

УДК 69.07

ЧЖУ ГУАНШАНЬ, аспирант,
jiandazgs@126.com
ЧЖУ ФУШЭН, докт. техн. наук, профессор,
zhufusheng@mail.neu.edu.cn
Северо-Восточный университет,
110819, Китай, г. Шеньян, ул. Вэньхуа, пер. № 3, д. 11

ИСПЫТАНИЕ НА ИЗГИБ И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ ТАВРОВЫХ БАЛОК, УСИЛИВАЕМЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯГАЕМЫМ УГЛЕПЛАСТИКОМ И СТАЛЬНОЙ ПЛИТОЙ

Проведены испытания на изгиб 10 тавровых балок, описаны методика испытаний, формы разрушения образцов, исследовано воздействие предварительного напряжения различного уровня и количества слоев усиливающего углепластика (на английском языке CFRP), степени предварительного повреждения тавровых балок на несущую способность и жесткость тавровых балок, комбинированно усиливаемых предварительно напрягаемым углепластиком и стальным листом. Результаты испытаний показали, что проявилось изгибное разрушение усиливаемых тавровых балок, а по сравнению со сравнительными балками предельная несущая способность P_u повысилась более чем на 90 %. При повышении уровня предварительного напряжения от 5 до 15 % значения P_{cr} и P_y повысились, а P_u снизилось. До текучести жесткость изменилась незначительно. При степени предварительного напряжения до 10–15 % жесткость после текучести заметно увеличилась. С увеличением количества слоев усиления значения P_{cr} , P_y и P_u линейно увеличились, также заметно повысилось P_u . После текучести, усиливаемой одним слоем углепластика, жесткость тавровой балки, усиливаемой двумя слоями углепластика, повысилась в два раза по сравнению с тавровой балкой.

Ключевые слова: железобетонная тавровая балка; предварительно напрягаемый углепластик; стальной лист; испытание на изгиб; комбинированное усиление; несущая способность; жесткость.

ZHU GUANG-SHAN, Research Assistant,
jiandazgs@126.com
ZHU FU-SHENG, DSc, Professor,
zhufusheng@mail.neu.edu.cn
Northeastern University,
No. 3-11, Wenhua Road, 110819, Shenyang, China

FLEXURE TEST AND STRENGTH ANALYSIS OF T-BEAMS REINFORCED WITH PRESTRESSED CFRP AND STEEL SHEET

The paper presents flexure tests of 10 T-beams, their methodology, specimen fracture, the investigation of prestressed carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) layers, T-beam carrying capacity and rigidity subjected to a combined reinforcement with prestressed CFRP and a steel sheet. It is shown that T-beam undergoes flexural fracture and its carrying capacity increased more than by 90 %. T-beam prestressing ranging between 5–15%, results in the in-

crease in prestress and yield load values and the decrease in the ultimate load. The rigidity has no obvious change before the yield. In prestressing, it increased up to 10–15 %. The values of prestress, yield and ultimate loads increase with the number of reinforced layers. After the yield, the rigidity of T-beam reinforced with two CFRP layers increased twice as compared to that reinforced with one CFRP layer. When the number of CFRP layers is more than two, the rigidity tends to a gradual increase. With the increase in predamage, the yield and ultimate loads linearly reduce. After the yield, the rigidity of T-beam reinforced with two CFRP layers increased twice.

Keywords: reinforced concrete T-beam; prestressed CFRP; steel plate; combined reinforcement; flexural test; carrying capacity; rigidity.

В Китае бетонные балки таврового сечения являются наиболее распространенным пролетным строением старых мостов. Длительная эксплуатация стала причиной серьезных повреждений многих тавровых балок, также выявились недостаточная прочность, низкая долговечность и безопасность главных балок, поэтому срочно требуется их усиление. Чтобы повысить рабочие характеристики поврежденных мостов, обычно усиливают бетонные балки путем внешней наклейки стального листа [1–3] или наклейки армированного полимерного материала (FRP) [4–9]. Наклейка (стальной лист) ограничена толщиной усиливающей стальной пластины, а использование только армированного полимерного материала неэффективно из-за хрупкого разрушения. Отсюда следует, что для усиления бетонных балок применение единственного материала имеет существенные недостатки. В связи с этим китайские ученые исследовали комбинированное усиление бетонных балок с использованием углепластика и стального листа [10–12]. Исследования в этой области были проведены для прямоугольных балок, также было выполнено комбинированное усиление только с использованием обычного углепластика и стального листа [10–13]. Тавровые балки и предварительно напрягаемый углепластик не исследовались. Тавровые балки являются конструкцией, которая широко применяется в области строительства мостов в Китае. Применение предварительно напрягаемого углепластика позволяет использовать высокопрочные характеристики композиционного материала и заметно повышает жесткость усиливаемых конструкций, так что исследование характеристик на изгиб тавровых балок, комбинированно усиливаемых предварительно напрягаемым углепластиком и стальным листом, имеет большое значение. В настоящей статье путем испытания на изгиб 10 тавровых балок показана прочность на изгиб тавровых балок при условии комбинированного усиления и исследовано влияние степени предварительного напряжения и количества слоев усиливающего углепластика, степени предварительного повреждения тавровых балок на характеристики при изгибе. Настоящее исследование имеет важное значение для инженерной практики.

