

однако положительно влияет на физико-механические показатели тампонажного камня – прочность при сжатии и изгибе.

Зависимость пластической прочности (P_m) от времени (t) для состава тампонажного раствора Цемент : Песок : Порода = 1 : 1 : 2 + 15 % ПВА-эмульсии описывается следующим уравнением:

$$P_m = - 3,283t^4 + 2,884t^3 - 7,496t^2 - 8,088t + 1,254 \quad (4)$$

Выводы. Использование тампонажных растворов на основе углевмещающих пород является эффективным, так как данные смеси практически не уступают повсеместно применяемому цементно-песчаному раствору по прочности при сжатии, а по способности прокачиваться растворонасосами, проникать в трещины породного массива и седиментационной устойчивости имеют ряд преимуществ. Однако для получения тампонажного камня более высокого качества целесообразно применять различные добавки – пластифицирующие или отошающие, ускорители схватывания и т.п. Это связано с низким качеством и неоднородностью используемых углевмещающих пород, а также достаточно большим количеством частиц каменного угля в породе, что также имеет нежелательный эффект как для свойств жидкого раствора, так и для прочности готового тампонажного камня.

Список литературы

1. Безазьян А.В., Павличенко Т.А., Чередниченко Т.И. Об использовании горных пород Западного Донбасса для производства строительных материалов // Уголь Украины. – 1981. – № 8. – С. 20.
2. Максимов А.П., Евтушенко В.В. Тампонаж горных пород. – М.: Недра. -1978.- 180 с.
3. Башлык С.М., Загибайло Г.Т., Зайонц О.Л. Лабораторный практикум по основам гидравлики и промывочным жидкостям. – М.: Недра. – 1982. – 156 с.
4. Коваленко В.В., Гаркуша В.С. Особенности использования шахтной породы в качестве замены части заполнителя при приготовлении торкретбетона // Уголь Украины. – 2014. - № 12. – С. 38 - 42.
5. Коваленко В.В., Гаркуша В.С. Исследование физико-механических характеристик торкрет-бетонных составов на основе пустой породы // Материалы международной конференции «Форум горняков-2014». Том 2. – Днепропетровск: ООО «Лизунов Пресс». – 2014. – С. 130-138.
6. Хямяляйнен В.А., Баев В.А. Оценка влияния отходов углеобогащения на физико-механические свойства тампонажных растворов и параметры технологии цементации // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск № 1. Труды научного симпозиума «Неделя горняка - 2014» - 2014. – С. 247-253.

РАСЧЕТ ОБДЕЛОК ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ

П.В. Деев, О.М. Левищева, М.А. Петрухин, Тульский государственный университет, Россия

Предложен новый аналитический метод расчета обделок подземных сооружений на сейсмические воздействия землетрясений, учитывающий влияние близкорасположенных подземных объектов и земной поверхности. Приводятся примеры расчета.

Работа поддержана грантом МД-1546.2014.5

При проектировании подземных сооружений, располагаемых в сейсмически активных районах, необходимо принимать во внимание возможность воздействия землетрясения на подземную конструкцию и окружающий массив пород. Оценить последствия сейсмического

воздействия в случае, когда выработка пересекает разлом, пройдена вблизи склона или расположена в структурно-неустойчивых и водонасыщенных грунтах, на современном этапе развития геомеханики не представляется возможным, однако воздействия, связанные с деформацией массива при распространении в нем длинных сейсмических волн, можно рассчитать с достаточной степенью точности.

Нормативные документы [1, 2], действующие на территории Российской Федерации, рекомендуют использовать для расчета подземных конструкций на сейсмические воздействия землетрясений квазистатический подход, рассматривая две задачи теории упругости о напряженном состоянии кольца, подкрепляющего отверстие в упругой полуплоскости при действии на бесконечности неравнокомпонентного сжатия или чистого сдвига. Указанные задачи соответствуют действию продольных и поперечных сейсмических волн, распространяющихся в плоскости поперечного сечения подземного сооружения.

