

водобойной плиты можно сократить на 20...40 %, а величину заглубления крепления — на 30...40 % по сравнению со свободно падающей струей.

На основании результатов лабораторных исследований и проведенных расчетов можно сделать вывод, что конструкция гасителя обладает хорошими энергогасящими свойствами и позволяет в отдельных случаях сократить затраты на крепление в нижнем бьефе быстротока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф а к т о р о в и ч М.Э. Гашение энергии при соударении потоков и перспективы его использования в водосбросных сооружениях. Тр. коор. совещаний по гидротехнике. — М.; Л., 1963. — Вып. 7. — С. 68—84.
2. К о м а р а Ю. Водосброс с использованием соударения потоков для гашения энергии / Гидротехн. стр-во. — М., 1969. — № 4. — С. 47—48.
3. С к л я д н е в Б.М. Эффект гашения энергии при соударении потоков. Вопросы гидротехники и гидравлики. — Киев, 1969. — С. 30—32.
4. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. — М., 1972. — С. 312.
5. Ф а к т о р о в и ч М.Э. Методика приближенного гидравлического расчета сопряжения бьефов водосбросных сооружений с использованием соударения потоков для гашения энергии, — М.; Л., 1956. — С. 48.
6. К у з н е ц о в С.К. Теория и гидравлические расчеты нижнего бьефа. — Львов, 1983. — С. 176.

УДК 631.131.4.524

Ю.А. СОБОЛЕВСКИЙ, д.ю. СОБОЛЕВСКИЙ

ДИСТОРСИЯ И РАЗЖИЖЕНИЕ ПЕСКОВ

В практике гидротехнического и гидромелиоративного строительства отмечаются аварии из-за внезапного разжижения водонасыщенных песчаных откосов и оснований [1, 2, 3]. Очень часто причины остаются невыясненными, но неизменно констатируется, что разжижение произошло с рыхлоотложенными грунтами.

В 1935 г. Е.Д. Кадомским впервые был поставлен весьма простой опыт перехода водонасыщенного песка в разжиженное состояние [2]. В наполненный водой сосуд, оборудованный стеклянными пьезометрами, тонкой струей насыпается сухой песок, который после осаждения образует рыхлоотложенную водонасыщенную массу. На поверхности последней устанавливается гиря, а затем толща песка пронзается линейкой. Рыхлая структура разрушается. Водонасыщенный песок переходит в разжиженное состояние, Гиря тонет. Пьезометры показывают подъем давления в воде с медленным понижением уровня до первоначального. Из-за более плотной переукладки частиц снижается также и уровень песка в сосуде.

Подобные явления в природе описаны А.М. Рыжовым и В.П. Вихаревым [4]. Рыхло отсыпанную насыпь из мелкого аллювиального песка под железную и автомобильную дороги на строительстве Кременчугского гидроузла во время ее подтопления подвергли спровоцированному оплыванию трехкратным вдавливанием полутораметрового шеста в откос у уреза воды.

Первое опытное разрушение распространилось на 14 м в глубину четырехметровой насыпи. Грунт вышел на 24 м за пределы насыпи, расплывшись по

площади 740 м². Оплывание захватило 330 м² насыпи, Площадка получила уклон 1:10–1:12. Первоначальный же наклон откоса – 1:1. Всего растеклось около 1000 м³ грунта.

Второе опытное разрушение состоялось после резких погружений шеста в насыпь у уреза воды. В этом месте надводная часть насыпи составляла 2,9 м, подводная – около 1 м. Процесс разжижения по площади 520 м² протекал так же, как и в первом случае, и распространился на 19,2 м в глубину насыпи. Расплывшийся грунт под уклоном 1:10–1:12 занял площадь 1100 м² и вытек за пределы насыпи на 28 м. Оплыванию подверглось около 1500 м² грунта. На этом же объекте был зафиксирован случай оплывания насыпи от случайного удара весла при движении лодки.

Подобное явление произошло зимой 1958 г. при растекании дамбы рыбхоза на р. Щара возле г. п. Ивацевичи. Участок дамбы, отсыпанной предшествующим летом без уплотнения из пылеватого песка на длине 40 м, пришел в разжиженное состояние при прохождении по нему экскаватора, который опрокинулся и утонул в образовавшейся при размыве воронке.

Изучению явлений разжижения песка и связанных с ними процессов посвящены работы исследователей в области механики грунтов [5,6]. Авторы независимо друг от друга опубликовали результаты опытов, из которых следовало, что объем песка в зоне сдвига изменяется. При плотном сложении частицы песка во время скольжения перекаатываются и зацепляются, что приводит к увеличению объема и разрыхлению грунта в зоне сдвига. В рыхлом же песке сдвиг вызывает разрушение неустойчивой структуры, затем более компактную переукладку зерен, сопровождающуюся уплотнением грунта. Впоследствии это явление было названо контракцией.

О зацеплении частиц плотного песка при сдвиге писал еще в 1773 г. Ш. Кулон. Позже, в 1885 г., расширение материала при сдвиге было названо О. Рейнольдсом дилатансией [7]. В настоящее время искажения объемов материала от девиатора напряжений объединены общим термином – дисторсия.

