

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

*С.Г. КОЛМОГОРОВ, П.Л. КЛЕМЯЦИОНОК, С.С. КОЛМОГОРОВА,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I*

К ВОПРОСУ УПЛОТНЕНИЯ ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Аннотация. В глинистых грунтах могут происходить различного рода сложные, в том числе и физико-химические, процессы, в конечном итоге определяющие их прочностные и деформативные свойства. Для использования глинистых грунтов в качестве основания возникает необходимость повышения их прочности, что достигается в первую очередь за счёт процесса уплотнения. В уплотнении глинистых грунтов основную роль играет физически связанная вода, которая группируется вокруг частиц в виде водных оболочек и затрудняет процесс уплотнения.

В настоящей работе рассматривается процесс уплотнения переувлажнённых глинистых грунтов совместно с вибрацией, которая позволяет обеспечить интенсивный переход связанной воды в свободное состояние. Оболочки физически связанной воды при этом будут становиться меньше, что увеличит возможность сближения частиц под давлением. Это способствует увеличению контактов между частицами и в результате развитию процесса уплотнения грунта.

Ключевые слова: глинистый грунт, уплотнение, вибрация, связанная вода

Для цитирования: Колмогоров С.Г., Клемяционок П.Л., Колмогорова С.С. К вопросу уплотнения переувлажнённых глинистых грунтов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 145–150.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

*S.G. KOLMOGOROV, P.L. KLEMYATSIONOK, S.S. KOLMOGOROVA,
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

TOWARD COMPACTION OF OVERMOISTURED CLAY SOIL

Abstract. Various complicated processes, including physical and chemical, occur in clay soils, which finally determine their strength and stress-and-strain properties. In order to use clay soils as a subgrade, it is necessary to increase their strength primarily through a compaction. In clay soil compaction, the main role belongs to physically bound water, which gathers around soil particles forming water envelopes and making the compaction difficult.

The paper considers compaction of overmoistured clay soils along with vibration, that provides an intensive transition of bound water to a free state. In this case, the envelopes of physically bound water become smaller, thereby increasing the possibility of the particle bonding under pressure. This improves the contact between the soil particles and the soil compaction.

Keywords: clay soil, compaction, vibration, bound water

For citation: Kolmogorov S.G., Klemyatsionok P.L., Kolmogorova S.S. K voprosu uplotneniya pereuvlazhnennykh glinistyykh gruntov [Toward compaction of overmoistured clay soil]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 5. Pp. 145–150. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-145-150

Как известно, повышение прочности глинистых грунтов связано в первую очередь с их уплотнением. В настоящее время установлено, что при сжатии глинистого грунта его гранулометрический состав и степень дисперсности остаются практически неизменными. Это происходит потому, что минеральные частицы грунта являются достаточно прочными и могут рассматриваться как несжимаемые. В результате уплотнение грунта происходит преимущественно за счет сближения частиц, за счет повышения их концентрации в единице объема, иначе говоря, за счет уменьшения пористости. При этом происходит перегруппировка частиц (или их агрегатов) и взаимное перемещение относительно друг друга.

Принято считать, что уплотнение грунтов определяется только возможностью фильтрации воды в уплотняемой толще. Согласно классической механике грунтов (теория фильтрационной консолидации), продолжительность осадки под нагрузкой ставится в зависимость от величины коэффициента фильтрации. Эта теория справедлива для песчаных грунтов, которые в основном содержат свободную воду. В глинистых грунтах основную роль играет физически связанная вода, которая группируется вокруг частиц в виде водных оболочек, более плотных в центральных частях и рыхлых в периферийных.

Водные оболочки, прежде всего, увеличивают диаметр частиц и тем самым уменьшают возможность взаимного перемещения этих частиц, поскольку их величина становится большей, нежели диаметр пор. Наличие водных оболочек, таким образом, ограничивает проявление структурных деформаций (по Н.Я. Денисову), являющихся основным фактором при уплотнении грунта. При возрастающем давлении на грунт сближение частиц может происходить лишь за счет деформации водных оболочек, т. е. за счет структурно-адсорбционных деформаций.

В процессе структурно-адсорбционных деформаций происходит частичное отжатие воды, в первую очередь из периферийных слоев водных оболочек. Эта отжатая часть воды становится свободной и при соответствующих условиях может быть удалена из грунта. Однако в грунтовой массе подобные условия отсутствуют, т. к. фильтрация к краевым участкам массива затруднена.

Как показали опыты [1], полное удаление физически связанной воды не достигается даже при очень больших нагрузках. В табл. 1 приведено изменение влажности кембрийской глины под различными нагрузками с указанием количества отжатой воды (В.Д. Ломтадзе).

