© И.Ю. Воронина, 2008

УДК 622.28

И.Ю. Воронина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБДЕЛОК ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРУГОВЫХ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРВИСНОГО ТОННЕЛЯ

Семинар № 18

Основной особенностью статической работы обделок подводных тоннелей является то, что, помимо действия собственного веса пород (грунта), они подвергаются также значительным нагрузкам, вызываемым давлением воды на дно пересекаемого водоема. В Тульском государственном университете разработан метод расчета монолитных обделок взаимовлияющих параллельных круговых подводных тоннелей [1] как в предположении водонепроницаемости пород, так и в случае фильтрации воды вглубь массива.

В основу метода положены современные представления механики подземных сооружений о взаимодействии подземных конструкций и массива пород как элементов единой деформируемой системы и новое аналитическое решение соответствующей плоской контактной задачи теории упругости для полубесконечной весомой линейно-деформируемой среды, ослабленной произвольным числом N любым образом расположенных круговых отверстий разных радиусов, подкрепленных кольцами различной толщины, выполненными из разных материалов.

Как показано в работе [1], оба случая, когда массив пород считается водонепроницаемым и когда имеет место фильтрация воды через породы, сводятся к одной задаче, расчетная схема которой приведена на рис. 1. При этом начальные напря-жения в среде S_0, моделирующей массив пород, определяются по формулам:

$$\sigma_y^{(0)(0)} = -\left[\gamma^{/}(H-y)+\gamma_w H_w\right],$$
$$\sigma_x^{(0)(0)} = -\left[\lambda^{/}\gamma^{/}(H-y)+\gamma_w H_w\right], \qquad (1)$$

где H - глубина заложения первого тоннеля, в центр которого помещено начало координат, под дном водоема, γ_w - удельный вес воды, H_w - глубина водоема.

Входящие в формулы (1) величины γ' и λ' в предположении водонепроницаемости пород полагаются равными $\gamma'=\gamma$, $\lambda'=\lambda$ (где γ - удельный вес пород, λ - коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве), а в случае фильтрации воды через породы эти величины определяются по формулам

$$\gamma' = \tilde{\gamma}+\gamma_w, \quad \lambda' = \lambda + (1-\lambda)\frac{\gamma_w}{\gamma'}, \qquad (2)$$

где $\tilde{\gamma}$ - удельный вес водонасыщенных пород с учетом взвешивающего действия воды.

