

MPHTI 67.21.17

Ф.Х. Аубакирова¹ – основной автор, ©
К.С. Досалиев², К. Ибрагимов³,
Д.Ж. Артыкбаев⁴, А.М. Будикова⁵



^{1,3}Канд. техн. наук, доцент, ²PhD, ⁴PhD, ст. препод.,

²Канд. техн. наук, ст. препод.

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-4687-1528> ²<https://orcid.org/0000-0002-5423-9231>

³<https://orcid.org/0000-0001-6557-4484> ⁴<https://orcid.org/0000-0003-4794-8707>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-4879-9467>



^{1,2,3,4}Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент,
Казахстан

⁵Кызылординский университет им. Коркыт Ата, г. Кызылорда, Казахстан

@

¹faraub1011@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/YFUG9648>

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КРУПНООБЛОМОЧНОГО ГРУНТА КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

Аннотация. В статье рассмотрен прибор плоского сдвига для проведения исследований прочностных свойств крупнообломочного грунта, приведена методика проведения опытов и обработки экспериментальных данных. Выявлено, что снижение прочности крупнообломочного грунта происходит с увеличением его напряженного состояния. При этом для обеспечения однородности прочностных свойств сооружения необходимо стремиться к равномерной укладке грунта по всей площади тела плотины. Установлено, что изменение прочностных свойств крупнообломочного грунта в зависимости от фракционного состава камня при одинаковой степени уплотнения возможно только за счет увеличения коэффициента зацепления.

Ключевые слова: каменно-земляная плотина, крупнообломочный грунт, прочностные свойства грунта, прибор плоского сдвига, модельная смесь.



Аубакирова, Ф.Х. Исследования прочностных свойств крупнообломочного грунта каменно-земляных плотин [Текст] / Ф.Х. Аубакирова, К.С. Досалиев, К. Ибрагимов, Д.Ж. Артыкбаев, А.М. Будикова // Механика и технологии / Научный журнал. – 2024. – №3(85). – С.247-256. <https://doi.org/10.55956/YFUG9648>

Введение. В последние годы большую актуальность приобретает рациональное использование каменных материалов, которые получают путем разработки горных пород взрывным способом [1,2]. На объектах гидротехнического и водохозяйственного строительства, связанных с большими объемами грунта, всё чаще вместо сортированного камня используют горную массу, представляющую собой смесь многофракционного состава. По этой причине в строительной практике и возникает необходимость определения прочностных свойств крупнообломочного грунта, используемого при строительстве каменно-земляных плотин, т.к. это влияет на функциональную надежность сооружения.

Изучению прочностных свойств крупнообломочных грунтов посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Так, исследования С.Н. Шабаева показали, что увеличение размера частиц однофракционной среды приводит к росту угла внутреннего трения и удельного сцепления [3,4]. Им также предложен усовершенствованный вариант клиновой установки для оценки сдвигоустойчивости предварительно уплотненных крупнозернистых сред по методу косога среза и выявления прочностных характеристик материала, а именно угла внутреннего трения и сцепления.

Исследовательская группа под руководством А.О. Сагыбековой [5] на сдвиговой установке определила, что остаточная прочность является более точной характеристикой сопротивления грунтов. Данной научной группой выявлено, что уплотнение крупнообломочных грунтов зависит от размера зерен, количества и состава заполнителя, формы и прочности обломков, а также начальной плотности укладки.

М.П. Саинов, изучая работы исследователей прошлого века [6], заметил, что степенная функция хорошо описывает возрастание значения модуля сдвига крупнообломочных грунтов в зависимости от напряжения обжатия грунта. Также он определил, что гравийно-галечниковый грунт менее деформируем и имеет более высокую прочность, чем горная масса при тех же условиях.

Результаты исследований В.А. Козионова [7] подтвердили армирующее влияние крупных включений на прочностные свойства крупнообломочных грунтов. Установлена связь между параметрами прочности, структуры и физического состояния грунта. Отмечено, что с увеличением размера включений и их количества повышаются прочностные характеристики грунта, а повышение влажности ведет к их снижению.

Группа исследователей под руководством А.Ф. Колоса [8] выявила, что повышение окатанности зерен приводит к существенному снижению сцепления между зёрнами в щебеночном балласте, однако почти не влияет на угол внутреннего трения.