Решения динамических задач о напряженном состоянии плоскости с отверстием, включением или подкрепленным отверстием при распространении в ней длинных волн, полученные в работах [3, 4, 5], свидетельствуют о том, что в случае, когда длины волн значительно превосходят линейные размеры неоднородности, результаты решения динамических и квазистатических задач практически совпадают. В работе [6] с использованием метода динамической фотоупругости была показана возможность применения решений квазистатических задач для практических целей в случае, когда длина волны превышает максимальный характерный размер отверстия в три и более раз. Указанное требование можно сформулировать в виде условия [7]:

$$\frac{E_0 g T_0^2}{20\gamma(1 + \nu_0)} \geq D^2, \quad (1)$$

где E_0 , ν_0 – средние модуль деформации и коэффициент Пуассона пород; g – ускорение свободного падения; γ – удельный вес пород; T_0 – преобладающий период колебаний частиц пород; D – наибольший поперечный размер выработки или комплекса выработок.

Характерной особенностью расчета подземных сооружений на сейсмические воздействия является тот факт, что расположение очага землетрясения, а, следовательно, и направление прихода сейсмических волн неизвестно заранее. Поскольку направление волн оказывает значительное влияние на распределение напряжений в обделке подземного сооружения, расчет на действие сейсмических волн заданного направления является малоэффективным. Более полезным является подход, предложенный в работе [7], согласно которому для землетрясения заданной интенсивности аналитически определяется наихудшее напряженное состояние, которое может возникнуть в каждом нормальном сечении обделки при землетрясении заданной интенсивности. В дальнейшем указанный подход был использован в работе [8] при разработке метода расчета обделок комплекса параллельных круговых тоннелей и работе [9] для расчета крепи параллельных горных выработок произвольного поперечного сечения на сейсмические воздействия землетрясений.

В настоящей работе предлагается усовершенствовать метод расчета [9], рассмотрев случай, когда параллельные выработки находятся на небольшой глубине. В основу метода положены аналитические решения двух плоских задач теории упругости, расчетные схемы которых представлены на рис. 1.

Среда S_0 , моделирующая массив пород, деформируется совместно с кольцами S_m ($m = 1, \dots, N$), моделирующими крепь выработок, т.е. на линиях контакта $L_{0,m}$ выполняются условия непрерывности векторов смещений и напряжений. Деформационные свойства среды S_0 характеризуются модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 , деформационные свойства колец S_m – величинами E_m и ν_m . Направление вспомогательной оси x' соответствует направлению распространения сейсмических волн.

Руководство [2] рекомендует использовать следующие выражения для определения параметров напряжений на бесконечности, моделирующих действие длинных сейсмических волн:

$$P = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma c_1 T_0; \quad \xi = \frac{v_0}{1 - v_0}; \quad S = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma c_2 T_0, \quad (2)$$

где A – коэффициент, соответствующий баллу землетрясения; K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения; c_1, c_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн.

