

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.9
EDN: GWZWHI



Исследование сцепления арматуры периодического профиля с бетоном в условиях действующего объекта

Илшат Т. Мирсаяпов¹, Е.В. Хорьков¹, Р.И. Минзянов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: Строительство современных, надежных и эффективных гражданских зданий осуществляется преимущественно из монолитного железобетона прямо на строительной площадке. Характер работы монолитных железобетонных конструктивных систем представляет собой, как правило, многократно статически неизменяемые системы. Расчет статически неизменяемых систем в значительной степени зависит от приложенных к системе нагрузок, определенных на стадии проектирования. Но со временем нагрузки на перекрытие, физико-механические свойства бетона и арматуры, а также характеристики их сцепления могут меняться. Цель работы заключается в определении сцепления арматуры периодического профиля с бетоном на реальном объекте при изменении эксплуатационных нагрузок. В ходе работы решаются следующие задачи: проведение эксперимента на существующей конструкции, анализ напряженно-деформированного состояния арматуры и бетона под изменяющейся нагрузкой, выявление наиболее опасных предельных факторов (разрушений и деформаций), влияющих на такие конструкции. Объектом исследования была выбрана монолитная железобетонная безбалочная плита перекрытия в эксплуатируемом здании, каркасу которого на момент проведения эксперимента было 8 лет.

Результаты. Системы контроля за экспериментом (датчики и прогибомеры) показали соответствие экспериментальных данных теоретическим моделям работы железобетонных конструкций. Были выявлены особенности перераспределения усилий в пролетных и опорных зонах плиты, что связано с текучестью арматуры в пролетной зоне. Постоянное перемещение кратковременных нагрузок (особенно характерное для торгово-развлекательных комплексов) оказывает значительное влияние на работу статически неопределимых железобетонных систем. При определенных условиях или сочетаниях кратковременных нагрузок, а также при их перемещении, может произойти мгновенное высвобождение энергии материала, что приведёт к образованию новых поверхностей в виде трещин и увеличению прогибов вследствие снижения жесткости отдельных элементов конструкции.

Выводы. Проведено экспериментальное нагружение существующей плиты перекрытия полосовой нагрузкой. Установлено, что кратковременные смещающие нагрузки представляют наибольшую опасность для плоских железобетонных плит перекрытий. С научной точки зрения требуется детальный анализ процессов, происходящих в зоне взаимодействия «бетон-арматура». С практической точки зрения, инженерам-конструкторам следует уделять особое внимание при проектировании железобетонных безбалочных перекрытий.

Ключевые слова: сцепление арматуры с бетоном, железобетонная плита, трещинообразование, физический эксперимент, арматура периодического профиля, натурный эксперимент, безбалочные плиты

Для цитирования: Мирсаяпов Ильшат Т., Хорьков Е.В., Минзянов Р.И. Исследование сцепления арматуры периодического профиля с бетоном в условиях действующего объекта // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 95-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.9, EDN: GWZWHI

Study of the bond of periodic profile reinforcement to concrete in the conditions of an operating facility

Ishat T. Mirsayapov¹, E.V. Khorkov¹, R.I. Minzyanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: Modern, reliable and efficient civil buildings are constructed mainly from monolithic reinforced concrete directly at the construction site. The nature of the work of monolithic reinforced concrete structural systems is, as a rule, repeatedly statically unchangeable systems. The calculation of statically unchangeable systems largely depends on the loads applied to the system, determined at the design stage. But over time, the loads on the floor, physical and mechanical properties of concrete and reinforcement, as well as the characteristics of their bond can change. The purpose of this work is to determine the bond of periodic profile reinforcement to concrete at a real facility with changing operational loads. The following tasks are solved in the course of the work: conducting an experiment on an existing structure, analyzing the stress-strain state of reinforcement and concrete under a changing load, identifying the most dangerous limiting factors (destruction and deformation) affecting such structures. The object of the study was a monolithic reinforced concrete beamless floor slab in an operated building, the frame of which was 8 years old at the time of the experiment.

Results. Experimental control systems (sensors and deflection meters) confirmed the alignment between the experimental data and the theoretical behavior of reinforced concrete structures. Features of the redistribution of forces in the span and support zones of the slab were identified, which is associated with the yield of the reinforcement in the span zone. The continuous application of short-term loads, which is especially prevalent in shopping and entertainment complexes, significantly affects the behavior of statically indeterminate reinforced concrete systems. In certain situations, such as specific combinations of short-term loads or their movement, a sudden release of surface energy may take place, resulting in the formation of new surfaces in the form of cracks. This also leads to increased deflections due to a decrease in stiffness in certain parts of the structure.