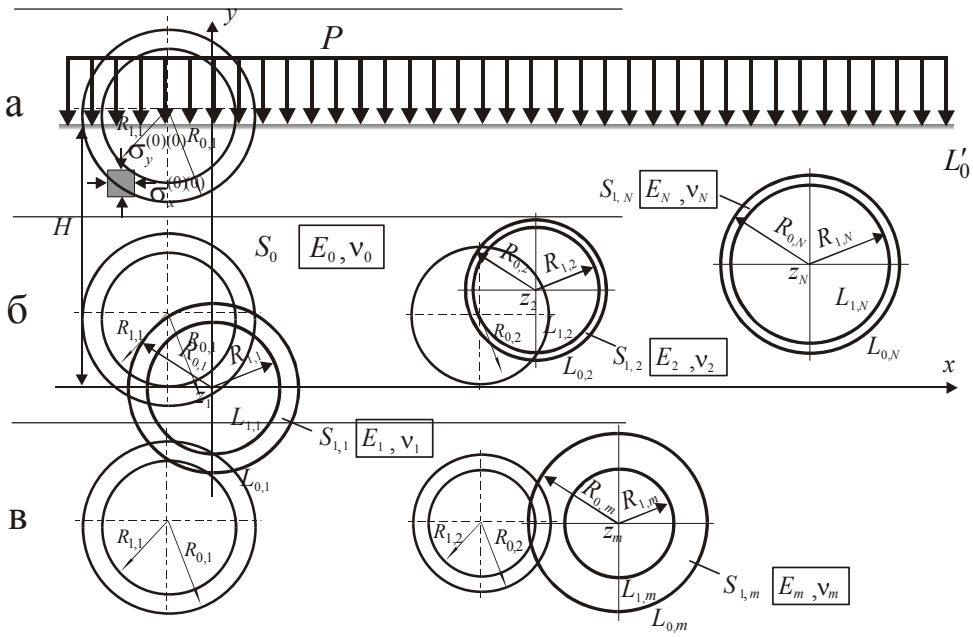


Рис. 1. Расчетная схема

С целью приближенного учета влияния расстояния $l_{0,m}$ $(m = 1,...,N)$ от сооружаемой в m-том тоннеле обделки до забоя выработки в результаты расчета обделки каждого из тоннелей вводится соответствующий корректирующий множитель α_m^* $(m = 1,...,N)$. Этот множитель в предположении водонепроницаемости пород определяется по формуле [2]

$$\alpha_m^* = 0,6e^{-1,38\frac{l_{0,m}}{R_{0,m}}}, \ (m = 1,...,N) \qquad (3)$$

в случае же фильтрации воды через породы полагаются $\alpha_m^* = 0,6$ $(m = 1,...,N)$.

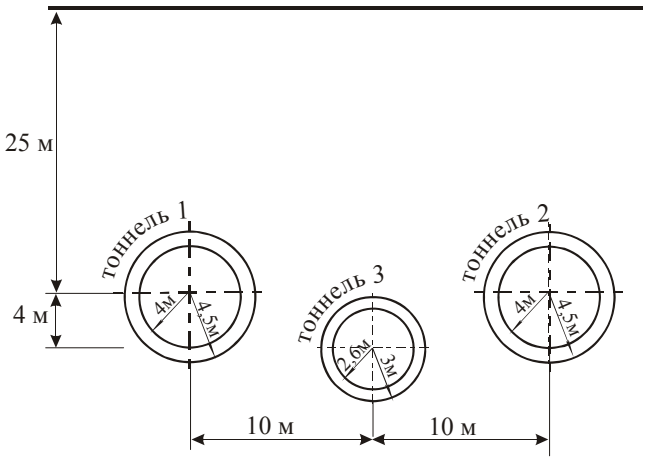
Обделки считаются водонепроницаемыми.

Решение указанной задачи получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [3], аналитического продолжения комплексных потенциалов через границу полуплоскости, метода Д.И. Шермана [4], позволяющего рассматривать задачи для многосвязных кусочно-однородных областей, аппарата интегралов типа Коши и комплексных рядов.

С целью приближенного учета влияния сооружения сервисного тоннеля на напряженное состояние обделок двух параллельных подводных тоннелей воспользуемся методикой, предложенной в работе [5]. Согласно указанной методике последовательно рассматривается ряд контактных задач, являющихся частными случаями задачи, представленной на рис. 1. Проиллюстрируем этот прием на примере двух параллельных тоннелей. Расчетные схемы решаемых последовательно задач показаны на рис. 2 *а, б, в*.

В этом случае порядок расчета следующий:

1. Определяются напряжения $\sigma^{(1)}(1)$, возникающие в обделке первого тоннеля после продвижения его забоя на значительное расстояние до проведения второго тоннеля (символом



σ обозначены все компоненты тензора напряжений) по формуле

$$\sigma^{(1)}(1) = \sigma_1^{(1)} \alpha_1^* , \qquad (4)$$

где $\sigma_1^{(1)}$ - компоненты тензора напряжений в обделке первого тоннеля, полученные из решения первой задачи (рис. 2, *а*).

