

УДК 624.131.4

UDC 624.131.4

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

УПРОЧНЕНИЕ И РАЗУПРОЧНЕНИЕ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

HARDENING AND SOFTENING OF CLAY SOIL

Ляшенко Павел Алексеевич

к. т. н., доцент

SPIN-код 5503-9110

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Lyashenko Pavel Alekseevich

Cand. Tech. Sci., associate Professor

SPIN-code 5503-9110

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

к. т. н., доцент

SPIN-код 8558-4247

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

E-mail: devivi@kubstu.ru

Denisenko Viktor Viktorovich

Cand. Tech. Sci., associate Professor

SPIN-code 8558-4247

Kuban State Technologic University, Krasnodar, Russia

E-mail: denvivi@kubstu.ru

Шмидт Олег Александрович

Аспирант инженерно-строительного факультета

SPIN-код: 9873-8857

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

E-mail: shmidtoleg55@list.ru

Shmidt Oleg Aleksandrovich

Postgraduate student of engineering-building faculty

SPIN-code: 9873-8857

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

E-mail: shmidtoleg55@list.ru

Гохаев Денис Валерьевич

Аспирант инженерно-строительного факультета

SPIN-код: 6971-1332

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

E-mail: gokhaev@mail.ru

Gohaev Denis Valer'evich

Postgraduate student of engineering-building faculty

SPIN-code: 6971-1332

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

E-mail: gokhaev@mail.ru

Упрочнение глинистого грунта проявляется, в простейшем случае, в виде нарастания сопротивления образца сдвиговым деформациям. Сдвиг нормально уплотненных и переуплотненных грунтов дает значения пиковой прочности при малых деформациях и длительной прочности при больших. Сдвиг с постоянной скоростью деформации (ПСД) при непрерывной регистрации сопротивления обнаруживает неравномерное изменение сопротивления и циклический характер скорости изменения сопротивления (СИС). Выявление циклов СИС позволило разделить деформацию в каждом цикле на упругую и неупругую, соответствующие восходящей и нисходящей ветвям цикла СИС. На участке нарастания общего сопротивления приращения неупругой деформации положительны до некоторого критического значения общей деформации образца, при котором их сумма достигает максимума. Этот максимум принят мерой упрочнения. При дальнейшем сдвиге образца неупругие приращения отрицательны, а их сумма монотонно убывает и достигает наибольшего отрицательного значения при тотальном разрушении образца. Это значение принято мерой разупрочнения. Признаком тотального разрушения образца является спад абсолют-

Hardening of clay soil manifests in the form of increase of the resistance of sample to shear deformation. The shear tests of normally compacted and overcompacted soils give values of peak strength at small strains and long-term strength at high. A shear test with constant strain rate of deformation (CRD) with continuous recording of resistance encounters uneven resistance change and the cyclical rate of change of resistance (RCR). The identification of cycles of the SIS allowed us to divide the deformation in each cycle for elastic and inelastic, corresponding to the ascending and descending branches of cycle. On an interval of the total resistance, the increases of the increment of inelastic strain are positive up to some critical value of the total deformation of the sample at which their sum reaches a maximum. This maximum is adopted as a measure of hardening. With further shearing of the sample, inelastic increments are negative, and their sum is monotonously decreases and reaches negative values for the total destruction of the sample. This value is taken as the softening. A symptom of total failure of the sample is the decline of absolute values of inelastic increments of resistance to zero. In general, the trend of the increments of inelastic and elastic increments of the resistance of the sample

ных значений неупругих приращений сопротивления до нуля. Вообще, тренд приращений неупругих и упругих приращений сопротивления образца грунта по поверхностям скольжения и, в частности, образования тотальной поверхности. Сумма упругих приращений сопротивления монотонно нарастает на протяжении всего сдвига

indicates the development of the destruction of the soil sample on the sliding surfaces and, in particular, yielding of the total surface. The sum of elastic increments of the resistance monotonically increases throughout the shear

Ключевые слова: УПРОЧНЕНИЕ, РАЗУПРОЧНЕНИЕ, ЦИКЛИЧНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ, ПРИРАЩЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ, МЕРА УПРОЧНЕНИЯ, МЕРА РАЗУПРОЧНЕНИЯ

Keywords: HARDENING, SOFTENING, CYCLIC DEFORMATION, INCREMENT OF THE RESISTANCE, MEASURE OF HARDENING, MEASURE OF SOFTENING

