

УДК 624.012.45:69.059.32.001.6

Экспериментальные исследования усиления плит перекрытия коллекторных тоннелей сетками из углеродных волокон в матрице на минеральной основе

Виталий Владимирович ГАПОНОВ

ЗАО «Триада-Холдинг», 123308 Москва, просп. Маршала Жукова, 6, стр. 2, e-mail: gaponov@triadaholding.ru

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований плит перекрытия коллекторных тоннелей, усиленных сетками из углеродных волокон в матрице на минеральной основе. Усиление выполнено путем внешнего армирования — присоединения к существующей конструкции элементов усиления с помощью специальных растворов на цементной основе. Приведены результаты испытаний фрагментов перекрытий и полноразмерных плит, усиленных углеродными сетками. Испытания показали высокий уровень безопасности обделки тоннелей, армированной углеродной сеткой.

Ключевые слова: коллекторный тоннель, усиление плит перекрытия, углеродная сетка, матрица на минеральной основе.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STRENGTHENING COLLECTOR TUNNELS OVERHEAD COVER SLABS WITH MESHES MADE OF CARBON FIBERS IN MINERAL-BASED MATRIX

Vitaly V. GAPONOV

Results of the experimental investigation of collector tunnels overhead cover slabs strengthened with carbon-fiber meshes in the mineral-based matrix are considered. Strengthening is executed by means of external reinforcement, joining of strengthening elements to the existing structure with the help of special solutions on cement basis. Results of the tests of overhead cover elements and full size slabs strengthened with carbon meshes are presented.

The tests show a high level of tunnel lining safety reinforced with a carbon mesh.

Key words: collector tunnel, strengthening of overhead cover slabs, carbon-fiber mesh, mineral-based matrix.

Наиболее слабое звено в конструкции сборных железобетонных коллекторных тоннелей — плиты перекрытия. При этом несущая способность плит как работающих на изгиб элементов определяется в основном несущей способностью продольных ребер жесткости, а полка плиты лишь незначительно увеличивает несущую способность конструкции.

Экспериментальные исследования влияния усиления с использованием углеродных сеток в матрице на минеральной основе были проведены совместно с испытательным центром «ЦНИИС-ТЕСТ» на конструкциях двух серий:

- железобетонных балках (перемычках), имитирующих работу продольных ребер жесткости в плитах перекрытия;
- натурных плитах перекрытия марки ДП-15-1т, на которых уточнялись полученные в первой серии испытательные результаты.

Для оценки степени фактического усиления конструкций испытаны 18 балок (перемычек) сечением

120×140 мм и длиной 1550 мм. Перемычки армированы двумя стержнями Ø5 мм класса Вр-1.

Усиление выполнено путем внешнего армирования конструкций углеродной сеткой с поверхностной плотностью в продольном (рабочем) направлении 400 г/м². Перемычки изготовлены из бетона класса В20, углеродную сетку устанавливали по всей ширине потолочной поверхности (120 мм) и на половину высоты одной либо обеих вертикальных сторон (70 мм).

Углеродную сетку обрабатывали в низковязком эпоксидном составе, в результате чего жгуты пропитывались и вследствие этого исключалось продергивание волокон в процессе деформации конструкции. По всей поверхности наносили слой специально подобранного цементно-песчаного раствора (матрицы), после чего укладывали сетку и вдавливали ее в матрицу. Сверху сетку покрывали защитным слоем раствора.

Программа испытаний предусматривала установить влияние на коэф-

фициент усиления следующих параметров:

- толщины сечения элемента усиления (углеродная сетка — один или два слоя, форма сечения L- или U-образная);
- длины элемента усиления (0,8; 1,35 и 1,55 м);
- обработки углеродной сетки низковязким эпоксидным составом;
- инъектирования трещин в конструкции низковязким эпоксидным составом перед установкой элемента усиления;
- выполнения элемента усиления в виде рессоры из нескольких слоев углеродной сетки разной длины (1,35 + 0,8 м) в соответствии с эпурой изгибающих моментов;
- защемления элемента усиления на опорах при длине углеродной сетки 1,55 м.

Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных внешним армированием углеродными сетками в матрице на минеральной основе, были выполнены по статически определимой схеме с нагружением в третях пролета. Это

позволило изучить эффект совместного действия изгибающего момента и поперечной силы.

Нагружение выполняли с помощью рычажной системы и гидравлического домкрата. Прогиб испытываемых балок под нагрузкой измеряли прогибомерами с ценой деления 0,1 мм, расположенными под точками приложения нагрузки и в центре балки; деформацию бетона в конструкциях — тензорезисторами с регистрирующей аппаратурой, величину нагрузки фиксировали по показаниям манометра в гидравлической системе.

В результате испытаний было установлено:

- в балках (перемычках) без усиления разрушающая нагрузка не превышала 7 кН. Это значение и было принято в качестве исходного для определения коэффициента усиления от использования углеродной сетки, уложенной в матрицу на минеральной основе;

- разрушение перемычек, усиленных одним и двумя слоями углеродной сетки L-образного сечения длиной 0,8 м, происходило по наклонному сечению в месте окончания элемента усиления. Разрушающая нагрузка составляла соответственно 9 и 10 кН (коэффициент усиления K_y равен 1,285 и 1,43);

- увеличение длины элемента усиления до 1,35 м привело к повышению коэффициента усиления. Разрушающая нагрузка составила 18 кН при одном слое сетки ($K_y = 2,714$) и 22 кН — при двух слоях ($K_y = 3,142$);

- при усилении накладками длиной 1,35 м разрушение происходило в результате образования нормальных к продольной оси трещин в центре пролета и наклонных — в трети пролета в точках приложения нагрузки. От наклонных трещин по направлению к опорам усиливающая накладка отслаивалась по потолочной поверхности балки. По вертикальной поверхности отслоений накладки не отмечено;

- при выполнении элемента усиления в виде рессоры из двух слоев углеродной сетки длиной 1,35 и 0,8 м несущая способность элемента и характер разрушения соответствовали варианту использования накладки из двух слоев одинаковой длины по

1,35 м, что свидетельствует о возможности экономии углеродной сетки без снижения несущей способности;

- при заземлении усиливающей накладки на опорах разрушение конструкции наступало после образования нормальных трещин в центре пролета с последующим отслоением накладки по направлению к опорам. Коэффициент усиления возрастает при U-образном сечении накладки до 6;

- если углеродную сетку не пропитывали низковязким эпоксидным составом, повышение несущей способности было значительно ниже. При одном слое углеродной сетки длиной 1,35 м L-образного сечения разрушающая нагрузка составила 10,5 кН ($K_y = 1,5$). Разрушение наступило в результате образования наклонных трещин в третях пролета в точках приложения нагрузки, раскрытие трещин по нижней поверхности перемычки достигало 3 мм, разрыва продольных жгутов и отслоений элемента усиления не отмечено, что свидетельствует о продергивании волокон в жгутах;

- на ряде фрагментов были проведены двухступенчатые испытания. На первом этапе к фрагментам прилагали нагрузки, приводящие к появлению первых трещин. Затем фрагменты разгружали, инъецировали трещины низковязким эпоксидным составом и усиливали их углеродной сеткой. Повторные испытания исследуемых фрагментов показали, что положение новых трещин не совпадает с первоначальным, а величина разрушающей нагрузки находится на уровне разрушающей нагрузки испытанных обычным способом фрагментов обделки с соответствующим вариантом усиления.

Полученные при испытаниях железобетонных перемычек результаты дополнялись данными, полученными в ходе испытаний натурных образцов плит перекрытия ДП-15-1т (габарит — 5,4×1×0,4 м). Конструкция плиты разработана институтом «Мосинжпроект».

