

3. Цитович, С.Г. Горы-Горечкий земледельческий институт - первая в России высшая сельскохозяйственная школа (1836...1864). Горки, 1960.

УДК 624.131.3

П.Н. Костюкович, И.П. Крошнер (БНТУ)

## **ВЛИЯНИЕ СТЕСНЕННОЙ ДИЛАТАНСИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫПУЧИХ И СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ**

В зоне сдвига практически всегда имеет место изменение объема грунта (дилатансия или дилатенция). Мощность этой зоны (или полосы), измеренная в направлении, перпендикулярном поверхности сдвига, крайне незначительная и не превышает 3...10 мм.

Суть дилатансии состоит в том, что в полосе сдвига происходит изменение положения частиц грунта путем их наклона, поворота, разворота, перекатывания, скольжения и других видов переупаковки и смещения. Это приводит к тому, что в зоне сдвига изменяются объем пор и плотность скелета грунта: плотные грунты разрыхляются, увеличивая свою пористость (положительная дилатансия), а рыхлые наоборот, уплотняются, уменьшая свою пористость (отрицательная дилатансия). Деформация полурыхлых и полуплотных грунтов происходит без изменения их пористости в области сдвига и, следовательно, без возникновения дилатансии (в этом случае пористость грунта, по А.Казагранде, называется *критической*).

Изменение объема грунта в полосе сдвига длится непродолжительное время, измеряемое секундами или их долями, и приводит к появлению *дилатантного распора*  $\Delta\sigma_d$  – напряжения, присущего всем сдвигам и перпендикулярного поверхности сдвига.

Дилатантный распор  $\Delta\sigma_d$  мгновенно рассеивается в окружающем горном массиве. Зона его диссипации ( $r_d$ ) в среднем составляет 30...60 см и зависит от дисперсности и минералогического состава грунтов, их фазового состояния и алгебраической суммы дейст-

вующих нормальных напряжений  $\sum \sigma_n = \sigma^*$ , с увеличением которых величина  $\Delta\sigma_d$  уменьшается. Известны случаи, когда при вертикальных нагрузках, превышающих прочность минеральных частиц и разрушающих их ( $\sigma_0 \gg \Delta\sigma_d$ ), значения  $\Delta\sigma_d$  были нулевыми, т.е. дилатансия подавлялась полностью. В этой связи рассмотрим влияние стесненной дилатансии на сдвиговую прочность сыпучих и связных грунтов.

Плоскостные сдвиговые приборы состоят из равных по высоте и независимых друг от друга обойм, заполненных монолитом грунта: верхней (сдвигаемой) и нижней (неподвижной). Вертикальная нагрузка прикладывается к верхнему торцу грунта сдвигаемой обоймы. Перед опытом она приподнимается над нижней на 0,5...1,5 мм таким образом, чтобы исключалось образование каких-либо деформаций грунта в появившейся между ними щели, которая и принимается за плоскость или поверхность сдвига.

Высота верхней обоймы не превышает 2...5 см. Поэтому сдвигаемая часть грунта находится в области диссипации  $\Delta\sigma_d$ , под действием которых верхняя обойма как бы "дышит", но с разной амплитудой при "свободном" и стесненном сдвигах: подымается в плотных грунтах за счет увеличения их пористости в зоне сдвига ( $\Delta\sigma_d > 0$ ) и опускается в рыхлых за счет их уплотнения в зоне сдвига ( $\Delta\sigma_d < 0$ ). В итоге, благодаря рычажной системе передачи напряжений, первоначальное нормальное давление на поверхности свободного сдвига не изменяется ( $\sigma_0 = const$ ) и для оценки параметров прочности грунта применяется *естественная система координат* (ЕСК)  $\tau = f(\sigma_0)$ , отражающая в плоскости свободного сдвига реальное распределение действующих напряжений как по вертикали (алгебраическая сумма сжимающих напряжений  $\sigma_0$ ), так и по горизонтали (та же сумма сдвигающих усилий  $\tau$ ). Именно в этой системе координат Ш.О.Кулон (1776 г.) открыл законы прочности

$$\tau(\sigma_0) = (\operatorname{tg}\varphi_0)\sigma_0, \quad (1)$$

$$\tau(\sigma_0) = \tau_0 + (\operatorname{tg}\varphi_0)\sigma_0 \quad (2)$$

соответственно для сыпучих (несвязных) и связных грунтов.

