

Вероятностная оценка надежности нескальных оснований сооружений при сейсмических воздействиях

Д.т.н., ведущий научный сотрудник И.У. Альберт;
д.т.н., профессор С.Г. Шульман,
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»*

Ключевые слова: надежность; нескальные основания; теория предельных состояний; нормативная оценка надежности; сейсмические воздействия; количественная оценка надежности; адаптация нормативного метода оценки надежности; теория вероятности; расчетная модель основания

Оценка надежности нескальных оснований сооружений, расположенных в районах интенсивной сейсмичности, в нормативной (детерминированной) постановке основана на использовании теории предельных состояний [1,2]. Данная теория различает предельные состояния по несущей способности (первая группа предельных состояний) и по деформациям (вторая группа предельных состояний). Отметим особенности нормативной методики оценки надежности.

Во-первых, в расчетных соотношениях используется комплекс эмпирических коэффициентов, необходимость которых обусловлена неполнотой и недостоверностью исходной сейсмологической и иной информации, относящейся к свойствам материалов, особенностям рассматриваемой конструкции, поведения элементов сооружений в условиях сочетания статических и интенсивных низкочастотных сейсмических воздействий, степени ответственности сооружения и условий работы.

Такие коэффициенты определены на основе натурных, экспериментальных и расчетных исследований типовых объектов, близких по указанным выше исходным данным и использованию методов статистической обработки. Однако для уникальных объектов и уникальных сейсмических воздействий использование такой системы поправочных коэффициентов может привести к неадекватным результатам.

Во-вторых, в большинстве случаев нормативные методы оценки не дают количественной оценки надежности, так как в качестве окончательного результата расчета делается качественный вывод относительно надежности основания. Следовательно, сопоставление таких качественных оценок для различных вариантов конструкций оснований не представляется возможным.

В-третьих, применение нормативной оценки надежности характеризуется отсутствием системного подхода, то есть оценки надежности всей системы сооружения, включающей строительные надфундаментные конструкции, фундамент и основание.

Тем не менее, учитывая важность и широкое распространение нормативных методов оценки надежности, которые являются основным инструментом при проектировании, естественно возникает стремление адаптировать нормативный метод, используя более адекватные способы учета неполноты и недостоверности исходной информации. Суть такой адаптации состоит в придании параметрам рассматриваемой модели основания характера случайных величин или функций [3,4]. Тем самым открывается возможность использования аппарата теории вероятностей [5] и, что важно, возможность получения количественной оценки надежности в виде вероятности отказа (или вероятности безотказной работы) [6,7,8].

Использование аппарата теории вероятности дает возможность наряду с определением количественной оценки надежности основания получать также данные, характеризующие их чувствительность к случайным изменениям параметров, что позволяет в ряде случаев сократить число случайных переменных (полагая их детерминированными) и, тем самым, сократить объем необходимых вычислений.

Применение вероятностного подхода позволяет объединять результаты оценки надежности по каждому элементу системы сооружения, используя параметрическую и структурно-логическую теории надежности.

Методика количественной оценки надежности нескальных оснований

Адаптацию нормативной методики оценки надежности по критерию предельной несущей способности рассмотрим на примере нескального грунтового основания.

Аналогичная адаптация без существенных изменений может применяться и для других элементов сооружения: фундаментов, надфундаментных строительных конструкций и установленного на них оборудования [9,10]. В отличие от известной работы [8], научная новизна данного исследования заключается в оценке вероятности сохранения работоспособности нескального основания для всех возможных вариантов состояний подсистемы «фундамент – основание», в том числе при частичном отрыве подошвы фундамента.

Кроме того, данная методика может также использоваться без принципиальных отличий для оценки надежности оснований, сложенных несвязными водонасыщенными грунтами, по критерию возможности разжижения [9,10,11].

Как известно, нормативная оценка надежности нескальных оснований по первой группе предельных оснований выполняется по различным расчетным формулам в зависимости от соотношения между эксцентриситетами вертикальной нагрузки и эпюры предельной несущей способности. При выполнении определенных условий также допускается возможность сохранения несущей способности основания при частичном отрыве подошвы фундамента.

