УДК 622.28

А.С.САММАЛЬ, Н.Н.ФОТИЕВА,
Н.С.БУЛЫЧЕВ, С.И.ХРЕНОВ
Тульский государственный университет

РАСЧЕТ ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предлагается новый аналитический метод расчета тоннельных обделок, толщина которых изменяется по периметру поперечного сечения, на действие собственного веса грунта, давления грунтовых вод и заполняющей тоннель жидкости с учетом влияния земной поверхности, а также веса зданий и сооружений на поверхности. Метод основан на рассмотрении взаимодействия подземной конструкции и окружающего массива грунта как элементов единой деформируемой системы. Приводятся примеры расчета, иллюстрирующие данный метод.

A new analytical method of designing shallow tunnel linings of a variable thickness is described in the paper presented. The method allows to determine the lining stress state under the action of the soil own weight, underground water pressure, internal liquid pressure in the tunnel and weight of buildings or structures on the ground surface. The method is based on the investigation of interacting the tunnel lining and the surrounding soil mass as elements of a united deformable system. Examples of the design are given.

Существующие аналитические методы расчета тоннельных обделок, толщина которых изменяется по периметру поперечного сечения [4], предназначены для расчета подземных сооружений, расположенных на значительной глубине. Аналогичных методов, учитывающих влияние земной поверхности на напряженное состояние обделки переменной толщины, размеры поперечного сечения которой соизмеримы с глубиной заложения тоннеля, до настоящего времени не имелось.

В данной работе предлагается метод расчета обделок, имеющих переменную толщину, тоннелей неглубокого заложения на действие собственного веса грунта (пород), давления грунтовых вод и заполняющей тоннель жидкости с учетом влияния земной поверхности, а также веса зданий и сооружений на поверхности существовавших до проведения тоннеля и возведенных после его строительства.

В основу метода положены новые аналитические решения плоских задач теории упругости, общая расчетная схема которых представлена на рис.1.

Полубесконечная весомая линейно-деформируемая среда S_0, ослабленная отверстием произвольной формы (с одной осью симметрии), моделирует массив грунта, механические свойства которого характеризуются модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0. Кольцо S_1 переменной толщины из материала с деформационными характеристиками E_1 и ν_1, подкрепляющее отверстие в полуплоскости S_0, моделирует обделку тоннеля.

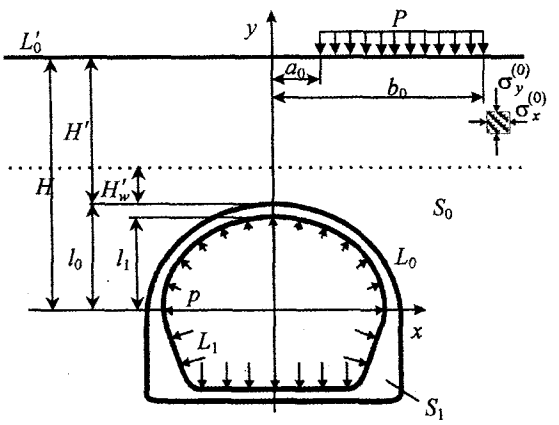


Рис.1. Общая расчетная схема

ISSN 0135-3500. Записки Горного института. Т.156

Среда S_0 и кольцо S_1 деформируются совместно, т.е. на линии контакта L_0 выполняются условия непрерывности векторов смещений и полных напряжений.

Действие собственного веса грунта моделируется наличием в среде S_0 начальных напряжений, линейно изменяющихся по глубине

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

где λ – коэффициент бокового давления грунта в ненарушенном массиве; γ – удельный вес грунта; H – глубина заложения тоннеля, равная сумме высоты H' налегающей толщи грунта над сводом тоннеля и расстояния l_0 от начала координат, выбранного на оси симметрии отверстия, до верхней точки контура L_0.

Действие давления грунтовых вод моделируется наличием в среде S_0 начальных напряжений

$$\sigma_x^{(0)} = \sigma_y^{(0)} = -\gamma_w(l_0 + H'_w - y);\ \ \tau_{xy}^{(0)} = 0,$$

где γ_w – удельный вес воды; H'_w – уровень грунтовых вод, отсчитываемый от верхней точки свода тоннеля.

Внутренний контур L_1 кольца свободен от действия внешних сил либо нагружен нормальным давлением, моделирующим действие заполняющей тоннель жидкости

$$p = p_0 + \gamma'_w(l_1 - y),$$

где p_0 – внутренний напор; γ'_w – удельный вес жидкости; l_1 – расстояние от начала координат до верхней точки внутреннего контура L_1 кольца.

Действие веса здания или сооружения на поверхности моделируется вертикальной нагрузкой интенсивности P, равномерно распределенной на участке $a_0 \le x \le b_0$ прямолинейной границы полуплоскости L'_0. При этом рассматриваются два случая: когда здание возводится вблизи существующего тоннеля и когда тоннель проводится вблизи имеющегося на поверхности здания. В последнем случае смещения точек среды S_0, вызываемые нагрузкой до образования отверстия, исключаются из граничного условия, связывающего смещения. Пространственный характер нагрузки, обусловленный ограниченным размером здания в направлении оси тоннеля, учитывается по работе [5].