1. Общее положение испытаний

Изготовление моделей. В соответствии с китайскими нормами JTGD62-2012 «Проектные нормы для железобетонных и предварительно напряженных бетонных мостов и труб на автомобильных дорогах» в качестве испытуемых тавровых балок применяются масштабные модели стандартных сборных тавровых балок длиной 16 м (масштаб 1:6). Марка бетона по прочности – 240. Измеряемая прочность на сжатие кубов бетона составляет

47,2 МПа. В качестве продольной растянутой рабочей арматуры применяются стержни диаметром 12 мм, а в качестве хомутов – стержни диаметром 6 мм. Конструкция моделей и армирование приведены на рис. 1.

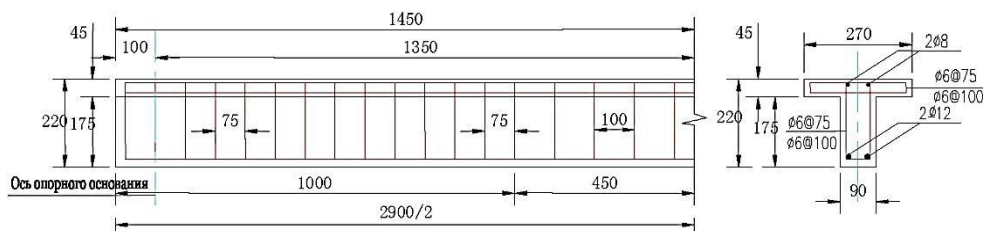


Рис. 1. Конструкция моделей и армирование

Для растяжения предварительно напрягаемого армированного полимерного материала применяется самостоятельно разработанная натяжная машина (рис. 2), рабочие принципы освещены в патенте на изобретение [13]. Для усиления тавровых балок применяется углепластик I-й степени, изготовленный ООО по производству композиционных материалов «CARBON» (в г. Тяньцзинь, Китай). Прочность на растяжение углепластика составляет 3536 МПа. Модуль упругости – 231 ГПа. Усиливающий стальной лист изготовлен из стали марки Q235 толщиной 2 мм.

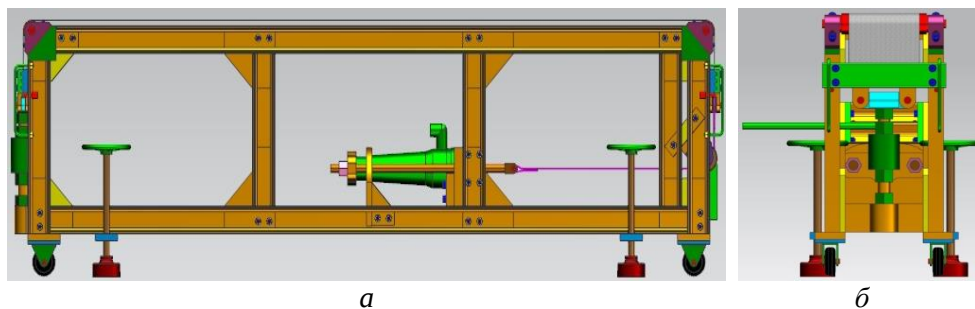


Рис. 2. Натяжная машина предварительно напрягаемого армированного полимерного материала:

a – вид спереди; *б* – вид сбоку

Процесс комбинированного усиления бетонных тавровых балок: 1) растяжение углепластика с использованием натяжной машины; 2) наклейка растянутого углепластика на нижнюю поверхность тавровых балок; 3) наклейка стального листа снизу предварительно напрягаемого углепластика; 4) установка анкерного устройства на двух сторонах тавровых балок и анкерное крепление предварительно напрягаемого углепластика, стального листа и тавровых балок; 5) после твердения смоляного клея перерезка углепластика и удаление натяжной машины. Процесс комбинированного усиления показан на рис. 3. Тавровые балки после усиления приведены на рис. 4.



Рис. 3. Процесс комбинированного усиления бетонных тавровых балок

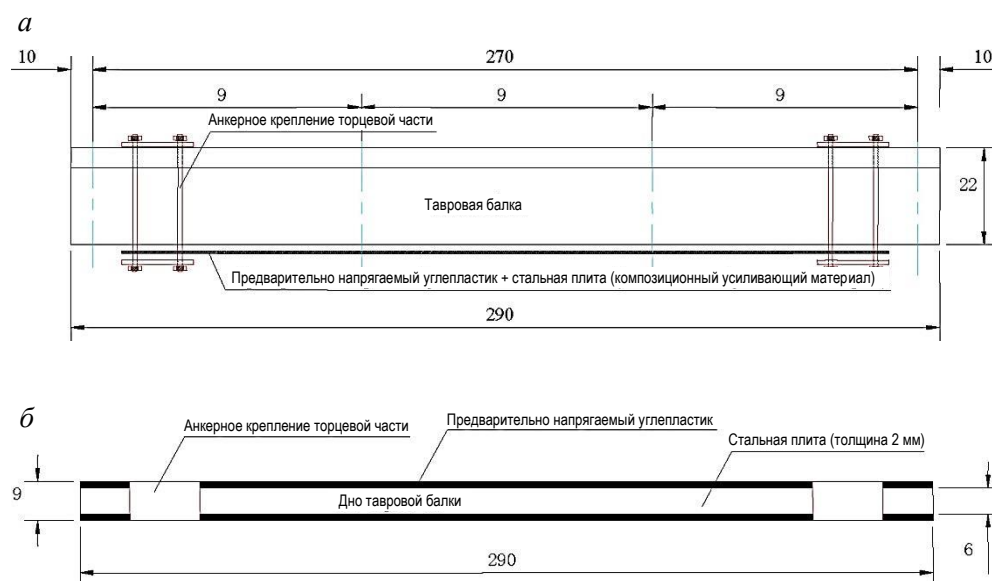


Рис. 4. Размер и положение комбинированного усиления:

a – вид спереди комбинированно усиливаемой тавровой балки; *b* – вид снизу комбинированно усиливаемой тавровой балки (единица: мм)

