УДК 622.28

МЕТОД РАСЧЁТА МНОГОСЛОЙНОЙ КРЕПИ СТВОЛА С УЧЁТОМ РАЗНОМОДУЛЬНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И МАТЕРИАЛА КРЕПИ

Копылов С.И.
Тульский государственный университет, г. Тула

Предложено решение задачи определения нштряжённо- деформированного состояния многослойной крепи ствола, выполненной из разномодульных материалов, с учётом разномодульности горного массива. Задача решена с позиции теории С.А.Амбарцумяна с использованием метода многослойных систем с помощью коэффициентов передачи нагрузок.

При строительстве стволов современных горнодобывающих предприятий возникает объективная потребность уходить на новые горизонты разработки полезных ископаемых. При возрастании глубины заложения стволов на первое место выходит проблема их без ремонтного поддержания. Одним из путей решения проблемы без ремонтного поддержания стволов является применение крепей, обладающих большой несущей способнорстью, которые изготавливаются из современных полимерных или композиционных материалов. Исследования упругих свойств многих материалов указывают на отличие в их поведении от линейного закона Гука при малых деформациях. Основными отличиями являются зависимость модулей упругости от напряженного состояния и их скачкообразное изменение при переходе от растяжения к сжатию. Таким образом, полученные в экспериментах значения модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении и при сжатии могут различаться. Это свойство, именуемое разномодульностью, в той или иной степени присуще практически всем материалам [1]. У различных материалов разномодульность проявляется в разной степени, у некоторых весьма существенно влияет на их поведение при нагружении.

Материалы, обладающие существенно различным сопротивлением растяжению и сжатию, часто встречаются в строительстве. К ним относятся многие естественные (грунты, горные породы, лед) и искусственные материалы (полимеры, бетон, композиционные материалы и многие другие). С.А. Амбарцумян в [1] приводит обширный обзор экспериментальных исследований материалов, обладающих свойством разномодульности.

Разномодульность установлена для многочисленных сплавов: чугуна и стали. У стали разномодульность проявляется незначительно, различие в значениях модуля упругости при растяжении и сжатии не более 3-5 %, у чугуна может достигать 30 % и более.

Свойством разномодульности обладают некоторые конструкционные материалы, в частности армированные и неармированные полимеры (полимербетоны, фторопласты).

Композиционные материалы, армированные волокнами или зернами, как правило, так же обладают существенной разномодульностью. Композиционные материалы (графитовые композиты) нашли широкое применение в строительном производстве.

Сильно выраженным свойством разномодульности обладает такой распространенный строительный материал, как бетон. Для некоторых видов мелкозернистого бетона модуль упругости при растяжении в два-три раза меньше, чем при сжатии [1]. Столь существенные различия в значениях параметров, очевидно, будут приводить к значительным расхождениям в результатах расчетов деформаций для бетона без учета его свойства разномодульности. Получение точной картины напряженно-деформированного состояния бетона чрезвычайно важно при расчетах крепей стволов глубоких шахт.

Свойство разномодульности также характерно для грунтов и горных пород. Для различного типа гранитов модуль упругости при сжатии превосходит модуль упругости при растяжении до 1,5 раз, а для осадочных пород (известняки, песчаники и др.) - до 4 раз.

В расчетах напряженного состояния горных пород и крепи, как правило, свойством разномодульности пренебрегают и рассматривают обыкновенную линейно-упругую модель сплошной среды, что может приводить к принципиальным расхождениям с экспериментальными данными и вызвать ошибки при проектировании крепей стволов глубоких шахт и рудников.

Таким образом, использование при строительстве стволов разномодульных материалов, широкое внедрение композитных материалов, проблемы, возникающие при проектироовании и строительстве многослойных крепей глубоких шахт делают актуальной задачу разработки адекватной модели поведения разномодульных материалов, а также программного комплекса для численного решения подобных задач.

Рассмотрим напряжённо-деформированное состояние многослойной крепи ствела, выполненной из разномодульных материалов с учётом разномодульности горных пород. Под разномодульностью понимают различные значения упругих характеристик одного и того же материала при растяжении и сжатии. Упругие свойства разномодульности горных пород и материала крепи характеризуются при сжатии модулем деформации E^- и коэффициентом Пуассона ν^-, а при растяжении E^+, ν^+ соответственно.

Расчётная схема представляет собой многослойное круговое кольцо внешний n-й слой которого (при внешнем радиусе $R_n \to \infty$) моделирует массив пород, а внутренние слои $1 \div (n-1)$ - многослойную крепь. На внешнем контуре n -го слоя действует равномерно распределенная нагрузка

$$p_{0(n)} = \alpha^* \cdot \gamma \cdot H$$

где α^* - корректирующий множитель; γ - объемная масса горных пород; *H*- глубина на которой производится расчёт крепи ствола; λ - коэффициент бокового давления горных пород; при отсутствие опытных даннных может определяться по формуле Динника

$$\lambda = \frac{\nu^-}{1-\nu^-}.$$

Задача рассматривается в условиях плоской деформации. На внутреннем контуре .сечения крепи (при $r = R_0$) радиальные и касательные напряжения отсутствуют.

