

DOI:10.33942/sit1398

УДК 624.012.37

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ИЗГИБ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ

Чыныбеков М.К.¹, Бегалиев У.Т.²

⁽¹⁾ *Международный университет инновационных технологий, г. Бишкек, магистрант, E-mail: mih-kh@mail.ru.*

⁽²⁾ *Международный университет инновационных технологий, г. Бишкек, д.т.н., проф. МУИТ, E-mail: utbegaliev@mail.ru*

Аннотация. Статья посвящена исследованию воздействия предварительного напряжения на прочность и эксплуатационные характеристики большепролетных железобетонных балок. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения надёжности и долговечности конструкций в условиях растущих нагрузок и масштабов строительства. Приведены теоретические основы, расчетные методы и экспериментальные данные, подтверждающие эффективность технологии. На примере балки пролётом 15,4 м проведён анализ напряжённого состояния и потерь напряжения. Установлено, что предварительное напряжение повышает прочность, жёсткость и трещиностойкость конструкции. Результаты могут применяться при проектировании новых и усилении существующих сооружений. Также обозначены перспективы численного моделирования и оптимизации конструкций с учетом предварительного напряжения.

Ключевые слова: железобетонная балка, предварительное напряжение, изгиб, сопротивление, трещиностойкость, надёжность.

АЛДЫН АЛА ЧЫНАЛГАН УЗУН ТЕМИР БЕТОН УСТУНДУН ИЙИЛҮҮГӨ ТУРУШТУК БЕРҮҮСҮНӨ ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ

Чыныбеков М.К.¹, Бегалиев У.Т.²

⁽¹⁾ *Эл аралык инновациялык технологиялар университети, Бишкек шаары, магистрант, E-mail: mih-kh@mail.ru*

⁽²⁾ *Эл аралык инновациялык технологиялар университети, т.и.д., ЭИТУ профессору, E-mail: utbegaliev@mail.ru*

Аннотация. Макалада алдын ала чыңалуунун узун аралыктуу темир бетон устундардын бекемдигине жана иштөө сапатына тийгизген таасири изилденет. Теманын актуалдуулугу курулуштагы чоң жүктөмдөр жана конструкцияларга болгон талаптардын жогорулашына байланыштуу. Изилдөөдө теориялык негиздер, эсептөө ыкмалары жана эксперименттик жыйынтыктар берилген. 15,4 метрлик устун мисалында чыңалуу абалы жана чыңалуу жоготуулары талданган. Алдын ала чыңалган арматура конструкциянын бекемдигин, катуулугун жана жаракка чыдамдуулугун жогорулатынын далилдейт. Натыйжалар жаңы курулуштарга жана эски конструкцияларды бекемдөөгө ылайыктуу. Мындан тышкары, сандык моделдөө жана конструкцияны оптималдаштыруу келечектүү багыт катары белгиленет.

Өзөктүү сөздөр: темир бетон балка, алдын ала чыңалуу, ийилүү, каршылык, жаракага туруштук, күчтөр, эсептөө, бекемдөө, эсептөө, күч, катуу, натыйжалуу технологиялар, конструкцияны оптималдаштыруу, ишенимдүүлүк.

The EFFECT OF PRESTRESSING ON THE FLEXURAL RESISTANCE OF LONG-SPAN REINFORCED CONCRETE BEAMS

Chynybekov M.K.¹, Begaliev U.T.²

⁽¹⁾ International University of Innovative Technologies, Bishkek, Master's student, E-mail: mix-kg@mail.ru.

⁽²⁾ International University of Innovative Technologies, Bishkek, Doctor of Technical Sciences, E-mail: utbegaliev@mail.ru

Annotation: This article investigates the influence of prestressing on the strength and performance of long-span reinforced concrete beams. The relevance of the topic stems from increasing structural demands and the need for more reliable and durable construction solutions. The study presents theoretical background, calculation methods, and experimental data that support the effectiveness of prestressing technology. A 15.4-meter beam is analyzed to evaluate stress distribution and prestress losses. The findings show that prestressed reinforcement significantly enhances structural strength, stiffness, and crack resistance. The results are applicable in both new designs and structural strengthening. Future prospects include numerical modeling and optimization of prestressed systems.

