

14. Lundgren K., Kettil P., Hanjari K.Z., Schlune H., San Roman A.S. Analytical model for the bond-slip behaviour of corroded ribbed reinforcement // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2012. Vol. 8. No. 2. Pp. 157–169.
15. Mak M.W.T., Desnerck P., Lees J.M. Corrosion-induced cracking and bond strength in reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 208. Pp. 228–241.
16. Jamali A., Angst U., Adey B., Elsener B. Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 42. Pp. 225–237.
17. Coccia S., Imperatore S., Rinaldi Z. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete // *Materials and Structures*. 2016. 49 (1-2). Pp. 537–551.
18. Andrade, C., Cesetti, A., Mancini, G., Tondolo, F. Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening // *Structural Concrete*. 2016. 17 (4). Pp. 533–540.
19. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. Lausanne, 2013. 402 p.
20. Tur V.V., Yalavaya Y.S. Influence of the reinforcing bar corrosion level on the flexural crack's width in the existing structure // *Modern Engineering*. 2019. Vol. 1. Pp. 1–9.

Information about authors:

Tur Viktor V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
doctor in tech. sc., prof., head of department of concrete technology and building materials
E-mail: tur.s320@mail.ru

Yalavaya Yuliya S.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
senior lecturer of the department of economics and construction organization
E-mail: jul4onka@mail.ru

Информация об авторах:

Тур Виктор Владимирович

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
доктор техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов
E-mail: tur.s320@mail.ru

Яловая Юлия Сергеевна

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства
E-mail: jul4onka@mail.ru

НАДЕЖНОСТЬ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ СВАИ С УШИРЕНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ ОСАДКИ

СОЛОВЬЕВ С.А., УТКИН В.С.

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия

Аннотация. В работе представлены методы расчетов надежности буроинъекционных свай с уширением по критерию осадки. В представленных методах расчетов надежности учитывается ограниченность статистической информации о контролируемых параметрах в расчетных математических моделях предельных состояний, что повышает их практическую значимость (требуется меньшее количество контрольных образцов грунта для испытаний), но снижает информативность полученного результата. Также в работе приведены методы расчетов надежности свай при наличии полной статистической информации для отдельных параметров, повышающих информативность результатов расчетов надежности. В статье рассмотрены числовые примеры расчета надежности буроинъекционной сваи с уширением на нижнем конце. Работа направлена на выполнение требований Закона РФ №384-ФЗ и Межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» при проектировании и обследовании свайных оснований с буроинъекционными сваями.

Ключевые слова: осадка, буроинъекционная свая, надежность, теория нечетких множеств, уширение сваи, интервал надежности

RELIABILITY ANALYSIS OF CFA PILES WITH UNDER-REAM ON SETTLEMENT

SOLOVYEV S.A., UTKIN V.S.

Vologda State University, Vologda, Russia

Abstract. The article presents the methods for reliability analysis of CFA (Continuous flight augering) piles with under-ream on settlement criterion. The presented methods of reliability analysis take into account the limited statistical information about the controlled parameters in the design mathematical models of limit states. That increases their practical significance (fewer control soil samples are required for testing), but reduces the informativeness of the reliability analysis results. The paper also presents methods for reliability analysis of CFA piles in the presence of complete (full) statistical information for individual parameters that increase the informativeness of the reliability analysis results. The article deals with numerical examples of reliability analysis for CFA piles with under-ream at the lower end. The paper is aimed at fulfilling the requirements of Russian Federal Law No. 384-FZ and Interstate standard GOST 27751-2014 "Reliability of structures and foundations" for the design and inspection of pile foundation with CFA piles.

Keywords: settlement, CFA pile, reliability, fuzzy set theory, pile under-ream, confidence interval

Введение

Свайные фундаменты с буроинъекционными сваями используются в качестве конструктивных решений для строительных объектов на сравнительно слабых грунтах и при усилении фундаментов зданий и сооружений. От надежности свай и свайного фундамента в целом зависит надежность всего строительного объекта. Основное назначение свай заключается в использовании несущей способности грунтов оснований на большой глубине при меньшем расходе материалов в фундаментах и передаче действующей нагрузки на нижележащие слои грунта, как правило, обладающих более высокой механической прочностью.

