

Основные подходы к геомеханическому мониторингу транспортных тоннелей

М.В. Старых¹, А.А. Ревякин¹, Т.А. Урсул²

¹*Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*

Аннотация: В статье выполнен краткий обзор геомеханических методов изучения напряженно-деформированного состояния грунтового массива и тоннельной обделки. Рассмотрена организация мониторинга в тоннелях с применением обычных и оптоволоконных систем. Описаны критерии анализа данных мониторинга и условия прочности конструкций.

Ключевые слова: железнодорожный тоннель, строительство, эксплуатация, мониторинг, тензометр, напряжения, деформации, прочность, несущая способность.

Для обеспечения комплексной безопасности строительства и эксплуатации транспортных тоннелей весьма важным является получение качественных данных о напряжениях и деформациях в обделке и окружающем массиве на различных этапах жизненного цикла [1-3].

Данная задача становится особенно актуальной при применении новых материалов и конструкций для подземных сооружений, в том числе многослойных типов обделки [4-5].

Экспериментальные методы изучения НДС по назначению делятся на методы определения НДС грунтового массива и обделки подземных сооружений [6-8].

Изучение свойств массивов осуществляется преимущественно геофизическими и геомеханическими методами. Точность геофизических методов во многом зависит от примененного при обработке данных математического аппарата, приборной базы, а также опыта и квалификации исполнителей. Они позволяют исследовать как локальные участки пород в окрестности горных выработок, так и большие объемы массивов. Целесообразным является подтверждение полученных результатов с

помощью прямых методов измерений, например, путем устройства замерных станций геомеханического мониторинга напряженно-деформированного состояния. Недостатком такого подхода является большая трудоемкость и стоимость этих работ.

Детальный анализ методов исследования НДС крепи подземных сооружений проведен в работе [9]. Следует отметить, что они также позволяют определить интенсивность напряжений в окружающем породном массиве на основе решения обратных геомеханических задач.

Систематические натурные исследования в подземных сооружениях начали проводиться в начале 50-х годов прошлого столетия. Постепенно совершенствовалась теоретическая и приборная база средств мониторинга, с начала 90-х годов начали успешно применяться компьютерные технологии обработки и анализа данных.

Существуют два направления натуральных измерений: измерение величин горного давления на крепь со стороны горного массива; измерение деформаций и напряжений в слоях обделки с последующим расчетом величин давления на крепь и напряжений в массиве.

Измерения по первому методу в нашей стране проводились с использованием одиночных динамометров и динамометрических баллонов.

В вертикальных стволах шахт и рудников мониторинг крепи осуществлялся институтом ВНИМИ, начиная с пятидесятых годов прошлого века (Булычев Н.С., Димов А.И., Дробышев В.Ф., Крупенников Г.А., Козел А.М., Филатов И.А. и др.). В ходе измерений определялись фактические нагрузки на крепь стволов в различных горно-геологических и гидрогеологических условиях. В дальнейшем это позволяло более обоснованно вести проектирование и расчет крепи, а также совершенствовать нормативную базу в этой области. Измерения выполнялись с помощью установки в бетонную крепь динамометрических баллонов.

К более современным средствам контроля нагрузок (давления) на крепь относятся датчики давления, представляющие собой плоскую емкость небольшого диаметра, заполненную деаэрированной жидкостью. Внешнее давление, приложенное к поверхности емкости, передается с помощью жидкости на струнный датчик и далее на блок сбора и обработки данных с преобразованием в электрический сигнал.

Основным недостатком первого метода определения параметров НДС в обделке является искусственное завышение данных о неравномерности нагружения крепи на внешнем контуре [9].

Второй метод определения параметров НДС обделки получил большее распространение в отечественной и зарубежной практике.

Так, институтом ВИОГЕМ разработана методика мониторинга шахтных стволов на основе применения закладных датчиков деформаций типа ТБ 200.

Тензометры состоят из сплошного цилиндрического корпуса и двух анкеров, между которыми смонтированы натянутая струна. Для возбуждения струны импульсом электромагнитного поля и создания переменной ЭДС от ее собственных колебаний служит электромагнитная головка, установленная посередине струны.

Деформация исследуемой среды через анкера передается струне, изменяя ее натяжение, и, следовательно, частоту собственных колебаний. Под действием температуры исследуемой среды (бетона или скалы) изменяется также сопротивление электромагнитной головки. По измеренному периоду колебаний струны, с помощью индивидуальной градуировочной зависимости удлинения струны тензометра от частоты ее колебаний, определяют величину относительных осевых деформаций базы тензометра.

