

Оптимизация конструкции земляного полотна в зоне вечной мерзлоты

В Китае строится железная дорога Цинхай — Тибет. Значительная ее часть проходит в зоне вечной мерзлоты. В этой связи важно заранее прогнозировать и предотвращать возможные дефекты земляного полотна железнодорожного пути, вероятность которых в данных условиях повышена, путем выбора оптимальных его конструкций, адаптированных к вечной мерзлоте.

Постановка задачи

Строящаяся железная дорога (рис. 1) на большей части длины проходит по Тибетскому нагорью на уровне земли в зоне вечной мерзлоты и только на 3,5 % в тоннелях и на мостах. Основной из технических проблем, возникающих в ходе ее строительства, являются возможные повреждения слоя вечной мерзлоты. Данная проблема имеет международный характер, и в таких странах, как Россия, Канада и США, проводили ее полномасштабные исследования. В ходе этих исследований предлагаемые меры борьбы с нарушениями слоя вечной мерзлоты касались, главным образом, контроля за двумя основными факторами: температурой и влажностью основания пути. Путем ослабления влияния этих факторов можно значительно облегчить и даже полностью решить указанную проблему. Применение качественных строительных материалов позволяет уменьшить теплопередачу от земляного полотна к основанию и водонасыщенность последнего. Тогда даже в случае возникновения таких дефектов, как всучивание и протаивание слоя вечной мерзлоты, они не будут оказывать большого влияния на устойчивость земляного полотна.



Рис. 1. Один из участков линии Цинхай — Тибет

Характерные особенности и причины повреждения земляного полотна в зоне вечной мерзлоты

По аналогии с опытом эксплуатации одной из линий в Северо-Восточном Китае, где также присутствует вечная мерзлота, характерными дефектами земляного полотна на участке, проходящем по Тибетскому нагорью, можно в основном считать оттаивание слоя вечной мерзлоты, всучивание этого слоя и льдообразование.

Оттаивание вечной мерзлоты

Этот дефект обычно случается в глинистых грунтах, содержащих большое количество льда. Из-за того что слой льда располагается на небольшой глубине от поверхности земли и в результате влияния различных факторов, действующих при строительстве железной дороги и в ходе ее последующей эксплуатации, частичное протаивание слоя вечной мерзлоты и осадка верхней части грунта под воздействием силы тяжести этого грунта и иных внешних нагрузок будут приводить к существенным деформациям основания пути. Эти деформации проявляются в форме осадки всего земляного полотна, образования в нем трещин и соскальзывания обочин и откосов.

Вспучивание вечной мерзлоты

Такой дефект имеет место и в районах с сезонным промерзанием грунта на большую глубину, но особенно серьезно проявляется в зонах вечной мерзлоты, когда замерзает большое количество как постоянно присутствующей, так и проникающей извне воды и, соответственно, увеличивается ее объем. Неравномерное всучивание вечной мерзлоты приводит к расстройствам рельсовой колеи и, как следствие, к сходу подвижного состава с рельсов и его опрокидыванию.

Льдообразование

Данный дефект проявляется в образовании слоев льда, которые покрывают земляное полотно или часть откосов. Вода поступает из-под откосов земляного полотна, заполняет собой углубления в грунте и при низкой температуре окружающего воздуха замерзает. В качестве причин этого явления можно назвать разрушение первоначальной поверхности раздела замерзшего и оттаявшего грунта из-за заполнения этой поверхности водопроницаемой почвой или иные нарушения целостности данной поверхности раздела. При этом располагающаяся между различными слоями грунта вода, находящаяся под давлением, находит себе путь по местам, где давление меньше.

Оптимизация конструкции земляного полотна

Участки с малым количеством льда

В зоне вечной мерзлоты участки с малым количеством льда располагаются по преимуществу там, где земляное полотно отсыпано полностью из основных скальных или чисто песчаных крупнозернистых грунтов с высокой температурной стабильностью, хорошими дренажными характеристиками и без склонности к промерзанию. Характерными особенностями таких участков является отсутствие:

- льда в зоне оттаивания;
- чрезмерной осадки почвы после оттаивания;
- нестабилизированного слоя, который с течением времени может стать причиной деформаций пути.