Введение

Деформирование упрочняющегося глинистого грунта встречает увеличивающееся сопротивление, которое чаще всего описывается плавной кривой зависимости касательного напряжения от сдвиговой деформации, рассчитанных для плоской площадки, пересекающей образец в зазоре между обоймами сдвигового прибора. «Относительное скольжение агрегатов грунта на рассматриваемой площадке в допредельном состоянии возможно, если на определенном промежутке времени будет выполняться условие

$$\tau_v > \sigma_v \operatorname{tg} \varphi + c(t), \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения; $c(t)$ – изменяющееся во времени сцепление вследствие уплотнения и структурных изменений» [Тер-Мартirosян, 1990]. На каждой ступени нагружения образца грунта сдвиговые деформации затухают со временем вследствие упрочнения, и только по мере исчерпания резервов упрочнения грунт переходит в состояние пластического течения.

Схема возникновения пластических деформаций в допредельном состоянии грунтового тела по [9] предполагает, что все выделенные слои сдвигаются одновременно, по поверхностям скольжения, охватывающим весь образец (рисунок 1).

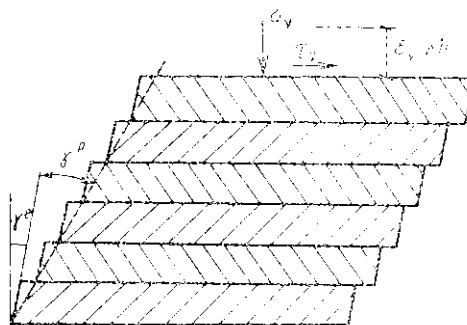


Рисунок 1 – Схема развития пластических деформаций при сдвиге образца грунта по [9]

Однако это нереально даже в условиях опыта со скашиванием исследуемой части образца, потому что неизбежна концентрация напряжений в какой-либо его малой части, в которой возникает и развивается поверхность скольжения. Эта малая часть находится в контакте с жесткой границей грунтового тела – кольцом для отбора грунта или промежуточным подвижным кольцом. На этой малой части возникает площадка скольжения, на которой $\tau_{\max} = \tau_{\text{lim}}$, в то время как остальной объем образца находится в допредельном состоянии, и в нем $\tau_{\max} < \tau_{\text{lim}}$. Увеличение деформации сдвига приводит к увеличению площадки скольжения и раскрытию сдвиговой трещины до видимых размеров, как это было показано в опытах на сдвиг плотной глины [7] (рисунок 2).

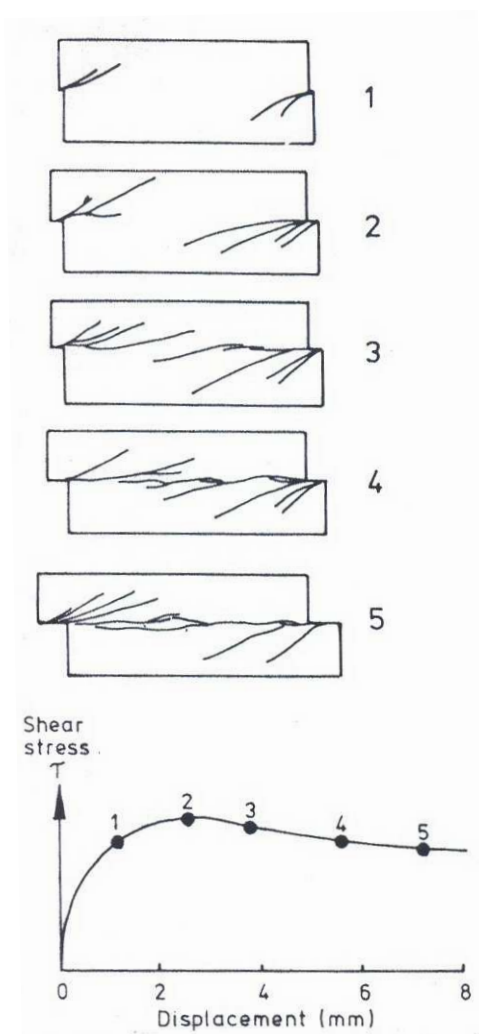


Рисунок 2 – Схема образования трещин, открывшихся на поверхностях скольжения при сдвиге грунта [7]

«Макроскопическое разрушение при сдвиге проявится, когда будет сформирована поверхность или система поверхностей скольжения (сдвига) с ослабленным сопротивлением, и таким образом станет возможным за-предельное ускоренное смещение» [2]. Развивая эту мысль, мы приходим к представлению о последовательном образовании *площадок скольжения*, сливающихся в *поверхность скольжения*.

