

Список литературы

1. Дрозд Г.Я. Надежность канализационных сетей //Водоснабжение и санитарная техника. - №10.-1995.- С. 2-4.
2. Булычев Н.С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах// Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды международной конференции. Тула, Россия 25 – 26 апреля 2002 г. – Тула: Изд. ТулГУ, 2002. – С. 35 – 37.
3. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости /Н.И. Мусхелишвили. - М.: Наука, 1966. - 708 с.
4. Фотиева Н.Н., Саммаль Т.Г. Прогноз снижения несущей способности обделки кругового тоннеля вследствие локального уменьшения ее толщины, обусловленного коррозией бетона //Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте. Сб. трудов IV Междунар. конф. 29-30 июня 1999 г. – С.-Петербург, 1999. – С. 197 – 201.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЛОКАЛЬНОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ СВОДЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

А.С. Саммаль, О.А. Соловьева, О.В. Афанасова, Тульский государственный университет, Россия

Приводится описание разработанного авторами аналитического метода расчета обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего локального вертикального давления, и анализируются результаты выполненных с использованием этого метода исследований влияния основных факторов на напряженное состояние обделки сводчатого очертания.

При проектировании тоннелей, особенно сооружаемых в сложных горнотехнических условиях, особую актуальность приобретают вопросы учета влияния внутренних нагрузок большой интенсивности, распределенных локально по контуру выработки, на несущую способность подземной конструкции. К таким нагрузкам можно отнести, например, вес тяжелой техники и складированных материалов, нагрузки от движущихся в тоннеле транспортных средств, усилий домкратов, подъемных устройств и пр. Очевидно, обоснованная оценка влияния таких воздействий на прочность подземных сооружений, необходима для принятия эффективных проектных решений, связанных с их усилением путем локального увеличения толщины конструкции или коэффициента армирования опасных ее сечений.

В настоящей работе на основе обобщения накопленного в Тульском государственном университете опыта математического моделирования напряженного состояния подземных сооружений при различных видах воздействий [1, 2] предлагается новый, базирующийся на современных представлениях геомеханики о взаимодействии подземной конструкции и окружающего массива горных пород как элементов единой деформируемой системы, аналитический метод расчёта обделок тоннелей произвольного поперечного сечения на действие внутреннего вертикального равномерного давления, распределенного по части контура обделки^{*)}.

^{*)} Работа выполнена при поддержке грантом МК-164.2009.5

В основу разработанного метода положена соответствующая математическая модель, позволяющая учитывать основные факторы, существенно влияющие на напряженное состояние подземной конструкции, к которым относятся: формы и размеры поперечного сечения обделки тоннеля, деформационные характеристики массива пород и материала обделки, интенсивность нагрузки и расположение места ее приложения.

С целью реализации сформулированной математической модели рассматривается плоская задача теории упругости о равновесии кольца в общем случае некруговой формы (с одной осью симметрии), подкрепляющего отверстие в линейно - деформируемой бесконечной среде, при действии на части внутреннего контура равномерно распределенного вертикального давления. Расчетная схема представлена на рис. 1.

Здесь среда S_0 , моделирующая массив пород, механические свойства которой характеризуются усредненными значениями модуля деформации E_0 и коэффициента Пуассона ν_0 , ослаблена отверстием произвольной формы, подкрепленным кольцом S_1 , моделирующего обделку тоннеля, выполненным из другого материала с деформационными характеристиками E_1 и ν_1 . Кольцо S_1 и среда S_0 деформируются совместно, то есть на линии контакта L_0 выполняются условия непрерывности векторов напряжений и смещений.

Внутренний контур кольца L_1 нагружен локальным равномерно распределенным вертикальным давлением, место расположения которого определяется углами φ_1^* , φ_2^* , соответствующими началу и концу участка действия нагрузки.

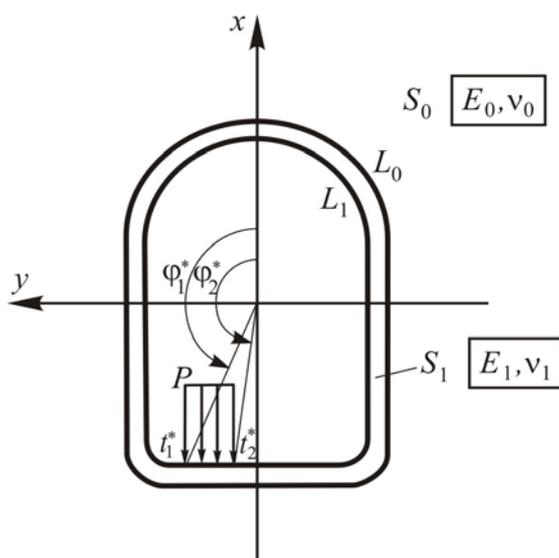


Рис.1. Расчетная схема

Решение поставленной задачи получено с использованием аппарата теории аналитических функций комплексного переменного, конформного отображения, и свойств рядов Фурье и Лорана [3]. Полученное решение реализовано в виде компьютерной программы.

