

УДК 624.191

Проектирование строительства и эксплуатации подземных сооружений с использованием композиционных материалов

Пшеничный В. А.

Московский государственный горный университет, Москва, Россия

Аннотация

В последние годы одним из перспективных направлений повышения долговечности железобетонных конструкций является использование композиционных материалов на основе арамидных, углеродных и стекловолокон. Они обладают высокими прочностью на растяжение и модулем упругости; относительно малым весом; невосприимчивостью к агрессивным внешним факторам, что предопределило быстрый рост их применения для усиления промышленных и гражданских зданий и сооружений. Вместе с тем для повышения надежности железобетонных конструкций подземных сооружений, эксплуатирующихся в условиях неустойчивой агрессивной внешней среды, эти материалы не нашли должного применения.

Это можно объяснить спецификой проектирования, строительства и эксплуатации железобетонных конструкций подземных сооружений, когда нагрузки на конструкции и степень воздействия на них агрессивных факторов внешней среды являются величинами неопределенными и зависят от большого числа горно-геологических и техногенных факторов, случайным образом изменяющихся по трассе тоннеля. Использование в этих условиях долговечных, прочных, устойчивых к воздействию агрессивных сред композиционных материалов позволило бы повысить надежность и долговечность сооружений в целом.

Монолитные и сборные конструкции бетонных и железобетонных обделок широко применяются в подземном строительстве для крепления транспортных и гидротехнических тоннелей, городских подземных сооружений, капитальных горных выработок угольных шахт и рудников. Вместе с тем многие исследователи отмечают неудовлетворительное состояние обделок подземных сооружений, как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации [1, 2]. Обделки подземных сооружений разрушаются значительно раньше предусмотренного проектом нормативного срока. Деформирование и разрушение обделок приводит к снижению надежности подземного сооружения, являющуюся комплексной характеристикой, включающей в себя долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохранность сооружения. Наиболее значимой характеристикой для подземных сооружений является их безотказность, то есть способность сохранять свою работоспособность в течение определенного промежутка времени [2]. Потерю работоспособности инженерных конструкций подземных сооружений можно объяснить следующими основными причинами:

- воздействие на крепь силовых факторов (давление горных пород и подземных вод, собственный вес, внутритоннельный и поверхностный транспорт и др.), приводящее к потере ее несущей способности и устойчивости. Негативное воздействие этих факторов сложно учесть при проектировании конструкции в силу их неопределенности и изменчивости по трассе тоннеля, что приводит к значительной вариации нагрузок, действующих на крепь, по длине подземного сооружения;
- воздействие агрессивной внешней среды, приводящее к снижению несущей способности железобетонной крепи и ее преждевременному физическому износу (коррозия арматуры, карбонизация бетона, заражение его хлоридами и др.);
- вынужденные ошибки при обосновании выбора конструкций подземных сооружений на проектной стадии, вызванные недостатком и изменчивостью исходной горно-геологической информации, являющейся функцией времени и координат грунтового массива по трассе тоннеля;
- отсутствие в нормативных документах учета влияния техногенных воздействий на вмещающий грунтовой массив, возникающих при строительстве и эксплуатации

подземных сооружений и изменяющих физико-механические и гидрогеологические характеристики массива, которые в общем случае будут отличными от тех, которые использовались при проектировании крепи.

Сложившееся положение можно объяснить тем, что эксплуатационная надежность подземных сооружений рассматривается обособленно на различных этапах их жизненного цикла (проектирование, строительство, эксплуатация, консервация, использование в новом эксплуатационном качестве, ликвидация). Между тем инновационный подход к проектированию, характерный для рыночной экономики, предусматривает комплексную оценку возможных рисков на всех стадиях инвестиционной деятельности.

Разработанные в последние десятилетия управляемые технологии строительства подземных сооружений [1] позволяют обеспечить их работоспособное состояние в условиях значительного силового воздействия со стороны вмещающего породного массива. Данные технологии получили широкое развитие при строительстве транспортных тоннелей и капитальных выработок горных предприятий. Необходимо отметить, что управляемые технологии применяются при строительстве подземных сооружений и не охватывают гораздо более продолжительного по времени периода эксплуатации.

Вместе с тем значительное внимание уделяется исследованиям, посвященным физическому износу, ремонту и усилению железобетона именно как материала обделок подземных сооружений, эксплуатирующихся в условиях агрессивной внешней среды, представленной грунтовым массивом и подземными водами. Стратегия выполнения ремонтных работ в сооружении должна основываться на системном подходе к его эксплуатации в целом и на индивидуальном подходе к оценке состояния каждого самостоятельного элемента конструкции и риску возникновения его отказа [2].