В соответствии с требованиями Закона РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», несущие элементы строительных конструкций должны отвечать требованиям механической (конструкционной) безопасности. Количественной мерой надежности (безопасности эксплуатации) может служить значение вероятности безотказной работы.

В соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» под понятием надежности строительного объекта понимается его способность «выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации». Надежность строительного объекта определяется через надежность каждого несущего элемента объекта с учетом их взаимодействия. Для этого объект рассматривается в виде совокупности элементов, которые образуют системы с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов систем [1, 2, 3 и др.]. Свая может рассматриваться как условный элемент системы, состоящий также из элементов – критериев ее работоспособности. Расчет надежности одиночной сваи является необходимым условием для расчета надежности свайного основания фундамента как системы, состоящей из свай, ростверка и тела фундамента.

По ГОСТ 27751-2014 для расчетов надежности рекомендуется применять вероятностно-статистические методы расчетов, для которых необходима полная статистическая информация о контролируемых параметрах. На практике расчетов надежности несущих элементов конструкций, в том числе буроинъекционных свай (и тем более одной сваи), зачастую не удается получить требуемую согласно ГОСТ 27751-2014 по объему статистическую информацию о контролируемых параметрах для математической модели предельного состояния по всем критериям работоспособности, в т.ч. по осадке. В связи с этим, нашли свое применение альтернативные методы расчетов надежности [4, 5, 6 и др.], которые дают менее информативный результат расчета надежности для систем с ограниченной по объему статистической информацией. Эти методы построены на новых теориях математического анализа, которые и будут использованы в предлагаемых в статье методах расчетов надежности буроинъекционных свай с уширением. В качестве методов расчета будут рассмотрены методы на основе теории нечетких множеств и комбинированные методы, построенные на возможностных и вероятностных распределениях случайных величин.

Вопросы расчетов надежности свай по осадке и перемещениям (линейным и угловым) при полной статистической информации рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов [7-10]. Данные методы построены на основе положений теории вероятностей и математической статистики. Использование таких подходов на практике зачастую ограничено вследствие неполноты статистической информации, а в случае игнорирования этих условий, могут привести к ошибочным результатам расчета надежности.

В работе [11] описывается процесс пересмотра норм проектирования свайных фундаментов в Китае на основе положений теории надежности. В [12] рассматривается подход к прогнозированию осадки сваи на основе положений теории вероятностей. Вероятностный анализ работы групп свай с учетом жесткости сооружения и пространственной изменчивости грунта рассмотрен в [13].

В данной работе рассмотрен расчет надежности буроинъекционной сваи с уширением (расчетная схема представлена на рис. 1 по критерию осадки сваи при ограниченной статистической информации о значениях осадки s).

Математическую модель предельного состояния для расчета надежности сваи с уширением по критерию осадки можно записать в виде (где волнистыми линиями обозначены случайные величины):

$$\tilde{s} \leq s_u, \quad (1)$$

где \tilde{s} – осадка сваи от расчетной эксплуатационной нагрузки (случайная величина); s_u – предельная допустимая осадка сваи (детерминированная величина).

В соответствии с СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», п. 7.4.2, расчет осадки одиночной висячей сваи с уширением на нижнем конце проводится по формуле:

$$s = \frac{0,22N}{G_2 d_b} + \frac{Nl}{EA}, \quad (2)$$

где N – вертикальная эксплуатационная нагрузка на сваю; l – длина сваи; G_2 – модуль сдвига грунта; d_b – диаметр уширения сваи; E – модуль упругости материала ствола сваи; A – площадь поперечного сечения ствола сваи.