Последовательное образование конечного числа площадок скольжения, или сдвиговых трещин, должно отразиться на реакции образца, придать диаграмме сдвига менее гладкую форму. Этого не видно, так как авторы [7] измеряли реакцию с большими интервалами перемещения. Сдвиг

с постоянной скоростью деформации и непрерывной записью реакции образца позволил увидеть колебания ее значений (рисунок 3).

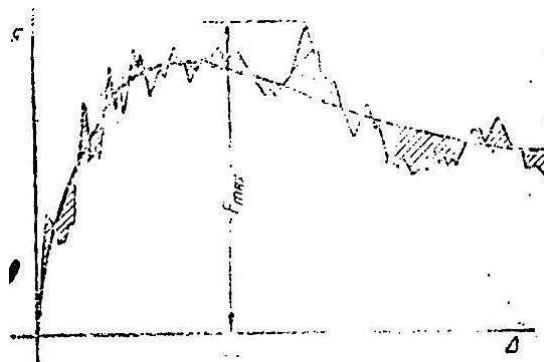


Рисунок 3 – Изменение реакции образца при сдвиге грунта с постоянной скоростью по [Покровский ГИ, 1937]

Г. И. Покровский [8] связывал колебания реакции с перестройкой микроструктуры грунта на поверхности скольжения и предлагал определять «эффективный диаметр частиц» по амплитуде колебаний, используя их статистическую оценку.

Пониманию физической сути изменений реакции способствует анализ сопротивления сдвигу при повторных нагружениях с разгрузкой при заранее определенных значениях перемещения. При разгрузке упругая деформация исчезает, а повторное нагружение добавляет долю остаточной деформации при бóльших значениях полного сопротивления. Каждый цикл нагружения увеличивает полное сопротивление сдвигу и остаточную деформацию, что можно рассматривать как упрочнение грунта. Оно происходит при малых перемещениях (рисунок 4).

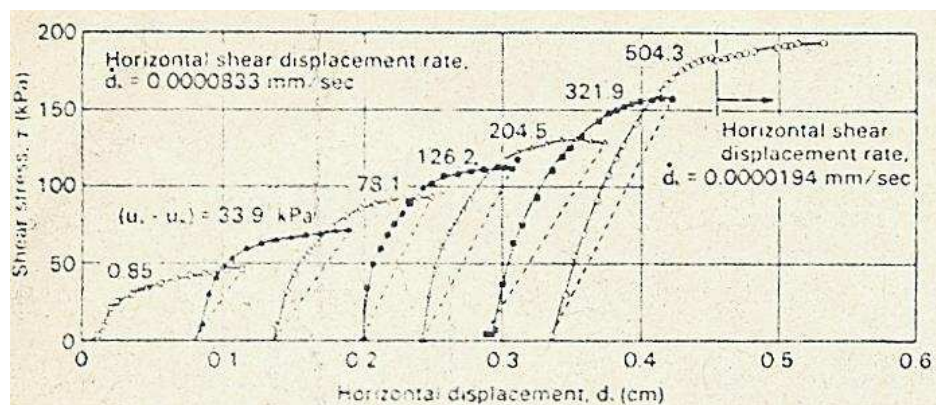


Рисунок 4 – Изменение реакции образца при сдвиге грунта с разгрузкой при заданных значениях перемещения по [3]

Поскольку разгрузка производилась в [3] при заданных значениях деформации, то в этом опыте также неполно проявляется природа упрочнения. Очевидно, что измерение упрочнения следует вести по методике, рекомендованной Г. И. Покровским [8], т. е. с малой постоянной скоростью сдвига, с непрерывной записью силовой реакции образца. При этом разгрузка (релаксация) происходит естественно после увеличения упругих деформаций до предела прочности на локальной площадке, а упрочнение – как следствие неупругих деформаций на этой площадке [6].

1 Одноплоскостной сдвиг с постоянной скоростью деформации

Нами были выполнены опыты на сдвиг с постоянной скоростью деформации (ПСД). Прямой плоский сдвиг образца грунта производился при постоянной скорости перемещения сдвиговой каретки $V = 2,5 \times 10^{-6}$ м/с. Испытание производилось на автоматическом сдвиговом приборе УСГ-А конструкции В. В. Денисенко, позволяющем регистрировать до 250 пар значений перемещения и сопротивления образца. Сдвиг происходил в зазоре шириной $h = 2,2$ мм между частями образца. Сопротивление грунта сдвигу регистрировалось динамометром сжатия ДОСМЗ-02 с фотоэлектронным преобразователем (ФЭП) с шагом перемещения 0,02 мм [5].