План испытаний. Испытания на изгиб выполнены в лаборатории испытаний конструкций Шеньянского строительного университета в Китае. Для испытуемых балок нагрузка передавалась в четырех точках. Перед образованием трещин в испытуемых изделиях осуществлялось ступенчатое увеличение нагрузки на 2 кН. После образования трещин производилось ступенчатое увеличение нагрузки на 3 кН. Продолжительность каждой степени нагрузки составляла 5 мин. С использованием системы для получения данных Solartron IMP (Англия) выполнена запись величин деформаций, также своевременно наблюдалось развитие трещин в усиливаемых балках и записана ситуация их развития. Испытания и нагрузочный механизм приведены на рис. 5. Проектные параметры усиления испытуемых изделий приведены в табл. 1.



Рис. 5. Нагрузочный механизм для испытаний

Таблица 1

Проектные параметры усиления испытываемых изделий

Номер испытываемых изделий	Форма усиления или количество слоев углепластика	Степень предварительного напряжения углепластика	Степень предварительного трещинообразования
L-0-1	Не усилено	—	Отсутствие предварительного трещинообразования
L-1-1	1 слой стальной плиты	—	То же
L-1-2	1 слой углепластика	10 %	»
L-1-3	1 слой стальной плиты + 1 слой углепластика	10 %	»
L-1-4	1 слой стальной плиты + 1 слой углепластика	5 %	»
L-1-5	1 слой стальной плиты + 1 слой углепластика	15 %	»
L-2-1	1 слой стальной плиты + 2 слоя углепластика	10 %	»
L-2-2	1 слой стальной плиты + 3 слоя углепластика	10 %	»
L-3-1	1 слой стальной плиты + 1 слой углепластика	10 %	30 % предварительного трещинообразования*
L-3-2	1 слой стальной плиты + 1 слой углепластика	10 %	60 % предварительного трещинообразования*

* Имеется в виду, что на балки приложена нагрузка, составляющая 30 и 60 % предельной нагрузки.

2. Проведение испытаний

Балка L-0-1 является неусиленной сравнительной балкой. Ее процесс разрушения разделяется на три этапа. Перед образованием трещин балка выдерживала малую нагрузку. Когда нагрузка увеличивалась до нагрузки образования трещин, вокруг точек приложения нагрузки испытываемой балки возникали мелкие трещины. Когда нагрузка дальше увеличивалась, количество трещин постепенно увеличивалось, и ширина трещин постепенно возрастала. После достижения текучести арматуры количество трещин незначительно изменилось, а ширина трещин быстро увеличилась. Высота трещин достигала полки тавровой балки. Бетон на верхней грани полки тавровой балки незначительно разрушился. Испытуемая балка повреждена.

Балка L-1-1 была усилена стальным листом. Ее процесс разрушения также разделяется на 3 этапа. Перед образованием трещин испытываемая балка выдерживала большую нагрузку. Потом вокруг точек приложения нагрузки возникали первичные трещины. Когда нагрузка дальше повышалась, количество и ширина трещин постепенно увеличивались. Высота некоторых трещин продлилась до полки тавровой балки. В процессе нагружения появился незначительный звук, свидетельствующий о нарушении сцепления стального листа с бетоном. После достижения текучести арматуры и стального листа ширина почти всех трещин начала быстро увеличиваться. Ширина трещин на нижней части балки имела наибольшую величину. Прогиб достиг максимального значения.

Балка L-1-2 была усилена предварительно напрягаемым углепластиком. Ее процесс разрушения разделяется на 4 этапа. Перед образованием трещин испытываемая балка выдерживала малую нагрузку. Сначала вокруг точек приложения нагрузки возникали первичные трещины, постепенно появились другие трещины. Высота трещин сильно увеличилась. При дальнейшем увеличении нагрузки количество и ширина трещин постепенно возрастали. В процессе нагрузки появился незначительный звук, свидетельствующий о нарушении сцепления углепластика с бетоном. После достижения текучести арматуры зарегистрировали непрерывные звуки, связанные с отслоением углепластика, а ширина трещин продолжала увеличиваться. Когда углепластик достиг предельной несущей способности, он издал громкий звук, и на середине углепластика появился мгновенный разрыв. Ширина почти всех трещин сразу достигла максимального значения.

Балка L-1-3 комбинированно усилена углепластиком и стальным листом. Ее процесс разрушения разделяется на 4 этапа. Перед образованием трещин испытываемая балка выдерживала большую нагрузку. Вокруг точек приложения нагрузки начали возникать первичные трещины. С увеличением нагрузки количество, ширина и высота трещин постепенно возрастали. После достижения текучести арматуры и стального листа на углепластике зарегистрировали непрерывные звуки, а ширина трещин заметно увеличилась. Когда углепластик достиг предельной несущей способности, он издал громкий звук, и произошел мгновенный разрыв. В связи с тем, что в это время испытываемая балка еще ограничена стальным листом, после появления разрыва углепластика ширина трещин быстро увеличивалась.

Балки L-1-4, L-1-5, L-2-1 и L-2-2 являются балками, комбинированно усиленными углепластиком и стальным листом. Их процесс разрушения был аналогичным с балкой L-1-3. Разница была в том, что с изменением параметров усиления нагрузка образования трещин, нагрузка текучести арматуры и стального листа, нагрузка разрушения углепластика и предельная нагрузка тавровой балки были разными.

Балки L-3-1 и L-3-2 являются предварительно поврежденными балками, комбинированно усиленными углепластиком и стальным листом. Процесс их разрушения разделяется на 3 этапа. В связи с наличием предварительных трещин не было этапа перед образованием трещин. С увеличением нагрузки ширина трещин постепенно возрастала. Процесс развития трещин был аналогичным с балкой L-1-3, но нагрузка текучести арматуры и стального листа, нагрузка разрушения углепластика и предельная нагрузка тавровой балки были меньше, чем для балки без предварительного повреждения. При разрушении тавровой балки максимальная ширина трещин была больше, чем в балке без предварительного повреждения. На рис. 6 показано окончательное состояние разрушения некоторых типичных балок при испытаниях.

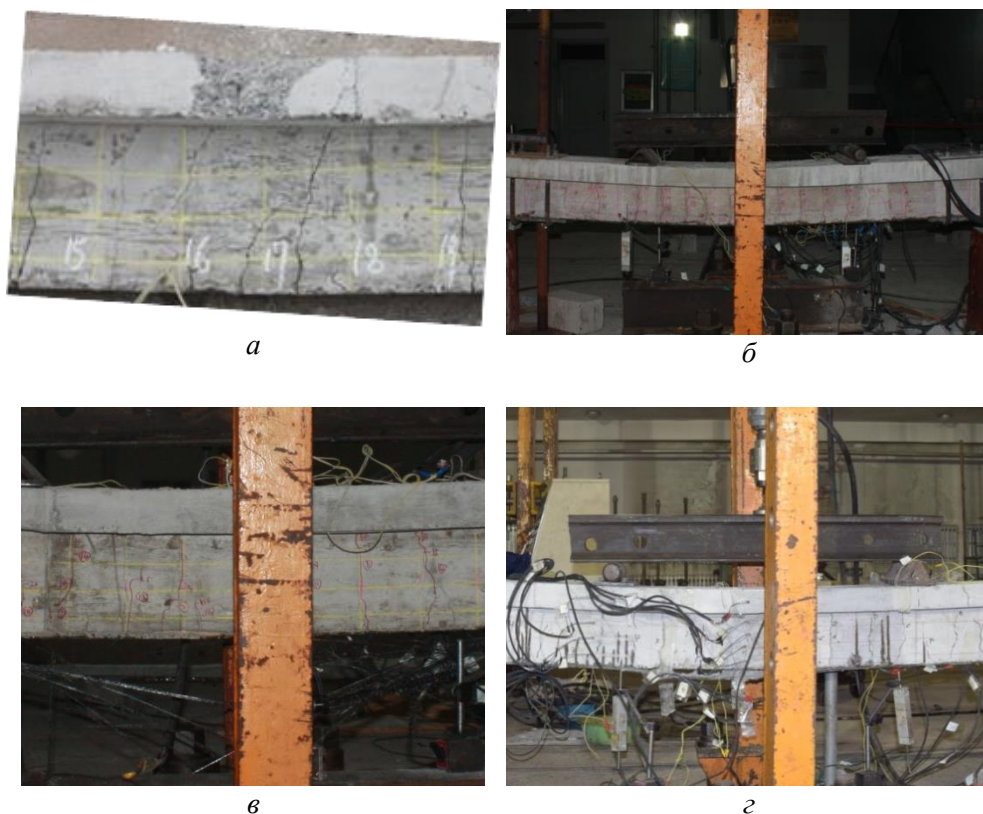


Рис. 6. Состояние разрушения типичных балок в испытаниях (окончание см. на с. 90):
а – L-0-1; б – L-1-1; в – L-1-2; г – L-1-3



Рис. 6. Состояние разрушения типичных балок в испытаниях (начало см. на с. 89):
 д – L-3-1; е – L-3-2

3. Результаты и анализ испытаний

Анализ нагрузок. В табл. 2 приведены нагрузка образования трещин, нагрузка текучести и предельная нагрузка при испытаниях.

Таблица 2

Результаты испытаний на изгиб

Номер испытываемых изделий	Нагрузка образования трещин	Нагрузка текучести	Предельная нагрузка
L-0-1	7,6	41,2	44,2
L-1-1	15,9	62,1	69,0
L-1-2	13,6	56,9	65,5
L-1-3	18,4	75,2	87,0
L-1-4	16,8	72,0	90,9
L-1-5	19,4	76,4	85,4
L-2-1	26,5	80,4	111,1
L-2-2	29,8	90,3	133,0
L-3-1	–	68,6	82,6
L-3-2	–	58,1	74,6

На рис. 7 представлено влияние формы усиления, степени предварительного напряжения, количества слоев усиления и степени предварительного повреждения на нагрузку образования трещин P_{cr} , нагрузку текучести P_y и предельную нагрузку P_u тавровых балок. С учетом наличия существующих трещин в степень предварительного повреждения не входит сравнение P_{cr} . На рис. 7, а показано, что по сравнению с неусиленной балкой три способа усиления могут повышать P_{cr} , P_y и P_u тавровых балок, наиболее высокая степень повышения комбинированно усиленной балки P_{cr} повышалось на 142,1 %, P_y – 82,5 %, P_u – 96,8 %.