В каждом из продольных ребер плиты в растянутой зоне установлены по два стержня Ø20 А-III и Ø18 А-III, в сжатой зоне — по четыре стержня Ø8 А-I. Бетон — тяжелый, на крупном заполнителе, класса

В25. По данным разработчика, плиты рассчитаны на нагрузку НК-80.

Усиление выполняли путем установки на продольных ребрах углеродной сетки с поверхностной плотностью 400 г/м². Сетка покрывала потолочную, внутреннюю и наружную поверхности ребер на половину их высоты. Перед установкой сетку обрабатывали в низковязком эпоксидном составе, затем укладывали на слой матрицы на минеральной основе и вдавливали в нее. Сверху набрызгивали защитный слой. После затвердевания матрицы обеспечивалось сцепление с бетоном основания и создание наружного защитного слоя.

Испытывали до разрушения четыре плиты: № 1 — без усиления; № 2 и № 3 — с усилением соответственно двумя и одним слоем углеродной сетки длиной 5 м U-образного сечения; № 4 — с усилением двумя слоями углеродной сетки длиной 5 м L-образного сечения.

Плиты испытывали на 1000-тонном прессе с нагружением в третях пролета по равномерно распределенной схеме в шести точках пролета. Прогибы плит под нагрузкой измеряли прогибомерами в местах приложения нагрузки и в центре пролета. Деформацию бетона в продольных ребрах измеряли тензорезисторами с регистрирующей аппаратурой, величина нагрузки фиксировалась по показаниям манометра в гидравлической системе пресса.

В результате испытаний установлено:

- разрушение плиты № 1 произошло в результате воздействия поперечной силы в опорной зоне при нагрузке около 700 кН (рис. 1). Произошел откол поперечного опорного ребра в результате нарушения сцепления с бетоном (выдергивания) растянутых арматурных стержней Ø20 мм. Разрушению предшествовало образование наклонной трещины от крайней точки приложения нагрузки в сжатой зоне до зуба по низу продольного ребра в опорной части. Деформации и разрушения самих арматурных стержней не отмечено;

- раскрытие трещин в растянутой зоне продольных ребер не превы-

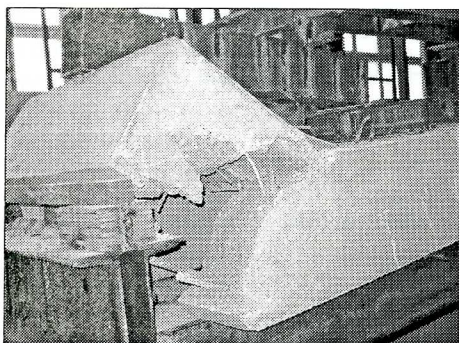


Рис. 1. Плита № 1 без усиления, пролет 5,2 м. Разрушение в опорной зоне от действия поперечной силы

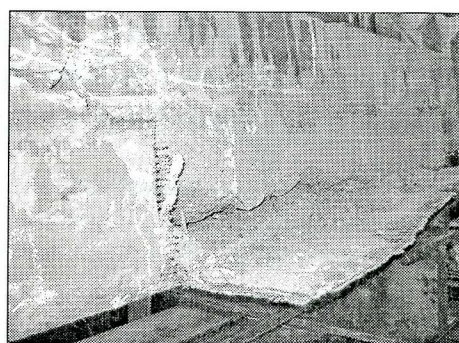


Рис. 2. Плита № 2 с усилением двумя слоями углеродной сетки, пролет 4,2 м. Разрушение в трети пролета с разрывом накладки

сходило 0,15 мм. Первые трещины с раскрытием менее 0,1 мм зафиксированы при нагрузке 300 кН. После разрушения опорной части трещины закрылись, что свидетельствует о работе растянутой стержневой арматуры в упругой стадии;

- плита № 2 была вначале испытана при равномерно распределенном нагружении. Разрушение, как и плиты № 1, произошло в результате откола опорной зоны от действия поперечной силы при нагрузке 600 кН. Каких-либо трещин в пролете до момента разрушения не отмечено;

- разрушение плит № 1 и 2 в опорной части от действия поперечной силы стало следствием недостаточного поперечного армирования и изменения геометрии (наличие зуба) в опорной части, в результате чего нижние растянутые стержни $\varnothing 18$ мм не доходят до конца плиты на 200 мм. Именно в этом месте произошло разрушение.

