

Л. А. Рыбалкин^{1✉}, В. В. Сказка¹, И. М. Сердюк¹

Разработка стенда для исследования распространения сейсмических поверхностных волн вдоль цилиндрической полости

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Аннотация. Данная работа рассматривает возможности применения сейсмических волн, распространяющихся вдоль цилиндрической полости, для решения задач горнодобывающей отрасли и инженерного строительства, в частности мониторинга состояния подземных сооружений и туннелей. Для проведения исследований разработан специальный лабораторный стенд, позволяющий моделировать как различные материалы и горные породы за внешним контуром тоннелей, так и процессы фильтрации пластовых вод в окружающем пространстве и обделке модели. В работе демонстрируется возможность применения различной регистрирующей аппаратуры, что в свою очередь позволит не только расширить методологические подходы к проведению исследований, но и отработать наиболее релевантную компоновку аппаратуры перед решением задач на действующих инженерных объектах.

Ключевые слова: физическое моделирование, туннельные волны, поверхностные волны, сейсмический мониторинг, мониторинг состояния подземных сооружений

L. A. Rybalkin^{1✉}, V. V. Skazka¹, I. M. Serdyuk¹

Development of a stand for studying the propagation of seismic surface waves along a cylindrical cavity

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com

Abstract. This work examines the possibilities of using seismic waves propagating along a cylindrical cavity to solve problems in the mining industry and engineering construction, in particular monitoring the condition of underground structures and tunnels. A special laboratory stand has been developed to conduct the research, allowing modeling both various materials and rocks behind the outer contour of tunnels, and the processes of filtration of formation waters in the surrounding space and the lining of the model. The work demonstrates the possibility of using various recording equipment, which in turn will not only expand the methodological approaches to conducting research, but also work out the most relevant configuration of equipment before solving problems at existing engineering facilities.

Keywords: physical modeling, tunnel waves, surface waves, seismic monitoring, monitoring of the condition of underground structures

Введение

При возведении инженерных объектов подземного строительства, проходке подземных выработок и прокладке тоннелей важнейшей задачей является обес-

печение безопасности как на этапе строительства, так и в процессе эксплуатации. Проектирование подобных объектов основывается на результатах инженерно-геологической съемки методами бурения разведочных скважин с последующей интерполяцией и оконтуриванием области будущих работ. Зачастую пространственного разрешения таких данных недостаточно для восстановления параметров и границ геологической среды, определения областей в массиве с повышенной неустойчивостью, водоотдачей и разломными зонами. Другой актуальной проблемой является установление точного расстояния от опасных для проходки участков или структур до тоннелепроходческого комплекса.

Часто для решения данных проблем применяются геофизические методы, основанные на регистрации и обработки сейсмического/акустического излучения. [Жуков, 2019; Вагин, 2010; Пригара, 2019; Сапфиров, 2003]. Рассматриваемые сейсморазведочные работы проводятся, как правило, на основе метода отраженных волн. Главным недостатком метода является низкое отношение сигнал/шум вследствие наличия высокоамплитудных поверхностно-волновых и других помех. Перспективным направлением в исследовании состояния массива горных пород является использование сейсмических волн, распространяющихся по поверхности выработки (туннельные волны) для обнаружения зон с выраженными структурными и механическими особенностями, возникающих вблизи горных выработок. К преимуществам сейсмических наблюдений с использованием поверхностных волн относятся высокая амплитуда сигнала и ее малое затухание в процессе распространения, а также возможность установки сейсмоприемников без бурения глубоких шпуров. Применение такого подхода зарекомендовало себя при решении различных задач, сопряженных как с инженерным строительством подземных сооружений, так и при подземной добычи полезных ископаемых [6 - 11]. Данная работа посвящена разработке лабораторных средств исследования возможностей использования туннельных волн для обнаружения низкоскоростных включений вблизи горных выработок.

