

УДК 624.012.36

К ИССЛЕДОВАНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЬКОВОЙ ЗОНЫ БАЛОК КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ

Н.В. Матвеевко, В.Н. Малиновский

TO RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF RIDGE AREA OF THE CURVED BEAM

N.V. Matweenko, V.N. Malinovskiy

Аннотация. В балках криволинейного очертания в местах излома верхней и нижней граней возникает двухосное напряженное состояние подобно напряженно-деформированному состоянию опорной зоны однопролетной балки постоянного сечения. Для расчета сопротивления данных областей может быть использована модель «распорки и тяжей». Важным этапом при разработке данной модели является замена возникающих в конструкции полей напряжений относительно простой системой сжатых и растянутых элементов. Одним из основных факторов, влияющим на выбор направления и положения распорок и тяжей, является высота сечения балки. В данной статье представлено исследование влияния изменения высоты сечения на напряженно-деформированное состояние коньковой зоны балки криволинейного очертания.

Ключевые слова: *относительные деформации; распорки; тяжи; нормальная трещина; фиктивная опора; изополя напряжений.*

Abstract: In the curved beams in places of fracture of the upper and lower faces arises biaxial stress state like stress-strain state support zone of single span beam with constant cross section. To define resistance these areas, the of struts-and-ties model can be used. An important step in the development of this model is the replacement of the stress fields arising in the design with a relatively simple system of compressed and tensioned elements. One of the main factors influencing the choice of direction and position of the struts and ties is the height of the beam section. This article presents a study of the effect of changes in the height of the cross section on the stress-strain state of the ridge area of the curved beam.

Key words: *relative deformations; strut; tie; normal crack; dummy support; stress fields.*

Введение

Особое внимание при проектировании балок криволинейного очертания уделяется армированию коньковой зоны. При этом коньковой зоной считается зона балки, расположенной по обе стороны от нормального сечения, проходящего по коньку ломаной верхней грани. Согласно рекомендациям по расчету и конструированию двускатных балок армирование коньковой зоны должно быть таким, чтобы поперечная арматура могла воспринимать вертикальную составляющую от сил сжатия в верхних полках [1]. Формирующаяся вертикальная составляющая усилия в сжатой зоне бетона изменяет напряженно-деформированное состояние коньковой зоны пролета балки: траектория главных сжимающих усилий устремляется к нижней грани, а растягивающих – к верхней. Таким образом, в зоне конька балки создаются условия подобные фиктивной опоре, а в зоне между пролетным грузом и фиктивной опорой складывается двухосное напряженное состояние подобно напряженно-деформированному состоянию опорной зоны однопролетной балки постоянного сечения. Данное обстоятельство объясняет причины появления диагональных трещин и последующего разрушения по наклонным сечениям в средней зоне балок в месте перелома верхней грани. В 70 гг. XX в. в СССР был проведен ряд исследований, целью которых являлась разработка рекомендаций по определению

требуемого армирования узлов сопряжения ломанного ригеля монолитных рам. Несмотря на это, до сих пор не существует точных и достаточных данных о характере напряженно-деформированного состояния коньковых зон и факторах, влияющих на сопротивление балок переменного сечения в местах перелома верхней и (или) нижней граней.

В отечественной практике проектирования железобетонных конструкций (согласно «Руководству по конструированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения)») при определении требуемого количества поперечной арматуры в коньковых узлах рам и балок выполняют расчет на отрыв, возникающий от действия вертикальной составляющей усилий в сжатом бетоне и (или) растянутой арматуре.

Зарубежные нормы для расчета зон, в которых наблюдается неравномерное распределение напряжений (так называемые D-области) вследствие геометрической или статической неоднородности, предлагают использовать модель «Распорки и тяжи» («Strut-and-ties model»). Размеры D-областей, в которых возникает неравномерное распределение напряжений, определяются на основании принципа Сен-Венана, в соответствии с которым линейное распределение напряжений наблюдается на расстоянии, равном одной высоте сечения от точки приложения сосредоточенной силы (опорной реакции) или от места геометрической неоднородности (место изменения высоты сечения, расположения отверстия).

