© Н.Н. Фотиева, А.С. Саммаль, Н.С. Булычев, 2005

УДК 69.035.4

Н.Н. Фотиева, А.С. Саммаль, Н.С. Булычев

*ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУСЛОЙНЫХ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ**

Семинар № 14

Технология строительства тоннелей в городских условиях, включающая нагнетание бетона в предварительно пробуренную щель и последующую выемку породы, позволяет в значительной степени уменьшить смещения поверхности и осадки фундаментов зданий и сооружений. Однако наличие высоких нагрузок от веса зданий и сооружений, расположенных вблизи тоннеля, может оказывать негативное влияние на несущую способность его обделки. В этом случае обделка может быть усилена путем создания второго (внутреннего) слоя, сооружаемого на некотором расстоянии от забоя тоннеля.

С целью определения необходимых параметров двуслойной обделки с учетом особенностей указанной технологии производства работ в Тульском государственном университете разработан метод расчета, базирующийся на аналитических решениях соответствующих плоских задач теории упругости для двуслойного круглого кольца, подкрепляющего отверстие в линейно-де-формируемой полубесконечной среде. Расчетная схема приведена на рис. 1.

Здесь наружный слой S_1 двуслойного кольца, имеющий внешний радиус R_0 и внутренний радиус R_1, моделирует обделку, сооружаемую путем нагнетания бетона в предварительно пробуренную щель, а внутренний слой S_2, имеющий внутренний радиус R_2, моделирует дополнительный второй слой обделки, сооружаемый после выемки породы на некотором расстоянии l_0 от забоя тоннеля. Материалы слоев S_j $(j=1,\ 2)$ имеют соответственно модули деформации E_1 $(j=1,2)$ и коэффициенты Пуассона ν_j $(j=1,2)$.

Массив пород моделируется линейно-деформируемой или вязкоупругой (в рамках теории линейной наследственной ползучести) полубесконечной средой S_0, ограниченной прямой $L_0^{'}$ и окружностью L_0, центр которой расположен на глубине H, и обладающей деформационными характеристиками E_0, ν_0. Слои кольца S_1, S_2 и среда S_0 деформируются совместно, то есть на линиях контакта L_0, L_1 удовлетворяются условия

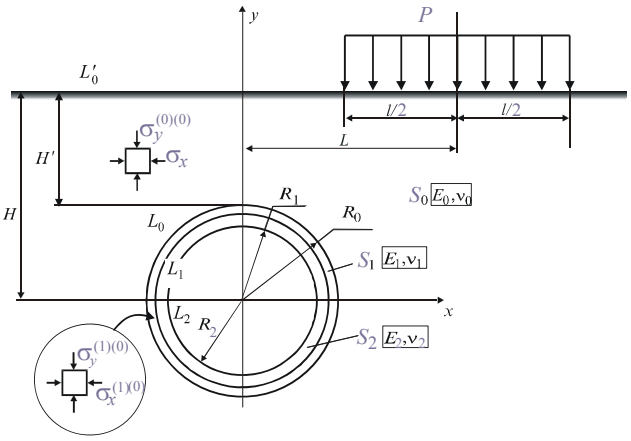


Рис. 1. Расчетная схема

*Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного грантом НШ-1013.2003.5.

непрерывности векторов смещений и полных напряжений. Внутренний контур L_2 свободен от действия внешних сил.

Действие собственного веса пород и наружного слоя обделки моделируется наличием в среде S_0 и в слое S_1 начального поля напряжений с компонентами:

$$\sigma_y^{(1)(0)} = \sigma_y^{(0)(0)} = -\gamma(H-y),$$
$$\sigma_x^{(1)(0)} = \sigma_x^{(0)(0)} = -\lambda\gamma(H-y), \qquad (1)$$
$$\tau_{xy}^{(1)(0)} = \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0,$$

где $\gamma -$ удельный вес пород и материала обделки (принимаются одинаковыми), $\lambda -$ коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве.

Действие веса зданий или сооружений на поверхности моделируется равномерно распределенной нагрузкой интенсивности P, приложенной на участке прямолинейной границы полуплоскости $L_0^{'}$.

