

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-314-323

ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРИЙ НАГРУЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Н. В. Дяченко, А. В. Бершов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Определение влияния траекторий нагружения на прочностные показатели переуплотненных глинистых грунтов в приборе трехосного сжатия при КД испытаниях. Выявление закономерностей изменения прочностных характеристик глинистых переуплотненных грунтов в зависимости от траектории нагружения в условиях трёхосного сжатия. Эксперименты на объекте исследования, суглинках московской морены, показали, что при траектории CTC φ и c составили $28,3^\circ$, 49 кПа соответственно, а для RTC – $50,5^\circ$, 43 кПа. Такая обратная последовательность снижения прочностных параметров для траектории CTC RTC, относительно консолидированно-недренированных испытаний нормально уплотненных грунтов или пасты, может быть объяснено, что при RTC были получены пиковые значения по перегибу графиков, а для CTC пик принимался по достижению 15 % деформации. Высокие углы внутреннего трения могут объяснять крутые склоны в московской морене, образованные при быстрых эрозионных процессах (ручьев, малых рек, оврагов), что и было зафиксировано у берегов р. Самородинка. Поведение нормально уплотненных грунтов или паст и переуплотненных грунтов существенно различается при траекториях нагружения RTC и CTC.

Ключевые слова: переуплотненные грунты, траектории нагружения, трехосные испытания, напряженное состояние, прочностные параметры

INFLUENCE OF LOADING PATHS ON THE STRENGTH PARAMETERS OF CLAYEY SOILS IN TRIAXIAL TESTS

N. V. Dyachenko, A. V. Bershov

Lomonosov Moscow State University, Moscow? Russia

Annotation. Determination of the influence of loading trajectories on the strength characteristics of over-compacted clay soils in a triaxial compression device during CD tests. Identification of the patterns of change in the strength characteristics of over-compacted clay soils depending on the loading trajectory under triaxial compression conditions. Experiments on the research object, Moscow moraine loams, showed that the CTC trajectory resulted in φ and c values of 28.3° and 49 kPa, respectively, while the RTC trajectory resulted in φ and c values of 50.5° and 43 kPa. Such an inverse sequence of decreasing strength parameters for the CTC RTC trajectory, relative to consolidated-undrained tests of normally compacted soils or paste, can be explained by the fact that RTC yielded peak values at the inflection point of the graphs, while CTC yielded a peak at 15% deformation. The high internal friction angles can explain the steep slopes in the Moscow moraine, which were formed through rapid erosion processes (streams, small rivers, and gullies), as observed near the banks of the Samorodinka River. The behavior of normally compacted soils or pastes and overcompacted soils differs significantly under RTC and CTC loading paths.

Keywords: overconsolidated soils, loading paths, triaxial testing, stress state, strength parameters

Введение

Глинистые грунты широко распространены и часто служат основанием для зданий и инженерных сооружений. Их механическое поведение не является однозначным и определяется комплексом факторов: напряженным состоянием, условиями дренажа, скоростью и траекторией нагружения. Игнорирование влияния и траектории нагружения может стать причиной значительных расхождений между прогнозируемыми и фактическими изменениями напряженно-деформированного состояния инженерно-геологических массивов под влиянием природных и техноприродных процессов. В связи с этим экспериментальные исследования на изучение зависимости прочностных показателей глинистых грунтов от траектории нагружения представляют значительный научный и практический интерес.

Основная часть

Прочность грунтов в широком смысле — это их способность сопротивляться разрушению. В работах [3, 6] природа прочности определяется силами взаимодействия между их структурными элементами — кристаллами, зернами, обломками, агрегатами, частицами, т. е. зависит от типа и особенностей структурных связей. Однако, результаты исследований М. В. Малышева [5] свидетельствуют о том, что прочность грунтов зависит существенным образом от вида напряженного состояния, возникающего в основании при различных внешних условиях силового нагружения (траекторий напряжений).

Для нелинейных сред с выраженными пластическими деформациями, к которым относят грунты, метод суперпозиции воздействий не применим. Следовательно, это означает, что на результирующее НДС в точке будет влиять последовательность изменения его составляющих — траектория нагружения [7].

