



Статья

Устойчивые и устойчивые структуры с помощью SHM на основе EMI

Оценка инновационной веревки из C-FRP

Техника усиления

Никос А. Пападопулос *, Мария К. Наум

, Джордж М. Сапидис и Константин Э. Чалиорис



Лаборатория железобетона и сейсмического проектирования конструкций, Факультет гражданского строительства, Инженерная школа, Фракийский университет Демокрита, 67100 Ксанти, Греция; mnaoum@civil.duth.gr (MCN); gsapidis@civil.duth.gr (GMS); chaliori@civil.duth.gr (ЦИК)

* Переписка: nikpapad@civil.duth.gr

Аннотация: Железобетонные элементы (RC) в существующих железобетонных конструкциях подвержены критическому сдвигу из-за их недостаточно армированной конструкции. Таким образом, внедрение метода модернизации имеет важное значение для устранения потерь, которые могут возникнуть в результате внезапных и катастрофических обрушений из-за хрупкости этих элементов. Среди других предложенных методов использование канатов из полимеров, армированных углеродным волокном (C-FRP) для увеличения прочности на сдвиг железобетонных конструктивных элементов оказалось многообещающим применением армирования. Кроме того, для оценки эффективности схемы упрочнения был использован метод электромеханического импеданса (на основе EMI) с использованием цирконата-титаната свинца (с поддержкой PZT). Первоначально предложенная технология была применена к веревке из C-FRP при испытании на выдергивание. Таким образом, корреляция прочности каната на разрыв с реакцией на электромагнитные помехи накладки PZT была достигнута с использованием метрического индекса среднеквадратического отклонения (RMSD). После этого метод был применен к экспериментально полученным данным о веревках из C-FRP, используемых в качестве армирования на сдвиг в прямоугольной глубокой балке. Тросы были установлены по схеме «Закладная с». Кроме того, была предпринята попытка оценить остаточную несущую способность на сдвиг на основе реакций электромагнитных помех, полученных при встраивании и прикреплении к канатам PZT, что продемонстрировало многообещающие результаты и хорошую точность по сравнению с аналитическим прогнозом для канатов из C-FRP. вклад в сопротивление сдвигу.

Ключевые слова: структурный мониторинг работоспособности (СМГ); электромеханический импеданс (ЭМИ); пьезоэлектрический преобразователь (ПЦТ); веревка C-FRP; техника модернизации сдвига; вытаскивать



Цитирование: Пападопулос, Н.А.; Наум,

М.С.; Сапидис, генеральный директор;

Халиорис, СЕ Устойчивый и

Устойчивые структуры посредством

Оценка SHM на основе EMI

Инновационный метод

укрепления веревки C-FRP. Прил. Мех. 2024,

5, 405–419. <https://doi.org/10.3390/applmech5030024>

applmech5030024

Поступила: 28 апреля 2024 г.

Пересмотрено: 30 мая 2024 г.

Принято: 5 июня 2024 г.

Опубликовано: 21 июня 2024 г.



Копирайт: © 2024 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе.

распространяется на условиях и

условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4.0/).

1. Введение

Значительная часть железобетонных (RC) элементов в существующих железобетонных конструкциях часто страдает от недостаточного усиления против сдвига, в первую очередь из-за устаревших и неадекватных проектных положений. Эти элементы уязвимы для критического растрескивания при сдвиге, что создает риск хрупких разрушений из-за их недостаточной прочности и способности к деформации [1,2]. В результате внедрение методов модернизации для повышения несущей способности на сдвиг становится обязательным для смягчения потенциальных жертв, возникающих в результате внезапных и катастрофических обрушений этих хрупких элементов RC [3,4].

Среди множества доступных методов модернизации железобетонная оболочка является популярным выбором для устранения недостатков железобетонных элементов в существующих структурных узлах [5,6]. Многочисленные исследования подчеркнули преимущества традиционной RC-оболочки в увеличении несущей способности [7], жесткости и общей эффективности реакции конструкции [8,9].

Однако, несмотря на свою эффективность, обычная оболочка RC имеет ограничения. Такие проблемы, как изменение структурных динамических характеристик в результате значительного увеличения массы и жесткости, а также трудоемкость процесса, побудили исследователей изучить альтернативные методы модернизации с использованием альтернативных материалов. Это стремление к инновациям направлено на преодоление недостатков, связанных с традиционными технологиями.

Оболочка RC, при этом эффективно улучшая структурную целостность и производительность существующих элементов RC [10–12].

Еще одной уязвимостью железобетонных конструкций, возведенных в соответствии с устаревшими правилами, является их восприимчивость к морфологическим проблемам, возникающим из-за недостаточной осведомленности о сейсмическом проектировании [13]. Строительство коротких конструктивных элементов создает риски для сейсмической реакции конструкции. Короткие элементы, такие как короткие колонны и глубокие балки, склонны к хрупкому разрушению, тем самым уменьшая их вклад в общую пластичность конструкции [14]. Глубокие балки, в основном, являются критически важными структурными элементами в железобетонных конструкциях из-за их сильного сдвига [15].

В общем, разрушение железобетонных конструкций при сдвиге может привести к внезапному и неожиданному обрушению секций или даже всей конструкции, тем самым ставя под угрозу целостность и безопасность находящихся в ней людей [16]. Эти структурные недостатки подчеркивают острую необходимость модернизации и усиления мер по повышению сейсмической устойчивости существующих железобетонных конструкций и смягчению связанных с этим рисков, связанных с разрушениями, вызванными сдвигом.

Балка классифицируется как глубокая или короткая в зависимости от ее коэффициента сдвига, который определяется с помощью уравнения (1). В частности, если коэффициент сдвига, рассчитанный по уравнению (1), падает ниже 2,5, балка классифицируется как глубокая. Эта классификация имеет решающее значение в проектировании конструкций, поскольку она помогает идентифицировать балки с характерным поведением на сдвиг, дает информацию при проектировании и стратегиях модернизации для обеспечения структурной целостности и безопасности.

$$\alpha_s = \frac{\alpha v}{d} = \frac{M}{V d} \quad 2,5 \quad (1)$$

где αv представляет собой сдвиговой пролет элемента, d означает статическую высоту, а M и V обозначают величины изгибающего момента и силы сдвига поперечного сечения соответственно.

Согласно принципу Сен-Венана, приложение внешней нагрузки вызывает возмущенные области внутри глубоких балок, в которых опоры перекрываются, тем самым сводя на нет области, в которых принцип Бернулли применим к балке при изгибе. Следовательно, анализ глубоких балок требует применения методов моделирования стоек и стяжек, при которых бетон берет на себя ответственность за передачу сжимающих усилий, а продольное армирование отвечает за растягивающие силы.

Механическая реакция глубоких балок находится под сильным влиянием их геометрических свойств, условий нагрузки и наличия поперечной арматуры. В железобетонных конструкциях глубокие балки создают острую необходимость в укреплении из-за их ограниченной пластичности и недостаточного обеспечения поперечной арматуры.

Невозможность масштабного восстановления существующей инфраструктуры и сооружений стимулировала разработку новых методологий мониторинга и укрепления. Эти инновационные подходы направлены на устранение недостатков существующих железобетонных конструкций, одновременно повышая их устойчивость и долговечность перед лицом динамических нагрузок и экологических проблем.

2. Предлагаемые инновации и цель исследования. В

последние десятилетия армированные волокнами полимеры (FRP), связанные снаружи эпоксидными смолами, стали популярными решениями для восстановления [17–19], армирования, модернизации и ремонта железобетона (железобетона).) структуры. Эти приложения охватывают различные конструкционные элементы [20], в том числе балки, армированные на сдвиг [21,22], балки, армированные на кручение [23] и подборы балка-колонна, армированные на сдвиг [24], благодаря их многочисленным преимуществам. Эти преимущества включают высокую прочность на растяжение и усталость, легкий вес и исключительную коррозионную стойкость [25,26]. Примечательно, что полимеры, армированные углеродным волокном (CFRP), отличаются превосходными характеристиками по этим свойствам по сравнению с другими FRP.

Кроме того, углепластики обладают высокой жесткостью, что позволяет им удовлетворять потребности в армировании бетонных конструкций, компенсируя при этом деформацию конструктивных элементов [27]. Эта особенность повышает их пригодность для модернизации, где сохранение структурной целостности при различных условиях нагрузки имеет первостепенное значение.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, предлагаемые материалами FRP, существуют проблемы, связанные с их применением в реальных структурных условиях. Такие проблемы, как преждевременное расслоение

были подняты вопросы отказов и низкой огнестойкости, что требует тщательного рассмотрения при их реализации [28]. Снижение сцепления, наблюдаемое в межфазной зоне между композитом FRP и бетонной поверхностью, может привести к более низкой, чем предполагалось, реакции на деформацию, что, как следствие, снижает эффективность модернизации применяемых FRP из-за преждевременного отсоединения [29,30].