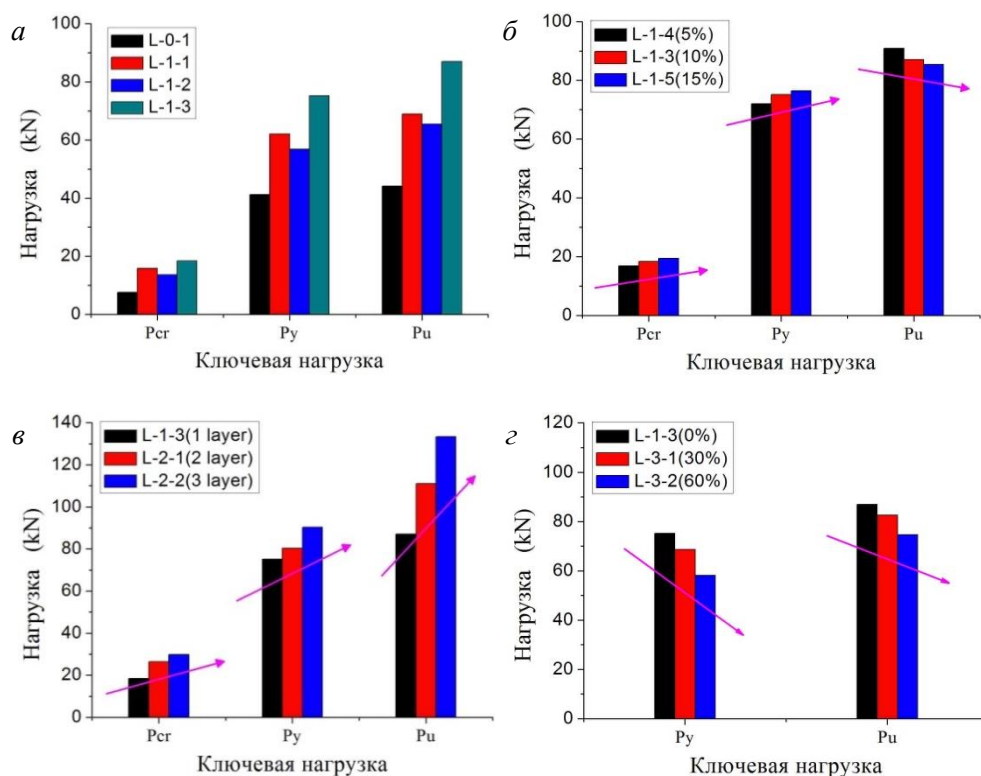


Рис. 7. Сравнительная схема нагрузки текучести и предельной нагрузки:

а – сравнительная схема форм усиления; б – сравнительная схема степени предварительного напряжения; в – сравнительная схема количества слоев усиления; г – сравнительная схема степени предварительного повреждения

Порядок степени повышения нагрузки для трех форм усиления: 1 слой стального листа + 1 слой углепластика с предварительным напряжением 10 %; > 1 слоя стального листа и > 1 слоя углепластика с предварительным напряжением 10 %. На рис. 7, б показано, что степень предварительного напряжения составляет в диапазоне 5–15 %. С повышением степени предварительного напряжения P_{cr} и P_y повышались, а P_u снижалась, но разница незначительная. Если степень предварительного напряжения повышается на 5 %, средняя повышаемая или снижаемая нагрузка не больше 5 %. На рис. 7, в показано, что если количество слоев усиления не больше 3, с увеличением слоев усиления P_{cr} , P_y и P_u проявили линейную зависимость, степень увеличения P_u заметная (при усилении 3 слоями больше на 52,8 %, чем при усилении 1 слоем), а с повышением количества слоев усиления P_{cr} и P_y различаются примерно на 10 %. На рис. 7, г показано, что если степень предварительного повреждения не больше 60 %, с усилением степени предварительного повреждения P_y и P_u проявили линейное уменьшение, разница уменьшения значительная. Если степень предварительного повреждения повышается на 30 %, P_y снижается на 10 %.

Анализ жесткости. Рис. 8 является сравнительной схемой графика нагрузки и прогиба в середине пролета при разных формах усиления, степени

предварительного напряжения, количестве слоев усиления и степени предварительного повреждения.

