

Ю. В. Немировский^{1, 2}

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГЕОВЕББЕТОННЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ВОЗДУШНЫХ ЭСТАКАДНЫХ ДОРОГ

¹Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Применительно к мостовым и эстакадным сооружениям коробчатых и широкополых тавровых сечений разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций армированных геовебом. Структура армирования геовебом в различных частях конструкции может быть различной.

Ключевые слова: бетонные балки, армирование геовебом, коробчатые, тавровые сечения, напряжения, деформации, перемещения, сложный продольно-поперечных изгиб.

УДК: 539.3

Опыт успешного применения геосинтетических материалов в строительной практике насчитывает уже более чем полувековой срок [1]-[5]. Такие материалы используются для армирования дорожных конструкций, усиления грунтов земляного полотна и оснований дорожных одежд, при устройстве подпорных стенок, для предотвращения оползней, обеспечения дренажа и укрепления откосов. Применение геосинтетики при проектировании, строительстве, реконструкции, ремонте и эксплуатации автомобильных дорог и других транспортных коммуникаций позволяет компенсировать недостатки грунтов и дорожно-строительных материалов, повысить их физико-механические свойства и в ряде случаев привести к созданию совершенно новых материалов и несущих конструктивных элементов. В последние годы в связи с намечающимися планами освоение Северо-Восточной и Приполярных регионов нашей страны обсуждаются серьезные проблемы оперативного создания надежных и долговечных транспортных

© Немировский Ю. В., 2017

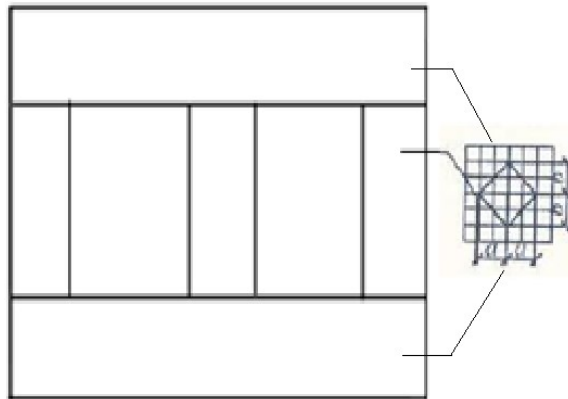
Немировский Юрий Владимирович

e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, доктор физико-математических наук, профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

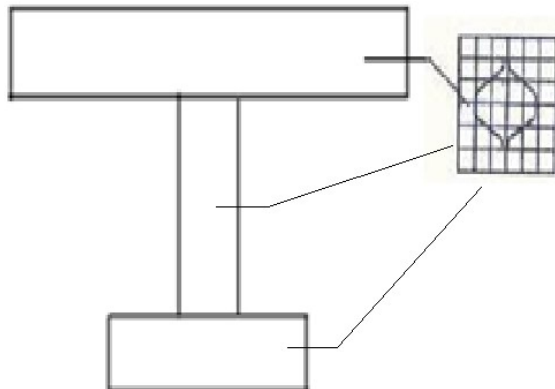
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №17-41-210272).

Поступила 10.07.2017

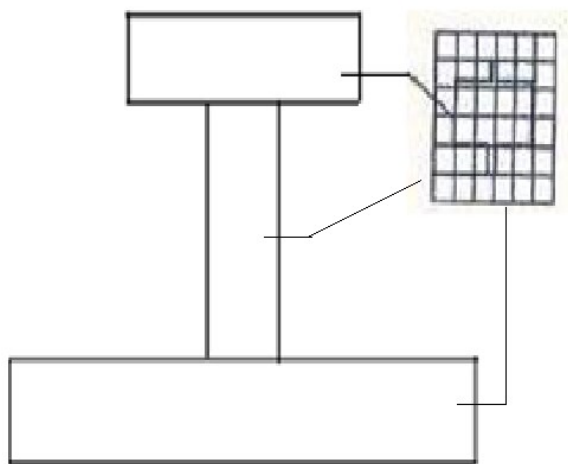
магистралей для этих районов. Вследствие массивной заболоченности рассматриваемых регионов и слабости грунтовых оснований традиционные методы строительства протяженных транспортных магистралей оказывается экономически и практически мало пригодными. Одним из возможных способов решения проблемы могло бы выступить создание протяженных воздушных из геовибетонных сооружений на колоннадных геовибетонных основаниях. В поперечном направлении трассы сечения сооружений могут иметь вид коробчатых (фиг. 1) или широкополых тавровых балок (фиг. 2а и 2б) с различными структурами геоармирования полок и стенок (фиг. 3,4), опирающихся на колоннадную геовибетонную трассу. При создании элементов геовибетонных конструкций целесообразно использовать специальные марки саморасширяющихся климатически устойчивых кау- и полимербетонов. При разработке методики расчёта рассматриваемых конструкций следует учитывать особенности деформирования фазовых материалов (полимеров и бетонов). Как известно [1]-[3],[8],[9] как бетоны, так и полимеры обладает существенным свойством разносопротивляемости при растяжении или сжатии. Причём, при растяжении они деформируются практически, как линейно упругие материалы, а при сжатии диаграммы их деформирования имеют ярко выраженный нелинейный характер. В связи с этим в диапазоне деформаций между предельно допустимыми деформациями $(-\varepsilon_*^-)$ и (ε_*^+) фазовых материалов, связь напряжений σ с деформациями и температурой T для бетонов и полимеров может быть представлена в единообразной форме



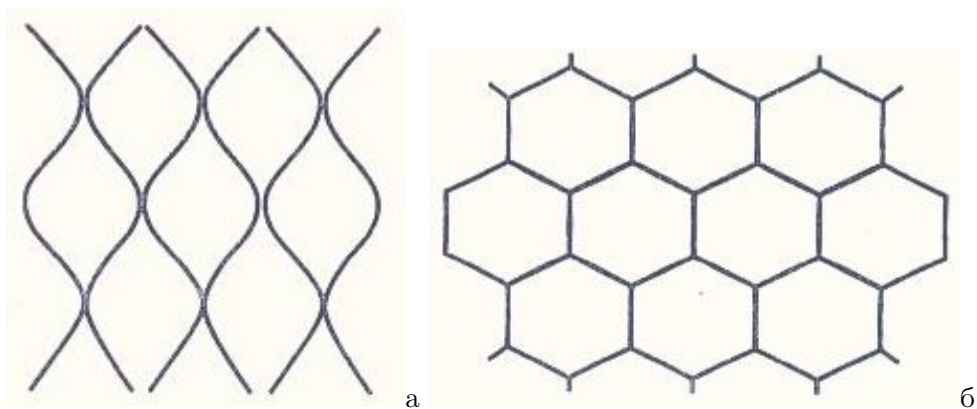
Фигура 1



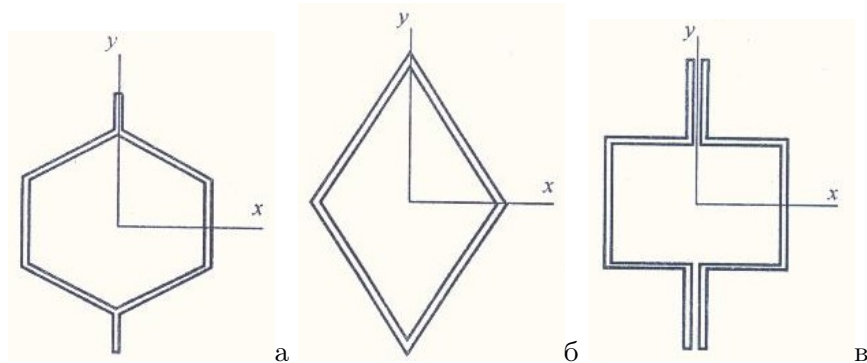
Фигура 2а



Фигура 2б



Фигура 3 Сотовые структуры для армирования а: geoweb, б: armater



Фигура 4 Характерные ячейки армирующей структуры а: гексагональная; б: ромбическая; в: прямоугольная

$$\sigma = A_1 (\varepsilon - \alpha T) + A_2 (\varepsilon - \alpha T)^2 \quad (1)$$

$$\sigma = B_1 (\varepsilon - \beta T) + B_2 (\varepsilon - \beta T)^2 \quad (2)$$

где A_1 , A_2 , B_1 , B_2 - характеристики механического деформирования бетонов и полимеров, α , β - коэффициенты температурного расширения бетонов и полимеров. Тогда,

используя модели геовебматериалов, разработанные в [5]-[8] в случае закономерностей деформирования фазовых материалов в форме (1), (2) для i -го геовеббетонного элемента получим зависимость

$$\sigma_i = C_{1i}\varepsilon^2 + C_{2i}\varepsilon + C_{3i}\varepsilon T + C_{4i}T^2 + C_{5i}T \quad (3)$$

