

Комплексные обследования бетонных и железобетонных обделок транспортных тоннелей ультразвуковым и ударно-акустическим методами

А.А. Шилин, д-р техн. наук, проф., А.М. Кириленко, канд. техн. наук, П.А. Знайченко, ЗАО «Триада-Холдинг», Москва

Аннотация

Рассмотрены вопросы обследования обделок транспортных тоннелей с помощью методов, основанных на распространении в бетоне и железобетоне упругих волн. Комплексное использование этих методов дает возможность получить достоверные и детальные результаты, позволяющие уменьшить затраты на проведение ремонта.

Ключевые слова

Обделки тоннелей, ударно-акустический метод, ультразвуковая томография.

Abstract

The article considers various methods of inspection of transport tunnels linings involving elastic waves propagation. These methods allow to obtain detailed and reliable results and thus to minimize repair expenses.

Keywords

Impact-echo method, tunnel lining, ultrasonic tomography.

Длительная эксплуатация тоннельных сооружений из сборного и монолитного бетона и железобетона в сложных геологических и гидрогеологических условиях предопределяет развитие в конструкциях обделок различного рода повреждений и дефектов. В практике эксплуатации тоннельных сооружений в этом случае обычно предусмотрено проведение локальных восстановительных мероприятий, которые не всегда решают проблему в целом.

Комплексное обследование обделки транспортных тоннелей с выявлением причин образования повреждений и дефектов позволяет получить более общее представление о состоянии конструкций, спрогнозировать развитие процессов разрушения и своевременно разработать технологию ремонта.

Какие же повреждения характерны для тоннельных обделок на проблемных участках и что нужно понимать под «проблемным участком»? Вмещающий тоннель грунтовый массив может пересекать зоны повышенного обводнения грунтов, зоны пльвунов, тектонических нарушений в скальном горном массиве. Проблемные участки могут также возникать в результате ведения подземных строительных работ в непосредственной близости от сооружения. Следствием всего этого могут быть следующие повреждения:

- нарушение герметичности обделки — фильтрация грунтовых вод по швам между блоками или по «холодным швам» захваток бетонирования, по трещинам в обделке;

- нарушение контакта обделки с грунтом;
- наличие трещин силового характера в обделке без фильтрации грунтовых вод;

- наличие каверн и разуплотнений в бетоне обделки.

Следует подчеркнуть, что состояние грунтового массива может быть как стабильным, так и существенно меняться во времени в результате развития естественных или техногенных процессов.

В настоящее время благодаря разработкам программного обеспечения и приборной базы существует возможность оперативного обследования протяженных участков тоннельных обделок на высоком качественном уровне.

Методы исследования, основанные на распространении в изучаемой среде упругих колебаний, имеют непосредственную связь с прочностными, упругими и деформационными характеристиками твердых тел. В связи с этим их применение наиболее информативно и достоверно. До недавнего времени основным методом испытания бетона конструкций был импульсный ультразвуковой метод. При этом излучение-прием сигнала проводился по одному каналу — «источник излучения упругих волн — приемник». С появлением многоканальных ультразвуковых систем появилась возможность повысить достоверность результатов, существенно снизить уровень помех, а с возникновением современных программных комплексов — добиться визуализации результатов с точным позиционированием аномальных выбросов. Приведем пример такой многоканальной системы.

Ультразвуковой томограф А1040 MIRA, представляющий собой полностью автономный измерительный блок (рис. 1), главный элемент которого — 48-канальная антенная решетка, безусловно, является дефектоскопом нового поколения. Преобразователи поперечных волн с сухим точечным контактом позволяют работать на относительно неровных поверхностях без применения контактной смазки. Принцип работы прибора основан на методе синтеза фокусируемой апертуры в сочетании с комбинационным зондированием (SAFT-C), что позволяет провести фокусировку ультразвука в каждой точке полупространства. Разработчиками прибора были получены аналитические асимптотические выражения,