Решение этих проблем и оптимизация характеристик материалов FRP в конструкционных применениях остаются важнейшими областями исследований и разработок. Путем повышения прочности межфазных связей, улучшения свойств огнестойкости и изучения инновационных методов модернизации можно полностью раскрыть потенциал стеклопластиков в повышении долговечности и устойчивости железобетонных конструкций.

Кроме того, обширные исследования в существующей литературе последовательно идентифицировали преобладающий тип отказа в модернизированных железобетонных элементах с использованием композитов FRP с внешней эпоксидной связью, таких как преждевременное отслоение или отслоение слоя FRP от бетонной основы. Этот режим разрушения обычно вызывается высокой концентрацией напряжений и связан с хрупким разрушением [31]. Это явление особенно распространено в железобетонных элементах Т-образной формы, подвергнутых U-образным схемам усиления, где наличие плиты ограничивает возможность применения обертывания FRP вокруг поперечного сечения и ограничивает доступность для правильного выполнения концевой фиксации, тем самым усугубляя риск преждевременного отказа от дебондинга.

В этом контексте Chaliotis et al. исследовали потенциальные преимущества нового метода упрочнения для повышения способности к сдвигу и улучшения пластичности критичных к сдвигу глубоких балок RC [27]. Исследование было сосредоточено на поперечном армировании с использованием исключительно веревок из C-FRP. Для реализации канатов из C-FRP были исследованы две различные конфигурации: встроенное сквозное сечение (ETS) для балок прямоугольного сечения и монтируемое вблизи поверхности (NSM) для глубоких балок с полками Т-образной формы. В обоих случаях экспериментальное исполнение применяемого метода усиления на сдвиг дало многообещающие результаты, поскольку исследуемые балки, критические к сдвигу, в конечном итоге испытали разрушение при изгибе. Эти результаты подчеркивают эффективность предлагаемого подхода к усилению в повышении структурных характеристик глубоких балок RC и снижении риска разрушения, вызванного сдвигом.

Следовательно, использование канатов из C-FRP для повышения прочности на сдвиг железобетонных структурных элементов становится многообещающим методом армирования. Универсальность способов крепления этих канатов позволяет полностью использовать их высокую прочность на разрыв, обеспечивая гибкость при модернизации стратегий проектирования. Кроме того, тросы из C-FRP могут быть развернуты в нескольких конфигурациях, в том числе в пазах с заранее сделанными канавками по высоте балки (NSM) [32,33] или встроены в стенку балки (ETS). Такая адаптивность позволяет инженерам адаптировать подход к усилению в соответствии с конкретными требованиями и ограничениями каждого структурного элемента, тем самым максимизируя эффективность укрепления.

Хотя предложенные методы представляют потенциальные преимущества, существенные недостатки требуют дальнейшего изучения. Предыдущие исследования в основном были сосредоточены на раннем обнаружении повреждений в армировании FRP на эпоксидной связке, предлагая методологии неразрушающего контроля (NDT), особенно при армировании железобетонных конструкций композитными материалами FRP. Однако многие из этих методов оказываются непрактичными для больших и сложных конструкций из-за структурных ограничений и необходимости предварительного знания мест. Более того, большинство подходов неразрушающего контроля характеризуются трудоемкими процедурами, высокими затратами, требованиями доступа на месте и отсутствием возможностей непрерывного мониторинга в реальном времени. Эти ограничения подчеркивают необходимость в более надежных и универсальных методах для эффективного решения задач структурного мониторинга и обнаружения повреждений [16].

Как подчеркивалось выше, обеспечение плавной интеграции существующих структурных элементов с армирующими материалами представляет собой многогранную задачу, чреватую неопределенностью. Следовательно, контроль структурной целостности модернизированных элементов конструкции считается полезным для безопасного продления их срока службы. Многочисленные исследователи углубились в область методов мониторинга состояния конструкций (SHM), применимых к бетонным элементам [34–36]. Тем не менее, исследования, специально нацеленные на SHM армированных волокон

бетон, включающий дисперсные синтетические макроволокна [37,38], композиты FRP [39–41], а исследования, посвященные структурным элементам, армированным C-FRP, относительно скудны в литературе [42–45].

Хотя важность SHM для повышения долговечности и безопасности бетонных конструкций широко признана, остается заметный пробел в исследованиях, касающихся применения этих методов к фибробетону и элементам, армированным стеклопластиком.

Устранение этого пробела посредством всесторонних исследований методологий SHM, адаптированных к этим материалам, имеет большой потенциал для развития области структурного мониторинга и обеспечения долгосрочной работы модернизированных конструкций.

Экспериментальная фаза этого исследования включала внедрение новой системы мониторинга на усиленной на сдвиг балке, подвергнутой четырехточечной изгибающей нагрузке, с целью оценить и оценить эффективность метода усиления каната C-FRP. В предложенном методе SHM использовалась система на основе электромеханического импеданса (EMI), оснащенная пьезоэлектрическими датчиками цирконата-титаната свинца (PZT) для беспроводного мониторинга импеданса (WiAMS) [46].

В этой экспериментальной установке частотные характеристики напряжения PZT-пластырей, расположенных по периметру веревки из C-FRP, были записаны при различных уровнях приложенной нагрузки. Эти условия нагрузки соответствовали различным состояниям здоровья конструкции или условиям повреждения. Кроме того, были предприняты усилия по количественной оценке вклада канатов C-FRP в сопротивление сдвигу RC-балки. Данной оценке способствовал анализ статистических значений индекса ущерба, полученных на основе данных мониторинга. Путем сопоставления реакции системы мониторинга с приложенной нагрузкой и состоянием здоровья конструкции была получена ценная информация о производительности и эффективности метода усиления веревки из C-FRP.

В рамках этого экспериментального исследования основной целью была оценка возможности EMI в качестве прикладного метода SHM для мониторинга структурной целостности, эффективности и производительности канатов из C-FRP, используемых в качестве метода модернизации глубокой прямоугольной балки. Для достижения этой цели во время установки рядом с канатами были установлены пьезоэлектрические датчики. Затем были зафиксированы характеристики напряжения этих PZT в частотной области при различных состояниях приложенной нагрузки и соответствующих условиях работоспособности конструкции (уровнях нагрузки).

Кроме того, была проведена оценка эффективности метода модернизации при рассмотренных уровнях нагрузки. Эта оценка проводилась с использованием значений, полученных на основе среднеквадратического отклонения (RMSD), широко используемого статистического индекса ущерба. Уникальный аспект этого исследования включает в себя создание комбинированной методологии, которая включает в себя реакцию пластырей PZT, встроенных в веревки из C-FRP во время испытаний на выдергивание, в качестве базовых данных гомогенизации. Путем объединения данных экспериментальной установки и испытаний на выдергивание была достигнута комплексная оценка характеристик веревки из C-FRP при различных условиях нагрузки.

3. Экспериментальная

программа 3.1. Характеристики

глубокой балки. R-глубинная балка имела прямоугольное сечение по длине длиной $L = 1,6$ м, шириной $b = 150$ мм и высотой $h = 300$ мм. Продольное армирование R-глубокой балки было расположено симметрично и состояло из стержней $2\phi 14$, расположенных как в зонах сжатия, так и в зонах растяжения. Кроме того, стремена $\phi 8/50$ были расположены только на концах R-образной балки, рядом с опорами, чтобы закрепить продольную арматуру и предотвратить растрескивание бетона.

Пролет балки на сдвиг составил $a = 400$ мм, а общая толщина бетонного покрытия составила 35 мм, в результате чего эффективная глубина составила 265 мм. Следовательно, коэффициент сдвига a/d был рассчитан равным 1,51. Однозвенный канат из C-FRP был установлен вертикально на правом срезном пролете, а на левом срезном пролете веревка была вставлена в просверленное отверстие под наклоном примерно 52° . Оба троса были установлены в качестве усиления ETS. Все детали балки показаны на рисунке 1.

- Приложение небольшого натяжения к концам веревок для достижения окончательного крепления.

409

Рисунок 1. Геометрия и детали армирования балки R-Deer Beam.