Из числа современных публикаций, посвященных решению данной проблемы за рубежом, можно отметить работы следующих авторов: S. Ghorashi, M. Khodaparast, Q. Khodajooyan [9], M. Fard [10], E. Wu, J. Zhu, W. Guo, Z. Zhang [11].

Условия и методы исследований. В строительной практике для исследования прочностных свойств крупнообломочных грунтов применяют прибор плоского сдвига и стабилометр.

В приборе плоского сдвига измеряемыми параметрами в испытаниях являются нормальное σ и сдвигающее τ напряжения в плоскости сдвига, по которым рассчитывается коэффициент сдвига K_c .

В стабилометре, в отличие от прибора плоского сдвига, измеряются два главных напряжения: максимальное σ_1 и минимальное σ_3 ($\sigma_2 = \sigma_3$). При этом коэффициент сдвига может быть рассчитан только после предварительных вычислений нормальных и сдвигающих напряжений по площадкам разрушения согласно формулам (1)-(3):

$$\sigma = \frac{2\sigma_1\sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_2} \cdot \sqrt{\sigma_1\sigma_3} \quad (2)$$

$$K_C = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_3}} \quad (3)$$

Результаты опытов как в приборах плоского сдвига, так и в стабилометрах, можно интерпретировать одинаковым образом в виде зависимости $K_C=f(\sigma)$, т.е. по теории Кулона-Мора. Многочисленные исследования, выполненные различными организациями на этих двух приборах, показывают практически одинаковые результаты. Несколько различны только методика проведения опытов и интерпретация результатов.

Следует отметить, что на приборе плоского сдвига имеется возможность исследовать крупнообломочные грунты близкие по зерновому составу к натурному. При этом работа на этом приборе характеризуется простой методикой проведения исследования, что делает его привлекательным для многих исследователей и инженеров. Также при проведении испытаний горной массы (рваный камень) с экономической точки зрения использование этого прибора является более выгодным, чем применение стабилометра.

При проведении экспериментальных исследований прочностных свойств крупнообломочного грунта нами использовался прибор плоского сдвига с размерами 700x700x700мм. Данный прибор состоит из следующих элементов: нижней и верхней кареток; гидравлических домкратов для создания вертикальных и горизонтальных нагрузок и прогибомеров для измерения вертикальных и горизонтальных деформаций. Подвижная нижняя каретка представляет собой металлический контейнер на катающихся опорах. Неподвижная верхняя каретка представляет собой раму, укладываемую на катки по нижней каретке. Образец грунта закладывается в контейнер, образованный между верхней и нижней каретками. Вертикальная нагрузка на образец передается через штампы. Нагрузка на штамп создается гидравлическим домкратом и контролируется манометром. Горизонтальная нагрузка генерируется горизонтальным домкратом и ее величина также контролируется манометром. Перемещения каретки регистрируются прогибомерами.

Перед проведением опытов была выполнена тарировка гидравлической системы прибора, к которой относятся насос, напорная линия и домкрат.

По причине крупности фракций крупнообломочных грунтов (размеры 100, 200, 500 мм и более), применяемых при строительстве плотин и других гидротехнических сооружений, необходимо проводить трудоемкие и дорогостоящие опыты на уникальных крупногабаритных установках. По этой причине в практике экспериментальных исследований большое внимание уделяется вопросу моделирования состава, крупности и других параметров крупнообломочных грунтов. Если размеры фракции натурального грунта превышают возможности прибора, то эксперименты проводятся с использованием модельных смесей. При этом модельная смесь создается путем уменьшения фракций материала натурального грунта в n раз, чтобы кривые зернового состава натурального и модельного грунта были параллельными. Исходя из условия, что отношение диаметра прибора к размеру максимальной фракции не должно быть меньше пяти [12], т.е. $d_{np} \geq 5d_{max}$, то для нашего прибора плоского сдвига с размерами 700x700x700 мм, зерновые составы принимаются с максимальным диаметром $d_{max}=140$ мм. По рекомендации специалистов НИУ МГСУ наша модельная смесь была сформирована с размером максимальной фракции 120 мм.