При определении напряженного состояния двуслойной обделки необходимо принимать во внимание, что второй слой S_2 сооружается на некотором расстоянии l_0 от забоя тоннеля. Поэтому первый слой S_1 до расстояния l_0 работает как самостоятельная конструкция и претерпевает смещения $u_0(l_0)$, которые могут быть определены из решения пространственной осесимметричной задачи теории упругости. Затем первый слой S_1 работает как наружный слой двуслойной конструкции и претерпевает смещения $u(\infty)-u_0(l_0)$, где $u(\infty)$ - смещения после значительного продвижения забоя, определяемые из решения плоской задачи теории упругости. Следовательно, напряженное состояние первого слоя обделки может быть определено из следующей комбинации решений двух плоских задач теории упругости

$$\sigma^{(1)} = \sigma^{(1,1)}(1-\alpha^*) + \sigma^{(1,2)}\alpha^*, \qquad (2)$$

где символом $\sigma^{(1)}$ обозначены все компоненты тензора напряжений, возникающих в наружном слое обделки; $\sigma^{(1,1)}$ - напряжения, возникающие в наружном слое обделки до сооружения второго (внутреннего) слоя, определяемые из решения плоской задачи для кольца, подкрепляющего отверстие в полуплоскости (задача 1); $\sigma^{(1,2)}$ - напряжения, возникающие в наружном слое обделки после сооружения внутреннего, определяемые из решения задачи для двуслойного кольца в полуплоскости (задача 2); α^* - корректирующий множитель, введенный для приближенного учета пространственного характера рассматриваемых задач.

Корректирующий множитель α^* определяется по формуле

$$\alpha^* = 1 - \frac{u_0(l_0)}{u(\infty)}, \qquad (3)$$

где $u_0(l_0)$ - функция, полученная в результате численного моделирования зависимости смещений поверхности незакрепленной выработки от расстояния до забоя тоннеля при $\lambda = 1$.

Напряжения, возникающие во внутреннем слое обделки S_2, определяются на основе решения задачи 2 по формуле

$$\sigma^{(2)} = \sigma^{(2,2)}\alpha^*. \qquad (4)$$

Контактные задачи теории упругости, описанные выше, решены с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [1], аппарата аналитического продолжения комплексных потенциалов через прямолинейную границу полуплоскости $L_0^{'}$ [2] и комплексных рядов. Такой подход, будучи несколько модифицированным [3], приводит к последовательному итерационному решению ряда задач для однослойного или двуслойного кольца в полной плоскости, граничные условия которых изменяются на каждом шаге итераций.

Определение напряженного состояния обделки дает возможность выбора таких толщин и материалов для каждого слоя обделки и такого расстояния от возводимого второго слоя обделки до забоя тоннеля, при которых обеспечивается требуемый коэффициент запаса несущей способности конструкции.

Для определения расстояния от забоя l_0 и толщины второго (внутреннего) слоя Δ_2, при которых обделка обладает необходимой несущей способность (с заданным коэффициентом запаса k_s), используются следующие условия прочности:

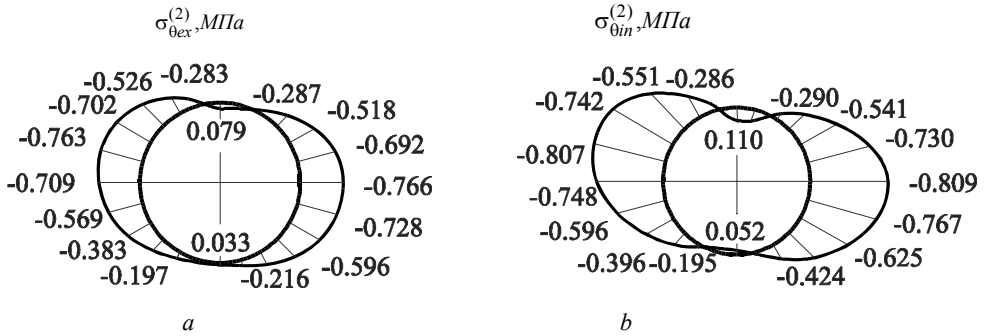
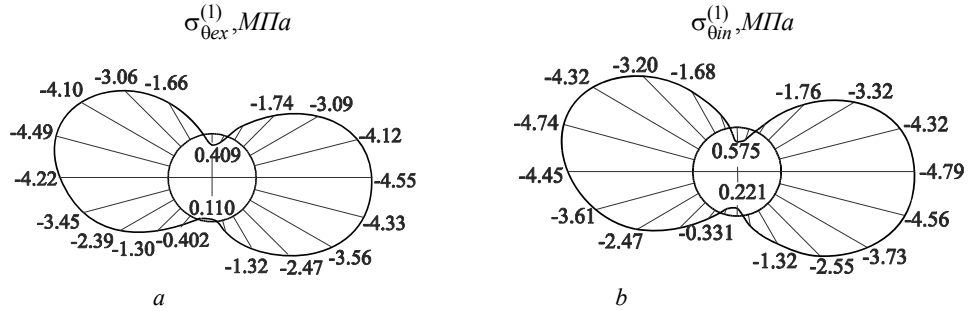


Рис. 2. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений на наружном (a) и внутреннем (b) контурах внутреннего слоя в случае 6