Таким образом, вопреки гарантии разработчика, плита ДП-15-1т не выдерживает нагрузки НК-80, которая при пролете 5,4 м и равномерно распределенном приложении (в шести точках) составляет 900 кН;

- после разрушения плит № 1 и 2 в опорной зоне были проведены повторные испытания при смещении опор на 600 мм (пролет 4,2 м) и приложении нагрузки в третях пролета. Разрушение плиты № 1 произошло от действия поперечных сил при нагрузке около 600 кН в результате образования наклонных трещин от точек приложения нагрузки к опорам. Это значение было принято в качестве исходного для определения коэффициента усиления. Рас-

крытие трещин достигало 1,5 мм, обрыва стержней не отмечено. Плита № 2 разрушилась при нагрузке 900 кН ($K_y = 1,5$) от поперечной силы в точках ее приложения (наклонные трещины по направлению к опорам). В трети пролета произошло разрушение усиливающей накладки с разрывом продольных жгутов (рис. 2). Отмечено отслоение бетона от стержневой арматуры в зоне трещины. Однако обрушения плиты не произошло. Прогиб в центре пролета составлял 18 мм. Первые трещины в ребрах с раскрытием менее 0,1 мм отмечены при нагрузке 600 кН только в центральной зоне пролета;

- плиты № 3 и 4 были испытаны при смещении опор на 600 мм (пролет 4,2 м) и приложении нагрузки в третях пролета. Разрушение обеих плит произошло при нагрузке 600 кН от действия поперечной силы в результате образования наклонных трещин от точек приложения нагрузки к опорам.

Раскрытие трещин в момент разрушения достигало 2 мм. Отслоений усиливающих накладок от бетона конструкций не отмечено;

- разрушение плит от действия поперечной силы, вероятно, является следствием недостаточного армирования сжатой зоны и поперечного армирования ребер.

Недостаток поперечного армирования компенсируется при использовании накладок U-образного сечения. При двух слоях углеродной сетки $K_y = 1,5$. Однако при использовании накладок L-образного сечения эффект усиления практически не проявляется, разрушение происходит в результате образования трещин с внешней (неусиленной) стороны ребра.

Выводы

Коэффициент усиления от использования углеродной сетки, уложенной в матрицу на минеральной основе, в испытанных балках и плитах изменялся в зависимости от длины, формы и площади сечения элемента усиления от 1,3 до 6.

При испытаниях фрагментов покрытия коллекторных тоннелей без

усиления углеродной сеткой, а также при недостаточной длине элемента усиления происходит хрупкое разрушение фрагментов с резким скачком деформации.

Конструкции с усилением углеродной сеткой от опоры до опоры, подвергнутой обработке в низковязком эпоксидном составе перед укладкой в матрицу на минеральной основе, разрушаются с постепенным увеличением деформации. Продергивания волокон в прядях в процессе разрушения конструкции не отмечено.

Такой тип разрушения говорит о более высоком уровне безопасности отделки тоннелей с армированием углеродной сеткой, что может быть особенно важным при проведении ремонтно-восстановительных работ.

Инъектирование трещин низковязким эпоксидным составом восстанавливает равнопрочность бетона, что свидетельствует о перспективности использования данного метода при выполнении ремонтных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин А. А., Пшеничный В. А., Картузов Д. В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. 184 с.
2. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
3. СП-13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.
4. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей.