

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Основы механики грунтов и их практические приложения. — М., 1948. — С. 124–129.
2. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. — М., 1985. — С. 73–77.
3. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. — М., 1982. — С. 465–477.
4. Рыжов А.М., Вихарев В.П. Случай разжижения песка в пойменной насыпи / Вопросы геотехники. — Днепропетровск, 1959. — С. 243–260.
5. Яропольский И.В. К вопросу о коэффициенте трения в песках / Тр. ЛИИВТ. — М., 1933. — Вып. 2. — С. 18–37.
6. Casagrande A. New Fact in Soil Mechanics from the Reseach Laboratories, Eng. News Record, Vol. 115, N 10, 1935.
7. Reynolds O. Experiments Showing Dilatancy a Property of Granular Material, Proc. Roy. Inst., 2, с. 351–363, 1886.
8. Нворслев М.И. Über die Festigkeitseigenschaft gestörter bindiger Böden, Skr., A, N 45, 1937.
9. Справочник гидрогеолога. — М., 1962. — С. 130–138.
10. Wilun Z. Zarus geotechniki, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1976, с. 45–48.

УДК 624.15:624.131

Г.В. ХМЕЛЕВСКАЯ

### О НАБУХАНИИ СУПЕСЧАНЫХ И ПЫЛЕВАТЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ

В центральных и северных районах Белоруссии строительство мелиоративных объектов часто проводится в зоне распространения супесчаных и пылеватых песчаных грунтов. Проведенный нами ранее анализ состояния проводящей мелиоративной сети показал, что в таких грунтах чаще, чем в других, происходят местные деформации откосов каналов под действием руслового потока, поверхностных и фильтрационных вод [1]. На поверхности откосов грунт, как правило, находится в непригруженном состоянии и наиболее подвержен воздействию различных гидрометеорологических факторов. Вследствие этого вопрос о поведении супесчаных и пылеватых песчаных грунтов в условиях изменения их влажностного режима представляет определенный интерес с точки зрения обеспечения устойчивости откосов каналов. Имеющиеся литературные данные относятся в основном к тяжелым суглинкам и глинам. Материалы же исследований, касающиеся набухания при увлажнении супесчаных грунтов (и тем более пылеватых песков), весьма ограничены, что не позволяет сделать обоснованные выводы о поведении таких грунтов в условиях изменения их влажности.

Было исследовано 14 супесчаных и 10 пылеватых песчаных грунтов, отобранных на мелиоративных объектах Минской и Витебской областей.

Основные физические характеристики исследованных супесчаных грунтов следующие: граница текучести  $W_T = 15...29\%$ , раскатывания  $W_P = 11...24\%$ ; число пластичности  $W_{Pl} = 3...6$ ; плотность частиц  $\gamma_c = 2,61...2,71 \text{ г/см}^3$ ; содержание глинистых частиц ( $< 0,005 \text{ мм}$ )  $P_{гп} = 6,4...16,7\%$ , пылеватых частиц ( $0,005...0,05 \text{ мм}$ )  $P_{пыл} = 15,5...67,2\%$ .

Исследованные пески представляют собой типичные пылеватые разности с содержанием пылевой фракции  $P_{пыл} = 7...40\%$ , глинистой —  $P_{гп} = 0,5...$

8 %. Плотность частиц песков  $\gamma_{\text{ч}} = 2,61...2,66 \text{ г/см}^3$ .

Проведено четыре серии опытов (93 опыта):

исследовано разуплотнение грунта в результате свободного набухания при увлажнении в зависимости от начальных характеристик;

влияние цикличности увлажнения на степень разуплотнения набухающего грунта;

дана оценка давления набухания;

влияние длительности периода водонасыщения на конечную величину деформации образца.

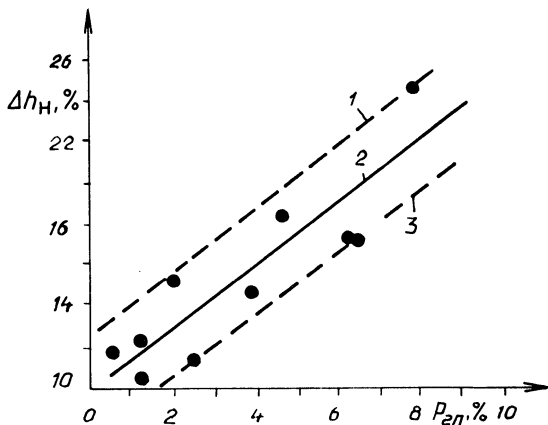
Эксперименты проводили в кольцах площадью  $25 \text{ см}^2$  и высотой 2 см. Деформация образцов измерялась штангенциркулем от постоянной плоскости отсчета в 10 точках с последующим усреднением результатов. Правомерность такого метода определяется, с одной стороны, значительной величиной деформации свободного набухания исследуемых грунтов (10...30 %), а с другой — большим влиянием на деформации даже незначительных нагрузок, т.е. малым давлением набухания. Исходные значения объемной массы скелета  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и влажности  $W_0$  образцов принимались в диапазоне их значений при естественном залегании исследуемых грунтов на откосах каналов ( $\gamma_{\text{ск}_0} = 1,6...1,9 \text{ г/см}^3$ ,  $W = (0,7...0,9) W_{\text{T}}$ ).