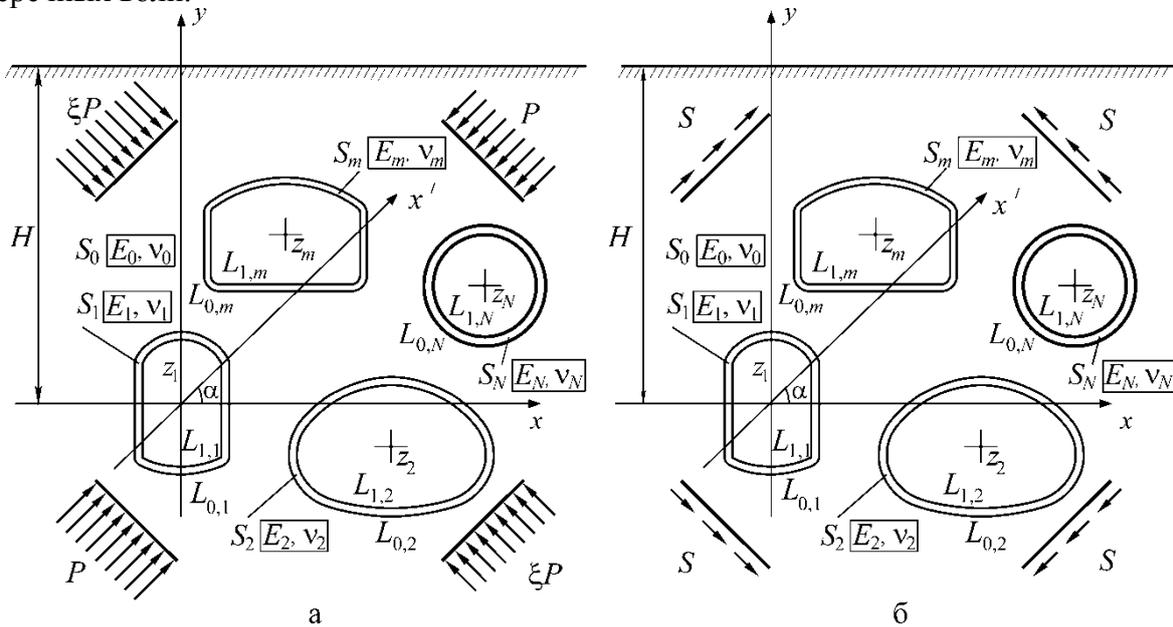


Рис. 1. Расчетные схемы задач теории упругости, рассматриваемых при моделировании действия продольных (а) и поперечных (б) длинных сейсмических волн

Для определения скоростей сейсмических волн можно использовать формулы [7]:

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - v_0}{(1 + v_0)(1 - 2v_0)}}; \quad c_2 = \sqrt{\frac{E_0 g}{2\gamma(1 + v_0)}}. \quad (3)$$

Решение задачи теории упругости, схема которой представлена на рис. 1 а, приводится в работе [10]. Решение получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [11], аналитического продолжения комплексных потенциалов, регулярных вне отверстий в нижней полуплоскости, через ее границу, конформных отображений и комплексных рядов. После некоторых математических преобразований решение поставленной задачи сводится к итерационному процессу, в каждом приближении которого каждое из колец рассматривается как одиночное кольцо в полной плоскости, а влияние границы полуплоскости и других подкрепленных отверстий учитывается наличием в граничных условиях дополнительных слагаемых, представляемых в виде рядов Лорана, коэффициенты которых уточняются на основе предыдущих итераций.

Полученное решение может быть использовано также для рассмотрения действия продольной волны в фазе растяжения, однако следует иметь в виду, что растягивающие нормальные напряжения могут передаваться через линию контакта «крепь-массив» только при использовании анкерного крепления или наличия значительных сжимающих напряжений на линии контакта, обусловленных, например, действием собственного веса пород. Поэтому при практической оценке несущей способности крепи выработки, расположенной в сейсмически активном районе, напряжения, полученные из расчета на сейсмические воздействия землетрясений и действие гравитационных сил, следует суммировать с осторожностью, рассматривая наиболее неблагоприятные варианты сочетаний нагрузок.

Если положить $P = S$, $\xi = -1$, а вместо величины α принять значение $\alpha + \pi/4$, то решение рассмотренной задачи можно использовать для определения напряжений в обделках подземных сооружений, вызванных действием поперечной волны (см. рис. 1 б).

С целью иллюстрации возможности метода выполним расчет обделок двух параллельных автодорожных тоннелей, расположенных на небольшой глубине (рис. 2).

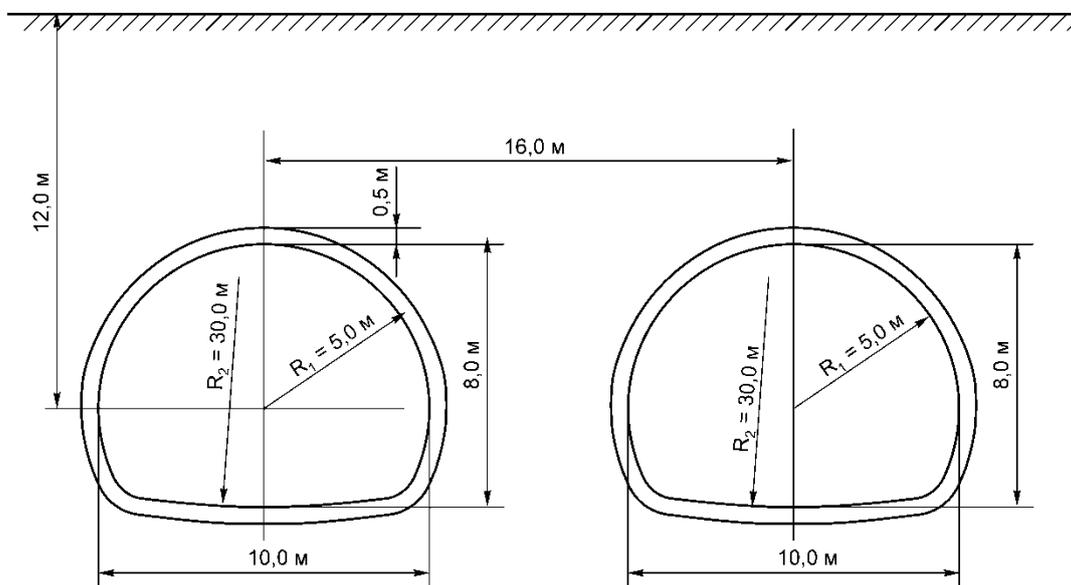


Рис. 2. Поперечное сечение рассматриваемых тоннелей

Исходные данные принимались согласно работе [11]: коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве $\lambda = 0,6$; удельный вес пород $\gamma = 0,023 \text{ МН/м}^3$; деформационные характеристики горных пород $E_0 = 1500 \text{ МПа}$, $\nu_0 = 0,35$; характеристики бетона обделок тоннелей $E_1 = E_2 = 30000 \text{ МПа}$, $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$; расчетное сопротивление бетона сжатию $R_b = 14,5 \text{ МПа}$, растяжению $R_{bt} = 1,05 \text{ МПа}$; преобладающий период колебания частиц породы $T_0 = 0,5 \text{ с}$, расчетная интенсивность землетрясения 9 баллов по шкале МСК ($AK_1 = 0,1$). Подставляя имеющиеся данные в условие (1), убеждаемся, что оно выполняется.

Результаты расчета обделок тоннелей на сейсмические воздействия землетрясений (огibaющие эпюры по максимальным значениям сжимающих и растягивающих напряжений) приведены на рис. 3 и рис. 4. В силу симметрии рассматриваемой задачи огibaющие эпюры приведены только для левого тоннеля. Действие продольной волны в фазе растяжения при расчетах не рассматривалось. Для сравнения пунктирными линиями показаны напряжения, соответствующие случаю одиночного тоннеля, значения напряжений даны в скобках.

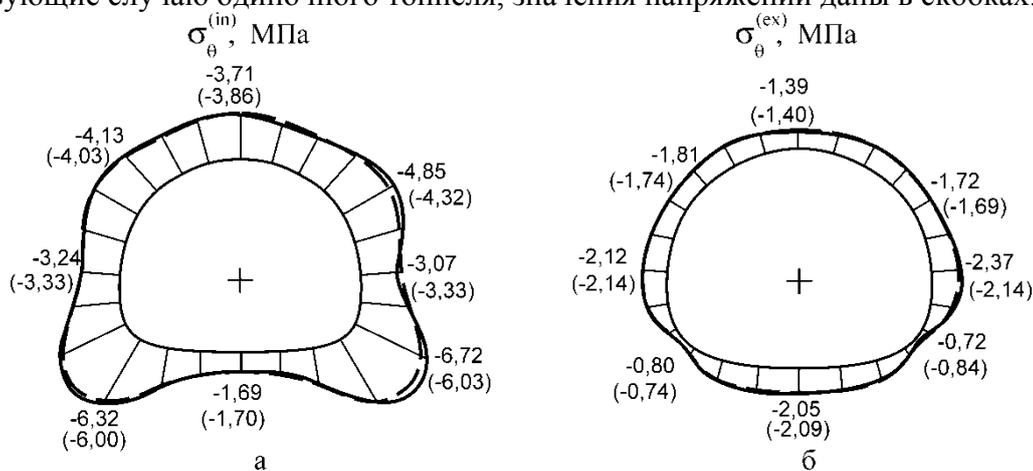


Рис. 3. Максимальные сжимающие напряжения, которые могут возникнуть на внутреннем контуре поперечного сечения обделки левого тоннеля при действии длинных сейсмических волн (а) и соответствующие им напряжения на наружном контуре (б)