При выполнении нами экспериментов на приборе плоского сдвига подготовленный грунт модельного состава послойно укладывался в каретки прибора. Толщина слоя укладки грунта составляла $h=1,2 \cdot d_{max}=14$ см. Каждый слой уплотнялся ручной трамбовкой. Далее укладываемый грунт взвешивался и вычислялась средняя плотность грунта в приборе. Диапазон плотности грунта в экспериментах составил $1,98 \dots 2,03$ т/м³.

После укладки грунта в прибор устанавливались штамп, вертикальный и горизонтальный домкраты, упорная балка, упорные и опорные гайки, прогибомеры. Затем записывалось начальное значение вертикального положения штампа.

Далее вертикальная нагрузка создавалась вертикальным домкратом с шагом $0,05-0,1$ МПа до заданной величины и контролировалась манометром. При достижении заданной нагрузки фиксировались значения вертикальной деформации по осадке штампа на каждой ступени нагрузки.

После достижения вертикальной нагрузки заданной величины, прикладывалась горизонтальная нагрузка с шагом не более $0,05$ МПа. Причем, горизонтальная нагрузка прикладывалась при условии постоянства вертикальной нагрузки. Момент сдвига фиксировался по росту горизонтальных деформаций, отмечаемых прогибомерами при неизменном сдвигающем (горизонтальном) усилии. После окончания опыта сбрасывалось давление в домкратах: сначала вертикальное, потом горизонтальное. Затем прибор разбирался, производился рассев грунта по фракциям через сита и каждая фракция взвешивалась. Далее строилась кривая фракционного состава после опыта, как показано на рисунке 1. Анализ данной кривой (фракционный состав после опыта) дает информацию о дробимости каждой фракции состава грунта.

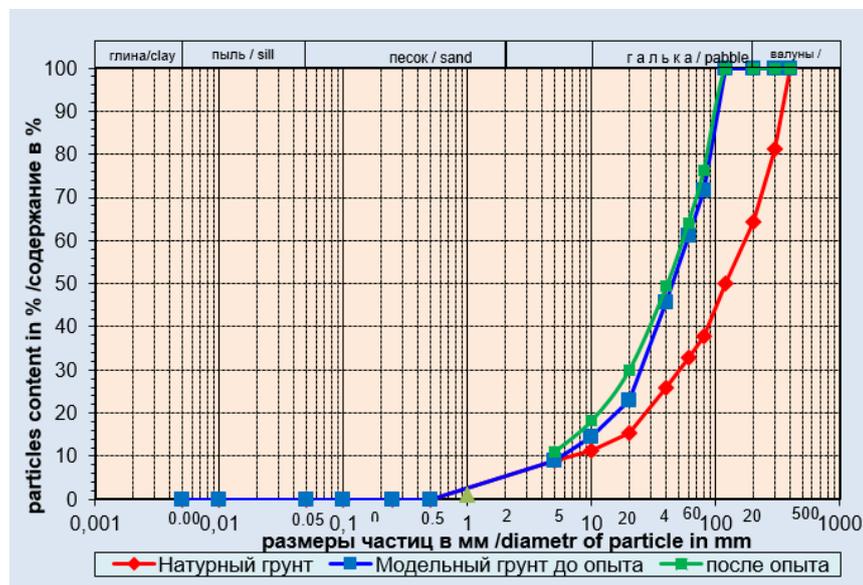


Рис. 1. График фракционного состава натурального грунта и модельной смеси до и после опыта

Результаты исследований и их обсуждение. В связи с переходом оценки прочностных свойств исследуемого грунта на доверительную

вероятность, нормативные и расчётные значения материала следует устанавливать путём статической обработки результатов экспериментальных данных в количестве не менее шести по каждой вертикальной нагрузке [13]. Нами предусмотрено 4 варианта вертикальной нагрузки: 2; 4; 8; 12 кгс/см², соответственно число опытов составило 24. По результатам опытных данных построены графики зависимости $\tau=f(\Delta l)$ и $\tau=f(\sigma)$, где τ – горизонтальное напряжение, сдвиг, кгс/см²; Δl – величина горизонтальной деформации, мм; σ – величина вертикального давления, кгс/см². Ниже на рисунках 2 и 3 приведены графики $\tau=f(\Delta l)$ для 2-х вариантов вертикальной нагрузки ($\sigma=4$ кгс/см² и $\sigma=12$ кгс/см²), на рисунке 4 представлен график $\tau=f(\sigma)$.

