

## СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ГРУНТА, АРМИРОВАННОГО ОБЪЕМНОЙ ГЕОРЕШЕТКОЙ

*Канд. техн. наук, доц. ЛЫЩИК П. А., канд. техн. наук МАКАРЕВИЧ С. С.,  
асп. КРАСКОВСКИЙ С. В.*

*Белорусский государственный технологический университет*

Современное дорожное строительство базируется на использовании новых материалов для улучшения технического и эксплуатационного состояния дорог. Одним из способов усиления дорожных конструкций является применение геосинтетики в виде плоских прослоек и объемных георешеток [1, 2]. Имеющиеся расчеты [3] позволяют сделать вывод о том, что применение объемных георешеток в дорожном строительстве с целью увеличения жесткости дорожной конструкции дает незначительный эффект. Однако технология лесозаготовок, определяющая использование в большом количестве гравийных и грунтовых дорог, требует разработки способов для их усиления (армирования). Наиболее рациональным является применение георешеток с целью увеличения сдвиговой прочности.

Как показали расчеты [4], при современных нагрузках от колес грузовых автомобилей в грунтовых и гравийных дорогах на небольшой глубине напряжения достигают предельного значения, в результате чего появляются сдвиги (скольжения) одних масс грунта относительно других. Это приводит к интенсивному накоплению остаточных деформаций и способствует образованию глубокой колеи. Для устранения этого явления рекомендуется применять георешетки, закладывая их на глубине, соответствующей предельным сдвигающим напряжениям и определяемой с использованием теории Мора – Кулона.

**Влияние георешетки на сдвиговую прочность композита «грунт – георешетка».** Из существующих теорий прочности к грунтам, работающим, как правило, в условиях сжатия, наиболее применима теория прочности Мора

[5]. Предельное состояние грунта согласно теории Мора запишется в следующем виде:

$$\tau_r = f(\sigma_r),$$

где  $\tau_r$ ,  $\sigma_r$  – касательные и нормальные предельные напряжения.

Существуют различные мнения о характере приведенной выше зависимости. Однако считается допустимым для практических расчетов записывать эту зависимость, используя закон Кулона [5]:

$$\tau_r = c + \sigma_r \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $c$  и  $\varphi$  – расчетные параметры, определяющие общее сопротивление сдвигу грунта и условно называемые:  $c$  – сцеплением и  $\varphi$  – углом внутреннего трения;  $\operatorname{tg} \varphi = f$  – коэффициент внутреннего трения.

В [6] показано, что для неконсолидированного состояния полностью водонасыщенных связных грунтов, т. е. когда полного уплотнения от данной нагрузки еще не достигнуто, условие (1) будет аналогичным, только значения параметров  $c$  и  $\varphi$  будут определяться для конкретного состояния грунта. Поскольку грунт в течение годового цикла находится в различных состояниях увлажнения и уплотнения, его сопротивление сдвигу не является постоянной величиной. Поэтому параметры  $c$  и  $\varphi$  принимаются в зависимости от расчетной влажности грунта и суммарного числа приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной конструкции [7].

Согласно [6, 8], если рассматривать предельное сопротивление сдвигу грунтов в большом диапазоне изменения уплотняющих давлений и различных напряженных состояниях,

огibaющая кругов предельных напряжений Мора в общем случае будет криволинейной. Но при небольших значениях давлений ( $\sigma < \sigma_\phi = 0,5-0,7$  МПа) часть огibaющей кривой предельных напряжений можно аппроксимировать прямой (отрезок  $ab$  на рис. 1), т. е. до давлений  $\sigma < \sigma_\phi$  будет полностью справедлив закон Кулона (1).

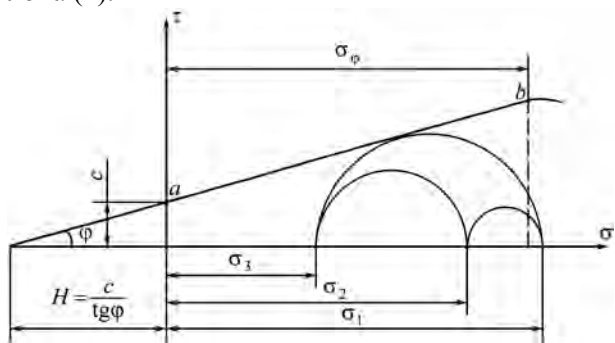


Рис. 1. Диаграмма Мора для предельных напряжений

Для спрямленной диаграммы  $c$  формально равно предельному напряжению сдвига  $\tau_0$  при отсутствии сжимающего напряжения.

