

УДК 624.04:624.137:625.122:677
DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-44-50

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ надежности материала георешетки со случайными нелинейными вязкоупругими характеристиками

А.И. Марасанов

Российский университет транспорта (МИИТ)
Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

(поступила в редакцию: 19 ноября 2018 г.; доработана: 17 декабря 2018 г.; принята к публикации: 15 января 2019 г.)

Введение. В статье исследуется поведение во времени материала георешетки при растяжении, обладающего случайными нелинейными вязкоупругими свойствами. Характеристики вязкоупругости представлены в виде гауссовского случайного вектора, компоненты которого приняты на основе экспериментальных данных.

Цель – изучение влияния различных факторов (уровень действующих напряжений, замена постоянной нагрузки на случайную, количество имитируемых реализаций случайного процесса относительной деформации, изменение допустимого уровня относительной деформации) на обеспечение требуемого срока службы при заданном уровне надежности. Под надежностью понимается вероятность безотказной работы. Под отказом подразумевается первое превышение случайной относительной деформацией некоторого заданного уровня. В качестве последнего принята величина относительной деформации, отвечающая условному пределу текучести материала георешетки.

Методы. Используются известные алгоритмы численного моделирования реализаций гауссовского случайного вектора с заданной корреляционной матрицей, характеризующего случайные вязкоупругие свойства материала (метод линейного преобразования), и гауссовских случайных чисел.

Результаты. Показано, что относительная продольная деформация материала георешетки является гауссовским нестационарным случайным процессом, для стохастического анализа которого можно ограничиться численным моделированием 10 000 реализаций. Получены зависимости от времени оценок математического ожидания и среднеквадратического отклонения случайной относительной деформации, а также функция вероятности безотказной работы.

Выводы. Выявлено, что оценка долговечности, получаемая на основе решения в детерминированной постановке задачи, оказывается завышенной по сравнению с решением в вероятностной постановке, если выдвигается условие обеспечения заданного срока службы с определенным уровнем надежности.

Ключевые слова: георешетка, гауссовский случайный вектор, долговечность, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, вероятность безотказной работы

Введение

Известно, что георешетки широко применяются в транспортном строительстве, а именно при сооружении оснований для аэродромов, самолетных ангаров, вертолетных площадок, армировании конструктивных дорожных одежд автодорог, укреплении поверхностей откосов земляного полотна авто- и железных дорог и т.д. Одновременно возникает проблема обеспечения безотказной работы георешеток в течение заданного срока служ-

бы. В различных методических документах, например в [1], отмечается, что заданный срок службы должен быть обеспечен с уровнем надежности не ниже 0,95. Отметим, что продолжительность срока службы георешеток зависит от их назначения. Так, срок службы георешеток, используемых для усиления откосов насыпей земляного полотна железных и автодорог может быть ограничен временем образования дернового слоя на поверхности откоса (примерно 2 месяца), повышающего устойчивость откоса к размывам.

Заметим также, что достоверный прогноз продолжительности срока службы георешеток, т.е. их долговечности, может быть дан только на основе длительных испытаний, позволяющих выявить вязкоупругие свойства материала.

© Марасанов А.И., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Экспериментальным исследованиям вязкоупругих свойств материала георешеток посвящены работы [2–6].

В [2] приводятся результаты статистического анализа характеристик вязкоупругости материала георешеток различных типов при растяжении. Показано, что изучаемый материал обладает свойством нелинейной ползучести, причем характеристики вязкоупругости имеют значительный статистический разброс.

В [3] исследуются вязкоупругие свойства геополотенец и георешеток различной структуры в режимах ползучести и релаксации. Отмечено, что геосинтетические материалы обладают существенным различием в их вязкоупругих свойствах.

В [4] на основе краткосрочных испытаний на ползучесть геосеток из полиэфира и георешеток из полипропилена при повышенных температурах с помощью метода температурно-временной аналогии дается прогноз их поведения в течение 30 лет эксплуатации. Подчеркивается, что образцы из полиэфира менее подвержены ползучести по сравнению с образцами из полипропилена.