Классической траекторией нагружения в испытаниях трехосного сжатия является траектория девиаторного раздавливания (СТС — conventional triaxial compression). Данная траектория предполагает изотропное сжатие с последующим увеличением вертикального напряжения σ_1 вплоть до разрушения (рис 1). Очевидно, что увеличение σ_1 при постоянных значениях $\sigma_2 = \sigma_3$ приведет к тому, что и среднее напряжение будет расти - то есть траектория отклонится от вертикали.

Также исследователи используют траекторию девиаторного нагружения при постоянном среднем напряжении, при этом происходит увеличение σ_1 и уменьшение $\sigma_2 = \sigma_3$ (ТС — triaxial compression), а также траекторию, при которой происходит разрушение образца при снижении среднего напряжения при постоянном вертикальном напряжении (RTC — reverse triaxial compression). Если через пиковые точки разных траекторий нагружений (СТС, RTC, ТС) можно провести прямую (предельную кривую), то параметры прочности получается одинаковыми для всех режимом нагружения.

Траектории нагружения реализуются в реальных инженерно-геологических массивах при различных геотехнических воздействиях [1, 9]. Например, возведение фундаментов и насыпей, подпорные стены.

Траектории нагружения также могут формироваться также под действием геологических процессов (боковая эрозия и аккумуляция).

Изучив литературу, посвященную влиянию траекторий нагружения на прочностные показатели грунтов, можно сделать вывод, что исследования приводят к трем основным выводам:

1. В ряде работ выявлено существенное влияние траектории нагружения на прочность грунтов [11–13, 15–17].

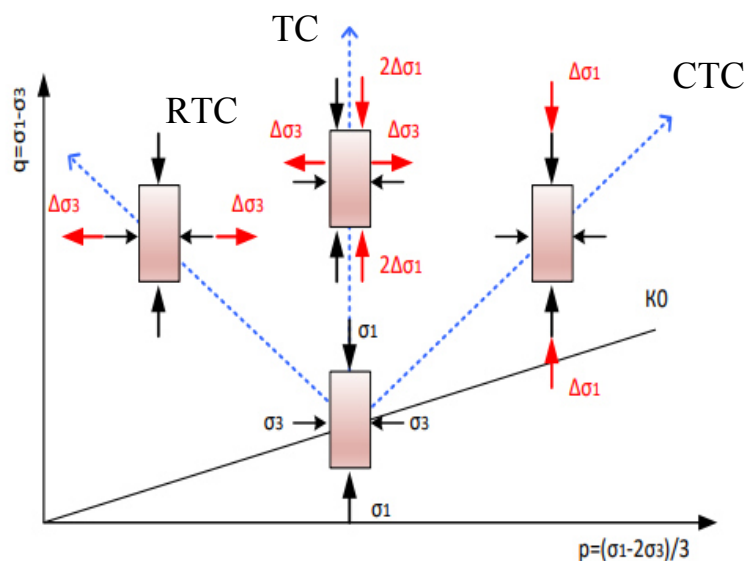


Рис. 1. Различные траектории нагружения и их напряженные состояния в условиях осесимметричного трехосного сжатия [9]

2. В других исследованиях основное внимание уделяется влиянию промежуточного главного напряжения σ_1 и параметра Лоде, при этом также устанавливается их значительное влияние на прочностные характеристики [5, 10, 14].

3. Существуют работы, в которых влияние траектории нагружения на прочность грунтов не обнаружено [4].

Во всех вышеперечисленных работах эксперименты проводились на пастах или нормально уплотненных грунтах. Таким образом, цель данной работы заключается в определении влияния траекторий нагружения на прочностные показатели переуплотненных глинистых грунтов, что обусловлено недостаточной изученностью этого вопроса.

Эксперименты проводились на образцах, отобранных из ледниковых отложений донского горизонта (донской морены) gQIdns возраста располагающихся в районе Алтуфьево в г. Москва. Значение коэффициента OCR составило 5.0. По полученным I_p и I_L в соответствии с ГОСТ 25100-2020 грунты относятся к суглинкам песчаным, легким, полутвердым.