Использование георешетки позволяет увеличить сцепление, т. е. параметр  $c$ , а следовательно, и предельное сопротивление сдвигу.

Объемная георешетка состоит из полимерных лент, которые через определенные промежутки соединены между собой с помощью сварных швов таким образом, что при растяжении в поперечном направлении они образуют сотовую структуру. Ячейки этой сотовой структуры имеют форму, состоящую из прямолинейных и небольших криволинейных участков. Эта форма близка к ромбической. Поэтому в первом приближении в качестве расчетной схемы реальной ячейки георешетки примем ячейку в виде ромба. При заполнении ячейки грунтом образуется композит из грунта и материала георешетки.

Рассмотрим слой грунта толщиной  $h$ , армированного георешеткой (рис. 2а).

Выделим из полученного композита характерный повторяющийся элемент  $ABCD$  георешетки со слоем грунта (рис. 2б) и определим предельное сопротивление сдвигу выделенного элемента.

Сила сдвига, воспринимаемая грунтом в предельном состоянии, определяется по зависимости

$$T_r = \tau_r A_r, \tag{2}$$

где  $A_r$  – площадь среза грунта в пределах выделенного элемента.

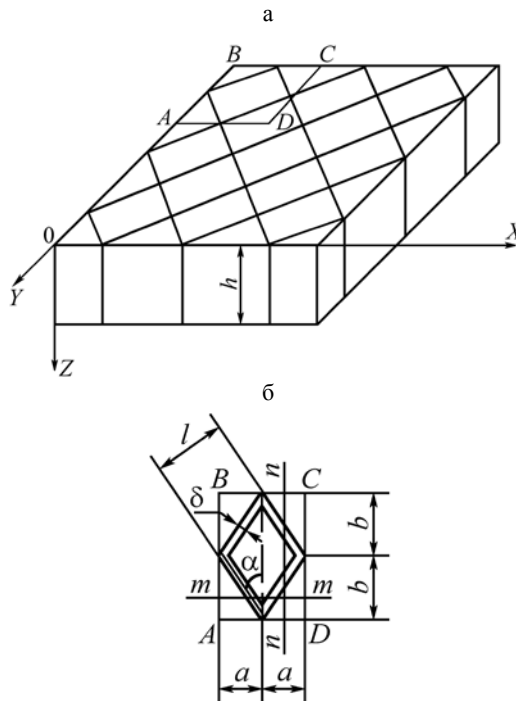


Рис. 2. Объемная георешетка: а – слой грунта, армированный георешеткой; б – характерный повторяющийся элемент композита «грунт – георешетка»

Сила сдвига, воспринимаемая георешеткой в предельном состоянии, определяется по следующей зависимости:

$$T_p = \tau_p A_p, \tag{3}$$

где  $\tau_p$  – предельное сопротивление сдвигу материала георешетки;  $A_p$  – площадь среза георешетки в пределах выделенного элемента.

Предельное сопротивление сдвигу композита, т. е. грунта, армированного георешеткой, будет равно

$$\tau_k = \frac{T_r + T_p}{A_k} = \frac{\tau_r A_r + \tau_p A_p}{A_k}, \tag{4}$$

где  $A_k$  – площадь среза композита в рассматриваемом направлении.

С учетом (1) выражение (4) можно записать в виде

$$\tau_k = \frac{(c + f \sigma_r) A_r + \tau_p A_p}{A_k}. \tag{5}$$

При  $\sigma = 0$  получим параметр  $c_0$ , характеризующий сцепление в композите:

$$\tau_{\kappa 0} = \frac{cA_r + \tau_p A_p}{A_k} = c_0. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), получим выражение для предельного сопротивления сдвигу грунта, армированного георешеткой:

$$\tau_{\kappa} = c_0 + f_0 \sigma_r, \quad (7)$$

где  $f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0 = f \frac{A_r}{A_k}$  – коэффициент внутреннего трения композита.