Conclusions. An experimental loading of the existing floor slab was performed using a strip load. The results showed that short-term displacement loads present the highest risk to flat reinforced concrete floor slabs. Scientifically, it is crucial to examine the processes taking place in the “concrete-reinforcement” interaction zone. Practically, design engineers must pay increased attention to the design of reinforced concrete beamless floors.

Keywords: reinforcement-concrete bond, reinforced concrete slab, cracking, physical experiment, reinforcement of a periodic profile, full-scale experiment, beamless slabs

For citation: Mirsayapov Ishat T., Khorkov E.V., Minzyanov R.I. Study of the bond of periodic profile reinforcement to concrete in the conditions of an operating facility // News of KSUAE, 2024, № 4(70), p. 95-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.9, EDN: GWZWHI

1. Введение

Строительство зданий и сооружений из монолитного железобетона является преобладающим методом возведения конструкций в современных условиях. Основным преимуществом этого способа является возможность создания практически любых геометрических форм будущего строения. Соединения несущих элементов здания (колонн, балок, плит перекрытий) обеспечивают жесткие связи, что делает расчетную схему многократно статически неопределимой. В частности, плоская монолитная железобетонная плита перекрытия представляет собой статически неопределимую систему с жесткими узлами на опорах.

Со временем величина нагрузки на перекрытие, физико-механические характеристики бетона и арматуры, а также сцепление арматуры с бетоном могут

изменяться. Для обеспечения безопасной эксплуатации конструкции необходим постоянный мониторинг ее технического состояния.

Для сбора данных о состоянии плит перекрытия применяются как разрушающие, так и неразрушающие методы контроля, с последующим проведением поверочного расчета. Существует множество исследований, посвященных исследованию эксплуатируемых железобетонных плоских перекрытий с различными дефектами.

В исследовании [1] описаны методы визуального контроля состояния железобетонных конструкций с использованием компьютерных технологий. Для этого была разработана программа на основе машинного обучения для оценки повреждений по виду и узору трещин, данные которой точно совпадали с результатами компьютерных расчетов.

В работе [2] рассмотрена оценка повреждений железобетонных конструкций с помощью ультразвукового метода. Испытания проводились на образцах, армированных в двух направлениях. На поверхности плиты установили источники и приемники ультразвуковых волн, и в процессе нагружения снимались данные о передаче сигналов, что позволило выявить искажения, вызванные появлением трещин.

Подобные исследования были проведены в [3], где применялась комбинация различных неразрушающих методов для создания карт повреждений железобетонных плит.

Многие дефекты железобетонных плит перекрытий связаны с нарушениями, возникающими при строительных и монтажных работах. Например, неизбежно образование строительных швов, которые часто не учитываются в расчетах. В работе [4] указаны критические размеры строительных швов, которые могут нарушить нормальную работу конструкции.

Проемы в плитах перекрытий также могут не учитываться проектом. В исследовании [5] изучено влияние таких проемов на несущую способность плит, и приведены зависимости их размеров и формы от способности конструкции выдерживать нагрузки.

Ключевым аспектом работы железобетонных конструкций является сцепление арматуры с бетоном, что обеспечивает их прочность. Оценивалось влияние продольной и поперечной арматуры на характеристики продавливания плит. Анализ показал, что уменьшение шага поперечных стержней значительно увеличивает несущую способность плиты.

Нарушения работы плит могут также возникать из-за преждевременной их нагрузки, например, при слишком раннем снятии опалубки. В работе [6] исследовалось влияние преждевременного нагружения на прочность плит перекрытия.

В случаях, когда визуальные признаки не позволяют определить несущую способность плит, используется метод статической нагрузки для оценки их состояния. Этот подход был использован в исследовании [7], где нагружение плиты песком выявило конструкции, непригодные для дальнейшей эксплуатации.

Также в работах [8-9] рассматривалось влияние трещин на несущую способность плит перекрытия.

Важным этапом обследования плоских перекрытий является поверочный расчет. Поскольку монолитные железобетонные плиты являются статически неопределимыми системами, их расчет представляет сложность. Теоретически такие конструкции рассматриваются как упругие системы, однако в реальных условиях железобетон проявляет неупругие деформации, что может существенно изменить распределение усилий в конструкции.

Исследования показали, что по мере увеличения нагрузки в железобетонных конструкциях возникают трещины, ползучесть арматуры и другие неупругие изменения, влияющие на их работу. Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных плит зависит от арматуры и характеристик бетона.

