

Sergey VERNIGORA, junior researcher of the Laboratory of the survey and ensure durability of concrete and concrete structures of NIIZH named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: nk1956@yandex.ru

Владислав Владимирович Лопатинский, инженер лаборатории обследования и обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladislav LOPATINSKIY, engineer of the Laboratory of the survey and ensure durability of concrete and concrete structures of NIIZH named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: labor9@mail.ru

УДК 624.012.3/4
[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-17-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-17-29)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РАСЧЕТНОЙ ДЛИНЫ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ON THE ISSUE OF ESTIMATING THE EFFECTIVE LENGTH OF NON-CENTRALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

С. А. ЗЕНИН, канд. техн. наук
Р. Ш. ШАРИПОВ, канд. техн. наук
О. В. КУДИНОВ

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнена научно-исследовательская работа, одной из задач которой ставилось исследование влияния условий закрепления опор типа «заделка – заделка» на параметры расчетных длин железобетонных колонн с квадратным и прямоугольным поперечным сечением, назначаемых при расчете нормальных сечений по прочности. В рамках исследования дана оценка влияния различных значений и направлений углов поворота заделок и их смещений. Проведенные расчетно-теоретические исследования на основе анализа опытных данных показали, что методика определения расчетных длин, принятая в отечественных нормах, может быть усовершенствована.

По результатам исследований сформулированы предложения по учету результатов работы в действующей нормативной базе. Учитывая особенности условий закрепления рассматриваемых в работе конструкций (заделка – заделка), отвечающих характеру работы монолитных

Research work was carried out at NIIZH named after A.A. Gvozdev, one of the tasks of which was to study the influence of the conditions for stiff fixing supports on the parameters of the effective lengths of reinforced concrete columns with square and rectangular cross-sections assigned when calculating the strength of normal sections. As part of the study, the influence of different values and directions of the angles of rotation of the fixing and their displacements was evaluated. The conducted computational and theoretical studies based on the analysis of experimental data showed that the method of determining the effective lengths, adopted in domestic standards, can be improved.

Based on the results of the research, proposals were formulated to take the results of the work into account in the current regulatory framework. Taking into account the peculiarities of the conditions for fixing the structures considered in the work, which correspond to the nature of the work of monolithic columns and pylons, it is recommended to include the

колонн и пилонов. Рекомендуется включить положения предлагаемой методики в СП 430.1325800.2018, распространяющегося на монолитные конструктивные системы зданий. Подготовленные предложения по расчету предполагаются к внесению в действующие нормативные документы в качестве одного из возможных вариантов методики определения расчетной длины внецентренно сжатых элементов при расчете их по прочности.

Ключевые слова:

Внецентренно-сжатые элементы, железобетон, прочность, расчетная длина, продольная сила, устойчивость

provisions of the proposed methodology in SP 430.1325800.2018, which applies to monolithic structural systems of buildings. The prepared proposals for the calculation are supposed to be included in the current regulatory documents as one of the possible options for determining the effective length of non-centrally compressed elements when calculating their strength.

Keywords:

Effective length, longitudinal force, non-centrally compressed elements, reinforced concrete, strength, stability

В рамках первого этапа НИР был выполнен анализ отечественной [1-20] и зарубежной [21-24] научно-технической, нормативной и методической литературы для оценки современного состояния вопроса назначения расчетной длины внецентренно сжатых вертикальных железобетонных элементов, включая элементы простой прямоугольной формы с закреплениями опор типа «заделка – заделка».

На основе обзора и анализа различных отечественных и зарубежных исследований и методик норм установлено, что в целом методологический подход к назначению в них значений расчетных длин внецентренно сжатых железобетонных элементов достаточно схож. В частности, широко применима упрощенная методика, заключающаяся в назначении условных коэффициентов, вводимых к длине элементов между закреплениями. Принцип назначения условных коэффициентов в различных нормах в целом также достаточно похож друг на друга. В общем случае за основу принимается модифицированная формула Эйлера для устойчивости сжатых стержней. Также во внимание принимаются различные дополнительные факторы, такие как образование трещин в элементах, вид заделок элементов по концам, а также неупругие характеристики материалов (бетона и арматуры), как правило, дополнительно учитывают ползучесть. Необходимость учета упомянутых факторов подтверждена результатами многочисленных испытаний.