2. Определяются дополнительные напряжения $\sigma^{(1)}(2)$ в обделке первого тоннеля при проходке второго тоннеля до его закрепления, по формуле

$$\sigma^{(1)}(2) = \left(\sigma_2^{(1)} - \sigma_1^{(1)}\right) f(l_{0,2}) , \qquad (5)$$

где $\sigma_2^{(1)}$ - компоненты тензора напряжений в обделке первого тоннеля, полученные из решения второй задачи (рис. 2, *б*), $l_{0,2}$ - расстояние от сооружаемой во втором тоннеле обделки до забоя выработки, $f(l_{0,2})$ - функция, определяемая по формуле

$$f(l_{0,2}) = 1 - \alpha_2^* . \qquad (6)$$

3. Определяются дополнительные напряжения $\sigma^{(1)}(3)$, возникающие в обделке первого тоннеля после закрепления второго тоннеля и продвижения его забоя до значительного расстояния, по формуле

$$\sigma^{(1)}(3) = \left(\sigma_3^{(1)} - \sigma_2^{(1)}\right) \alpha_2^* , \qquad (7)$$

где $\sigma_3^{(1)}$ - компоненты тензора напряжений в обделке первого тоннеля, полученные из решения третьей задачи (рис. 2, *в*).

Полные напряжения в обделке первого тоннеля определяются по формуле

$$\sigma^{(1)} = \sigma^{(1)}(1) + \sigma^{(1)}(2) + \sigma^{(1)}(3) . \qquad (8)$$

4. Определяются напряжения $\sigma^{(2)}(3)$, возникающие в обделке второго тоннеля, по формуле

$$\sigma^{(2)}(3) = \sigma_3^{(2)} \alpha_2^* , \qquad (9)$$

где $\sigma_3^{(2)}$ - компоненты тензора напряжений в обделке второго тоннеля, полученные из решения третьей задачи (рис. 2, *в*).

Рис. 2. Расчетные схемы для определения напряжений в обделке первого тоннеля до проведения второго (а), в обделке первого тоннеля при проведении второго (б), после закрепления второго тоннеля (в)

В случае, когда число тоннелей более двух, влияние последовательности их проведения учитывается аналогичным образом.

Коэффициенты запаса несущей способности обделок $k_s^{(m)}$ $(m = 1,...,N)$ определяются по формулам

$$k_s^{(m)} = \min\left(\frac{R_{bc}^{(m)}}{\left|\sigma_{\theta\max}^{(m)(c)}\right|}, \frac{R_{bt}^{(m)}}{\left|\sigma_{\theta\max}^{(m)(t)}\right|} \right),$$

$(m = 1,...,N)$, (10)

где $\sigma_{\theta\max}^{(m)(c)}$, $\sigma_{\theta\max}^{(m)(t)}$ - соответственно максимальные сжимающие (отрицательные) и растягивающие (положительные) нормальные тангенциальные напряжения на внутренних контурах поперечного сечения обделок; $R_{bc}^{(m)}$, $R_{bt}^{(m)}$ - расчетные сопротивления бетона при сжатии и растяжении.

Ниже в качестве примера выполнен расчет бетонных обделок двух параллельных подводных тоннелей с учетом влияния проведения сервисного тоннеля в предположении водонепроницаемости пород. Взаимное расположение и размеры тоннелей показаны на рис. 3.

При расчете принимались следующие исходные данные:

γ =0,02 МН/м^3, λ=0,37, H_w=30 м, γ_w =0,01 МН/м^3, E_0 =15000 МПа, ν_0 =0,27, E_m =30000 МПа, ν_m =0,2, $R_{bc}^{(m)}$ =14,5 МПа, $R_{bt}^{(m)}$ =1,05 МПа $(m = 1, 2, 3)$.

Рассматривалось проведение тоннеля 3 (сервисный тоннель) после сооружения тоннелей 1, 2 с возведением обделок на расстоянии $l_{0,m} = 1\,м$ ($m = 1, 2, 3$) от забоев выработок.

На рис. 4 показаны эпюры расчетных нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, $МПа$, возникающих в обделках первого и второго тоннелей до проведения третьего тоннеля.

