

Сравнительные характеристики длины зоны передачи напряжений в преднапряженных железобетонных конструкциях

Г. Ю. Фетисова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Информация о статье УДК 691.328

Аннотация

Определение эффективной длины зоны передачи напряжений – одно из необходимых условий при проектировании преднапряженных железобетонных конструкций. Степень передачи напряжений на бетон напрямую влияет на прочность и надежность конструкций. В данной статье выполнен анализ существующих исследовательских наработок и сравнение методов определения длины передачи напряжений численным, конечно-элементным и экспериментальным способом. Численный расчет проводился по нормативной формуле для тяжелых бетонов, конечно-элементная модель строилась по аналогии с экспериментальной схемой, использованной в ранее проведенном исследовании. Установлено, что расчет по нормативной формуле и моделирование методом конечных элементов дают завышенные показатели длины зоны передачи напряжений в сравнении с экспериментальными. Это имеет значение при анализе преднапряженных конструкций из новых высокопрочных материалов, которые не могут быть полноценно рассчитаны по нормативным формулам и требуют отдельного анализа.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, преднапряженный железобетон, зона передачи напряжений, изменение усилий, высокопрочный бетон, адгезия, метод конечных элементов

Содержание

1.	Введение	82
2.	Методы	83
3.	Результаты и обсуждение	84
4.	Заключение	85

1. Введение

При устройстве предварительно напряженных конструкций требуется понимание условий передачи напряжений с арматуры на бетон. Одним из необходимых факторов является длина зоны передачи напряжений, от которой зависит эффективность применяемого предварительно напряжения арматуры. Согласно действующему в России своду правил по железобетонным конструкциям, эта зона зависит от площади и периметра арматуры, напряжений в ней, а также от сопротивления сцепления, зависящего от свойств бетона [1].

При расчете традиционных конструкций по методике, предложенной в своде правил, проектировщик получает верифицированные результаты, которым можно доверять. Однако при необходимости анализа конструкций с новыми технологическими решениями и проектировании преднапряженных конструкций с высокопрочным бетоном или композитной арматурой, зачастую необходимо выполнить дополнительные расчеты и моделирование методом конечных элементов в современных программах. Результаты такого моделирования и их достоверность пока не полностью изучены. Они во многом зависят от знаний и профессиональной интуиции самого проектировщика, но в любом случае могут служить не более, чем дополнительным оценочным материалом. В связи с этим возникает необходимость в получении сравнительных данных экспериментов и численного моделирования методом конечных элементов поведения преднапряженной конструкции.

Передача напряжений на бетон от армирующего элемента зависит от механического защемления армирующего элемента, усилия трения и адгезионных усилий (рис. 1). Эти параметры необходимо учитывать при проведении моделирования поведения конструкции. В то же время, на сегодняшний день существует множество новых видов высокопрочных бетонов и композитной арматуры, для которых характер передачи предварительно напряжения может значительно отличаться [2, 3].