Расчетная модель основания представляет собой полубесконечную однородную среду, характеризуемую углом внутреннего трения φ , коэффициентом сцепления c , модулем деформации E и коэффициентом Пуассона μ . Несущая способность основания характеризуется эпюрой предельных давлений трапецеидального очертания с эксцентриситетом e_u и ординатами боковых сторон p_0 , p_b . Ординаты эпюры предельных давлений определяются соотношениями [2]:

$$p_0 = \xi_q F_1 \gamma_1' d + \xi_c (F_1 - 1) c / \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

$$p_b = p_0 + \xi_\gamma \gamma_1 - b(F_2 - k_{eq} F_3), \quad (2)$$

где ξ_q, ξ_c, ξ_γ – коэффициенты, зависящие от соотношения сторон фундамента;

F_1, F_2, F_3 – функции угла внутреннего трения;

c – расчетное значение коэффициента сцепления;

γ_1, γ_1' – расчетные значения удельного веса грунта выше и ниже подошвы фундамента,

d – глубина заложения фундамента;

k_{eq} – коэффициент, зависящий от балла воздействия.

Надежность (сохранение прочности) обеспечивается при выполнении условия:

$$N_a \leq \gamma_c N_{u,eq} / \gamma_n, \quad (3)$$

где N_a – вертикальная составляющая нагрузки в особом сочетании;

$N_{u,eq}$ – вертикальная составляющая силы предельного сопротивления при сейсмическом воздействии;

$\gamma_{c,eq}$ – сейсмический коэффициент условий работы;

γ_n – коэффициент надежности по степени ответственности сооружения.

В зависимости от соотношения между эксцентриситетами эквивалентная величина предельной несущей способности основания $N_{u,eq}$ может принимать одно из трех возможных значений:

- при $e_a < e_u$

$$N_{u1,eq} = 0.5bL(p_0 + p_b); \quad (4)$$

- при $e_a \geq e_u$

$$N_{u2,eq} = bLp_b / (1 + 6e_a / b); \quad (5)$$

- при $e_a > b/6$, $p_{\max} = 2N_a / [3l(b/2 - e_a)] \leq p_b$

$$N_{u3eq} = 0 / 5b_c l p_b. \quad (6)$$

В группе условий (6), определяющих возможность сохранения прочности основания при частичном отрыве подошвы фундамента, обозначены:

p_{\max} – максимальное давление по подошве фундамента при частичном отрыве подошвы;

p_b – ордината эпюры для фундамента, имеющего условную ширину b_c ;

$b_c = 1.5(b - e_a)$ – размер подошвы, равный размеру сжатой зоны;

e_a – эксцентриситет вертикальной нагрузки, $e_a = M / N$;

M, N – соответственно, вертикальная нагрузка и изгибающий момент, приведенный к подошве фундамента;

e_u – эксцентриситет равнодействующей эпюры предельного давления основания;

$e_u = b(p_b - p_0) / 6(p_b + p_0)$;

N_{u1}, N_{u2}, N_{u3} – варианты значений вертикальной составляющей силы предельного сопротивления основания.

Нормативная оценка надежности заключается в проверке выполнения групп неравенств, определяющих условия сохранения работоспособности основания в детерминированной постановке:

$$\Phi_1 = F_s / F_v - \sin(\varphi) < 0 \quad \square \quad (7)$$

$$\Phi_2 = e_a - b/6 < 0 \quad \square \quad (8)$$

$$\Phi_3 = e_a - e_u < 0 \quad \square \quad (9)$$

$$\Phi_4 = e_a - b/3 < 0 \quad \square \quad (10)$$

$$\Phi_5 = p_{\max} - \bar{p}_b < 0 \quad \square \quad (11)$$

$$\Phi_6 = F_v - N_{u1} < 0 \quad \square \quad (12)$$

$$\Phi_7 = F_v - N_{u2} < 0 \quad \square \quad (13)$$

$$\Phi_8 = F_v - N_{u3} < 0 \quad \square \quad (14)$$

В зависимости от выполнения комбинации условий, выражаемых соотношениями (7-14), вертикальная сила предельного сопротивления основания вычисляется по соотношениям:

- при $\Phi_1 < 0, \Phi_2 < 0, \Phi_3 < 0$ сила

$$N_{u,eq} = N_{u1}; \quad (15)$$

- при $\Phi_1 < 0, \Phi_2 < 0, \Phi_3 > 0$ сила

$$N_{u,eq} = N_{u2}; \quad (16)$$

- при $\Phi_1 < 0, \Phi_3 < 0, \Phi_4 < 0, \Phi_5 < 0$ сила

$$N_{ueq} = N_{u3}. \quad (17)$$

Вероятностная интерпретация этих условий позволяет получить расчетные соотношения для количественной оценки надежности (вероятности отказа) основания.