Принцип расчета с использованием модели «Распорки и тяжи» заключается в замене возникающих в конструкции полей напряжений на относительно простую систему сжатых и растянутых элементов. Особое внимание при использовании данной модели следует уделить выбору направления распорок и тяжей [2]. Как правило, для одного конструктивного элемента может быть разработано несколько моделей «распорок и тяжей». Оптимальной моделью считается та, в которой предусмотрено наименьшее количество тяжей, а их длина минимальна. В областях с высоким уровнем напряжений это требование может быть выполнено за счет приведения системы распорок и тяжей в соответствии с направлением и величиной внутренних усилий, которые были получены с использованием методов теории упругости или численного моделирования. В связи с этим первым этапом при разработке рекомендаций по применению модели «Распорки и тяжи» для отдельного вида элементов или участков конструкций является определение направления главных напряжений и деформаций в интересующей области.

Целью данного исследования является разработка системы распорок и тяжей, которая позволила бы выполнять обоснованный расчет требуемого количества поперечной арматуры в коньковой зоне балок ломанного очертания.

Общая характеристика модели

В качестве исходного объекта исследования выбрана предварительно напряженная железобетонная балка ломанного очертания. Ширина сечения составляет 120 мм. Высота сечения балки переменная: минимальная 270 мм для наклонной части, максимальная 350 мм в коньке. Средняя прочность бетона при сжатии принята 37,50 МПа, при растяжении – 3,36 МПа. В качестве продольного армирования принят один канат диаметром 12,5 мм класса Y1860 S7. Уровень предварительного напряжения принят на уровне $0.7 \cdot f_{p0,1k}$.

В наклонной части балки для обеспечения сопротивления балки изгибу предусмотрено продольное армирование из двух стержней диаметром 18 мм арматуры класса S500, в средней части один стержень диаметром 18 мм арматуры класса S500. В сжатой зоне по всей длине установлено два стержня диаметром 12 мм арматуры класса S500. Поперечная арматура в балке отсутствует. Загружение балки производилось двумя сосредоточенными силами в месте излома нижней грани.

Более подробная информация о конструктивном решении и схеме загрузки балки представлена на рисунке 1.

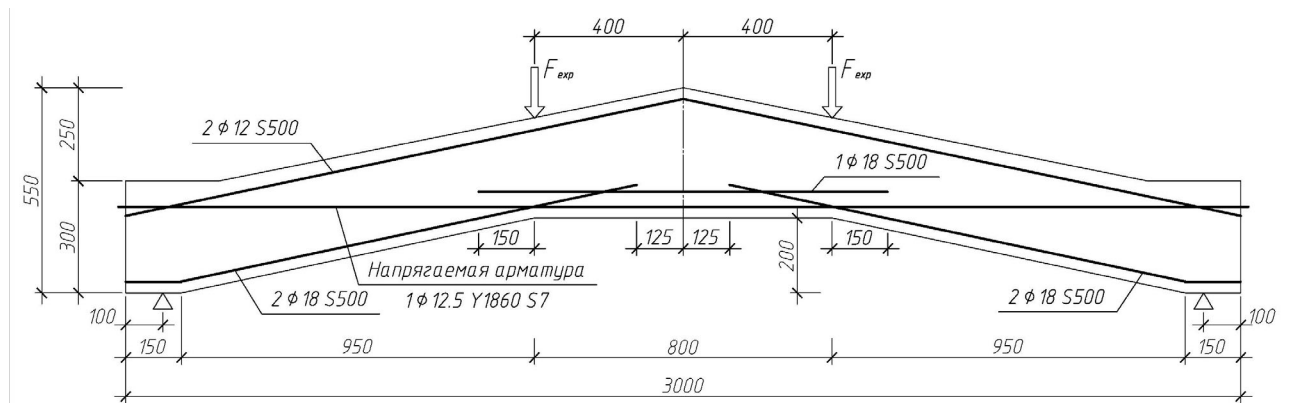


Рисунок 1 – Конструктивное решение и схема загрузки исследуемой балки

Очевидно, что с увеличением высоты балки усилия в сжатой зоне сечения бетона и в растянутой арматуре снижаются. Данное обстоятельство приводит к уменьшению величины вертикальной составляющей, формирующейся в коньке балки от равнодействующей усилий в сжатой зоне бетона, и может привести к изменению угла наклона диагональных трещин в середине пролета балки и, соответственно, изменению расположения распорок и тяжей.