Лабораторный стенд

Для проведения экспериментальных исследований распространения туннельных волн с целью обнаружения опасных зон, возникающих вблизи горных выработок, был разработан лабораторный стенд. Схематическое изображение стенда представлено на рисунке 1. Для размещения модели туннеля произведена экскавация выемки длиной 15м, шириной 2м и глубиной 2,5 метра. На дно выемки укладывают слой мелкозернистого песка высотой 0,3м с последующим вибротрамбованием. Далее размещают модель туннеля представляющую собой металлическую трубу длиной 11м, внутренним диаметром 0,6м и внешним диаметром 0,7м.

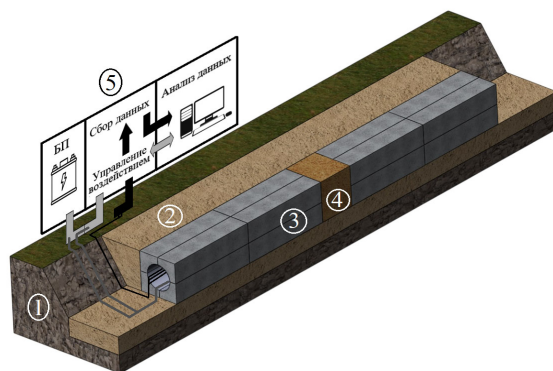


Рис. 1. Стенд для исследования распространения сейсмических поверхностных волн вдоль цилиндрической полости: 1 – экскавационная выемка; 2 – слой из виброутрамбованного грунта; 3 – секции внешнего контура модели; 4 – секция водонасыщенного грунта внешнего контура; 5 – система генерации, сбора и анализа сейсмических сигналов.

Моделирование различных материалов за внешним контуром модели осуществляется за счет организации интервалов засыпки пространства сыпучими породами разного гранулометрического состава с последующим виброуплотнением (лессы, песок, мелкозернистый гравий, и др.) или же созданием искусственной полной или частичной опалубки из бетонных блоков. Линейные размеры внешнего контура могут варьироваться в зависимости от решаемых задач, минимальная толщина стенки контура составляет 1,5 метра для стабильной работы аппаратуры при генерации сигналов до 5000 Гц. Для предотвращения смещения части засыпки размещаются перегородки из листов фанеры мдф, расположенных перпендикулярно оси трубы. Для решения задач с моделированием тоннелей с внутренней обделкой возможна установка предварительно сформированного бетонного кольца во внутреннее пространство трубы с предварительной промазкой интервала стыка твердеющим составом – для предотвращения неполного прилегания стенок.

Наиболее частым негативным явлением в подземных сооружениях и туннелях является фильтрация подземных вод во внутреннее пространство сооружения. Такое движение воды по системам естественной или техногенной трещиноватости, приводит к постепенному разрушению обделки тоннеля и снижению прочности окружающих его пород. Для моделирования процессов фильтрации пластовых вод в натурных условиях выделяют интервал длиной 1 – 1,5м огораживают его листами мдф фанеры с последующей герметизацией стыков прилегания к трубе. Далее размещают гибкую трубку малого внешнего диаметра с предварительно перфорированными стенками: один конец трубки выводят за пределы верхней границы выемки, а второй конец описывает дугу по внешней поверхности модели или же полный круг. После интервал засыпают речным песком малой фракции без последующей трамбовки. Подача воды во внешний конец

трубки будет продуцировать увлажнение интервала имитирую фильтрацию пластовых вод, без рисков размыва соседних секций обкладки трубы.

Исследования распространения сейсмических поверхностных волн вдоль цилиндрической полости позволяют получить информацию о свойствах горных пород с целью определения их типа и глубины залегания за пределами контура туннеля. В данном случае речь идёт о закономерностях, наблюдаемых в законтурной зоне туннеля при искусственном генерировании сейсмических волн. Эти периодические колебания могут генерироваться: однократными импульсами за счет коротких ударов, серии длительных колебаний с периодическим возобновлением. На рисунке 2 представлено размещение источника колебаний на внутренней стенке модели, а также варианты организации измерительных линий.