В [5] рассматривается изменение показателей прочности геосинтетических материалов с течением времени путем сравнения указанных параметров для материала, бывшего длительное время в эксплуатации, с прочностными характеристиками образцов нового аналогичного материала. Полученная на основе указанных опытов зависимость прочности от времени сравнивается с теоретическими подходами, заложенными в европейские нормы проектирования армогрунтовых конструкций (EBGEO).

В [6] сравниваются результаты длительных испытаний георешеток из нетканого полипропилена, размещенных в массиве плотного песка, с лабораторными опытами, а также результатами, полученными другими исследователями. Для анализа результатов натуральных испытаний предложена аналитическая модель.

Исследованию поведения во времени на основе метода конечных элементов георешеток с учетом нелинейной ползучести при их взаимодействии с массивом грунта посвящены работы [7–9].

В [7] представлены результаты расчета нескольких ячеек георешетки при их анкерном креплении в тело откоса насыпи.

В [8] проводится имитирование поведения во времени массива песка, усиленного полимерной георешеткой.

В [9] выполнено исследование влияния ползучести геосинтетического усиления на сдвиговые

деформации оснований насыпей, укрепленных колоннами.

Следует отметить, что в вышеперечисленных трудах задача решалась в детерминистической постановке. Однако характеристики вязкоупругости геосинтетиков, как отмечалось ранее, имеют существенный статистический разброс, поэтому такие задачи целесообразно решать в вероятностной постановке.

Цель

Целью данной работы является исследование влияния различных факторов (уровень действующих напряжений, замена постоянной нагрузки на случайную, количество имитируемых реализаций случайного процесса относительной деформации) на обеспечение требуемого срока службы материала георешетки при заданном уровне надежности. Под надежностью понимается вероятность безотказной работы, причем отказом считается первое превышение случайной относительной деформацией некоторого заданного уровня. В качестве последнего принята величина относительной деформации, отвечающая условному пределу текучести материала георешетки, равная, согласно исследованиям, представленным в [2], 0,05.

Методы

В [2] для материала георешетки Геомат С-60 была принята следующая зависимость относительной продольной деформации ε от времени t :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + c\sigma^k t^\beta. \quad (1)$$

Согласно [2], $k = 2,175$, а коэффициенты E , $\ln\beta$, c являются компонентами гауссовского случайного вектора $\bar{\theta} = (E, \ln\beta, c)^t$ с характеристиками: $\langle E \rangle = 264$ МПа; $S_E = 45,7$ МПа; $\langle \ln\beta \rangle = -1,14$; $S_{\ln\beta} = 0,13$; $\langle c \rangle = 0,00043$ (МПа) $^{-k} \times (\text{сутки})^{-\beta}$; $S_c = 0,00013$ (МПа) $^{-k} \times (\text{сутки})^{-\beta}$; $r_{E,c} = -0,04$; $r_{E,\ln\beta} = 0,44$; $r_{c,\ln\beta} = -0,48$. Здесь угловыми скобками обозначены оценки среднего значения случайной величины, символом S – оценки среднеквадратического отклонения, символом r – оценки коэффициента корреляции между соответствующими случайными величинами.

Реализации гауссовского случайного вектора $\bar{\theta}$ с заданной корреляционной матрицей можно численно моделировать с помощью метода линейного преобразования [10].

Согласно указанному методу центрируем и пронормируем случайный вектор $\bar{\theta}$. Полученный таким образом вектор обозначим $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)'$. Для $\bar{\alpha}$ справедливо соотношение

$$\bar{\alpha} = H\bar{\gamma}. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)'$ – вектор, координаты которого являются независимыми гауссовскими случайными числами с параметрами (0,1); H – матрица 3-го порядка. Приняв ее в треугольном виде, найдем

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= h_{11}\gamma_1 \\ \alpha_2 &= h_{21}\gamma_1 + h_{22}\gamma_2 \\ \alpha_3 &= h_{31}\gamma_1 + h_{32}\gamma_2 + h_{33}\gamma_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты h_{ij} определяются из соотношения

$$r_{ij} = \langle \alpha_i \alpha_j \rangle. \quad (4)$$

Реализацию случайного вектора $\bar{\theta}$ получим на основе реализации вектора $\bar{\alpha}$, проведя необходимые преобразования с его компонентами:

$$\begin{aligned} E &= S_E \alpha_1 + \langle E \rangle \\ \beta &= \exp(S_{\ln\beta} \alpha_2 + \langle \ln\beta \rangle) \\ c &= S_c \alpha_3 + \langle c \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты

В таблице представлены статистические характеристики случайного вектора $\bar{\theta}$, найденные численно на основе различного числа реализаций. Они сопоставляются с аналогичными характеристиками, определенными по экспериментальным данным, указанным выше. Можно заметить, что при увеличении количества реализаций параметры имитируемого случайного вектора приближаются к заданным значениям.

Исследуем поведение во времени материала георешетки при растяжении с учетом его случайных свойств.

На рис. 1–3 представлены графики функций математического ожидания и среднеквадратического отклонения случайного процесса относительной продольной деформации материала георешетки, а также функции вероятности его безотказной работы, полученные при различном числе моделируемых реализаций, а именно 1000, 5000, 10 000, для уровня напряжений, составляющего 35 % от разрушающего.

Как видно из представленных результатов, соответствующие кривые, полученные на основе статистического анализа 1000, 5000 и 10 000 реализаций, практически совпадают.

Таким образом, для анализа поведения во времени материала георешетки можно ограничиться моделированием 10 000 реализаций случайного процесса относительной деформации. Результаты, приведенные ниже, получены путем статистического анализа именно такого количества реализаций.

Таблица

Статистические характеристики случайного вектора $\bar{\theta}$
[Table. Statistical characteristics of a random vector $\bar{\theta}$]

Число реализаций [The number of implementations]	$\langle E \rangle$	S_E	$\langle \ln\beta \rangle$	$S_{\ln\beta}$	$\langle c \rangle \times 10^5$	$S_c \times 10^5$	$r_{E \ln\beta}$	r_{E_c}	$r_{c \ln\beta}$
1000	265	44,7	-1,14	0,13	43	13	0,45	-0,07	-0,49
5000	264	45,1	-1,14	0,13	43	13	0,43	-0,05	-0,46
10 000	265	45,4	-1,14	0,13	42	13	0,42	-0,04	-0,47
Опыт [Experience]	264	45,7	-1,14	0,13	43	13	0,44	-0,04	-0,48

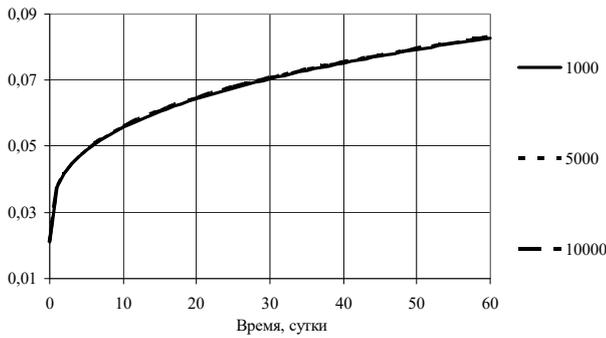


Рис. 1. Функция математического ожидания относительной деформации при различном числе моделируемых реализаций
 [Figure 1. Function of mathematical expectation of strain under different number of imitated realizations]

Отметим нестационарность случайного процесса относительной деформации. Кроме того, функция математического ожидания относительной деформации оказывается очень близкой к решению детерминированной задачи, получаемому на основе соотношения (1), если приравнять в этом соотношении случайные величины E , β , c соответствующим средним значениям.