Из выше сказанного следует, что одним из наиболее важных факторов, влияющим на напряженно-деформированное состояние коньковой зоны балки, является высота сечения в коньке. В связи с этим был выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния в середине пролета балки при высоте сечения в коньке (h) 350 мм, 400 мм и 450 мм.

При моделировании искусственного каменного материала (бетона) при расчете на ЭВМ использовалась пластическая модель с вероятностью разрушения («concrete damage plasticity model»). Преимуществом данной модели является возможность учитывать образование и развитие трещин в условиях плоского напряженного состояния.

В основу расчетной диаграммы деформирования бетона при сжатии была принята полная диаграмма деформирования согласно рекомендациям п. 6.1.5 СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции». Для описания в расчетах диаграммы деформирования бетона при осевом растяжении приняты аналитические зависимости L. Bertolotti [3], описывающие как восходящую, так и нисходящую ветвь.

Для упрощения математической модели, уменьшения требуемой вычислительной мощности и продолжительности расчета модели полные диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении заменялись на кусочно-линейные, при этом количество линейных участков и характерные точки выбирались таким образом, чтобы расчетная диаграмма графически наиболее точно соответствовала полной диаграмме. Более подробная информация о принятых диаграммах деформирования и базовых параметрах для принятой модели сопротивления бетона (модуль упругости, коэффициент Пуассона, угол дилатации и др.) изложена в более ранних публикациях авторов [4, 5].

Для моделирования материала арматуры была использована упрощенная диаграмма деформирования с двумя линейными участками - зоной упругой работы до характеристического значения предела текучести (условного предела текучести для высокопрочной арматуры) и зоной пластической работы с незначительным упрочнением после достижения предела текучести.

Распределение вертикальных деформаций в коньковом сечении

От действия вертикальной составляющей в коньке балки возникают растягивающие усилия, которые стремятся «разорвать» сечение балки. Это проявляется в формировании наклонных трещин в середине пролета балки, отрыве бетона в коньке, а на более поздних этапах загрузки приводит к появлению и развитию продольной трещины в уровне

нейтральной оси конькового сечения и в непосредственной близости от него. С целью установления закономерностей распределения вертикальных растягивающих деформаций в коньковом сечении балки и оценки размера зоны влияния отрывающего усилия, были получены и проанализированы эпюры распределения относительных деформаций от вертикальной составляющей в нормальном сечении в середине пролета балки (рисунок 2).

Анализ распределения относительных деформаций в коньке для принятой модели предварительно напряженной железобетонной балки при различной высоте сечения выполнялся при трех характерных этапах напряженно-деформированного состояния: 1 этап – перед образованием нормальных трещин ($M = 17,04$ кН·м); 2 этап – после образования нормальных трещин при отсутствие отрыва сжатого бетона в коньке ($M = 34,08$ кН·м); 3 этап – непосредственно перед разрушением ($M = 45,44$ кН·м при высоте $h = 350$ мм и $h = 400$ мм, $M = 56,80$ кН·м – при $h = 450$ мм) (рисунок 2). Для рассматриваемых моделей балки одна из нормальных трещин возникает в сечении, проходящем в коньке балки. В связи с этим на поздних этапах загрузки значения вертикальных деформаций ниже нейтральной оси в итоговом анализе не учитывались. Принималось во внимание и то, что величины относительных деформаций в конечном элементе с трещиной могут быть использована для определения её ширины раскрытия, но не могут сказываться на особенностях напряженно-деформированного состояния рассматриваемой области конструкции в целом.