3.2. Материалы

- В исследовании использовалась веревка из C-FRP, изготовленная из однопроволочных гибких углеродных волокон. Для использования каждого воздуха и специальной цепи для удаления скопившейся пыли внутри. В спецификации производителя производства, включая площадь поперечного сечения примерно 28 мм², минимальное удлинение до разрыва 1,6% и жесткость (модуль упругости) 240 ГПа
- Пропитка каната эпоксидной смолой в соответствии с техническими данными производителя для неопределенных волокон.
- После заделки веревка была пропитана эпоксидной смолой (Sikadur-52, Sika). • Заливка эпоксидной Hellas Kroyerst-Franchis) со свойствами, указанными в Таблице 1. Этот процесс был направлен на • вставку веревки из C-FRP в проделанные отверстия в бетонной плите.
- Улучшение качества эпоксидной смолы для устранения пустот и повышения адгезивности между паста (Sikadur-52, Sika Hellas, Kroyer, Греция) использовалась для заполнения и герметизации закладных канатов, предназначенных для приложения нагрузки, что снижает риск отрыва каната из-за недостаточного крепления.
- Формирование.

- Добавление большего количества эпоксидной смолы на поверхность балок для получения более гладких канавок.

3.2. Материалы

В исследовании использовалась веревка из C-FRP, изготовленная из однонаправленных гибких углеродных волокон.

В характеристиках производителя указана площадь поперечного сечения около 28 мм², минимальное удлинение до разрыва 1,6% и жесткость (модуль упругости) 240 ГПа для непропитанных волокон.

Впоследствии веревка была пропитана эпоксидной смолой (Sikadur-52, Sika Hellas Kryoneri, Греция) со свойствами, указанными в Таблице 1. Этот процесс был направлен на повышение механические свойства и долговечность веревки из C-FRP. Дополнительно эпоксидная паста (Sikadur-330, Sika Hellas, Крионери, Греция) использовался для заполнения и герметизации канавок. просверлены для экспериментальной установки, обеспечивая надлежащую адгезию и структурную целостность.

Для оценки механических свойств бетона используются стандартные бетонные цилиндры. диаметром 150 мм и высотой 300 мм подвергались испытаниям на прочность на сжатие и раскалывание. В день испытаний среднее значение бетонных балок Измеренные значения прочности на сжатие и растяжение составили 28,0 МПа и 2,70 МПа соответственно. Бетонная смесь, использованная в экспериментах, содержала максимальное количество заполнителей с диаметр 16 мм.

Деформированная стальная арматура (14 мм) имела предел текучести 580 МПа, а мягкая стальные хомуты (8 мм) имели предел текучести 310 МПа.

Измеренная прочность на сжатие и растяжение составила 28,0 МПа и 2,70 МПа соответственно.

Бетонная смесь, использованная в экспериментах, содержала максимальное количество частиц заполнителя диаметром 16 мм.

Деформированная стальная арматура (14 мм) имела предел текучести 580 МПа, а мягкая

стальные хомуты (8 мм) имели предел текучести 310 МПа.

Таблица 1. Механические свойства канатов из C-FRP.

C-FRP.		Механические свойства материала			
Таблица 1. Механические свойства канатов из					
Материал	Веревка C-FRP	Предел прочности (TS)		2100 ГПа	
		Механические свойства		230 ГПа	
Веревка C-FRP	SikaWrap FX-50C	Модуль упругости при растяжении			
SikaWrap FX-50C	(Ламинат)	Предел прочности (TS)		2100 ГПа	
		Удлинение при разрыве напряжения		0,87%	
(Ламинат)	Сикадур 300	Модуль упругости при растяжении		230 ГПа	
		TC		0,87%	
Сикадур 300	Сикадур 330	Модуль упругости при растяжении		45 МПа	
		TC		3,5 ГПа	
Сикадур 330	Сика Анкорфикс 3+	Модуль упругости при растяжении		45 МПа	
		TC		3,5 ГПа	
Сика Анкорфикс 3+		Модуль упругости при растяжении		30 МПа	
		TC		4,5 ГПа	
Сика Анкорфикс 3+		Предел прочности на сжатие		4,5 ГПа	
		Предел прочности на сжатие		114 МПа	

3.3. Испытательная установка

Балка прошла испытания с использованием установки на четырехточечный изгиб, как показано в 3.3.

Испытательная установка

Рис. 2. Гидравлический привод, управляемый машиной с сервоуправлением, приложил градиентное усилие. Балка

увеличила нагрузку (мониторинг усилием в установке) на верхнюю поверхность балки. Через два датчика 2. Гидравлический

равномерно приложенный сервоуправляемой машиной, расположенные на расстоянии 60 мм друг от друга. Балку

поддерживали двумя роликами, увеличивая нагрузку (мониторинг силы) на верхней поверхности балки двумя равными

ролическими ролями, измеряли приложенную силу с предельной точностью: стальные

в дополнение к измерению нагрузки три датчика, в частности с линейной разницей в 0,05 кН, измеряют

приложенную силу с предельной точностью

для измерения отклонения балок использовались датчики LVDT.

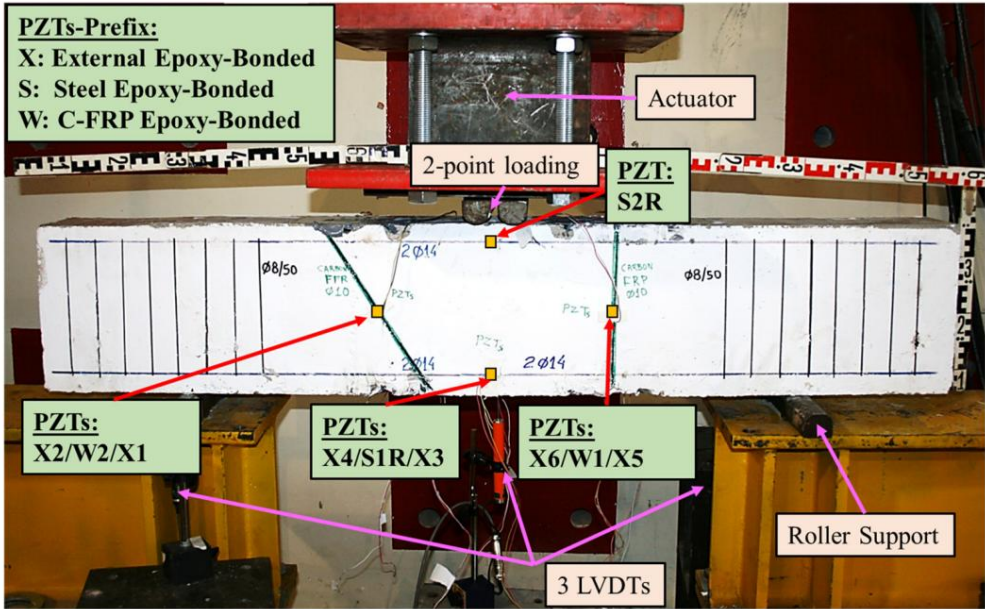


Рисунок 2. Тестовая установка для измерения деформации ЦТ.

Вопределение к измерению нагрузки реализуются (или) датчика, в частности линейной переменной . 3.4.

Технические датчики электромеханического импеданса (ЭМИ)

(LVDT) использовались для измерения отклонений балок.

3.4. Метод электромеханического импеданса (ЭМИ)

В методе электромагнитных помех используются преобразователи PZT, которые используют преимущества пьезоэлектрического явления. При механическом воздействии преобразователи PZT генерируют поверхностный электрический заряд и, наоборот, приложение электрического поля индуцирует механическая вибрация. Таким образом, используя это явление, электромагнитные помехи активируют и вызывают вибрации в связанных или встроенных ЦТС-преобразователях внутри основной конструкции. Любой изменение механического импеданса конструкции (или обратного адмиттанса) отражается в изменения в извлеченном электрическом сигнале из ЦТС (либо по напряжению, либо по частоте).

ответ). Взаимодействие ЦТС с основной структурой представлено в виде

сигнатура адмиттанса, состоящая из действительной части (проводимость) и мнимой части (поддерживающая

механическая вибрация. Таким образом, используя это явление, электромагнитные помехи активируют и вызывают вибрации в связанных или встроенных ЦТС-преобразователях внутри основной конструкции. Любое изменение механического импеданса конструкции (или обратного адмиттанса) отражается в изменениях электрического сигнала, извлекаемого из ЦТС (либо напряжения, либо частотной характеристики).

