. Некоторые вопросы проектирования высоких каменно-земляных плотин // Сб. трудов МИСИ. 1961. № 32. С. 23–35.
- Рассказов Л. Н. Экспериментальные исследования сопротивляемости сдвигу крупнообломочных грунтов // Труды ВНИИ ВОДГЕО. 1968. Вып. 19. С. 92–97.
- Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 272 с.
- Трофименков Ю. Г. Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
- Алимсеитов Д. Н., Горбачев А. Г., Рыспаев Б. С., Сагыбекова А. О. Изучение прочностных характеристик крупнообломочного грунта и модели крупнообломочного грунта // Проблемы науки. 2018. № 12 (36). С. 34–37.
- Швец В. Б., Лушников В. В., Жидков О. Н. Влияние включений крупных фракций на показатели сдвига грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1975. № 5. С. 27–28.
- Неволин Д. Г., Дмитриев В. Н., Кошкароев Е. В. и др. Инновационные технологии проектирования и строительства автомобильных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2015. 291 с.
- Иванов Н. Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. М.: Транспорт, 1973. 328 с.
- Mueller G. E. Radial porosity in packed beds of spheres // Powder Technology. 2010. № 203, issue 3. P. 626–633. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.007>
- Roozbahani M. M., Huat B. B. K., Asadi A. Effect of rectangular container's sides on porosity for equal-sized sphere packing // Powder Technology. 2012. № 224. P. 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.018>
- Wensrich C. M. Boundary structure in dense random packing of monosize spherical particles // Powder Technology. 2012. № 219. P. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.026>
- Афиногенов А. О. Анализ напряженно-деформированного состояния массива грунта земляного полотна автомобильных дорог // Автомобильный транспорт. 2008. № 3. С. 109–111.

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2020 года

Oblique shear method for determining strength performance of pre-compacted very coarse soils

Sergey Nikolaevich SHABAEV',
Natal'ya Vasil'evna KRUPINA'',
Viktor Aleksandrovich SHALAMANOV''',
Nikita Aleksandrovich MARTEL',
Artem Ivanovich SHTARK

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Abstract

The relevance of the work. Crushed stone, crushed rock and very coarse (mostly crushed plant) soils are the most widely used in the construction of open pit haul roads. However, the strength performance of these media has been studied insufficiently, due, inter alia, to the fact that there are no reliable methods for their determination.

The purpose of the work is to develop a reliable method for determining the strength performance of pre-compacted crushed stone, crushed rock and very coarse soils.

Research methods. To achieve the purpose, an analysis of the design features of the existing oblique shear apparatus was carried out, elements and nodes were identified that needed refinement to ensure test media pre-compaction, a statistical analysis of the data obtained on the improved oblique shear apparatus, as well as their comparison with the results obtained by testing according to standard methods, were performed.

Research results. A design of an improved oblique shear apparatus has been developed, which allows determining the strength performance of statically and dynamically pre-compacted crushed stone, crushed rock and very coarse soils. The required geometric parameters of its individual elements are determined depending on the maximum particle size of the test media, and the order of preparation for the experiment and its conduct is given.

Conclusions. The proposed design of an improved oblique shear apparatus allows determining the strength performance of pre-compacted crushed stone, crushed rock and very coarse soils with a particle size of up to 20–30 mm. In order to avoid the occurrence of a keyway effect and to obtain chaotic results, the optimal clearance between the upper and lower holders should be 0.3 of the maximum particle size. To obtain the confidence interval of the measured breaking load value $\pm 10\%$ of the weighted average value with a confidence level of 90% when implementing the oblique shear method, taking into account possible misses, it is necessary to repeat the experiment with the same factors at least 5 times.

Keywords: crushed stone, crushed rock, very coarse soils, strength performance, oblique shear, oblique shear apparatus.

REFERENCES

1. Borisova A. A., Sokolova M. D., Zarovnyaev B. N., Akishev A. N. 2019, Analysis of the possibility of using improved coatings on the roads of kimberlite quarries in Yakutia. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 2, pp. 74–77. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.15>
2. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Zarovnyaev B. N., Akishev A. N. 2016, Prospects for the use of modified bitumen for the construction of steeply inclined open pit roads. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 3, pp. 47–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.03.10>
3. Vallerger B. A., Seed H. B., Monismith C. L., Cooper R. S. 1957, Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials. *ASTM Special technical publication*, no. 212, pp. 63–76.
4. Gordienko P. I. 1961, *Nekotoryye voprosy proyektirovaniya vysokikh kamenno-zemlyanykh plotin* [Some issues of designing high earth-to-rockfill dams]. *Proceedings of the Moscow Civil Engineering Institute*, no. 32, pp. 23–35.
5. Rasskazov L. N. 1968, *Eksperimental'nyye issledovaniya soprotivlyayemosti sdvigu krupnooblomochnykh gruntov* [Experimental studies of shear resistance of coarse-grained soils]. *VNI VODGEO Proceedings*, issue 19, pp. 92–97.
6. Lysenko M. P. 1980, *Sostav i fiziko-mekhanicheskiye svoystva gruntov* [Composition and physical and mechanical properties of soils]. Moscow, 272 p.
7. Trofimenkov Yu. G. 1981, *Polevyye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov* [Field methods of studying the building properties of soils]. Moscow, 215 p.
8. Alimseitov D. N., Gorbachev A. G., Ryspaev B. S., Sagybekova A. O. 2018, Study of strength characteristics of coarse-grained soil and model of coarse-grained soil. *Problemy nauki* [Science problems], no. 12 (36), pp. 34–37. (In Russ.)
9. Shvets V.B., Lushnikov V.V., Zhidkov O.N. 1975, Influence of inclusions of coarse fractions on soil shear indicators. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], no. 5, pp. 27–28. (In Russ.)
10. Nevolin D. G., Dmitriyev V. N., Koshkarov Ye. V. et al. 2015, *Innovatsionnyye tekhnologii proyektirovaniya i stroitel'stva avtomobil'nykh dorog* [Innovative technologies for the design and construction of highways]. Ekaterinburg, 291 p.

✉ shsn.ad@kuzstu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2059-6169>

''krupinanv@kuzstu.ru

'''shalamanovva@kuzstu.ru

11. Ivanov N. N. 1973, *Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd* [Design and calculation of non-rigid road pavements]. Moscow, 328 p.
12. Mueller G. E. 2010, Radial porosity in packed beds of spheres. *Powder Technology*, no. 203, issue 3, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.007>
13. Roozbahani M. M., Huat B. B. K., Asadi A. 2012, Effect of rectangular container's sides on porosity for equal-sized sphere packing. *Powder Technology*, no. 224, pp. 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.018>
14. Wensrich C. M. 2012, Boundary structure in dense random packing of monosize spherical particles. *Powder Technology*, no. 219, pp. 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.026>
15. Afinogenov A.O. 2008, Analysis of the stress-strain state of the soil massif of the roadbed of highways. *Avtomobil'nyy transport* [Automobile transport], no. 3, pp. 109–111. (In Russ.)

The article was received on April 21, 2020