Keywords: reinforced concrete beam, prestressing, flexure, resistance, crack resistance, forces, calculation, reinforcement, calculation, strength, rigidity, efficient technologies, design optimization, reliability.

Введение. Железобетонные конструкции, особенно балки с большими пролётами, играют важную роль в современном строительстве благодаря их высокой несущей способности, долговечности и экономичности. Однако при увеличении пролётов резко возрастают изгибающие моменты, что приводит к возникновению значительных растягивающих напряжений и, как следствие, образованию трещин и прогибов. Это снижает эксплуатационные качества конструкции и её надёжность. Одним из наиболее эффективных решений данной проблемы является применение предварительного напряжения, которое обеспечивает создание внутренних сжимающих усилий в наиболее нагруженных зонах конструкции до её эксплуатации.

Предварительно напряжённый железобетон широко используется в строительстве большепролётных конструкций благодаря высокой трещиностойкости, жёсткости и экономичности по сравнению с обычным железобетоном. Основная идея технологии заключается в создании сжимающих напряжений в наиболее растянутых зонах сечения до приложения эксплуатационных нагрузок. Это позволяет значительно снизить или вовсе исключить растягивающие напряжения, а значит — и трещинообразование в начальной стадии работы конструкции [1].

Предварительное напряжение позволяет частично или полностью компенсировать растягивающие напряжения, возникающие при действии внешних нагрузок, повышая трещиностойкость, устойчивость и жёсткость конструкции.

Классические труды Э. Фрейсине и Г. Магнеля заложили основы теории и технологии предварительного напряжения железобетонной конструкции, сформулировав принципы применения предварительного напряжения в железобетонных конструкциях [2, 3]. С тех пор исследование работы предварительно напряжённых элементов, в том числе при изгибе, стало одним из ключевых направлений в строительной науке.

Как отмечает Nilson в фундаментальной монографии [4], воздействие предварительного напряжения приводит к перераспределению усилий в сечении балки, снижая уровень растягивающих напряжений и позволяя более рационально использовать прочность материала. Это особенно актуально для большепролётных балок, где изгибающие моменты от собственного веса и эксплуатационных нагрузок достигают значительных величин.

Современные исследования показывают, что эффективность предварительно напряженного состояния железобетонных балок при изгибе зависит от ряда факторов: величины и способа приложения предварительного натяжения (адгезионного или безадгезионного), расположения арматуры в сечении, формы поперечного сечения и характеристик материалов [5, 6]. Использование высокопрочной арматуры позволяет достичь значительных напряжений в конструкции без образования трещин в стадии эксплуатации.

Многочисленные работы, в том числе опубликованные в журналах *Engineering Structures* и *ACI Structural Journal*, подтверждают, что применение предварительного напряжения повышает не только несущую способность, но и прогибоустойчивость балок [7, 8]. Также показано, что в процессе работы происходит перераспределение напряжений после образования трещин, и это должно учитываться в расчётных моделях.

Моделирование поведения предварительно напряженных железобетонных балок с использованием метода конечных элементов (МКЭ) позволяет более точно оценивать напряжённо-деформированное состояние конструкций при изгибе. Так, в статье Zhang и Yu [9] проанализировано влияние различных схем армирования и уровней натяжения на поведение балок, где показана высокая чувствительность предельных характеристик к распределению предварительного усилия.

Кроме того, Mahamid [10] в своих исследованиях рассматривает задачи оптимизации уровня предварительного напряжения в зависимости от длины пролёта и нагрузки, предлагая экономически обоснованные решения, которые сохраняют прочностные характеристики конструкции на высоком уровне.