Таблица 1

Изменение влажности кембрийской глины под нагрузкой

Нагрузка, МПа	0	6	15	50	100	300	500
Влажность, %	40,1	13,8	10,8	8,2	6,4	4,6	3,2
Количество отжатой воды, г	–	18,8	2,2	1,8	1,3	0,6	0,4

Из данных таблицы видно, что наибольшее отжатие воды происходит в начальной стадии уплотнения. В дальнейшем процесс уменьшения влажности весьма замедляется. Это связано с тем, что по мере уплотнения и удаления воды начинает отжиматься наиболее прочно связанная вода. Если учесть, что максимальная гигроскопическая влажность для кембрийских глин составляет 4,9 %, то можно видеть, что при нагрузке в 300 МПа начинает отжиматься гигроскопически связанная вода.

Как известно, наиболее эффективное уплотнения грунтов, в том числе глинистых, достигается при оптимальной влажности, причем эта влажность зависит от уплотняющей нагрузки. При увеличении уплотняющей нагрузки оптимальная влажность понижается.

Установлено также, что уплотняемость (сжатие) глинистых грунтов будет различной в зависимости от того, как прилагается нагрузка на грунт – резко (мгновенно) или постепенно [1]. Больше сжатие (уплотнение) будет иметь место в первом случае. Постепенное увеличение нагрузки (ступенями) при прочих равных условиях вызывает меньшее уплотнение глинистого грунта. Данное явление связано с тем, что при постепенно возрастающей нагрузке в глинистом грунте создается сцепление упрочнения (по Н.Я. Денисову), которое затрудняет дальнейшее сжатие грунта. При быстром повышении нагрузки происходит резкая деформация грунта и его сжатие, причем за этот короткий период сцепление упрочнения не возникает.

Таким образом, на уплотняемость глинистых грунтов будут влиять количество физически связанной воды и темпы возрастания нагрузки. Но основным фактором следует считать количество физически связанной воды.

Известно, что уплотнение глинистых грунтов при влажности выше некоторого значения практически невозможно [2]. Основной причиной невозможности уплотнения глинистых грунтов, находящихся в переувлажненном состоянии, является физически связанная вода. По данным В.Д. Ломтадзе [3], при уплотнении переувлажненных глин, без возможности бокового расширения (компрессия), наблюдаются три стадии (табл. 1). Первая стадия – при давлении от 0 до 6 МПа – соответствует наибольшему отжатию воды, предположительно удаляется свободная вода. Вторая стадия наблюдается при давлении до 50 МПа, как считает автор, на этом этапе часть физически связанной воды переходит в свободную. Третья стадия соответствуют давлению выше 50 МПа, когда отжимается вода, соответствующая влажности, близкой к гигроскопической (физически связанная).

В условиях относительно свободного бокового расширения (в основании фундаментов) повышенное давление на переувлажненный глинистый

грунт вызовет выдавливание грунта из-под уплотняющей нагрузки. Последнее обусловлено тем, что переувлажненный глинистый грунт обладает небольшим сопротивлением сдвигу. В этом случае деформации под действием нагрузки в условиях свободного бокового расширения будут происходить без изменения объема.

Поскольку основной причиной невозможности уплотнения переувлажненных глинистых грунтов является физически связанная вода, необходимо одновременно с действием нагрузки обеспечивать интенсивный переход этой воды в свободное состояние. Таким мероприятием может быть, например, вибрация.

Использование вибрации для уплотнения песчаных грунтов, как известно, имеет широкое применение. Воздействие вибрации на глинистые грунты является сложным и принципиально отличным, нежели в песках.

Изменение состояния глинистого грунта, содержащего то или иное количество воды, под действием вибрации связывается с тиксотропными превращениями, происходящими в глинистом грунте. В явлении тиксотропии различают две стадии: разжижение и восстановление структуры. Разжижение грунта рассматривается как процесс перехода грунта из состояния геля в состояние золя; обратимый переход вызывает восстановление структуры.

Предполагается, что разжижение глинистого грунта при вибрации связано с тем, что в результате колебаний высокой частоты какая-то часть физически связанной воды переходит в свободную. Последняя как бы разобцает частицы грунта (покрывает водной пленкой) и сообщает им подвижность, что и проявляется как разжижение. При прекращении вибрации вода вновь переходит в физически связанную и происходит восстановление структуры. Процесс тиксотропии зависит от степени дисперсности грунта, формы частиц, влажности, пористости, минералогического состава и т. д. Так, в грунтах, лишенных глинистых частиц, тиксотропия не проявляется.

Зависимость тиксотропии от влажности выражается в том, что более влажные грунты легче подвергаются тиксотропным превращениям. Вообще, только при наличии физически связанной воды грунт становится способным к тиксотропии, причем чем больше содержит грунт этой воды, тем легче грунт может перейти в разжиженное состояние.

При прекращении вибрации, как уже отмечалось выше, происходит обратный переход освободившейся воды в физически связанную. При этом может быть получена более прочная структура грунта. Это связано с тем, что вибрация, по-видимому, может обусловить более плотную упаковку частиц, увеличить количество контактов между ними и, следовательно, повысить прочность грунта. В то же время многократная длительная вибрация приводит к разуплотнению глинистого грунта, т. е. прочность его становится меньше ранее существующей.