Рис. 3. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений на наружном (a) и внутреннем (b) контурах наружного слоя обделки в случае 6



$$\left|\sigma_{\theta in}^{(1,1)(c)}\right|_{\max}(1-\alpha^*) \le R_b^{(1)}/k_s\,,$$

$$\sigma_{\theta in\ \max}^{(1,1)(t)}(1-\alpha^*) \le R_{bt}^{(1)}/k_s\,, \qquad (5)$$

$$\left|\sigma_{\theta in}^{(1,1)}(1-\alpha^*)+\sigma_{\theta in}^{(1,2)}\alpha^*\right|_{\max} \le \begin{cases} R_b^{(1)}/k_s & \text{если } \sigma_{\theta in}^{(1)}<0 \\ R_{bt}^{(1)}/k_s & \text{если } \sigma_{\theta in}^{(1)}>0 \end{cases}, \qquad (6)$$

$$\left|\sigma_{\theta in}^{(2,2)(c)}\right|_{\max}\alpha^* \le R_b^{(2)}/k_s\,,$$

$$\sigma_{\theta in\ \max}^{(2,2)(t)}\alpha^* \le R_{bt}^{(2)}/k_s\,, \qquad (7)$$

где $\sigma_{\theta in}$ - нормальные тангенциальные напряжения на внутреннем контуре поперечного сечения соответствующего слоя обделки, $R_b^{(i)}, R_{bt}^{(i)}$ $(i=1,2)$ - расчетные сопротивления материала i - того $(i=1,2)$ слоя соответственно сжатию и растяжению; $\sigma_{\theta in}^{(c)}$, $\sigma_{\theta in}^{(t)}$ - соответственно сжимающие (отрицательные) и растягивающие (положительные) напряжения; максимальные значения выбираются из значений напряжений, полученных в различных точках по периметру внутреннего контура слоя. Выполнение условий (5) обеспечивает необходимую несущую способность наружного слоя обделки до возведения внутреннего.

Необходимая величина коэффициента α^* (и соответственно расстояние l_0) может быть при минимальных толщинах слоев предварительно ограничена полученной на базе условий прочности (5), (7) формулой

$$\max\left(1-\frac{R_b^{(1)}}{k_s\left|\sigma_{\theta in}^{(1,1)(c)}\right|_{\max}},\ 1-\frac{R_{bt}^{(1)}}{k_s\sigma_{\theta in\ \max}^{(1,1)(t)}}\right) \le \alpha^* \le \qquad (8)$$

$$\le \min\left(\frac{R_b^{(2)}}{k_s\left|\sigma_{\theta in}^{(2,2)(c)}\right|_{\max}},\ \frac{R_{bt}^{(2)}}{k_s\sigma_{\theta in\ \max}^{(2,2)(t)}}\right)$$

после чего проверяются условия проверяются условия прочности (5)-(7) для первого слоя с использованием коэффициентов α_1^*, α_2^*, полученных соответственно как левая и правая части неравенства (8). Если эти условия выполняются при $\alpha^*=\alpha_1^*$, вычисления заканчиваются. Если условия (5)-(7) не выполняются

Таблица 2

Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения в однослойной обделке толщиной $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$

Ц	Δ, *м*	$\left\|\sigma_{\theta in}^{(c)}\right\|_{\max}$, МПа	$\sigma_{\theta in\ \max}^{(t)}$, МПа
1	0.2	5.538	0.838
2	0.45	1.571	0.846
3	0.25	3.841	0.802
4	0.2	2.793	0.645
5	0.4	4.789	0.938
6	0.2	4.791	0.585
7	0.2	4.491	0.761

ни при $\alpha^* = \alpha_1^*$, ни при $\alpha^* = \alpha_2^*$, то толщина второго (внутреннего) слоя Δ_2 (а затем и толщина наружного слоя Δ_1) или класс бетона увеличивается и расчет повторяется. Если условия (5)-(7) удовлетворяются при значении α_2^*, то величина α^* определяется способом половинного деления. В результате выбираются параметры α^* и Δ_1, Δ_2. Расстояние l_0 от сооружаемого второго слоя до забоя тоннеля определяется на базе полученной на основе численного моделирования формулы

$$\alpha^* = 0.61 e^{-1,522 l_0 / R_1}, \qquad (9)$$

из которой следует

$$l_0 = -0.657 R_1 \ln(1.635 \alpha^*). \qquad (10)$$

Ниже приводятся примеры определения толщин слоев Δ_1, Δ_2 и коэффициента α^*, связанного с расстоянием l_0.