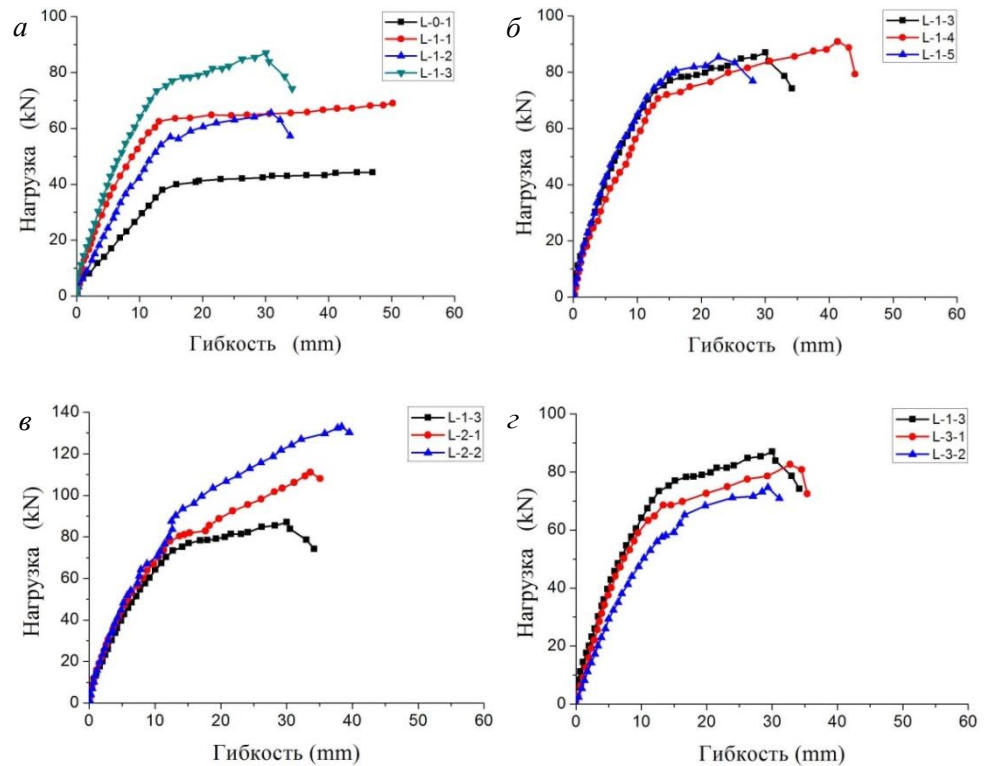


Рис. 8. Сравнительная схема графика нагрузки и прогиба в середине пролета:

a – сравнительная схема форм усиления; *б* – сравнительная схема степени предварительного напряжения; *в* – сравнительная схема количества слоев усиления; *г* – сравнительная схема степени предварительного повреждения

На рис. 8, *a* видно, что графики нагрузки и прогиба балок L-0-1 и L-1-1 являются линиями с тремя характерными точками. Переломные точки соответственно являются точкой образования трещин, точкой текучести и предельной точкой. На рис. 8, *г* видно, что до текучести жесткость балок L-3-1 и L-3-2 почти не имеет заметного изменения. Графики являются линиями с тремя характерными точками. Переломные точки соответственно являются точкой текучести, пиковой точкой нагрузки и предельной точкой. На графиках нагрузки и прогиба видно, что до и после образования трещин изменение жесткости незначительное. Точка текучести является переломной точкой. Жесткость резко снижается. За пиковой точкой отмечена «отрицательная» жесткость, что вызвало снижение нагрузки. На этапе использования балок исследование отрицательной жесткости не имеет большого значения, так что в целом изменение жесткости разделяется на жесткость до текучести B_y и жесткость после текучести B_u . В соответствии с рис. 8 определен закон влияния форм усиления, степени предварительного напряжения, количества сло-

ев усиления и степени предварительного повреждения на изменение B_y и B_u (рис. 9). На рис. 9 ордината выражает отношение жесткостей B_y и B_u тавровых балок с жесткостью до текучести B_{y0} и жесткостью после текучести B_{u0} сравнительных балок, отсюда определяется степень повышения жесткости.

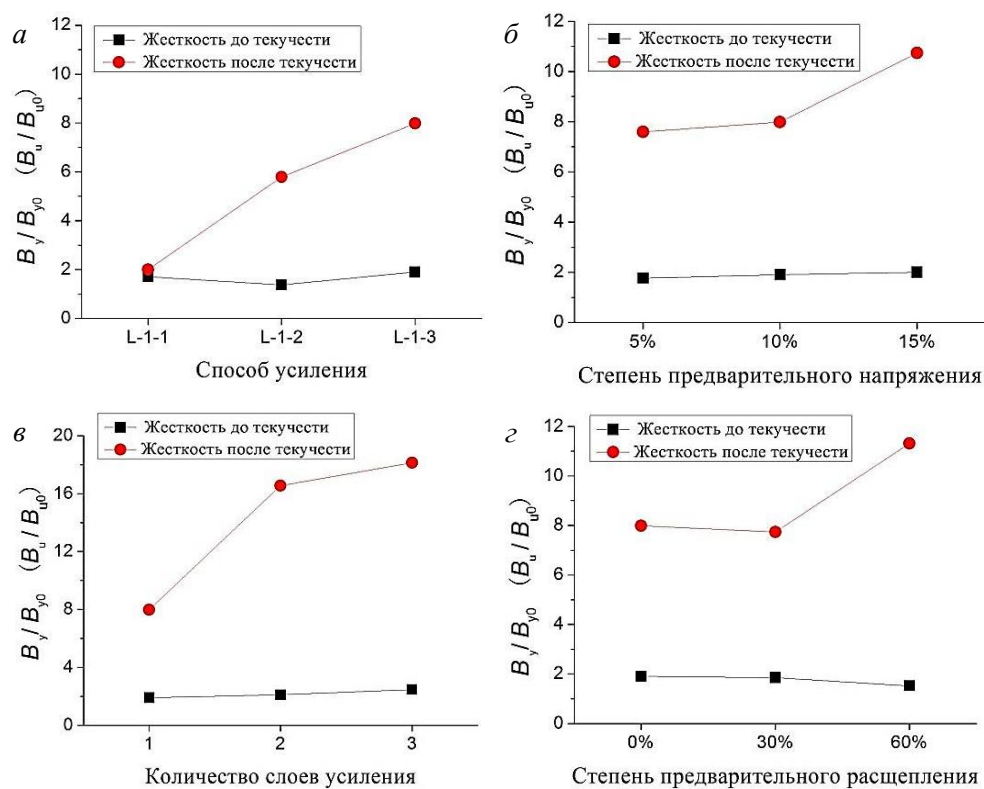


Рис. 9. Сравнительная схема жесткости до и после текучести:

а – сравнительная схема форм усиления; б – сравнительная схема степени предварительного напряжения; в – сравнительная схема количества слоев усиления; г – сравнительная схема степени предварительного повреждения

На рис. 9, а показано, что три формы усиления повышали жесткость до и после текучести. Порядок повышения жесткости до текучести: 1 слой стального листа + 1 слой углепластика с предварительным напряжением 10 %; > 1 слоя стального листа; > 1 слоя углепластика с предварительным напряжением 10 %. Порядок повышения жесткости после текучести: 1 слой стального листа + 1 слой углепластика с предварительным напряжением 10 %; > 1 слоя углепластика с предварительным напряжением 10 %; > 1 слоя стального листа. Видно, что комбинированно усиленная тавровая балка является конструкцией, которая имеет самый значительный эффект повышения жесткости из трех форм усиления. Для сравнительных балок жесткость до и после текучести соответственно повышалась в 2 и 7 раз. На рис. 9, б показано, что с увеличением степени предварительного напряжения жесткость до текучести не имеет значительного изменения, но при условии степени предварительного

напряжения 10–15 % жесткость после текучести имеет значительное повышение. На рис. 9, в показано, что с увеличением слоев усиления жесткость до и после текучести заметно повышалась, но жесткость до текучести незначительно повышалась. При условии количества слоев усиления не больше 2 жесткость после текучести заметно повышалась. По сравнению с жесткостью после текучести с 1 слоем усиления жесткость после текучести с 2 слоями усиления повышалась примерно в 2 раза. При условии слоев усиления больше 2 повышение становилось плавным. На рис. 9, г показано, что жесткость до текучести неповрежденной тавровой балки и тавровой балки при условии степени предварительного повреждения на 30 % почти одинаковая. Для тавровой балки при условии степени предварительного повреждения на 60 % жесткость до текучести снижалась, а жесткость после текучести повышалась.

Выводы

Комбинированно усиливаемые тавровые балки испытаны на изгиб до разрушения. По сравнению с неусиливаемой балкой 3 формы усиления могут повышать P_{cr} , P_y и P_u тавровых балок, в том числе степень повышения комбинированно усиленной балки самая большая. P_{cr} повышалось более чем на 140 %, P_y – на 80 %, P_u – на 90 %. Комбинированно усиливаемая тавровая балка является усиливаемой балкой, которая имеет самый значительный эффект повышения жесткости из трех форм усиления. Для сравнительных балок жесткость до и после текучести соответственно повышалась в 2 и 7 раз.

Влияние степени предварительного напряжения на ключевую нагрузку незначительное. При условии предварительного напряжения 5–15 % с повышением степени предварительного напряжения P_{cr} и P_y повысились, а P_u снизилось. До текучести жесткость незначительно изменилась. При условии степени предварительного напряжения 10–15 % жесткость после текучести существенно увеличилась.

Влияние количества слоев усиления с использованием углепластика на ключевую нагрузку значительное. С увеличением количества слоев усиления значения P_{cr} , P_y и P_u линейно увеличились, также P_u заметно повысилось. По сравнению с жесткостью после текучести с 1 слоем усиления жесткость после текучести с 2 слоями усиления повышалась примерно в 2 раза. При условии слоев усиления больше 2 повышение становилось плавным.

С усилением степени предварительного повреждения P_y и P_u проявили линейное уменьшение. Если степень предварительного повреждения повышается на 30 %, P_y и P_u снижаются на 10 %. Жесткость до текучести неповрежденной тавровой балки и тавровой балки при условии степени предварительного повреждения на 30 % почти одинаковая. Для тавровой балки при условии степени предварительного повреждения 60 % жесткость до текучести снижалась, а жесткость после текучести повышалась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Су, Р.К.Л. Влияние болтовых пластин на железобетонные балки, укрепленные стальными плитами. Ч. 32 : пер. с англ. / Р.К.Л. Су, В.Н. Сиу, С.Т. Смит // Инженерное сооружение. – 2010. – № 6. – С. 1769–1778.