Таким образом, обзор современных исследований подтверждает, что предварительное напряжение оказывает значительное влияние на изгибную жёсткость, трещиностойкость и эксплуатационную надёжность большепролётных железобетонных балок. Несмотря на наличие обширной теоретической базы и нормативных документов (например, ACI 318-19), вопросы оптимального проектирования и расчёта предварительного напряжения железобетонных балок в условиях комплексных нагрузок остаются актуальными и требуют дальнейших исследований.

Возможные аварии предварительно-напряжённых железобетонных балок

Предварительно-напряжённые железобетонные балки, несмотря на их повышенную прочность и устойчивость к трещинообразованию, могут быть подвержены различным

типам аварий и разрушений при нарушении проектных, технологических или эксплуатационных условий. Наиболее распространённые типы аварий можно классифицировать следующим образом (рис.1):

Хрупкое разрушение вследствие превышения прочности бетона в сжатой зоне. Возникает при чрезмерной величине внешних нагрузок или ошибке в расчёте усилий. Отсутствие пластического перераспределения приводит к внезапному разрушению без предварительных признаков.

Обрыв натянутой арматуры. Возможен при локальной коррозии, перегрузке или резком механическом воздействии. Это приводит к мгновенной потере несущей способности.

Сдвиговое (срезное) разрушение. Возникает при недостаточной сдвиговой прочности и проявляется в виде диагональных трещин в пролётной зоне, часто при отсутствии вертикальных хомутов или их недостаточном армировании.

Прогиб и раскрытие трещин, не соответствующее эксплуатационным требованиям. Возникает при заниженном уровне предварительного напряжения или чрезмерных длительных нагрузках. Может не приводить к немедленному разрушению, но нарушает работоспособность конструкции.

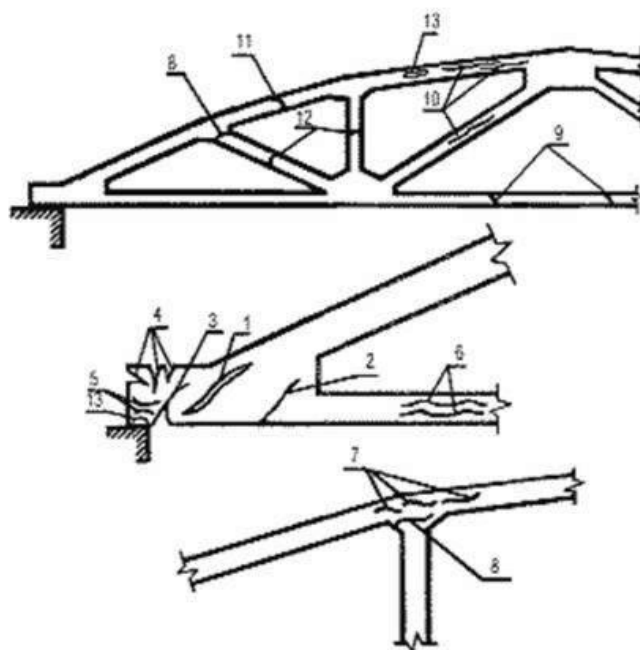


Рис.1 – Схема основных участков разрушений предварительно-напряжённых железобетонных балок

Разрушение в зоне анкеровки. Характерно для некачественного выполнения заделки концов арматуры или неучёта напряжений в зоне анкеровки. Приводит к внезапной потере напряжения и разрушению всей системы.

Коррозионные повреждения арматуры. При недостаточной защите от внешней среды может развиваться медленное разрушение арматуры с последующим обрывом и потерей несущей способности.

Потеря устойчивости или кривизна оси балки. Может возникать при нарушении технологии натяжения или неравномерной геометрии сечения балки.