Наряду с рассмотренной *теорией и методологией свободного сдвига*, основанного на рычажной, т.е. независимой, системе дейст-

вия нормальных, касательных и дилатантных напряжений, существует и интенсивно разрабатывается *теория стесненного сдвига*, при котором ограничение (или подавление) свободного рассеивания дилатантного распора  $\Delta\sigma_d$ , т.е. дилатансии, осуществляется винтовой системой (в частности домкратной), дополнительно создающей постоянное сжимающее давление  $\sigma_d = \text{const}$  на плоскости сдвига. Отсюда следует, что если свободное "дыхание" верхней обоймы прибора искусственно ограничить, то сдвиг становится стесненным и ограниченная часть дилатантного распора  $\gamma(\Delta\sigma_d)$  пойдет на приращение первоначального нормального давления  $\sigma_0$  (здесь  $\gamma = \text{const}$ ). В итоге при стесненном сдвиге эффективное сжимающее напряжение на плоскости сдвига  $\sigma^*$  будет равно алгебраической сумме действующих нормальных напряжений:  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_d$ , где  $\sigma_d$  – приращение нормального давления за счет ограничения свободного дилатантного распора усилием  $\sigma_d = \text{const}$ .

Таким образом, если при свободной дилатансии (свободном сдвиге) энергия дилатантного распора полностью расходуется на "дыхание" сдвигаемой части грунта и не влияет на величину суммарных сжимающих напряжений, равную  $\sigma_0$  ( $\sigma_d = 0$ ,  $\sigma_0 = \sigma^*$ ), то при стесненной дилатансии усилие домкрата  $\sigma_d$  идет на приращение нормального давления и суммарные сжимающие напряжения становятся равными  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_d$ . В этой связи возникает принципиальный вопрос о том, в какой системе координат –  $\tau = f(\sigma_0)$  или –  $\tau = f(\sigma^*)$  – вести обработку опытных данных по стесненной дилатансии.

Чтобы найти ответ, воспользуемся известным правилом механики: описание любого динамического процесса должно производиться в ЕСК, отражающей реальное взаимодействие сил в этом процессе, т.е. расположенные по осям координат напряжения должны максимально точно совпадать с реальными силами, действующими в направлении этих осей. В соответствии с данным правилом *диаграмма предельных сопротивлений грунтов сдвигу как при свободной, так и при стесненной дилатансии должна строиться в ЕСК*, которая имеет вид

$$\tau = f(\sigma_0) \text{ и } \tau = f(\sigma_0 + \sigma_d) = f(\sigma^*) \quad (3)$$

соответственно для свободного ( $\sigma_d=0$ ) и стесненного ( $\sigma_d>0$ ) сдвигов.

Несмотря на очевидную логичность данных рекомендаций, в работе [1] диаграмма предельных сопротивлений грунтов сдвигу при стесненной дилатансии строится в системе координат свободной дилатансии  $\tau(\sigma_0)$ , не учитывающей домкратную систему подавления ее, т.е. применяется не "своя", а "чужая", *неестественная система координат (НСК)*. В итоге несвязные грунты превращаются в связные с огромной прочностью, поскольку для сыпучих грунтов НСК дает не присущий им закон (1), а закон Кулона для связных грунтов [1]:

$$\tau_s(\sigma_0, \sigma_d) = \sigma_d (\operatorname{tg}\varphi') + (\operatorname{tg}\varphi') \sigma_0 = \tau_d + (\operatorname{tg}\varphi') \sigma_0 (\Delta\sigma_0 \geq 0), \quad (4)$$

превращая таким путем несвязный (сыпучий) грунт (1) в связный (4) с "дилатометрической связностью"

$$\tau_d = \sigma_d (\operatorname{tg}\varphi') = \operatorname{const} \quad (5)$$

и коэффициентом дилатантного (контактного) трения

$$\operatorname{tg}\varphi' = (\tau_s - \tau_d) / \sigma_0 = \tau_d / \sigma_d, \quad (6)$$

убывающим с ростом интенсивности подавления дилатансии  $\sigma_d$ . Здесь  $\tau_s$  – прочность сыпучего грунта по Соболевскому;  $\tau_d$  – "дилатометрическая связность" этого грунта, равная отрезку оси  $\tau_s$ , отсекаемому прямой (4);  $\operatorname{tg}\varphi'$  – угловой коэффициент этой прямой.

Чтобы получить объективное представление о влиянии стесненной дилатансии на прочность сыпучих грунтов, обработку опытных данных по свободному и стесненному сдвигам будем производить в ЕСК. Тогда увидим, что и при стесненной дилатансии предельные сопротивления сдвигу сыпучих грунтов  $\tau_k$  также прямо пропорциональны суммарным сжимающим напряжениям  $\sigma^*$ , т.е. подчиняются закону Кулона для этих грунтов при свободной дилатансии ("закону сухого трения Кулона") (таблица 1)

$$\tau_k(\sigma^*) = (\operatorname{tg}\varphi') \sigma^* (\sigma^* \geq \sigma_d) \quad (7)$$

без придания им "дилатометрической связности", но с изменением коэффициента внутреннего трения грунта при свободном сдвиге

$\text{tg}\varphi_0$  на коэффициент внутреннего трения этого грунта  $\text{tg}\varphi'$  в условиях стесненного сдвига:

откуда видно, что с ростом неподвижной пригрузки  $\sigma_d$  величина  $\text{tg}\varphi'$  уменьшается ( $\text{tg}\varphi' \rightarrow 0$  при  $\sigma_d \rightarrow \infty$ ) и, наоборот,  $\text{tg}\varphi' \rightarrow \text{tg}\varphi_0$  при  $\sigma_d \rightarrow 0$ , т.е. с увеличением  $\sigma_d$  прямые (7) поворачиваются относительно прямой Кулона (1) в сторону уменьшения их  $\text{tg}\varphi'$ . Так происходит потому, что в ЕСК одна и та же прочность грунта при свободном ( $\sigma_d = 0$ ) и стесненном ( $\sigma_d > 0$ ) сдвигах достигается при одинаковых величинах нормальных напряжений, если какие-либо физические силы не изменяют фазового состояния грунта.

Таблица 1 – Определение прочностных характеристик крупного сухого песка ( $d_{50} = 1,5$  мм), испытанного в условиях свободной ( $\sigma_d = 0$ ) и стесненной ( $\sigma_d = 471$  кПа) дилатансии, в различных системах координат: естественной ( $\tau(\sigma_0)$  для  $\sigma_d = 0$  и  $\tau_k(\sigma^*)$  для  $\sigma_d = 471$  кПа) и неестественной ( $\tau_s(\sigma_0)$  для  $\sigma_d = 471$  кПа). Опытные данные Д.Ю.Соболевского, 1994 г.

$\sigma_0$ кПа	$\sigma_d=0$	$\sigma_d=471$ кПа		
	$\tau(\sigma_0) = 0,97\sigma_0$ кПа	$\tau_s(\sigma_0) = 292 + 0,62\sigma_0$ кПа	$\tau_k(\sigma^*) = 0,62\sigma^*$ кПа	$\Delta\tau$ кПа
0	0	292	292	292
100	97	354	354	257
200	194	416	416	222
300	291	478	478	187
400	388	540	540	152
500	485	602	602	117
834,3	809,3	809,3	809,3	0
1000	970	912	912	- 58
2000	1940	1532	1532	- 408

$$\text{tg}\varphi' = \tau_k/\sigma^* = \tau_d/\sigma_d = 1/(\sigma_d/\tau_{0s} + 1/\text{tg}\varphi_0), \quad (8)$$

Сопоставляя (1) с (7), получаем, что поправка  $\Delta\tau$  на изменение естественной прочности сыпучих грунтов за счет подавления дилатансии в зоне сдвига (по сравнению с их кулоновской прочностью в условиях свободного сдвига) составляет:

$$\Delta\tau = \tau_k - \tau = \tau_d - (\text{tg}\varphi_0 - \text{tg}\varphi') \sigma_0. \quad (9)$$

Функция (9) представляет собой прямую с угловым коэффициентом  $-(tg\varphi_0 - tg\varphi')$  и начальными отрезками: в координатах  $\Delta\tau(\sigma_0) \rightarrow \Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma_0 = 0$  и  $\sigma_0 = \sigma_{0s}$  при  $\Delta\tau = 0$ ; в координатах  $\Delta\tau(\sigma^*) \rightarrow \Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma^* = \sigma_d$  и  $\sigma^* = \sigma_{0s} + \sigma_d$  при  $\Delta\tau = 0$ . Таким образом, с ростом  $\sigma^*$  (или  $\sigma_0$ ) прибавка прочности грунта  $\Delta\tau$  уменьшается по линейному закону от максимальной величины  $\Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma^* = \sigma_d$  (или  $\sigma_0 = 0$ ) до  $\Delta\tau = 0$  при  $\sigma^* = \sigma_{0s} + \sigma_d$  (или  $\sigma_0 = \sigma_{0s}$ ), где  $\sigma_{0s}$  и  $\tau_{0s}$  — абсцисса и ордината точки пересечения прямых (1) и (4) (при  $\sigma_0 > \sigma_{0s}$  подавление дилатансии приводит к обратному эффекту и  $\tau(\sigma_0) > \tau_s(\sigma_0)$ , см. таблицу 1). Эту закономерность изменения  $\Delta\tau$  необходимо учитывать при возникновении дополнительного сжатия грунта усилием  $\sigma_d = const$ .

Полагая, что физика стесненного сдвига сыпучих и связных грунтов идентичны, получаем диаграмму предельных сопротивлений связных грунтов стесненному сдвигу

$$\tau_k(\sigma^*) = \tau_k + (tg\varphi')\sigma^* = \tau_0(tg\varphi'/tg\varphi_0) + (tg\varphi')\sigma^*. \quad (10)$$

Таким образом, ЕСК показывает, что ограничение дилатансии не придает сыпучим грунтам никакой связности, а влияет только на их внутреннее трение, переводя угол внутреннего трения при свободной дилатансии  $\varphi_0$  в угол внутреннего трения при стесненной дилатансии  $\varphi'$ . При свободном сдвиге  $\sigma_d = 0$  и  $\varphi' = \varphi_0$ . Поэтому при различных значениях  $\sigma_d$  графики  $\tau_k(\sigma^*)$  образуют семейства прямых, исходящих из начала координат ( $\tau_k = \sigma^* = 0$ ) и располагающихся ниже прямой свободного сдвига под углами  $\varphi' < \varphi_0$ .

Вторым примером применения ЕСК для обработки опытных данных по сдвиговым деформациям может служить сдвиг водонасыщенных песков. В этом случае при наличии дренажа изменение пористости в полосе сдвига также приводит к изменению нормального давления  $\sigma_0$  на величину порового давления воды  $\sigma_w$ . В результате фактическое нормальное давление становится равным  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_w$  и закон Кулона для свободной дилатансии принимает вид закона сопротивления сдвигу для стесненной дилатансии (7):  $\tau_k = (tg\varphi')(\sigma_0 + \sigma_w) = (tg\varphi')\sigma^*$ . Отсюда следует, что сдвиговые деформации водонасыщенного песка никогда не протекают по закону свободного сдвига сыпучих грунтов, а всегда — или по закону простого стесненного сдвига, если в изменении  $\sigma_0$  принимает участие

только один фактор – поровое давление воды  $\sigma_w$ , или по закону сложного стесненного сдвига, когда изменение  $\sigma_0$  происходит за счет воздействия многих факторов: порового давления воды  $\sigma_w$ , ограничения дилатансии  $\sigma_d$  и т.д.

Данные исследования позволяют сделать следующие выводы:

В условиях свободного сдвига первоначальное нормальное давление на поверхности сдвига не изменяется ( $\sigma_0 = \text{const}$ ) и для оценки параметров прочности грунта применяется *естественная система координат (ЕСК)*  $\tau = f(\sigma_0)$ , отражающая в плоскости сдвига реальное распределение действующих напряжений как по вертикали (алгебраическая сумма сжимающих напряжений  $\sigma_0$ ), так и по горизонтали (та же сумма сдвигающих усилий  $\tau$ ). Очевидно, если хотя бы на одной из осей координат откладываются нереальные значения действующих сил, то применяется *неестественная система координат (НСК)*, которая приводит к некорректным зависимостям и выводам. Классическим примером использования НСК в механике грунтов является описание стесненного сдвига сыпучих грунтов в системе координат свободного сдвига, в результате чего сухие пески приобретают связность и становятся подобными плотным песчанникам.

Доказано, что в условиях стесненной дилатансии при использовании  $\sigma^*$  мы "работаем" в ЕСК  $\tau_k = f(\sigma^*)$  и получаем достоверные результаты, а применение  $\sigma_0$  приводит к НСК и соответственно к ошибочным заключениям.

Анализ стесненного сдвига сыпучих грунтов в ЕСК  $\tau_k = f(\sigma^*)$  показал, что и при ограниченной дилатансии сопротивление сдвигу этих грунтов подчиняется закону сухого трения Кулона для свободной дилатансии, т.е. и здесь предельные сопротивления стесненному сдвигу  $\tau_k$  прямо пропорциональны суммарным сжимающим давлениям  $\sigma^*$ :  $\tau_k = (\text{tg}\varphi')\sigma^*$ , где численно  $\text{tg}\varphi' = \tau_k$  при  $\sigma^* = 1$ . Это значит, что ограничение дилатансии не придает сыпучим грунтам никакой (и прежде всего "дилатометрической") связности, а сказывается только на их внутреннем трении, изменяя прочность на величину  $\Delta\tau$ .

Сдвиговые деформации геоснований в условиях стесненной дилатансии происходят в двух случаях: при возникновении интерференции зон влияния дилатантного распора  $r_d$  (например, когда забивные сваи располагаются густо, т.е. на расстояниях  $L \leq 2r_d$ ) и

при наличии в этих зонах неподвижных преград (скальных пород, бетонных стенок и т.д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта: автореф... дис. д-ра техн. наук. – Минск, 1998. – 35 с.

УДК 628.3

А.Г. Воронин (БНТУ)

### **ТЕХНОЛОГИЯ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТОВ ОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Общей характерной особенностью сточных вод предприятий мясомолочной промышленности, таких как мясокомбинаты и мясоперерабатывающие заводы, является высокая концентрация жировых загрязнений, в пределах 200-1500 мг/л, значительная часть которых (до 300 -500 мг/л) содержится в виде чрезвычайно стабильных эмульсий и коллоидных растворов. Кроме того, сточные воды этих предприятий являются основным источником фосфора, в значительной степени способствуя эвтрофикации водоемов, тем самым ухудшая экологическую обстановку в отдельных регионах республики. Поэтому повышение эффективности очистки высококонцентрированных сточных вод мясокомбинатов является одной из наиболее актуальных задач охраны водоемов от загрязнения.

Технология и сооружения, используемые для очистки этих сточных вод, к настоящему времени морально и физически устарели и не позволяют обеспечить необходимую эффективность очистки не только при сбросе очищенных стоков в открытые водоемы, но даже и при их сбросе в городскую канализацию.

Для достижения нормативных показателей приема в городскую канализацию уже недостаточно будет только извлечения жира и неполной биологической очистки сточных вод. Современные технологии должны обеспечивать также и соответствующее уменьше-