В такой ситуации можно, в принципе, использовать земляное полотно обычной конструкции. Однако все же следует дополнительно применять фильтры из водопроницаемого материала. Если при этом укладывается заполнитель, не обладающий достаточной водопроницаемостью, важно предотвратить конденсацию из окружающего воздуха водяных паров, выделяющихся из самого увлажненного земляного полотна, а на поверхности земляного полотна следует создать водозащитный слой. В случае расположения железнодорожного пути в выемке должна быть предусмотрена хорошая дренажная система. На первоначальной стадии проектирования второй очереди железной дороги Цинхай — Тибет особых требований к конструкции земляного полотна выработано не было и лишь предложено регламентировать использование наполнителей.

Участки с большим количеством льда

На участках с большим количеством льда важно предварительно выяснить состояние слоистого грунта на поверхности основания пути, тип подповерхностных вод и характер процесса замерзания (открытый или закрытый). На подобных участках насыпи нужно строить по возможности низкими, а основание земляного полотна — заполнять крупнозернистым материалом, обладающим высокой водопроницаемостью (например, содержание в наполнителе глины с частицами размером менее 0,075 мм не должно превышать 15 %). Поверхность подстилающего слоя основного грунта может быть обработана обычным путем. Если процесс замерзания открытый, следует предусмотреть создание эффективной дренажной системы для отвода и устранения просачивания поверхностных или подповерхностных вод у основания пути, а также избегать излишней экскавации грунта. Для более эффективной борьбы с последствиями открытого замерзания необходимо найти и изолировать источник поверхностных или подповерхностных вод. На поверхность основания пути можно уложить каменные блоки, обеспечивающие одностороннюю теплопередачу и хорошую вентиляцию, а обочины земляного полотна следует выполнить большей ширины. Основание откосов выемок должно быть снабжено дренажными канавами, а верхняя часть откосов — водоперехватывающими траншеями и водозащитными стенками. Для откосов, отсыпанных из крупнозернистых грунтов, следует тщательно рассчитать угол их крутизны. На откосах можно не устраивать теплоизолирующий слой, их стабилизация происходит естественным образом в течение трех сезонов оттаивания-замерзания. Если в откосах содержатся включения определенного количества мелкозернистого материала, откосы могут быть защищены с помощью отсыпки на их поверхность грунта, извлеченного при экскавации в ходе сооружения выемок. В случае невозможности этого следует провести точный теплотехнический расчет и применить теплоизолирующие материалы или выполнить солнцезащитные мероприятия для обеспечения стабильности земляного полотна.

Участки с большим льдонасыщением

Насыпи, проходящие через запруду оттаивающего озера, болото или участки вечной мерзлоты с большим насыщением льдом, следует строить как можно меньшей высоты и при этом в максимально возможной степени отказаться от экскавации грунта. Для высокотемпературных зон вечной мерзлоты проектирование земляного полотна должно вестись с учетом постепенного оттаивания. В основании земляного полотна следует использовать мелкий щебень или устраивать вентиляционные трубы (рис. 2). Высота земляного полотна определяется величиной допустимой нагрузки на основание после оттаивания. При действительной необходимости сооружения выемки значение крутизны ее откосов должно находиться в пределах 1:2...1:3. Откосы должны иметь теплоизолирующий слой, их строительство следует выполнить обязательно в течение одного холодного сезона. Идеальными материалами для защиты откосов являются грунт из поверхностного слоя, извлеченный при экскавации, и щебень.



Рис. 2. Вентиляционные трубы в теле насыпи

Можно также, если это оправданно с экономической точки зрения, рассмотреть возможность использования солнцезащитных укрытий или трехрядной посадки деревьев. В том случае, если проектом предусмотрено сооружение откосов, которые согласно расчетам обладают свойством самостабилизации, следует учитывать, что стабилизация обычно наступает через три – пять сезонных циклов оттаивания-замерзания. Для низкотемпературных зон вечной мерзлоты при проектировании конструкции земляного полотна следует соблюдать принцип поддержания постоянного уровня замерзания грунта. Высота земляного полотна должна назначаться больше критической, а идеальным заполнителем его основания являются каменные блоки размером 30 – 50 см, которые не допускают теплопередачу от поверхности земляного полотна внутрь. Основание из каменных блоков с относительно большими пустотами между ними может также препятствовать деформациям земляного полотна из-за всучивания замерзшего грунта. К тому же путем использования каменных блоков можно уменьшить осадку земляного полотна при протаивании, так как эти блоки эффективно выполняют роль опорных элементов. С учетом влияния глобального потепления климата следует рассмотреть также возможность применения тепловых стержней (рис. 3), бутового строительного камня или щебеночной отсыпки для защиты откосов от оползней, цементобетонных или поливинилхлоридных вентиляционных труб в теле насыпей и иных подобных мер. Однако реализация этих мер должна основываться на результатах технико-экономического анализа с расчетом срока службы и получаемых при этом выгод.