В транспортных тоннелях большой комплекс работ выполнен учеными и специалистами ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» [9-11].

В основном применялась простая компоновка замерных станций систем мониторинга, включающая несколько групп датчиков линейных деформаций (рис. 1).

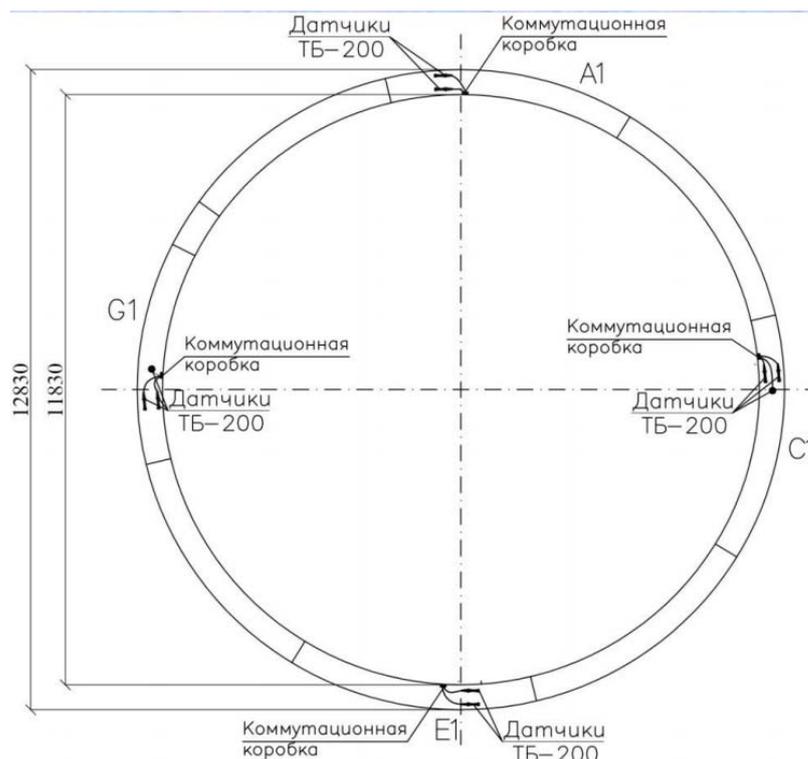


Рис. 1. – Пример схемы замерной станции системы мониторинга в тоннеле

Система при необходимости может дополнительно комплектоваться датчиками различного типа, позволяющими определять широкий спектр геомеханических показателей, как в тоннеле, так и в окружающем массиве и поверхностной застройке.

В последние годы в различных отраслях строительства активно внедряются системы мониторинга, использующие в качестве чувствительного элемента оптоволокно.

Волоконно-оптическое оборудование – это точечные и распределённые датчики и приборы их опроса. Чувствительным элементом датчика является

оптическое волокно. Сигнал передается по оптическому волокну с помощью светового импульса. Это позволяет волоконно-оптическим датчикам иметь ряд преимуществ перед традиционными датчиками:

- небольшой размер и вес;
- возможность встраивания чувствительного элемента в структуру материала;
- пожар- и взрывобезопасность;
- невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей;
- высокая коррозионная, химическая и радиационная стойкость;
- высокая точность;
- возможность мультиплексирования (несколько сотен датчиков интегрируются с одним оптическим источником);
- возможность распределённых измерений;
- стабильная передача оптического сигнала на расстояние до 50 км от АРМ;
- высокая скорость реакции на изменение измеряемой величины;
- продолжительный срок службы (до 30 лет).

Вместе с тем апробированные решения для мониторинга железнодорожных тоннелей на базе оптико-волоконных систем отечественного производства в нашей стране отсутствуют. Известные зарубежные системы характеризуются высокой стоимостью монтажа и технического обслуживания.

В целом, основной информацией о состоянии тоннельной обделки, полученной с помощью замерных станций, являются относительные деформации. По их величинам производится определение напряжений в обделке с учетом объемного напряженного состояния. В случае определения всех компонентов напряженно-деформированного состояния обделки могут

быть определены главные напряжения и произведен всесторонний анализ несущей способности конструкций.

При установлении критериев оценки данных мониторинга следует использовать основополагающие принципы методики предельных состояний. Параметры тоннельной обделки, как правило, принимаются на основании расчета на несущую способность с применением нормативных коэффициентов надежности и ответственности. С учетом этого, ранжирование данных мониторинга по первому предельному состоянию производится по трем уровням:

1 уровень (зеленый) – обделка работает в нормальном режиме: напряжения не превышают расчетных значений.