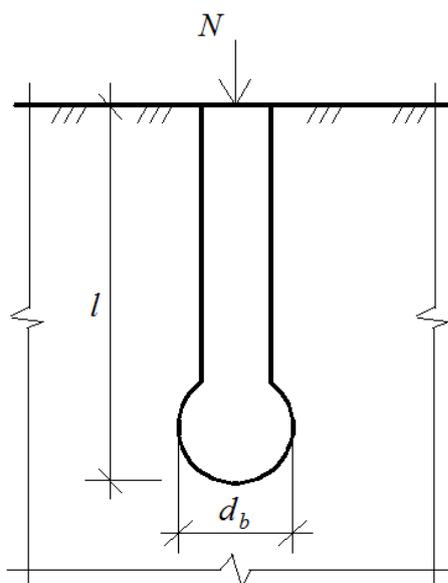


Рисунок 1 – Расчетная схема буринъекционной сваи с уширением
N – нагрузка на сваю; d_b – диаметр уширения; l – длина сваи

В других исследованиях содержатся другие предложения для второго слагаемого в (2). Так в [14] предлагается рассчитывать осадку верхнего конца сваи от укорочения ствола сваи по формуле: $s = \frac{2Nl}{5EA}$. В [15] приведено значение $s = \frac{Nl}{2EA}$. В общем виде второе слага-

емое в (2) можно записать как $k \frac{Nl}{EA}$, где $k=1$ в соответствии с СП 24.13330.2011. При необходимости расчета осадки по другим формулам, дальнейший расчет может быть легко перестроен с помощью коэффициента k .

Предельное допустимое значение осадки принимается по приложению Г СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Например, для промышленных и гражданских зданий с полным железобетонным каркасом максимально допустимая осадка $s_u=100$ мм.

Модели и методы

Вертикальная эксплуатационная нагрузка N и модуль сдвига грунта G_2 определяются по результатам измерений и испытаний и являются случайными величинами. Параметры l , d_b и A определяются по результатам измерений и в (2) являются детерминированными (по-

стоянными) величинами в силу их малой изменчивости при измерениях. Примем для первого варианта расчета надежности сваи модуль упругости материала сваи E детерминированной величиной. Математическую модель (1) с учетом (2) можно записать в виде:

$$\tilde{N} \left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) \leq s_u. \quad (3)$$

Рассмотрим расчет надежности сваи по критерию (3) возможным методом, принимая \tilde{N} и \tilde{G}_2 нечеткими переменными [16].

Введем в (3) принятые в теории возможностей [16] обозначения $\tilde{N} = X$, $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) = Y$. Тогда математическую модель предельного состояния (3) можно записать в виде:

$$X \cdot Y \leq s_u. \quad (4)$$

Т.к. число измерений параметров X и Y в (4) для одной или нескольких пробных сваи на практике ограничено, будем использовать для расчета надежности сваи по критерию осадки положения теории нечетких множеств [17]. Примем по [5] для описания нечетких переменных X и Y функцию распределения возможностей с аналитическим видом:

$$\pi_X(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где $a_x = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – «условное среднее»; $b_x = 0,5(X_{\max} - X_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ – мера «рассеяния», где X_{\max} и X_{\min} – наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной X , полученных из результатов измерений; $\alpha \in [0;1]$ – уровень среза (риска), значением которого задаются, например, по рекомендациям, приведенным в [18]. Обратную функцию от $\pi_X(x)$ найдем из (5) в виде $x = a_x \pm b_x \sqrt{-\ln \alpha}$ или $x = a_x \pm b_x \beta$, где $\beta = \sqrt{-\ln \alpha}$. Аналогичные выражения, характеризующие функцию (5), будут и для нечеткой переменной Y .

Графический вид функции распределения возможностей (5) представлен на рис. 2, где область всех возможных функций распределения ограничена функциями $\underline{F}_X(x)$ и $\overline{F}_X(x)$ (нижней и верхней функцией распределения возможностей).

