

УДК 630*383:625.7/.8

С. В. Красковский, канд. техн. наук, ассистент (БГТУ);

П. А. Лыщик, канд. техн. наук, доцент (БГТУ)

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УПРОЧНЕННЫХ ОБЪЕМНЫМИ ГЕОРЕШЕТКАМИ

Дана краткая характеристика существующей нормативно-технической базы в области проектирования и расчета дорожных конструкций, упрочненных объемными георешетками. Рассмотрены современные методы расчета упрочненных дорожных конструкций. Показана область возможного применения методов, приведены их основные недостатки. Отмечена необходимость разработки методов, позволяющих более полно учитывать реальные условия работы упрочненных дорожных конструкций.

The short characteristic of existing normative and technical base in the field of designing and calculation of the road designs strengthened by solid geolattices is given. Modern methods of calculation of the strengthened road designs are considered. The area of possible application of methods is shown, their basic lacks are resulted. Necessity of working out of the methods allowing more full to consider a real working condition of strengthened road designs is noted.

Введение. Применение объемных георешеток в качестве упрочняющих элементов в отечественной практике дорожного строительства началось с середины 90-х годов XX-го века и является перспективным направлением в области совершенствования конструктивных элементов, технологий строительства дорожных конструкций.

Однако существующая нормативно-техническая база по применению объемных георешеток (далее – георешеток) в дорожном строительстве создается очень медленно. Накопленный практический опыт по упрочнению конструктивных слоев земляного полотна и дорожной одежды опережает теоретические исследования в этой области.

Между тем проектирование и расчет дорожных конструкций с упрочняющим материалом (георешеткой) отличается от традиционного проектирования и представляет довольно сложную задачу. В данной статье рассмотрены наиболее известные из существующих методы расчета упрочненных дорожных конструкций.

Основная часть. Первый метод был разработан Ассоциацией американских инженеров (AASHTO) для расчета дорожных одежд, состоящих из георешеток «Геовеб» с зернистым заполнителем, основанный на эмпирических зависимостях [1]. Согласно этому методу расчета, полиэтиленовые полосы георешетки с текстурированной поверхностью создают трение между стенками ячеек и заполнителем. Вертикальные напряжения передаются стенкам ячеек, что увеличивает сопротивление вертикальным перемещениям заполнителя относительно георешетки.

Расчетами установлено, что при определенных сочетаниях колесных нагрузок и сдвиговых характеристик заполнителя трение с поверхностью стенок позволяет уменьшить общую

толщину дорожной одежды [1]. За характеристику сопротивления грунта нагрузкам было принято калифорнийское число прочности (CBR), выражаемое через отношение нагрузки в фунтах к площади в квадратных дюймах.

При этом общая толщина упрочненного слоя h_y (м) определяется по формуле [1]

$$h_y = R \left(\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_p}{p}\right)^{2/3} - 1}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где R – радиус площадки загрузки (штампа), м; σ_p – расчетное допустимое напряжение в слое с георешеткой, МПа; p – давление в шинах, МПа.

Недостатком данного метода расчета является то, что в основу эмпирических зависимостей заложены характеристики, не применяемые в отечественной практике расчета (число прочности CBR). К тому же в нем неполно отражен механизм работы композита «заполнитель – георешетка»: учитывается только трение заполнителя о стенки георешетки. Однако очевидно, что увеличение прочности слоя заключается в следующем. Стенки георешетки ограничивают горизонтальные смещения (деформации) под действием колесной нагрузки, результатом чего является более высокие прочностные характеристики упрочненного слоя.

Второй метод разработан Центральным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ЦНИИС) для расчета дорожных конструкций, устраиваемых при низкой интенсивности движения на участках со слабой несущей способностью грунтов [2]. Нежесткую дорожную одежду рассчитывают методом приведения многослойной упругой конструкции к эквивалентной двухслойной модели. Расчетными

характеристиками слоев являются толщина h , коэффициент Пуассона μ , модуль упругости E .

Эффект упрочнения дорожной одежды оценивают увеличением модуля упругости. Модуль упругости упрочненного слоя E_y (МПа) определяют по эмпирической зависимости [2]

$$E_y = k_y E_r, \quad (2)$$

где k_y – коэффициент увеличения модуля упругости упрочненного слоя; E_r – модуль упругости неупрочненного слоя (грунта), МПа.

Коэффициент k_y определяют по результатам штамповых испытаний неупрочненных и упрочненных георешеткой слоев дорожной одежды; для некоторых видов дорожных одежд были получены численные значения k_y [2].