Задачу решим с позиции теории С.А. Амбарцумяна [1] с использованием метода расчёта многослойных систем и коэффициентов передачи нагруэок [2].

Плоское деформированное состояние массива и многослойной крепи описывается следующими соотношениями упругой разномодульной среды:

$$e_r = \frac{1}{E^-} \cdot \left[\left(1-\nu^- \cdot \nu^+\right) \cdot \sigma_r - \nu^- \cdot \left(1+\nu^+\right) \cdot \sigma_\vartheta\right];$$

$$e_\vartheta = \frac{1}{E^+} \cdot \left[\left(1-\nu^+ \cdot \nu^+\right) \cdot \sigma_\vartheta - \nu^+ \cdot \left(1+\nu^+\right) \cdot \sigma_r\right]; \qquad (1)$$

$$\sigma_x = \nu^+ \cdot \left(\sigma_r + \sigma_\vartheta\right).$$

Напряжения и деформации в массиве пород многослойной крепи должны удовлетворять уравнениям равновесия и совместности деформаций:

$$r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\vartheta = 0\ ;$$

$$r\frac{de_\vartheta}{dr} + e_\vartheta - e_r = 0\,. \qquad (2)$$

Подставляя выражения (1) в формулы (2) получим следующие соотношения для напряжений и перемещений в массиве и крепи:

$$\sigma_{r(i)} = D_{1(i)} \cdot r^{\alpha_i - 1} + D_{2(i)} \cdot r^{-\alpha_i - 1};$$

$$\sigma_{\vartheta(i)} = \alpha_i \cdot (D_{1(i)} \cdot r^{\alpha_i - 1} - D_{2(i)} \cdot r^{-\alpha_i - 1});$$

$$u_{r(i)} = \frac{1}{E_i^+} \cdot \left[\left(1-\nu_i^+ \cdot \nu_i^+\right)\cdot \alpha_i - \nu_i^+ \cdot \left(1+\nu_i^+\right)\right]\cdot D_{1(i)} \cdot r^{\alpha_i} - \\ -\left[\left(1-\nu_i^+ \cdot \nu_i^+\right)\cdot \alpha_i + \nu_i^+ \cdot \left(1+\nu_i^+\right)\right]\cdot D_{2(i)} \cdot r^{-\alpha_i}. \qquad (3)$$

где α_i - параметр разномодульности,

$$\alpha_i = \frac{\left(1-\nu_i^- \cdot \nu_i^+\right)\cdot E_i^+}{\left(1-\nu_i^+ \cdot \nu_i^+\right)\cdot E_i^-};$$

$D_{1(i)}$, $D_{2(i)}$ - константы i-того слоя, принимающие значения

$$D_{1(i)} = \frac{p_{0(i-1)} \cdot R_{i-1}^{-\alpha_i-1} - p_{0(i)} \cdot R_i^{-\alpha_i-1}}{R_{i-1}^{\alpha_i-1} \cdot R_i^{-\alpha_i-1} - R_{i-1}^{-\alpha_i-1} \cdot R_i^{\alpha_i-1}};$$

$$D_{2(i)} = \frac{-p_{0(i-1)} \cdot R_{i-1}^{\alpha_i-1} + p_{0(i)} \cdot R_i^{\alpha_i-1}}{R_{i-1}^{\alpha_i-1} \cdot R_i^{-\alpha_i-1} - R_{i-1}^{-\alpha_i-1} \cdot R_i^{\alpha_i-1}} \qquad (4)$$

R_i - значение внешнего радиуса i-того слоя;

R_{i-1} - значение внутреннего радиуса i-того слоя.

По аналогии с [2] примем

$$p_{0(i-1)} = p_{0(i)} \cdot K_i^{(0)} \qquad (5)$$

где $K_i^{(0)}$ - коэффициент передачи нагрузки через i-тый слой.

Значения $K_i^{(0)}$ определяются из условия равенства радиальных напряжений и перемещений на контактах смежных слоев многослойной крепи. После выполнения очевидных преобразований получим рекуррентное выражение

$$K_i^{(0)} = \frac{d_{1(i)}}{d_{2(i)} + \chi_{0(i-1)}(d'_{1(i-1)} - K_{(i-1)}^{(0)} d'_{2(i-1)})} \quad \left(i = 2,3,..,n-1\right); \qquad (6)$$

где:

$$d_{1(i)} = c_i^{3\cdot\alpha_i-1} \cdot \alpha_i \cdot (x_i + 1);$$

$$d_{2(i)} = 2 \cdot \left\{\left[\left(1-\nu_i^+\right)\cdot \alpha_i - \nu_i^+\right]\cdot c_i^{\alpha_i-1} + \right. \\ \left. + \left[\left(1-\nu_i^+\right)\cdot \alpha_i + \nu_i^+\right]\cdot c_i^{3\alpha_i-1}\right\};$$

$$d'_{1(i-1)} = 2 \cdot \left\{ \left[\left(1 - \nu^{+}_{i-1} \right) \cdot \alpha_{i-1} - \nu^{+}_{i-1} \right] \cdot c_{i-1}^{3\alpha_{i-1}-1} + \right.$$

$$\left. + \left[\left(1 - \nu^{+}_{i-1} \right) \cdot \alpha_{i-1} + \nu^{+}_{i-1} \right] \cdot c_{i-1}^{\alpha_{i-1}-1} \right\};$$

$$d'_{2(i-1)} = c_{i-1}^{\alpha_{i-1}-1} \cdot \alpha_{i-1} \cdot (x_{i-1} + 1);$$

$$\chi_{0(i-1)} = \frac{G_i}{G_{i-1}} \cdot \frac{(c_i^{3\cdot\alpha_i-1} - c_i^{\alpha_i-1})}{(c_{i-1}^{3\cdot\alpha_{i-1}-1} - c_{i-1}^{\alpha_{i-1}-1})}; \quad G_i = \frac{E_i^{+}}{2\cdot(1+\nu_i^{+})};$$

$$x_i = 3 - \nu_i^{+}; \quad c_i = \frac{R_i}{R_{i-1}}.$$

Заметим, что если разномодульность материала крепи и пород не учитывать и положить $E_i = E_i^{+} = E_i^{-}$ и $\nu_i = \nu_i^{+} = \nu_i^{-}$, $\alpha_i = \alpha_{i-1} = 1$, то выше приведенные формулы приобретают вид [2]:

$$d_{1(i)} = c_i^2 (x_i + 1); \quad d_{2(i)} = 2c_i^2 + x_i - 1;$$

$$d'_{1(i)} = c_i^2 (x_i - 1) + 2; \quad d'_{2(i)} = x_i + 1;$$

$$\chi_{0(i-1)} = \frac{G_i}{G_{i-1}} \frac{c_i^2 - 1}{c_{i-1}^2 - 1}; \quad G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}; \quad x_i = 3 - \nu_i;$$

$$c_i = \frac{R_i}{R_{i-1}}$$

E_i - модуль деформации i-того слоя ;

ν_i - коэффициент Пуассона i-того слоя.

Коэффициенты передачи нагрузок определяются последовательно для каждого слоя многослойной системы, начиная с внутреннего полагая

$$K_1^{(0)} = 0$$

Коэффициент передачи через наружный слой $K_n^{(0)}$, моделирующий массив пород, получим из выражения (6), полагая в нем $c_n \to \infty$. После несложных преобразований имеем:

$$K_n^{(0)} = \frac{(x_n+1)\cdot\alpha_n}{d_{2(n)} + \chi_{0(n-1)}(d'_{1(n-1)} - K_{(n-1)}^{(0)} d'_{2(n-1)})}$$

где:

$$d_{2(n)} = 2\cdot\left[\left(1-\nu_i^+\right)\cdot\alpha_i + \nu_i^+\right];$$

$$\chi_{0(i-1)} = \frac{G_n}{G_{n-1}}\cdot\frac{1}{(c_{i-1}^{3\cdot\alpha_{i-1}-1} - c_{i-1}^{\alpha_{i-1}-1})};\quad G_n = \frac{E_n^+}{2\cdot(1+\nu_n^+)};$$

$$x_n = 3-\nu_n^+ .$$

По вычисленным значения коэффициентов передачи нагрузок определяют контактные напряжения для каждого слоя многослойной крепи и, используя выражения (3) производят расчет крепи ствола.

Литература
1. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. – 317 с.
2. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982. – 270 с.

УДК 622.016.62

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Копылов А.Б., Харламов А.Е.
Тульский государственный университет

Прогнозирование технологических характеристик вмещающих пород и угольных пластов в пределах шахтного поля и установление закономерностей геомеханических процессов, протекающих вокруг очистных выработок, в совокупности обеспечивающих превентивное и оперативное обоснование параметров эффективной и безопасной комплексно-механизированной выемки пологих пластов в различных геотехнологических ситуациях.

Для прогнозирования и учета влияния неуправляемых факторов на технологические процессы, связанные с перемещением секций механизированной крепи, выбором величины вынимаемой мощности, режимов работы комбайна целесообразно использовать трехмерную математическую модель, включающую параметры почвы, кровли и угольного пласта. Рассмотрев один из выемочных участков шахтного (рис. 1) поля свяжем с ним подвижную систему координат $o_i x_i y_i z_i$, причем начало выбранной системы координат o_i совпадает с началом i-го участка, а ось $o_i x_i$ направлена вертикально вверх; ось $o_i y_i$ направлена по длине выемочного участка по правилу левого винта.