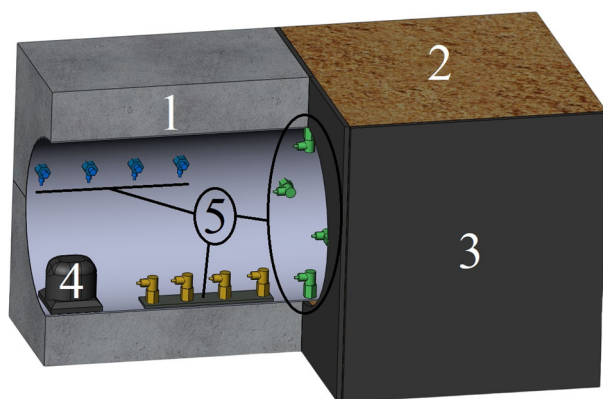


Рис. 2. Возможная расстановка источника и приемников микросейсмических колебаний в ходе экспериментов: 1 – часть секции внешнего контура; 2 – интервал с водонасыщенными породами; 3 – изоляция стенок интервала; 4 – источник колебаний; 5 – пример расстановки сейсмических датчиков.

Источник колебаний представляет собой ButtKicker LFE: низкочастотный преобразователь, оснащенный 1,48-кг сердечником с магнитным подвесом. Данный источник способен генерировать вибрационные колебания с частотой до 500 Гц. Для более высокочастотных колебаний, до 5000 Гц может использоваться источник на базе многослойных пьезокерамических актуаторов. Данные источники, полученные методом совместного спекания в стопке при низком напряжении, обладают отличными характеристиками и длительным сроком службы.

Измерительная система представляет собой набор типовых пьезоэлектрических датчиков ускорений KD33. Благодаря их высокому коэффициенту холостого хода (чувствительности) и высокой внутренней емкости возможно подключение удлиненных проводов до 50м, что в условиях протяженной модели туннеля значительно облегчает задачу размещения. Крепление датчиков возможно, как на твердеющие составы (воск, клей, эпоксидные смолы), так и на контактную измерительную платформу с магнитом на противоположном торце. Последний вариант предпочтителен, так как позволяет оперативно изменять расстановку пачки датчиков при проведении серии разнонаправленных экспериментов.

Выводы

Моделирование породного массива позволяет проводить различные испытания и исследования в лабораторных условиях, получать достоверные данные о механических свойствах пород, их поведении при воздействии различных факторов. Это помогает оптимизировать процессы разработки месторождений полезных ископаемых и строительства инженерных объектов подземным способом, снижать риски и обеспечивать безопасность ведения работ.

Организация представленного в работе лабораторного стенда позволяет проводить серии экспериментальных исследований распространения микросейсмических волн на поверхности протяженного интервала цилиндрической полости, но также позволяет оперативно размещать и корректировать состав генерирующей и регистрирующей аппаратуры.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Госзадания, номер государственной регистрации 121052500138-4 (FWNZ-2021-0001).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуков А. А. и др. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №. 4. – С. 121-136.
2. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. 188 с.
3. Пригара А. М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений //Науки о Земле и недропользование. – 2019. – Т. 42. – №. 2 (67). – С. 176-184.
4. Сапфиров И. А., Бабкин А. И. Горно-геологические приложения сейсморазведочных исследований во внутренних точках среды //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – №. 10. – С. 214-218.
5. Tzavaras J. et al. Three-dimensional seismic imaging of tunnels //International Journal of Rock Me-chanics and Mining Sciences. – 2012. – V. 49. – P. 12-20.
6. Bohlen T., Lorang U., Rabbel W., Muller G., Giese R., Luth S. and Jetschny S. 2007. Rayleigh-to-shear wave conversion at the tunnel face - from 3D-FD modeling to ahead-of-drill exploration. Geo-physics 72, T67–T79.
7. Jetschny S., Bohlen T., De Nil D. On the propagation characteristics of tunnel surface-waves for seismic prediction //Geophysical Prospecting. – 2010. – Т. 58. – №. 2. – С. 245-256.
8. Chen K., Zhang Z., Zhou Y. Application of surface wave in reinforced concrete invert detection //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 660. – №. 1. – С. 012069.
9. Czarny R. et al. Dispersive seismic waves in a coal seam around the roadway in the presence of exca-vation damaged zone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2021. – V. 148. – P. 104937.
10. Дорохин К.А. Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн. – дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. - Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, 2017

© Л. А. Рыбалкин, В. В. Сказка, И. М. Сердюк, 2025