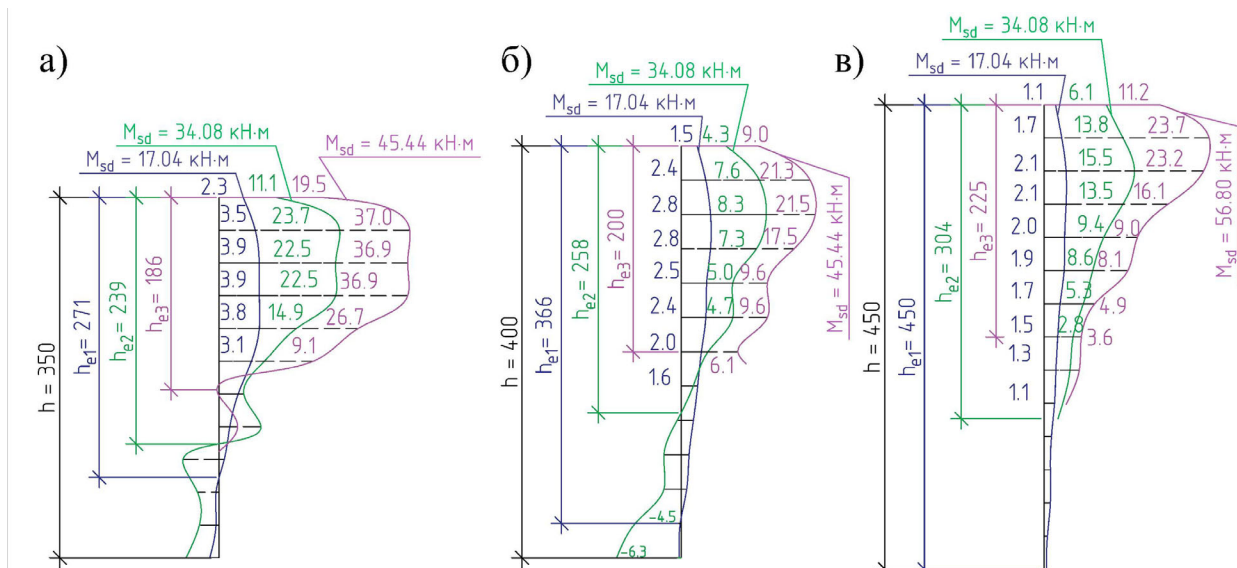


Рисунок 2 – Распределение относительных деформаций ($\epsilon_v \times 10^{-5}$) от вертикальной составляющей в коньковом сечении балки: а) при $h = 350$ мм; б) при $h = 400$ мм; в) при $h = 450$ мм

Установлено, что до образования нормальных трещин в средней части пролета балки вертикальные растягивающие деформации (ϵ_v) имеют незначительную величину в пределах $(2.1..3.5) \times 10^{-5}$. При этом деформации примерно равномерно распределяются в пределах всей высоты сжатой зоны бетона и незначительно уменьшаются ближе к нижней грани (при небольшой высоте сечения возникают деформации сжатия). После образования и раскрытия нормальных трещин (при $M = 34,08$ кН·м) в середине пролета происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны бетона в рассматриваемом сечении, как следствие, увеличение деформаций, параллельных верхним граням балки, и возрастание величины их проекции на биссектрису входящего угла. При этом отмечается, что независимо от высоты балки концентрация вертикальных деформации происходит в зоне на расстоянии 30-90 мм от верхней грани. Данное обстоятельство свидетельствует, что наибольшие вертикальные деформации возникают в центре тяжести сжатой зоны бетона и в непосредственной близости от него.

С ростом нагрузки происходит постепенное уменьшение высоты участка h_e , на котором возникают растягивающие вертикальные деформации. При увеличении высоты

сечения размер данного участка также увеличивается. На характерных этапах напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента (образование нормальных и наклонных трещин, разрушение) отношение высоты участка эпюры с вертикальными растягивающими деформациями к рабочей высоте сечения остается неизменным. На этапе перед разрушением данное отношение h_e/d сохраняется в пределах (0.58..0.62) независимо от высоты сечения балки в коньке.

Дальнейший анализ величины вертикальных растягивающих деформаций производился по высоте сечения с максимальными значениями деформаций, которая для всех трех моделей исследуемой балки находилась на расстоянии 30 мм от верхней грани (на уровне центра тяжести сжатой арматуры).

Как видно из рисунка 3 графики зависимостей «изгибающий момент – вертикальные деформации» независимо от высоты сечения имеют схожий характер. До образования нормальных трещин в середине пролета зависимости имеет линейный характер. Далее происходит скачкообразное увеличение деформаций, связанное с неравномерным перераспределением деформаций между бетоном и арматурой в растянутой зоне после появления первых трещин. На стадии стабилизации развития трещин график зависимостей (рисунок 3) приобретает более пологий наклон, и перед разрушением образца формируется ниспадающая ветвь, которая характеризует снижение вертикальных деформаций, связанное с отрывом бетона конька балки и, как следствие, уменьшением вертикальной составляющей усилия в сжатой зоне бетона.