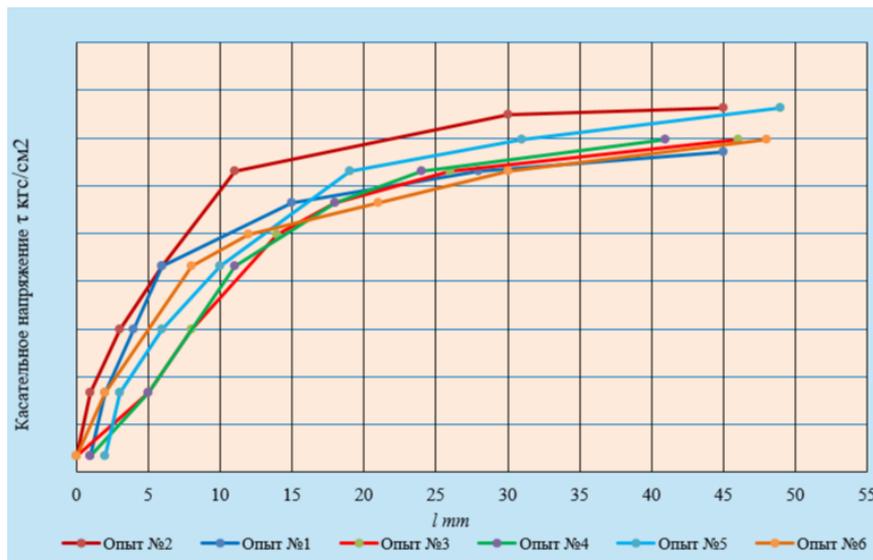


Рис.2. График зависимости $\tau=f(\Delta l)$ при $\sigma=4$ кгс/см²

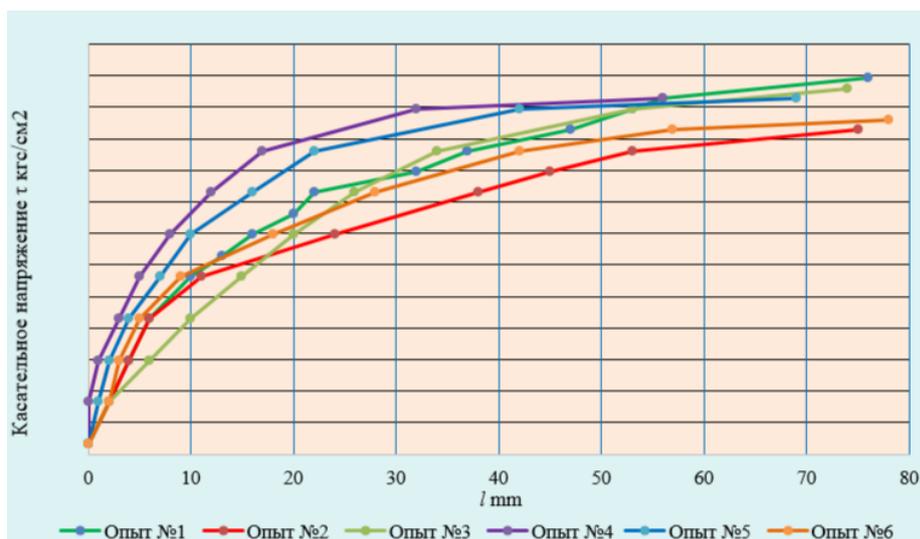


Рис.3. График зависимости $\tau=f(\Delta l)$ при $\sigma=12$ кгс/см²

Рис.4. График зависимости $\tau=f(\sigma)$

Коэффициенты сдвига $tg\varphi$ и зацепления C подсчитывались по методу наименьших квадратов. Определение главных напряжений σ_1 и σ_3 производилось путем построения круга Мора. Точка пересечения круга с осью абсцисс даёт искомую величину главных напряжений σ_1 и σ_3 , а угол наклона касательной к оси абсцисс является углом внутреннего трения φ при данном вертикальном напряжении.

При наличии зацепления для каменного материала (горная масса) угол сдвига определится по формуле:

$$tg\Psi = tg\varphi + \frac{C}{\sigma} \quad (4)$$

где: Ψ – угол сдвига; φ – угол внутреннего трения; C – зацепление; σ – вертикальное напряжение.