Таким образом, данный метод расчета основан только на эмпирических зависимостях. Это является его недостатком, поскольку необходимость устройства в начале опытного участка и только потом выполнение оценки влияния георешетки на прочность упрочненного слоя достаточно трудоемки и требуют дополнительных затрат. К минусам отнесем и отсутствие теоретической зависимости для определения упрочняющего эффекта, поскольку при хорошей сходимости результатов теоретических и практических исследований надобность в последних минимальна.

Метод расчета Шуваева А. Н. и др. [3, 4] основан на следующем предположении. В случае распределения вертикальной нагрузки на несколько рядом расположенных ячеек георешетки стенки смежных ячеек, по крайней мере, в центре нагруженной области, не испытывают одностороннего бокового давления и работают только на растяжение. Поэтому в первом приближении в качестве расчетной схемы реальной ячейки была принята цилиндрическая оболочка равного с ячейкой объема и равной высоты, заполненная тем же материалом и обеспечивающая такую же величину осадки, как и реальная конструкция (рис. 1).

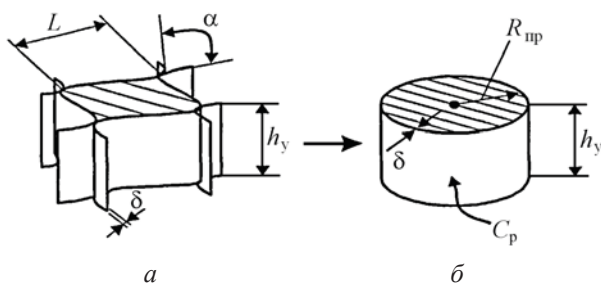


Рис. 1. Переход от реальной ячейки (а) к расчетной схеме (б):

h_y – высота ячейки; L – размер ячейки; δ – толщина стенки; $R_{np} = L(\sin \alpha / \pi)^{0.5}$; C_p – эквивалент модуля упругости цилиндрической оболочки

Для такой расчетной схемы рассматривалась задача плоской деформации идеально-упругого однородного и изотропного цилиндра, заключенного в расчетную оболочку и установленного на бесконечно жестком идеально гладком основании. Отношение величины осадки неупрочненного слоя заполнителя dh_r (м) к осадке упрочненного слоя с георешеткой dh_y (м) названо эффектом армирования k_a , который определяется по формуле [3]

$$k_a = \frac{dh_r}{dh_y} = \frac{1}{1 - \mu^2 / \left(\frac{E_r R_{np}}{E_p \delta} + 1 - \mu \right)}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала заполнителя; R_{np} – приведенный радиус ячейки, м; E_p – постоянная характеристика георешетки (модуль упругости), зависящая только от физико-механических свойств материала георешетки, МПа; δ – толщина стенки (ребра) георешетки, м.

Отмечается, что эффект армирования растет при увеличении μ и E_p , уменьшении E_r и R_{np} .

Величина k_a по существу является коэффициентом увеличения модуля упругости упрочненного слоя E_y и используется для вычисления эффективного модуля упругости $E_{эф}$ (МПа), отражающего работу композита «грунт – георешетка», т. е.

$$E_{эф} = k_a E_r. \quad (4)$$

По расчетам [4], максимальный возможный эффект упрочнения дорожных одежд георешетками для водонасыщенных грунтов при $\mu = 0,5$ может достигать 100%, что равносильно двукратному увеличению модуля упругости слоя при его упрочнении георешетками. Величина предельного эффекта упрочнения соответствует случаю, когда оболочка изготовлена из квази недеформируемого материала и установлена на достаточно жесткое неподвижное основание.

Данный метод расчета позволяет учесть как свойства заполнителя (E_r и μ), так и свойства георешетки (E_p , размеры ячейки и толщина ребра). Подтверждено влияние размеров ячеек георешетки на эффект армирования и отсутствие зависимости между ним и толщиной упрочненного слоя. Результаты расчета эффекта армирования дают приемлемые значения. Однако в расчетах не учтены угол внутреннего трения и сцепление заполнителя, в значительной мере характеризующие прочность грунтов, песчано-гравийных (щебеночных) смесей, что ограничивает область применения этой теории.

Отметим также, что в расчетах сначала использовались нормативные значения коэффициента Пуассона (например, для щебня принимали $\mu = 0,27$, для суглинка – $0,38$), что привело

к значительной (в несколько раз) разбежке между теоретическими и экспериментальными значениями k_a .

Для сопоставления была решена обратная задача, результатом которой стали значения так называемого «фактического» коэффициента Пуассона: для щебня $\mu_{\text{факт}} = 0,556$, для суглинка $\mu_{\text{факт}} = 0,52$, что превышает максимально возможное теоретическое значение $\mu = 0,5$. При этом слой заполнителя рассматривался как среда сложной физической структуры, где энергия деформации может расходоваться на перекомпоновку частиц среды [4]. Возможно, данное утверждение имеет смысл, но не совсем соответствует основным принципам теории упругости, в рамках которой разработан рассматриваемый метод расчета.