По всей видимости, вибрация сама по себе едва ли может вызвать более или менее значительное уплотнение и упрочнение грунта. Явление вибрации может быть эффективно использовано для уплотнения переувлажненного глинистого грунта, если последний одновременно с вибрацией подвергнуть нагрузке. Освобождающаяся при этом вода под воздействием градиента, создаваемого нагрузкой, должна легко удаляться из грунта. Оболочки физически связанной воды при этом будут становиться меньше, что повысит возможность

сближения частиц под давлением, увеличение контактов между ними и связанное с этим уплотнение грунта.

Были выполнены опыты по уплотнению глинистого грунта механической нагрузкой с одновременной вибрацией. Опыты проводились на компрессионное сжатие в приборе КПр-1М в одометре площадью 60 см². Высота образца составляла 2,5 см, объем образца – 150 см³. Давление на образец передавалось через рычажный пресс ступенями.

Вибрация создавалась ударом ручным молотком по столу компрессионного прибора с определенной частотой (60 ударов в минуту). Опыты проводились на пастах кембрийской глины (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики кембрийской глины

Зерновой состав, %, размер частиц, мм						ρ_s , г/см ³	W_p	W_L	I_p
0,25–0,10	0,10–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	0,002–0,001	Менее 0,001	2,66	18	41	28
1,0	7,0	30,8	30,4	9,8	21,0				
Всего: 8,0		61,2		30,8					

Приготовленная паста имела влажность в пределах 37–39 % (более чем полусумма пределов пластичности и предела текучести).

Испытания проводились следующим образом: загруженный в одометр образец подвергался давлению 0,1 МПа до полной консолидации (до прекращения сжатия грунта при данной нагрузке). Сжатие образца фиксировалось индикаторами. Затем грунт без снятия нагрузки подвергался вибрации. Последняя продолжалась в течение 1 мин. После вибрации фиксировались показания индикаторов и велись наблюдения за дальнейшим сжатием образца снова до полной консолидации. После этого вибрация повторялась, фиксировались показания индикаторов и т. д.

Результаты опытов показали, что вначале сжатие грунта под нагрузкой происходит довольно интенсивно, но уже через 3,5 ч наблюдалось затухание этого процесса, что свидетельствует о завершении консолидации. Вибрация в течение 1 мин резко увеличивает сжатие образца. Грунт сжимается почти мгновенно. После прекращения вибрации сжатие грунта некоторое время продолжается, но более медленными темпами и снова прекращается. Наступает новое предельное равновесие. Повторные вибрации вызывают дальнейшее сжатие образца.

Естественно, опыты сопровождалось уменьшением влажности грунта, подвергнувшегося давлению и вибрации. Так, если до опытов влажность исследуемой глинистой пасты составляла 37–39 %, то после опытов она уменьшилась до 25–27 % и ниже. Соответственно с этим коэффициент пористости изменился от 1,2 (до сжатия) до 0,68–0,76.

Таким образом, используя явление вибрации, можно добиться значительного уплотнения весьма небольшой нагрузкой переувлажненного глинистого грунта. Правда, это уплотнение достигалось в условиях невозможности

бокового расширения грунта, что не моделирует условия уплотнения в естественных условиях. Однако подбором соответствующих уплотняющих (постепенно возрастающих) нагрузок можно добиться уплотнения и в условиях свободного бокового расширения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Денисов Н.Я.* Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Москва : Госэнергоиздат, 1956. 288 с.
2. *Саатчан Г.Г.* Методы уплотнения насыпей / Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства. Москва : Трансжелдориздат, 1957.
3. *Ломтадзе В.Д.* Изменение влажности глин при уплотнении их большими нагрузками // Записки Ленинградского горного института. 1953. Т. 29. Вып. 2.

REFERENCES

1. *Denisov N.Ya.* Stroitel'nye svoistva glinistykh porod i ikh ispol'zovanie v gidrotekhnicheskom stroitel'stve [Construction properties of clay soils and their use in hydraulic engineering construction]. Moscow: Gosenergoizdat, 1956. (rus)
2. *Saatchan G.G.* Metody uplotneniya nasypei [Methods of embankment compaction]. Moscow: Transzheldorizdat, 1957. (rus)
3. *Lomtadze V.D.* Izmenenie vlazhnosti glin pri uplotnenii ikh bol'shimi nagruzkami [Clay moisture content changed after heavy load]. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta*. 1953, V. 29. No. 2. (rus)

Сведения об авторах

Колмогоров Сергей Гаврилович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovsg@list.ru

Клемяционок Петр Леонидович, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Petr.1940@list.ru

Колмогорова Светлана Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Kolmogorovass@yandex.ru

Authors Details

Sergey G. Kolmogorov, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovsg@list.ru

Petr L. Klemyatsionok, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Petr.1940@list.ru

Svetlana S. Kolmogorova, PhD, A/Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovskii Ave., 190031, Saint-Petersburg, Russia, Kolmogorovsg@list.ru