Факторы, которые оказывают влияние на прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонной плиты перекрытия, включают:

- продольную рабочую арматуру — она воспринимает основную нагрузку и определяет общую прочность конструкции;

- поперечную арматуру в зоне продавливания — она предотвращает локальные разрушения в местах концентрации нагрузки, таких как опорные зоны;
- бетон в сжатой и растянутой зонах — сжатая зона отвечает за восприятие давящих нагрузок, а растянутая зона подвержена трещинообразованию.

Подходы к расчету железобетонных плит со временем совершенствовались, и различные ученые предложили методы, учитывающие как упругие, так и неупругие деформации. Например, современные методы расчета учитывают влияние ползучести бетона, образование трещин и текучесть арматуры, что позволяет более точно моделировать поведение железобетонных конструкций под нагрузкой. Это особенно важно для статически неопределимых систем.

Работа [10] предлагает интегрированный подход для расчета железобетонных плит, а исследование [11] – аналитические методы анализа работы плит как мембранных конструкций. В численном эксперименте [12] применялся пластинчатый элемент на основе вычислительных континуумов, что позволяет учитывать поврежденность плит и наличие преднапряженной арматуры.

Исследование [13] изучало выносливость арматуры в железобетонных элементах при многократных нагрузках, предложив уравнения для расчетов в таких условиях.

Исследование контакта бетон-арматура является важным аспектом при изучении стыков в монолитных и сборных конструкциях, что подробно рассматривается в работах [14-16].

В последние годы активно развиваются подходы к определению сопротивления сдвигу для железобетонных плит и балок перекрытий. В одном из исследований, представленных учеными в [17], была предложена новая модель, которая обеспечивает экономию арматуры и бетона, а также увеличивает запас прочности конструкций. Подобные исследования также проводились другими авторами в [18-19], где разрабатывались новые подходы к расчету плит на сдвиг и усилению строительных конструкций. При этом проводились сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными, что позволяет лучше понять реальное поведение конструкций.

На сегодняшний день по-прежнему существует заблуждение о характере работы статически неопределимых систем в железобетонном исполнении. Внутренние усилия действительно перераспределяются в таких системах, однако процесс этот начинается задолго до наступления текучести арматуры, а именно: с началом образования первых трещин на поверхности контакта «бетон-арматура».

Для плоских железобетонных плит перекрытия процесс перераспределения усилий играет решающее значение. Образование трещин приводит к разделению плиты на отдельные (шарнирно соединенные) звенья, и работе всей системы как геометрически изменяемой. Трещины на поверхности являются следствием развития внутренних трещин, а это означает, что сцепление арматуры с бетоном, характер развития трещин является основным направлением фундаментального исследования железобетонных конструкций.

Цель настоящей работы — исследование сцепления арматуры периодического профиля с бетоном в условиях действующего объекта. В рамках работы решаются следующие задачи:

- Обзор исследований по данной теме для определения современных подходов и методов.
- Проведение физического эксперимента существующей конструкции, чтобы получить данные о поведении арматуры в бетоне под воздействием нагрузки.
- Анализ полученных результатов, который позволит выявить наиболее опасные воздействия и факторы, влияющие на работоспособность железобетонных конструкций.

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана железобетонная монолитная безбалочная плита перекрытия существующего здания. Перед началом работ был изучен проект каркаса и проверено соответствие его с проектом. На момент проведения

исследования железобетонному каркасу было 8 лет. Также перед испытанием плиты был проведен визуальный осмотр на выявление существующих трещин.

Плита перекрытия имеет размеры в плане 17180*29510 мм. Толщина плиты составляет 200мм.

Нагружение плиты производилось этапами, всего 15. В качестве нагрузки на плиту использовались резервуары с водой. Время между этапами нагружения составляло 30 минут. В начале испытания резервуары были пустые и по мере нагружения они заполнялись водой.

При каждом нагружении определялся расчетный изгибающий момент в двух плоскостях M_x (вдоль цифровых осей) и M_y (вдоль буквенных осей), в центре пролета и на опоре в программном комплексе LIRA SAPR.

После приложения последнего 15 этапа нагрузки, нагрузка оставалась на плите в течении 45 дней. Контрольные показания прогибов и трещин снимались каждые 7 дней.

Для определения относительных деформаций в пролетной и опорной зоне плиты были установлены тензорезисторы. Места расположения тензорезисторов отмечены на рис.1. Тензорезисторы установленные на бетон и на арматуру имели разные размерные базы равные 50мм и 20мм соответственно.