Методика расчета по предельным состояниям

Анализ влияния предварительного напряжения на изгибную работу большепролётной железобетонной балки проводится с использованием методов расчета по предельным состояниям в соответствии с положениями современных нормативных документов, таких как СП 63.13330.2018. Основу расчёта составляют два ключевых направления: проверка по первой и второй группам предельных состояний.

Расчёт по первой группе предельных состояний направлен на обеспечение прочности и устойчивости конструкции в условиях действия расчётных нагрузок. На этом этапе оценивается способность балки воспринимать внешние и внутренние воздействия без разрушения. Особое внимание уделяется:

- оценке прочности сечения при изгибе с учётом действия предварительного напряжения (рис.2);
- проверке прочности на совместное действие изгиба и продольной силы;
- учёту возможного перераспределения напряжений между бетоном и арматурой;
- определению глубины сжатой зоны и характеристик предельного сопротивления материала.

В рамках анализа предварительно напряжённой балки важно правильно задать значение предварительного усилия, скорректированное с учётом всех потерь натяжения (усадка, ползучесть бетона, релаксация арматуры, потери при анкеровке). Это позволяет адекватно отразить реальную работу конструкции в эксплуатационном состоянии.

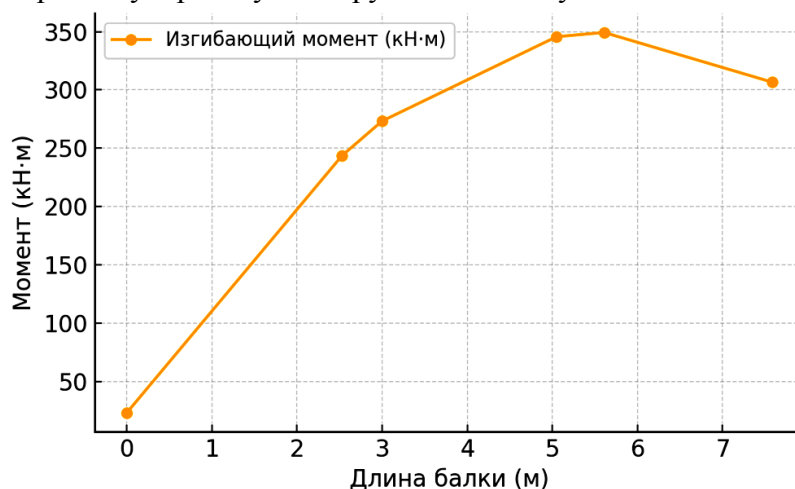


Рис.2 – Распределение изгибающих моментов по длине балки.

Расчет по второй группе предельных состояний направлен на оценку эксплуатационной пригодности конструкции, в частности:

- обеспечение ограниченных прогибов балки, не нарушающих нормальную эксплуатацию здания;
- проверка раскрытия трещин в растянутой зоне сечения и соответствие их ширины нормативным значениям;
- учет влияния предварительного напряжения на образование и развитие трещин;
- анализ долговечности и надежности работы арматуры и бетона в условиях длительной эксплуатации.

В процессе расчёта прогибов используется понижающий коэффициент, учитывающий влияние трещиноватости на изгибную жёсткость. Также важно учитывать, что при оптимальном предварительном напряжении конструкция может длительное время сохранять трещиностойкость, повышая эксплуатационную надёжность и снижая необходимость в увеличении сечений.

Общая последовательность расчета содержит следующее:

Задание геометрических и прочностных характеристик балки, включая материалы, тип и расположение предварительно напряженной арматуры.

Определение величины предварительного напряжения и оценка потерь.

Определение усилий и расчетных нагрузок в конструкции.

Проверка несущей способности по первой группе предельных состояний.

Проверка деформативности и трещиностойкости по второй группе предельных состояний.

Проведение сравнительного анализа вариантов с различными уровнями предварительного напряжения.