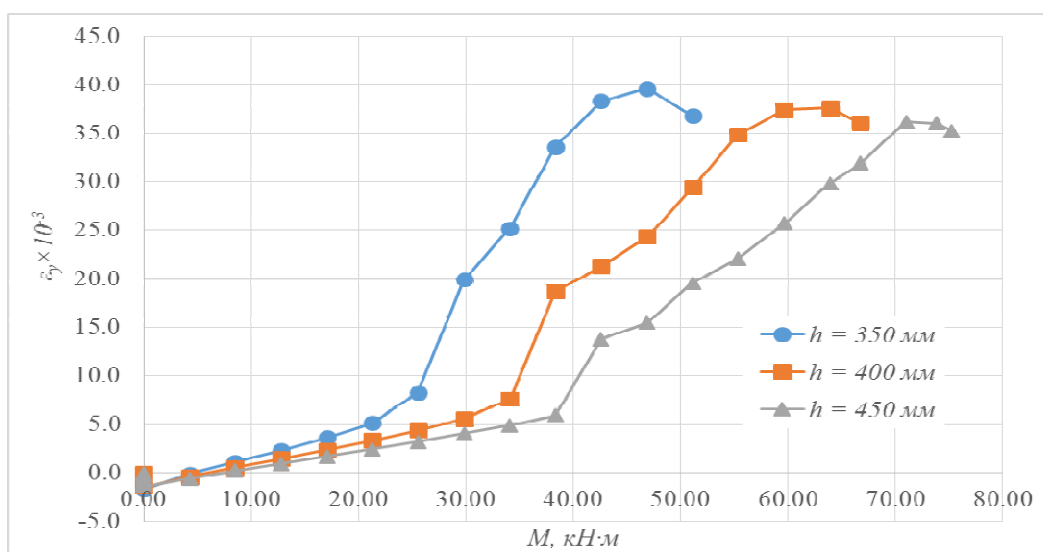


Рисунок 3 – График зависимости «изгибающий момент – вертикальные деформации»

Следует отметить, что с увеличением высоты сечения происходит снижение растягивающих деформаций, вызывающих отрыв конька. В момент образования нормальных трещин величина деформаций в балке высотой 350 мм на 8,4% больше, чем в балке с высотой сечения 400 мм и на 28,9% по сравнению с балкой высотой 450 мм. Аналогичная ситуация отмечена и на стадии, предшествующей разрушению: разница составила 5,1% и 8,6% соответственно.

Система распорок и тяжей

Гораздо больший интерес при разработке системы распорок и тяжей для рассматриваемого сечения представляет не величина деформаций и напряжений, а их ориентация. При этом предполагается, что в состоянии предельной несущей способности направление тяжей в меньшей степени будет соответствовать траекториям главных растягивающих деформаций, а в большей степени положению установленной в элементе

продольной и поперечной арматуры. Положение бетонных распорок будет определяться количеством и ориентацией трещин на этапе, предшествующем разрушению конструкции.

При разработке модели распорок и тяжей были учтены следующие требования [2, 6]:

- положение распорок и тяжей должно как можно ближе соответствовать изополям главных напряжений и деформаций;
- местоположение тяжей является центром тяжести растянутой арматуры;
- минимальный угол между наклонными распорками и тяжами, расположенными в центре тяжести растянутой арматуры, составляет 25° ;
- наиболее рациональной является модель с минимальным количеством вертикальных тяжей при их минимальной длине.

С использованием вышеуказанных требований, на основе картины трещинообразования, а также с учетом направления главных сжимающих и растягивающих деформаций были разработаны модели «распорок и тяжей» для трех вариантов исследуемой балки ломанного очертания (рисунок 4).