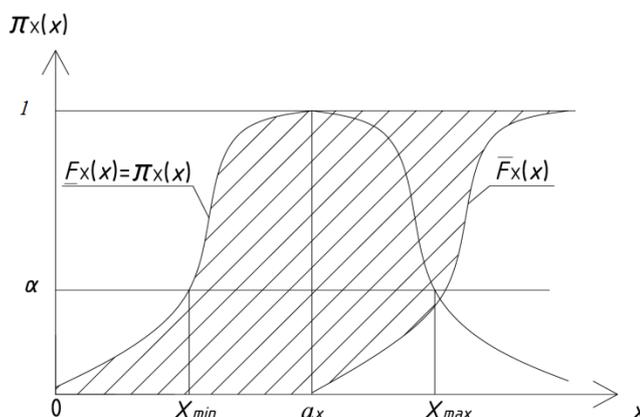


Рисунок 2 – Область графиков функций распределения возможностей $\pi_X(x)$

Расчет надежности по математической модели (4) проведем с использованием принципа обобщения Л. Заде из теории нечетких множеств [17]. Формируем из (4) нечеткую переменную T как функцию от нечетких аргументов X, Y в виде:

$$T = XY \leq s_u. \quad (6)$$

Графический вид функции $\pi_T(t)$ неизвестен, но она характеризуется значениями a_t, b_t, α , по аналогии с $\pi_X(x)$. Условная «средняя» a_t для функции T определяется по (6) в виде $a_t = a_x a_y$, с левой ветвью $t \leq a_t$ и правой ветвью $t > a_t$ функции $\pi_T(t)$, а обратная функция t от T будет определяться через обратные функции x, y от X, Y , которые имеют вид обратной функции x от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_T(t)$ имеем:

$$t_{лев} = (a_x - b_x \beta)(a_x - b_x \beta) \leq s_u, \quad (7)$$

$$t_{пр} = (a_x + b_x \beta)(a_y + b_y \beta) \leq s_u, \quad (8)$$

где $\beta = \sqrt{-\ln \pi_T(t)} = \sqrt{-\ln \alpha^*}$. Перед « b » в $t_{лев}$ ставят знак минус в числителе, если от этой величины значение левой ветви в (7) возрастает, а в (8) наоборот. При $t = a_t$ имеем $\pi_T(t) = 0$ или $\beta = 0$. По (8) при выполнении $a_t \leq s_u$ значение возможности безотказной работы балки принимается $R=1$. Возможность отказа Q (для правой ветви функции $\pi_T(t)$) найдем по значению β , полученного из (8) при $t_{пр} = s_u$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности. По результатам решения (8), при $t_{пр} = s_u$ находят β_{min} по абсолютному значению и возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2)$. В [1] нечеткая переменная характеризуется мерами возможности R и необходимости N . В понятиях надежности, необходимость N безотказной работы сваи равна $N=1-Q$. Надежность как мера безопасности характеризуется интервалом $[N; R]$ или в вероятностных показателях $[\underline{P}; \bar{P}]$, где \underline{P} и \bar{P} – нижнее и верхнее значения вероятности безотказной работы.

Пример 1. Дано: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $E = 30 \cdot 10^3$ МПа, $\tilde{N} = X = \{1,9; 2,1; 2,0\}$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, тогда $Y = \{4,638; 4,726; 4,682\} \cdot 10^{-8}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения возможностей: $a_x = 2,0 \cdot 10^6$ Н; $b_x = 5,74 \cdot 10^4$ Н; $a_y = 4,682 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_y = 2,544 \cdot 10^{-10}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Т.к. $a_x a_y = 0,094 < s_u = 0,1$ м, то принимаем $R=1$. Из (8) при $t_{пр} = s_u$ вычислим $\beta = \{-220,620; 1,963\}$. Соответственно $\beta_{min} = 1,963$. Тогда возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2) = \exp(-1,963^2) = 0,0212$.

Необходимость безотказной работы $N=1-Q=10,0212=0,979$. Надежность сваи характеризуется интервалом $[0,979; 1]$.

Рассмотрим вариант, в котором модуль упругости материала ствола сваи является нечеткой переменной. Математическая модель предельного состояния (3) примет вид:

$$\tilde{N} \left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{\tilde{E} A} \right) \leq s_u. \quad (9)$$

Введем обозначения: $\tilde{N} = X$, $\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} = Y$, $\frac{l}{\tilde{E}A} = Z$. Расчет надежности будем проводить также на основе принципа обобщения Л. Заде из теории нечетких множеств [17].