Такой подход позволяет не только обеспечить нормативную безопасность конструкции, но и определить оптимальный уровень предварительного напряжения, позволяющий снизить прогибы, уменьшить раскрытие трещин и повысить долговечность железобетонной балки при сохранении экономической эффективности.

Выводы

Установлено, что эффект предварительного напряжения оказывает существенное влияние на изгибную прочность и эксплуатационные характеристики железобетонных балок с большими пролётами.

Представленная методика позволяет комплексно оценить влияние величины и схемы приложения предварительного напряжения на изгибную жёсткость, трещиностойкость и прогибы большепролётной железобетонной балки. Полученные данные служат основой для сравнения различных схем армирования и оптимизации параметров натяжения.

В будущем перспективным направлением представляется использование методов численного моделирования и оптимизации конструкций с предварительным напряжением, что позволит не только повысить точность расчётов, но и значительно повысить эффективность проектных решений.

Список использованных источников

1. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19). – American Concrete Institute, 2019.
2. Freyssinet E. Le béton armé précontraint. – Paris, 1950.
3. Magnel G. Prestressed Concrete. – London: Concrete Publications Ltd., 1954.
4. Nilson A.H., Darwin D., Dolan C.W. Design of Prestressed Concrete. – John Wiley & Sons, 2004.
5. Collins M.P., Mitchell D. Prestressed Concrete Structures. – Response Publications, 1991.
6. Леонтьев Н.А., Гребеньков В.А. Предварительно напряжённые железобетонные конструкции. – М.: ACB, 2006.

7. ACI Structural Journal. Various issues, 2015–2023.
8. Engineering Structures, Vol. 261, 2022.
9. Zhang M., Yu J. Numerical study on behavior of prestressed beams under flexural loading. // Engineering Structures. – 2021.
10. Mahamid E. Optimization of prestressing force in concrete beams. // Journal of Construction Engineering. – 2019.
11. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
12. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия,
13. Заикин А.И. Железобетонные конструкции. Учебное пособие. М.: АСВ, 2007.
14. Методическое пособие по расчету предварительно напряженных железобетонных конструкций. М.: Минстрой РФ, 2015.
15. Михайлов В.В. Предварительно напряженные комбинированные и вантовые конструкции : учебное пособие / В. В. Михайлов. – Москва : АСВ, 1978. – 256 с.
16. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции. Общий курс : учебник для вузов / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – Изд. 5-е. – Москва : Стройиздат, 1991. – 767 с.
17. Бегалиев У.Т., Абдыкалыков Д.Б., Абдыганы У.Э., Кенешбек У.Т. Натурные динамические испытания 3-этажного здания со стенами комплексной конструкции. – Наука и инновационные технологии. – 2022. № 1 (22). – С. 3-14.
18. Abdykalykov A.A., Abdybaliev M.K., Begaliev U.T. Approaches to determination of seismic hazard on building area and demand for building structures in the Kyrgyz Republic. – News of International Association of Experts on Earthquake Engineering. – 2022. № 1 (13). – С. 5-14.
19. Тулеев А.Т., Абаканов Т., Бегалиев У.Т., Лапин В.А. Динамические испытания высотного жилого дома в г. Алматы. – Наука и инновационные технологии. – 2024. № 1 (30). – С. 310-320.
20. Бегалиев У.Т., Абдыкадыров А.З., Абдыкалыков Д.Б. Экспериментальные зависимости «силы-перемещения» при испытаниях на статические горизонтальные и вертикальные воздействия стеновых панелей из ЛСТК. – Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2024. № 6. – С. 139-164.
21. Матыева А.К., Таалайбеков А., Апысов К., Рысбаев Э., Таалайбеков С. Инновация в сейсмостойком строительстве. – Наука и инновационные технологии. – 2021. № 1 (18). – С. 154-161.
22. Кулбаев Б.Б., Шокбаров Е.М., Темирлиулы Г. Численная модель испытываемого образца из каменной кладки. Вестник Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. – 2022. № 1 (13). – С. 65-69.