Именно сложность учета указанных факторов при определении расчетных длин сжатых железобетонных элементов обуславливает широкое применение в настоящее время упрощенных методов с введением условных коэффициентов расчетных длин. Это обстоятельство приводит к необходимости проведения поэтапных расчетов. На первом этапе таких расчетов определяют усилия в элементах конструктивной системы в предположении ее работы как линейно-деформируемой системы. Необходимость выполнения расчетов на втором этапе обусловлена значительным несоответствием принятых предпосылок (упругие деформации

и малость перемещений), характеризующих такую систему, действительным свойствам элементов в конструктивной системе. На этом этапе перераспределяют усилия и проверяют прочность каждого стержня с учетом пластических свойств и гибкости. При перераспределении усилий руководствуются эмпирическими правилами, учитывающими характер разрушения критических сечений, высоту сжатой зоны, свойства применяемой арматуры.

Получить более точное решение для железобетонных конструктивных систем можно методами нелинейной строительной механики, свободной от указанных предпосылок и основанной на нелинейных зависимостях σ - ϵ . Широко применяемый в настоящее время метод конечных элементов (МКЭ) совместно с методом последовательных приближений по уточнению характеристик элементов в целом позволяет выполнить расчет по деформированной схеме. Однако точный расчет конструкций при помощи МКЭ в рамках всей конструктивной системы здания по деформированной схеме с учетом возможных упругопластических деформаций также весьма затруднителен. Трудности связаны с необходимостью учета большого числа уже описанных здесь факторов, характеризующих физическую и геометрическую нелинейность, учета изменения их от величины нагрузки, учета изменения самой нагрузки во времени.

Таким образом, для практического применения, безусловно, необходимы и упрощенные методики расчета, известные как в отечественной нормативной базе, так и в зарубежной. При этом очевидно, что усредненные значения расчетных длин, полученные по таким методикам, не могут с одинаковой достоверностью учитывать влияние различных встречающихся в проектной практике комбинаций нагружений и схем опирания железобетонных элементов.

С учетом изложенного видно, что практические рекомендации по определению расчетных длин сжатых железобетонных элементов нуждаются в дальнейшем совершенствовании и развитии в отношении более полного учета действительной работы элементов конструкций и условий их нагружения.

Действующий отечественный нормативный документ СП 63.13330.2018 [1] содержит различные методики расчета гибких сжатых элементов: расчет по предельным усилиям и расчет по деформационной модели. Кроме того, в указанном СП также содержится упрощенная методика расчета прочности гибких сжатых элементов прямоугольного сечения с симметрично расположенной арматурой при малом начальном эксцентриситете и при малой гибкости элемента. Во всех приведенных методиках параметр расчетной длины учитывается в явном виде или косвенно.

Следует отметить, что методика определения расчетной длины, принятая в СП 63.13330.2018 [1], в достаточной степени гармонизируется с методиками, принятыми в европейских и американских нормативных документах – Eurocode-2 [21] и ACI 318 [22], где параметр расчетной длины также учитывает факторы ползучести, нелинейной работы материалов, образования трещин и условия закрепления. Проанализированные зарубежные нормативные документы, как и СП 63.13330.2018 [1], содержат упрощенные методики определения расчетных длин внецентренно сжатых элементов, в которых также используют условные коэффициенты, полученные эмпирическим путем и вводимые к длине элемента.

Как показал проведенный анализ, методика действующего СП 63.13330.2018 [1] по расчету внецентренно сжатых элементов по прочности обладает следующими преимуществами:

– содержит указания к расчету по деформированной схеме, в которой не применяется параметр расчетной длины, т. к. усилия в элементе определяют сразу с учетом деформированного состояния;

– включает в себя упрощенный расчет для практических применений, в котором влияние продольного изгиба на действующие усилия определяют с введением коэффициента продольного изгиба, значение которого зависит от параметра расчетной длины. Расчетная длина в данном случае назначается в осторожность с учетом условий закрепления опор;

– для малых эксцентриситетов и гибкостей методика включает в себя еще более простой инженерный расчет прочности, в котором параметр расчетной длины учитывается косвенно – при определении гибкости;

– в достаточной степени гармонизирована с положениями зарубежных нормативных документов (европейских и американских).