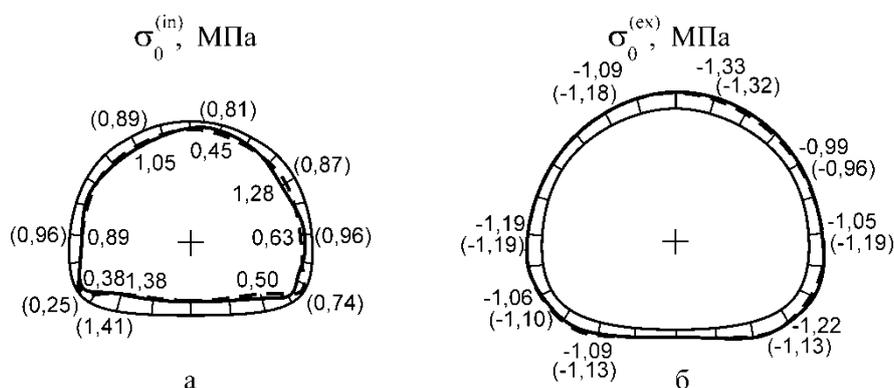


Рис. 4. Максимальные растягивающие напряжения, которые могут возникнуть на внутреннем контуре поперечного сечения обделки левого тоннеля при действии длинных сейсмических волн (а) и соответствующие им напряжения на наружном контуре (б)

Из результатов расчета, представленных на рис. 3, 4, видно, что землетрясение интенсивностью 9 баллов может привести к возникновению значительных сжимающих и растягивающих напряжений на внутренних контурах поперечного сечения обделок. Наличие второго тоннеля приводит к росту максимальных сжимающих напряжений на 10 % и практически не влияет на величину максимальных растягивающих напряжений.

Для оценки прочности подземных конструкций полученные значения максимальных сжимающих и растягивающих напряжений, которые могут возникнуть в обделке тоннеля при землетрясении, следует сложить с напряжениями, обусловленными действием собственного веса пород. При этом следует иметь в виду, что расчет дает максимальные значения напряжений от действия собственного веса пород, а реальные напряжения в конструкции могут оказаться несколько меньше, поэтому при суммировании напряжений следует отдельно складывать положительные и отрицательные значения. Значения напряжений в обделках рассматриваемых тоннелей при действии собственного веса пород приведены в работе [10]. Эпюры суммарных сжимающих напряжений на внутреннем контуре поперечного сечения левого тоннеля и соответствующие значения напряжений на наружном контуре представлены на рис. 5.

Поскольку в рассматриваемом примере растягивающие напряжения, вызываемые действием собственного веса пород, возникают только в центральной части лотка обделки [10], и максимальные суммарные растягивающие напряжения не превышают аналогичных напряжений, показанных на рис. 4, эпюра суммарных растягивающих напряжений не приводится.