Формируем из (9) нечеткую переменную T как функцию от нечетких аргументов X, Y, Z в виде:

$$T = X(Y + Z) \leq s_u. \quad (10)$$

Условная «средняя» a_t определяется по (10) в виде $a_t = a_x(a_y + a_z)$, с левой ветвью $t \leq a_t$ и правой ветвью $t > a_t$ функции $\pi_T(t)$, а обратная функция t от T будет определяться через обратные функции x, y, z от X, Y, Z которые имеют вид обратной функции x от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_T(t)$ имеем:

$$t_{лев} = (a_x - b_x \beta) [(a_y - b_y \beta) + (a_z - b_z \beta)] \leq s_u, \quad (11)$$

$$t_{пр} = (a_x + b_x \beta) [(a_y + b_y \beta) + (a_z + b_z \beta)] \leq s_u. \quad (12)$$

По (10) при выполнении $a_t \leq s_u$ значение возможности безотказной работы балки принимается $R=1$. Возможность отказа Q (для правой ветви функции $\pi_T(t)$) найдем по значению β , полученного из (12) при $t_{пр} = s_u$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности. По результатам решения (12), при $t_{пр} = s_u$ находят β_{min} по абсолютному значению и возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2)$. Надежность также характеризуется интервалом $[N; R]$.

Пример 2. Воспользуемся данными примера 1: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $\tilde{N} = X = \{1,9; 2,1; 2,0\}$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $\tilde{E} = \{30,0; 28,4; 31,6\} \cdot 10^3$ МПа, $Y = \{4,400; 4,356; 4,444\} \cdot 10^{-8}$ м/Н, $Z = \{2,976; 2,735; 2,674\} \cdot 10^{-9}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения возможностей: $a_x = 2,0 \cdot 10^6$ Н; $b_x = 5,74 \cdot 10^4$ Н; $a_y = 4,400 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_y = 2,543 \cdot 10^{-10}$ м/Н; $a_z = 2,817 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $b_z = 8,728 \cdot 10^{-11}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Т.к. $a_x(a_y + a_z) = 0,094 < s_u = 0,1$ м, то принимаем $R=1$. Из (12) при $t_{пр} = s_u$ вычислим $\beta = \{-173,518; 1,858\}$. Соответственно $\beta_{min} = 1,963$. Тогда возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2) = \exp(-1,858^2) = 0,0317$. Необходимость безотказной работы $N = 1 - Q = 1 - 0,0317 = 0,968$. Надежность сваи характеризуется интервалом $[0,968; 1]$.

Результаты исследования и их анализ

Как видно из результатов расчетов в примере 1 и примере 2, с введением дополнительной нечеткой переменной интервал надежности становится шире, т.е. менее информативным, т.к. в расчет вносится дополнительная неопределенность.

Для оценки надежности сваи по всем критериям работоспособности следует условно рассматривать сваю как механическую систему с последовательным соединением элементов. Надежность сваи в целом по всем критериям работоспособности (несущей способности материала, несущей способности грунта основания, осадке) по [19] определяется по формулам:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max\left(0, \sum_{i=1}^n \underline{P}_i - (n-1)\right), \\ \overline{P} = \min(\overline{P}_i) \end{cases}$$

где \underline{P}_i и \overline{P}_i - нижняя и верхняя граница вероятности безотказной работы сваи по i -му критерию работоспособности; n – количество критериев работоспособности. В данной работе задача ограничена критерием осадки.

Если в модели (3) удастся по некоторым параметрам получить полную статистическую информацию, то результат расчета надежности можно сделать более информативным с меньшей шириной интервала, применяя комбинированный метод расчета надежности [5], например, комбинацию функции распределения возможностей для нечетких переменных и функции распределения вероятностей для случайных величин. Представим математическую модель предельного состояния (3) в виде:

$$\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) \leq \frac{s_u}{\tilde{N}}. \quad (13)$$

Введем обозначения $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) = X$, $\frac{s_u}{\tilde{N}} = Y$. Тогда (13) можно записать в виде:

$$X \leq Y, \quad (14)$$

где X – нечеткая переменная; Y – случайная величина.