Опыты первой серии показали, что для супесчаных грунтов величина свободного набухания  $\Delta h_{\text{н}} = 10...25 \%$  и зависит от исходных значений объемной массы скелета  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и влажности  $W_0$  [2]. Деформации набухания возрастают с увеличением  $\gamma_{\text{ск}_0}$  и уменьшением  $W_0$ , что хорошо согласуется с данными других авторов, проводивших опыты с суглинками и глинами [3,4]. Однако, как показали исследования, величина свободного набухания супесчаных грунтов возрастает лишь до некоторого значения начального коэффициента водонасыщения образца  $G_0 = 0,7...0,8$ , а затем начинает снижаться и при  $G_0 = 1,0$  набухание образца практически отсутствует. Такой эффект можно объяснить тем, что насыщение грунта за счет миграции влаги возможно лишь в некотором диапазоне начальных его характеристик, когда размеры пор и соотношение между количеством свободной и связанной воды в образце таковы, что скелет грунта способен еще поглощать воду за счет незамкнутых пор [5,6].

Эксперименты показали, что в процессе свободного набухания происходит значительное изменение состояния грунта. В среднем за счет набухания происходит разуплотнение образца на 8...13 %. Наибольшее разуплотнение наблюдается в поверхностном слое толщиной 2...5 мм, где объемная масса скелета уменьшается на 20...80 % в зависимости от исходного значения  $\gamma_{\text{ск}_0}$ : например, для супеси с  $W_{\text{II}} = 4$  при изменении  $\gamma_{\text{ск}_0}$  от 1,7 до  $1,92 \text{ г/см}^3$  объемная масса поверхностного слоя снизилась соответственно на 26...74 %. Влажность этого слоя превышает влажность на границе текучести в 1,2...1,7 раза; естественно, что и несущая способность такого грунта практически падает до нуля.

Исследования свободного набухания пылеватых песков с  $W_0 = 9...11 \%$  позволили выявить связь величины деформации набухания с содержанием

Рис. 1. Зависимость деформаций свободного набухания пылеватых песков от содержания глинистой фракции  $P_{\text{гл}}$ :  
 1 — средняя расчетная прямая; 2, 3 — верхняя и нижняя огибающие опытных значений



в песке глинистых частиц  $P_{\text{гл}}$  (рис. 1), которую в среднем можно описать следующим уравнением:

$$\Delta h_{\text{н}} = (10 + 1,6P_{\text{гл}}). \quad (1)$$

Давление набухания исследованных супесчаных грунтов, как показали эксперименты, невелико и составляет в среднем  $p_{\text{наб}} = 15 \dots 20 \text{ г/см}^2$  (1,5... 2 кПа). Уменьшение деформации набухания под действием нагрузки происходит интенсивно по полулогарифмическому закону и в общем виде может быть выражено зависимостью

$$\Delta h_{\text{н}} = A - B \lg p, \quad (2)$$

где  $p$  — нагрузка,  $\text{г/см}^2$ ;  $A$  и  $B$  — эмпирические коэффициенты (для супесей с  $W_{\text{п}} = 4 \dots 6$   $A = 7,2$  и  $B = 6,2$ ). Зависимость (2) действительна при  $p \geq 0,25 \text{ г/см}^2$  (0,025 кПа), что учитывает действие на деформации набухания массы верхнего набухающего слоя.

Полученные значения давления набухания супесчаных грунтов (1,5... 2 кПа) во много раз меньше, чем у суглинков и глин. Эта величина составляет соответственно в среднем 50...150 и 400...600 кПа, достигая для сильнонабухающих разновидностей глин 1...1,2 МПа [7, 8]. Для сооружений (регулирующих, сопрягающих и т.д.) на каналах столь малые давления набухания не опасны, поскольку нагрузка на грунт от сооружения превышает это давление и деформации под ними развиваться не будут. К аналогичным выводам пришли и авторы работы [7]. На откосах каналов предотвратить разуплотнение поверхностного слоя грунта можно устройством пригрузки из щебня или гравия слоем 15...20 см, что обеспечивает поверхностную нагрузку 2,0... 3,0 кПа.