При этом можно отметить, что методика СП 63.13330.2018 [1] также имеет отдельные недостатки:

– положения по расчету по деформированной схеме имеют только общий характер и не детализированы, что затрудняет их применение на практике;

– значения коэффициентов расчетных длин элементов имеют фиксированные значения для различных условий закрепления опор, на которые не оказывают влияние величина углов поворотов и их смещений.

На дальнейших этапах работы были выполнены дополнительные расчетно-теоретические исследования по данному вопросу, в том числе с учетом уже имеющихся данных экспериментальных исследований. В качестве упомянутых данных были выделены экспериментальные результаты, приведенные в работе Чистякова Е.А. [13]. Была выполнена оценка поведения внецентренно сжатых элементов (стержней) с различными условиями закрепления опор, которая показала, что на параметр расчетной длины оказывают влияние такие факторы как гибкость элемента λ , жесткость элемента D , несущая способность нормального сечения M_{ult} , а также величина, направление и соотношение углов поворота заделок φ_1 и φ_2 . Расчетные исследования выполнялись для железобетонных элементов колонн с различными размерами поперечных сечений (соотношением сторон) и гибкостями элементов. Учитывались и различные классы бетона и содержание арматуры, а также различные значения нагрузок.

Анализ результатов проведенных расчетно-теоретических исследований расчетов был выполнен с целью выявления наиболее существенных факторов, влияющих на коэффициент расчетной длины k_0 , и последующей корректировки имеющейся в нормативных документах методики ее определения.

Из анализа полученных результатов расчетов и проведенных экспериментов установлено, что на коэффициент расчетной длины k_0 наибольшее влияние оказывают три фактора: величина и направление углов поворота заделок φ_1 и φ_2 , эквивалентная жесткость стержня в предельном состоянии B_3 и его гибкость λ .

Также одним из существенных факторов является некоторый характерный угол поворота заделки α , при котором происходит изменение напряженного состояния стержня. Величина этого характерного угла поворота заделки α также зависит от вышеуказанных параметров, включая соотношение углов поворота заделки φ_2/φ_1 и их направления один относительно другого. Как показал анализ результатов опытных данных [13], значение угла α может быть установлено исходя из сопоставления работы стержня с двумя заделками с работой стержня с граничными условиями типа заделка/шарнир или шарнирно опертым стержнем при определенных условиях. При этом расчетная длина стержня будет определяться длиной фрагмента стержня между точками нулевых моментов. Именно этот участок стержня будет

характеризовать его общую несущую способность. Однако опыты показали, что установить точное значение угла α , характеризующего переход из одного напряженно-деформированного состояния стержня в другое, достаточно сложно и трудоемко. Кроме того, изменение напряженного состояния стержня может происходить не только при повороте одной из заделок на угол α , но и при достижении углом поворота второй заделки некоторого угла α_1 , что также необходимо учитывать при определении коэффициента расчетной длины. Таким образом, представляется необходимой некоторая упрощенная оценка величины характерного угла поворота α для обеих заделок.

По результатам расчетно-теоретического анализа опытных данных было предложено ввести отдельные уточнения к величинам упрощенных коэффициентов расчетных длин элементов, приведенных в действующих нормативных документах.

Как показали опытные исследования, в качестве основных факторов, влияющих на расчетную длину стержня с граничными условиями типа «заделка – заделка», являются его гибкость λ , жесткость D , несущая способность M_{ult} , а также величина, направление и соотношение углов поворота заделок φ_1 и φ_2 . По результатам проведения дополнительных исследований установлено, что одними из основных из числа указанных факторов являются углы поворота заделок φ_1 и φ_2 , их направление и абсолютное соотношение их значений. В связи с этим предлагается при определении расчетных длин таких внецентренно сжатых элементов учитывать в первую очередь углы поворота заделок. Взаимное смещение заделок Δ в направлении, перпендикулярном оси стержня (в горизонтальном направлении), как показали опытные исследования [13], дают результаты, аналогичные получаемым при равнозначных углах поворота заделок φ_1 и φ_2 , что также можно учесть.

Как указывалось выше, в проведенной НИР были рассмотрены стержни прямоугольного поперечного сечения с опорами типа «заделка – заделка», предусматривающие возможность смещения, а также поворота заделок.