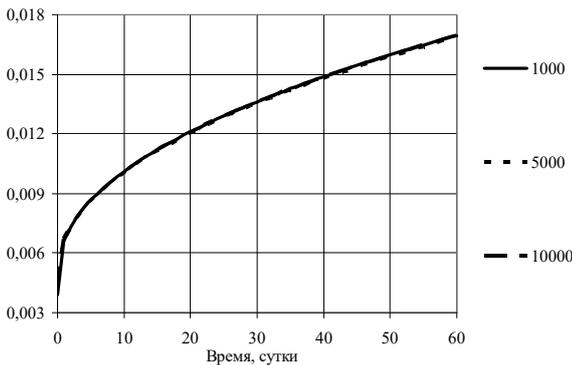


Рис. 2. Функция среднеекватического отклонения относительной деформации при различном числе моделируемых реализаций
 [Figure 2. Function of standard deviation of strain under different number of imitated realizations]

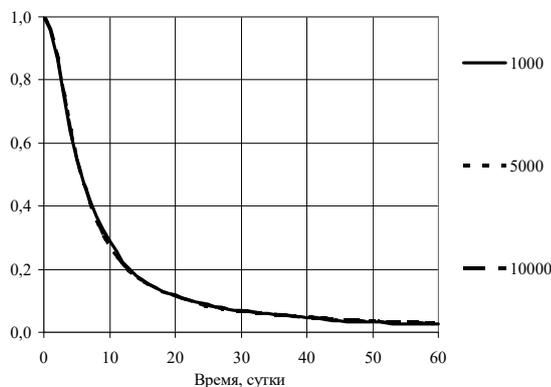


Рис. 3. Функция вероятности безотказной работы при различном числе моделируемых реализаций
 [Figure 3. Function of probability of no-failure under different number of imitated realizations]

На рис. 4–5 приведены графики функций математического ожидания и среднеекватического отклонения случайной относительной деформации материала георешетки, полученные при различных уровнях растягивающих напряжений. Здесь нижние кривые соответствуют напряжениям, равным 25 % от разрушающего напряжения, средние кривые – 30 %, верхние – 35 %.

Из рис. 4 следует, что для детерминированной задачи при уровнях напряжений, равных 35 и 30 % от разрушающего, долговечность материала георешетки составляет 6 и 22 суток соответственно, при уровне напряжений 25 % от разрушающего долговечность превышает заданный срок службы. Под долговечностью в данном случае понимается время, проходящее до момента превышения относительной деформацией допускаемой величины.

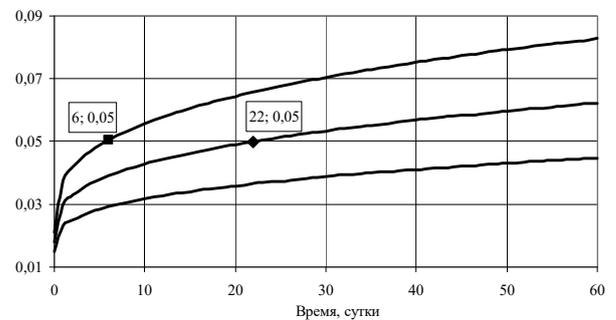


Рис. 4. Функция математического ожидания относительной деформации при различных уровнях растягивающих напряжений
 [Figure 4. Function of mathematical expectation of strain under different values of tension stresses]

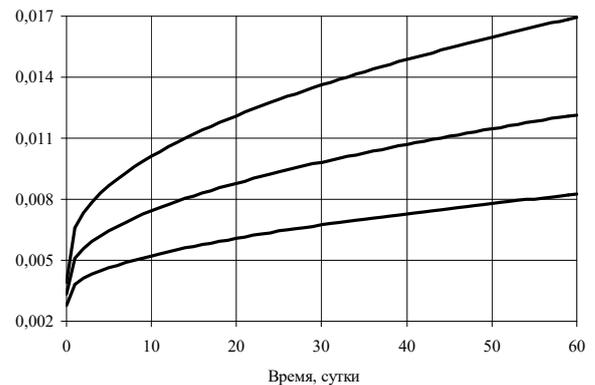


Рис. 5. Функция среднеекватического отклонения относительной деформации при различных уровнях растягивающих напряжений
 [Figure 5. Function of standard deviation of strain under different values of tension stresses]

На рис. 6 представлены графики функции вероятности безотказной работы материала георешетки, полученные при различных уровнях растягивающих напряжений. Нижняя сплошная кри-

вая соответствует напряжениям, равным 35 % от разрушающего напряжения, средняя сплошная кривая – 30 %, верхняя прямая – 25 %.