Испытывался пылевато-глинистый грунт четвертичного возраста, отобранный в г. Краснодаре. Испытаны два образца: Infos1 (глубина отбора 1,5 м, влажность 12,7 %, коэффициент пористости 1,030); Infos2 (глубина отбора 2,1 м, влажность 10,1 %, коэффициент пористости 0,636).

В результате сдвига на 5 мм получено 250 пар значений перемещения s_I и сопротивления τ_I , ($I=1\dots250$). По ним вычислены значения относительной деформации $\gamma_I = s_I/h$, где s_I – перемещение сдвиговой каретки прибора, зарегистрированное в t_I -й момент времени, при том, что $s_I = Vt_I$. По этим данным вычислены значения скорости изменения сопротивления (СИС)

$$v_I = \frac{\Delta_I \tau}{\Delta_I \gamma}, \quad (2)$$

где $\Delta_I \tau$ – изменение сопротивления на приращении относительной деформации $\Delta_I \gamma$.

Сопротивление сдвигу $\tau(\gamma)$ является функцией относительной деформации, характерной для нормально уплотненных грунтов. Сопротивление образца сначала быстро увеличивается, затем пройдя максимум, медленно уменьшается до конца опыта. На всем протяжении заданного сдвига (5 мм) сопротивление изменяется немонотонно, ступенчато, с разными знаками приращений и с разной амплитудой изменений (рисунок 1).



Рисунок 5 – График сопротивления образца сдвигу при нормальном давлении 100 кПа

Скорость изменения сопротивления (СИС) $v(\gamma)$ может более ярко иллюстрировать изменения величины $\tau(\gamma)$. СИС $v(\gamma)$ изменяется циклически на протяжении всего сдвига. На начальном участке практически все значения $v > 0$. Потом появляются отрицательные значения, амплитуды положительных и отрицательных $v(\gamma)$ увеличиваются, а после прохождения $\max|v(\gamma)|$ – уменьшаются (рисунок 2).



Рисунок 6 – График изменения сопротивления образца сдвигу при нормальном давлении 100 кПа

В целом график $v(\gamma)$ содержит два цуга циклов с большими амплитудами, значения $v(\gamma)$ обоих знаков между цугами имеют малую амплитуду.

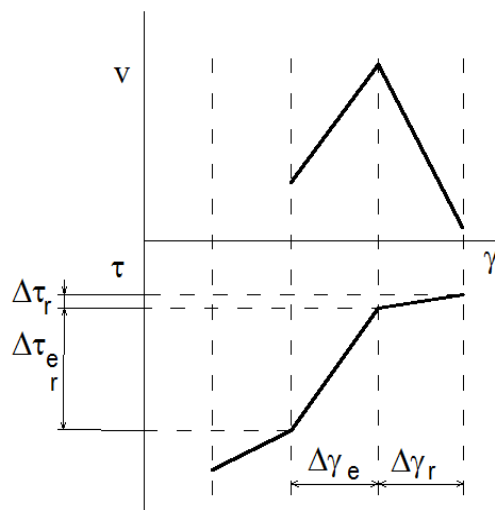


Рисунок 7 –Схема цикла изменения сопротивления образца сдвигу

Каждый цикл состоит из восходящей и нисходящей ветвей значений $v(\gamma)$, аппроксимированных отрезками прямых. Приращение сопротивления сдвигу в цикле деформации на восходящей ветви $\Delta\gamma_{e,i}$ имеет положительное значение $\Delta\tau_{e,i} > 0$, $i = (n_o + 1) \dots n_{fin}$, где i – номер цикла; n_{fin} – полное число циклов деформации, образовавшихся при сдвиге на 5 мм (рисунок 4). На нисходящей ветви $\Delta\tau_{r,i} > 0$ на части циклов при $i = (n_o + 1) \dots n_h$, затем $\Delta\tau_{r,i} \leq 0$ при $i = (n_h + 1) \dots n_{fin}$, т. е. до конца сдвига (рисунок 5); n_o – число циклов в начале нагружения, имеющих следы технических погрешностей.



Рисунок 8 – Приращения сопротивления образца на восходящей ветви цикла

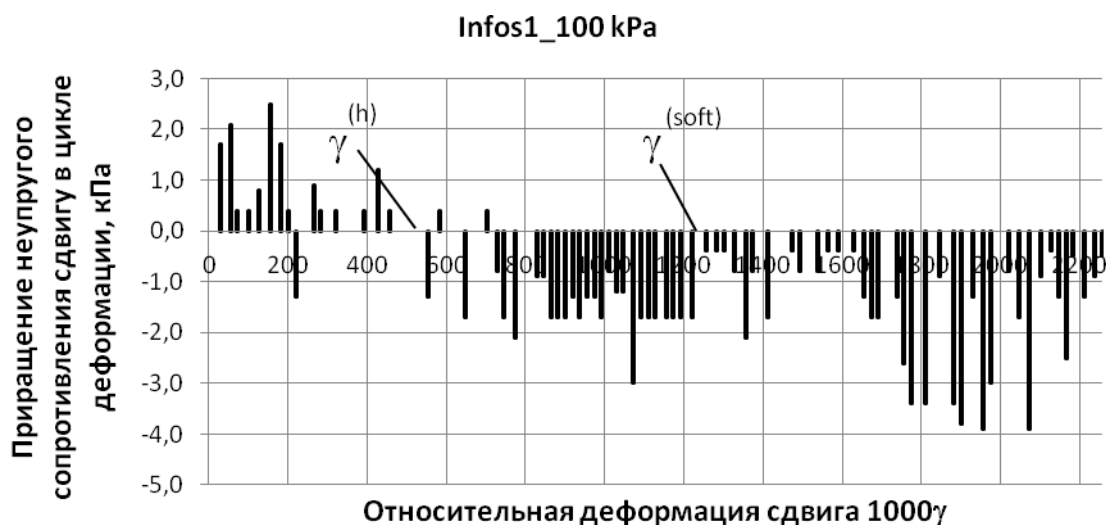


Рисунок 9 – Приращения сопротивления образца на нисходящей ветви цикла

Например, для образца Infos1_100 число $n_o=1$, так как 1-й цикл характеризуется аномально высоким значением скорости изменения реакции образца, вызванным обмятием неровностей образца в начале испытания (рисунок б). Значение n_h определяется по моменту устойчивого перехода

приращений реакции к отрицательным значениям; для образца Infos1_100 число $n_h = 21$.

2 Анализ упрочнения грунта при сдвиге

Примем, что условие прочности

$$\tau_{\text{lim}} = \sigma_v \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

выполняется на определенной части номинальной площадки сдвига, в то время как на остальной ее площади касательное напряжение меньше предельного значения, т. е.

$$\tau_v < \tau_{\text{lim}}, \quad (4)$$

где τ_v – касательное напряжение на номинальной площадке сдвига, имеющей площадь, равную площади сечения образца; σ_v – нормальное напряжение и τ_{lim} – предельное значение касательного напряжения, рассчитанные для момента максимального упрочнения грунта на номинальной площадке сдвига.

Задача испытания грунта состоит в том, чтобы определить момент максимального упрочнения. Она решается путем разделения сдвиговой деформации на упругую и неупругую составляющие и соответствующие им доли сопротивления. Способ разделения, основанный на анализе формы кривых, не представляется надежным и содержит элемент субъективности [1]. Нами предложен способ, использующий имманентное свойство реакции грунта, открытое Г. И. Покровским [8] и подтвержденное нами при разных воздействиях на грунт [4, 5, 6]. Ступенчатое изменение сопротивления отражает природу прочности грунта наилучшим образом и положено здесь в основу ее анализа.

Увеличение касательного напряжения τ_v вызывает упругую деформацию всего грунтового тела, которая может быть зарегистрирована как упругая деформация сдвига γ_e образца в сдвиговом приборе. При дости-

жении значения $\tau_i = \tau_{lim}$ на i -й площадке сдвига локально наступает неупругая деформация, которая частично разгружает грунтовое тело и не восстанавливается, если тело разгрузить. Последующее увеличение касательного напряжения увеличивает упругую деформацию на $\Delta\gamma_e$, что приводит к увеличению неупругой деформации $\Delta\gamma_r$ на новой $i+1$ -й площадке. Остаточная деформация сохраняется на каждом таком шаге, накапливается и упрочняет грунт на поверхности скольжения, образованной из площадок сдвига. Эти шаги регистрируются как ступенчатое изменение сопротивления образца и циклическое изменение скорости $v(\gamma)$.

Допустим, что восходящая ветвь цикла деформации отражает упругую деформацию, а нисходящая – неупругую (рисунок 7). При непрерывной деформации образца упругая часть $\sum\Delta\tau_e$ непрерывно и монотонно нарастает (рисунок 10), что подтверждает ее упругую природу.

Неупругая часть $\sum\Delta\tau_r$ возрастает до максимального положительного значения $\max\sum\Delta\tau_r$, а затем уменьшается, проходит через нуль, становится отрицательной, и ее абсолютная часть увеличивается до конца опыта (рисунок 10).

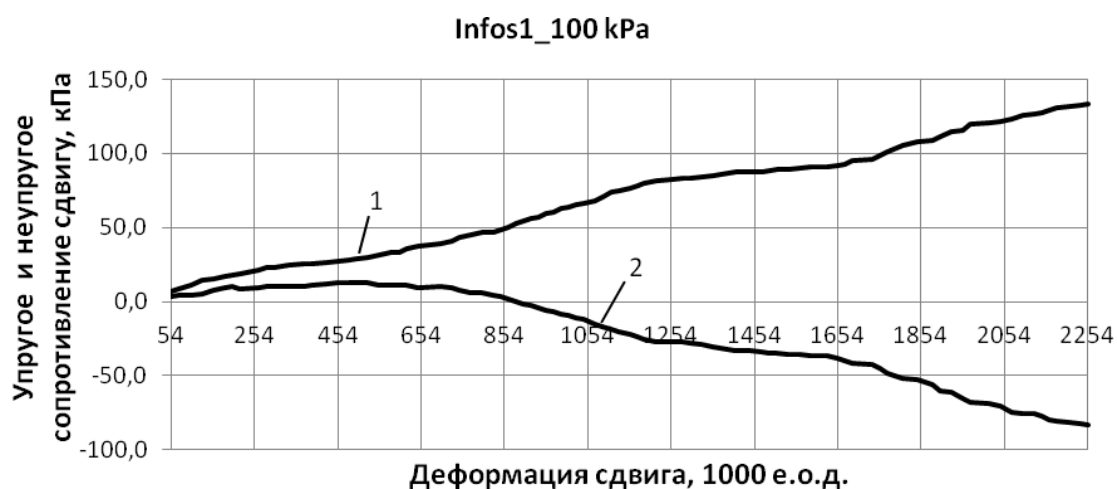


Рисунок 10 – График упругой (1) и неупругой (2) частей сопротивления образца сдвигу

«По мере накопления пластических деформаций формы и объема, грунт будет упрочняться...» [9]. Но это происходит только на участке увеличения неупругой части сопротивления $\gamma_o < \gamma \leq \gamma_h$ до значения $\Delta T_r^{(h)} = \max \sum \Delta \tau_r$. Далее значения $\sum \Delta \tau_r$ снижаются.

Величина

$$\Delta T_r^{(h)} = \max \sum \Delta \tau_r \quad (5)$$

может служить мерой упрочнения грунта. Действительно, на участке роста значений $\sum \Delta \tau_r$ происходит накопление остаточной деформации на поверхности скольжения, т. е. упрочнение. При этом полное сопротивление образца $\tau^{(h)} > \tau_r^{(h)}$ при $\gamma = \gamma_h$, за счет упругой составляющей $\sum \Delta \tau_e$. При этом значение $\tau^{(h)} < \tau_{lim}$, т. е. меньше пиковой прочности (таблицы 1 и 2). Это означает, что локальные разрушения грунта происходят раньше, чем достигается пиковая прочность образца.

Следует также отметить, что мера упрочнения $\tau_r^{(h)}$ увеличивается с увеличением нормального давления на образец σ_v (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты определения характеристик деформируемости и упрочнения грунта при сдвиге

Образец	σ_v кПа	γ_h	γ_{soft}	$\tau^{(h)}$ кПа	$\tau^{(soft)}$ кПа	$\max \sum \Delta \tau_r$ кПа	$\inf \sum \Delta \tau_r$ кПа	$soft \sum \Delta \tau_r$ кПа
Infos1_100	100	0,527	1,255	42,5	53,1	12,4	-27,1	39,5
Infos1_200	200	0,727	1,327	65,0	89,2	12,7	-21,6	34,3
Infos1_300	300	0,527	1,655	77,3	113,0	24,4	-34,0	58,4
Infos2_100	100	0,400	1,109	46,7	58,6	14,6	-23,5	38,1
Infos2_200	200	0,800	1,300	72,2	87,9	20,3	-3,1	23,4
Infos2_300	300	0,845	2,227	53,3	–	31,4	21,4	21,4

Таблица 2 – Результаты определения характеристик пиковой прочности и длительной прочности грунта при сдвиге

Образец	σ	u_h	$\tau^{(h)}$	u_{lim}	τ_{lim}	u_{long}	τ_{long}
	кПа	мм	кПа	мм	кПа	мм	кПа
Infos1_100	100	1,16	42,5	2,38	55,2	5,00	47,6
Infos1_200	200	1,20	65,0	3,82	98,6	5,00	97,7
Infos1_300	300	1,16	77,3	4,22	115,6	5,00	112,2
Infos2_100	100	0,88	46,7	1,86	60,7	5,00	*62,4
Infos2_200	200	1,76	72,2	3,94	94,3	5,00	*94,7
Infos2_300	300	1,86	53,3	2,92	99,4	5,00	*99,8

3 Анализ разупрочнения грунта при сдвиге

Сумма приращений неупругого сопротивления сдвигу $\sum \Delta\tau_r$ снижается после γ_h , проходит через нуль и становится отрицательной. Снижение приращений является следствием разупрочнения грунта при больших деформациях $\gamma > \gamma_h$, когда приращения сопротивления становятся отрицательными, т. е. при $\Delta\tau_r \leq 0$ (рисунок 10). Причиной разупрочнения является расширение физической поверхности скольжения при достаточно большой ее длине, на которой она трансформируется из трещины сдвига в трещину отрыва (рисунок 2). Как видно на рисунке 5, приращения $\Delta\tau_r$ достигают весьма малой абсолютной величины (в т. ч. нуля) между цугами колебаний при $\gamma = \gamma_{soft}$, после чего увеличиваются на втором цуге колебаний $v(\gamma)$. Но второй цуг СИС, по-видимому, отражает разрушение грунта по другим поверхностям скольжения, отличным от первых, как на рисунке 2, следовательно, описывает поведение уже другого образца, измененного первыми трещинами. Второму цугу предшествуют минимальные абсолютные значения как $\Delta\tau_r$, так и $\Delta\tau_e$ (рисунки 8 и 9), что свидетельствует о максимальном разупрочнении грунта на поверхности скольжения, следовательно, о тотальном разрушении ею образца при $\gamma = \gamma_{soft}$.

Поэтому момент наступления $\inf \sum \Delta \tau_r, \gamma_h \leq \gamma \leq \gamma_{soft}$, примем за окончание разупрочнения исходного образца, а соответствующую сумму приращений – за меру разупрочнения:

$$\Delta T_r^{(soft)} = \inf \sum \Delta \tau_r, \quad (6)$$

при $\gamma_h \leq \gamma \leq \gamma_{soft}$, где $\Delta T_r^{(soft)}$ – значение разупрочнения грунта.

Как видно из испытаний образцов, мера разупрочнения значительно больше меры уплотнения (таблица 1). Это свойство нормально уплотненных грунтов. Оно не проявилось при большем нормальном давлении в образцах Infos2_200 и Infos2_300, так как не хватило длины сдвига (5 мм, или 2,227 е.о.д.) для определения момента наступления $\min \Delta \tau_r$. Однако полученных данных достаточно для понимания того, что конечная деформация разупрочнения γ_{soft} увеличивается с увеличением нормального давления.

Полное сопротивление образцов $\tau^{(soft)}$ при γ_{soft} мало отличается от длительной прочности τ_{long} ($\gamma = 2,227$), но $\gamma_{soft} < 2,227$ для обоих образцов.

Выводы

Упрочнение грунта выражается в виде увеличения сопротивления сдвиговым деформациям. Оно является следствием формирования площадок скольжения, на которых касательные напряжения достигли предельного значения. Эти площадки формируются последовательно от мест концентрации напряжений и соединяются в поверхность скольжения, разрушающую грунтовое тело.