Коэффициенты запаса несущей способности обделок составляют $k_s^{(1)} = k_s^{(2)} = 11{,}09$.

На рис. 5 показаны эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, $МПа$, возникающих в обделках первого и второго тоннелей при проведении третьего тоннеля.

Коэффициенты запаса несущей способности обделок составляют $k_s^{(1)} = k_s^{(2)} = 7{,}21$.

Рис. 3. Взаимное расположение и размеры тоннелей

На рис.6 изображены эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, $МПа$, возникающих в обделках всех трех тоннелей, полученных с учетом последовательности их сооружения.

Коэффициенты запаса несущей способности обделок составляют $k_s^{(1)} = k_s^{(2)} = 7{,}69$, $k_s^{(3)} = 8{,}49$.

Для сравнения на рис. 7 представлены результаты расчета обделок тех же трех параллельных подводных тоннелей в предположении их од-новременного проведения.

Коэффициенты запаса в этом случае

$k_s^{(1)} = k_s^{(2)} = 8{,}73$, $k_s^{(3)} = 8{,}49$.

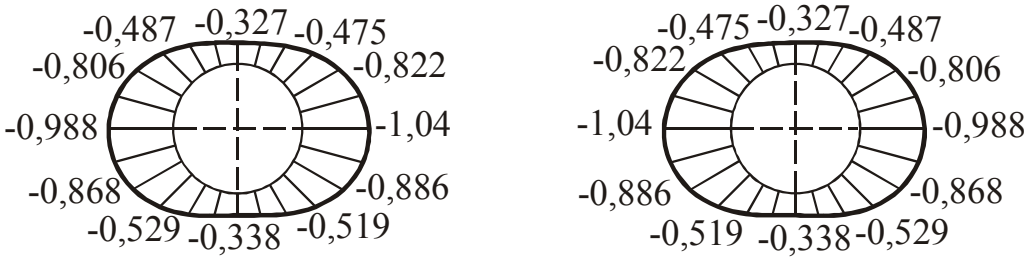


Рис. 4. Эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, возникающих в обделках первого и второго тоннелей до проведения третьего тоннеля

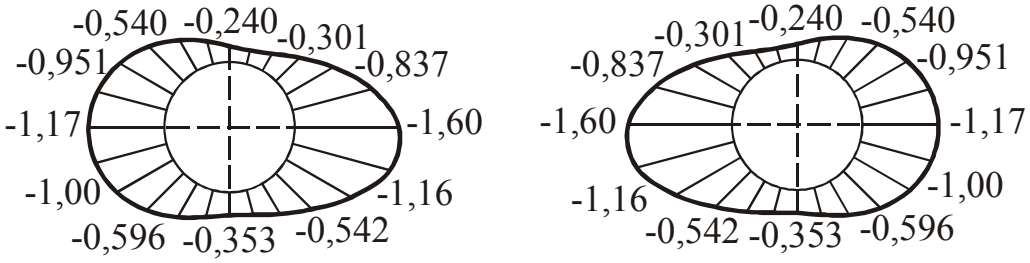


Рис 5. Эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, возникающих в обделках первого и второго тоннелей при проведении третьего тоннеля