Нижняя и верхняя граница вероятности безотказной работы в комбинированном методе расчета надежности по модели в общем случае записываются в виде:

$$\begin{cases} \underline{P} = \int_0^{a_x} \rho_Y(x) dx + \int_{a_x}^{+\infty} \rho_Y(x) (1 - \pi_X(x)) dx; \\ \overline{P} = \int_0^{a_x} \rho_Y(x) \pi_X(x) dx + \int_{a_x}^{+\infty} \rho_Y(x) dx, \end{cases} \quad (15)$$

где $\rho_Y(x)$ – плотность вероятности «прочности»; $\pi_X(x)$ – функция распределения возможностей для «нагрузки», как показано на рис. 3.

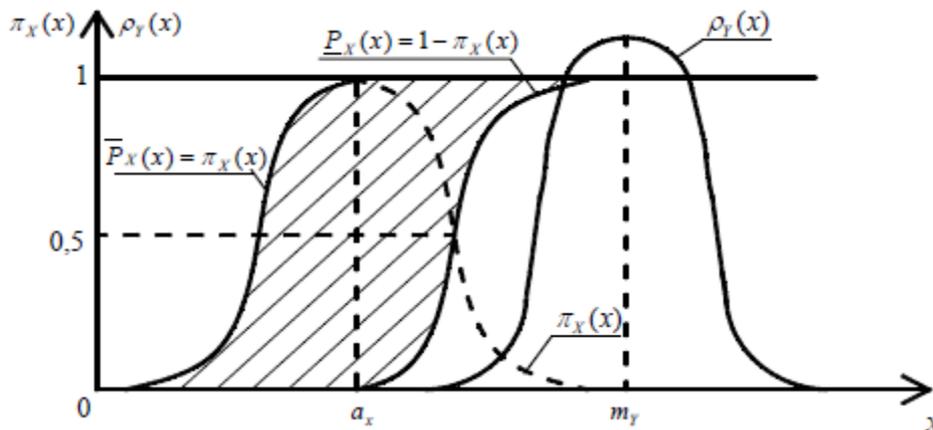


Рисунок 3 – Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ и ее границы для нечеткой переменной $X(x)$ и функция плотности вероятности $\rho_Y(x)$ нормального закона распределения для случайной величины Y

Если случайная величина Y описывается нормальным законом распределения, то в соответствии с [5] нижнюю и верхнюю границу вероятности отказа можно вычислить по формулам:

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \int_{a_x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_Y} \exp\left[-\frac{(x-m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{x-a_x}{b_x}\right)^2\right]\right) dx; \\ \bar{P} &= \int_0^{a_x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_Y} \exp\left[-\frac{(x-m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] \left(\exp\left[-\left(\frac{x-a_x}{b_x}\right)^2\right]\right) dx + \int_{a_x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_Y} \exp\left[-\frac{(x-m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] dx, \end{aligned} \right. \quad (16)$$

где m_Y и S_Y – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины (прочности) $Y = \frac{s_u}{\tilde{N}}$.

Пример 3. Воспользуемся данными примера 1: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $E = 30 \cdot 10^3$ МПа, $\bar{N} = 2,0$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $s_u = 0,1$ м, тогда $X = \{4,638; 4,726; 4,682\} \cdot 10^{-8}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения: $a_x = 4,682 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_x = 2,544 \cdot 10^{-10}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$; $m_Y = 5 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $S_Y = 2 \cdot 10^{-9}$ м/Н. Тогда по (13) вычислим нижнюю и верхнюю границу вероятности безотказной работы: $\underline{P} = 0,993$, $\bar{P} = 1$. Надежность характеризуется интервалом $[0,993; 1]$, что информативнее интервала $[0,979; 1]$ в примере 1.