Однако, как убеждают опыты, существует промежуточное состояние между плотным и рыхлым сложением грунтов, характеризующее неизменной пористостью при сдвиге. Она также не меняется при установившемся движении на границе смещающихся плотных массивов грунта и называется критической [8].

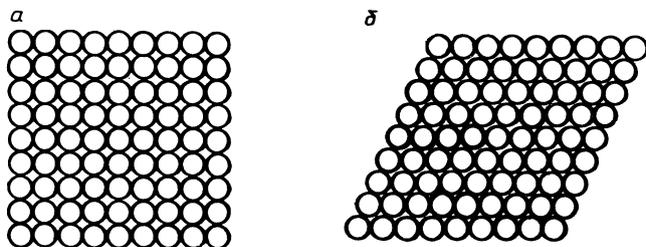


Рис. 1. Механические модели идеального грунта из шариков:

а – неустойчивая система с шестью точками контакта; *б* – устойчивая система с восемью точками контакта.

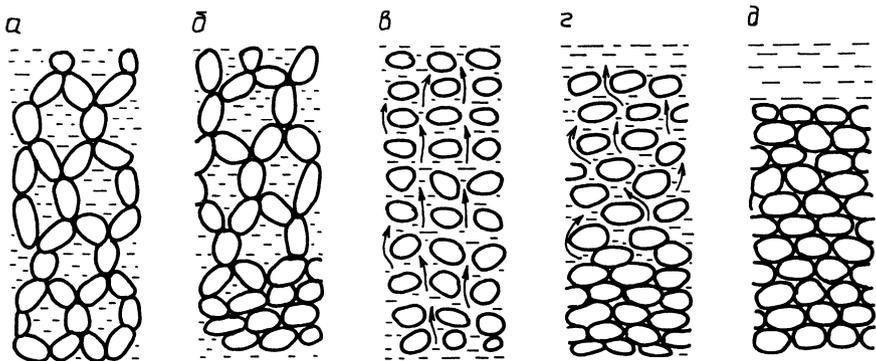


Рис. 2. Переукладка частиц рыхлого водонасыщенного песка:

a – первоначальное рыхлое сложение; *б* – переукладка частиц нижнего контактирующего слоя; *в* – взвешивание частиц восходящим фильтрационным потоком; *г* – процесс переукладки частиц; *д* – уплотненное сложение частиц.

При сдвиге водонасыщенного песка возникают фильтрационные явления, существенно влияющие на устойчивость оснований и откосов. Устойчивость несвязных грунтов, обладающих жестким скелетом, обуславливается трением между частицами от вышележащих масс грунта, внешней нагрузки и капиллярных сил. Для выяснения ряда фильтрационных явлений, происходящих при сдвиге рыхлого песка, воспользуемся моделью грунта из шариков правильной формы [1] (рис. 1). Пористость между шариками на рис. 1, *a* будет составлять 48 %, коэффициент $e = 0,91$; и соответственно на рис. 1, *б* – 26 и 0,35 %. При перекосе структуры резко изменится высота. Водопроницаемость, как показывает расчет по эмпирическим формулам, учитывающим значение пористости, изменится на порядок [9].

Многочисленные опыты по сдвигу маловлажных песков в сдвиговом приборе ВСВ-25 и специально сконструированном компрессионном dilatометрическом приборе прямого среза позволяют выявить зависимость сопротивления сдвигу от плотности сложения и одновременно измерять нормальные напряжения от дисторсии в зоне сдвига. Результаты показали, что сопротивление сдвигу при контракции из-за уменьшения контактов между частицами уменьшается или исчезает полностью, а при дилатансии – увеличивается из-за возрастания нормального давления в зоне сдвига.

Зависимость Кулона приобретает вид

$$\tau = (\sigma_n \pm \sigma_d) \operatorname{tg} \varphi,$$

где σ_n и σ_d – соответственно нормальное и дисторсионное давления в зоне сдвига, кПа; φ – угол внутреннего трения, град.

При $\sigma_d = \sigma_n$ грунт в полосе контракции полностью лишается трения, даже не будучи взвешенным в воде. В грунтовом массиве образуется щель. Взвешивающей средой может стать даже поровый воздух. Однако чаще всего песок взвешивается поровой водой.

Уплотнившийся при контракции слой грунта подобно полупроницаемой мембране передает давление с примыкающего еще ненарушенного массива

на возникшую водяную прослойку. В освободившейся от частиц прослойке воды резко возрастает поровое давление (рис. 2). Избыточный напор вызывает восходящий фильтрационный ток воды, который и разрушает неустойчивую структуру рыхлого водонасыщенного песка. Контрактирующий слой также разрушается. Из-за неустойчивости структуры грунта явления контракции и мембранный эффект развиваются в соседних областях. Процесс становится лавинным. Происходит разжижение значительных масс грунта. Сооружения на таких грунтах погружаются. Природные склоны и искусственные откосы оплывают. Разжижение и оплывание водонасыщенных грунтов прекращаются лишь тогда, когда в силу вступают дилатантные явления.