Влияние циклического увлажнения было изучено на супесчаных грунтах ( $W_{\text{T}} = 23 \%$ ,  $W_{\text{п}} = 6$ ) при  $\gamma_{\text{ск}_0} = 1,59 \text{ г/см}^3$  и  $W_0 = 0,65 W_{\text{T}}$ . Проведено шесть циклов увлажнение — высушивание с измерением деформаций образца в конце каждой фазы цикла. После фазы высушивания первого цикла (отрезок 1—1', рис. 2) поверхность образца опустилась практически в первоначальное

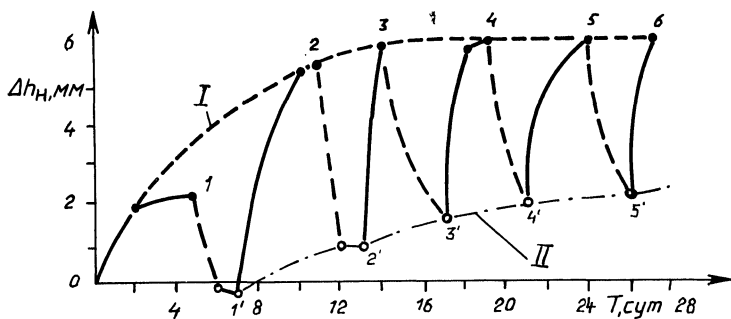


Рис. 2. Деформации свободного набухания образца супеси при циклическом насыщении: I – ветвь набухания при увлажнении; II – ветвь остаточного набухания при осушении.

положение, произошло также и уменьшение диаметра образца – деформация усадки. В начале первого цикла в результате набухания при насыщении образца водой произошло уменьшение объемной массы скелета до  $\gamma_{ск_1} = 1,43 \text{ г/см}^3$ , а затем при высушивании грунта – ее увеличение до  $\gamma'_{ск_1} = 1,69 \text{ г/см}^3$ . Последнее значение  $\gamma'_{ск_1}$  и явилось исходным для второго цикла увлажнения. Последнее привело к увеличению деформации ( $\sim$  в 2,5 раза) вследствие того, что исходная плотность была намного больше, а влажность намного меньше, чем перед первым циклом насыщения, т.е. условия для последующего набухания стали более благоприятными. Последующие циклы насыщения (2'–3) и высушивания (3–3') привели к увеличению общей деформации образца, однако интенсивность процесса затухает и после шестого цикла практически стабилизируется. Кроме того, следует отметить, что начиная со второго цикла после высушивания и усадки образца появляется остаточная деформация набухания, интенсивность увеличения которой также от цикла к циклу снижается и стабилизируется на уровне деформации набухания первого цикла (см. рис. 2). Затухание процесса свободного набухания говорит о том, что внутренние возможности перестройки структуры грунта уже исчерпаны, поэтому дальнейшее увеличение количества циклов не приводит к росту деформаций, а наблюдается лишь колебание поверхности образца между линиями I и II. Конечное разуплотнение образца после шести циклов насыщения произошло до  $\gamma_{ск_6} = 1,23 \text{ г/см}^3$ , что на 22,6 % меньше начального значения  $\gamma_{ск_0} = 1,59 \text{ г/см}^3$  и на 13,9 % меньше  $\gamma_{ск_1}$  после первого цикла насыщения.

Полученные при циклическом водонасыщении образца результаты говорят о том, что наибольшие деформации грунта на откосах каналов возможны при повторных насыщениях в период летнего пересыхания поверхности грунтов, что подтверждается и исследованиями других авторов [7].

При изучении длительности влияния увлажнения на деформации свободного набухания супесчаных грунтов было установлено, что своего наибольшего значения деформации достигают через четыре-пять суток; после чего начинается постепенное их снижение со стабилизацией на уровне 80 % от максималь

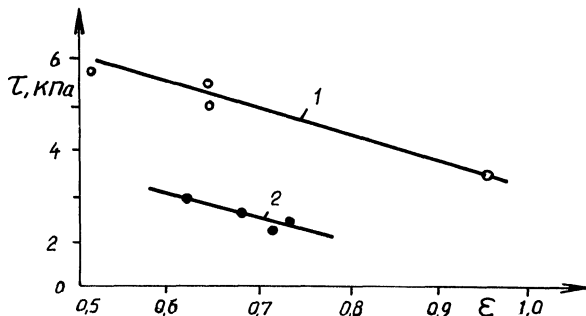


Рис. 3. Зависимость сдвигающего усилия  $\tau$  от коэффициента пористости для набухших и ненабухших образцов (сдвиг переуплотненных образцов):  
1 – ненабухший грунт; 2 – набухший грунт.

