

УДК 69.035.4

В.Н. Борисов, О.Н. Павлов, М.В. Толмачев

**ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СВОЙСТВ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ ОБДЕЛКИ
КАМЕРНЫХ ВЫРАБОТОК КАНАЛИЗАЦИОННЫХ
СТАНЦИЙ**

Применение вероятностных понятий в теории надежности строительных конструкций обусловлено наличием четырех групп источников неопределенности [1-4]:

- изменчивость параметров и характеристик (свойств материала - бетона, арматуры, пород, размеров и геометрии элементов, нагрузок, водопритока и т.д.);

- ошибки оценок параметров и характеристик, возникающие из-за неполноты статистического материала или невозможности точных измерений;

- несовершенства моделей и методов, описывающих процесс, возникающих по причине использования упрощений при рассмотрении сложных явлений из-за отсутствия понимания явления самого по себе, так и применения упрощенного описания;

- ошибки человека - инженера или оператора при проектировании, изготовлении, строительстве или эксплуатации конструкции.

Есть фундаментальная разница между первой группой и остальными. Неопределенности от изменчивости не устранимы, тогда как последние можно уменьшить.

Конструкции проектируются таким образом, чтобы за все время службы конструкции ее несущая способность R

с очень высокой вероятностью была больше нагрузки S :

$$Z = g(x_1, \dots, x_n) = R - S \geq 0. \quad (1)$$

Резерв прочности Z в состоянии безотказной работы будет величиной положительной. Определение резерва прочности было бы тривиальной задачей, если при оценке каждого из слагаемых (иначе, для параметров задачи x_1, \dots, x_n) отсутствовали указанные выше неопределенности.

Задача определения надежности несущих конструкций обычно формулируется с помощью понятия функции предельного состояния $Z = 0$ по формуле (1), зависящей от случайных параметров x_1, \dots, x_n : для породы, нагрузки и отделки: геометрии, прочностных характеристик бетона и арматуры. Предельная поверхность $Z = 0$ отделяет два состояния: состояние отказа - $Z < 0$ и безопасное состояние $Z > 0$.

В статье рассматриваются характеристики неопределенности для физико-механических свойств пород г. Москвы и для свойств железобетона отделки камерных выработок канализационных станций глубокого заложения.

Породы

Основным исходным параметром при проектировании отделки камерных выработок канализационных станций является коэффициент крепости сла-

гающих пород f . По данным Мосгоргеотреста и отчетам МИСИ (рук. работ проф. Мостков В.М.) можно построить аппроксимации зависимостей между основными свойствами пород, участвующими при оценках надежности: модуль упругой деформации E , коэффициент сцепления c , угол внутреннего трения φ , прочность на сжатие R_c и коэффициент упругого отпора K_0 . Такие зависимости для средних величин приведены на рисунке.

Как видно из графиков наиболее тесная связь имеет место между коэффициентом сцепления и коэффициентом крепости. Кроме того, подсчитан коэффициент корреляции между коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения. Он оказался равным 0,927 (!). Т.е. в расчетах надежности следует этот факт обязательно учитывать.

Исходя из опыта вероятностных расчетов надежности гидросооружений в работе [4] показатели свойств пород предлагается рассматривать при коэффициенте вариации $v < 0,1$ - детерминированными величинами; при $v = 0,1 - 0,3$ - распределенными по нормальному закону; при $v = 0,2 - 0,5$ - по логнормальному закону; при $v > 0,5$ - использовать равномерное распределение. Обычно моделирование показателей свойств пород в виде случайных величин, распределенных таким образом, идет в запас риска.

В работе [1] приведены оценки коэффициентов вариации для слабых пород: для коэффициента сцепления – диапазон (0,15-0,6), угла внутреннего трения – диапазон (0,1-0,25), модуля деформации – (0,2-0,4). В работе [4] эти диапазоны примерно такие же. Эти же диапазоны изменчивости подтверждаются и в работе [5].

В качестве функции предельного состояния пород, подчиняющихся условию разрушения Кулона-Мора, в соответствии с работой [6] возьмем функцию

$$g_s = \sin \varphi J_1 + \cos \varphi c - J_2. \quad (2)$$

где $J_1 = (\sigma_x + \sigma_y)/2$,

$$J_2 = \left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

- инварианты напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} .

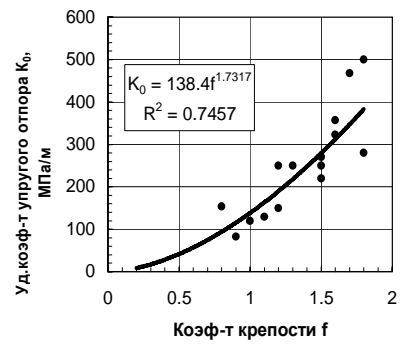
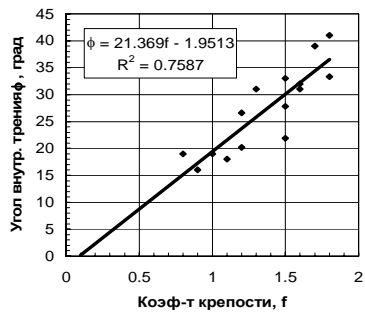
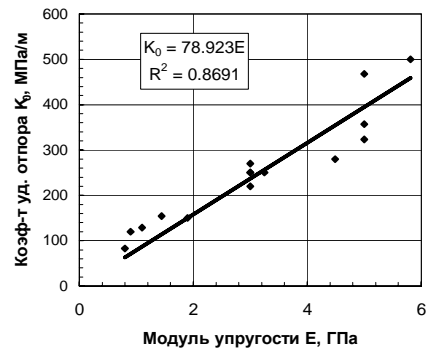
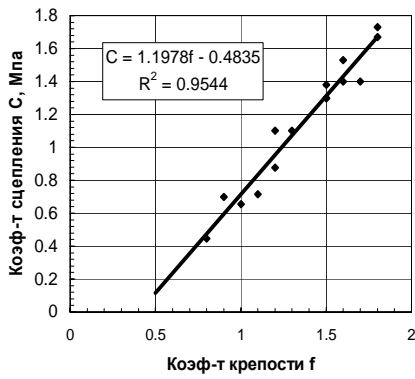
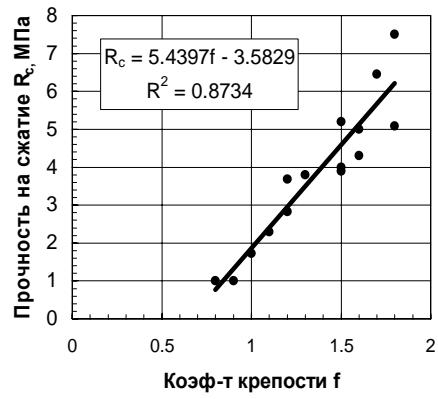
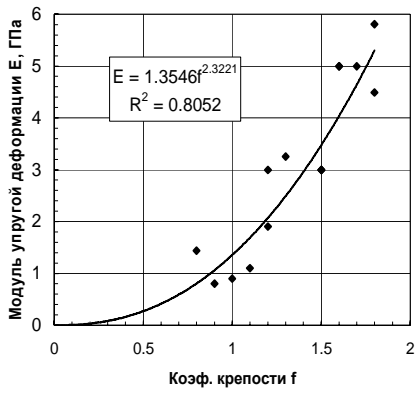
Бетон

Важнейшей причиной изменчивости свойств бетона служат изменчивость свойств его компонентов, разбросы в подборе состава, случайные влияния в процессе перемешивания, транспортирования, укладки и последующего твердения, а также различия в системе контроля качества и методов испытаний.

В соответствии с [1] данные о прочности на сжатие показывают, что для средних и высокопрочных бетонов стандартное отклонение почти постоянно, а для низкопрочных бетонов постоянен коэффициент вариации. Прочность бетонов составляет 12,5—28 МПа. Статистические параметры распределения прочности на сжатие зависят от качества изготовления и контроля. При сжатии призм стандартное отклонение по прочности на 20-30 % больше чем при сжатии кубов.

В табл. 1 приведены данные о порядке величин коэффициентов вариации и стандартных отклонений. В этих величинах, естественно, содержится разброс, вызываемый самими испытаниями. Он может быть установлен путем отбора проб из одного замеса. Разброс в испытаниях характеризуется коэффициентом вариации $v = 0,005 \div 0,08$ (в среднем $v = 0,04$).

Распределение прочности бетона на сжатие лучше всего представляется нормальным законом.



Аппроксимации зависимостей между основными свойствами пород (R^2 - достоверность аппроксимации)

Таблица 1
**Стандартные отклонения и коэффициенты вариации
 прочности на сжатие для обычных тяжелых бетонов [1]**

Место бетона и уровень контроля	Коэффициент вариации для бетонов со средней прочностью на сжатие $V_m < 20$ МПа	Стандартное отклонение для бетонов со средней прочностью на сжатие $V_m \geq 20$ МПа
Бетонные заводы с хорошими составляющими материалами, обученным персоналом и безупречным контролем изготовления	0,125 – 0,20 (0,15)	2,5-4,0 (3,0)
Большие стройплощадки с привозным бетоном и нормальными условиями изготовления и контроля	0,20 – 0,275 (0,225)	4,0 – 5,5 (4,5)
Малые стройплощадки с изготовлением бетона на месте	0,275 – 0,35 (0,3)	5,5 – 7,0 (6,0)

Примечание: В скобках даны средние значения.

В работе [4] для коэффициента вариации модуля деформации предлагает диапазон (0,20-0,30).