При хорошо разработанных технологиях строительства подземных сооружений, учитывающих фактическое напряженно-деформированное состояние вмещающего породного массива, и стратегии выполнения работ по ремонту и усилению железобетонных конструкций на стадии эксплуатации наблюдается некоторый временной и методологический дисбаланс при проектировании, строительстве и эксплуатации одного объекта – подземного сооружения.

Создавшееся положение можно объяснить отсутствием единой нормативной базы проектирования и единого подхода к оценке взаимосвязанных рисков, возникающих при строительстве и эксплуатации подземного сооружения. Необходимо отметить и тот факт, что строительством подземного сооружения и возникающими при этом рисками занимаются одни научно-исследовательские, проектные и строительные организации, а эксплуатацией, ремонтом и перекреплением конструкций крепей и связанными с ними рисками – другие.

На надежность подземных сооружений, строящихся и эксплуатирующихся в различных горно-геологических условиях, влияют разнообразные факторы, определяемые свойствами и состоянием вмещающего породного массива по трассе тоннеля или горной выработки. Их можно разделить на две большие группы. К первой из них относятся факторы, определяющие начальное напряженно-деформированное состояние породного массива, изменяющееся в дальнейшем под влиянием горнопроходческих работ по образованию искусственной полости в толще массива и возведению крепи и оказывающее силовое воздействие на обделку подземного сооружения. Эта группа факторов, учитываемая при проектировании и строительстве всех подземных сооружений, во время эксплуатации последних является определяющей только в условиях, когда горное давление развивается во времени и достигает величин, которые не всегда можно предусмотреть на стадии проектирования. Конструкция и параметры железобетонной обделки до появления в ней силовых трещин от горного давления остаются малоизменяемыми. Данная ситуация имеет место при строительстве и эксплуатации большинства горных выработок и тоннелей, расположенных на большом расстоянии от земной поверхности. Существующие управляемые технологии строительства подземных сооружений разработаны именно для этих условий. Для обделок подземных сооружений неглубокого заложения предполагаемая величина горного давления является значимым фактором только при выборе конструкции крепи и определении ее первоначальных параметров на стадии проектирования. В дальнейшем на стадии эксплуатации подземного сооружения горное давление изменяется незначительно. При правильном определении величины горного давления и обоснованном выборе несущей

способности железобетонной крепи риск ее отказа только от действия силовых факторов минимален.

Ко второй группе относятся факторы, оказывающие агрессивное воздействие на конструкции крепей подземных сооружений и во время эксплуатации снижающие надежность ее функционирования. Такая ситуация имеет место прежде всего в зонах гидрогеологической активности и динамических воздействий от наземного транспорта, то есть для подземных сооружений неглубокого заложения. В этом случае при практически неизменном установившемся силовом воздействии на крепь из-за коррозионных и вибрационных процессов снижается ее несущая способность, что может привести к отказу подземного сооружения на определенном участке, где несущая способность крепи станет меньше установившейся величины горного давления. Именно для такой ситуации разработана стратегия ремонта железобетонных конструкций подземных сооружений с учетом их состояния и требуемого уровня надежности [2].

При оценке надежности таких конструкций определяющим является подход, принятый при строительстве и эксплуатации наземных зданий и сооружений. Экономия средств на материалах на этапе строительства влечет за собой значительный перерасход средств в процессе эксплуатации сооружения [3]. При этом не учитывается существенное различие между условиями эксплуатации наземных и подземных железобетонных конструкций. Если первые функционируют в условиях достаточно известных и постоянных по величине нагрузок и воздействий, то подземные сооружения находятся в породном массиве, свойства которого являются функцией координат и времени, что приводит к изменчивости величин нагрузок и воздействий на крепь, как по трассе тоннеля, так и во времени. Эта неопределенность свойств массива горных пород является одной из основных причин, влияющей на надежность подземного сооружения при его строительстве и эксплуатации и существенно отличающей условия его функционирования от функционирования наземных объектов.

Предложенная в [1] структурная модель устойчивого функционирования природно-технической геосистемы «массив – технология – подземное сооружение» не полностью отражает жизненный цикл последнего и приспособлена непосредственно к его строительству. Более полной будет являться модель, учитывающая как технологию выемки грунта и возведения постоянной крепи во время строительства, так и технологию обеспечения надежности функционирования подземного сооружения во время эксплуатации, основанную на правильном выборе стратегии ремонта.