В табл. 1 приведены физические характеристики пар проб-близнецов, и их последующий режим нагружения.

Таблица 1. Физические характеристики исследуемых проб-близнецов и их последующий режим нагружения

№ образцов	Давление σ_{cons} , кПа	Режим нагружения	Физические характеристики				
			ρ_d	ρ_s	ρ	e	n
1	300	СТС	2,03	2,71	2,26	0,330	25
2	400	СТС	2,09	2,72	2,32	0,301	23
5	400	RTC	2,03	2,70	2,26	0,330	25
3	500	СТС	1,93	2,71	2,20	0,402	29
6	500	RTC	1,93	2,71	2,20	0,402	29
4	600	СТС	1,90	2,71	2,13	0,430	30
7	600	RTC	1,97	2,7	2,23	0,372	27
8	700	RTC	2,00	2,69	2,25	0,345	26

Реализация траекторий нагружений и определение прочностных параметров грунтов проходило в приборе трехосного сжатия серии «Кварц» НПП Геотек с камерой типа А в программном обеспечении АСИС 5.0. Опыты проводились в консолидированно-дренированном режиме.

Проведение трехосных испытаний проходило в 3 стадии: реконсолидация с противодавлением, консолидация, разрушение (в данной стадии разрушение образца проходит по двум траекториям: RTC и СТС при постоянной скорости нагружения, составляющей 0,4 кПа/мин).

По результатам опытов были получены графики девиаторного нагружения $|\sigma_1 - \sigma_3|$ от относительной осевой деформации ε в режимах СТС и RTC (рис. 2–3). На кривых наблюдаются экстремумы, после которых значения девиатора начинают спадать. В случае траектории СТС (рис. 2) для графиков пиков на данных кривых нет.

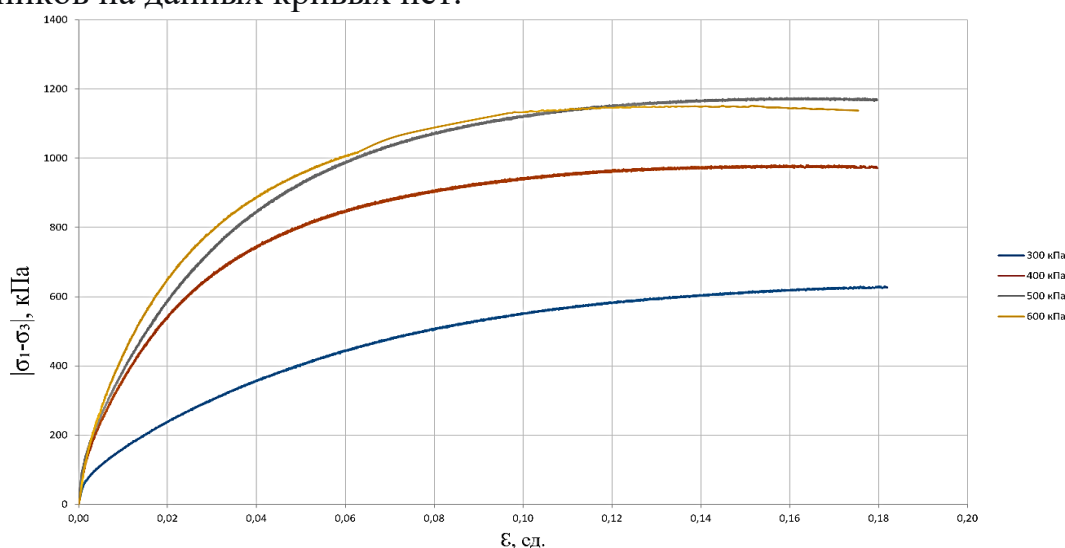


Рис. 2. График зависимости девиаторного нагружения $|\sigma_1 - \sigma_3|$ от относительной осевой деформации ε в режиме СТС