Рис. 3. Тепловые стержни, установленные в основание пути перед сооружением насыпи

При строительстве земляного полотна с использованием каменных блоков нет необходимости в специальном уплотнении, но следует обеспечить их равномерное распределение. Поверхность слоя из таких блоков выравнивается с помощью заполнения пустот щебнем небольших фракций. После этого производят укатку поверхности обычным дорожным катком для стабилизации земляного полотна. Однако эти каменные блоки не должны использоваться в конструкции подстилающего слоя основания пути. При проектировании второй очереди железнодорожной линии Цинхай — Тибет на участках с вечной мерзлотой и обширным льдонасыщением предусматривалось, что защита откосов и их вентиляция будет осуществляться, главным образом, путем использования рваного камня, а при текущем содержании откосов выемок будут применять сменяемую теплоизоляцию и устраивать подпорные стенки.

Оптимизация высоты

Сооружение насыпей приводит к изменению условий теплового равновесия и гидрологии пластов естественного грунта, а также, возможно, к изменению предельного уровня залегания верхней границы вечной мерзлоты. Эти изменения в сильной мере зависят от различий в степени нагревания, что вызвано такими факторами, как высота насыпи, ориентация ее откосов и время года, когда ведется строительство. Если насыпь выполнена слишком низкой, повышенная интенсивность прорастания грунта в данной климатической зоне будет влиять на основание земляного полотна, понижая залегание верхней границы вечной мерзлоты и, соответственно, на стабилизацию самой насыпи. Если высокая насыпь сооружена в теплый сезон, тепловая энергия от большого количества заложенного в насыпь нагретого заполнителя будет, по всей видимости, снижать степень промерзания, характерную для данной климатической зоны, что не позволит впоследствии обеспечить в теле насыпи достаточную связность частиц вечной мерзлоты. С начала 1960-х годов специалисты-железнодорожники анализировали результаты исследований и испытаний по рассматриваемой проблеме, выполненных в отношении автомобильных дорог. В итоге этого анализа в 1972 г. были разработаны подробные руководящие указания, в которых, в частности, сказано, что высота насыпей на участках с подповерхностным льдообразованием должна быть не менее 0,5 м. Дальнейшие исследования и расчеты по проблемам дорожного строительства, выполненные в 1975 – 1979 гг. при проектировании автомобильной дороги Цинхай — Тибет в условиях вечной мерзлоты, а также систематические наблюдения позволили закончить составление в 1979 г. отчета по выбору профиля земляного полотна, правилам искусственного изменения верхней границы вечной мерзлоты и критической высоте насыпей, который был представлен при рассмотрении проекта железной дороги в 1980 г.

Рекомендации по высоте насыпей

Классификация участков по температуре грунта	Среднегодовая температура, °C	Минимальная высота насыпей, м
Стабильные низкотемпературные	Ниже – 2,0	1,5
Преимущественно стабильные низкотемпературные	–2,0… –1,0	1,9
Нестабильные высокотемпературные	–1,0… –0,5	2,3
Особо нестабильные высокотемпературные	– 0,5…0	Более 2,5

В настоящее время высота земляного полотна определяется в соответствии с положениями нового документа «Временные нормы проектирования железной дороги Цинхай — Тибет» (таблица).

Заключение

Многоаспектное экономическое сопоставление разных вариантов позволяет сделать обоснованный выбор оптимальной конструкции земляного полотна железной дороги, проходящей через зону вечной мерзлоты, что послужит гарантией соблюдения установленных требований в отношении усталостной прочности основания пути при воздействии динамических нагрузок от движения поездов и уменьшения вероятности повреждения земляного полотна от прорастания и вспучивания грунта. Участки пути с земляным полотном, сооруженным в соответствии с приведенными выше положениями, в настоящее время находятся под тщательным наблюдением в целях проверки правильности этих положений.