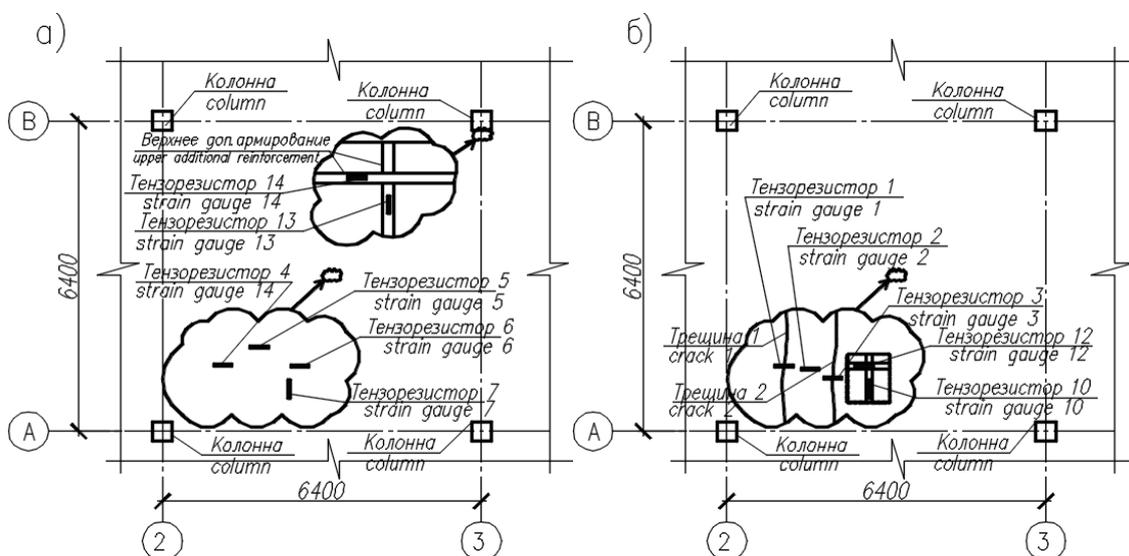


Рис. 1. Места расположения тензорезисторов на плите перекрытия. а – вид сверху, б – вид снизу (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Locations of strain gauges on the floor slab. a – top view, b – bottom view (illustration by the authors)

В пролетной зоне также контролировались трещины №1 и №2 (рис. 1). Перед нагружением трещина №1 имела ширину раскрытия 0.1мм, трещина №2 имела ширину раскрытия 0.05мм. На каждом этапе нагружения ширина раскрытия трещин замерялась с помощью микроскопа.

Для определения вертикальных деформаций в плите использовались индикаторы. Индикаторы были установлены на перекрытии нижнего этажа, на которое во время эксперимента не оказывалось влияния. Для передачи перемещений от плиты на индикаторы к плите были подвешены груза с помощью стальных тросов. При таком методе измерения перемещений для соблюдения точности все время эксперимента в помещении контролировалась температура воздуха.

3. Результаты и обсуждение

В результате физического эксперимента авторы получили ряд графиков и зависимостей.

Поскольку загрузка выполнялась поэтапно, постепенно увеличивая нагрузку на участки плиты от опор к пролету, изгибающий момент в плите, который является ключевым фактором исследования, может изменяться нелинейно.

Построены графики (рис. 2, 3) зависимости относительных деформаций в нижней зоне плиты на бетоне (тензорезисторы №1, 2, 3) и на арматуре (тензорезисторы №10, 12).