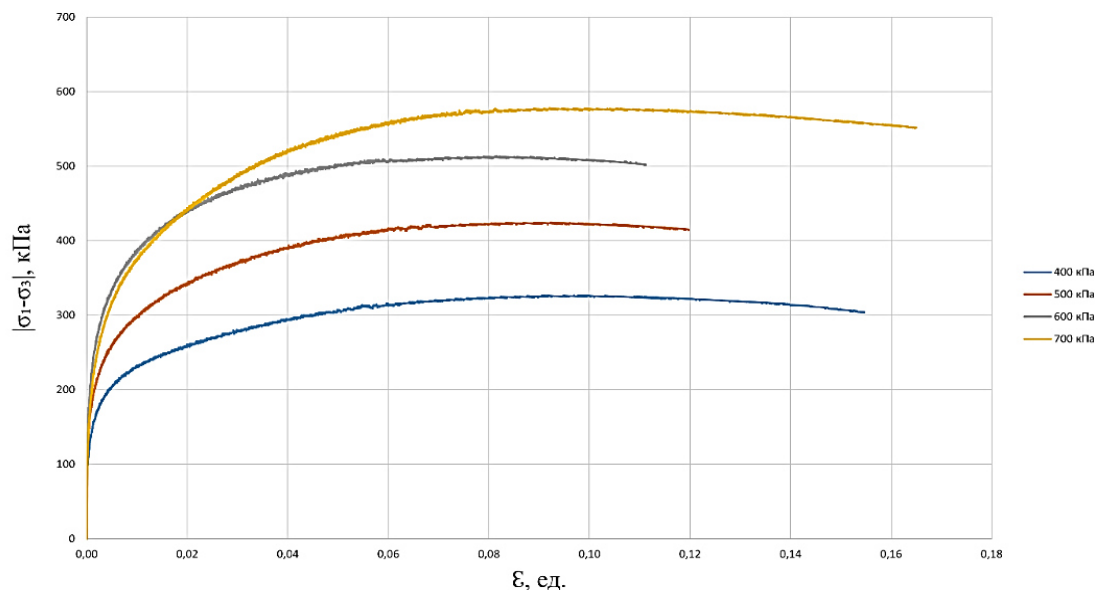


Рис. 3. График зависимости девиаторного нагружения $|\sigma_1 - \sigma_3|$ от относительной осевой деформации ε в режиме RTC

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости девиаторного нагружения q от среднего напряжения p' при траекториях нагружения CTC и RTC.