На рис. 1 показан характер изменения во времени несущей способности железобетонной обделки и нагрузки на нее по трассе подземного сооружения.

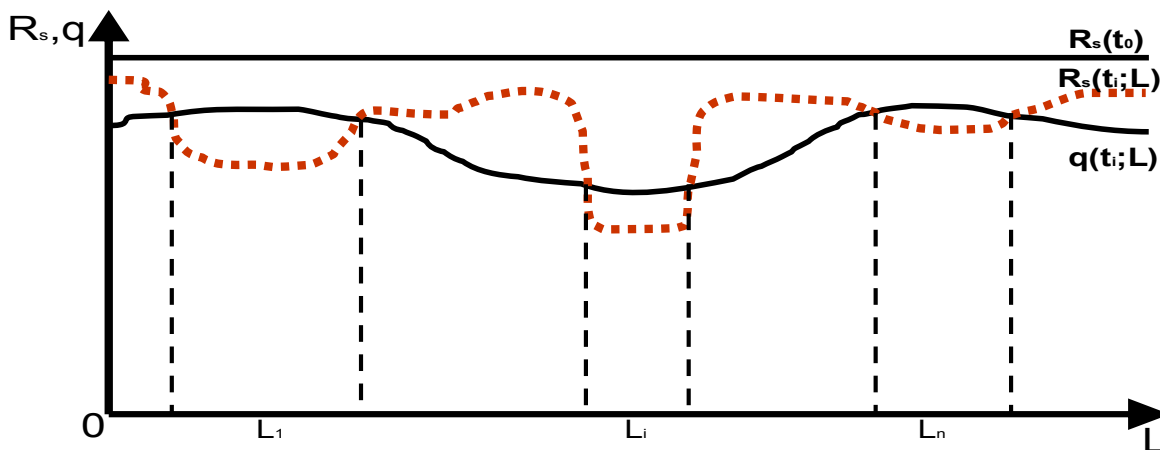


Рис.1. Характер изменения во времени несущей способности обделки и нагрузки на нее по длине подземного сооружения.

Первоначально крепь проектируется с несущей способностью $R_s(t_0)$, превышающей нагрузку на нее от максимального воздействия силовых факторов $q(L; t_i)$. $R_s(t_0) > \max q(L; t_i)$. Со временем под воздействием агрессивных факторов внешней среды несущая способность обделки

снижается (кривая $R_s(t_i;L)$ на рис. 1) и на некоторых участках $L_1...L_i...L_n$ может оказаться недостаточной для восприятия внешних силовых воздействий. Такая ситуация возможна не только на участках тоннеля с максимальной нагрузкой, которые на стадии проектирования можно определить достаточно точно. С большей степенью вероятности это происходит на участках с максимальным агрессивным воздействием внешней среды на обделку. Именно на этих участках в первую очередь выполняется ремонт подземных сооружений, который по классификации [2] может быть плановым, по состоянию, преждевременным или запоздалым.

Использование для строительства подземных сооружений неглубокого заложения управляемых ресурсосберегающих технологий долгое время сдерживалось высокими трудоемкостью, стоимостью и сложностью и сложностью выполнения работ по увеличению несущей способности (усилению) железобетонных крепей, используемых в качестве базовых конструкций. Стесненные условия подземного сооружения затрудняют применение традиционных способов усиления железобетонных конструкций.

В последние годы одним из наиболее перспективных направлений ремонта и усиления железобетонных конструкций является их внешнее армирование композиционными материалами на основе углеродных, арамидных и стекловолокон [4]. Они обладают целым рядом неоспоримых преимуществ перед другими способами усиления – высокими прочностью на растяжение и модулем упругости; относительно малым весом по сравнению с другими материалами; невосприимчивостью к агрессивным внешним факторам; долговечностью; возможностью усиления строительных конструкций практически любой формы; небольшой трудоемкостью и легкостью выполнения работ. Эти факторы предопределили быстрый рост их применения для усиления промышленных и гражданских зданий и сооружений, мостов, башен, тоннелей. В России большой опыт работ по усилению железобетонных конструкций композиционными материалами накоплен в ЗАО «Триада – Холдинг». Были успешно выполнены работы по усилению внешним армированием композиционными материалами ребристых железобетонных плит коллекторных тоннелей в г. Москва. Несущая способность конструкций в среднем увеличилась на 20–25 % [4]. Значительный прогресс достигнут также в разработке средств непрерывного мониторинга состояния строительных конструкций, в том числе и подземных сооружений.

Это позволяет предложить следующую, отличную от общепринятой, технологию строительства и эксплуатации подземного сооружения неглубокого заложения (рис. 2).

