

$$\sigma = \left(\frac{2(4V + \rho V^2 + \varepsilon \varepsilon_0 E^2)}{3K} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Из полученной формулы следует, что, зная упругие, акустические, электрические свойства горных пород, их плотность, скорость и поверхностную энергию, а также, измеряя в точке приема напряженность электромагнитного поля, возникающего при разрушении горных пород, и зная модуль всестороннего сжатия K можно определить действующие напряжения σ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. - М.: Недра, 1987. - 248 с.
2. Воробьев А.А., Тонконогов М.П., Векслер Ю.А. Теоретические вопросы физики горных пород. - М.: Недра, 1977. - 150 с.

УДК 622.837+519.24

В.В. Левит, Г.Т. Рубец, Н.Т. Бобро

ПРИЛОЖИМОСТЬ ТЕОРИИ НАИБОЛЕЕ СЛАБОГО ЗВЕНА К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ТОЛЩ, ВСКРЫВАЕМЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СТВОЛАМИ

На устойчивость подземного сооружения наибольшее влияние оказывают прочностные свойства, напряженное состояние, нагрузка на сооружение и его несущая способность. Наличие большого объема информации по прочностным свойствам пород позволяет подобрать соответствующую теоретическую статистическую модель и с ее помощью приближенно прогнозировать прочность пород в массиве, а также допустимые минимальные значения, применяя расширенную статистическую теорию хрупкой прочности Вейбулла, которая основана на концепции наиболее «слабого звена» с независимыми по прочности «звеньями» и методах статистической теории экстремальных значений. На основе обобщения модели наиболее слабого звена можно оценить также несущую способность слоистого массива в целом и вероятность разрушения его в зависимости от действующих напряжений. Имеющиеся результаты испытаний на прочность слоистых образцов подтверждают перспективность применения таких моделей для оценки прочности слоистых и блочных массивов. Для характе-

ристики прочности многослойного массива недостаточно знания прочностных характеристик слоев, из которых состоит массив. Поэтому возникает задача обобщенной прочностной оценки многослойного массива в целом для системы нескольких слоев.

Для двухслойного образца средневзвешенное значение прочности запишется так [1,4]:

$$R = \frac{h_1}{h} R_1 + \frac{h_2}{h} R_2, \quad (1)$$

где R, R_1, R_2 - прочность из, соответственно, многослойного образца наименее и наиболее прочных слоев; h_1, h_2 - мощности менее и более прочных слоев; h - высота составного образца; $h = h_1 + h_2$.

Для оценки прочности двухслойных и трехслойных образцов предложена эмпирическая формула:

$$R = \frac{h_1}{h} R_1 + \frac{h_2}{h} R_2 - \alpha\beta \left[h_2 \sqrt{h_1} \sqrt[5]{(R_2 - R_1)^5} \right], \quad (2)$$

где $\alpha = 2,5$ и $\beta = 1$ для двух слоев; $\alpha = 2,5$ и $\beta = 1,2$ для трех и более слоев.

В табл. 1 представлены результаты испытаний горных пород различных литологических разностей, слагающих два или три слоя породной структуры, проведенные в ИГТМ НАН Украины. Определены средние, средневзвешенные и приведенные значения прочности каждой многослойной толщи. Анализ результатов показывает, что вычисленные по (2) значения прочности меньше средневзвешенных, а средневзвешенные меньше средних значений прочности многослойной толщи. Различие составляет от 5% до 35%.

Анализ результатов также показывает, что приведенная прочность породной структуры, сложенной несколькими слоями, приближается к прочности пород наименее прочного слоя. Поэтому, в расчетах при прогнозировании устойчивости выработок следует принимать значение приведенной прочности пород многослойной толщи, которые наиболее близки к прочности массива.

Рассмотрим метод построения вероятностной модели разрушения слоистых образцов и конструкций на основе обобщения статистической теории прочности Вейбулла (наиболее слабого звена) [2]. Прочностные характеристики каждого слоя, представленные своими средними величинами и величиной разброса в самом общем виде могут быть охарактеризованы своими функциями распределения вероятностей или, другими словами, функциями вероятности разрушения $F_i(x)$ при действующем напряжении, меньшем или равном x . Веро-

ятность неразрушения i -го слоя $1 - F_i(x)$. Для системы, состоящей из n слоев, вероятность неразрушения запишется:

$$\prod_{i=1}^n [1 - F_i(x)]. \quad (3)$$

Вероятность разрушения слоистой конструкции массива имеет вид

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(x)]. \quad (4)$$

Это есть вероятность разрушения системы элементов, соединенных последовательно в смысле прочностной надежности, при условии, что прочностные элементы имеют различные функции распределения. Таким образом, полученная модель является обобщением статистической теории прочности наиболее слабого звена. Плотность вероятности, например, при $n = 2$, запишется:

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x) - f_1(x)F_2(x) - F_1(x)f_2(x), \quad (5)$$

где $f_i(x)$ - плотности вероятности для $F_i(x)$.