Предложенный Пшеничниковой Е. С. и Хусаиновым И. Ж. метод расчета модуля упругости дорожной одежды, включающей георешетку, основан на следующих предпосылках [5]:

- георешетка с заполнителем расположена на упругом изотропном полупространстве;

- георешетка с заполнителем работает на растяжение, при этом стенки георешетки не работают на изгиб (изгибная жесткость стенки георешетки настолько мала, что ей можно пренебречь). Георешетку можно представить как растянутую мембрану, работающую только на растяжение;

- на георешетку действует сила трения, возникающая от сопротивления движению заполнителя по основанию при растяжении георешетки. Область, в пределах которой действует сила трения, названа активной зоной.

Силу давления штампа $q_{\text{ш}}$ (Н) с учетом условия равновесия штампа под нагрузкой и силы натяжения стенок георешетки определяли так:

$$q_{\text{ш}} = \pi E_{\text{г}} l_y R / 2 + N, \quad (5)$$

где l_y – упругое перемещение штампа на упругом слое под нагрузкой, м; N – сила натяжения стенок георешетки под нагрузкой, Н.

С учетом площади активной зоны, равной $4(R_{\text{акт}}^2 - R^2)$, можно записать

$$N = 4(R_{\text{акт}}^2 - R^2)(\gamma h_y \text{tg}\varphi + c), \quad (6)$$

где $R_{\text{акт}}$ – радиус активной зоны действия нагрузки, м; γ – удельный вес грунта (заполнителя), Н/м³; φ – угол внутреннего трения грунта, град.; c – сцепление грунта, МПа.

Результатом совместного решения выражений (5) и (6) относительно l_y является формула для расчета упругого перемещения штампа:

$$l_y = A \pm \sqrt{A^2 - B}, \quad (7)$$

где A , B – параметры, определяемые аналитически, с размерностью соответственно метр и метр квадратный.

Таким образом, модуль упругости упрочненного слоя можно найти по формуле

$$E_y = q_{\text{ш}} / (2Rl_y). \quad (8)$$

Данный метод расчета позволяет учесть важнейшие характеристики сопротивляемости грунта сдвигу (его φ и c) и условия нагружения. Вместе с тем неясно, какой принимать величину активной зоны, сложность представляет определение параметров A , B . Не приняты во внимание характеристики самой георешетки – размеры ячейки, толщина стенки ребра, прочность материала георешетки и форма ячеек в плане, которые наряду с характеристиками грунта оказывают большое влияние на эффект упрочнения.

Общим свойством, присущим описанным выше методам расчета, является их незавершенность и некоторая узконаправленность. В частности, расчеты сводились лишь к определению эффекта упрочнения или армирования (модуля упругости упрочненного слоя), недостаточно полно исследовалось напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции с георешеткой. В одних случаях не принимались во внимание характеристики георешетки, в других учитывались не все прочностные характеристики грунта. Неизученным остался вопрос о величинах угла внутреннего трения и сцепления упрочненного слоя грунта.

Матвеевым С. А. (совместно с Немировским Ю. В.) было предложено учесть влияние геометрических параметров георешетки на упругие характеристики композита «грунт – георешетка» при заданном объеме упрочняющего материала [6].

Наряду с модулем упругости георешетки E_p в расчеты входит также и коэффициент Пуассона материала георешетки μ_p . При этом для определения упругих характеристик слоя, упрочненного ромбической (прямоугольной) георешеткой, в качестве повторяющегося элемента выделялась одна сторона ромба (прямоугольника) с прилегающим к ней грунтом, а не призма, заполненная грунтом. Это дало несколько завышенные значения модулей упругости упрочненного грунта в поперечном направлении.

Для оценки влияния упрочнения на упругие характеристики грунта предложено вычислять в процентном отношении изменение модулей упругости композита «грунт – георешетка» в сравнении с соответствующими упругими характеристиками неупрочненного грунта по формуле [6]

$$k_{ij} = (A_{ij} - B_{ij}) / B_{ij}, \quad (9)$$

где k_{ij} – эффект армирования для компоненты A_{ij} (МПа) матрицы A упругих постоянных упрочненного слоя; B_{ij} – соответствующая компонента матрицы B упругих постоянных неупрочненного слоя, МПа.

Отметим, что параметр k_{ij} по своей сути соответствует коэффициентам k_y и k_a .