Прил. Мех. 2024, 5

Взаимодействие между PZT и основной структурой представлено в виде характеристики адмиттанса, состоящей из действительной части (проводимость) и мнимой части (проводимость). Эти взаимодействия проявляют структурные характеристики внутри сигнатуры, как описано уравнением (2) для комплексного пропускания прикреплённой структуры как PZT: восприятие). Эти взаимодействия проявляют структурные характеристики

— описывается уравнением (2) для комплексной проводимости $\bar{Y}$ прикреплённой накладки из ЦТС:

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{\frac{h}{2L} + \frac{Z_{s,eff}}{2L} + \frac{Z_{a,eff}}{2L}} \quad (2)$$
$$\bar{Y} = G + Bj = 4\omega j \left[\frac{2d_{31}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{2d_{31}^2}{\epsilon_{33}} + \frac{Z_{a,eff}}{2L} \right] \quad (2)$$

где : гармоническое переменное напряжение, подаваемое в цепь, : ток, проходящий через PZT, G: проводимость (действительная часть проводимости), B: проводимость (мнимая часть где V: гармоническое переменное напряжение, подаваемое в цепь, I: прохождение тока через проводимость), j: мнимая единица, v: угловая частота, L: половина длины участка, h: толстый PZT, G: проводимость (действительная часть проводимости), B: проводимость (мнимая часть плотность заплата, d31: коэффициент пьезоэлектрической деформации PZT, Za,eff: эффективность короткозамкнутого замыкания), j: мнимая единица, v: угловая частота, L: полудлина заплата, h: толщина тивный механический импеданс, Zs,eff: эффективный структурный импеданс, n: коэффициент Пуассона, k: волна заплата, d31: коэффициент пьезоэлектрической деформации ЦТС, Za,eff: эффективный короткозамкнутый число, связанное с угловой частотой, : комплексный модуль упругости Юнга, немеханический импеданс, Zs,eff: эффективный структурный импеданс, n: коэффициент Пуассона, k: волновой в постоянном электрическом поле, и: комплексная электрическая проницаемость пластины ЦТС вдоль : ось при постоянном напряжении.

Любые изменения в железобетонной балке, такие как изменения ее свойств массы и жесткости, постоянный стресс

неизбежно приведут к изменениям структурных параметров, что, в свою очередь, повлияет на любые изменения в железобетонной балке, такие как изменения ее свойств массы и жесткости. эффективный структурный импеданс. Эти изменения также приведут к изменениям в конструкции, что неизбежно приведет к изменениям в структурных параметрах, что, в свою очередь, повлияет на проводимость, как определено уравнением (2), тем самым указывая на состояние здоровья элемента - эффективный структурный импеданс. Эти изменения также повлекут за собой изменения в

пропускная способность $\bar{Y}$, как определено уравнением (2), тем самым указывая состояние работоспособности элемента.

В этом экспериментальном исследовании выбран подход для обнаружения изменений в установленных

застопорившиеся каналы из C-FRP включали использование преобразователей PZT, возбуждаемых синусоидальной гармоникой. Тросы из C-FRP включали использование преобразователей PZT, возбуждаемых синусоидальной гармоникой.

гармоническое напряжение 2,5 В в определенном диапазоне частот от 10 до 250 кГц, напряжение 2,5 В в определенном диапазоне частот от 10 до 250 кГц, напряжение 2,5 В в

с шагом 1 кГц на шаг PZT, выступая в качестве исполнительных механизмов и в качестве датчиков, изменяется с частотой 1 кГц за шаг преобразователи PZT, служащие и исполнительными механизмами, и датчиками,

преобразователи генерировали сигнал напряжения и захватывали сигнатуры электромагнитных помех, которые затем генерировали сигнал напряжения и записывали сигнатуры электромагнитных помех, которые затем обрабатывались

обрабатываются с помощью специально разработанного беспроводного устройства, известного как WiAMS [40,46]. Это устройство происходит с помощью специально разработанного беспроводного устройства, известного как WiAMS [40,46]. Это устройство

вычисления, оснащены высокой вычислительной мощностью, позволяющей выполнять быстрые и обширные вычисления, и может управляться удаленно, как показано на рисунке 3.

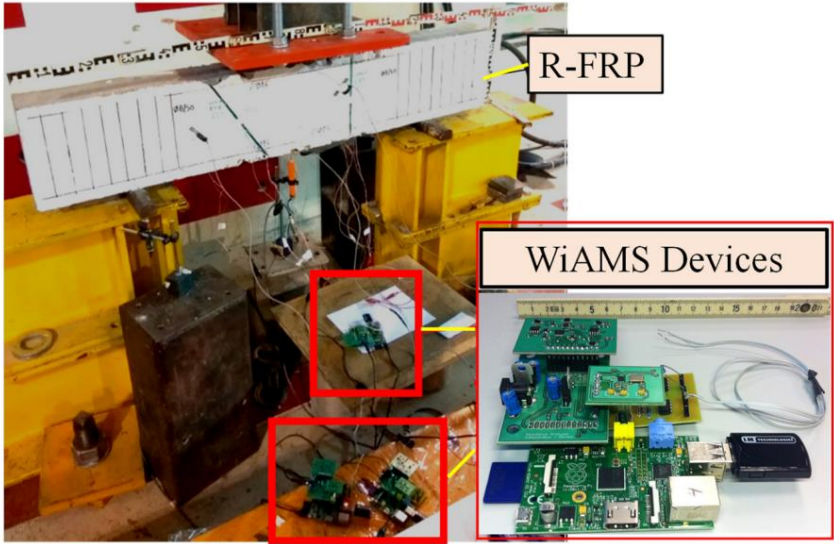


Рисунок 3. Устройство WiAMS для мониторинга методом SHM.

Вначале измерения электромагнитных помех проводились на луче в его первоначальном первозданном виде. штата, устанавливая базовый уровень его заявленного здорового состояния. Впоследствии эти измерения были повторены при различных сценариях потенциального ущерба, моделируя условия это может поставить под угрозу структурную целостность. Полученные результаты затем тщательно по сравнению с оценкой любых отклонений с использованием статистических показателей, особенно среднего значения. Квадратное отклонение (RMSD). Этот сравнительный анализ позволил обнаружить и оценить структурные изменения, предоставив ценную информацию о состоянии балки и ее состоянии. целостность при различных условиях нагрузки. В этом месте примечательно отметить, что

Воздействия повторялись при различных сценариях потенциального повреждения, моделируя условия, которые могли поставить под угрозу структурную целостность. Полученные результаты затем тщательно сравнивались для оценки любых отклонений с использованием статистических показателей, в частности среднеквадратического отклонения (RMSD). Этот сравнительный анализ позволил обнаружить и оценка структурных изменений, предоставляющая ценную информацию о состоянии и целостности балки при различных условиях нагрузки. Здесь следует отметить, что все измерения напряжения проводились в контролируемых лабораторных условиях, чтобы все измерения напряжения проводились в контролируемых лабораторных условиях, чтобы избежать влияния помех из-за колебаний температуры и влажности. помехи из-за колебаний температуры и влажности.

3.5. Установка PZT-патчей 3.5.

Балка R-FRP была оснащена одинаковыми маленькими и тонкими датчиками PZT, каждый из балок R-FRP был оснащен идентичными маленькими и тонкими датчиками PZT, каждый из датчиков размером 10 × 10 × 2 мм. Эти пластиры PZT, получившие обозначение PIC151, были изготовлены размером 10 × 10 × 2 мм. Эти пластиры PZT, получившие обозначение PIC151, были изготовлены от компании PI Ceramics. Компания PI Ceramics стратегически разместила в общей сложности десять ЦТС. В общей сложности десять ЦТС были стратегически расположены на территории балки в различных конфигурациях, как показано на рисунке 2. Шесть ЦТС (три размещены на балке в различных конфигурациях, как показано на рисунке 2). Шесть ЦТС (три размещены спереди и три сзади) были приклеены эпоксидной смолой снаружи к критическим механическим местам, а три сзади) были приклеены эпоксидной смолой снаружи к критическим механическим местам на бетонной поверхности, особенно в местах, подверженных изгибу и диагональному сдвигу бетонной поверхности, особенно в местах, склонных к образованию диагональных трещин при изгибе и сдвиге. трещины, обозначенные как «X1-X6». Два дополнительных ЦТС были прикреплены к стальной арматуре, обозначенной как «X1-X6». Два дополнительных ЦТС были приклеены к стальной арматуре, при этом один расположен в середине натянутого арматурного стержня (S2R), другой - в середине натянутого арматурного стержня (S2R), а другой - в середине изгибаемого арматурного стержня (S1R). середина изгибаемого арматурного стержня (S1R).