При уровне напряжений, равном 25 % от разрушающего, в течение заданного интервала времени отказа не происходит, т.е. уровень надежности составляет 1. При уровнях напряжений 30 и 35 % от разрушающего срок службы материала георешетки при уровне надежности 0,95 составляет 6 и 1 сутки соответственно, что существенно ниже оценок долговечности, полученных при детерминированной постановке задачи (22 и 6 суток).

Штриховая кривая на рис. 6 соответствует функции вероятности безотказной работы материала георешетки при уровне напряжений, равном 35 % от разрушающего, и более высокой допускаемой величине относительной деформации (0,1). Следовательно, двукратное повышение допускаемой деформации при прочих равных условиях приводит к резкому повышению надежности рассматриваемой системы.

На рис. 7 представлены графики функции вероятности безотказной работы материала георешетки, причем штриховая кривая отвечает действию постоянной нагрузки, равной 35 % от разрушающей, сплошная кривая соответствует действию нагрузки в виде гауссовой случайной величины с математическим ожиданием, равным 35 %, и среднеквадратическим отклонением, равным 3,5 % от разрушающей нагрузки.

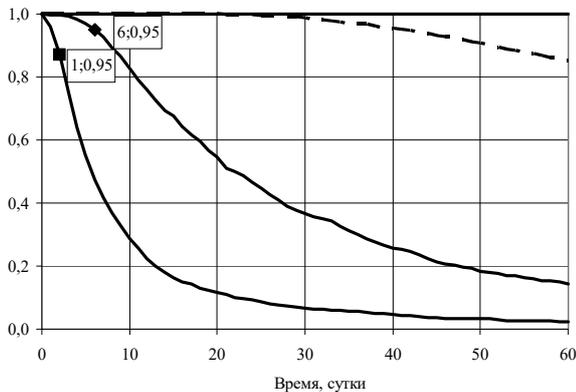


Рис. 6. Функция вероятности безотказной работы при различных уровнях растягивающих напряжений
[Figure 6. Function of probability of no-failure under different values of tension stresses]

На начальном временном интервале (примерно 5 суток) вероятность безотказной работы элемента георешетки с постоянной нагрузкой несколько выше аналогичного фактора элемента со случайной нагрузкой. С течением времени картина меняется на противоположную.

Подчеркнем, что приведенные результаты получены для отдельного образца материала георешетки. Между тем в работе [7] показано, что учет свойств грунта заполнения георешеток, а также сил трения, появляющихся на поверхности контакта грунта заполнения и откоса насыпи, приводит к существенному замедлению роста деформаций ползучести во времени. Однако в представленной работе на простом примере проиллюстрирована необходимость учета случайной природы свойств материала и нагрузок при решении подобных задач.

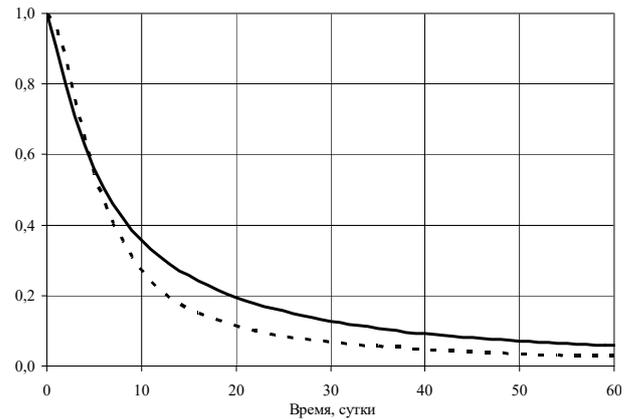


Рис. 7. Функция вероятности безотказной работы при действии постоянной и случайной нагрузок
[Figure 7. Function of probability of no-failure under constant and random loadings]

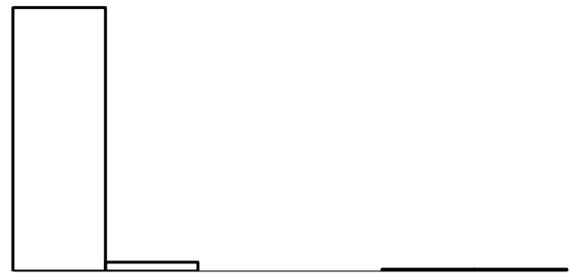


Рис. 8. Гистограмма долговечности материала георешетки
[Figure 8. Bar chart of geogrid material durability]