Рассмотрим вариант расчета надежности комбинированным методом, в котором модуль упругости материала ствола сваи является случайной величиной. Представим математическую модель предельного состояния (13) к виду:

$$\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{\tilde{E} A} \right) \leq \frac{s_u}{\tilde{N}}. \quad (17)$$

Введем обозначения $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} \right) = X_1$, $\frac{l}{\tilde{E} A} = X_2$, $X = X_1 + X_2$, $\frac{s_u}{\tilde{N}} = Y$. Тогда (9) можно

записать в виде:

$$X = X_1 + X_2 \leq Y. \quad (18)$$

Выражение $X = X_1 + X_2$ представляет собой сумму нечетких переменных. Пример графической реализации суммы для наглядности с линейными функциями распределения возможностей нечетких переменных F_1 и F_2 представлен на рис. 4.

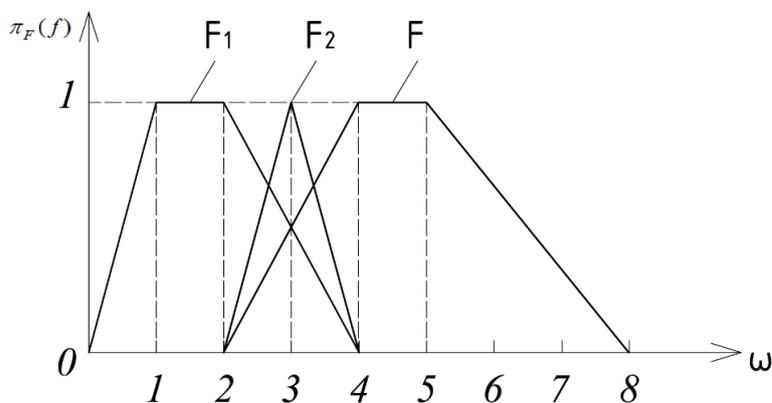


Рисунок 4 – Графическое представление суммы нечетких переменных $F = F_1 + F_2$
 $\pi_F(f)$ - функция распределения возможностей

В этом случае параметры функции распределения $\pi_x(x)$ определяются как $a_x = a_{x1} + a_{x2}$, $b_x = b_{x1} + b_{x2}$. Надежность по модели (18) вычисляется аналогично предыдущему примеру.

Пример 4. Воспользуемся данными примера 2: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $\bar{N} = 2,0$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $\tilde{E} = \{30,0; 28,4; 31,6\} \cdot 10^3$ МПа. Вычислим параметры функций распределения возможностей: $a_{x1} = 4,400 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_{x1} = 2,543 \cdot 10^{-10}$ м/Н; $a_{x2} = 2,817 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $b_{x2} = 8,728 \cdot 10^{-11}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Тогда $a_x = a_{x1} + a_{x2} = 4,628$ м/Н, $b_x = b_{x1} + b_{x2} = 3,416 \cdot 10^{-10}$ м/Н. По примеру 3: $m_Y = 5 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $S_Y = 2 \cdot 10^{-9}$ м/Н. Тогда по (13) вычислим нижнюю и верхнюю границу вероятности безотказной работы: $\underline{P} = 0,990$, $\bar{P} = 1$. Надежность характеризуется интервалом $[0,990; 1]$, что информативнее интервала $[0,968; 1]$ в примере 2.

Выводы

1. Разработаны новые методы расчета надежности свай с уширением по осадке при различной по полноте статистической информации о контролируемых параметрах;
2. На числовых примерах расчета надежности проиллюстрированы алгоритмы расчетов надежности свай с уширением по критерию осадки при различных параметрах математической модели предельного состояния и различным методам расчета надежности;
3. На числовых примерах расчета надежности проиллюстрировано влияние количества нечетких переменных и влияние полноты статистической информации на интервал, характеризующий надежность свай;
4. Разработанные методы расчетов надежности могут быть использованы при оценке надежности условной механической системы «основание-здание-сооружение», а также для количественной оценки безопасности эксплуатации свайных фундаментов и включены в нормативную литературу по расчетам надежности буроналивных свай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010. 384 с.
2. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. М.: Изд. АСВ, 2008. 188 с.
3. Fischer K., Vijoen C., Kohler J., Faber M.H. Optimal and acceptable reliabilities for structural design // Structural Safety. 2019. Vol. 76. pp. 149-161.
4. Уткин В.С. Расчет надежности висячих железобетонных свай в грунте основания // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 1 (276). С. 31-36.
5. Уткин В.С., Уткин Л.В. Новые методы расчетов надежности строительных конструкций. Вологда: ВоГТУ, 2011. 98 с.
6. Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности железобетонных балок по критерию прочности поперечной арматуры при образовании наклонных трещин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 5. С. 34-42.
7. Ivanova, T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., etc. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material // Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 7 (67). pp. 3-12.
8. Альберт И.У., Д.А. Ивашинцов, С.Г. Шульман. Определение прогибов и углов поворота одиночной свай с учетом случайного характера параметров системы свая - грунтовое основание // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. Т. 286. С. 35-42.
9. Jiang C., Li T., Zhou K. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 26. 2016. pp. 1955-1964.
10. Kozubal J., Pula W., Stach M. Reliability Assessment of a Single Pile in Unsaturated Substrate under Climate Factors Influence // Procedia Engineering. Vol. 91. 2014. pp. 310-316.
11. Li J. P., Zhang J., Liu S. N., Juang C. H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55. pp. 637-649.