Процесс образования площадок скольжения регистрируется прибором в виде скачков значений сопротивления и цикличности скорости изменения сопротивления (СИС). Цикличность СИС позволяет разделить общую деформацию образца на упругую и неупругую составляющие. Каждый цикл СИС отражает сопротивление упругой деформации (на вос-

ходящей ветви) и неупругой (на нисходящей ветви). Приращения упругого сопротивления все положительны в процессе сдвига с постоянной скоростью деформации. Приращения неупругого сопротивления с начала сдвига положительны, потом отрицательны до конца сдвига и при определенных значениях деформации обращаются в нуль. Положительные приращения сопротивления неупругой деформации характеризуют упрочнение, отрицательные – разупрочнение на площадках скольжения. Нули, совпадающие с нулями приращения упругого сопротивления, означают разрушение образца поверхностью скольжения.

Последовательное суммирование приращений сопротивления неупругой деформации от начала сдвига дает устойчивую связь этой суммы с деформацией образца в виде функции с максимумом, ниспадающая часть которой становится отрицательной и нарастает по абсолютной величине до конца сдвига. Последнее свидетельствует о разрушении образца грунта на поверхностях сдвига. Нарастание суммы приращений в начале сдвига указывает на упрочнение грунта.

Сумма приращений упругих сопротивлений монотонно возрастает на протяжении заданного сдвига.

Максимальная сумма приращений сопротивления неупругой деформации на длине сдвига 5 мм и более принята мерой упрочнения.

Мерой разупрочнения принята отрицательная сумма приращений, при которой их абсолютные значения обращаются в нуль одновременно с приращениями упругого сопротивления.

Использованные источники

1. Голли О. Р. Определение характеристик деформируемости грунтов оснований для прогноза осадок при строительстве и реконструкции зданий // Реконструкция городов и геотехническое строительство, №7. Научные доклады. – СПб., 2003, с. 225–232.
2. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов : (Напряженно-деформативные и прочностные характеристики). – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.

3. Gan, K.J. and Fredlung, D.G. Multistage direct shear testing of unsaturated soils // *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 11, No. 2, June 1988, pp. 132–138.
4. Ляшенко П. А., Денисенко, В. В. Беляева Ю. А. Изучение структурной прочности глинистого грунта при постоянно возрастающей нагрузке // *Научн. журн. КубГАУ [Электронный ресурс]*. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 84(10). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/47.pdf>
5. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // *Научн. журн. КубГАУ [Электронный ресурс]*. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 04(78). – С. 278–305.
6. Ляшенко П. А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 161 с.
7. Matthews, M.C. The engineering application of direct and simple shear testing // *Ground Engineering*, v. 21, No. 2, pp. 13–21.
8. Покровский Г. И. Исследования по физике грунтов. – М.-Л.: Гл. ред. строит. лит., 1937.– 93 с.
9. Тер-Мартirosян З. Г. Реологические параметры грунтов и расчеты оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1990. – 200 с.

REFERENCES

1. Golli O. R. Opredelenie karakteristik deformiruемости gruntov osnovanij dlja prognoza osadok pri stroitel'stve i rekonstrukcii zdaniy // *Rekonstrukcija gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, №7. Nauchnye doklady. – SPb., 2003, s. 225–232.
2. Gol'dshtejn M. N. Mehanicheskie svojstva gruntov : (Naprjazhenno-deformativnye i prochnostnye harakteristiki). – М.: Strojizdat, 1979. – 304 s.
3. Gan, K.J. and Fredlung, D.G. Multistage direct shear testing of unsaturated soils // *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 11, No. 2, June 1988, pp. 132–138.
4. Ljashenko P. A., Denisenko, V. V. Beljaeva Ju. A. Izuchenie strukturnoj prochnosti glinistogo grunta pri postojanno vozrastajushhej nagruzke // *Nauchn. zhurn. KubGAU [Jelektronnyj resurs]*. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 84(10). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/47.pdf>
5. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Kontaktnoe vzaimodejstvie jelementov mikrostrukturny glinistogo grunta // *Nauchn. zhurn. KubGAU [Jelektronnyj resurs]*. – Krasnodar: KubGAU, 2012. – № 04(78). – S. 278–305.
6. Ljashenko P. A. Soprotivlenie i deformacii glinistogo grunta. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 161 s.
7. Matthews, M.C. The engineering application of direct and simple shear testing // *Ground Engineering*, v. 21, No. 2, pp. 13–21.
8. Pokrovskij G. I. Issledovanija po fizike gruntov. – М.-Л.: Gl. red. stroit. lit., 1937.– 93 s.
9. Ter-Martirosjan Z. G. Reologicheskie parametry gruntov i raschety osnovanij sooruzhenij. – М.: Strojizdat, 1990. – 200 s.