При проведении такой интерпретации обычно используется прием, состоящий в разложении в ряд Тейлора функций, определяющих надежную работу основания и сохранение в разложениях только линейных слагаемых [3,5,13,15]. Далее используются известные соотношения теории вероятностей, позволяющие вычислить математическое ожидание и дисперсию линейной функции случайных аргументов. При необходимости в разложениях можно оставить слагаемые более высокого порядка с последующей проверкой значимости дополнительных слагаемых.

Приведем в качестве примера такую интерпретацию для первого варианта сочетаний условий, определяющих надежность основания. Эти условия заключаются в определении вероятностей их выполнения P_i :

- а) вероятность выполнения условия глубинного сдвига:

$$P_1 = P(\Phi_1 < 0) = P\left[\frac{F_s}{F_v} - \sin(\varphi)\right] < 0, \quad (18)$$

где F_s, F_v – горизонтальная и вертикальная компоненты суммарных (статических и инерционных сейсмических) нагрузок на основание;

φ – угол внутреннего трения грунта, выполнение данного условия учитывается при всех вариантах соотношений между эксцентриситетами нагрузки и эпюры предельной несущей способности основания;

- б) вероятность выполнения соотношения между эксцентриситетами вертикальной нагрузки и эпюры предельной несущей способности:

$$P_3 = P(\Phi_3 < 0) = P(e_a - e_u < 0); \quad (19)$$

- в) вероятность непревышения вертикальной нагрузки предельной силы сопротивления основания:

$$P_6 = P(\Phi_6 < 0) = P(F_v - N_{u1} < 0). \quad (20)$$

Вероятность надежной работы основания при одновременном выполнении условий (7,9,12) определяется произведением:

$$N_1 = P_1 \cdot P_3 \cdot P_6. \quad (21)$$

Вероятность надежной работы основания при одновременном выполнении условий (7,9,12) определяется произведением:

$$N_2 = P_1 \cdot V_3 \cdot P_7, \quad V_3 = 1 - P_3. \quad (22)$$

Для вычисления вероятности выполнения условия (7), считая величины F_s, F_v и φ нормально распределенными, определим вероятностные характеристики функции

$\Phi_1 = \frac{F_s}{F_v} - \sin(\varphi)$ – математическое ожидание $m(\Phi_1)$ и дисперсию $D(\Phi_1)$:

$$m(\Phi_1) = \frac{m(F_s)}{m(F_v)} - \sin[m(\varphi)], \quad (23)$$

где $m(F_s), m(F_v), D(F_s), D(F_v)$ – математические ожидания и дисперсии вертикальной и горизонтальной составляющих нагрузки.

Дисперсия функции Φ_1 определяется методом прямой линеаризации, для чего представим ее в виде разложения в ряд Тейлора в окрестности математических ожиданий переменных с сохранением только линейных относительно производных слагаемых:

$$\Phi_1 \approx m(\Phi_1) + \frac{\partial \Phi_1}{\partial F_s} \Big|_m [(F_s - m(F_s))] + \frac{\partial \Phi_1}{\partial F_v} \Big|_m [F_v - m(F_v)] + \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} \Big|_m [\varphi - m(\varphi)], \quad (24)$$

$$D[\Phi_1(F_s, F_v, \varphi)] = \frac{1}{[m(F_v)]^2} \cdot D(F_s) + \left\{ \frac{[m(F_s)]^2}{[m(F_v)]^4} \cdot D(F_v) + \cos^2[m(\varphi)] \cdot D(\varphi) + 2 \frac{m(F_s)}{[m(F_v)]^3} \cdot \sqrt{D(F_s)D(F_v)} \right\}. \quad (25)$$

Частные производные функции Φ_1 , определяемые при значениях аргументов, равных соответствующим математическим ожиданиям:

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial F_s} \Big|_m = \frac{1}{m(F_v)}; \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial F_v} \Big|_m = -\frac{m(F_s)}{m^2(F_v)}; \quad \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi} \Big|_m = \cos[m(\varphi)]. \quad (26)$$

Если аргументы линейной функции имеют нормальное распределение, то плотность вероятности самой функции также подчиняется нормальному распределению, что позволяет определить искомую вероятность выполнения условия (7):

$$P_1 = P(\Phi_1 < 0) = \frac{1}{2} [1 - \Phi_0[\frac{m(\Phi_1)}{\sqrt{D(\Phi_1)}}]], \quad (27)$$

где Φ_0 – интеграл вероятности.

Аналогичным образом осуществляется вычисление вероятностей выполнения всех условий сохранения прочности основания.

Для вычисления компонент вертикальной нагрузки F_v, F_s изгибающего момента M при возникновении сейсмического воздействия используется динамический расчет колебаний сооружения на основании. Пример такого расчета изложен в работе [6]. Оценка надежности основания в этом случае включает случайные характеристики сейсмического воздействия (балл воздействия и собственные частоты колебаний сооружения на нескальном основании). Методика количественной оценки надежности основания по второй группе предельных состояний аналогична вышеизложенной при условии задания предельно допустимых кренов и осадок сооружения.

Тем же методом оценивается надежность основания в соответствии с теорией предельного равновесия. В этом случае рассматривается вероятность плоского сдвига по подошве фундамента с учетом активного и пассивного боковых давлений на заглубленную часть фундамента.

Заключение

Разработана методика количественной оценки надежности одного из элементов системы сооружения – нескального грунтового основания. Приведены необходимые расчетные соотношения, полученные на основе использования математического аппарата теории вероятностей, параметрической и структурно-логической теорий надежности.

Методика может быть использована также для количественной оценки надежности других элементов системы сооружения (фундамента, надфундаментных строительных конструкций и установленного в сооружении оборудования).

Литература

1. СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений / Госкомитет по делам строительства. М., 1985. 41 с.
2. Пособие к СНиП 2.02.01-83 / НИИОСП им. Н.М.Герсеванова. М.: Стройиздат, 1986. 415 с.
3. Беллендир Е.Н., Ивашинцев Д.А., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. СПб: ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева», 2003. т. 1.С. 326-336.
4. Ермолаев Н.Н., Михеев В.В. Надежность оснований сооружений. Л.: Стройиздат, 1976. С. 55-64.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. С. 67-106.
6. Альберт И.У. Численная оценка вероятности отказа системы «сооружение – сейсмоизолирующий фундамент – основание» при сейсмических воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2008. №1(14). С. 17-24.
7. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость.СПб.: Наука,1998. 254 с.
8. Бирбраер А.Н., Шульман, С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 301 с.
9. Idriss I.M., Yound T.L. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. Vol. 127. №4. Pp.297-313.
10. Esteva L. Geology and probability in the assessment of seismic risk. Proc. Second Intl. Congress Int. Assoc. Eng. Geology., San Paulo, Brazil. 1974. Pp. 378-392.
11. Freudenthal A.M. Safety and probability of structural failure // Proc. ASCE. 1954. Vol. 80. Paper №468.
12. Барштейн, М.Ф. Приложение вероятностных методов к расчету сооружений на сейсмические воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 1960. №2. С. 25–29.
13. Бугаенко С.Е., Буторин С.Л., Шульман Г.С., Шульман С.Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при экстремальных воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 2005. 575 с.
14. Wolf J. P. Soil – structure – interaction analysis in time domain. New Jersey: Prentice-Hall, 1988. 446 p.
15. Альберт И.У. Вероятностная оценка надежности системы «сейсмоизолированное сооружение – основание» при сейсмических воздействиях // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2005. Т. 244. С. 203-209.
16. Аугусти, Г., Барретта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1988. 584 с.
17. Аубакиров, А.Т. Фундаменты и подземные сооружения при динамических воздействиях. Ташкент: Фан, 1975. С. 50 – 54.
18. Kanai K. Improved empirical formula for the seismic characteristics of the ground // Bull. of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1957. Vol. 35. Pp. 73-81.

** Июля Ушерович Альберт, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)590-19-25; эл. почта: albertyu@vniig.ru*

© Альберт И.У., Шульман С.Г., 2012

doi: 10.5862/MCE.35.10

Probabilistic assessment of the ground base reliability under the seismic load

I.U. Albert, S.G. Shulman,

JSC Vedeneyev VNIIG, Saint-Petersburg, Russia

+7(903)314-42-26; e-mail: nikola_535@mail.ru

Key words

reliability; ground bases; limit state theory; regulatory assessment of reliability; seismic load; quantitative assessment; adaptation; probability theory; estimated base model

Abstract

The article describes the method of probabilistic reliability assessment of the ground bases constructions based on the adaptation of the regulatory assessment methodology and the use of the probability theory. In contrast to the standard (deterministic) methods, probabilistic assessment provides a quantitative expression of the reliability with the random nature of seismic effects and properties of soils. An analysis of the reliability index sensitivity to random changes in the parameters can be simultaneously performed, that reduces the number of random factors in the calculation of reliability.

In this paper, the estimated base model is a semi-infinite homogeneous medium, but the described methods can be used for more complex models of soil bases. The method consists in adapting the relations used in the regulatory methodology to assess the reliability with the random nature of the values within the relations. This adaptation is realized by the construction of the model response function followed by Fourier series expansion and preservation of the linear terms in the expansion. Next, the apparatus of probability theory is used, which calculates the probability characteristics of the response function (the mean and variance). Subject to the requirements of a normal distribution of the original random variables obtained data allow us to compute probability of the reliable operation of the base.

References

1. SNIP 2.02.01-83 *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Goskomitet po delam stroitelstva* [SNIP 2.02.01-83. Foundations of buildings and structures. The State Committee for Construction]. Moscow, 1985. 41 p. (rus)
2. *Posobiye k SNiP 2.02.01-83 / Izd.NIIOSP im. N.M.Gersevanova* [Guide to SNIP 2.02.01-83. Published by N.M. Gersevanov NIIOSP]. Moscow: Stroyizdat. 1986. 415 p. (rus)
3. Bellendir E.N., Ivashintsev D.A., Stefanyshyn D.V. Finagenov O.M. Shulman S.G. *Veroyatnostnyye metody otsenki nadezhnosti gruntovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Probabilistic methods for assessing the reliability of underground waterworks]. Saint-Petersburg: OAO VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 2003. Vol. 1. Pp. 326-336. (rus)
4. Ermolaev N.N., Mikheev V.V. *Nadezhnost osnovaniy sooruzheniy* [Safety of structures' bases]. Leningrad: Stroyizdat, 1976. 152 p. (rus)
5. Venttsel Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 1969. 576 p. (rus)
6. Albert I.U. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2008. No. 1 (14). Pp. 17-24. (rus)
7. Birbraer. A.N. *Raschet konstruktsiy na seysmostoykost* [Structural analysis on seismic stability]. Saint- Petersburg: Nauka, 1998. 254 p. (rus)
8. Birbraer A. N., Schulman S.G. *Prochnost i nadezhnost konstruktsiy AES pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh* [Strength and reliability of nuclear power plant designs in special dynamic effects]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 301 p. (rus)
9. Idriss I.M., Yound T. L. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER / NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2001. Vol. 127. No. 4. Pp. 297-312.
10. Esteva L. Geology and probability in the assessment of seismic risk. *Proc. Second Intl. Congress Int. Assoc. Eng. Geology, San Paulo, Brazil*. 1974. Pp. 288-392.
11. Freudenthal A.M. Safety and probability of structural failure. *Proc. ASCE*. 1954. Vol. 80. Paper No. 468.
12. Barshteyn. M.F. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1960. No. 2. Pp. 25 - 29. (rus)

13. Bugaenko S.E., Butorin S.L., Shulman G.S., Shulman S.G. *Prochnost i nadezhnost konstruksiy AES pri ekstremalnykh vozdeystviyakh* [Strength and reliability of nuclear power plant designs under extreme conditions]. Moscow: Energoatomizdat, 2005. 575 p. (rus)
14. Wolf J. P. *Soil - structure - interaction analysis in time domain*. New Jersey: Prentice-Hall, 1988. 446 p.
15. Albert I.U. *Izvestiya VNIIG im.B.E.Vedeneyeva*. 2005. Vol. 244. Pp. 203-209. (rus)
16. Augusti G.A., Barretta A., Kashiati F. *Veroyatnostnyye metody v stroitel'nom proyektirovanii* [Probabilistic methods in structural design]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 584 p. (rus)
17. Aubakirov A.T. *Fundamenty i podzemnyye sooruzheniya pri dinamicheskikh vozdeystviyakh. Sbornik statey* [Foundations and underground structures under dynamic loads. Collection of papers]. Tashkent: Fan, 1975. Pp. 50 - 54. (rus)
18. Kanai K. Improved empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bull. of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. 1957. Vol. 35. Pp. 73-99.

Full text of this article in Russian: pp. 79-84