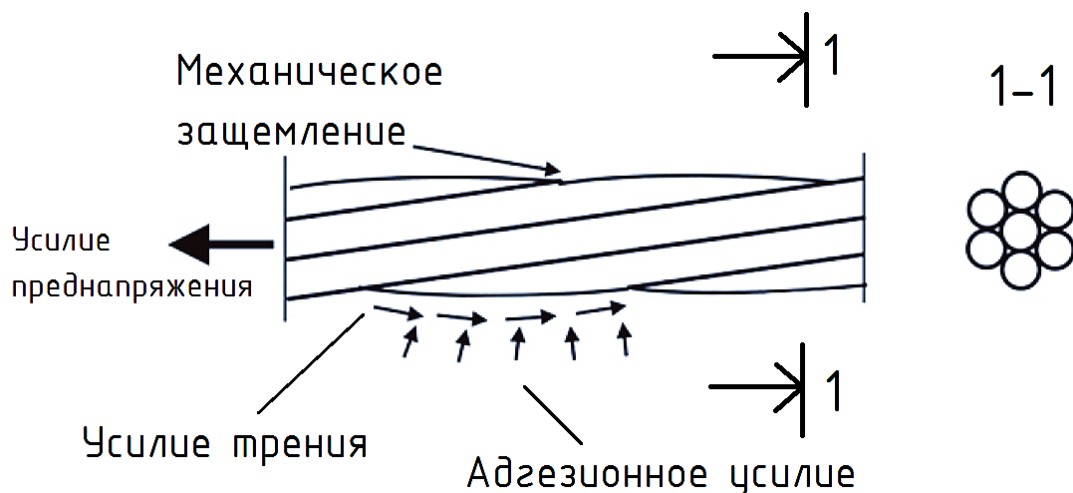


Рисунок 1. Схема передачи предварительно напряжений на бетон [3]

Анализу длины передачи напряжений с арматуры на бетон посвящены различные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные как в России, так и за рубежом [4-8]. Так, была предложена установка для экспериментального определения длины зоны передачи напряжений предварительно напряженной арматуры железобетонных элементов [9]. Установка представляла собой жесткую раму со съемной опалубкой и механизмом для натяжения преднапряженной арматуры. Эксперимент подразумевает возможность поэтапной обрезки арматуры. Длина зоны передачи напряжений определяется как наименьшая длина заделки предварительно напряженной арматуры в бетон, при которой наблюдается минимальное изменение линейных перемещений в датчике, закрепленном на арматуре. Такая экспериментальная схема достаточно удобна для соотнесения с конечно-элементной моделью, однако численное моделирование не выполнялось, в связи с чем выполнить такое соотнесение можно только после специального моделирования, для которого необходимо большее количество данных о проведенном эксперименте.

Теоретический анализ известных зависимостей для определения длины зоны передачи напряжений был выполнен в работе В.В. Тура [10]. Основное внимание было уделено величине втягивания канатов. Анализ проводился для выявления наиболее удобных к применению зависимостей, предложенных за последние 50 лет. Такими зависимостями оказались предложенные в EN 13369. Кроме того, для используемой формулы (1) из СНиП 2.03.01–84* было рекомендовано использовать базовую длину зоны передачи напряжений, определенную при средней прочности бетона на растяжение к моменту времени, соответствующему передаче обжатия.

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \frac{\sigma_{pm,0} \cdot \Phi}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}(t)} \quad (1)$$

где $\alpha_1 = 1,0$; $\alpha_2 = 0,19$; $\eta_1 = 1,0$; $\eta_2 = 3,2$ – для канатов; $f_{ctd}(t)$ – расчетное сопротивление бетона на растяжение к моменту времени t , соответствующему передаче усилия обжатия.

В зарубежных исследованиях для экспериментов часто используется повторяющаяся испытательная схема [11-13]. Испытания проводятся с призматическими или цилиндрическими образцами, по оси которых расположена напрягаемая арматура. При освобождении арматурного стержня изменение напряженного состояния этого стержня и смежного с ним бетона определяют по их деформациям. Наиболее характерным параметром здесь является величина взаимного смещения торца арматурного стержня относительно бетона. По этому параметру можно эффективно оценить длину зоны передачи напряжений с использованием известных эмпирических и теоретических зависимостей.

Проблемы преднапряжения в высокопрочных бетонах исследовались в работах W. Derkowski [14]. Рассматривалось применение высокопрочного бетона на сборных заводах. Было показано, что длина зоны передачи напряжений напрямую влияет на безопасность и долговечность конструкции. Это особенно важно для предварительно напряженных железобетонных элементов без анкерующих устройств. Напряжения связи в предварительно напряженных конструкциях зависят от величины проскальзывания и многих материальных и технологических аспектов. Сложное напряженное состояние в торцевой зоне элемента, вызванное передачей предварительного напряжения бетону, может привести к различным повреждениям. Показано, что в элементах без поперечной арматуры растрескивание торцевой зоны может поставить под угрозу ее безопасное использование.

В исследованиях длины передачи напряжений ряда зарубежных авторов [15-18], показаны очень разрозненные результаты. Это связано со сложностью явления, на которое влияют несколько параметров, среди которых различные характеристики волокон канатов по механической прочности и состояние поверхности контакта. На основе методики, которая может имитировать большинство явлений, возникающих вокруг предварительно напряженной арматуры при ее отпуске, была проведена серия экспериментов. По ее результатам для различных значений прочности бетона определена длина передачи напряжений и величина втягивания элемента.

Кроме того, во многих работах [19-22] производится сравнение расчетов длины зон передачи напряжений в соответствии с последними нормативами - Еврокод 2 [23] и Model code 2010 [24], и их аналитическое развитие. Результаты исследований показывают фактическую эквивалентность данных нормативов, при условии применения методик расчета, адаптированных под конкретный вид напрягаемого элемента.

Целью текущей работы было соотнесение результатов экспериментов и расчетов по выведенным формулам с конечно-элементным моделированием для последующего выявления возможных проблем и поиска путей наиболее достоверного моделирования узлов преднапряженных железобетонных конструкций.

2. Методы

Для сравнения результатов расчетов по нормативным документам и ранее проведенных экспериментов [25] с конечно-элементным моделированием была выполнена расчетная модель (рис. 3) по аналогии с экспериментальной схемой, представленной на рис. 2. В свойствах материала бетона был задан начальный модуль упругости и стандартное нелинейное поведение при повышенных напряжениях, что обеспечивало возможность получения наиболее близкой к реальной длине передачи напряжений. Анализ проводился в 2 этапа. На первом этапе к арматурному стержню было приложено начальное растягивающее напряжение 40 МПа. На втором этапе было активировано жесткое защемление арматурного стержня конечно-элементными моделями бетона. Перед деактивацией усилий преднапряжения были также активированы ограничения перемещений по внутренней грани бетона через промежуточную металлическую пластину. Также был проведен сравнительный расчет по формуле (1).

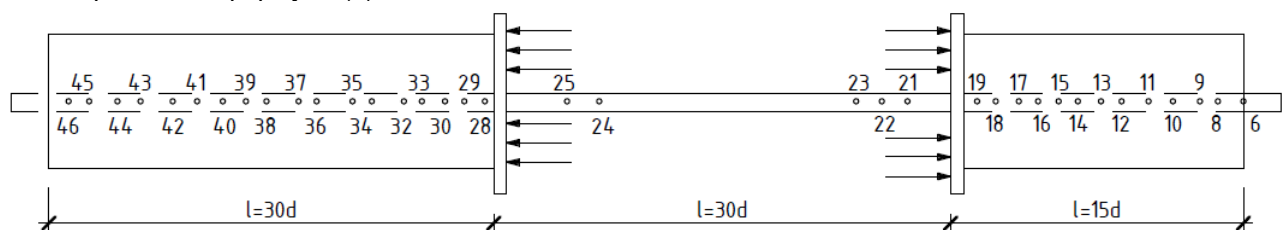


Рисунок 2. Испытательная схема ранее выполненных исследований [24]. 6-46 – датчики деформаций, расположенные на арматурном стержне и в бетоне, d – диаметр арматурного стержня.