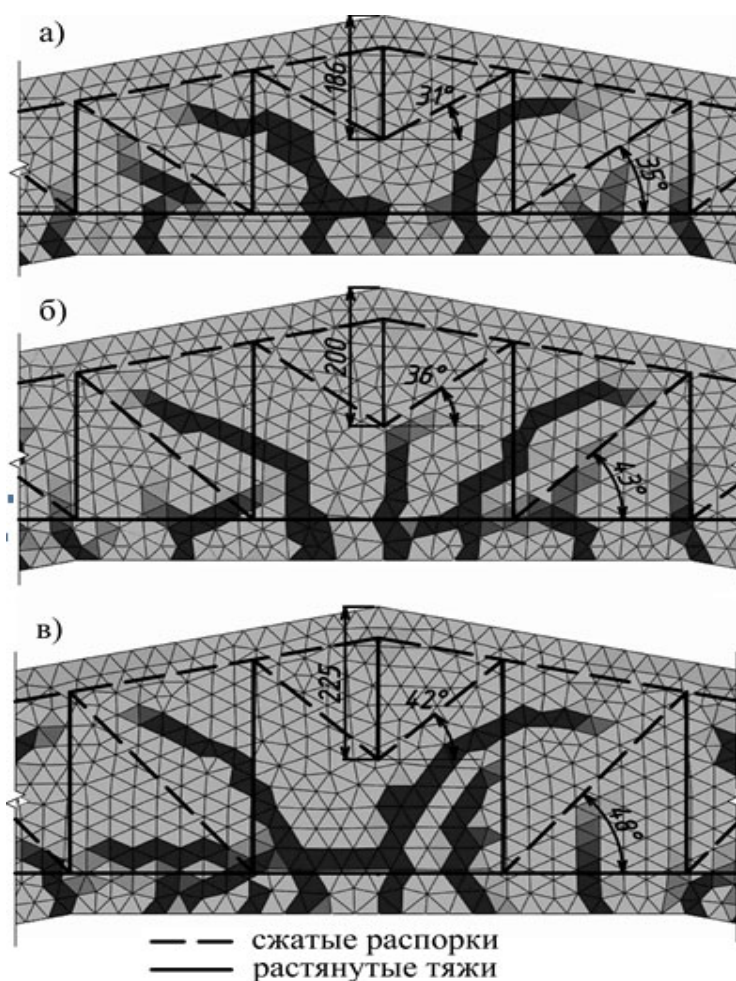


Рисунок 4 – Модель «распорок и тяжей» для исследуемой балки: а) при $h_k = 350$ мм; б) при $h_k = 400$ мм; в) при $h_k = 450$ мм

Построение модели производилось следующим образом. Первоначально сжатыми распорками был заменен бетон сжатой зоны, а растянутыми тяжами продольная рабочая арматура (включая предварительно напряженный канат). Далее по среднему углу наклона трещин были получены направления промежуточных распорок, соединяющих верхний сжатый и нижний растянутый пояса. Особое внимание было уделено определению местоположения узла соединения центрального вертикального тяжа и уравнивающих

его распорок. Более точно его положение относительно верхней грани позволил получить анализ распределения вертикальных деформаций в коньковом сечении (рисунок 2).

Угол наклона сжатых распорок постепенно увеличивается по мере удаления от конькового сечения. При этом отмечено увеличение угла наклона распорок относительно продольной оси при увеличении высоты сечения балки. При высоте сечения $h = 350$ мм угол наклона варьируется в пределах $31..35^\circ$, при $h = 400$ мм – $36..43^\circ$, при $h = 450$ мм – $42..48^\circ$.

Заключение

На основании выполненного исследования влияния ломаного очертания можно сделать следующие выводы:

1. До образования нормальных трещин в средней части пролета балки вертикальные растягивающие деформации равномерно распределяются в пределах всей высоты сжатой зоны и имеют незначительную величину в пределах $(2.1..3.5) \times 10^{-5}$.

2. После появления нормальных трещин вертикальные растягивающие деформации концентрируются в сжатой зоне бетона на участке высотой h_e , которая с ростом нагрузки постепенно уменьшается.

3. На этапе загрузки, предшествующему разрушению, отношение высоты участка с вертикальными растягивающими деформациями к рабочей высоте сечения h_e/d сохраняется в пределах $(0.58..0.62)$ независимо от высоты сечения.

4. При разработке модели «распорки и тяжи» для балок ломанного очертания необходимо учитывать, что в коньке должен быть предусмотрен тяж, сдерживающий развитие вертикальных деформаций в данном сечении.