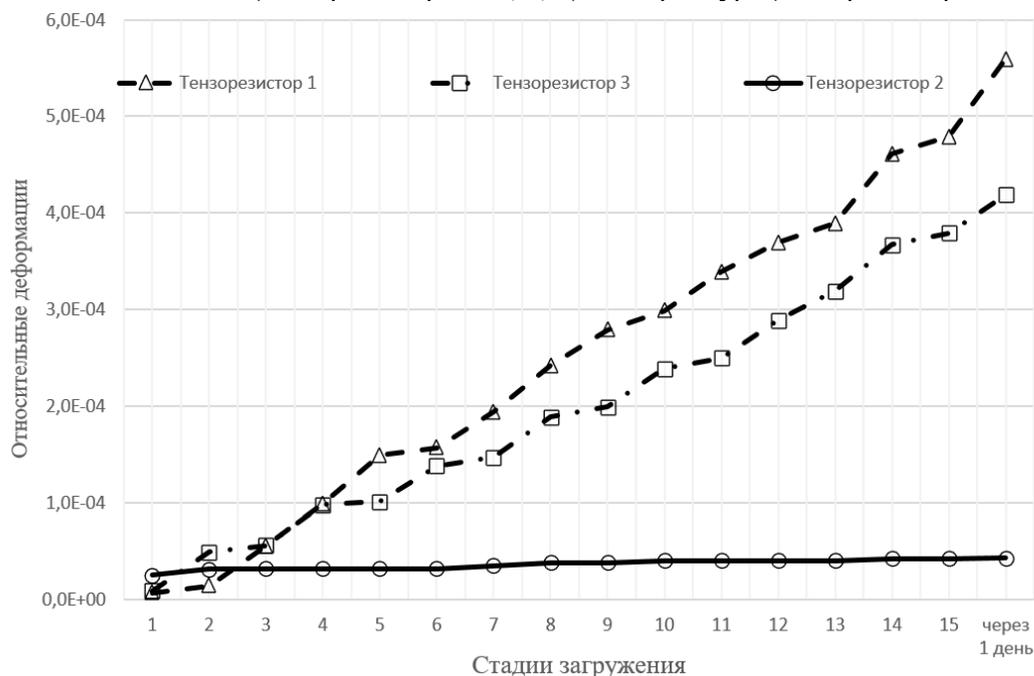


Рис. 2. График изменения относительных деформаций в нижней зоне плиты в пролете (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Graph of changes in relative deformations in the lower zone of the slab in the span (illustration by the authors)

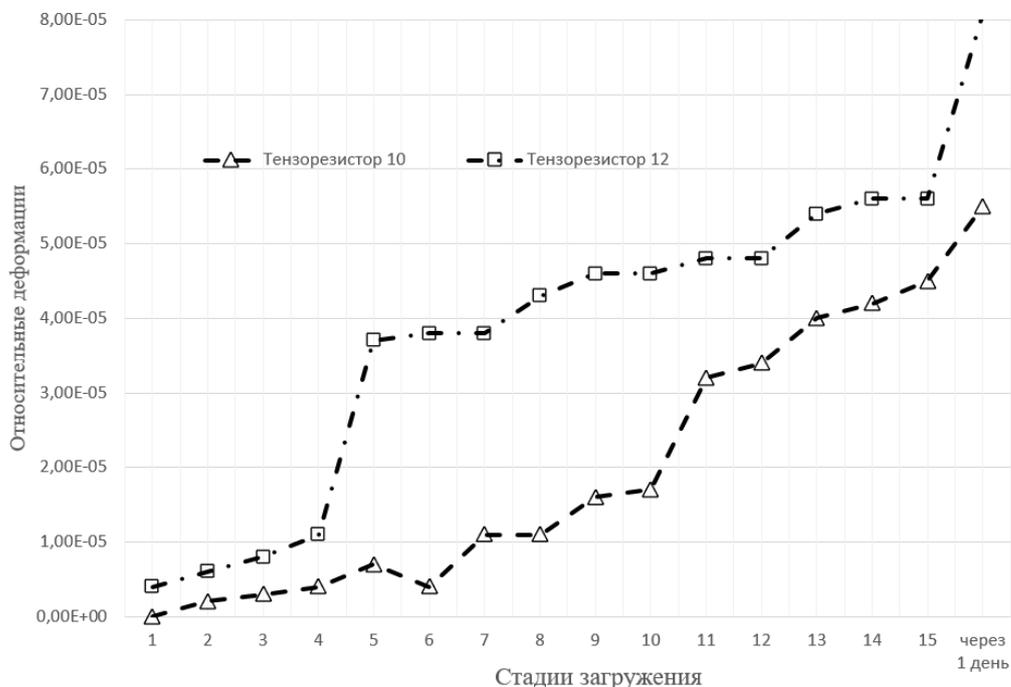


Рис. 3. График изменения относительных деформаций растянутой арматуры в нижней зоне плиты в пролете (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Graph of changes in the relative deformations of tensile reinforcement in the lower zone of the slab in the span (illustration by the authors)

Построен график (рис.4) зависимости относительных деформаций в верхней зоне плиты на бетоне (тензорезисторы №4, 5, 6, 7).