Следует отметить, что в рамках вероятностного решения можно помимо функции вероятности безотказной работы системы получить вероятностное распределение долговечности, которая является случайной величиной. На рис. 8 представлена 6-ти разрядная гистограмма долговечности материала георешетки со случайными характеристиками вязкоупругости при действии постоянных напряжений, равных 35 % от разрушающего. При этом среднее значение долговечности равно 13,7 суток, а коэффициент вариации равен 0,3. Очевидно, что приведенное вероятностное распределение долговечности затруднительно аппроксимировать каким-либо статистическим законом.

Выводы

Проведено численное исследование поведения во времени материала георешетки со случайными нелинейными вязкоупругими свойствами. Показано, что решение задачи в вероятностной постановке приводит к существенному снижению оценок долговечности по сравнению с аналогичной задачей, решаемой в детерминированной постановке. В вероятностном решении увеличение допускаемого уровня относительной деформации приводит к повышению надежности рассматриваемой системы, а замена постоянной нагрузки на нагрузку в виде гауссовской случайной величины с малым коэффициентом вариации оказывает неоднозначное влияние на функцию безотказной работы.

Список литературы

1. ОДМ 218.5.001-2009. Методические рекомендации по применению геосеток и плоских георешеток для армирования асфальтобетонных слоев усовершенствованных видов покрытий при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог.
2. Марасанов А.И., Фимкин А.И. Исследование вязкоупругих свойств материала георешеток различных типов // Механизация строительства. 2014. № 6 (840). С. 33–37.
3. Логинова И.И., Артамонова Д.А., Столяров О.Н., Мельников Б.Е. Влияние структуры на вязкоупругие свойства геосинтетических материалов // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4 (56). С. 11–18.
4. Srungeri S.G., Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N. Creep behavior of geosynthetics by temperature accelerated testing // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8 (76). С. 255–265.
5. Пономарев А.Б., Клевеко В.И., Татьянаников Д.А. Анализ изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов в процессе эксплуатации // На-

учный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 3 (35). С. 11–16

6. De Bona Becker L., Lopes da Silva Nunes A.L. Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles // Geotextiles and Geomembranes. 2015. № 43 (4). С. 351–358.

7. Пуляевский Д.В., Токарев П.М. Напряженно-деформированное состояние элементов систем из синтетических нетканых материалов с учетом их нелинейной ползучести // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 5. С. 52–57.

8. Fu-Lin Li, Fang-Le Peng, Yong Tan, W. Kongkitkul, M.S.A. Siddiquee. FE simulation of viscous behavior of geogrid-reinforced sand under laboratory-scale plane-strain-compression testing // Geotextiles and Geomembranes. 2012. № 31. С. 72–80.

9. Liu K.-W., Kerry Rowe R. Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns // Geotextiles and Geomembranes. 2015. № 43 (6). С. 567–578.

10. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.

Об авторе

Марасанов Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики, Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация). *Область научных интересов:* анализ надежности, долговечности и устойчивости стохастических вязкоупругих систем, экспериментальные исследования вязкоупругих материалов. *Контактная информация:* e-mail: marasanovai@yandex.ru

Для цитирования

Марасанов А.И. Анализ надежности материала георешетки со случайными нелинейными вязкоупругими характеристиками // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 1. С. 44–50. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-44-50

RESEARCH PAPER

Reliability analysis of geogrid material with random nonlinear viscoelastic characteristics

Alexander I. Marasanov

Russian University of Transport
9 Obrazcova St., bldg. 9, Moscow, 127994, Russian Federation

(received: November 19, 2018; revised: December 17, 2018; accepted: January 15, 2019)

Abstract. Introduction. The behavior in the course of a time of geogrid material with random nonlinear viscoelastic characteristics under tension is analysed. Parameters of viscoelasticity are represented in form of Gaussian random vector. The components of this vector are taken from experimental data.