Ниже в качестве примера приводятся результаты расчета монолитной обделки двухпутного железнодорожного тоннеля сводчатого поперечного сечения (рис. 2), на лотковую часть которого действует вертикальная равномерно распределенная нагрузка, моделирующая вес подвижных составов на обоих путях, при следующих исходных данных: $E_0 = 1000$ МПа, $\nu_0 = 0,3$, $E_1 = 27000$ МПа, $\nu_1 = 0,2$.

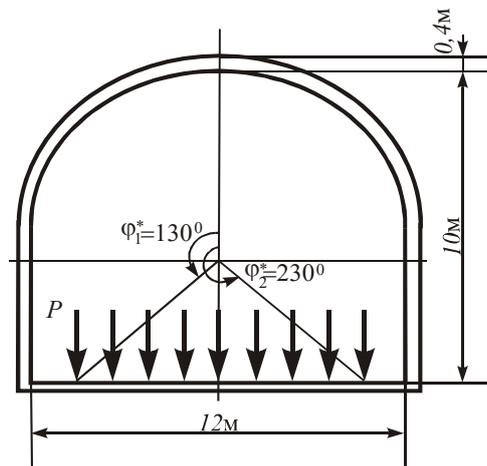


Рис. 2. Поперечное сечение тоннеля

Расчетные эпюры нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta}^{(in)}/P$, $\sigma_{\theta}^{(ex)}/P$ соответственно на внутреннем и наружном контурах поперечного сечения обделки приведены на рис. 3, а,б. Для сравнения пунктирными линиями здесь же показаны аналогичные результаты (значения напряжений даны в скобках), полученные при $\varphi_1^* = 130^\circ$, $\varphi_2^* = 160^\circ$, соответствующие нагружению только левой части лотка.

Как следует из представленных результатов, давление на лотковую часть обделки тоннеля приводит к появлению не только существенных сжимающих нормальных тангенциальных напряжений в нижней части внутреннего контура поперечного сечения конструкции, но и к значительным растягивающим напряжениям в своде и углах. При этом в случае несимметричного нагружения, (при нагружении одного из путей), растягивающие напряжения возникают также и в лотковой части обделки. Эти обстоятельства следует учитывать при проектировании подземных конструкций, особенно сооружаемых в слабых породах, обладающих низким модулем деформации