Оставшиеся две заплатки PZT были тщательно размещены на веревках из C-FRP в соответствии со следующей процедурой: Заплатки PZT были одновременно вклеены в соответствии со следующей процедурой: Патчи PZT были встроены одновременно с

с веревками, вставленными в каждое просверленное отверстие. Каждая заплатка из ЦТС была надежно прикреплена к веревкам, вставленным в каждое просверленное отверстие. Каждая нашивка PZT была надежно прикреплена к веревке. Вывод: веревку с помощью эпоксидного клея, сварные проволоки были тщательно привязаны к веревке с помощью эпоксидного клея, а сварные проволоки были тщательно привязаны к веревке с помощью компонент шины и стальная проволока для обеспечения окончательного расчетного положения заплатки PZT. Компонент шины и стальная проволока для обеспечения окончательного расчетного положения заплатки PZT внутри дыры. Место привязки было стратегически выбрано таким образом, чтобы заплатка PZT заканчивалась внутри отверстия. Место привязки было выбрано стратегически так, чтобы пластырь ЦТС заканчивался вверху, прикрепленный внутри к просверленному отверстию в середине для быстрой перемещения каната. Верх заплатки привязан к просверленному отверстию в середине для быстрой перемещения каната. Дупло, сделанное из проволоки, служило вспомогательным инструментом для проведения каната, заплатки ЦТС и отверстия, после чего оно было удалено. Эти два заплатки были обозначены как W1 и W2, дыра, после чего она была удалена. Эти два дыры были обозначены как W1 и W2.

соответственно, как показано на рисунке 4.



Рисунок 4. Вставка датчиков PZT в просверленные отверстия, собранных с помощью веревки GFRP

4. Результаты и обсуждение.

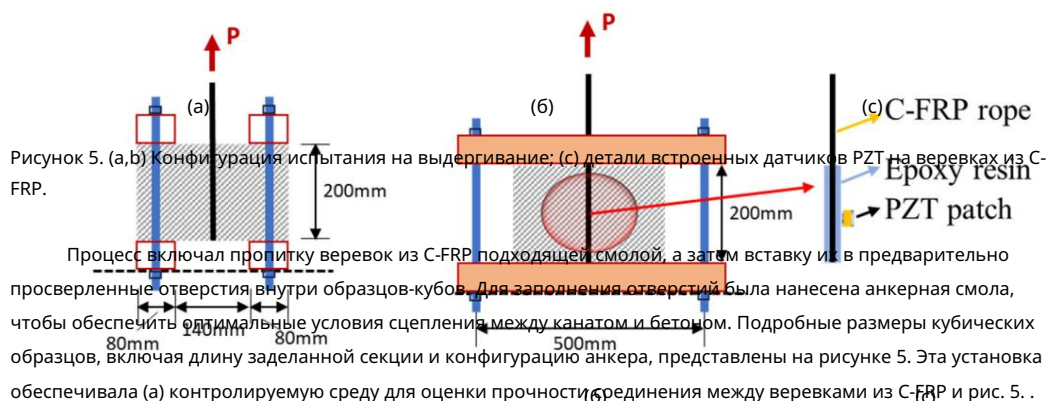
Тест на выдергивание

4.1. Испытание на

отрыв. Чтобы оценить эффективность системы SHM на основе электромагнитных помех при оценке прочности соединения, было проведено испытание на выдергивание с использованием прямой конфигурации для крепления веревок из C-FRP, без выступающего конца. В связи с этим были изготовлены кубические образцы бетона. служат опорой для крепления, как показано на рисунке 5.

Процесс включал пропитку канатов C-FRP подходящей смолой, а затем вставляя их в предварительно просверленные отверстия внутри образцов куба. Закрепляющая смола была применяется для заполнения отверстий, чтобы обеспечить оптимальные условия сцепления между веревкой и веревкой. конкретный. Подробные размеры образцов куба, включая длину заделанного раздел и конфигурация якоря представлены на рисунке 5. Эта установка обеспечила контролируемая среда для оценки прочности соединения между канатами C-FRP и

Чтобы оценить эффективность системы SHM на основе EMI при оценке прочности соединения, было проведено испытание на выдергивание с использованием прямой конфигурации для крепления веревок из C-FRP без каких-либо выступающих концов. В связи с этим кубические образцы бетона служили бетонной подложкой, что способствовало точной оценке эффективности SHM. Изготовлены в качестве опоры для крепления, как показано на рисунке 5, система обнаружения потенциальных дефектов соединения или деградации с течением времени.



(a,b) Конфигурация испытания на выдвигание; (c) детали встроенных датчиков PZT на C-FRP, рисунок 5. (a,b) Конфигурация и способ оценки выдвигания; (c) детали встроенных датчиков PZT на C- бетонное основание, рисунок 6.

Установка прошла испытание на прямое выдергивание с применением монотонной постоянной нагрузки. Итогом испытания является выдергивание ватометром подкладной смолы из зацепов в прощипы. скорость смещения 0,5 мм/мин до достижения разрушения. Во время испытания три лазерных датчика встраивались в предзащитный слой для измерения деформации. Во время разрыва в ватометрической смола располагалась на выступающем конце веревки, тщательно записывал степень свободы, применяемой для зацепов смолы на ватометрической стороне, а также степень свободы смещения между веревкой и расположенным концевое скопление, как показано на рисунке 6а. Кроме того, комплексная система данных координат и скорости движения веревки и смолы, как описано в таблице 1, была использована для измерения соответствующих измерения скопления свободного конца, приложенная нагрузка и Разработанный датчик измерения скопления на свободном конце на рисунке 5. Эта установка обеспечивала контролируемую среду для оценки прочности сцепления между канатами из CFRP и бетонным основанием, что способствовало точной оценке эффективности системы SHM при обнаружении потенциального сцепления. дефекты или деградация с течением времени.

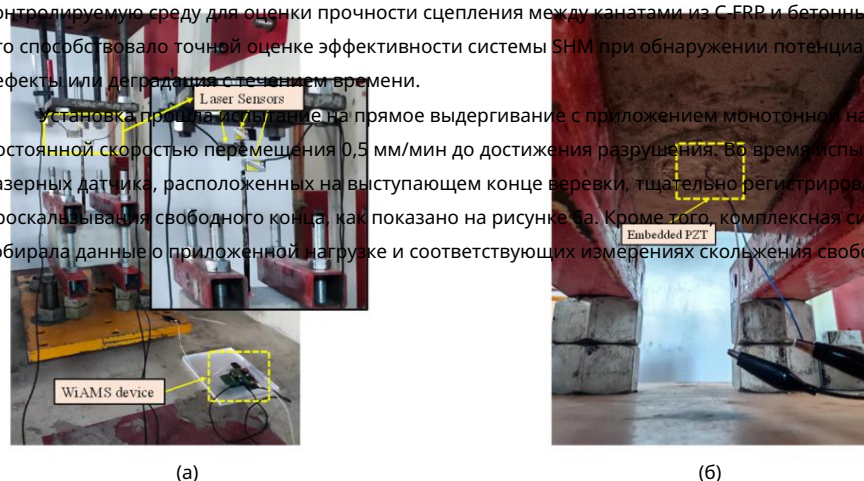


Рисунок 6: (а) конфигурация тестирования извлечения из устройств Wi-Fi; (б) вид вложения в чехле. Рисунок 6: (а) конфигурация тестирования извлечения из устройств Wi-Fi; (б) вид вложения в чехле. Рисунок 6: (а) конфигурация тестирования извлечения из устройств Wi-Fi; (б) вид вложения в чехле.

Кроме того, в рамках выполнения было проведено стратегическое исследование влияния стратегии подкрепления на поведение лапки из ЦТС, как указано на рисунке 17. Задача решалась с помощью роли в мониторинге и регистрации структурной реакции системы крепления, обеспечивая ценная информация о поведении сцепления между канатом из C-FRP и бетонным основанием на протяжении всего теста на выдергивание.

Диаграмма напряжения и частоты, соответствующая тесту на выдергивание, изображена на рис. 6. (а) Конфигурация испытания на выдергивание и устройство WiAMS; (б) вид заделки в перевернутом виде 7. Сплошной черной линией показана реакция веревки из C-FRP в первоначальном состоянии:

разработал датчики PZT для конфигурации канатов из C-FRP.