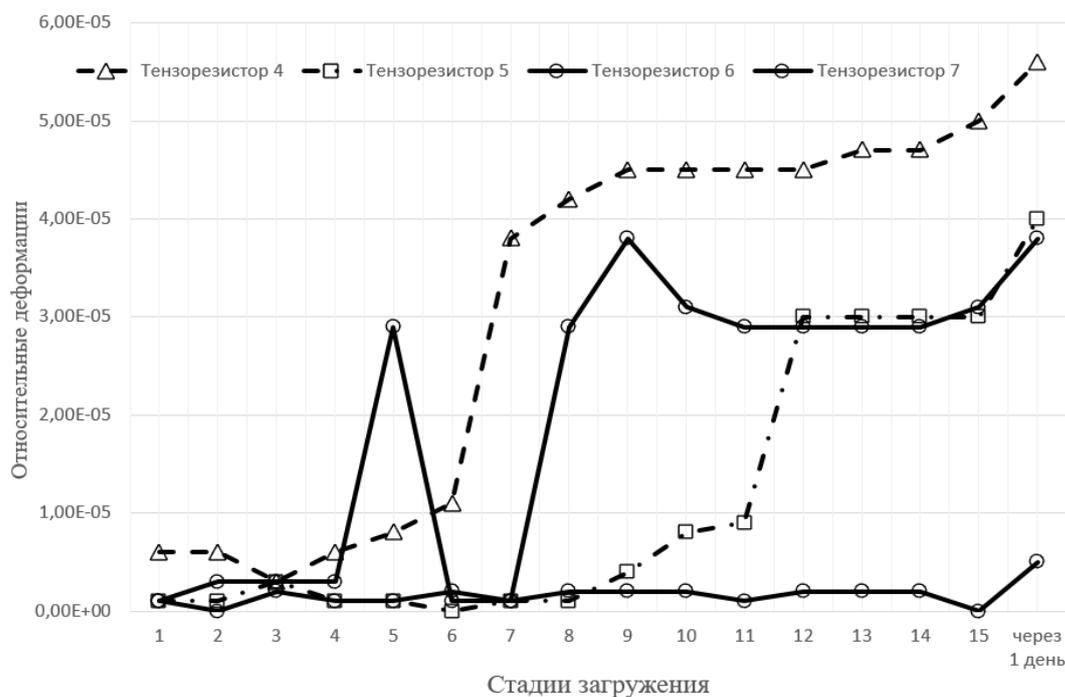


Рис. 4. График изменения относительных деформаций в верхней зоне плиты на опоре (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Graph of changes in relative deformations in the upper zone of the slab on the support (illustration by the authors)

Датчики №1 и №3, установленные в пролете, в растянутой зоне бетона, на трещинах показывают линейный рост относительных деформаций при увеличении нагрузки. При этом коэффициент пропорциональности составляет от $3 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-5}$. Деформации у датчика №1 растут быстрее, чем у датчика №3, разница между относительными деформациями при наибольшем нагружении составляет 25%. Однако визуально ширина раскрытия трещины №1 (на которой установлен датчик №1) в течение эксперимента не менялась, тогда как ширина раскрытия трещины №2 (на которой установлен датчик №3) увеличилась. На первый взгляд, такое несоответствие можно объяснить теорией А. Гриффитса, согласно которой большая трещина высвобождает больше поверхностной энергии, перераспределяя ее в соседние волокна материала. Мы предполагаем, что при дальнейшем увеличении нагрузки произойдет резкое увеличение ширины раскрытия трещины №1 с образованием новых поверхностей.

Датчик №2, установленный в пролете в растянутой зоне бетона на участке между трещинами, как и ожидалось, не демонстрирует никаких изменений относительных деформаций. Этот датчик используется для проверки адекватности проводимого эксперимента, и его показания это подтверждают.

Датчики №4 (расположенный над датчиком №1) и №6 (над датчиком №3) установлены в пролете, в сжатой зоне бетона, над трещинами в растянутой области. В целом, их показания согласуются с данными датчиков №1 и №3, а разница находится в пределах 25%. Однако у датчика №6 на этапе испытания №4 наблюдается резкий скачок относительных деформаций сжатия, а на этапе №5 – аналогичный скачок уменьшения этих деформаций. Вероятно, такое поведение также соотносится с теорией А. Гриффитса, хотя точных доказательств нам не удалось найти.

Датчик №7, установленный в пролете в сжатой зоне бетона над участком без трещины вдоль линии действия нагрузки, как и предполагалось, не демонстрирует изменений относительных деформаций. Аналогично датчику №2, он служит для проверки адекватности эксперимента, и его показания вновь подтверждают это.

Датчики №10 (расположенный вдоль линии действия нагрузки) и №12 (перпендикулярно линии действия нагрузки), установленные в пролете на арматуре в растянутой зоне, показывают линейный характер увеличения относительных деформаций. Относительные деформации у датчика №12 превышают деформации у датчика №10 на 30–

35%, что также согласуется с теорией работы железобетонных изгибаемых конструкций. Арматура под датчиком №12 расположена перпендикулярно линии действия нагрузки и, следовательно, воспринимает больше усилий, чем арматура, установленная вдоль линии действия нагрузки (на которую установлен датчик №10).