2 уровень (желтый) – обделка работает в непредусмотренном проектом режиме: напряжения превышают расчетные значения.

3 уровень (красный) – критический режим работы обделки: не соблюдается одно из следующих условий:

$$\tilde{\sigma}_3 \leq 1 + \beta_{\text{п}} \tilde{\sigma}_1, \quad (1)$$

$$R_b \geq \sigma_1, \quad (2)$$

где $\tilde{\sigma}_3 = -\frac{\sigma_3}{R_b}$; $\tilde{\sigma}_1 = -\frac{\sigma_1}{R_b}$;

σ_1, σ_3 – значения максимальных и минимальных главных напряжений в обделке;

β – параметр объемной прочности бетона.

По установленному уровню надежности разрабатывается рекомендации по обеспечению работоспособного и безопасного состояния тоннеля на планируемый временной период.

Литература

1. Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В. Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 1. С. 34-40.
2. Плешко М.С., Насонов А.А., Гармонин Р.Э., Сироткин А.Ю. Элементы геотехнического мониторинга подземных сооружений, закрепленных железобетонными анкерами // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196.
3. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.
4. Саммаль А.С., Воронина И.Ю., Шелепов Н.В. Математическое моделирование взаимодействия многослойных обделок параллельных некруговых подводных тоннелей с технологически неоднородным массивом пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 3. С. 154-163.
5. Голик В.И., Страданченко С.Г., Масленников С.А. Новое направление оптимизации бетонных работ при подземном строительстве // Технологии бетонов. 2016. № 7-8 (120-121). С. 33-37.
6. Heng-chang L., Guo-qing Z., Bo L., et al., 2009. In-site monitoring and analysis of shaft lining's additional strain in failure and formation grouting. *Procedia Earth and Planetary Science*. 1, pp. 503–511.
7. He M.; Li. C.; Gong W.; Sousa, L.R.; Li S. (2017). Dynamic tests for a constant-resistance-large-deformation bolt using a modified SHTB system. *J. of Tunneling and Underground Space Technology*, 64, pp. 103-116.



8. Казикаев Д.М., Сергеев С.В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 244 с.

9. Безродный К.П., Лебедев М.О., Саммаль А.С. Современный опыт применения теоретических подходов геомеханики в подземном строительстве, базирующихся на методах механики сплошной среды // Метро и тоннели. 2018. № 4. С. 20-21.

10. Лебедев М.О. Геотехнический мониторинг в технологическом процессе строительства подземных сооружений Санкт-Петербургского метрополитена // Инженерная защита. 2016. № 1 (12). С. 14-21.

11. Безродный К.П., Исаев Ю.С., Лебедев М.О. Геотехнический мониторинг при эксплуатации тоннелей // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 10. С. 18-23.

References

1. Pleshko M.S., Pleshko M.V., Vojnov I.V. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2018. № 1. P. 34-40.

2. Pleshko M.S., Nasonov A.A., Garmonin R.E., Sirotkin A.YU. Inzenernyj vestnik Dona. 2015. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3196.

3. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armejskov V.N. Inzenernyj vestnik Dona. 2013. № 4 (27). P. 60. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

4. Sammal' A.S., Voronina I.YU., Shelepov N.V. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. 2016. № 3. P. 154-163.

5. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Tekhnologii betonov. 2016. № 7-8 (120-121). pp. 33-37.

6. Heng-chang L., Guo-qing Z., Bo L., et al., 2009. In-site monitoring and analysis of shaft lining's additional strain in failure and formation grouting. Procedia Earth and Planetary Science. 1, pp.503–511.



7. He M.; Li. C.; Gong W.; Sousa, L.R.; Li S. (2017). Dynamic tests for a constant-resistance-large-deformation bolt using a modified SHTB system. J. of Tunneling and Underground Space Technology, 64, 103-116.
8. Kazikaev D.M., Sergeev C.B. Diagnostika i monitoring napryazhennogo sostoyaniya krepki vertikal'nyh stvolov. [Diagnostics and monitoring of the stress state of the support of vertical shafts]. M.: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2011. 244 p.
9. Bezrodnyj K.P., Lebedev M.O., Sammal' A.S. Metro i tonneli. 2018. № 4. pp. 20-21.
10. Lebedev M.O. Inzhenernaya zashchita. 2016. № 1 (12). pp. 14-21.
11. Bezrodnyj K.P., Isaev YU.S., Lebedev M.O. Put' i putevoe hozyajstvo. 2015. № 10. pp. 18-23.