Расчеты выполнялись для тоннеля, расположенного в крепких породах, при следующих общих исходных данных: $E_0 = 20000$ МПа, $\nu_0 = 0.25$, $\lambda = 0.33$, $\gamma = 0.025$ МН/м^3, $E_1 = E_2 = 23000$ МПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0.2$, $R_b^{(1)} = R_b^{(2)} = 8.5$ МПа, $R_{bt}^{(1)} = R_{bt}^{(2)} = 0.75$ МПа, $k_s = 1,5$.

Остальные исходные данные, а именно – наружный радиус обделки R_0, глубина заложения тоннеля H', отсчитываемая от верхней точки свода, длина поверхностной нагрузки l, расстояние L между серединой нагрузки и вертикальной осью, проходящей через центр тоннеля, интенсивность нагрузки P и результаты расчетов, выполненных для 7-ми примеров, приведены в табл. 1.

Эпюры нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta ex}^{(j)}$, $\sigma_{\theta in}^{(j)}$ $(j = 1,2)$, возникающих на наружном и внутреннем контурах наружного $(j = 1)$ и внутреннего $(j = 2)$ слоев обделки в случае 6, приведены на рис. 2, 3 соответственно.

Для сравнения в табл. 2 приведены величины максимальных сжимающих и растягивающих нормальных тангенциальных напряжений $\left|\sigma_{\theta in}^{(c)}\right|_{\max}$, $\sigma_{\theta in\max}^{(t)}$, возникающих на внутреннем контуре однослойной обделки толщиной $\Delta_1 + \Delta_2$, определенные для всех рассмотренных выше 7-ми примеров.

Из табл. 2 видно, что растягивающие напряжения, возникающие в однослойной обделке толщиной $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$, превышают пре-

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчетов

№	Исходные данные					Результаты расчетов			
	R_0, *м*	H', *м*	L, *м*	l, *м*	P, *МН*	Δ_1, *м*	Δ_2, *м*	α^*	l_0, *м*
1	6.0	3.0	0	1.5	1.5	0.1	0.1	0.454	1.15
2	6.0	6.0	0	1.0	1.0	0.1	0.35	0.529	1.12
3	6.0	15.0	10.0	1.5	1.5	0.1	0.15	0.463	1.07
4	5.0	6.0	20.0	1.5	1.5	0.1	0.1	0.250	2.88
5	4.0	6.0	0	2.0	2.0	0.1	0.3	0.523	0.40
6	4.0	10.0	5.0	2.0	2.0	0.1	0.1	0.181	3.11
7	3.0	20.0	0	1.5	1.5	0.1	0.1	0.136	2.86

дельную величину $\frac{R_{bt}}{k_s} = 0.5$ МПа.

Таким образом, описанный метод и реализующая его компьютерная программа позволяют прогнозировать напряженное состояние двуслойных обделок тоннелей мелкого заложения при действии гравитационных сил и веса зданий или сооружений на поверхности, существовавших до проведения тоннеля, с учетом особенностей технологии его сооружения.

Они также дают возможность выбора параметров обделки, обеспечивающих ее несущую способность с заданным коэффициентом запаса.

Результаты, приведенные в табл. 1, 2, показывают, что возведение тоннельной обделки в два этапа, когда ее второй (внутренний) слой сооружается на некотором расстоянии от первого, приводит к существенному увеличению коэффициента запаса несущей способности конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Наука, 1966.
2. *Араманович И.Г.* Распределение напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием. Доклады АН СССР, вып. 102, № 3: 372-375.
3. *Fotieva N.N., Bulychev N.S., Sammal A.S.* Design of shallow tunnel linings. P*roceedings of the ISRM International Symposium Eurock'96:* Rotterdam: Balkema, 1996: 677-680.

Коротко об авторах

Фотиева Н.Н., Саммаль А.С., Булычев Н.С. – Тульский государственный университет.

НОВИНКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Букринский В.А. Геометризация недр. Практический курс: Учебное пособие для вузов. — 333 с.: ил.

ISBN 5-7418-0263-X (в пер.)

Приведены 250 задач по всем разделам программы дисциплины «Геометрия недр», решение которых даст возможность освоить современные методы математико-статистической и графической обработки результатов измерений; выработать умение применять проекции при геометризации горно-геометрических объектов и приемы геометризации разнообразных форм залежей, складчатых и разрывных структур, трещиноватости массива горных пород и условий их залегания. Кроме того, эти методы позволяют выявлять закономерности размещения полезных и вредных компонентов, осуществлять прогнозирование их на соседние участки, подсчитывать добычу, потери, изменение запасов полезных ископаемых при их разработке, выполнять некоторые задачи детальной разведки и горной технологии геометрическими методами.

В.А. Букринский — д-р техн. наук, профессор кафедры «Маркшейдерское дело», лауреат премии «Золотое перо горняка» — 2003.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело», направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.1