величины. По классификации И.М. Горьковой [6], исследованные грунты относятся к дисперсно-обломочным системам со смешанными коагуляционно-цементационными связями при естественной влажности. При набухании за счет переувлажнения происходит ослабление межагрегатных коагуляционных связей и начинается дилатантное уплотнение и усадка под действием массы грубодисперсных частиц и микроагрегатов, что и характеризуется наличием перегиба и нисходящей ветви на кривой зависимости деформации от времени.

Для оценки изменения прочностных свойств супесчаных грунтов после их свободного набухания были выполнены сдвиговые испытания (супесь с  $W_T = 22\%$ ,  $W_{II} = 5$ ,  $\gamma_c = 2,65 \text{ г/см}^3$ ).

Варианты испытаний:

срез в условиях завершеного уплотнения грунта естественной влажности при нагрузках 20...110 кПа;

срез в условиях завершеного уплотнения водонасыщенного грунта при нагрузках 10...154 кПа;

срез переуплотненных водонасыщенных образцов (табл. 1);

срез образцов после их свободного набухания (предварительное уплотнение производилось при нагрузках 87 и 154 кПа) (табл. 1).

Для супеси естественной влажности  $W_0 = (0,6...0,7) W_T$  при  $\epsilon_0 = 0,5...0,6$  сцепление оказалось равным 10 кПа, а угол внутреннего трения  $\varphi = 17,7^\circ$ . Для того же грунта в водонасыщенном состоянии сцепление уменьшилось вдвое – до 5 кПа, угол же трения  $\varphi$  равен  $17,4^\circ$ . Из графиков зависимости (рис. 3) сдвигающего усилия от коэффициента пористости грунта в момент среза видно, что по сравнению с обычным водонасыщенным образцом при срезе набухшего грунта сдвигающие усилия уменьшаются в 1,8...2 раза ( $\tau = 2...3 \text{ кПа}$ ). При этом срез в приборе осуществляется по средней части образца, для которой характерны и осредненные значения  $\gamma_{ск}$ ,  $W$  и  $\epsilon$  в момент среза. Следовательно, и полученные в опытах сдвигающие усилия отражают среднее для образца сопротивление грунта сдвигу. В верхней же части образца, где изменение характеристик грунта при набухании максимально, падение прочности грунта будет значительно больше, чем в среднем по образцу. Однако возможности обычных сдвиговых приборов не позволяют оценить распре-

Таблица 1

Характеристики супеси ( $W_T = 22\%$ ,  $W_{II} = 5$ ,  $\gamma_q = 2,65 \text{ г/см}^3$ ) и значения сопротивления сдвигу  $\tau$  при срезе набухших и ненабухших образцов