Несмотря на то, что статистическое распределение для прочности бетона на сжатие уже длительное время представляет интерес, чаще всего, оно оказывает значительно меньшее влияние на общее поведение конструкции нежели чем арматура. Это целиком объясняется обычной философией проектирования - достичь состояния пластического разрушения конструкции.

Арматура

В работе [2] отмечается, что вариации предела текучести и максимальной прочности по длине типичного арматурного стержня пренебрежимо малы. Поэтому корреляция сопротивления растяжению можно считать единицей. Изменчивость показателей для стержней, взятых из различных источников, приблизительно оценивается около 4–7 %.

Изменчивость поперечных сечений мала с отношением действительной площади к номинальной со средним значением 1,0 и ковариацией около 2 %. Для предела текучести F_y предложено использовать Бета – распределение:

$$f_{F_y} = A \left(\frac{F_y - a}{c} \right)^B \left(\frac{b - F_y}{c} \right)^C \quad (4)$$

где константы (A, B, C, a, b, c) получены путем подгонки при сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Они приведены в табл. 2 для сталей класса А300 и А400 МПа для диапазона $a \leq F_y \leq b$.

Определение функции предельного состояния производилось в соответствии с документом [8] для внецентренно сжатых прямоугольных элементов с симметричной арматурой для сечений, нормальных к продольной оси.

Таблица 2
**Коэффициенты функции распределения вероятностей
 для сопротивления растяжению арматурных стержней (МПа)**

Класс	Среднее	Ковар.	А	В	С	а	б	с
А300	≈ 310	≈ 35	4.106	2.21	3.82	228	428	200
А400	≈ 461	≈ 38	7.587	2.02	6.95	372	703	331

Для бетонов классов В20, В25 и классов арматуры А400, А500 относительная высота сжатой зоны бетона ξ_R , при котором предельное состояние наступает одновременно с достижением в растянутой арматуре напряжения, равного расчетному сопротивлению R_s , приближенно равен 0,6. Ширину сечения b примем равной 1 м.

Прочность бетона R_b , сопротивление арматуры растяжению R_s , площадь сечений арматуры A_s , рабочая высота сечения h_0 , действующие моменты и нормальные силы M и N соответственно, высота сжатой зоны x , расстояние от равнодействующих усилий в арматуре до ближайшей грани a .

Введем обозначения

$$a_n = N / R_b h_0, a_m = M / R_b h_0^2,$$

$$a_s = R_s A_s / R_b h_0, \xi = x / h_0.$$

Функция предельного состояния $g_b(M, N, R_b, R_s)$ тогда будет иметь вид:

$$\text{а) для } \xi \leq \xi_R \\ g_b = \eta [0,5 a_n (1 - a_n) + a_s (1 - a / h_0)] - a_m \quad (5)$$

$$\text{б) для } \xi > \xi_R \\ g_b = \eta [(1 + 8 a_s + 15 a_s^2) \xi - (0,5 + 5 a_s + 12,5 a_s^2) \xi^2 - a_s (4,5 a_s + 2 + a / h_0) - 0,5 a_n] - a_m, \quad (6)$$

где $\xi = (1 + 5 a_s)^{-1} (a_n + 3 a_s)$.

$$\text{В этих формулах } \eta = (1 - a_n / a_{ncr}); a_{ncr} = \frac{3200}{(l_0 / h_0)^2} (0,125 + 4,1 a_s).$$

Здесь расчетная длина l_0 для обычных размеров выработанной части камерных выработок находится в диапазоне (7 ч 13) м.

В этих формулах все величины рассматриваются как случайные и распределенные в соответствии со сказанным выше для бетонов и арматуры, включая рабочую высоту сечения h_0 с нормальным законом распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Пер. с нем. - М.: Стройиздат, 1994. - 288 с.

2. Melchers R.E. Structural Reliability. Analysis and Prediction. 2nd Ed. - N.Y.: Wiley & Sons, 2002. - 500 p.

3. Толмачев М.В. О надежности обделок камерных выработок канализационных станций глубокого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: Изд-во МГТУ, -2006. - № 1. - С. 38 - 42.

4. Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанюшин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. - С.-П.: ОАО "ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева", 2002. - 510 с.

5. Клемяционок П.Л. Информационное обеспечение в задачах расчета надежности оснований и планирования испытаний грунтов // Безопасность энергетических сооружений // Научн. техн. сборник. - М.: АО НИИЭС. - 1998. вып.6.

6. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. - М.: Физматгиз. - 1960. - 243с.

7. Wang D., Zhang Q. Modelling and Reliability Analysis of Lining Structures in Chinese Tunnels//Conf. "Safety, Risk, Reliability - Trends in Engineering" - Malta, 2001.

8. СНиП 2.06.08-87 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений/Минэнерго СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 32 с.

Коротко об авторах

Борисов Владимир Николаевич – профессор,

Павлов О.Н. – кандидат технических наук

Московский государственный горный университет.

Толмачев М.В. – инженер, ГУП Мосинжпроект.