5. При увеличении высоты сечения балки угол наклона сжатых распорок также увеличивается. При высоте сечения $h = 350$ мм угол наклона варьируется в пределах $31..35^\circ$, при $h = 400$ мм – $36..43^\circ$, при $h = 450$ мм – $42..48^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панарин Н.Я., Павлов А.П., Онуфриев Н.М. Железобетонные конструкции – М.: Высшая школа, 1971. 554 с.
2. Schlaich J., Schäfer K., Jennewein M. Towards a Consistent Design of Structural Concrete // Journal of the Prestressed Concrete Institute, May-June 1987, V.32, No3. P. 74-150.
3. Bortolotti L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension // ACI Materials Journal, Jan.-Feb., 1991, Vol. 88, № 1, P. 70-73.
4. Малиновский В.Н., Матвеевко Н.В. Эффективность железобетонных конструкций при смешанном армировании // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник научных трудов. Минск: Институт БелНИИС, 2016. Вып.8. С. 134–154. doi: 10.23746/2016-8-9.
5. Кривицкий П.В., Матвеевко Н.В. Математическая модель предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутой арматурой при различных пролетах среза // Вестник БрГТУ. Брест, 2018. № 1(109): Строительство и архитектура. С. 92–97.
6. Санникова О. Г., Тур В. В. Применение модели “распорки и тяжи” к определению сопротивления срезу железобетонных элементов, подверженных действию сосредоточенных сил // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара в 2-ух ч. Брест: БрГТУ, 2018. Ч.1. С. 232–241.

REFERENCES

1. Panarin N.Ja., Pavlov A.P., Onufriev N.M. *Zhelezobetonnyye konstrukcii* [Reinforced concrete structures] Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1971. 554 p.

2. Schlaich J., Schäfer K., Jennewein M. Towards a Consistent Design of Structural Concrete. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, May-June 1987, V.32, No3. P. 74-150.
3. Bortolotti L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension. *ACI Materials Journal*, Jan.-Feb., 1991, Vol. 88, № 1, pp. 70-73.
4. Malinovskiy V.N., Matweenko N.V. *Jefferktivnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri smeshannom armirovanii* [Efficiency of reinforced concrete structures with mixed reinforcement] *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona* [Contemporary issues of concrete and reinforced concrete] Minsk: Institut BelNIIS, 2016. Issue 8, pp. 134–154. doi: 10.23746/2016-8-9.
5. Krivitskiy P.V., Matweenko N.V. *Matematicheskaja model' predvaritel'no naprjazhennyh zhelezobetonnyh balok s pologo otognutoj armaturoj pri razlichnyh proletah sreza* [Prestressed concrete beams with flat bent-up reinforcement mathematic model] *Vestnik BSTU*, Brest, 2018. No. 1(109): Stroitel'stvo i arhitektura. pp. 92–97.
6. Sannikova O.G., Tur V.V. *Primenenie modeli "rasporki i tjazhi" k opredeleniju soprotivlenija srezu zhelezobetonnyh jelementov, podverzhennyh dejstvuju sosredotochennyh sil* [The use of models of "Sturt and Tie" to determine the resistance to shear of reinforced concrete elements exposed to concentrated forces]. *Perspektivnye napravlenija innovacionnogo razvitija stroitel'stva i podgotovki inzhenernyh kadrov* [Perspective Directions of Innovative Development of Construction Industry and Engineering Training]: *sbornik nauchnyh statej XXI Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminaru v 2-uh ch.* Brest, 2018. P.1, pp. 232–241.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеенко Никифор Викторович

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь, ассистент кафедры строительных конструкций

E-mail: nikifarych@yandex.ru

Matweenko Nikifor Viktorovich

Brest state technical university, Brest, Belarus, Assistant of Building Constructions Department

E-mail: nikifarych@yandex.ru

Малиновский Василий Николаевич

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь, профессор кафедры строительных конструкций, кандидат технических наук, доцент

E-mail: sk@bstu.by

Malinovskiy Vasiliy Nikolaevich

Brest state technical university, Brest, Belarus, Professor of Building Constructions Department, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: sk@bstu.by

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:

224023, Брест, Беларусь, ул. Московская, 340, кв. 245

8 10 375 162 25 48 90, +375 29 822 45 55