2. *Исследование характеристики на изгиб железобетонных балок, укрепленных анкером и наклепкой стальных плит.* Ч. 34 : пер. с китайск. / Гао Цзяньпин, Би Хан, Сюй Цзямин, Дэн Цзяньхуа // *Борьба с землетрясением в инженерной области и реконструкция.* – 2012. – № 6. – С. 120–124.
3. *Чжан Мэй.* Исследование испытаний бетонных балок, усиливаемых стальной плитой. Ч. 27 : пер. с китайск. / Чжан Мэй, Чжан Чжэ, Чжао Чжо // *Вестник Шеньянского строительного университета в Китае (Версия естественных наук).* – 2011. – № 3. – С. 485–489.
4. *Лепин, Е.* Применение и развитие армированного полимерного материала в инженерной конструкции. Ч. 39 : пер. с китайск. / Е Лепин, Фэн Пэн // *Вестник по специальности гражданского строительства.* – 2006. – № 3. – С. 24–36.
5. *Исследование напряженной характеристики железобетонных балок, усиливаемых углепластиком.* Ч. 29 : пер. с китайск. / Пэн Хуй, Чжан Цзяньжэнь, Хэ Сяньфэн, Цян Синь // *Техническая механика.* – 2012. – Вспомогательное издание I. – С. 79–91.
6. *Исследование характеристики на изгиб железобетонных напряженных компонентов, усиливаемых углепластиком.* Ч. 24 : пер. с китайск. / Шан Шоупин, Пэн Хуй, Тун Хуа, Вэй Дунхуй, Зэн Линхун // *Вестник по строительной конструкции.* – 2003. – № 5. – С. 24–30.
7. *Плевков, В.С.* К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов / В.С. Плевков, И.В. Балдин, А.В. Невский // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2017. – № 1 (60). – С. 96–113.
8. *Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии* / В.С. Плевков, И.В. Балдин, К.Л. Кудяков, А.В. Невский // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2016. – № 5 (58). – С. 91–101.
9. *Experimental and numerical investigation of concrete structures with metal and non-metal reinforcement at impulse loadings* / P.A. Radchenko, S.P. Batuev, A.V. Radchenko, V.S. Plevkov, K.L. Kudyakov // *IOP Conf. Series: Journal of Physics.* – 2016. – V. 774. – P. 2–8.
10. *Лу Иянь.* Исследование характеристических испытаний на изгиб железобетонных балок, комбинированно усиливаемых углеродно-волоконным материалом и стальной плитой. Ч. 28 : пер. с китайск. / Лу Иянь, Чжоу Тин // *Вестник по железной дороге.* – 2006. – № 1. – С. 80–87.
11. *Лу Иянь.* Исследование характеристических испытаний на усталость при изгибе железобетонных балок, комбинированно усиливаемых углепластиком и стальной плитой. Ч. 36 : пер. с китайск. / Лу Иянь, Ху Лин, Лян Хунцзюнь // *Вестник по строительной конструкции.* – 2015. – № 11. – С. 64–71.
12. *Сюн Сюеюй.* Исследование испытаний на трещины железобетонных балок, комбинированно усиливаемых углеродно-волоконным материалом и стальной плитой. Ч. 33 : пер. с китайск. / Сюн Сюеюй, Сюй Хайфэн // *Китайская железнодорожная наука.* – 2012. – № 3. – С. 21–27.
13. *Пат. 2026447 КНР, ZL 2014 1 0554300.4 [P].* Натяжная машина предварительно напрягаемого армированного полимерного материала для дозирования управления углепластика/ Чжу Гуаншань, Гао кайлун, Шэн Гохуа. Опубл. 13.04.2016.

REFERENCES

1. *Su R.K.L., Siu W.H., Smith S.T.* Effects of bolt plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams. *Engineering Structure.* 2010. V. 32. No. 6. Pp. 1769–1778.
2. *Gao Jian-ping, Bi Hang, Xu Jia-ming, Deng Yan-hua.* A review of the flexural behavior of reinforced-concrete beam strengthened with bolted side steel plate. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting.* 2012. V. 34. No. 6. Pp. 120–124.
3. *Zhang Mei, Zhang Zhe, Zhao Zhuo.* Experiment research on concrete beams reinforced by steel plate. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science).* 2011. V. 27. No. 3. Pp. 485–489.
4. *Ye Lieping, Feng Peng.* Applications and development of fiber - reinforced polymer in engineering structures. *China Civil Engineering Journal.* 2006. V. 39. No. 3. Pp. 24–36.

5. Peng Hui Zhang Jian-Ren, He Xian-Feng, Jiang Xin. Study of mechanical behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface-mounted prestressed CFRP strips. *Engineering Mechanics*. 2012. V. 29. Pp. 79–91.
6. Shang Shouping, Peng Hui, Tong Hua, Wei Dong-hui, Zeng Ling-hong. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet. *Journal of Building Structures*. 2003. V. 24. No. 5. Pp. 24–30.
7. Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevskii A.V. K opredeleniyu raschetnykh napryazhenii v stal'noi i uglekompozitnoi armature normal'nykh sechenii zhelezobetonnykh elementov [Estimated stresses in steel and carbon reinforced composite rebar of normal sections in concrete structures]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 1. Pp. 96–113. (rus)
8. Plevkov V.S., Baldin I.V., Kudyakov K.L., Nevskii A.V. Prochnost' i deformativnost' armatury kompozitnoi polimernoi pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom rastyazhenii i szhatii [Strength and deformability of polymer composites under tensile and compressive loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5. Pp. 91–101. (rus)
9. Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V., Plevkov V.S., Kudyakov K.L. Experimental and numerical investigation of concrete structures with metal and non-metal reinforcement at impulse loadings. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2016. V. 774. Pp. 2–8.
10. Lu Yi-Yan, Zhou Ting. Experimental research on flexural performance of reinforced concrete beams combination strengthened with bonded carbon fiber reinforced polymer and steel plates. *Journal of the China Railway Society*. 2006. V. 28. No. 1. Pp. 80–87.
11. Lu Yi-Yan, Hu Ling, Liang Hong-Jun. Research on bend fatigue performance test for composite reinforced concrete beam of CFRP cloth and steel plate. *Journal of Building Structures*, 2015. V. 36. No. 11. Pp. 64–71.
12. Xiong Xue-yu, Xu Hai-feng. Research on test for composite reinforced concrete beam crack of carbon fiber and steel plate. *China Railway Science*. 2012. V. 33. No. 3. Pp. 21–27.
13. Zhu Guang-Shan, Gao Kai-Long, Sheng Guo-Hua. Self-anchorage prestressed tensioning equipment for quantitative control of FRP. Pat. Chin. Fed. N 2026447. 2016.