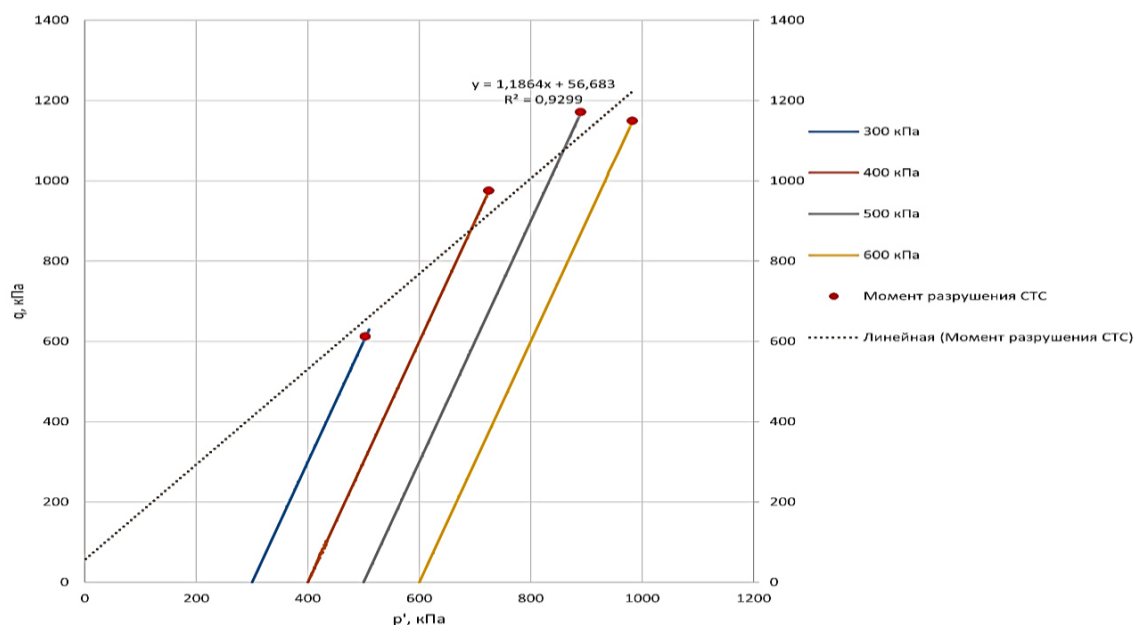


Рис. 4. График зависимости девиаторного нагружения q от среднего напряжения p' при CTC

Для траектории RTC (рис 5) наблюдаются пики, соответствующие переходу от роста девиатора к его спаду. Через все пики можно провести прямую линию. Пиковое поведение характерно для переуплотненных грунтов. Для траектории CTC (рис. 4) пики определяется по достижению 15 % значения относительной вертикальной деформации, перегиба графика не наблюдается. Через пики, полученные при траектории CTC, возможно провести только линию тренда.

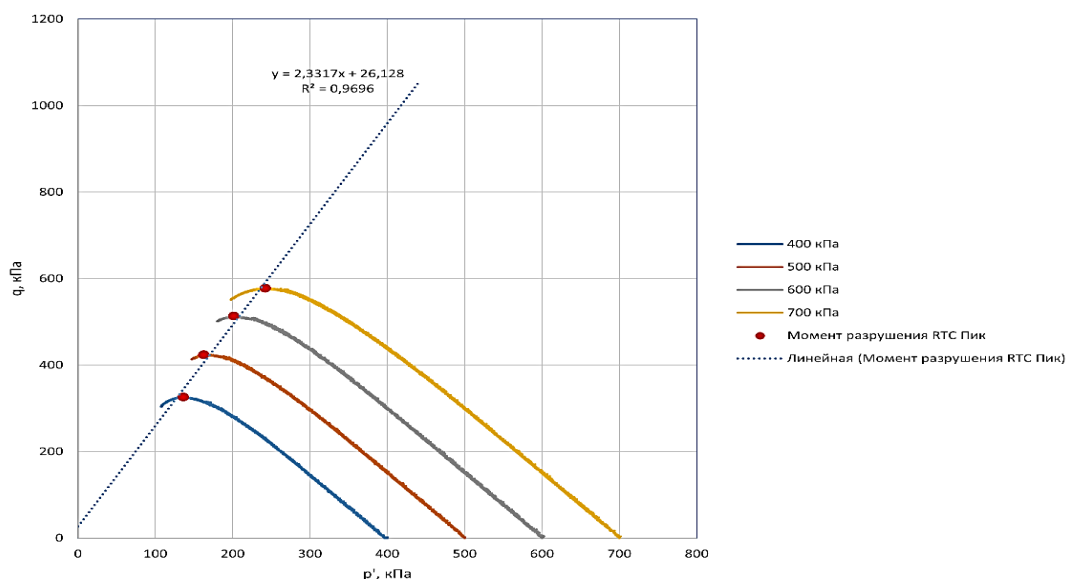


Рис. 5. График зависимости девиаторного нагружения q от среднего напряжения p' при RTC

На рис. 6. представлен график зависимости девиаторного нагружения q от среднего напряжения p' для траекторий RTC и CTC. Можно заметить параллельность прямых, соответствующих траекториям CTC и прямой линии, проведенной по пикам для траектории RTC.