изображен и помечен как «Здоровый». Далее голубыми и синими сплошными линиями изображены измерения

Кроме того, к веревке внутри была прикреплена стратегически расположенная заплата из ЦТС, обозначенная как «Плотина1» и «Плотина2» соответственно. Более того, в зеленом непрерывном предварительно просверленном отверстии в кубе, как показано на рисунке 6б. Этот патч PZT сыграл решающую роль, измерение напряжения на нисходящей постпиковой стадии изображено и обозначено как «Плотина3». При внимательном рассмотрении диаграммы были обнаружены заметные отклонения в кривые реакции между неповрежденным состоянием и различными уровнями смоделированного повреждения

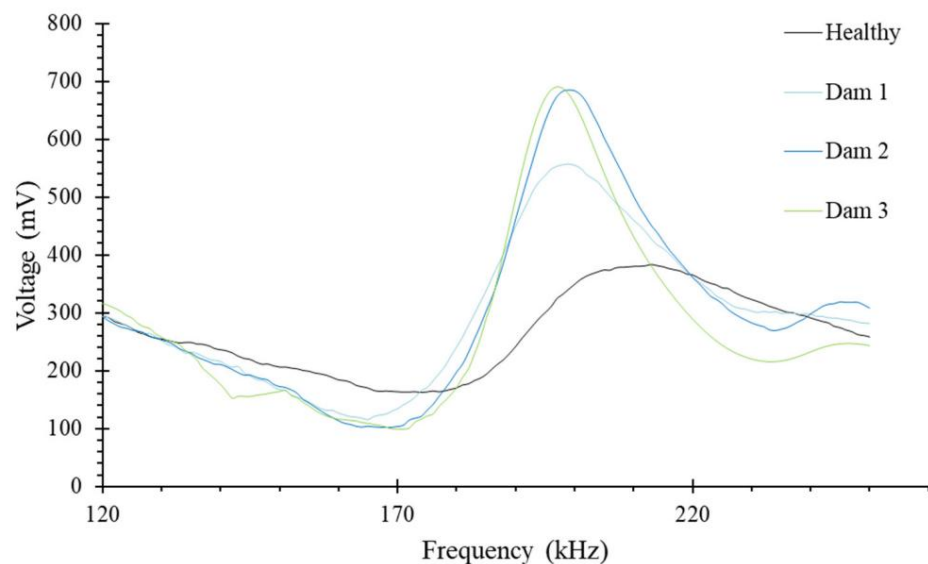
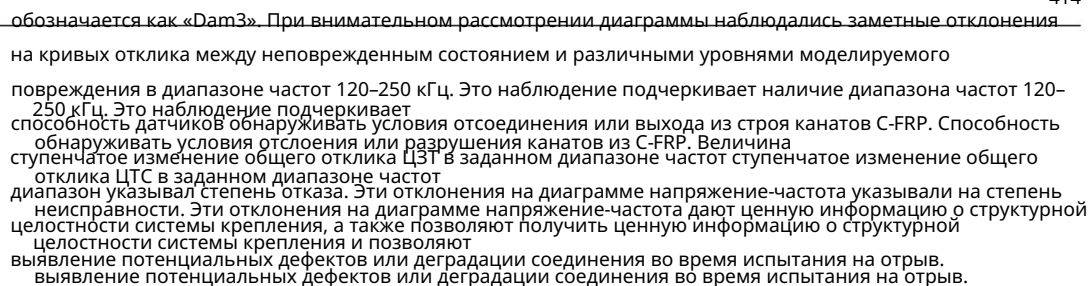


Рисунок 7. Реакция напряжения PZT при испытании на выдергивание веревки из C-FRP.
Рисунок 7. Реакция напряжения PZT при испытании на выдергивание веревки из C-FRP.

4.2. Испытание на глубокую балку

4.2. Испытание на глубокую балку. Комплексные характеристики балки с прямоугольным поперечным сечением, илл. Комплексные характеристики балки с прямоугольным поперечным сечением, ил. Среднеквадратичные, представлены на рис.

Рис. 1. Расчеты по [8]. По подробный анализ общего поведения деформаций и статистический анализ могут найти отражение в следующем исследовании, проведенном Chalioris et al. [27]. Кроме того, характер растрескивания

РЕЦЕНЗИИ на проект доклада, следующего за проведенными баллистическими испытаниями, в том числе в части распределения усилий в элементах конструкции, а также в части оценки влияния на конструкцию различных условий эксплуатации, что дает дополнительную информацию о реакции конструкции при различных условиях нагрузки.

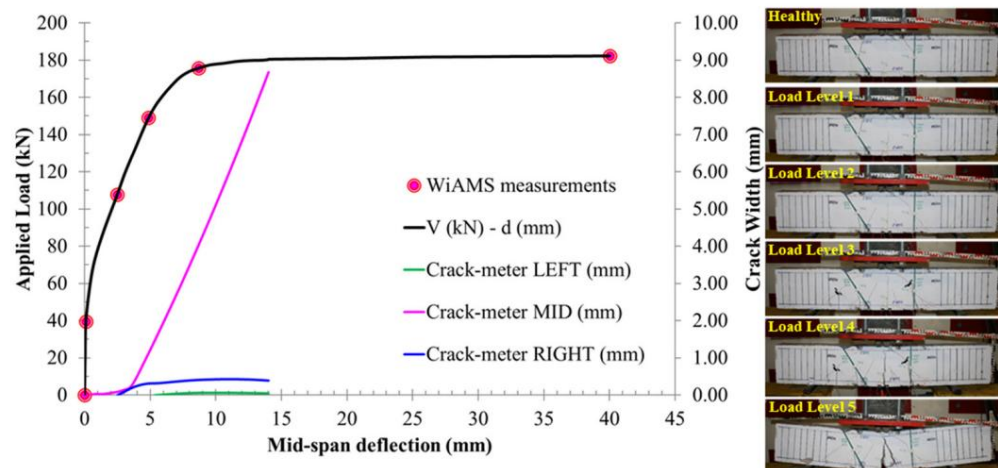


Рисунок 8. Характер растрескивания и экспериментальное поведение образца R-FRP.

4.3: Анализ данных

Использование статистического анализа для определения бурового ЭММ может оказаться полезным для преобразования измерений в интервалы значений, влияющих на темп между соседними скважинами в состоянии и толщину и в скважинах-декарте, и темп скважин. Таким образом, под влиянием скважин, напряжению проанализированы и оценены в этом контексте с использованием статистического индекса RMSD. Выражение индекса представлено ниже в уравнении (3).

были проанализированы и оценены в этом контексте с использованием статистического индекса RMSD. Выражение индекса представлено ниже в уравнении (3).

$$CKO = \frac{\sum_{r=1}^M \frac{Bp(fr)}{Vp(fr)} \cdot d}{\sum_{r=1}^M \frac{Bp(fr)}{Vp(fr)} \cdot d^2}$$

(3)

где $Vp(fr)_0$ относится к отклику напряжения в исходном состоянии, а $Vp(fr)_d$ относится к характеристикам напряжения в любом последующем состоянии.

4.4. Оценка эффективности метода модернизации На основе

результатов, полученных в ходе испытания на выдергивание, и извлеченных значений индекса RMSD при определенных уровнях нагрузки до окончательного разрушения каната из C-FRP (как показано на рисунке 9), оценка остаточного сдвига была предпринята попытка оценить несущую способность. Эта оценка проводилась с использованием гомогенизирующего подхода, который включал корреляцию значений RMSD теста на выдергивание со значениями, полученными при помощи глубокого луча.

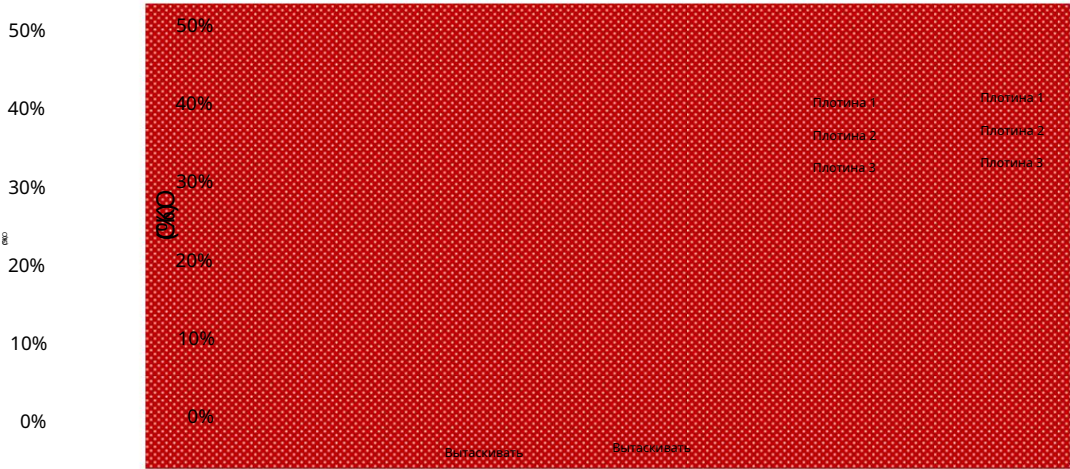


Рисунок 9. Значения RMSD PZT при испытании на выдергивание веревки из C-FRP.