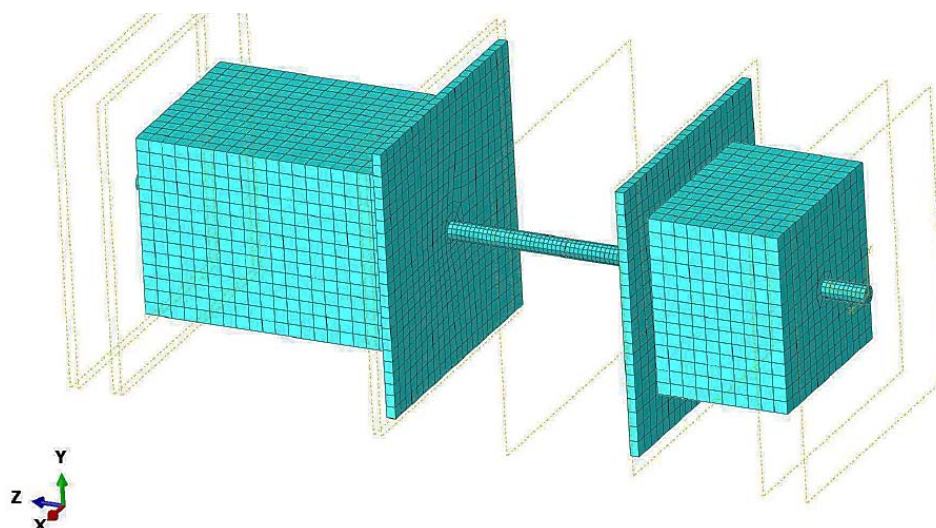


Рисунок 3. Конечно-элементная модель, соответствующая ранее использованной экспериментальной схеме. Преднапрягаемый стержень, бетонные элементы и ограничительные стальные пластины.

3. Результаты и обсуждение

Как можно видеть на рис. 4, при текущей испытательной схеме на бетон передается главным образом растягивающее напряжение по внутренней стороне образцов. Сжимающее напряжение заметно только на небольшом участке и сравнительно мало по сравнению с растягивающим.

Первое, что бросается в глаза по результатам расчета – значительные растягивающие напряжения отрыва, что может быть связано с несовершенством экспериментальной модели.

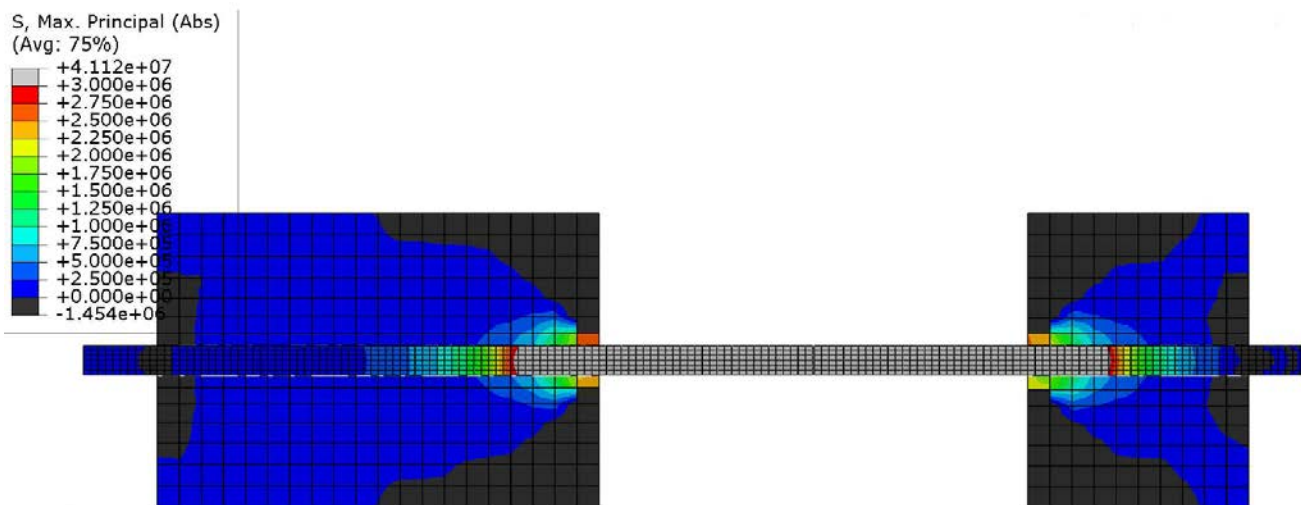


Рисунок 4. Максимальные главные напряжения в бетоне и арматурном стержне с преднапряженной арматурой без дополнительной анкеровки