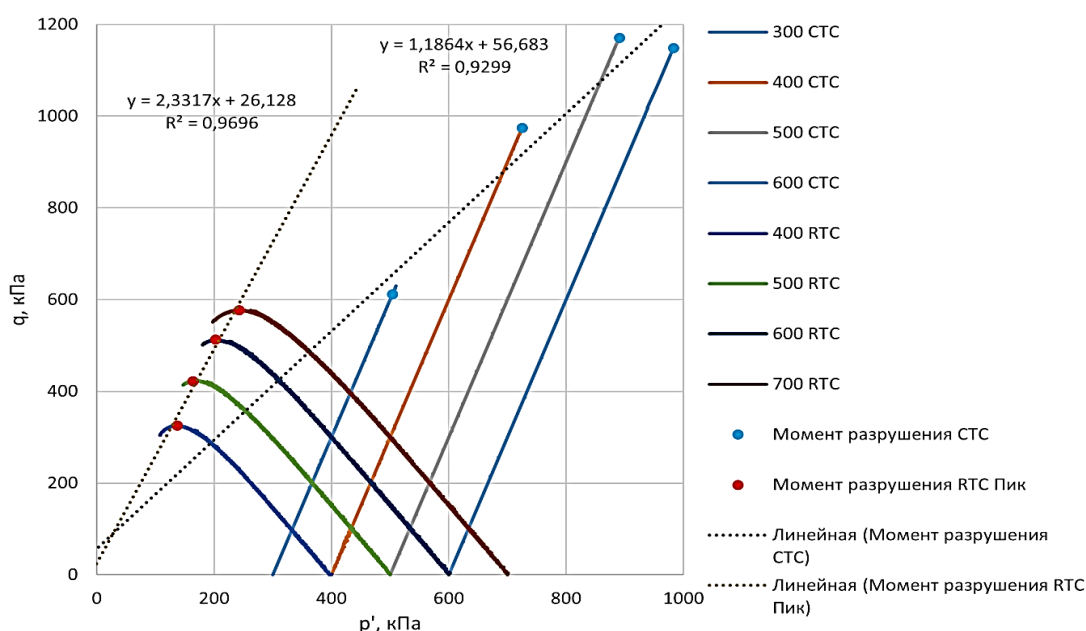


Рис. 6. График зависимости девиаторного нагружения q от среднего напряжения p' при траектории RTC и CTC

На рис. 7 и 8 приведены диаграммы Кулона-Мора для двух режимов нагружения.

По результатам испытаний на приборе трехосного сжатия были получены параметры прочности, приведенные в табл. 2.