Применение результатов рассматриваемых исследований предлагается выполнить в виде дополнительной к имеющейся в СП 63.13330.2018 [1] методике определения коэффициентов расчетной длины k_0 введением отдельных зависимостей.

При этом, учитывая особенности конструктивных решений стержней и их граничных условий, рассмотренные в данном исследовании, вводить указанные зависимости рекомендуется в СП 430.1325800.2018 [25] так как разработанная методика предлагается как дополнительная (уточняющая).

Положения уточняющей методики рекомендуется распространить в первую очередь на железобетонные колонны с прямоугольным поперечным сечением, постоянным по высоте, выполненные из тяжелого железобетона с классами по прочности не выше В60, что отвечает результатам проведенных исследований.

В качестве исходных данных для расчетов по предлагаемой методике будут выступать следующие параметры:

- размеры поперечного сечения элемента (b, h);
- длина элемента (l);
- условия закрепления (заделка – заделка);
- угол поворота каждой из заделок и его направление ($\pm\varphi$);
- гибкость элемента (λ).

Указанные параметры играют ключевую роль при определении коэффициента расчетной длины элемента. При этом элемент рассматривается как выделенный из общей конструктивной системы, опирание которого удовлетворяет условиям «заделка – заделка».

Порядок расчета по методике предлагается следующий.

Из общей конструктивной системы выделяется конкретный элемент (колонна, пилон).

Для выделенного элемента устанавливаются уже указанные параметры. При этом геометрические характеристики (b , h , l), условия закрепления обусловлены принятыми конструктивными решениями. Углы поворота заделок φ_1 и φ_2 и их направление принимают по результатам расчета элемента в рамках общей конструктивной системы. При этом принимают условно $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_1 \geq |\varphi_2|$.

По значениям параметров с учетом взаимного направления углов поворота заделок φ_1 и φ_2 определяют условный критический угол α , значение которого сравнивают с максимальным углом поворота заделок φ_1 . В зависимости от результатов сравнения выбирают конкретную зависимость для определения коэффициента расчетной длины k_0 , полученную по результатам исследований.

Описанный порядок выполнения расчетов по предложенной методике может быть сформулирован в виде следующих положений.

Для элементов с несмещаемыми податливыми заделками на двух концах (допускающими ограниченный поворот), а также для элементов с ограниченно смещаемыми жесткими заделками на двух концах (без поворота) коэффициенты расчетной длины допускается определять по следующей методике.

Значение расчетной длины элементов l_0 постоянного поперечного сечения по длине l при действии продольной силы принимают равной

$$l_0 = l \cdot k_0, \quad (1)$$

где l – длина элемента между опорами;

k_0 – коэффициент расчетной длины, определяемый в зависимости от величины и направления углов поворота заделок φ_1 и φ_2 (где $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_1 \geq |\varphi_2|$) и условных критических углов поворота заделки α и α_1 .

Углы поворота заделок φ_1 и φ_2 , а также их направление допускается устанавливать по результатам расчета выделенного элемента в рамках расчета общей конструктивной системы, размерность угла – в минутах.

При определении коэффициента расчетной длины учитывают значения условных критических углов поворота заделки α и α_1 , соответствующих разным направлениям поворота и при превышении которых происходит изменение напряженно-деформированного состояния стержня.

При разнозначных углах поворота заделок φ_1 и φ_2 значение условного критического угла α определяют по формулам:

$$\begin{aligned} \text{при } \lambda \leq 25 \quad \alpha &= 0,004\lambda \left((\lambda - 0,6) \left(\frac{|\varphi_2|}{\varphi_1} + 2 \right) - 10 \right) \frac{b}{h}; \\ \text{при } \lambda > 25 \quad \alpha &= 0,28 \left((\lambda + 4) \left(0,2 \frac{|\varphi_2|}{\varphi_1} + 1 \right) - 14 \right) \frac{b}{h}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значение коэффициента расчетной длины элемента k_0 принимают равным:

при $\varphi_1 \leq \alpha$

$$k_0 = 0,18 \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\alpha} - 0,14 \frac{\varphi_1 \varphi_2}{\alpha^2} + 0,5 \geq 0,5; \quad (3)$$

при $\varphi_1 > \alpha$ определяют дополнительный условный угол поворота α_1 :

$$\alpha_1 = 0,5 \left(\varphi_1 + 0,34 \frac{b}{h} (\lambda - 7,5) \right). \quad (4)$$