Передача напряжений на участке обжатия происходит на длине до $1 \dots 1.5 d$, в данном случае – около $5 \dots 6$ см, а на участках отрыва – $10 \dots 12 d$, или $28 \dots 34$ см. Расчет длины зоны передачи напряжений при подстановке исходных данных использованной модели в формулу (1) дал значение 4.75 см для сжатого бетона при минимальном расчетном значении преднапряжения в 40 МПа (2).

$$l_{pt} = 1 \cdot 0.19 \frac{40 \cdot 2}{1 \cdot 3.2 \cdot 1} = 4,75 \text{ см} \quad (2)$$

Аналогичные расчеты проводились для увеличенных напряжений преднапряжения арматурного стержня. Результаты расчетов сведены в график (рис. 5). Как видно, результаты конечно-элементного моделирования оказываются несколько выше результатов расчета по предлагаемой формуле и экспериментальных данных. Это может объясняться как определенной долей упрощения при моделировании, не полным учетом факторов влияния, а также учтенной в формуле поправкой, обеспечивающей большее соответствие реальному поведению конструкций.

В то же время формула несколько завышает значения длины в сравнении с экспериментом, что может означать необходимость ее корректировки и учета данного обстоятельства в расчетах конструкций.

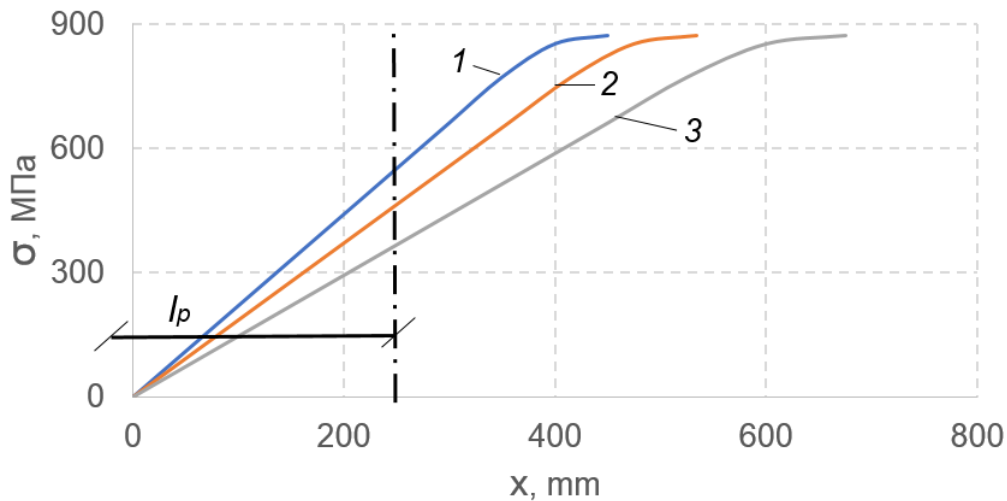


Рисунок 5. Зависимость длины зоны передачи напряжений от усилия преднапряжения. 1 – по данным ранее проведенных исследований; 2 – по расчету согласно предлагаемой формуле; 3 – по данным конечно-элементного моделирования

4. Заключение

Были выполнены численные расчеты и конечно-элементное моделирование фрагмента бетонной конструкции с преднапряженным арматурным стержнем согласно схеме, по которой ранее был поставлен эксперимент. Было установлено, что длина зоны передачи напряжений при моделировании оказывается на 15...25% больше, чем при расчете по ранее предложенной формуле. Относительно экспериментальных данных также было превышение, однако также было выявлено, что использовавшаяся схема эксперимента может демонстрировать не вполне точные результаты по причине наличия участка отрыва арматуры на внутренних сторонах бетонных элементов.

При конечно-элементном моделировании в такую схему необходимо вводить дополнительные параметры, характеризующие поведение материалов, даже на стадии упругой работы. Кроме того, для повышения точности результатов представляется более подходящим выполнять моделирование с использованием только одного бетонного элемента, к центральной части которого и будут направлены деформации обжатия преднапряженной арматуры.