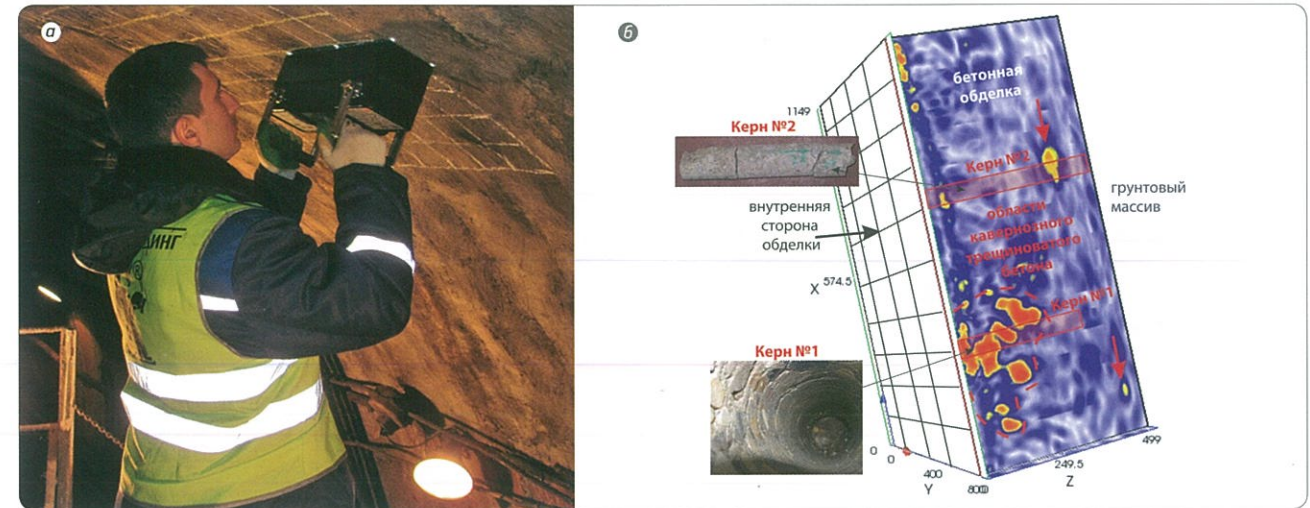


Рис. 1. Ультразвуковые томографические исследования в тоннеле метрополитена: а — процесс формирования результатов для построения трехмерной картины; б — результаты прозвучивания бетона обделки в виде трехмерного блока, подтвержденные отбором керна

описывающие компоненты смещения продольных и поперечных волн в произвольной точке твердого полупространства для случаев действия на границе полупространства точечного источника нормальной или касательной гармонической силы или источника нормальной гармонической силы с прямоугольной апертурой, корректность которых была подтверждена экспериментальными исследованиями [1].

Помимо выявления повреждений и дефектов в бетоне или железобетоне конструкций прибор помогает решить важнейшую задачу по определению контакта обделки тоннеля с грунтовым массивом. Известно, что обделки тоннелей рассчитываются с учетом их совместной работы с вмещающим грунтом. Отсутствие контакта между обделкой и породным массивом меняет расчетную схему. Неравномерность распределения горного давления по контуру тоннеля может приводить к развитию деструктивных процессов в материале обделки, вплоть до ее разрушения.

Характер контакта конструкции с грунтовым массивом и ее толщину определяют томографическим методом по отражению от границы раздела сред, т.е. по так называемому донному сигналу [2]. Для плохого контакта конструк-

ции с грунтом мы имеем ярко выраженную отражающую границу, для хорошего контакта — «размытую» (рис. 2).

Большое значение в диагностике состояния тоннельных обделок имеют трещины в материале конструкций, проявляющиеся на их поверхности. Известная методика определения глубины трещин импульсным ультразвуковым методом позволяет проводить лишь локальную оценку. Ультразвуковая томография дает возможность более полно отразить картину распространения трещин на протяженном участке с трехмерной визуализацией и выделением трещины сквозного распространения.