| До опыта                                 |              |              | После уплотнения нагрузкой |           |                                       |                 | После опыта                            |              |              |       |                     |                               |                    |
|--|--------------|--------------|----------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------------|--|--------------|--------------|-------|---------------------|-------------------------------|--------------------|
| $\gamma_{СК_0}$ ,<br>г/см <sup>3</sup>   | $W_C$ ,<br>% | $\epsilon_0$ | $G_0$                      | $p$ , кПа | $\gamma'_{СК}$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $\tau$ ,<br>кПа | в среднем по образцу                   |              |              |       | по высоте образца   |                               |                    |
|  |              |              |                            |           |                                       |                 | $\gamma_{СК_К}$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $W_K$ ,<br>% | $\epsilon_K$ | $G_K$ | верх<br>$W_K^B$ , % | зона<br>сдвига<br>$W_K^C$ , % | низ<br>$W_K^H$ , % |
| <i>Ненабухшие водонасыщенные образцы</i> |              |              |                            |           |                                       |                 |  |              |              |       |                     |                               |                    |
| 1,58                                     | 14,22        | 0,68         | 0,56                       | 161       | 1,62                                  | 5,5             | 1,62                                   | 20,15        | 0,64         | 0,84  | 19,5                | 19,2                          | 20,4               |
| 1,22                                     | 7,1          | 1,17         | 0,16                       | 161       | 1,36                                  | 3,5             | 1,36                                   | 19,95        | 0,95         | 0,56  | 20,81               | 19,11                         | 21,16              |
| 1,54                                     | 14,59        | 0,72         | 0,53                       | 161       | 1,62                                  | 5,0             | 1,62                                   | 19,65        | 0,64         | 0,82  | 19,27               | 19,22                         | 21,53              |
| 1,74                                     | 15,14        | 0,52         | 0,76                       | 61        | 1,75                                  | 5,8             | 1,75                                   | 17,82        | 0,51         | 0,92  | 16,45               | 20,33                         | 19,03              |
| <i>Набухшие образцы</i>                  |              |              |                            |           |                                       |                 |  |              |              |       |                     |                               |                    |
| 1,65                                     | 14,21        | 0,61         | 0,62                       | 154       | 1,69                                  | 2,7             | 1,58                                   | 21,97        | 0,68         | 0,86  | 23,6                | 21,03                         | 22,7               |
| 1,25                                     | 7,04         | 1,12         | 0,16                       | 154       | 1,60                                  | 2,4             | 1,53                                   | 25,85        | 0,73         | 0,92  | 22,26               | 27,27                         | 18,31              |
| 1,65                                     | 10,97        | 0,61         | 0,48                       | 154       | 1,74                                  | 3,0             | 1,64                                   | 22,78        | 0,62         | 1,0   | 24,53               | 21,01                         | 23,79              |
| 1,54                                     | 12,44        | 0,72         | 0,46                       | 87        | 1,59                                  | 2,3             | 1,55                                   | 22,71        | 0,71         | 0,85  | 22,04               | 23,19                         | 23,39              |

деление прочностных характеристик по высоте образца. Предварительная оценка прочности поверхностного слоя по методу шариковой пробы Цытовича показала, что сцепление грунта в этом слое уменьшается в 20...30 раз по сравнению со средней частью образца и составляет 0,08...0,2 кПа.

Таким образом, исследованные супесчаные и пылеватые песчаные грунты характеризуются значительными деформациями свободного набухания, достигающими 10...25 %, и незначительной при этом величиной давления набухания  $p_{\text{наб}} = 1,5...2,0$  кПа, что с точки зрения устойчивости сооружений на таких грунтах не представляет опасности. В результате свободного набухания при увлажнении происходит разуплотнение грунта. В среднем по образцу объемная масса скелета уменьшается на 10...20 %, а влажность близка к пределу текучести ( $W = 0,8...0,9 W_T$ ). Разуплотнение поверхностного слоя достигает 20...80 %, а влажность его в 1,2...1,7 раза превышает предел текучести. При переменном режиме увлажнения происходит рост деформаций свободного набухания со стабилизацией на уровне двух-, трехкратного значения  $\Delta h_n$  первого цикла насыщения. Сцепление набухшего грунта в 1,8...2,0 раза меньше сцепления водонасыщенного ненабухшего образца и в 3,5...4,0 раза меньше сцепления грунта естественной влажности. Сцепление поверхностного слоя образца в 20...30 раз меньше сцепления грунта в средней его части.

Полученные данные о существенном изменении состояния и свойств супесчаных грунтов при набухании свидетельствует о необходимости учета этих изменений при расчетах устойчивости поверхностных слоев откосов каналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б е л я е в А.Н., П о л и в к о Н.А., М и ш у р о в а Г.В. Техническое состояние мелиоративных проводящих каналов и его улучшение. — НТИ МВХ БССР, № 11. — 1984. — С. 25—28.
2. Х м е л е в с к а я Г.В. Устойчивость каналов в набухающих грунтах. — В сб. Управление водным режимом мелиорированных земель. — Мн., 1987. — С. 154—161.
3. Р у т к о в с к и й Б.И. Исследование разуплотняемости насыпных грунтов под влиянием изменения температурного и влажностного режимов / Тр. совещаний по инж.-геол. свойствам горных пород и методам их изучения. Т. II. М., 1957. — С. 111—117.
4. Б у р е н к о в а В.В. Исследование поведения суглинка в горизонтальной трещине под действием фильтрационного потока / Тр. ВНИИ ВОДГЕО, вып. 19. Гидротехника. — М., 1968. — С. 75—78.
5. Строительство на набухающих грунтах. — М., 1968. — 134 с.
6. Г о р ь к о в а И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. — М., 1975. — 151 с.
7. П о з д н я к о в а В.Д., Р е з н и к о в О.М. Особенности применения набухающих грунтов в земляном полотне / Тр. Днепропетровского ин-та инженеров ж.-д. транспорта, 1979, № 203/28, с. 37—43.
8. Л ы с е н к о М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. — М., 1980. — 272 с.