В случае, когда прочностные характеристики слоев имеют нормальные распределения с параметрами μ_i и σ_i , среднее значение приведенной прочности находят из соотношения

$$\mu_x = \frac{1}{2} \left\{ (\mu_1 + \mu_2) - (\mu_2 - \mu_1) \left[\Phi(\alpha) - \frac{l^{-\alpha^2}}{\sqrt{\pi} \cdot \alpha} \right] \right\}, \quad (6)$$

где $\mu_2 > \mu_1$, $\alpha = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}}$, $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ - интеграл вероятностей.

Это соотношение дает хорошую сходимость при небольших коэффициентах вариации прочности слоев и небольшом различии между средними значениями. В других случаях применяют распределения, которые физически обоснованы для таких величин, как прочность, и учитывают ограниченность и асимметричность эмпирических кривых распределения прочностных свойств. С этой целью применяют распределение Рэлея

$$F_i(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right], \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

Таблица 1 - Оценка прочности сложеноструктурной толщи, и

Символика пласта	Литологические разности сложеноструктурной толщи	$\sigma_{сж}$, МПа	Среднее по кровле, почве, МПа	Средневзвешенная прочность, R_1 , МПа	Приведенная прочность, $R_{зсж}$, МПа
кровля, l_6^a	сл. песчаный	89	121	102	89
	сл. глинистый	73			
	известняк	202			
почва, l_6^a	сл. песчаный	48	77	75	67
	песчаник	87			
	сл. песчаный	96			
кровля, l_5	сл. песчаный	76	87	83	74
	сл. песчано-глинистый	98			
почва, l_5	песчаник	127	102	112	87
	сл. песчаный	78			
кровля, l_6^a	сл. песчано-глинистый	50	70	57	46
	сл. глинистый	33			
	известняк	125			
почва, l_6^a	сл. песчаный	49	47	48	46
	сл. песчано-глинистый	46			
кровля, m_3	известняк	84	108	112	88
	сл. песчаный	133			
почва, m_3	сл. песчаный	127	94	98	87
	сл. песчано-глинистый	84			
	сл. песчаный	72			
кровля, l_6^a	сл. песчано-глинистый	89	88	86	81
	сл. глинистый	74			
	известняк	101			
почва, l_6^a	сл. песчаный	82	77	68	62
	сл. песчано-глинистый	56			
	песчаник	94			

где μ_i и σ_i - параметры расположения и масштаба,

$$\mu_i = \bar{x}_i - \frac{\sqrt{\pi}}{2} Si; \sigma_i = \frac{Si}{\left(\frac{4-\pi}{4}\right)}; \bar{x}_i \text{ и } Si - \text{среднее значение и среднее квадратиче-}$$

ское отклонение прочности i -го слоя. Для среднего значения при $n = 2$ получаем

$$\bar{x} = \mu_1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \sigma_1 \Phi(a) + \frac{c}{a} \cdot \frac{\sigma_2}{\exp(c^2)} [1 - \Phi(bc)] \right\}, \mu_1 > \mu_2, \quad (8)$$

где $a = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sigma_1}$; $b = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$; $c = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$. Результаты вычислений по (6) и экспериментальные данные [3] лучше согласуются между собой, чем при нормальных распределениях прочности слоев.

Для целей дальнейшего использования результирующего распределения в оценках надежности подземных сооружений, исходные распределения должны обладать свойствами «самовоспроизводимости» при функциональном преобразовании, т.е. сохранять функциональную форму распределения, изменяя лишь входящие туда параметры. Такому условию удовлетворяют распределения вида

$$F(x) = 1 - \exp[-\varphi(x)]. \quad (9)$$

Функция $\varphi(x)$ должна быть такого типа, чтобы конечная сумма таких функций была снова функцией того же типа, т.е., чтобы

$$\sum_{i=1}^n \varphi(x, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i) = \varphi(x, \alpha, \beta, \gamma). \quad (10)$$

Условию (10) удовлетворяют многочлены степени n , для коэффициентов которых справедливы соотношения

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i; \beta = \sum_{i=1}^n \beta_i; \gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i.$$

Для наших целей достаточно использовать многочлен второй степени $px^2 + qx + r$. Тогда распределение (9) запишется так:

$$F(x) = 1 - \exp[-(px^2 + qx + r)].$$

Следовательно, при функциональном преобразовании (4) имеем

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - \exp \left(- \left(p x^2 + q x + r \right) \right) \right) \right] = 1 - \exp \left\{ - F \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) x^2 + \left(\sum_{i=1}^n q_i \right) x + \left(\sum_{i=1}^n r_i \right) \right\}.$$

Эта формула справедлива для любого количества слоев приблизительно равной мощности и является очень удобной при оценке вероятности разрушения многослойных породных структур.

Породные массивы в окрестности шахтного ствола состоят из большого количества разнопрочных слоев горных пород со своими функциями слоев горных пород со своими функциями прочностной надежности, поэтому рассмотренная статистическая модель в первом приближении может быть использована для обобщенной оценки прочности и надежности пачки слоев или некоторых участков структурно-неоднородного массива, пересекаемого шахтным стволом.

Изложенные результаты применимы не только к оценке вероятности разрушения слоистых структур, но и к оценке надежности механических и технических систем последовательного типа, когда отказ или выход из строя системы связан с отказом наиболее слабого элемента из совокупностей и элементов, имеющих различные функции вероятности разрушения. Показатели надежности элементов должны быть увязаны с уровнями надежности всей системы. Разработанный подход вполне применим для оценки надежности многослойных конструкций регулятивных систем, какими являются комбинированные системы поддержания стволов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об одном обобщении статистической модели прочности наиболее слабого звена / В.Т. Глушко, Г.Т. Рубец, Г.П. Шестаков, Л.В. Шулык // Прочность и надежность элементов конструкций, - К.: Наук. Думка, 1982. - С. 38-44.
2. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. - М.: Сов. Радио, 1966. - 166 с.
3. Зубарев Ю.П., Лысиков Б.А., Шестаков Г.П. Прочность массива горных пород, представленного разнопрочными литологическими разностями // Разработка месторождений полезных ископаемых, 1974, - № 38, - с. 57-61.

4. Статистический метод обработки данных о прочностных свойствах реальных горных пород / В.Т. Глушко, Н.Т. Бобро, Г.Т. Рубец, Н.В. Кижняк // Сб. Научн. Тр. НИГРИ, 1971, - № 16, с. 10-14.

УДК 622.281.424

С.П. Мусиенко

К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЕМ ПОРОД ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ЛОКАЛЬНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ПРИКОНТУРНЫЙ СЛОЙ

Существуют различные технологии крепления горных выработок [1,2], для реализации которых разработаны бетоноукладочные машины, бурильные установки, пневмонагнетатели, конструкции кровли и другое оборудование. Однако, можно выделить технологии и оборудование, позволяющие получить максимальный эффект при использовании способов локального воздействия. Рассмотрим некоторые из них, разработанные в Институте геотехнической механики НАН Украины.

Один из путей достижения поставленной цели связан с анкерованием приконтурных пород, которое должно быть направлено не только на создание упрочненной армопородной грузонесущей оболочки, а главным образом, на блокирование расслоения и разрыхления пород и на формирование блоков, препятствующих свободному истечению разрушенных пород в выработку. Такое анкерование обеспечивает перевод процесса разрушения и запредельного деформирования на режим с максимальным поглощением внутренней энергии массива и позволяет в породах III и IV категорий устойчивости с минимальными затратами существенно уменьшить (более чем вдвое) размеры зоны разрушения и (почти на порядок) смещение контура выработок и делает задачу повышения категории устойчивости пород технически разрешимой, путем блокирования свободного разрушения локальными воздействиями.

Параметры такой технологии представлены во временном технологическом регламенте [3]. Регламент содержит геомеханическое обоснование, область применения и технологию возведения одной из разновидностей рамно-анкерных крепей, а именно ограниченно-податливых, содержащих специальный соединительный элемент анкером с рамной крепью. Крепь состоит из