Подводя итог, можно сказать, что из-за существенного расхождения длины передачи напряжений в использованных экспериментальных и теоретических моделях, для полноценного сравнения необходимо выполнить дополнительное исследование с максимальной совместимостью экспериментальных и конечно-элементных моделей.

Литература

- [1]. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
- [2]. Lammlein T. D., Messina F., Wyrzykowski M., Terrasi G. P., Lura P. Low clinker high performance concretes and their potential in CFRP-prestressed structural elements. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 100. 2019. Pp. 130-138.
- [3]. Фетисова Г.Ю. Длина зоны передачи напряжений на бетон для арматуры без анкерующих устройств. Сборник статей магистрантов и аспирантов СПбГАСУ. Том 2. 2019. С. 201-206.
- [4]. Староверов В.Д., Бароев Р.В., Цурупа А.А., Кришталевиц А.К. Композитная арматура: проблемы применения // Вестник гражданских инженеров. 2015. №3. С. 171-178.
- [5]. Lou T., Karavasilis T.L. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete

References

- [1]. Code 63.13330.2012. Concrete and won concrete construction. Design requirements. (rus)
- [2]. Lammlein T. D., Messina F., Wyrzykowski M., Terrasi G. P., Lura P. Low clinker high performance concretes and their potential in CFRP-prestressed structural elements. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 100. 2019. Pp. 130-138.
- [3]. Fetisova G.Y. Dlina zony peredachi napryazhenij na beton dlya armatury bez ankeruyushchih ustrojstv [The transmission length of concrete for reinforcement without anchorage devices]. *Sbornik statej magistrantov i aspirantov SPbGASU*. Vol. 2. 2019. Pp. 201-206. (rus)
- [4]. Staroverov V.D., Baroev R.V., Curupa A.A., Krishtalevich A.K. Fiber-reinforced polymer reinforcement: the problems of application. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2015. No. 3. Pp. 171-178. (rus)
- [5]. Lou T., Karavasilis T.L. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-

- composite beams. *Engineering Structures*. Vol. 190. 2019. pp. 116-127.
- [6]. "Rezazadeh M., Barros J. Transfer zone of prestressed CFRP reinforcement applied according to NSM technique for strengthening of RC structures. *Composites Part B: Engineering*. Vo. 79. 2015. pp. 581-594."
- [7]. Ghimire M., Wang C., Dixon K., Serrato M. In situ monitoring of prestressed concrete using embedded fiber loop ringdown strain sensor. *Measurement*. Vo. 124. 2018. pp. 224-232.
- [8]. Sha X., Davidson J.S. Analysis of transfer length for prestressed FRP tendons in pretensioned concrete using composite beam theory. *Composite Structures*. Vol. 208. 2019. pp. 665-677.
- [9]. Рябенко Н.Д. Установка для определения длины зоны передачи напряжений предварительно напряженной арматуры железобетонных элементов // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2017. №16. С. 98-105.
- [10]. Тур В.В. Контроль длины зоны передачи напряжений по величине втягивания напрягающих элементов в технологии изготовления предварительно напряженных конструкций // *Строительство и архитектура*. 2010. №1. С. 57-64.
- [11]. Marti-Vargas J.R., Serna P., Navarro-Gregori J., Bonet J.L. Effects of concrete composition on transmission length of prestressing strands. *Construction and Building Materials*. Vol. 27. 2012. Pp. 350-356.
- [12]. Jeng C.H., Chao M., Chuang H.C. Torsion experiment and cracking-torque formulae of hollow prestressed concrete beams. *Engineering Structures*. Vol. 196. 2019. 109325
- [13]. Butler L.J., Gibbons N., He P., Middleton N., Elshafie M.Z.E.B. Evaluating the early-age behaviour of full-scale prestressed concrete beams using distributed and discrete fibre optic sensors. *Construction and Building Materials*. Vol. 126. 2016. pp. 894-912.
- [14]. Derkowski W., Dyba M. Behaviour of End Zone of Pre-tensioned Concrete Elements. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 19-26.
- [15]. Bosco C., Taliano M. Measurements of the transmission length of pre-tensioned strands. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Concrete Future - "Recent Advances in Concrete Technology and Concrete in Structures"*. 2017. Pp. 91-98.
- [16]. Fabris N., Faleschini F., Zanini M.A., Pellegrino C. Assessment of influencing parameters on transmission length of prestressed concrete. *Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. 2018. Pp. 387-395.
- [17]. Dang Canh N., Micah Hale W., Marti-Vargas J.R. Assessment of transmission length of prestressing strands according to fib Model Code 2010. *Engineering Structures*. 2017. 147. Pp. 425-433.
- [18]. Moawad M., Mahmoud A., El-karmoty H., El-zanaty A. Behavior of corroded bonded partially prestressed concrete beams. *HBRC Journal*. Vol. 14. 2018. pp. 9-21.
- [19]. Тур В.В. О нормировании величины втягивания канатов при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования // *Проблемы современного бетона и железобетона*. 2012. №1. С. 458-478.
- [20]. Pellegrino C., Zanini M.A., Faleschini F., Hofer L. Transmission length formulations for prestressed concrete elements. *Proceedings of Italian Concrete Days - Giornate aicap 2016 Congresso CTE*. 2016. Pp. 98-105.
- [21]. Zou X.W. Transmission Length of AFRP Tendons in Concrete Beams. *Procedia Engineering*. 1997. Vol. 22. Pp. 703-710.
- concrete composite beams. *Engineering Structures*. Vol. 190. 2019. pp. 116-127.
- [6]. "Rezazadeh M., Barros J. Transfer zone of prestressed CFRP reinforcement applied according to NSM technique for strengthening of RC structures. *Composites Part B: Engineering*. Vo. 79. 2015. pp. 581-594."
- [7]. Ghimire M., Wang C., Dixon K., Serrato M. In situ monitoring of prestressed concrete using embedded fiber loop ringdown strain sensor. *Measurement*. Vo. 124. 2018. pp. 224-232.
- [8]. Sha X., Davidson J.S. Analysis of transfer length for prestressed FRP tendons in pretensioned concrete using composite beam theory. *Composite Structures*. Vol. 208. 2019. pp. 665-677.
- [9]. Ryabenko N.D. Setting to determine the length of the zone of transmission of stress in the pre-stressed reinforcement concrete elements. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. No. 16. Pp. 98-105. (rus)
- [10]. Tur V.V. Transmission length control at prestressed structure manufacturing. *Stroitelstvo i arhitektura*. 2010. No. 1. S. 57-64. (rus)
- [11]. Marti-Vargas J.R., Serna P., Navarro-Gregori J., Bonet J.L. Effects of concrete composition on transmission length of prestressing strands. *Construction and Building Materials*. Vol. 27. 2012. Pp. 350-356.
- [12]. Jeng C.H., Chao M., Chuang H.C. Torsion experiment and cracking-torque formulae of hollow prestressed concrete beams. *Engineering Structures*. Vol. 196. 2019. 109325
- [13]. Butler L.J., Gibbons N., He P., Middleton N., Elshafie M.Z.E.B. Evaluating the early-age behaviour of full-scale prestressed concrete beams using distributed and discrete fibre optic sensors. *Construction and Building Materials*. Vol. 126. 2016. pp. 894-912.
- [14]. Derkowski W., Dyba M. Behaviour of End Zone of Pre-tensioned Concrete Elements. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 19-26.
- [15]. Bosco C., Taliano M. Measurements of the transmission length of pre-tensioned strands. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Concrete Future - "Recent Advances in Concrete Technology and Concrete in Structures"*. 2017. Pp. 91-98.
- [16]. Fabris N., Faleschini F., Zanini M.A., Pellegrino C. Assessment of influencing parameters on transmission length of prestressed concrete. *Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*. 2018. Pp. 387-395.
- [17]. Dang Canh N., Micah Hale W., Marti-Vargas J.R. Assessment of transmission length of prestressing strands according to fib Model Code 2010. *Engineering Structures*. 2017. 147. Pp. 425-433.
- [18]. Moawad M., Mahmoud A., El-karmoty H., El-zanaty A. Behavior of corroded bonded partially prestressed concrete beams. *HBRC Journal*. Vol. 14. 2018. pp. 9-21.
- [19]. Тур В.В. О нормировании величины втягивания канатов при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования [On the rationing of the amount of rope drawing in the manufacture of hollow-core slabs using the formless molding technology]. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona*. 2012. No. 1. Pp. 458-478. (rus)
- [20]. Pellegrino C., Zanini M.A., Faleschini F., Hofer L. Transmission length formulations for prestressed concrete elements. *Proceedings of Italian Concrete Days - Giornate aicap 2016 Congresso CTE*. 2016. Pp. 98-105.