где в коэффициентах C_{1i}, \dots, C_{5i} отражены параметры удельного содержания армирующего материала, геометрической формы армирующей ячейки, физико-механические характеристики $(A_{1i}, B_{1i}, A_{2i}, B_{2i}, \alpha_i, \beta_i)$ бетона и армирующего материала. В общем случае рассматриваемые конструкции деформируются в условиях сложного продольно-поперечного изгиба. Для упрощения получающихся в дальнейшем формул будем считать, что структуры рассматриваемых гибридных стержней и распределенных нагрузок согласованы так, что они в процессе нагружения вовсе не вызывают эффектов закручивания, либо они столь незначительные, что ими можно пренебречь. Деформации и перемещения будем считать малыми. Введем системы декартовых координат x, y, z с осью x , совпадающей с осью стержня. Тогда уравнения равновесия будут иметь вид

$$\frac{d^2 M_z}{dx^2} = q_y - \frac{dm_z}{dx}, \quad \frac{d^2 M_y}{dx^2} = q_z - \frac{dm_y}{dx}, \quad \frac{dN}{dx} = -q_x \quad (4)$$

Здесь N - проекция вектора внутреннего усилия на ось x , M_z, M_y - проекции вектора внутреннего момента на оси z, y . Величины q_x, q_y, q_z - проекции вектора распределенной нагрузки, приложенной к оси стержня, m_z, m_y - проекции вектора распределенной нагрузки на оси z, y . Интегрируя уравнение (4), получим выражения для внутренних усилий

$$\begin{aligned} N(x) &= N(0) + \int_0^x q_x(x) dx \\ M_z(x) &= M_z(0) - Q_y(0)x - \int_0^x m_z(x) dx + \int_0^x \left[\int_0^x q_y(x) dx \right] dx \\ M_y(x) &= M_y(0) - Q_z(0)x - \int_0^x m_y(x) dx + \int_0^x \left[\int_0^x q_z(x) dx \right] dx \end{aligned} \quad (5)$$

В случае статически определимых задач значения начальных усилий определяется из условий равновесия узловых сечений. В противном случае необходимо привлекать дополнительные стандартные кинематические условия. Принимая справедливой традиционную теорию плоских сечений Кирхгофа, для выражения связи деформаций $\varepsilon(x, y, z)$ с компонентами вектора перемещения $u_0(x), v_0(x), w_0(x)$ будем иметь выражения

$$\varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_0(x) - y\kappa_z(x) - z\kappa_y(x) \quad (6)$$

$$\varepsilon_0(x) = \frac{du_0}{dx}, \quad \kappa_y(x) = \frac{d^2 v_0}{dx^2}, \quad \kappa_z(x) = \frac{d^2 w_0}{dx^2} \quad (7)$$

Интегрируя соотношения (7), получим

$$\begin{aligned}
u_0(x) &= u_0(0) + \int_0^x \varepsilon_0(x) dx, \\
v_0(x) &= v_0(0) + \varphi_y(0)x + \int_0^x \left[\int_0^x \kappa_y(x) dx \right] dx, \\
\varphi_y(x) &= \varphi_y(0) + \int_0^x \kappa_y(x) dx, \\
w_0(x) &= w_0(0) + \varphi_z(0)x + \int_0^x \left[\int_0^x \kappa_z(x) dx \right] dx, \\
\varphi_z(x) &= \varphi_z(0) + \int_0^x \kappa_z(x) dx
\end{aligned} \tag{8}$$

Величины $u_0(0)$, $v_0(0)$, $w_0(0)$, $\varphi_y(0)$, $\varphi_z(0)$ находим из условий закрепления стержня. Связь напряжений с деформацией и температурой в i -м геобетонном элементе определяется выражением (3), а связь между обобщенными усилиями N , M_z , M_y и напряжениями σ_i

$$N = \sum_{i=1}^n \int_{F_i} \sigma_i dF, \quad M_y = \sum_{i=1}^n \int_{F_i} \sigma_i z dF, \quad M_z = \sum_{i=1}^n \int_{F_i} \sigma_i y dF \tag{9}$$