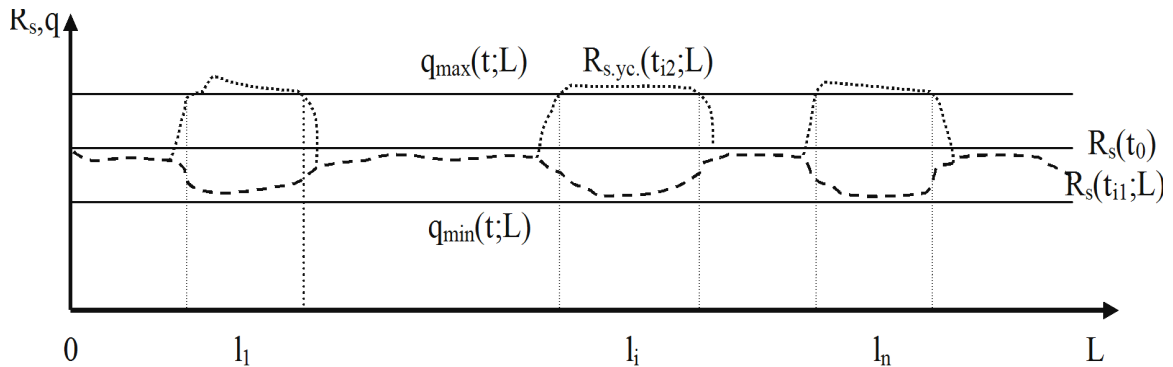


Рис.2. Схема к проектированию обделки и ее последующему усилению.

Первоначально определяются для конкретных горно-геологических условий максимально и минимально возможные силовые нагрузки на обделку подземного сооружения $q_{max}(t;L)$ и $q_{min}(t;L)$, относительно случайным образом распределяющиеся по трассе тоннеля и мало зависящие от времени. Обделка проектируется с некоторым запасом прочности на восприятие ожидаемых минимальных силовых воздействий со стороны породного массива. Данная конструкция с несущей способностью $q_{min}(t;L) < R_s(t_0) < q_{max}(t;L)$ возводится по трассе тоннеля в процессе его строительства. При этом осуществляется контроль за состоянием обделки и ее деформированием на всем протяжении тоннеля. Контроль может быть периодическим (как, например, для мостовых конструкций) или постоянным для особо ответственных подземных

сооружений (например, с использованием оптико-волоконной системы мониторинга SOFO). Таким образом, по длине тоннеля можно определить участки, на которых наиболее ощутимо влияние внешней среды на конструкцию крепи и ее несущая способность снижается наиболее интенсивно, приближаясь сверху к минимальному значению силового воздействия (минимально допустимая несущая способность крепи). Кривая $R_s(t_{i1}; L)$ на рис. 2. На этих участках необходимо выполнить усиление обделки композиционными материалами и обеспечить ее несущую способность $R_s(t_{i2}) > q_{\max}(t; L)$. Время между t_{i1} и t_{i2} является продолжительностью выполнения работ по усилению (увеличению несущей способности) железобетонной крепи, по завершению которых она не только восстанавливает свои первоначальные качества, но и обеспечит надежность эксплуатации подземного сооружения при наиболее неблагоприятном воздействии внешних факторов, встречающихся по его длине. Так как композиционные материалы в незначительной степени подвержены действию агрессивных факторов внешней среды, то дальнейшее поддержание заданного уровня надежности подземного сооружения возможно с помощью своевременного проведения профилактических мероприятий.

Таким образом предлагаемая концепция проектирования инженерных конструкций подземных сооружений неглубокого заложения позволяет без ущерба для требуемого уровня надежности снизить первоначальные инвестиционные затраты на строительство и перейти в период эксплуатации к системному обслуживанию подземного строительного объекта по его фактическому состоянию.

Библиографический список

1. Корчак А.В. Методология проектирования строительства подземных сооружений // Научное обоснование подземного строительства: Избранные труды ученых Московского государственного горного университета. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – с.197 – 227.
2. Шилин А.А. Стратегия ремонта железобетонных конструкций подземных сооружений с учетом их состояния и требуемого уровня надежности // Научное обоснование подземного строительства: Избранные труды ученых Московского государственного горного университета. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – с.301 – 344.
3. Рогожский В.А., Костриц А.И., Шеряков В.Ф. Эксплуатационная надежность зданий. Л.: Стройиздат, 1983. – 279с.
4. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. – 184с.

© Пшеничный В. А., 2009 г.