Датчики №13 (расположенный вдоль линии действия нагрузки) и №14 (перпендикулярно линии действия нагрузки), установленные на опоре на арматуре в сжатой зоне, демонстрируют скачкообразный характер работы. Относительные деформации то растут, то падают, причем скорость этих изменений неравномерна. Объяснить такое поведение можно с точки зрения теории расчета статически неопределимых железобетонных систем. Жесткость опорной зоны больше, чем жесткость пролетной зоны, и в определенные моменты опорная зона может принимать на себя часть усилий пролетной зоны. Под определенными моментами понимается перемещение кратковременной нагрузки от пролетной зоны к опорной, и обратно. Примерной такой характер имело проводимое нами испытание, когда сначала загружались крайние баки с водой, затем средние и в конце – центральный, то есть нагрузка перемещалась от опор к пролету. В таком состоянии нагрузка выдерживалась в течении 10 минут, за это время часть усилий из пролета перемещалась на опору, догружая ее и увеличивая относительные деформации.

Характер роста прогибов, которые показывают прогибомеры, является линейным и, в целом, согласуется с характером нагружения плиты.

Очевидно, что постоянное перемещение кратковременной нагрузки, что особенно характерно для торгово-развлекательных комплексов, играет решающую роль в работе железобетонных статически неопределимых систем. При определенных обстоятельствах, таких как специфическая комбинация кратковременных нагрузок или перемещение этой нагрузки (то есть, когда она не является статической), может произойти мгновенное высвобождение энергии поверхности материала. Это приводит к образованию новых трещин и увеличению прогибов из-за снижения жесткости отдельных участков конструкции.

Похожий по своей специфике и направленности эксперимент был проведен в работе [20], в которой автор изучал усталостную прочность арматуры железобетонных конструкций. В выводах приведен перечень аналогичных наблюдений, сделанный в рамках настоящего исследования. Автор рекомендует особое внимание уделять узлам СНС, учитывать перераспределение усилий в виду возникновения шарнира пластичности.

Согласно результатам сравнения, расхождение данных настоящего эксперимента и эксперимента, проведенного в [20], в пролетной зоне составляет от 4 до 8,5%. Расхождения в опорной зоне – в пределах 5%. Наблюдаются аналогичные явления по образованию и раскрытию трещин, а также форма и характер их распределения.

4. Заключение

1. Выполнен обзор исследований по эксплуатации плоских железобетонных плит перекрытий. Рассмотрены авторские методики испытаний плит на этапе эксплуатации. Определено, что на данный момент уделяется недостаточное внимание расчету СНС в виду большой сложности расчета и многообразия форм и типоразмеров конструктивных система. Необходима дальнейшая систематическая проработка данного вопроса.

2. Проведено экспериментальное нагружение существующей плиты перекрытия полосовой нагрузкой. Плиту подготовили к испытаниям: установили тензодатчики и измерители прогиба. Получены и обработаны результаты испытаний, построены графики зависимостей относительных деформаций от нагрузки. Выявлены трещины, появившиеся в результате нарушения сцепления арматуры с бетоном в связи с явлениями, происходящими в зоне контакта «бетон-арматура». Выявлено, что наибольшую опасность для плоских железобетонных плит перекрытий представляют кратковременные смещающие нагрузки. Сравнивая настоящее исследование с аналогичными, авторы выявили, что расхождение данных находятся в пределах от 4 до 8,5%. Наблюдаются аналогичные явления по образованию и раскрытию трещин, а также форма и характер их распределения.

3. С научной точки зрения, необходим анализ и точная теоретическая формулировка процессов, происходящих в зоне контакта «бетон-арматура», что позволит уточнять расчеты по величине заделки, анкеровки, нахлестки арматуры, величину раскрытия трещин. С практической точки зрения, инженерам-конструкторам необходимо уделять повышенное внимание при проектировании конструкций железобетонных безбалочных перекрытий, учитывая положения, изложенные в данной работе.