Расчетные значения прочности получены путем деления нормативных значений на коэффициент запаса по грунту. При этом коэффициент запаса по грунту вычислялся по совокупности парных измерений вертикальных напряжений и сдвигающих нагрузок от σ_{min} до σ_{max} . Расчет проводился посредством следующих формул:

$$\Delta = n \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^2 \quad (5)$$

$$tg\varphi = \frac{1}{\Delta} \left(n \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i - \sum_{i=1}^n \tau_i \sum_{i=1}^n \sigma_i \right) \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^n \tau \sum_{i=1}^n \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \tau_i \sigma_i \right) \quad (7)$$

Рассчитанные значения экспериментальных данных прочности горной массы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения прочностных свойств горной массы в зависимости от вертикального давления

Вертикальное давление, σ , кгс/см ²	2	4	8	12
Коэффициент сдвига, $tg \varphi$	1,149	0,958	0,862	0,831
Угол внутреннего трения, φ , °	48,9	43,8	40,8	39,7

Анализ таблицы 1 показывает, что снижение прочности происходит с увеличением напряженного состояния грунта. Это следует учитывать при возведении плотины, т.е. чтобы прочностные свойства грунта плотины были одинаковыми необходимо стремиться к однородности материала при укладке грунта в разные зоны тела плотины.

Следует отметить, что полученные нами экспериментальные значения прочностных свойств (угол внутреннего трения, удельное сцепление) горной массы хорошо согласуются со значениями, приведенными в нормативном документе [14]. Следовательно, устойчивость и надежность работы плотины, построенной из данного крупнообломочного грунта, будет обеспечена.

Закключение. Выполненные экспериментальные исследования прочностных свойств горной массы позволяют сделать следующие выводы:

1) прочностные показатели, определенные по результатам испытаний при вертикальных нагрузках от 2,0 до 12,0 кг/см², сжимающие σ и сдвигающие τ напряжения в момент разрушения образца приняты по условию Кулона-Мора. Количество опытов и обработка результатов проведены согласно требованиям нормативных документов [12-15];

2) на основании полученных результатов установлены расчетные характеристики для фактического гранулометрического состава при доверительной вероятности $\alpha=0,95$, которые характеризуются углом сдвига в диапазоне $\varphi=48,9^\circ \dots 39,7^\circ$ в зависимости от значения вертикальной нагрузки от 2,0 до 12,0 кг/см²;

3) изменение прочностных свойств крупнообломочного грунта в зависимости от фракционного состава камня при одинаковой степени уплотнения возможно только за счет увеличения коэффициента зацепления C .

Список литературы

1. Ibragimov K., Ussenkulov Zh.A., Yerimbetov B.T., Baibolov K.S., Kunanbayeva Y.B., Ussenkulova S.Zh. Strength and deformability of large-scale clastic soils // Proceedings of 17ARC «Smart geotechnics for smart societies», 2023. P. 862-866.
2. Петров, Г.Н. Крупнообломочные грунты в гидротехническом строительстве [Текст] / Г.Н. Петров, В.Г. Радченко, В.А. Дубняк. – СПб: АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1994. – 236 с.
3. Шабаев, С.Н. Влияние крупности частиц одноразмерной сыпучей зернистой среды на прочностные характеристики [Текст] / С.Н. Шабаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т.18. – №2. – С. 62-70.