Если учесть, что  $A_r = A_k - A_p$ , то выражения для параметров  $c_0$  и  $f_0$  примут вид:

$$c_0 = c + k(\tau_p - c); \quad f_0 = f(1 - k), \quad (8)$$

где  $k = \frac{A_p}{A_k}$  – коэффициент армирования.

Определив  $c_0$  и  $f_0$ , можно построить диаграмму предельных сопротивлений сдвигу грунта, армированного георешеткой (рис. 3).

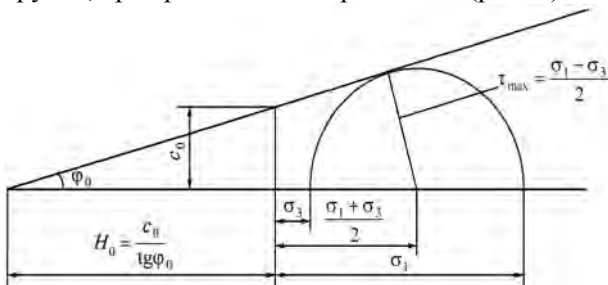


Рис. 3. Диаграмма предельных сопротивлений сдвигу грунта, армированного объемной георешеткой

Рассмотрим более детально сдвиг композита «грунт – георешетка» в направлениях, параллельных граням выделенного элемента  $ABCD$ , т. е. в плоскостях  $XOY$ ,  $XOZ$  и  $YOZ$ . Для этого определим коэффициент армирования в каждой плоскости.

Плоскость  $XOY$ :  $A_k = 4ab$ ,  $A_p = 4\delta l$ ,

$$k = \frac{A_p}{A_k} = \frac{\delta l}{ab}.$$

Плоскость  $XOZ$  (сечение  $m-m$ ):  $A_k = 2ah$ ,

$$A_p = 2 \frac{\delta h}{\cos \alpha}, \quad k = \frac{A_p}{A_k} = \frac{\delta}{a \cos \alpha} = \frac{\delta l}{ab}.$$

Плоскость  $YOZ$  (сечение  $n-n$ ):  $A_k = 2bh$ ,

$$A_p = 2 \frac{\delta h}{\sin \alpha}, \quad k = \frac{A_p}{A_k} = \frac{\delta}{b \sin \alpha} = \frac{\delta l}{ab}.$$

Таким образом, коэффициент армирования во всех сечениях одинаков. Следовательно, предельное сопротивление композита «грунт – георешетка» одинаково во всех направлениях и будет определяться диаграммой, показанной на рис. 3, а также формулами (7) и (8) с учетом коэффициента армирования  $k = \frac{\delta l}{ab}$ . Коэффициент армирования характеризует также расход материала георешетки. Если используется четырехгранная георешетка с заданной толщиной ребра  $\delta$  и длиной грани  $l$ , то коэффициент армирования зависит только от угла  $\alpha$  (рис. 2б). Учитывая, что размеры выделенного элемента  $a = l \sin \alpha$  и  $b = l \cos \alpha$ , коэффициент армирования можно записать как функцию угла  $\alpha$

$$k = \frac{\delta l}{ab} = \frac{\delta}{l \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{2\delta}{l \sin 2\alpha} = \eta \frac{\delta}{l}, \quad (9)$$

где  $\eta = \frac{2}{\sin 2\alpha}$ .

В табл. 1 приведены численные значения  $\eta$  для разных углов  $\alpha$ .

Таблица 1

Значения коэффициента  $\eta$

$\alpha$ , град	10	20	30	40	45
$\eta$	5,85	3,11	2,31	2,03	2,00

Как видно из табл. 1, значение коэффициента  $\eta$ , а следовательно, и коэффициента армирования  $k$  будет минимальным для квадратной георешетки.