Различают полное и частичное разжижение песков [2]. При полном разжижении потеря контактов от контактирующей области распространяется вверх, достигая дневной поверхности грунта. Грунт превращается в суспензию:

$$\gamma_{susp} = \gamma_s m + \gamma_w n ,$$

где γ_s и γ_w — соответственно удельный вес частиц и воды, кН/м^3 ; n и m — доля пор и скелета в единице объема грунта.

Давление в воде в уровне образовавшейся щели под условной мембраной возрастает до

$$p = \gamma_{sr} h = \gamma_{susp} h ,$$

где $\gamma_{sr} = \gamma_{susp}$ — объемный вес насыщенного водой грунта и соответственно суспензии, кН/м^3 ; h — глубина рассматриваемого уровня, м.

Учитывая, что при повышении давления вода из щели будет стремиться вверх, а частицы песка двигаться книзу, возникает напор

$$H = \frac{\gamma_{sr}}{\gamma_w} h .$$

Максимальные градиенты H могут достигать $i = H/h = \gamma_{sr} / \gamma_w$, т.е. стать больше единицы. При этом толща песка разжижается. Однако такое состояние возникает и при $i = \gamma_{sb} / \gamma_w$. Тогда

$$u_{\max} = (\gamma_{sr} - \gamma_w) (h - z) = \gamma_{sb} (h - z) ,$$

где u_{\max} — поровое давление, соответствующее полному разжижению грунта, кПа ; γ_{sb} — удельный вес взвешенного в воде грунта, кН/м^3 .

Восходящий ток воды приводит к полной потере контактов в слое выше контактирующей области (см. рис. 2).

Следует иметь в виду, что избыточное давление при динамических воздействиях может и не достигать максимального значения. Тогда происходит частичное облегчение контактов. Грунт в определенной мере сохраняет несущую способность. Такое состояние П.Л. Иванов [2] предлагает оценивать степень разжижения грунта

$$N = \frac{u}{u_{\max}} = \frac{u}{\gamma_{sb} (h - z)} ,$$

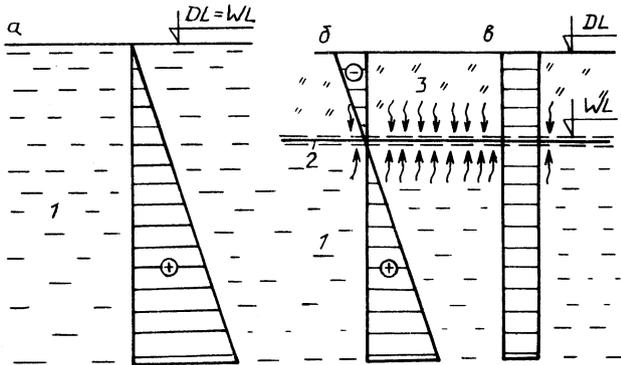


Рис. 3. Возникновение капиллярных сил обжатия при переукладке рыхлого тонкозернистого водонасыщенного песка:

a – распределение давлений в поровой воде рыхлосложенного песка; *б* – распределение давлений в поровой воде уплотняющегося песка; *в* – напряжения в скелете песка из-за капиллярного обжатия; 1 – свободная вода (знак "плюс" – давление в воде выше атмосферного); 2 – капиллярная вода (знак "минус" – давление в воде ниже атмосферного); 3 – дилатирующая прослойка.

где u – избыточное поровое давление при частичном разжижении, кПа. Числовые значения N лежат в пределах от 0 до 1. При $N = 1$ происходит полное разжижение грунта.

При частичном разжижении водонасыщенных песков, которое также заканчивается переукладкой зерен и уплотнением, в силу вступают дилатантные явления, противоположные контракции. Дилатансия водонасыщенного песка сопровождается разрыхлением прослойки между смещающимися грунтовыми областями с пористостью выше критической. Образуется разрежение. В дилатирующуюся прослойку устремляется вода из сдвигаемых частей грунта. Если толщина представлена достаточно мелкозернистым песком, то выше горизонта 2–2 возникает капиллярное состояние воды. Скелет же грунта получит капиллярное сжатие по всей толще [10] (рис. 3). Подтверждается вывод [1], что "...песок с порозностью ниже критической представляет собой одно из самых надежных оснований",

Сопоставление контракции и дилатансии показывает, что частичное разжижение песков проявляется преимущественно в толщах, структура которых близка по сложению к критической пористости либо состоит из чередующихся рыхло и плотно сложенных прослоек. Виброползучесть песков при динамических воздействиях, очевидно, также следует трактовать как сменяющуюся во времени и пространстве дилатансию и контракцию.

Дисторсионные представления о деформировании грунтов, объединяющие дилатансию и контракцию, указывают на то, что для снятия напора в поровой воде эффективны дренажные мероприятия, а для недопущения или ограничения контракции и, как следствие, разжижения водонасыщенных песков необходимо их уплотнение до пористости ниже критической.

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 $\gamma_{ch} = 2,61...2,71 \text{ г/см}^3$; 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 — $P_{гл} = 0,5...$