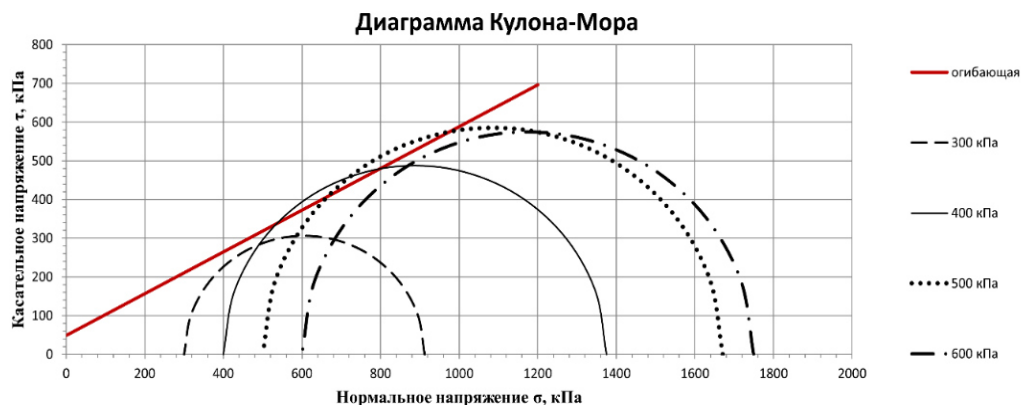


Рис. 7. Диаграмма Кулона Мора для траектории СТС

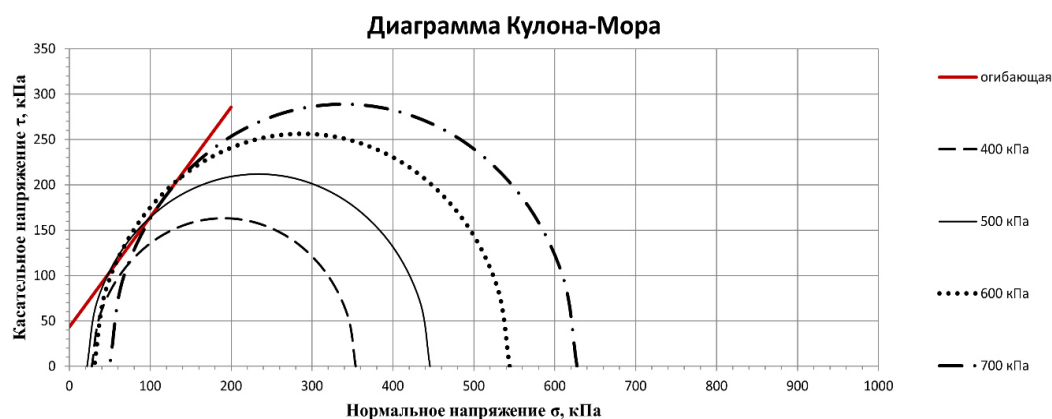


Рис. 8. Диаграмма Кулона Мора для траектории RTC

Таблица 2. Прочностные параметры исследуемых грунтов

Режим нагружения	C, кПа	φ , °
СТС	49	28,3
RTC	43	50,5

Угол внутреннего трения, полученный при траектории нагружения RTC получился достаточно высоким, если сравнивать со значением, полученным при СТС, при этом значения сцепления получились схожими.

Объяснить то, что при СТС режиме пиков не наблюдается можно тем, что:

1. Выбранная скорость нагружения для легкого суглинка оказалась избыточно медленной. Так как общее девиаторное нагружение составило неделю.

2. Образцы недоконсолидировались в процессе испытаний

При консолидировано-дренированных испытаниях переуплотненных грунтов ярко выражена пиковая прочность для траектории RTC, чего не наблюдается для СТС (пиковые значения определялись по достижению 15 % деформации), при этом для RTC прочность получилась больше, что не

соответствует рассмотренным выше работам. Однако, в тех работах испытания проводились для нормально уплотненных грунтов или пасты, а не на переуплотненных грунтах, что могло привести к таким различиям. Заниженные значения для СТС, скорее всего, получились из-за того, что не были достигнуты явные перегибы графиков. Таким образом, влияние траектории RTC на переуплотненные грунты требует дополнительного исследования.

Разницу в результатах, полученных в данных испытаниях и работ, рассмотренных выше, можно объяснить также выбранной скоростью нагружения. В работах [14–17] скорость задавалась по деформациям, при этом в данных испытаниях — по напряжениям.

Большие значения угла внутреннего трения удовлетворительно описывают то, что при быстрой речной или овражной эрозии (траектория RTC) в грунтах московской морены видны очень крутые склоны. В пример можно привести крутые берега, имеющие угол естественного откоса до 90° и образованные в результате эрозии рекой Самородинка в районе метро Юго-Западная (рис. 9). Также при освоении территории схожий эффект можно ожидать при откопке вертикальных стенок котлована. Без учета возможного промерзания, оттаивания и водонасыщения устойчивые откосы в московской морене могут быть оценены в 60° – 70° . Таким образом, стандартный подход оценки устойчивости по СТС может давать заниженные значения показателей прочности.



Рис. 9. Крутые склоны, образованные эрозией реки Самородинка в районе метро Юго-западная

Заключение

Анализ литературных данных показывает, что теоретические гипотезы, что траектория нагружения не влияет на прочностные показатели φ и c некорректна, угол внутреннего трения не является инвариантом относительно траектории нагружения.

В инженерно-геологических массивах, как при их техногенном использовании, так и при природном развитии в их разных частях наблюдается реализация различных схем нагружения.