Для учета влияния отставания возведения обделки от забоя выработки в процессе проходки тоннеля в результаты расчета на действие собственного веса грунта и веса здания или сооружения, имевшегося на поверхности до проведения тоннеля, вводится корректирующий множитель α [2].

Все описанные задачи решены с применением теории аналитических функций комплексного переменного [3] на основе предложенного И.Г.Арамановичем [1] аналитического продолжения комплексных потенциалов Колосова – Мусхелишвили, характеризующих напряженно-деформированное состояние нижней полуплоскости вне отверстия, через прямолинейную границу в верхнюю полуплоскость. Это позволяет свести решение указанных задач к предложенному в работе [6] хорошо сходящемуся итерационному процессу, в каждом приближении которого используется решение соответствующей задачи для кольца переменной толщины, подкрепляющего отверстие в полной плоскости, при наличии в граничных условиях некоторых дополнительных членов, отражающих влияние прямолинейной границы полуплоскости, представляемых в форме рядов Лорана, неизвестные коэффициенты которых уточняются на основе предыдущих приближений. Задачи для кольца переменной толщины в полной плоскости решены с использованием аппарата конформных отображений, полиномов Фабера и комплексных рядов тем же путем, что и в работе [4].

Разработан алгоритм расчета и составлена компьютерная программа, позволяющая производить многовариантные расчеты обделок переменной толщины тоннелей неглубокого заложения на указанные виды статических нагрузок.

В качестве примера приведены результаты расчета обделки тоннеля на действие

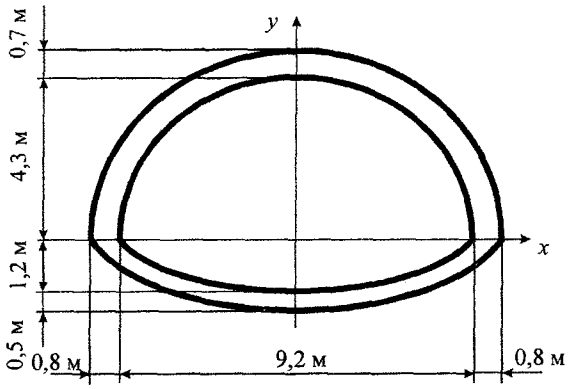


Рис.2. Форма и размеры поперечного сечения обделки

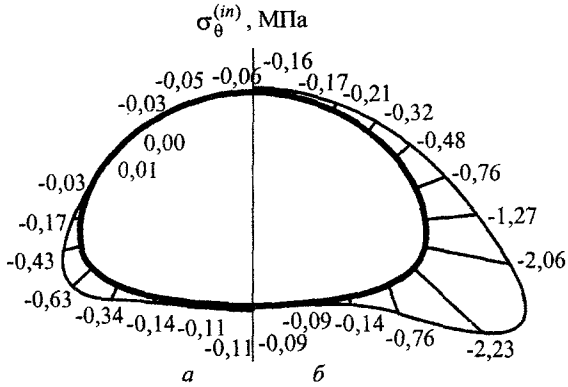


Рис.3. Эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, возникающих в обделке тоннеля

собственного веса грунта и давления грунтовых вод (рис.2).

Исходные данные для расчета принимались следующими: $\gamma = 0{,}017$ МН/м^3, $H' = 4{,}3$ м, $\gamma_w = 0{,}01$ МН/м^3, $H'_w = 0{,}1$ м, $\nu_0 = 0{,}3$, $\nu_1 = 0{,}2$, $E_0/E_1 = 0{,}01$, $\lambda = 0{,}8$, $\alpha = 1$.

На рис.3, *а, б* показаны эпюры нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, возникающих на внутреннем контуре поперечного сечения рассматриваемой обделки при действии внешнего давления грунтовых вод и собственного веса грунта.

Работа поддержана грантом НШ-1013.2003.5 Совета программы по государственной поддержке ведущих научных школ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Араманович И.Г.* О распределении напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием // ДАН СССР. М. 1955. Т.104. № 3. С.372-375.

2. *Булычев Н.С.* О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах // Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды международной конференции. Тула, 2002. С.35-37.

3. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.

4. *Фотиева Н.Н.* Расчет многослойной обделки некруговых гидротехнических туннелей / Н.Н.Фотиева, А.С.Саммаль // Сб. научн. трудов: Технология и механизация горных работ. М.: Изд-во АГН, 1998. С.83-88.

5. *Фотиева Н.Н.* Расчет некруговых обделок тоннелей мелкого заложения / Н.Н.Фотиева, А.С.Саммаль, П.В.Деев // Сб. науч. трудов / Национальный горный университет. Днепропетровск, 2003. № 17. Т.1. С.413-417.

6. Fotieva N.N. Design of shallow tunnel linings / N.N.Fotieva, N.S.Bulychev, A.S.Sammal // Proc. ISRM Int. Symp. EUROCK'96 / Torino, Italy – Rotterdam: A.A.Balkema, 1996.