4. Шабаев, С.Н. Метод косо́го среза для определения прочностных характеристик предварительно уплотненных крупнозернистых сред [Текст] / С.Н. Шабаев, Н.В. Крупина, В.А. Шаламанов, Н.А. Мартель, А.И. Штарк // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Т. 3. – С. 115-122.
5. Алимсеитов, Д.Н. Изучение прочностных характеристик крупнообломочного грунта и модели крупнообломочного грунта [Текст] / Д.Н. Алимсеитов, А.Г. Горбачев, Б.С. Рыспаев, А.О. Сагыбекова // Проблемы науки. – 2018. – № 12. – С. 34-37.
6. Саинов, М.П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин [Текст] / М.П. Саинов // Строительство: наука и образование. – 2016. – № 1. – С. 15-33.
7. Козионов, В.А. Оценка прочности глинистых грунтов с включениями дресвы и щебня [Текст] / В.А. Козионов, М.К. Кудерин, Л.А. Варламова, Р.К. Кульжигинов // Наука и техника Казахстана. – 2007. – № 2. – С. 18-26.
8. Колос, А.Ф. Влияние формы зерен щебеночного балласта на его прочностные свойства [Текст] / А.Ф. Колос, П.А. Чистяков, А.С. Леус, Е.И. Шехтман, В.И. Штыков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – С. 148-160.
9. Ghorashi S., Khodaparast M., Khodajooyan Q. Compaction Quality Control of Coarse-grained Soils Using Dynamic Penetration Test Results through Correlation with Relative Compaction Percentages // International Journal of Engineering, 2023. Vol. 36 (3). P. 473-480.
10. Fard M.A method for determining hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils // Unsaturated Soils for Asia, 2020. P. 375-379.
11. Wu E., Zhu J., Guo W., Zhang Z. Effect of Gradation on the Compactability of Coarse-Grained Soils // Journal of Civil Engineering, 2020. Vol. 24 (2). P. 356-364.
12. ГОСТ 30416-2012 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения [Текст]. – Введ. 2014-10-03. – М.: Стандартиформ, 2018. – 12 с.
13. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статической обработки результатов испытаний [Текст]. – Введ. 2014-10-03. – М.: Стандартиформ, 2013. – 16 с.
14. ГОСТ 12248.1-2020 Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза [Текст]. – Введ. 2020-08-31. – М.: Стандартиформ, 2020. – 24 с.
15. СН РК 3.04-03-2023 Основания гидротехнических сооружений [Текст]. – Введ. 2023-11-06. – Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ Министерства промышленности и строительства РК, 2023. – 46 с.

Материал поступил в редакцию 19.08.24.

Ф.Х. Аубакирова¹, К.С. Досалиев¹, К. Ибрагимов¹, Д.Ж. Артыкбаев¹, А.М. Будикова²

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан

²Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан

ТАС-ЖЕР БӨГЕТТЕРІНДЕГІ ІРІСЫНЫҚТЫ ТОПЫРАҚТЫҢ БЕРІКТІК ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Мақалада ірісынықты топырақтың беріктік қасиеттеріне зерттеулер жүргізуге арналған жазық ығысу құрылғысы қарастырылған, эксперименттер жүргізу және эксперименттік деректерді өңдеу әдістемесі келтірілген. Ірісынықты топырақтың беріктігінің төмендеуі – оның кернеу күйінің жоғарылауымен жүретіні анықталды. Сонымен қатар, құрылымның беріктік қасиеттерінің біркелкілігін қамтамасыз ету үшін, бөгет денесінің әртүрлі аймақтарында топырақты біркелкі төсеуге қажет. Ірісынықты топырақтың беріктік қасиеттерінің өзгеруі тастың фракциялық құрамына байланысты, тығыздау дәрежесі бірдей болған кезде, тек ілінісу коэффициентін арттыру арқылы мүмкін болатындығы анықталды.

Тірек сөздер: тас-жер бөгет, ірісінықты топырақ, топырақтың беріктік қасиеттері, жазық ығысу құрылғысы, үлгі қоспасы.

F.Kh. Aubakirova¹, K.S. Dossaliyev¹, K. Ibragimov¹, D.Zh. Artykbaev¹, A.M. Budikova²

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

²Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

STUDIES OF THE STRENGTH PROPERTIES OF COARSE-GRAINED SOIL STONE-EARTH DAMS

Abstract. The article considers a plane shear device for conducting studies of the strength properties of coarse-grained soil, provides a methodology for conducting experiments and processing experimental data. It was revealed that a decrease in the strength of coarse-grained soil occurs with an increase in its stress state. At the same time, in order to ensure uniformity of the strength properties of the structure, it is necessary to strive for uniform soil laying in different zones of the dam body. It has been established that a change in the strength properties of coarse-grained soil, depending on the fractional composition of the stone with the same degree of compaction, is possible only by increasing the gearing coefficient.

Keywords: stone-earth dam, coarse-grained soil, strength properties of soil, plane shear device, model mixture.