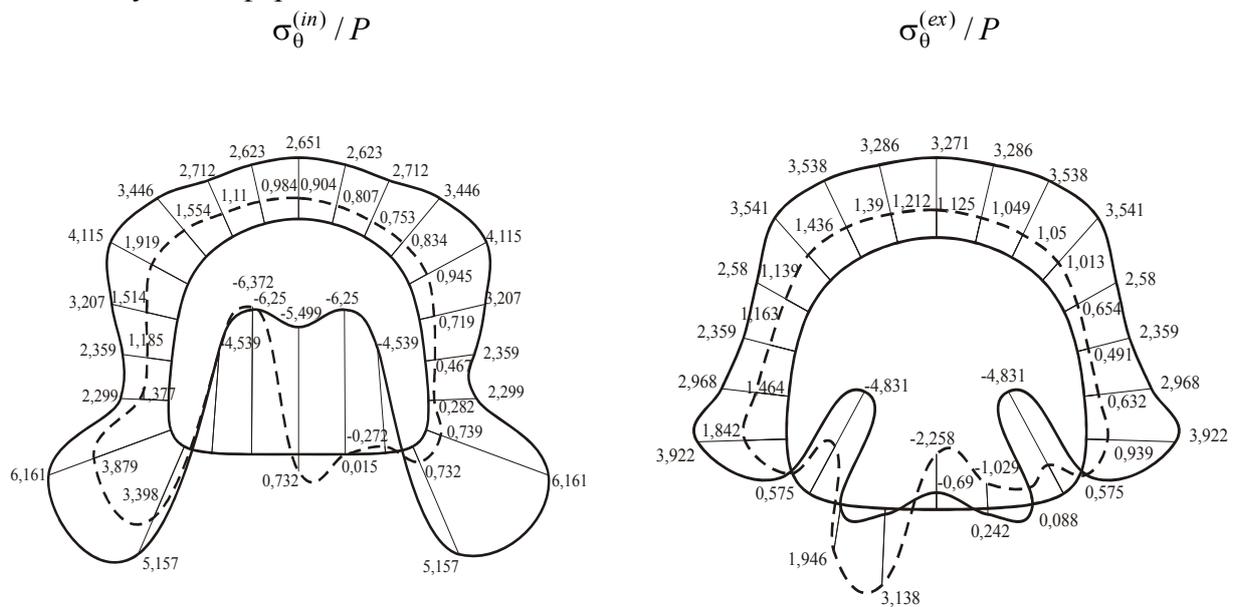


Рис. 3. Расчетные напряжения на контурах обделки: а) – внутреннем, б) - наружном

Описанный метод и реализующая его компьютерная программа не только позволяют производить эффективные расчеты при практическом проектировании, но могут также применяться в

научно – исследовательских целях при выявлении особенностей формирования напряженного состояния подземных конструкций, испытывающих локальные внутренние нагрузки.

Ниже в качестве иллюстрации приводятся некоторые результаты исследований напряженного состояния рассмотренной выше обделки от основных влияющих факторов: отношения модулей деформации массива пород и материала обделки E_0/E_1 , толщины обделки Δ/R , где R - средний радиус выработки, а также положения нагрузки (при этом, для удобства интерпретации результатов использовался безразмерный параметр b/R - относительная ширина нагрузки и соответствующие расчеты проводились при фиксированном значении угла φ_1^* и изменяющемся параметре b/R).

С целью выявления влияния указанных факторов проводились многовариантные расчеты, на основе которых строились графические зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на внутреннем контуре поперечного сечения подземной конструкции, от каждого из влияющих факторов. При этом анализировались не только максимальные напряжения, возникающие в угловых точках подземной конструкции (соответствующие кривые отмечены номером 1), поскольку эти напряжения не всегда оказываются самыми опасными, в частности, в силу того, что в реальных условиях угловая часть обделки, как правило, имеет увеличенную толщину вследствие переборов при проходке, а возникновение трещин растяжения в этой части конструкции может и не приводить к потере несущей способности обделки в целом, но и относительных экстремумов нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на внутреннем контуре в других частях обделки, - в своде (соответствующие кривые отмечены номером 2) и в лотке (кривые 3).

Ниже приведены зависимости максимальных растягивающих и максимальных сжимающих (экстремальных) нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$, возникающих на внутреннем контуре поперечного сечения обделки, от отношения E_0/E_1 . Соответствующие графические зависимости, построенные по результатам многовариантных расчетов при исходных данных: $\Delta/R=0,05$; $\nu_0=0,3$, $\nu_1=0,2$; $\varphi_1^* = 135^\circ$, $\varphi_2^* = 165^\circ$, приведены на рис. 4.

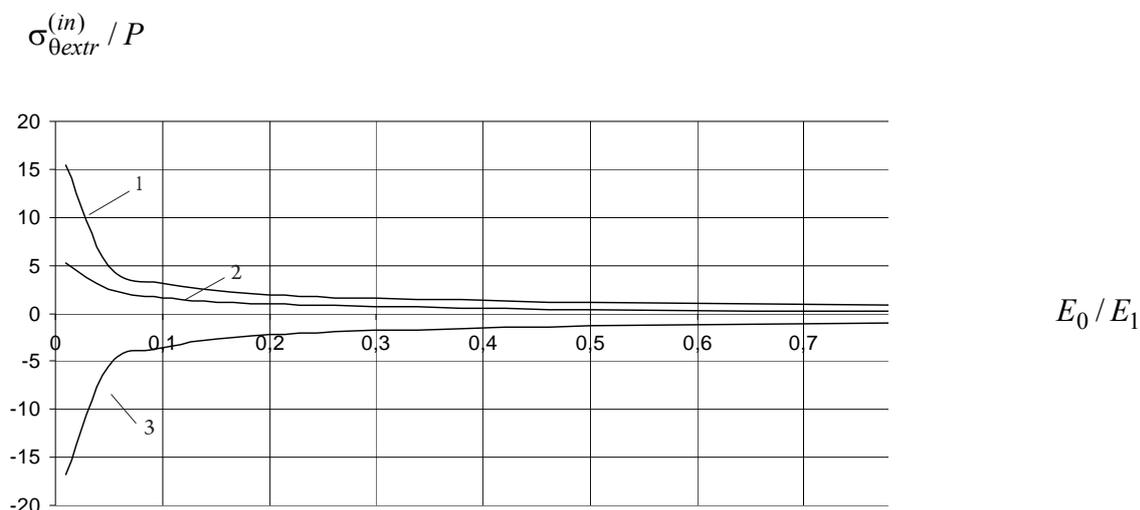


Рис. 4. Зависимости экстремальных напряжений на внутреннем контуре обделки от отношения модулей деформации E_0/E_1 при $\Delta/R=0,05$ (1 – в угловой точке, 2 – в своде, 3 – в лотке)