Значение коэффициента расчетной длины элемента k_0 принимают в зависимости от соотношения углов поворота φ_2 и α_1 :

$$\text{при } \varphi_2 \leq \alpha_1 \quad k_0 = 0,68 - 0,32 \frac{\varphi_2}{\alpha_1}; \quad (5)$$

$$\text{при } \varphi_2 > \alpha_1 \quad k_0 = 1,0 \quad (6)$$

При равнозначных углах поворота заделок φ_1 и φ_2 значение условного критического угла α определяют по формулам:

$$\text{при } \lambda \leq 25 \quad \alpha = \left(\frac{\lambda}{40} \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} - 2 \right) - \frac{\lambda^2}{200} \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} - 1,6 \right) \right) \frac{b}{h}; \quad (7)$$

$$\text{при } \lambda > 25 \quad \alpha = (\lambda - 16) \left(0,43 - 0,27 \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right) \frac{b}{h}.$$

Значение коэффициента расчетной длины элемента k_0 принимают равным при $\varphi_1 \leq \alpha$ – по формуле (3), при $\varphi_1 > \alpha$ – по формуле

$$k_0 = 0,68 - 0,18 \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \geq 0,5. \quad (8)$$

В зависимостях (2) – (5) значения углов поворота принимают с учетом знаков. В зависимостях (2), (4) и (7) соотношение $b/h \leq 1$, а гибкость элемента λ принимают равной

$$\lambda = \frac{l}{h}. \quad (9)$$

Для верификации предложенной методики был выполнен сравнительный анализ с существующей методикой СП 63.13330.2018 [1]. Сравнение было выполнено как для разнозначных углов поворота заделок, так и для равнозначных.

Для удобства сравнения примем соотношения углов поворота равными $\varphi_2/\varphi_1 = k_\varphi$ и $\varphi_1/\alpha = k_\alpha$ и, учитывая соответствующие знаки углов поворота, получаем для условия $\varphi_1 \leq \alpha$ зависимость (3) в виде

$$k_0 = 0,18 k_\alpha (1 + k_\varphi) + 0,14 k_\varphi k_\alpha^2 + 0,5 \geq 0,5. \quad (10)$$

Для условия $\varphi_1 > \alpha$ примем соотношение углов равным $\varphi_2/\alpha_1 = k_{\alpha 1}$, тогда выражение (5) с учетом знака угла поворота заделки для определения коэффициента расчетной длины примет вид

$$k_0 = 0,68 + 0,32 k_{\alpha 1}. \quad (11)$$

Графическое сравнение значений коэффициентов расчетной длины k_0 при различных значениях коэффициентов k_φ и k_α , полученных по предлагаемой методике при $\varphi_1 \leq \alpha$, а также по методике СП 63.13330.2018 [1] приведены на рис. 1. Как видно, в зави-

симости от соотношения угла поворота заделок, а также соотношения наибольшего угла поворота заделок φ_1 к условному углу α , параметры расчетной длины по предлагаемой методике отличаются от указаний СП 63.13330.2018 [1] как в меньшую сторону (до 60%), так и в большую – до 25%.

На рис. 2 в графическом виде показан сравнительный анализ коэффициента расчетной длины, полученного по предлагаемой методике при $\varphi_1 > \alpha$ и по методике СП 63.13330.2018 [1]. Из сравнения видно, что при соотношении фактического угла поворота и условного угла $\varphi_2/\alpha_1 < 0,8$ коэффициент расчетной длины по предлагаемой методике имеет линейную зависимость в пределах от $k_0 = 0,68$ до $k_0 = 1,0$. Значение коэффициента расчетной длины согласно СП 63.13330.2018 [1] $k_0 = 0,8$ в данном случае является некоторым усредненным значением. При увеличении соотношения φ_2/α_1 , т. е. при больших углах поворота заделки по предлагаемой методике коэффициент расчетной длины выше на 25%, чем по СП 63.13330.2018 [1].