- [22]. Mohandoss P., Pillai R.G., Sengupta A.K. Transmission length of pretensioned concrete systems – comparison of codes and test data. Magazine of Concrete Research. 2018. No. 17. 1700553.
- [23]. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций : ТКП EN 1992-1-1:2009 / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – Ч. 1-1: Общие правила и правила для зданий. – 207 с.
- [24]. Model Code 2010, Vol. 1, 2. – fib, 2010. – CH – 1015. – 293p.
- [25]. Трофимов А.В. Расчет железобетонных конструкций с использованием модели составного сечения. СПбГАСУ, 2012, 99 с.
- [21]. Zou X.W. Transmission Length of AFRP Tendons in Concrete Beams. Procedia Engineering. 1997. Vol. 22. Pp. 703-710.
- [22]. Mohandoss P., Pillai R.G., Sengupta A.K. Transmission length of pretensioned concrete systems – comparison of codes and test data. Magazine of Concrete Research. 2018. No. 17. 1700553.
- [23]. EN 1992-1-1:2009 Eurocode 2: Design of concrete structures.
- [24]. Model Code 2010, Vol. 1, 2. – fib, 2010. – CH – 1015. 293p.
- [25]. Trofimov A.V. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij s ispol'zovaniem modeli sostavnogo secheniya [Calculation of reinforced concrete structures using the composite section model]. SPbGASU, 2012, 99 p. (rus)

Фетисова, Г. Ю., Сравнительные характеристики длины зоны передачи напряжений в преднапряженных железобетонных конструкциях // Alfabuild. 2019. № 2(9). С. 81-88.

Fetisova, G. Comparative characteristics of the transmission length in prestressed concrete structures. Alfabuild. 2019. 2(9). Pp. 81-88. (rus)

Comparative characteristics of the transmission length in prestressed concrete structures

G. Fetisova¹

¹ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-nd Krasnoarmeiskaya St. 4, 190005 St. Petersburg, Russia

Article info

research article

Abstract

Determination of the effective length of the stress transmission zone is one of the necessary conditions for designing prestressed reinforced concrete structures. The degree of stress transfer to concrete directly affects the strength and reliability of structures. Therefore, this article analyzes the existing research developments. Also, it compares the methods for determining the transmission length in a numerical, finite-element and experimental way. In particular, the numerical calculation was carried out according to the normative formula for heavy concrete, and the finite element model was constructed by analogy with the experimental scheme used in the earlier study. As a result, it was established that the calculation according to the normative formula and the modeling by the finite element method give overestimated values of the transmission length in comparison with the experimental ones. This is important in the analysis of prestressed structures made of new high-strength materials, which cannot be fully calculated using standard formulas and require separate analysis.

Keywords:

reinforced concrete structures, prestressed reinforced concrete, transmission length, force variation, high-strength concrete, adhesion, finite element method

¹ Corresponding author

1. +79119031688, galina.fetisova.95@mail.ru (Fetisova Galina, graduate student)