После подстановки выражений (3) и интегрирования получим значения N , M_y , M_z в виде полиномов второго порядка от трех неизвестных ε_0 , κ_z , κ_y . В случае статически определимых задач решение получающейся системы нелинейных алгебраических уравнений можно определить численно с помощью известных итерационных процедур [10]. После чего необходимо использовать формулы (8). Более сложные процедуры решения будут возникать в случае статически неопределимых задач. Тогда подставляя вышеупомянутые полиномиальные зависимости N , M_y , M_z от ε_0 , κ_z , κ_y в уравнения (4) будем получать систему трех нелинейных дифференциальных уравнений для функций $u_0(x)$, $v_0(x)$, $w_0(x)$. Приближенные решения этой системы можно получать с помощью некоторых модификаций метода Бубнова-Галеркина [11].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Синтетические текстильные материалы в транспортном строительстве / под редакцией В. Д. Казарновского. М.: Транспорт, 1984. 160 с.
- [2] Синтетические текстильные материалы в конструкциях автомобильных дорог: Сб. научных трудов М.: Союздороги, 1980. 138 с.
- [3] Смирнов А. Р. Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций. Омск: ОмГУ, 1993. 128 с.
- [4] Koerner R. M. Designing with geosynthetics, 2nd edition Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [5] Матвеев С. А., Немировский Ю. В. Автомобильные дорожные покрытия. Моделирование и расчет. Новосибирск: Наука, 2006. 346 с.
- [6] Nemirovsky Ju. V., Matveev S. A. Construction of settlement model of the soil reinforce with cellular system. //News of high schools. Construction. №9. 2002. P. 95–101.
- [7] Matveev S. A., Nemirovsky Ju. V. Phisico-mechanical properties of the composite Cellular system cell infill material. Geosintetics // Proc. of the 8th Internat. Conference on Geosyntetics (SICG). Vol. 4. 2006. P. 1627–1630.
- [8] Крижановский В. К., Бурлов В. В., Паниматченко А. Д., Крыжановская Ю. В. Технические свойства полимерных материалов. Санкт-Петербург: Профессия, 2005. 235 с.
- [9] Немировский Ю. В., Болтаев А. И. Особенности расчета дерево-железобетонного балочного моста // Вестник СибАДИ. 2016. №5. С. 114–124.
- [10] Ortega J. M., Rheinboldt W. C. Iterative solution of nonlinear equations in several variables. New York: London Academic Press, 1970.
- [11] Fletcher C. A. J. Computational Galerkin Methods. New York: Springer Verlag, 1984.

Yu. V. Nemirovskii

**MODELING AND CALCULATION OF DEFORMATION OF GEOWEB
CONCRETE BRIDGE STRUCTURES, ELEVATED ROADS AND AIR**

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics S.A.Christianovich Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. In the case of bridge and trestle structures of box and wide-section T-sections, a mathematical model of the stress-strain state of concrete structures reinforced by the geoweb. The structure of the reinforcement by the geoweb in different areas of the structure may be different.

Keywords: concrete beams, geoweb reinforcement, box-shaped, T-sections, stresses, deformations, displacements, complex longitudinal-transverse bending.

REFERENCES

- [1] Sinteticheskie tekstil'nye materialy v transportnom stroitel'stve / pod redakciej V. D. Kazarnovskogo. M.: Transport, 1984. 160 s. (in Russian)
- [2] Sinteticheskie tekstil'nye materialy v konstrukciyah avtomobil'nyh dorog: Sb. nauchnyh trudov M.: Soyuzdorogi, 1980. 138 s. (in Russian)
- [3] Smirnov A. R. Prikladnaya mekhanika dorozhnyh i aehrodromnyh konstrukcij. Omsk: OmGU, 1993. 128 s. (in Russian)
- [4] Koerner R. M. Designing with geosynthetics, 2nd edition Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice Hall, 1990.
- [5] Matveev S. A., Nemirovskij YU. V. Avtomobil'nye dorozhnye pokrytiya. Modelirovanie i raschet. Novosibirsk: Nauka, 2006. 346 s. (in Russian)
- [6] Nemirovskij Ju. V., Matveev S. A. Construction of settlement model of the soil reinforce with cellular system. //News of high schools. Construction. №9. 2002. P. 95–101.
- [7] Matveev S. A., Nemirovskij Ju. V. Phisico-mechanical properties of the composite Cellular system cell infill material. Geosynthetics // Proc. of the 8th Internat. Conference on Geosynthetics (SICG). Vol. 4. 2006. P. 1627–1630.
- [8] Krizhanovskij V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D., Kryzhanovskaya YU. V. Tekhnicheskie svojstva polimernyh materialov. Sankt-Peterburg: Professiya, 2005. 235 s. (in Russian)
- [9] Nemirovskij YU. V., Boltaev A. I. Osobennosti rascheta derevo-zhelezobetonnoho balochnogo mosta // Vestnik SibADI. 2016. №5. С. 114–124. (in Russian)
- [10] Ortega J. M., Rheinboldt W. C. Iterative solution of nonlinear equations in several variables. New York: London Academic Press, 1970.
- [11] Fletcher C. A. J. Computational Galerkin Methods. New York: Springer Verlag, 1984.

Nemirovskij Yuri Vladimirovich

e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Institute of Theoretical and Applied Mechanics S.A.Christianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.