Поставленные эксперименты на объекте исследования, суглинках московской морены, показали, что при траектории СТС φ и c составили $28,3^\circ$, 49 кПа соответственно, а для RTC — $50,5^\circ$, 43кПа. Такая обратная последовательность снижения прочностных параметров для траектории СТС RTC, относительно консолидированно-недренированных испытаниях нормально уплотненных грунтов или пасты, может быть объяснено, что при RTC были получены пиковые значения по перегибу графиков, а для СТС пик принимался по достижению 15 % деформации.

Такие высокие углы внутреннего трения могут объяснять крутые склоны в московской морене, образованные при быстрых эрозионных процессах (ручьев, малых рек, оврагов), что и было зафиксировано у берегов р. Самородинка.

Поведение нормально уплотненных грунтов или паст и переуплотненных грунтов существенно различается при траекториях нагружения RTC и СТС.

Список источников

1. Болдырев, Г. Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография / Г. Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
2. Болдырев, Г. Г. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов / Г. Г. Болдырев, А. С. Колесников, А. Г. Новичков // Инженерные изыскания. – 2014. – № 5-6. – С. 78-85.
3. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
4. Иващенко, И. Н. Влияние напряженного состояния и траектории нагружения на деформируемость глинистых грунтов: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00/ И. Н. Иващенко. – Москва, 1965. – 177 с.
5. Малышев, М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений / М. В. Малышев. – М.: Стройиздат, 1994. – 228 с.
6. Маслов, Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н. Н. Маслов. – М.: Высшая школа, 1982. – 511 с.
7. Мирный, А. Ю. Осесимметричное трехосное сжатие в практике инженерных изысканий: монография / А. Ю. Мирный. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 156 с.
8. Грунтоведение / Т В. Трофимов, В. А. Королев, В. А. Вознесенский [и др.]. – М.: Издательство МГУ, 2005. – 1024 с.

9. Федоренко, Е. В. Теоретические и методологические основы индивидуального проектирования насыпей транспортных сооружений на слабых основаниях: дис. ... д-р техн. наук: 2.1.8. / Федоренко Евгений Владимирович [Место защиты: ФГБОУ ВО «МАДИ»]. – Краснодар, 2025. – 394 с.
10. Lam, W.K., Tatsuoka, F. Effects of Initial Anisotropic Fabric and σ_2 on Strength and Deformation Characteristics of Sand // *Soils and Foundations*. – 1988. – Vol. 28, No. 1. – P. 89-106.
11. Lambe, T.W., Silva, F. Effect of Stress Path on Slope Stability. – MIT, 1998. – Course Notes.
12. Liu Xue-Yan, Ye Yu, Li Ke, Wang Yun-Qi. Stress Path Effects on Palm Fiber Reinforcement of Clay in Geotechnical Engineering // *Water*. – 2023. – Vol. 15, No. 23.
13. Sterpi, D. Effects of the intermediate principal stress on the shear strength of a sand // *Géotechnique*. – 2000. – Vol. 50, No. 3. – P. 327–336.
14. Wang Shuai, Wang Lianguo, Tian Jiansheng, Fan Hao, Jiang Chongyang and Ding Ke. An Experimental Study on the Effects of True Triaxial Loading and Unloading Stress Paths on the Mechanical Properties of Red Sandstone // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12, No. 204. – 14 p.
15. Wei Houzhen, Liu Hao, Li Xiaoxiao, Tao Zhao, Wu Yongjie, Shen Jianhua, Yin Mei. Effect of stress path on the mechanical properties of calcareous sand // *Underground Space*. – 2023. – Vol. 9. – P. 20-30.
16. Zhang Dongjie, Luo Fei, Zhu Zhanyuan, Liu Jiaming, Li Jing, Li Bailin, Xue Tianlang. Study on Mechanical Properties of Gravelly Sand under Different Stress Paths // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Issue 1.
17. Zhang Yanzhao, Zuo Shuangying, Li Rita Yi Man, Mo Yunchuan, Yang Guosheng, Zhang Min. Experimental study on the mechanical properties of Guiyang red clay considering the meso micro damage mechanism and stress path // *Scientific Reports*. – 2020. – 17449.

© Дяченко Н. В., Бершов А. В., 2026