Определение места расположения арматурного каркаса — еще одна задача, успешно решаемая методом ультразвуковой томографии [3]. Наряду с радиографическим, магнитным и георадиолокационным методами томографический метод позволяет добиться достоверных результатов.

Другой группой методов, основанных на изучении динамики распространения в среде упругих волн, являются ударно-акустические методы. К ним можно отнести сейсмические, виброакустические и эхо-импульсные исследования.

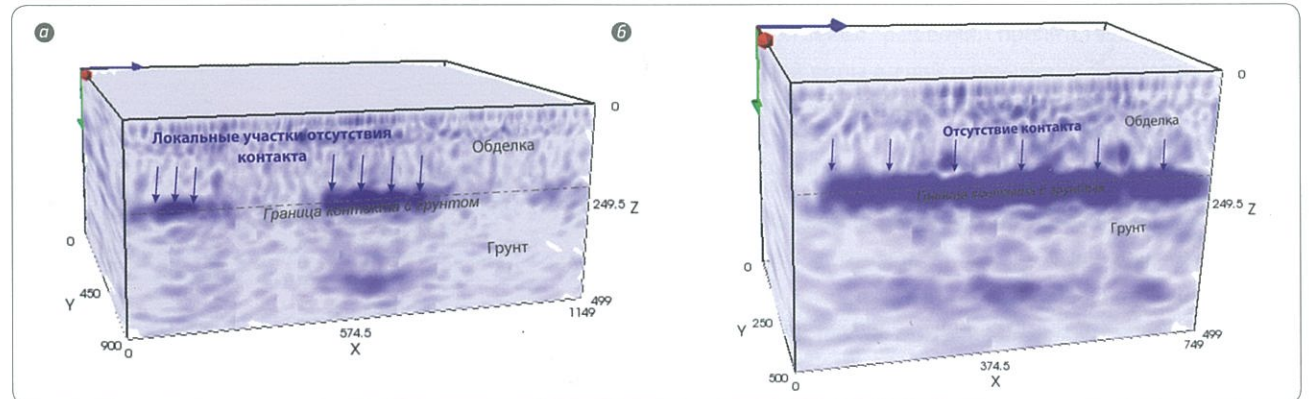


Рис. 2. Ультразвуковые томографические исследования в тоннеле метрополитена: а — участки локального отсутствия контакта обделки с грунтом; б — участок полного отсутствия контакта обделки с грунтом

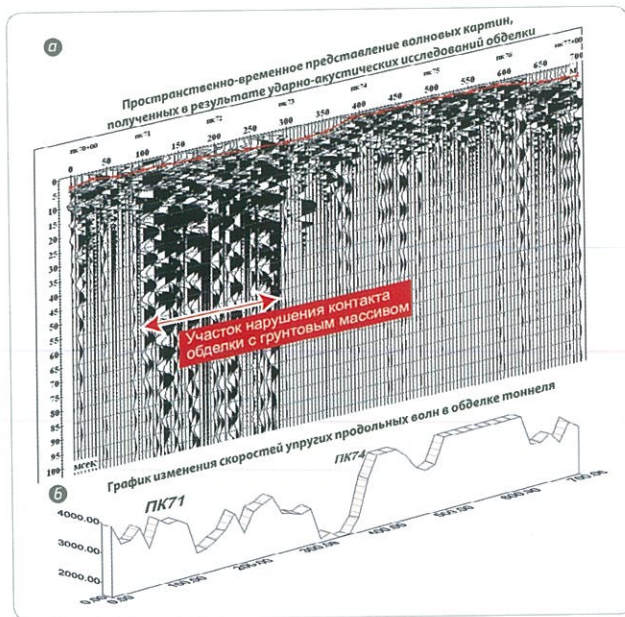


Рис. 3. Ударно-акустические исследования обделки тоннеля метрополитена: а — пример пространственно-временной сборки зарегистрированных волновых картин; б — график распределения скоростей продольных упругих волн на участке протяженностью 700 м с шагом 1 м

Сейсмические исследования позволяют полнее оценить состояние бетона обделки на значительном по протяженности участке тоннеля (в идеале — по всей трассе), а виброакустические — определить характер контакта обделки с вмещающими грунтами. Эхо-импульсные исследования уточняют толщину обделки и оценивают условия контакта бетона с основанием.