Кроме того, все значения индекса RMSD, полученные при заделке двух связанных PZT-Кроме того, все разрушения на 30 мм. Этот индекс был стандартизирован относительно значений, полученных внутри канатов канатов сквозного сечения, были стандартизированы относительно значений, полученных внутри канатов разрушения при испытании на выдергивание. Этот процесс гомогенизации позволил провести прямое сравнение и наоборот, значения на рисунке 11. Остаточная прочность на сдвиг канатов W1 и W2 соответственно показана на рисунке 11. Вклад прочности каната на сдвиг был рассчитан как 0%. Сохранение окончательного разрушения и полная потеря. Прочность на растяжение в результате испытания на выдергивание были получены ценные сведения об остаточном сдвиге канатов, условиях остаточной прочности и их работе в различных условиях нагрузки. Прочность и их характеристики при различных условиях нагрузки.

Рисунок 10 еще раз подтверждает этот подход.



Рисунок 10. Окончательный вид разрушения веревки из C-FRP.

Кроме того, все значения индекса RMSD, полученные для двух связанных PZT, заделанных в канаты сквозного сечения, были стандартизированы относительно полученных значений. Уровень нагрузки 1 (22% Vmax) по результатам испытания на отрыв. Этот процесс гомогенизации позволил провести прямое сравнение и наоборот, значения на рисунке 11. Остаточная прочность на сдвиг канатов W1 и W2 соответственно показана на рисунке 11. Вклад прочности каната на сдвиг был рассчитан как 0%. Сохранение окончательного разрушения и полная потеря. Прочность на растяжение в результате испытания на выдергивание были получены ценные сведения об остаточном сдвиге канатов, условиях остаточной прочности и их работе в различных условиях нагрузки. Прочность и их характеристики при различных условиях нагрузки.



Рисунок 10. Окончательный вид разрушения веревки из C-FRP.



В отличие от традиционного использования индекса RMSD для выражения уровней повреждения или воздействия нагрузки, в этом исследовании использовались значения индекса 100%-RMSD для отображения остаточного сдвига.

силовой потенциал. Этот новый подход позволил оценить эффективность метода укрепления, продемонстрировав многообещающую сходимость и точность аналитических прогнозов. Этот сравнительный анализ улучшает понимание эффективности метода усиления и предоставляет ценные данные для дальнейшей оптимизации и совершенствования стратегий структурного усиления.

Более того, результаты, полученные с помощью прикладного метода, основанного на электромагнитных помехах, предоставляют значительную возможность служить надежным дополнительным инструментом для диагностики дефектов повреждений и оценки эффективности материалов на основе волокон в сценариях реального времени.

Стоит отметить, что присутствие эпоксидной смолы в просверленных отверстиях может незначительно повлиять на точность экспериментальных результатов, полученных с помощью метода PZT на основе EMI.

Кроме того, хотя это исследование показывает многообещающее соответствие аналитическим прогнозам относительно вклада веревки в прочность на сдвиг, необходимы дополнительные экспериментальные работы для дальнейшей оценки и повышения точности предлагаемой методологии оценки. Целью дальнейших экспериментов является обеспечение устойчивости и надежности этого нового подхода для реальных приложений, тем самым продвигая область методов структурного усиления.

Вклад авторов: концептуализация, NAR, MCN и GMS; методология, НПД и МКН; формальный анализ, НПД и СОБ; расследование, ЦИК, НПД и СГМ; курирование данных, NAR и MCN; письменная форма – подготовка первоначального проекта, НПД и МКС; написание-обзор и редактирование, НПД и ЦИК; визуализация, МЦН; надзор, ЦИК. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: оригинальные материалы, представленные в исследовании, включены в статью, дальнейшие запросы можно направить соответствующему автору/ам.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Чжан Т.; Висинтин П.; Олерс, DJ Прочность на сдвиг железобетонных балок со стальными хомутами. Дж. Структ. англ. 2016, 142, 04015135. [\[CrossRef\]](#) 2.
Зарарис, П.Д. Разрушение при сдвиговом сжатии железобетонных глубоких балок. Дж. Структ. англ. 2003, 129, 544–553. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Годат А.; Л'Хади, А.; Чааллал, О.; Нил, К.В. Поведение связи при использовании метода упрочнения на сдвиг стеклопластиковых стержней ETS. Дж. Компос. Констр. 2012, 16, 529–539. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
4. Азам Р.; Судки, К.; Уэст, Дж.С.; Ноэль, М. Поведение железобетонных балок, критических к сдвигу, усиленных с помощью CFRMC. Дж. Компос. Констр. 2018, 22, 04017046. [\[CrossRef\]](#)
5. Караяннис, К.Г.; Сиркелис, Г.М. Усиление и восстановление соединений железобетонной балки и колонны с использованием оболочки из углеродного стеклопластика и Инъекция эпоксидной смолы. Земляк. Английская структура. Дин. 2008, 37, 769–790. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
6. Караяннис, К.Г.; Наум, МС Крутильное поведение многоэтажных железобетонных каркасных конструкций вследствие асимметричного сейсмического взаимодействия. англ. Структура. 2018, 163, 93–111. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
7. Цонос А.Г. Эффективность углепластиковых оболочек при реконструкции балочно-колонн после землетрясения и перед землетрясением. Структура. англ. Мех. 2007, 27, 393–408. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
8. Лампропулос, А.П.; Дритсос, С.Э. Моделирование железобетонных колонн, усиленных железобетонными оболочками. Earthq Engng Struct Dyn 2011, 40, 1689–1705. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Ма, К.-К.; Апанди, Нью-Мексико; Софри, CSY; Нг, Дж. Х.; Ло, WH; Аванг, Аризона; Омар, В. Ремонт и восстановление бетонных конструкций с использованием изоляции: обзор. Констр. Строить. Матер. 2017, 133, 502–515. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
10. Азам Р.; Судки, К.; Уэст, Дж.С.; Ноэль, М. Усиление железобетонных балок, критических к сдвигу: альтернатива листам из углепластика, соединенным снаружи. Констр. Строить. Матер. 2017, 151, 494–503. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
11. Феррейра, Д.; Оллер, Э.; Мари, А.; Байран, Дж. Численный анализ железобетонных балок, критических при сдвиге, усиленных при сдвиге листами FRP. Дж. Компос. Констр. 2013, 17, 04013016. [\[CrossRef\]](#)
12. Баджо, Д.; Судки, К.; Ноэль, М. Укрепление железобетонных балок, критических к сдвигу, с помощью различных систем FRP. Констр. Строить. Матер. 2014, 66, 634–644. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
13. Агилар, В. Прочность бетонных элементов на сдвиг: проблемы, последние события и возможности. Адв. Гражданский. англ. Технол. 2020, 4, 1–2. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
14. Истик, Э.; Улуташ, Х.; Харирчян Э.; Авсил, Ф.; Аксойлу, Ч.; Арслан М.Х. Функциональная оценка железобетонных зданий с короткими колоннами в связи с различными принципами проектирования. Здания 2023, 13, 750. [\[CrossRef\]](#)