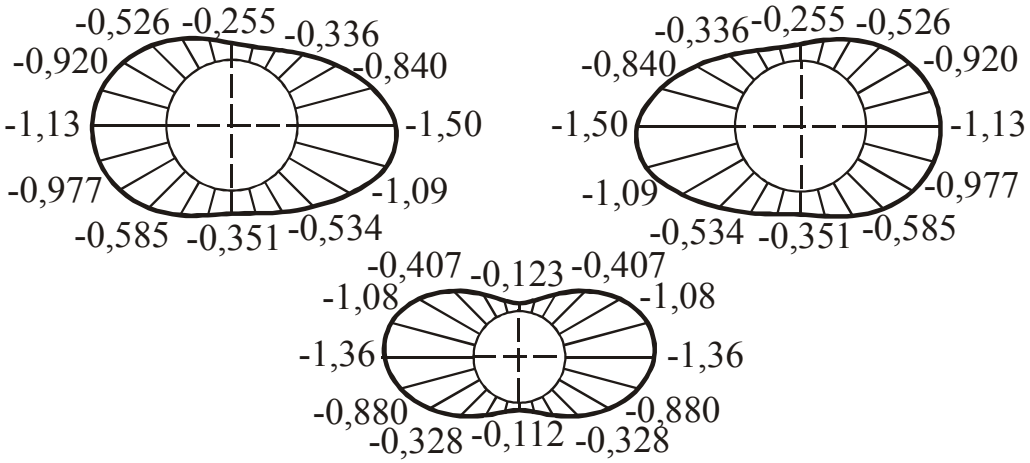


Рис. 6. Эпюры напряжений $\sigma_\theta^{(in)}$, возникающих в обделках трех тоннелей

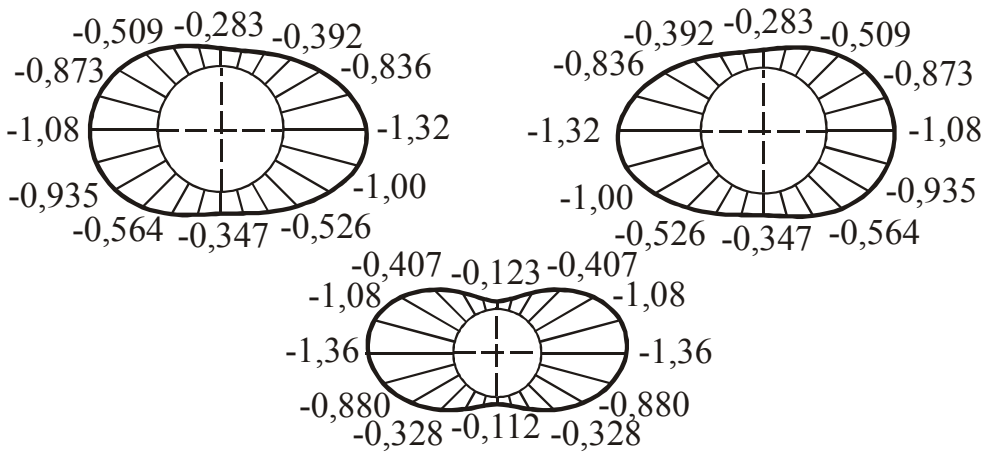


Рис. 7. Напряжения $\sigma_{\theta}^{(in)}$ в обделках трех параллельных подводных тоннелей, пройденных одновременно

Как видно из рис. 4-7, проведение сервисного тоннеля существенно влияет на напряженное состояние обделок двух ранее сооруженных тоннелей, что указывает на необходимость учета последовательности проходки параллельных подводных тоннелей при проектировании и строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фотиева Н.Н., Воронина И.Ю.* Расчет обделок параллельных взаимовлияющих подводных тоннелей.// Геомеханика. Механика подземных сооружений/Сборник научных трудов/ ТулГУ, Тула 2001, с. 165-176.

2. *Булычев Н.С.* О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах.//

3. Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды Международной конференции. - Тула, 2002. - С. 35-37.

4. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966.

5. *Шерман Д.И.* О напряжениях в плоской весомой среде с двумя одинаковыми симметрично расположенными круговыми отверстиями.// Прикладная математика и механика, 1951, т. 15, № 6. С. 751 – 761.

6. *Воронина И.Ю.* Расчет обделок параллельных взаимовлияющих подводных тоннелей с учетом влияния последовательности их проведения// Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды Международной конференции. Тула, Россия, 25-26 апреля 2002 г. Тула. 2002. С.46-52. ГИАБ

Коротко об авторе

Воронина И.Ю. – Тульский государственный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 18 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *Б.А. Картозия.*