Из представленных результатов следует, что с ростом отношения E_0/E_1 экстремальные напряжения $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$ в обделке снижаются. При этом наиболее интенсивное снижение напряжений наблюдается в интервале $0 \leq E_0/E_1 \leq 0,05$. Следует отметить, что при рассмот-

рении обделки увеличенной толщины были получены аналогичные зависимости, однако из них следует, что в более толстой обделке интенсивное снижение напряжений происходит в большем диапазоне значений отношения E_0/E_1 . В частности, в обделке толщиной $\Delta/R=0,2$ основное снижение напряжений происходит при $E_0/E_1 \leq 0,15$.

В целом, анализ выполненных расчетов показал, что толщина обделки оказывает существенное влияние на напряженное состояние подземной конструкции. Для иллюстрации этого влияния на рис. 5 приведены соответствующие зависимости напряжений $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$ от относительной толщины Δ/R обделки. Рассмотрен случай, когда массив пород представлен относительно слабыми породами (грунтами), характеризуемых отношением $E_0/E_1=0,03$. При этом принимались следующие исходные данные $\nu_0=0,3$; $\nu_1=0,2$; $\varphi_1^* = 135^\circ$, $\varphi_2^* = 165^\circ$ ($b/R=0,5$).

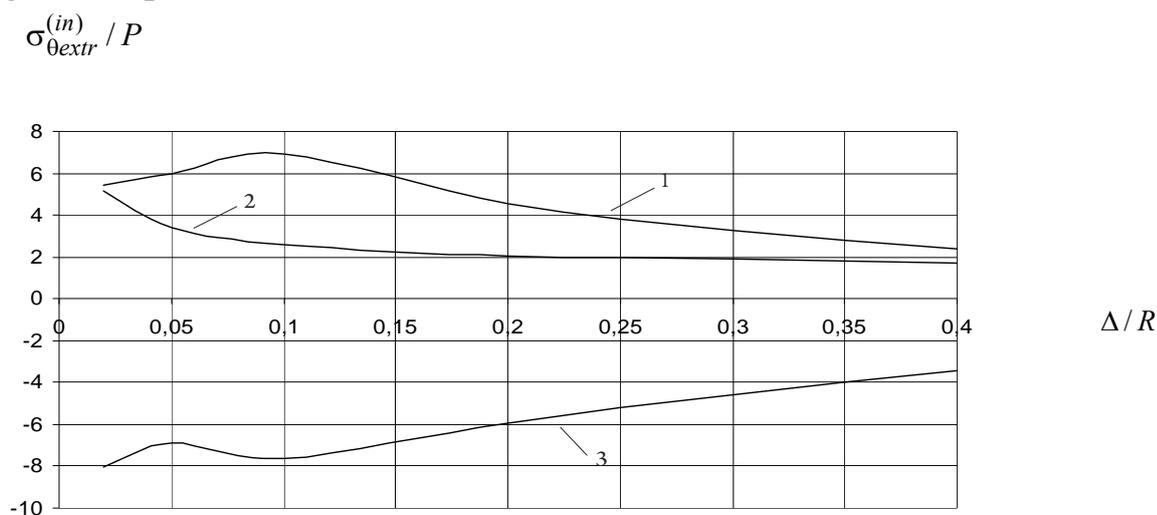


Рис. 5. Зависимости экстремальных напряжений на внутреннем контуре обделки от толщины Δ/R при сооружении тоннеля в слабых породах, характеризуемых отношением $E_0/E_1=0,03$ (кривая 1 – в угловой точке, кривая 2 – в своде, кривая 3 – в лотке)

Из приведенных на рис. 5 результатов видно, что с ростом относительной толщины обделки анализируемые напряжения $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$, в целом, имеют тенденцию к снижению. Однако можно отметить, что в диапазоне значений $0,05 \leq \Delta/R \leq 0,1$ наблюдается некоторый рост экстремальных напряжений $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$ в лотке и в угловой точке обделки (кривые 1, 3). Следовательно, обделки с такими параметрами в рассмотренных условиях являются не рациональными. Аналогичные результаты были получены в случае, когда массив представлен более крепкими породами, характеризующимися отношением $E_0/E_1=0,5$. При этом в крепких породах, влияние толщины Δ/R обделки на ее напряженное состояние проявляется в значительно меньшей степени.