12. Suzuki M., Ishii K. Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment. *Structural Safety*. 1994. No.14(1–2). pp. 47–59.
13. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. pp. 193–200.
14. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422–428.
15. Уткин В.С. Новый метод расчета осадки висячей сваи в грунте основания фундамента // *Вестник Вологодского государственного университета*. 2018. №1. С. 86–90.
16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.
17. Zadeh L. Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility // *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. No. 1. pp. 3–28.
18. Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А. Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможным методом // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2015. № 6. С. 63–67.
19. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. СПб: Любович, 1999. 166 с.

REFERENCES

1. Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzhenij [Theory of structural reliability]. Moscow: ASV, 2010. 384 p. (rus)
2. Lychev A.S. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij [Reliability of structures]. Moscow: Izd. ASV, 2008. 188 p. (rus)
3. Fischer K., Vijoan C., Kohler J., Faber M.H. Optimal and acceptable reliabilities for structural design. *Structural Safety*. 2019. Vol. 76. Pp. 149–161.
4. Utkin V.S. Raschet nadezhnosti visyachih zhelezobetonnyh svaj v grunte osnovaniya [Friction piles reliability analysis in soil base]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2018. No. 1 (276). Pp. 31–36. (rus)
5. Utkin V.S., Utkin L.V. Novye metody raschetov nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij [New methods of structures reliability analysis]. Vologda: VoGTU, 2011. 98 p. (rus)
6. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnyh balok po kriteriyu prochnosti poperechnoj armatury pri obrazovanii naklonnyh treshchin [Reliability analysis of reinforced concrete beams with shear cracks on shear bar strength]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. 2017. No. 5. Pp. 34–42. (rus)
7. Ivanova, T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., etc. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 7 (67). Pp. 3–12.
8. Al'bert I.U., D.A. Ivashincov, S.G. SHul'man. Opredelenie progibov i uglov povorota odinochnoj svai s uchetom sluchajnogo haraktera parametrov sistemy svaya - gruntovoe osnovanie [Determination of deflections and angles of rotation of a single pile taking into account the random nature of the pile parameters of the pile - soil base]. *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2017. Vol. 286. Pp. 35–42. (rus)
9. Jiang C., Li T., Zhou K. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 26. 2016. Pp. 1955–1964.
10. Kozubal J., Pula W., Stach M. Reliability Assessment of a Single Pile in Unsaturated Substrate under Climate Factors Influence. *Procedia Engineering*. Vol. 91. 2014. Pp. 310–316.
11. Li J. P., Zhang J., Liu S. N., Juang C. H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China. *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55. pp. 637–649.
12. Suzuki M., Ishii K. Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment. *Structural Safety*. 1994. No.14(1–2). Pp. 47–59.
13. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. Pp. 193–200.
14. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422–428.
15. Utkin V.S. Novyj metod rascheta osadki visyachej svai v grunte osnovaniya fundamenta [New method of settlement evaluation of friction pile in soil base]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. No. 1. Pp. 86–90. (rus)
16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.
17. Zadeh L. Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. No. 1. Pp. 3–28.