References

1. Ibragimov K., Ussenkulov Zh.A., Yerimbetov B.T., Baibolov K.S., Kunanbayeva Y.B., Ussenkulova S.Zh. Strength and deformability of large-scale clastic soils // Proceedings of 17ARC «Smart geotechnics for smart societies», 2023. P. 862-866.
2. Petrov, G.N., Radchenko, V.G., Dubnyak, V.A. Krupnooblomochnyye grunty v gidrotekhnicheskoy stroitel'stve [Coarse-grained soils in hydraulic engineering]. – St. Petersburg: B.E. Vedeneev JSC VNIIG, 1994. – 236 p., [in Russian].
3. Shabayev, S.N. Vliyaniye krupnosti chastits odnorazmernoy sypuchey zernistoy sredy na prochnostnyye kharakteristiki [Influence of particle size of a uniform loose granular medium on strength characteristics] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov], 2020. Vol. 18, No. 2. P. 62-70, [in Russian].
4. Shabayev S.N., Krupina N.V., Shalamanov V.A., Martel'N.A., Shtark A.I. Metod kosogo sreza dlya opredeleniya prochnostnykh kharakteristik predvaritel'no uplotnennykh krupnozernistykh sred [Oblique cut method for determining the strength characteristics of pre-compacted coarse-grained media] // Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [Bulletin of the Ural State Mining University], 2020. Vol. 3. P. 115-122, [in Russian].
5. Alimseitov D.N., Gorbachev A.G., Ryspayev B.S., Sagybekova A.O. Izucheniye prochnostnykh kharakteristik krupnooblomochnogo grunta i modeli krupnooblomochnogo grunta [Study of strength characteristics of coarse-grained soil and coarse-grained soil models] // Problemy nauki [Problems of science], 2018. No. 12. P. 34-37, [in Russian].
6. Sainov, M.P. Parametry deformiruyemosti krupnooblomochnykh gruntov v tele gruntovykh plotin [Deformability parameters of coarse-grained soils in the body of earth dams] // Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye [Construction: science and education], 2016. No. 1. P. 15-33, [in Russian].
7. Kozionov V.A., Kuderin M.K., Varlamova L.A., Kul'zhiginov R.K. Otsenka prochnosti glinistykh gruntov s vklyucheniymi dresvy i shchebnya [Evaluation of the strength

- of clay soils with inclusions of gravel and crushed stone] // *Nauka i tekhnika Kazakhstana [Science and Technology of Kazakhstan]*, 2007. No. 2. P. 18-26, [in Russian].
8. Kolos A.F., Chistyakov P.A., Leus A.S., Shekhtman Ye.I., Shtykov V.I. Vliyaniye formy zeren shchebenochnogo ballasta na yego prochnostnyye svoystva [Influence of the grain shape of crushed stone ballast on its strength properties] // *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of scientific research results]*, 2017. P. 148-160, [in Russian].
 9. Ghorashi S., Khodaparast M., Khodajooyan Q. Compaction Quality Control of Coarse-grained Soils Using Dynamic Penetration Test Results through Correlation with Relative Compaction Percentages // *International Journal of Engineering*, 2023. Vol. 36 (3). P. 473-480.
 10. Fard M.A method for determining hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils // *Unsaturated Soils for Asia*, 2020. P. 375-379.
 11. Wu E., Zhu J., Guo W., Zhang Z. Effect of Gradation on the Compactability of Coarse-Grained Soils // *Journal of Civil Engineering*, 2020. Vol. 24 (2). P. 356-364.
 12. GOST 30416-2012 Grunty. Laboratornyye ispytaniya. Obshchiye polozheniya [GOST 30416-2012 Soils. Laboratory tests. General provisions]. – Introduced. 2014-10-03. – Moscow: Standartinform, 2018. – 12 p., [in Russian].
 13. GOST 20522-2012 Grunty. Metody staticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy [GOST 20522-2012 Soils. Methods of static processing of test results]. – Introduced. 2014-10-03. – Moscow: Standartinform, 2013. – 16 p., [in Russian].
 14. GOST 12248.1-2020 Grunty. Opredeleniye kharakteristik prochnosti metodom odnoploskostnogo sreza [GOST 12248.1-2020 Soils. Determination of strength characteristics by the single-plane shear method]. – Introduced. 2020-08-31. – Moscow: Standartinform, 2020. – 24 p., [in Russian].
 15. SN RK 3.04-03-2023 Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [SN RK 3.04-03-2023 Foundations of hydraulic structures]. – Introduced. 2023-11-06. – Astana: Committee for Construction and Housing and Public Utilities of the Ministry of Industry and Construction of the Republic of Kazakhstan, 2023. – 46 p., [in Russian].