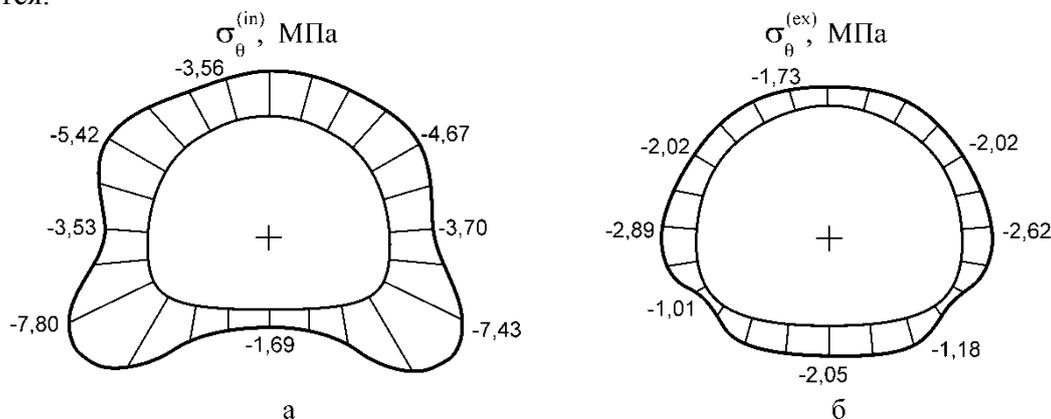


Рис. 5. Максимальные сжимающие напряжения, которые могут возникнуть на внутреннем контуре поперечного сечения обделки левого тоннеля при 9-балльном землетрясении (а) и соответствующие им напряжения на наружном контуре (б)

Как видно из эпюр напряжений, представленных на рис. 5, максимальные сжимающие напряжения, которые могут возникнуть в обделках рассматриваемых тоннелей при

землетрясения заданной интенсивности, не превышают расчетного сопротивления бетона сжатию. В лотке тоннелей могут возникнуть растягивающие напряжения (см. рис. 4), превышающие расчетное сопротивление бетона ($R_{bt} = 1,05$ МПа), следовательно, в этом месте обделки возможно образование трещин при землетрясении.

В дальнейшем планируется усовершенствовать разработанный метод расчета, используя решение динамической задачи теории упругости об отражении плоской гармонической волны от границы полуплоскости.

Список литературы

1. Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей ВСН 193-81. – М.: Минтрансстрой, 1982. – 68 с.
2. Руководство по проектированию подземных сооружений в сейсмических районах. – М.: ТИМР, 1996.
3. Mow C.C., Mente L.J. Dynamic stresses and displacements around cylindrical discontinuities due to plane harmonic sphere wave // Trans. Of ASME, Dec. 1963 “Journal of Applied Mechanics” – P. 598-604.
4. Pao J.H., Mow C.C. Dynamic stress concentration in elastic plate with rigid circular inclusion // Proc. of The IV US National Congress of Applied Mechanics, Berkeley, USA, 1962.
5. Саммаль С.А. Напряженное состояние кольца произвольной формы, подкрепляющего отверстие в бесконечной среде из другого материала, при распространении гармонических волн // Тр. междунар. науч. конф. «Современные проблемы математики, механики и информатики». Россия, Тула, 23-27 ноября 2009 г. – Тула, 2009. – С. 264 – 267.
6. Хесин Г.Л., Костин И.Х., Затеев В.Б. Исследование концентрации напряжений около отверстий в тонких пластинках при воздействии волны давления // Сб. № 73, МИСИ «Моделирование задач термодинамики, термоупругости и статики поляризованно-оптическим методом». – М., 1970. – С. 33-40.
7. Фотиева Н.Н. Расчет крепи подземных сооружений в сейсмически активных районах. – М.: Недра, 1980 – 222 с.
8. Фотиева Н.Н., Саммаль А.С., Анциферов С.В. Расчет обделок параллельных взаимовлияющих круговых тоннелей мелкого заложения // Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды междунар. конф. – Тула, 2002. – С. 194-201.
9. Фотиева Н.Н., Булычев Н.С., Деев П.В. Напряженное состояние обделок глубоких параллельных некруговых тоннелей при распространении длинных сейсмических волн в массиве пород // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». – Тула: Гриф и К, 2008. – С. 146 – 150.
10. Деев П.В. Напряженное состояние обделок параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения при распространении в массиве длинных сейсмических волн // Известия ТулГУ. Сер. Естественные науки. – Вып. 2. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 292-302.
11. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
12. Деев П.В. Напряженное состояние обделок параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения, расположенных на небольшой глубине // Матер. междунар. конф. «Форум горняков» 11-13 ноября 2007. Днепропетровск, 2007. – С. 80-84.