При импульсном воздействии на обделку тоннеля (например, при возбуждении колебаний кувалдой весом 5–10 кг) в системе грунт–бетон возникают затухающие свободные колебания. Для случая линейно-упругого приближения при линейной упруго-вязкой модели грунта (модели Максвелла и Фойхта) смещение частиц на свободной поверхности системы бетон–грунт определяется дифференциальным уравнением второго вида

$$\frac{d^2}{dt^2}S + 2b \frac{d}{dt}S + \omega^2 S = 0,$$

где t — время,

S , b и ω — соответственно смещение, затухание и собственная частота системы.

Решением системы является функция, описывающая смещение частиц во времени:

$$S(t) = Ae^{-bt} \sin(\omega t + \Psi),$$

где A и Ψ — соответственно начальная амплитуда и фаза колебаний.

Характер затухания колебаний (потери энергии системой) на практике определяют с помощью логарифмического декремента затухания (уменьшения амплитуды

колебаний за условный период T) либо добротности (уменьшения энергии колебательной системы за условный период T). Из анализа приведенных соотношений следует, что скорость затухания процесса определяется вязкими свойствами грунта, а собственные частоты колебаний — упругими свойствами грунта и бетона. Таким образом, исследуя спектральный состав возбуждаемого ударным способом колебательного процесса, можно определять состояние акустического контакта системы бетон–грунт. Образовавшиеся в ней колебания в дальнейшем распространяются в цилиндрической оболочке тоннеля и грунте в виде волн сдвиговой природы, длина которых составляет первые десятки метров. Скорость распространения сдвиговых волн определяется упругими свойствами грунта и бетона.

Отдельно следует выделить важность динамического воздействия на обделку проходящего по тоннелю транспорта. Такое воздействие может способствовать развитию дополнительных трещин и в дальнейшем разрушению бетона. Отклик конструкции на динамическое воздействие характеризуется величиной добротности колебательной системы. В результате инструментальных измерений на обделке тоннеля могут быть получены величины добротности по всем исследуемым участкам тоннеля.

Таким образом, в итоге проведения ударно-акустических исследований на протяженных участках тоннеля можно выделить участки с нарушениями контакта конструкции с грунтовым массивом (рис. 3).

Выводы:

- применение комплекса методов в обследовании обделок позволяет добиться высокой детализации и достоверности исследований, что дает возможность получить исчерпывающие данные по состоянию обделки;
- достоверность результатов обследования, подтверждаемая визуализацией полученных данных, дает возможность обосновать затраты на ремонт конструкций;
- оперативность проведения обследования позволяет свести к минимуму ограничения движения транспорта, затраты на организацию работ и т.п.;
- рассмотренные методы позволяют свободно корректировать методику работ в зависимости от особенностей строительных конструкций, условий окружающей среды и постановки задач обследования.

Литература

1. Development of acoustic method and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing / A. Samokrutov [a. o.] // *ULTRAGARSAS Journal*. — Kaunas, Lithuania, 2006. — Nr. 4 (61).
2. Козлов В. Н. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы / В. Н. Козлов, А. А. Самокрутов, В. Г. Шевалдыкин // *В мире неразрушающего контроля*, 2002. — № 2 (16), С. 6–10.
3. Hoegh K. Ultrasonic tomography technique for evaluation of concrete pavements / K. Hoegh, L. Khazanovich // *Transportation research Record: Journal of the transportation research board*. — 2011. — No. 2232. — Pp. 85–94.

Для связи с авторами:

Павел Александрович Знайченко, 8-916-211-23-16,
znajchenko@triadaholding.ru