Для грунта и георешетки «Геовиб» с ячейками различной конфигурации были проведены численные теоретические расчеты. Их результаты хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований Матвеева С. А. При этом подтверждено влияние геометрических параметров георешетки на эффект армирования и доказано, что наибольший эффект армирования, в том числе и эффект по снижению прогиба, достигается на грунтах с низкой несущей способностью [6]. Поэтому данный метод расчета можно считать наиболее полным и завершенным из всех вышеизложенных.

Тем не менее применять метод Матвеева С. А., например, для расчета лесных дорог из грунтов, песчано-гравийных (щебеночных) смесей представляется не совсем целесообразным, поскольку неучтенными остаются угол внутреннего трения и сцепление грунта.

Метод расчета, суть которого изложена в работах [7, 8], позволяет учесть указанные прочностные характеристики грунта. Согласно этому методу, при заполнении ячеек георешеток грунтом образуется композит «грунт – георешетка» с характерным повторяющимся элементом $ABCD$ (рис. 2).

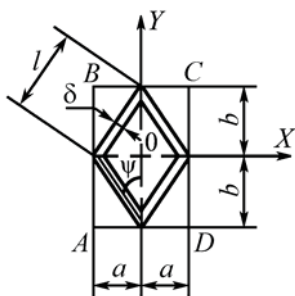


Рис. 2. Повторяющийся элемент композита «грунт – георешетка»

Сдвиговую прочность композита характеризуют сцепление c_0 и коэффициент внутреннего трения композита f_0 , определяемые по формулам [7]:

$$\tilde{n}_0 = \tilde{n} + k(\tau_\delta - \tilde{n}); \quad f_0 = f(1 - k), \quad (10)$$

где $k = \delta l / ab$ – коэффициент армирования; τ_p – предельное сопротивление сдвигу материала георешетки, МПа; $f = \operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения грунта.

Также были получены зависимости для определения модуля упругости композита в различных направлениях [8]:

в направлении оси Z , перпендикулярной плоскости XOY ,

$$E_z = E_r + k(E_p - E_r); \quad (11)$$

в направлении оси Y

$$E_y = E_r / C_y + \delta(E_p - E_r / C_y) \cos \psi / a, \quad (12)$$

$$C_y = 1 - \delta(1 - E_r / E_p) \sin \psi / b; \quad (13)$$

в направлении оси X

$$E_x = E_r / C_x + \delta(E_p - E_r / C_x) \sin \psi / b, \quad (14)$$

$$C_x = 1 - \delta(1 - E_r / E_p) \cos \psi / a. \quad (15)$$

В расчетах при этом исходили из теории армированных материалов и допускали, что грунт и материал георешетки являются линейно-упругими материалами.

Данный метод обладает некоторой ограниченностью, т. к. рассматривалась ячейка георешетки только ромбовидной формы. В дальнейшем необходимо провести вычисления также и для ячеек другой геометрической конфигурации.

Заключение. В статье проведен анализ существующих методов расчета дорожных конструкций, упрочненных георешетками. Приведена область применения и указаны недостатки методов. Отмечена необходимость совершенствования методов расчета, всесторонней оценки влияния параметров георешеток и свойств грунта (заполнителя) на прочностные характеристики упрочненных дорожных конструкций.

Литература

1. Несущая система «Геовиб»: Технический обзор / М. М. Азарх [и др.]. – М.: Престо-Русь, 2002. – 24 с.
2. Применение синтетических материалов при устройстве нежестких одежд автомобильных дорог: ВСН: утв. 26 ЦНИИ МО РФ 17.02.95. – М.: 26 ЦНИИ МО РФ, 1995. – 44 с.
3. Расчет дорожных одежд, армированных объемными георешетками / А. Н. Шуваев [и др.] // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2003. – № 3. – С. 18–20.
4. Санников, С. П. Армирование несущих слоев из грунтов и каменных материалов объемными георешетками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02, 05.23.11 / С. П. Санников. – Тюмень, 2004. – 157 л.
5. Пшеничникова, Е. С. Расчет нежесткой дорожной одежды, армированной объемной

георешеткой / Е. С. Пшеничникова, И. Ж. Хусаинов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2006. – № 4. – С. 21–23.

6. Матвеев, С. А. Моделирование и расчет армированных многослойных плит на упругом основании: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.17, 05.23.11 / С. А. Матвеев; Томский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Томск, 2006. – 34 с.

7. Лыщик, П. А. Сопротивление сдвигу грунта, армированного объемной георешет-

кой / П. А. Лыщик, С. С. Макаревич, С. В. Красковский // Вестник БНТУ. – 2007. – № 4. – С. 5–8.

8. Лыщик, П. А. Определение модулей упругости грунта, армированного объемной георешеткой / П. А. Лыщик, С. С. Макаревич, С. В. Красковский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 113–116.

Поступила 01.04.2010