15. Пан З.; Ли, Б. Оценка методологий расчета прочности на сдвиг тонких железобетонных балок, критических по сдвигу. Дж. Структ. англ. 2013, 139, 619–622. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
16. Пападопулос, Н.А.; Наум, МС; Сапидис, генеральный директор; Чалиорис, СЕ. Растрескивание и отслоение волокон. Идентификация бетонных глубоких балок, армированных канатами из C-FRP, против сдвига с использованием системы мониторинга в реальном времени. Полимеры 2023, 15, 473. [\[CrossRef\]](#)
17. Билотта А.; Черони, Ф.; Ди Людовико, М.; Нигро, Э.; Печче, М.; Манфреди, Г. Бонд. Эффективность систем EBR и NSM FRP для усиления бетонных элементов. Дж. Компос. Констр. 2011, 15, 757–772. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
18. Со, С.-Ю.; Фео, Л.; Хуэй, Д. Прочность сцепления стеклопластиковых плит, монтируемых вблизи поверхности, для модернизации бетонных конструкций. Композиции. Структура. 2013, 95, 719–727. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
19. Бревельери, М.; Априле, А.; Баррос, JAO: Метод усиления поперечного сдвига на сдвиг с использованием стальных и углепластиковых стержней в железобетонных балках с разным процентом существующих хомутов. Композиции. Структура. 2015, 126, 101–113. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
20. Ли, П.; Ван, Х.; Не, Д.; Ван, Д.; Ван, К. Метод анализа долговременной долговечности подземных железобетонных водопропускных сооружений при совокупных механических и экологических нагрузках. Дж. Интелл. Констр. 2023, 1, 9180011. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
21. Саид, М.; Адам, Массачусетс; Махмуд, А.А.; Шанур А.С. Экспериментальная и аналитическая оценка сдвига бетонных балок, армированных стержнями из полимеров, армированных стекловолокном. Констр. Строить. Матер. 2016, 102, 574–591. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
22. Наум, М.; Сапидис, Г.; Пападопулос, Н.; Голиас, Э.; Чалиорис, К. Мониторинг состояния конструкций железобетонных соединений балки и колонны с использованием пьезоэлектрических преобразователей. В материалах Международной конференции RILEM по синергии опыта в области устойчивого развития и надежности материалов на основе цемента и бетонных конструкций, Милос, Греция, 14–16 июня 2023 г.; Енджеевска А., Канаварис Ф., Азенья М., Бенбудема Ф., Шликке Д., ред.; Книжная серия RILEM. Springer Nature: Чам, Швейцария, 2023 г.; Том 43, стр. 945–956. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
23. Тернер, Л.; Дэвис, В.К. Обычный и железобетон при кручении, с особым упором на железобетонные балки. Сел. англ. Пап. 1934, 1, 165. [\[CrossRef\]](#)
24. Халиорис, СЕ; Пападопулос, Н.А.; Сапидис, Г.; Наум, МС; Голиас, Э. Метод мониторинга усиленных соединений балок и колонн на основе ЭМА. В материалах Международной конференции ISCRAM, Омаха, Невада, США, 28–31 мая 2023 г.; стр. 853–873. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
25. Алам, П.; Мамалис, Д.; Роберт, К.; Флореани, К.; Брэдэй, директор по маркетингу. Усталость пластиков, армированных углеродным волокном — обзор. Композиции. Часть Б, англ. 2019, 166, 555–579. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
26. Чжу, Х.; Абз, Х.; Хаяши, Д.; Танака, Х. Поведенческие характеристики железобетонных балок с неоднородной коррозией по длине армирование. Дж. Интелл. Констр. 2023, 1, 9180019. [\[CrossRef\]](#)
27. Халиорис, К.; Космиду, П.-М.; Пападопулос, Н. Исследование нового метода усиления железобетонных балок глубокого действия с использованием Веврки из углеродного стеклопластика в качестве поперечного усиления. Волокна 2018, 6, 52. [\[CrossRef\]](#)
28. Базли, М.; Абольфазли, М. Механические свойства армированных волокном полимеров при повышенных температурах: обзор. Полимеры 2020, 12, 2600. [\[CrossRef\]](#)
29. Китинов В.К.; Грибняк В.; Заприс, АГ; Чалиорис, СЕ. Инновационный подход к мониторингу состояния здоровья при диагностике отслоения армированных волокном полимеров посредством испытаний на растяжение и сдвиг. Аналитические и экспериментальные методы в машиностроении и гражданском строительстве; Спрингер: Чам, Швейцария, 2024 г.; Том 28, стр. 228–239. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
30. Джу, С.; Ли, Д.; Цзя, Дж. Экспериментальное исследование и оценка повреждений нового типа крепления для углеродного волокна. Армированные полимерные сухожилия. Дж. Сив. Структура. Монит здоровья. 2023, 13, 117–132. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
31. Эль-Сиси, А.А.; Эль-Эмам, Ее Величество; Эль-Холи, АЕ-МИ; Ахмад, СС; Саллам, НМ; Салим, Х.А. Структурное поведение железобетонных балок, содержащих неармированные просверленные отверстия с усилением из углепластика и без него. Полимеры 2022, 14, 2034. [\[CrossRef\]](#)
32. Базна, М.; Джахани, Ю.; Торрес, Л.; Баррис, К.; Перера, Р. Прогнозирование характеристик изгиба и разрыва соединений на концах железобетонных балок, усиленных углеродным FRP, NSM при различных температурах эксплуатации. Полимеры 2023, 15, 851. [\[CrossRef\]](#)
33. Перера, Р.; Гил, А.; Торрес, Л.; Баррис, К. Диагностика армирования NSM FRP в бетоне с использованием моделей смешанных эффектов и Подходы EMI. Композиции. Структура. 2021, 273, 114322. [\[CrossRef\]](#)
34. Пеллоне, Л.; Чиминелло, М.; Меркурио, У.; Апулео, Г.; Консилио, А. Система мониторинга состояния конструкции для обнаружения дефектов соединительной линии на полномасштабном демонстрационном стенде секции крыла. Прил. Мех. 2024, 5, 36–57. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
35. Ай, Д.; Мо, Ф.; Ян, Ф.; Чжу, Х. Обнаружение повреждений бетонных конструкций на основе электромеханического импеданса с использованием анализа главных компонентов в сочетании с нейронной сетью. Дж. Интелл. Матер. Сист. Структура. 2022, 33, 2241–2256. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
36. Ай, Д.; Чжан, Д.; Чжу, Х. Локализация повреждений на конструкции железобетонной плиты с использованием метода электромеханического импеданса и алгоритма вероятностно-взвешенной визуализации. Констр. Строить. Матер. 2024, 424, 135824. [\[CrossRef\]](#)
37. Сапидис, Г.М.; Кансизоглу, И.; Наум, МС; Пападопулос, Н.А.; Чалиорис, СЕ. Подход глубокого обучения для автономной идентификации повреждений при сжатии в фибробетоне с использованием пьезоэлектрических датчиков цирконата и титаната свинца. Датчики 2024, 24, 386. [\[CrossRef\]](#)
38. Ван, З.; Чен, Д.; Чжэн, Л.; Хо, Л.; Сонг, Г. Влияние осевой нагрузки на электромеханический импеданс (ЭМП) встроенных устройств. Пьезокерамические преобразователи в сталефибробетоне. Датчики 2018, 18, 1782. [\[CrossRef\]](#)
39. Наум, МС; Пападопулос, Н.А.; Вуетаки, Мэн; Чалиорис, СЕ. Мониторинг состояния конструкций фибробетонных призм с полиолефиновыми макроволоконками с использованием сети пьезоэлектрических материалов в условиях различных напряжений, вызванных нагрузкой. Здания 2023, 13, 2465. [\[CrossRef\]](#)

40. Наум, МС; Сапидис, генеральный директор; Пападопулос, Н.А.; Воутетаки, М.Э. Применение электромеханического импеданса для мониторинга в реальном времени изгибных напряжений и повреждений, вызванных нагрузкой, в фибробетоне. Волокна 2023, 11, 34.

[\[Перекрестная ссылка\]](#)

41. Хатир А.; Капусукка, Р.; Хатир, С.; Маганьини, Э.; Бенаисса, Б.; Куонг-Ле, Т. Эффективное улучшенное повышение градиента деформации прогноз в усиленной железобетонной балке NSM FRP. Передний. Структура. Гражданский. англ. 2024, в печати.

42. Редди, ПН; Кавятея, Б.В.; Джиндал, Б.Б. Методы мониторинга состояния конструкций, дисперсия волокон, микро- и макроструктурные свойства, измерения и механические свойства самочувствительного бетона — обзор. Структура. Конкр. 2021, 22, 793–805. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

43. Перера, Р.; Уэрта, МС; Баэна, М.; Баррис, К. Анализ железобетонных балок, усиленных стеклопластиком, с использованием метода электромеханического импеданса и системы корреляции цифровых изображений. Датчики 2023, 23, 8933. [\[CrossRef\]](#)

44. Ли, Д.; Чжоу, Дж.; Оу, Дж. Повреждения, неразрушающая оценка и восстановление конструкции из стеклопластика и железобетона: обзор. Констр. Строить. Матер. 2021, 271, 121551. [\[CrossRef\]](#)

45. Хатир А.; Капусукка, Р.; Хатир, С.; Маганьини, Э.; Бенаисса, Б.; Ле Тхань, К.; Вахаб, Массачусетс Новый гибрид ПСО-ЮКИ для двойни идентификация трещин в консольной балке из углепластика. Композиции. Структура. 2023, 311, 116803. [\[CrossRef\]](#)

46. Провидакис, К.; Цистракис, С.; Воутетаки, М.; Цомпанакис, Дж.; Ставрулаки, М.; Агадакос, Дж.; Кампианакис, Э.; Пентес, Г.; Лиаракос, Э. Инновационная активная сенсорная платформа для беспроводного мониторинга повреждений бетонных конструкций. Курс. Умный Мэтр. 2016, 1, 49–62. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

47. Мофиди, А.; Чааллал, О.; Бенмокрейн, Б.; Нил, К. Экспериментальные испытания и модель расчета железобетонных балок, усиленных на сдвиг. Использование метода встроенного сквозного FRP. Дж. Компос. Констр. 2012, 16, 540–550. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

48. ACI (Американский институт бетона). Руководство по проектированию и строительству систем FRP с внешним соединением для укрепления бетона Структуры; АЦИ-440.2Р-08; Американский институт бетона (ACI): Фармингтон-Хиллз, Мичиган, США, 2008 г.; п. 76.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и соавторам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.