Коэффициент армирования выбирается исходя из условия прочности композита сдвигу при конкретных условиях нагружения. В случае сложного напряженного состояния для оценки предельного сопротивления сдвигу композита «грунт – георешетка» можно использовать, как и для неармированного грунта [6], теорию Мора – Кулона. В данном случае она примет вид

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2H_0} = \sin \varphi_0. \quad (10)$$

В выражении (10) главные сжимающие напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  приняты положительными, причем  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

$$\text{С учетом того, что } H_0 = \frac{c_0}{\text{tg}\varphi_0} = \frac{c_0}{f_0}, \sin\varphi_0 = \frac{\text{tg}\varphi_0}{\sqrt{1+\text{tg}^2\varphi_0}} = \frac{f_0}{\sqrt{1+f_0^2}}, \text{ а также зависимости (8)}$$

уравнение (10) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \frac{c+k(\tau_p-c)}{f(1-k)}} = \frac{f(1-k)}{\sqrt{1+f^2(1-k)^2}},$$

или после преобразования

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1+f^2(1-k)^2} &= \\ = f(\sigma_1 + \sigma_3)(1-k) + 2(c+k(\tau_p-c)). \end{aligned}$$

Если необходимо, чтобы слой грунта, армированный георешеткой, работал с коэффициентом запаса  $\chi_0$ , то последнее выражение будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \chi_0(\sigma_1 - \sigma_3)\sqrt{1+f^2(1-k)^2} &= \\ = f(\sigma_1 + \sigma_3)(1-k) + 2(c+k(\tau_p-c)). \end{aligned} \quad (11)$$

При известных параметрах грунта  $c, f$  и предельном сопротивлении материала георешетки  $\tau_p$ , а также величин главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  в опасной точке можно из (11) определить необходимый коэффициент армирования  $k$ , чтобы композит работал с запасом  $\chi_0$ .

Если коэффициент армирования  $k$  оказался меньше минимального при заданных размерах георешетки  $\delta$  и  $l$ , то георешетку следует принять квадратной; если  $k$  больше минимального, то георешетку следует принять ромбической, определив угол  $\alpha$  из уравнения (9). Коэффициент армирования  $k$  можно также регулировать основными размерами георешетки – толщиной ребра  $\delta$  и длиной  $l$ .

При  $k \leq 0$  рассматриваемый слой грунта удовлетворяет условию прочности в неармированном состоянии, поэтому применять георешетку для его усиления не требуется.

## ВЫВОД

Слой грунта, армированный объемной георешеткой, звенья которой можно схематизировать четырехугольниками, имеет одинаковое сопротивление сдвигу во всех направлениях. Диаграмма предельных сопротивлений сдвигу такого слоя будет аналогична диаграмме предельных сопротивлений сдвигу неармированного грунта, но с другими параметрами, характеризующими сцепление и внутреннее трение.

Для оценки предельного сопротивления сдвигу грунта, армированного георешеткой, можно использовать теорию Мора – Кулона с учетом новых параметров  $c_0$  и  $f_0$ , характеризующих сопротивление сдвигу композита. Влияние георешетки на прочность армированного слоя оценивается коэффициентом армирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Применение** геосинтетических и геопластиковых материалов при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог: труды СоюздорНИИ / Гос. доп. науч.-иссл. ин-т «СоюздорНИИ». – М., 2001. – Вып. 201. – 162 с.
2. **Применение** геосинтетики и геопластиков при строительстве и ремонте автомобильных дорог: труды СоюздорНИИ / Гос. доп. науч.-иссл. ин-т «СоюздорНИИ». – М., 1998. – Вып. 196. – 135 с.
3. **Немировский, Ю. В.** Построение расчетной модели грунта, армированного объемной георешеткой / Ю. В. Немировский, С. А. Матвеев // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 9. – С. 95–101.
4. **Лыщик, П. А.** Исследование напряженного состояния в грунтовой дороге под воздействием колес лесовозного автопоезда / П. А. Лыщик, С. С. Макаревич, С. В. Красковский // Труды БГТУ. Сер. II: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2006. – Вып. XIV. – С. 56–58.
5. **Конструирование** и расчет нежестких дорожных одежд / под ред. Н. Н. Иванова. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
6. **Цытович, Н. А.** Механика грунтов (краткий курс): учеб. для строит. вузов / Н. А. Цытович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983. – 288 с.
7. **Проектирование** нежестких дорожных одежд: ОДН 218.046-01. – М.: Гос. служба доп. хозяйства Мин-ва транспорта РФ, 2001. – 145 с.
8. **Вялов, С. С.** Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строит. вузов / С. С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.

Поступила 28.12.2006