Список литературы / References

1. Davoudi R., Miller G.R., Kutz J.N. Data-driven vision-based inspection for reinforced concrete beams and slabs: Quantitative damage and load estimation. *Aut Con* 2018;96:292-309. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.09.024>.
2. Moradi-Marani F., Rivard P., Lamarche C.-P., Kodjo S.A. Evaluating the damage in reinforced concrete slabs under bending test with the energy of ultrasonic waves. *Con Build Mat* 2014;73:663-673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.050>.
3. Rathod H., Gupta R. Two dimensional non-destructive testing data maps for reinforced concrete slabs with simulated damage. *Data in Bried* 2019;25:104127. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104127>.
4. Jensen T.W., Poulsen P.N., Hoang L.C. Limit analysis of reinforced concrete slabs with construction joints. *Eng Struct* 2020;205:110062. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110062>.
5. Mostofinejad D., Ali Naderi N.J., Mostofinejad A., Salehi M. Effects of openings on the punching shear strength of reinforced concrete slabs. *Structures* 2020;25:760-773. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.061>.
6. Mabrouk R.T.S., Bakr A., Abdalla H. Effect of flexural and shear reinforcement on the punching behavior of reinforced concrete flat slabs. *Alexandria Eng Journal* 2017;56:591-599. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.019>.
7. Shaaban I.G., Hosni A.H., Montaser W.M., El-Sayed M.M. Effect of premature loading on punching resistance of reinforced concrete flat slabs. *Case Studies in Con Mat* 2020;12:e00320. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00320>.
8. Saleem M.A., Abbas S., Nehdi M.L. Assessment of reinforced concrete slabs using in-situ load testing: A case study. *Journal of Build Eng* 2019;25:100844. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100844>.
9. Das S., Dutta S., Adak D., Majumdar S. On the crack characterization of reinforced concrete structures: Experimental and data-driven numerical study. *Structures* 2021;30:134-145. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.069>.
10. Ferreira G.S., Pimentel R.L., Barbosa F.S. Evaluation of two crack models for reinforced concrete one-way slabs subjected to bending by means of modal tests. *Structures* 2020;28:2013-2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.025>.
11. Phuc L.H. Ho, Canh V. Le, Tran-Cong T. Limit state analysis of reinforced concrete slabs using an integrated radial basis function based mesh-free method. *Applied Mathematical Modelling* 2018;53:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.08.006>.
12. Wang S., Kang S.-B., Fu Q.-L., Ma J., Ziolkowski P. Analytical approach for membrane action in laterally-restrained reinforced concrete square slabs under uniformly distributed loads. *Journal of Build Eng* 2021;41:102427. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102427>.
13. Moyeda A., Comput J.F. Multiscale analysis of solid, waffle, ribbed and hollow core reinforced concrete slabs. *Methods Appl Mech Eng* 2019;348:139-156. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.01.022>.
14. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021). 2021. Vol. 274 P.1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403017.
15. George Pantazopoulos, Ioannis Pressas, Athanasios Vazdirvanidis, Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: Metallurgical evaluation and numerical simulation, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 101, 2019, P. 180-192, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.016>.

16. Mahesh, Prashant Rawat, K.K. Singh, P.K. Singh, Comparison of steel and fiber-reinforced polymer rebars for mining applications: A numerical approach, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 33, Part 8, 2020, P. 5041-5045, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.840>.
17. Bairán J.-M., Casas J.R. Safety factor calibration for a new model of shear strength of reinforced concrete building beams and slabs. *Eng Struct* 2018;172:293-303. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.033>.
18. Henze L., Rombach G.A., Harter M. New approach for shear design of reinforced concrete slabs under concentrated loads based on tests and statistical analysis. *Eng Struct* 2020;219:110795. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110795>.
19. Fabrichnaya K. A., Safin R. R. The need to strengthen the frame when equipping a parking lot with mechanical storage means // *Construction and development: life cycle - 2022: Proceedings of the VI International (XII All-Russian) Conference, Cheboksary, November 23-24, 2022. - Cheboksary: LLC Publishing House "Sreda", 2022. - P. 245-255. - EDN HHLSCQ*.
20. Terin V. D., Klimov D. E., Kvasnikov A. A. Experimental studies of the fatigue strength of reinforcement of reinforced concrete structures of class A500 with various types of periodic profile // *Bulletin of the Research Center for Construction. - 2021. - No. 3 (30). - P. 100-107. - DOI 10.37538/2224-9494-2021-3 (30) -100-107. - EDN LMLHXT*.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Хорьков Евгений Владимирович, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: evg-ne@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9040-6538

Минзянов Рустам Ильдарович, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: minzianovrustam@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7198-9907

Information about the authors

Ishat T. Mirsayapov, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Evgeny V. Khorkov, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: evg-ne@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9040-6538

Rustam I. Minzianov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: minzianovrustam@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7198-9907