Aim of the research. The objective of this research is the analysis of influence of different factors (value of applied load and the application of load in the form of random value instead of dead one, number of realizations, change of given

level of strain) on providing of needed service life of geogrid material with given reliability level. Here reliability is interpreted as function of probability of non-failure. The first crossing of some given level by random strain is considered as a failure. The strain value corresponding to yield limit of geogrid material is accepted as the given level of longitudinal strain.

Methods. The realizations of Gaussian random vector of viscoelastic parameters of material with given correlation matrix were imitated by means of linear transformation method.

Results. It is demonstrated that longitudinal strain is Gaussian nonstationary random process which stochastic analysis can be made on base of 10 000 realizations. The dependencies on time of mathematical expectation and standard deviation of random longitudinal strain as well as function of probability of non-failure are found.

Conclusion. It is shown that durability estimation found on base of the deterministic problem solution is overestimated in comparison with stochastic problem solution if the condition of given service life providing with some reliability level is set up.

Keywords: geogrid, Gaussian random vector, durability, mathematical expectation, standard deviation, the probability of non-failure

References

1. ODM 218.5.001-2009. *Metodicheskie rekomendacii po primeneniю geosetok i ploskih geoschetok dlja armirovaniа asfaltobetonnih sloev usovershenstvovannih vidod pokritiy pri kapitalnom remonte i remonte avtodorog* [Guidelines for the use of geogrids and flat geogrids for reinforcing asphalt concrete layers of improved types of coatings for overhauling and repairing highways]. (In Russ.)

2. Marasanov A.I., Fimkin A.I. (2014). Issledovanie vyazkouprugih svoystv materiala geoschetok razlichnyh tipov [The investigation of the viscoelastic properties of the material of geogrids of various types]. *Mechanization of Construction*, (6), 33–36. (In Russ.)

3. Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. (2015). Vliyanie struktury na vyazkouprugie svoystva geosinteticheskikh materialov [Effect of structure on the viscoelastic properties of geosynthetic materials]. *Magazine of Civil Engineering*, 4(56), 11–18. (In Russ.)

4. Srungeri S.G., Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N. (2017). Creep behavior of geosynthetics by temperature accelerated testing. *Magazine of Civil Engineering*, 8(76), 255–265.

5. Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Tat'yannikov D.A. (2014). Analiz izmeneniya prochnostnyh harakteristik geosinteticheskikh materialov v processe ehkspluatatsii [Analysis of changes in the strength characteristics of geosynthetic materials during operation]. *Nauchnyy vestnik voronezhskogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*, 3(35), 11–16. (In Russ.)

6. De Bona Becker L., Lopes da Silva Nunes A.L. (2015). Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 351–358.

7. Puliaevsky D.V., Tokarev P.M. (2006). Napriajenno-deformirovannoe sostoianje elementov is sinteticheskikh

netkannykh materialov s uchedom ih nelineynoy polsuchesti [Stress-strain state of the elements of systems made of synthetic non-woven materials, taking into account their nonlinear creep]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, (5), 52–57. (In Russ.)

8. Fu-Lin Li, Fang-Le Peng, Yong Tan, W. Kongkitkul, M.S.A. Siddiquee. (2012). FE simulation of viscous behavior of geogrid-reinforced sand under laboratory-scale plane-strain-compression testing. *Geotextiles and Geomembranes*, (31), 72–80.

9. Liu K.-W., Kerry Rowe R. (2015). Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(6), 567–578.

10. Bikov V.V. (1971). Cifrovoe modelirovanie v statisticheskoy radiotekhnike [Digital modeling in statistical radio engineering.]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 328. (In Russ.)

About the author

Alexander I. Marasanov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Structural Mechanics, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation). *Research interests:* analysis of reliability, durability and stability of stochastic viscoelastic systems, experimental researches of viscoelastic materials. *Contacts:* e-mail – marasanovai@yandex.ru

For citation

Marasanov A.I. (2019). Reliability analysis of geogrid material with random nonlinear viscoelastic characteristics. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(1), 44–50. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-1-44-50 (In Russ.)