Далее рассматривается влияние, которое оказывает ширина участка нагружения, характеризуемая параметром b/R , на напряженное состояние подземной конструкции. При этом изучались два случая: массив представлен слабыми породами (грунтами), характеризуемых отношением $E_0/E_1=0,03$ и относительно крепкими породами при $E_0/E_1=0,5$. Многовариантные расчеты выполнялись при следующих исходных данных: $\Delta/R=0,05$; $\nu_0=0,3$; $\nu_1=0,2$; $\varphi_1^* = 135^\circ$.

Соответствующие зависимости экстремальных нормальных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)}/P$, возникающих на внутреннем контуре обделки, сооружаемой в слабых породах, приведены на рис. 6.

$$\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)} / P$$

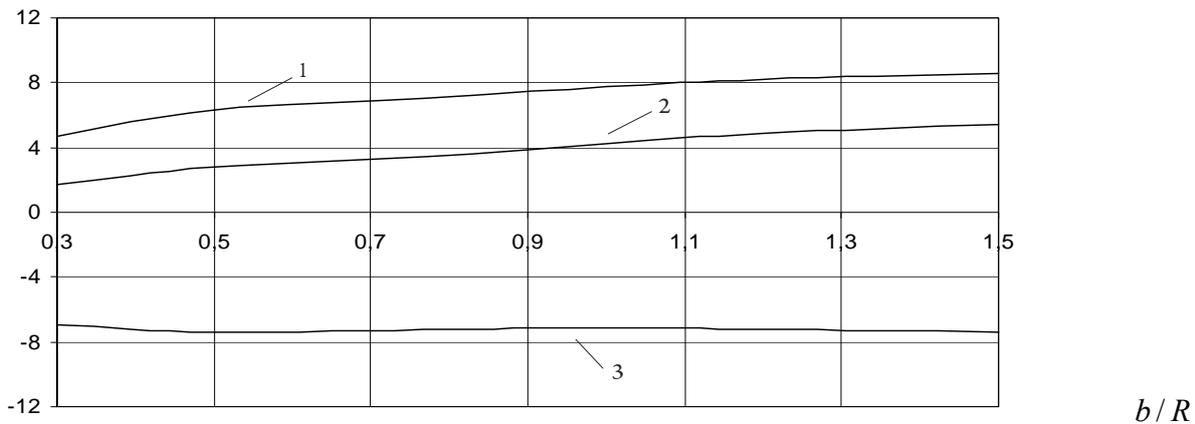


Рис. 6. Зависимости экстремальных напряжений на внутреннем контуре обделки тоннеля, сооружаемого в слабых породах ($E_0 / E_1 = 0,03$), от безразмерной ширины нагрузки b/R (1 – в угловой точке, 2 – в своде, 3 – в лотке)

Как следует из представленных на рис. 6 результатов, в обделке, имеющей относительно малую толщину $\Delta/R=0,05$, в слабых породах с увеличением пролета b/R растягивающие напряжения растут. При этом сжимающие напряжения (кривые 3) практически не зависят от ширины нагрузки b/R . Похожие зависимости были получены при рассмотрении обделки, сооружаемой в относительно крепких породах, характеризуемых отношением $E_0 / E_1=0,5$.

Аналогичные исследования, выполненные для более толстой обделки (при $\Delta/R=0,2$) показали, что в слабых породах влияние размера b/R участка нагружения на напряженное состояние подземной конструкции оказывается более существенным, при этом в крепких породах увеличение толщины обделки практически не оказывает влияния на закономерности формирования напряженного состояния подземной конструкции.

В заключение можно отметить, что приведенные выше зависимости получены при рассмотрении обделки, у которой пролет и высота имеют примерно одинаковые размеры. В горном деле часто встречаются подземные сооружения, поперечные сечения которых вытянуты в вертикальном направлении (вдоль оси x). Выполненные аналогичные исследования показали, что, несмотря на существенные отличия в распределении напряжений в обделках таких выработок, основные закономерности формирования экстремальных напряжений $\sigma_{\theta_{extr}}^{(in)} / P$ в них идентичны рассмотренным выше. При этом проведенный анализ позволил выявить тот факт, что при одинаковом нагружении лотков в обделках сводчатого очертания, подземные конструкции, имеющие форму, вытянутую в вертикальной плоскости, являются более предпочтительными по сравнению с обделками, сечения которых вытянуты в горизонтальном направлении.

Список литературы

1. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1989 –270 с.
2. Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах. – М.: Недра, 1974 – 240 с.
3. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М.: Наука, 1966. - 708 с.