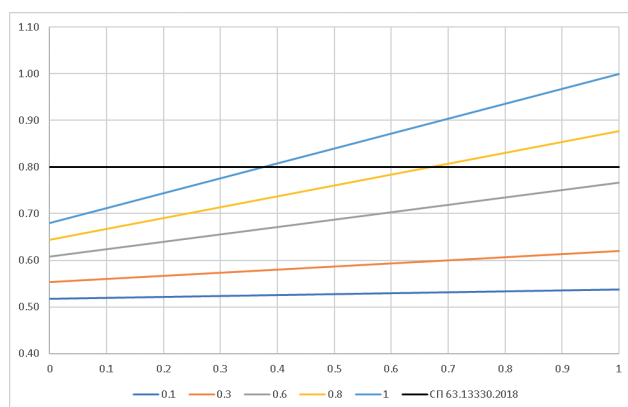


Рис. 1. Сравнение значений коэффициента расчетной длины k_0 по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 для элементов с несмещающимися податливыми заделками на двух концах (допускающими ограниченный поворот) при различных углах поворота заделок при $\varphi_1 \leq \alpha$

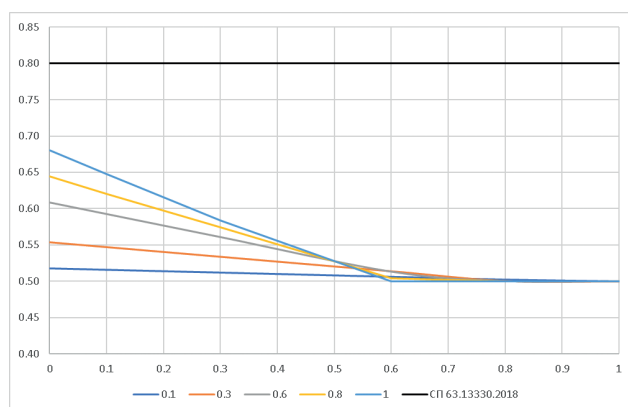


Рис. 2. Сравнение значений коэффициента расчетной длины k_0 по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 для элементов с несмещающимися податливыми заделками на двух концах (допускающими ограниченный поворот) при различных углах поворота заделок при $\varphi_1 > \alpha$

Для равнозначных углов поворота заделок, принимая соотношения углов поворота равными $\varphi_2/\varphi_1 = k_\varphi$ и $\varphi_1/\alpha = k_\alpha$, получаем для условия $\varphi_1 \leq \alpha$ зависимость (3) в виде

$$k_0 = 0,18k_\alpha(1 - k_\varphi) - 0,14k_\varphi k_\alpha^2 + 0,5 \geq 0,5. \quad (12)$$

Для условия $\varphi_1 > \alpha$ выражение (8) для определения коэффициента расчетной длины примет вид

$$k_0 = 0,68 - 0,18k_\varphi. \quad (13)$$

Графическое сравнение значений коэффициентов расчетной длины k_0 при различных значениях коэффициентов k_φ и k_α , полученных по предлагаемой методике при $\varphi_1 \leq \alpha$ для равнозначных углов поворота заделок, а также по методике СП 63.13330.2018 [1] приведено на рис. 3. На рис. 4 дан сравнительный графический анализ значений коэффициента расчетной длины k_0 при равнозначных углах поворота заделок при $\varphi_1 > \alpha$.

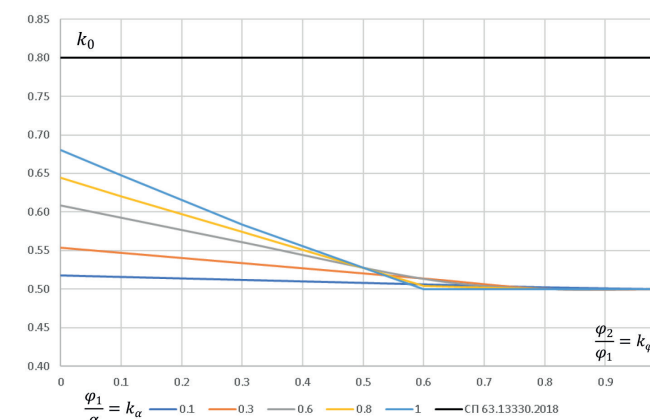


Рис. 3. Сравнение значений коэффициента расчетной длины k_0 по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 для элементов с несмещающимися податливыми заделками на двух концах (допускающими ограниченный поворот) при равнозначных углах поворота заделок при $\varphi_1 \leq \alpha$

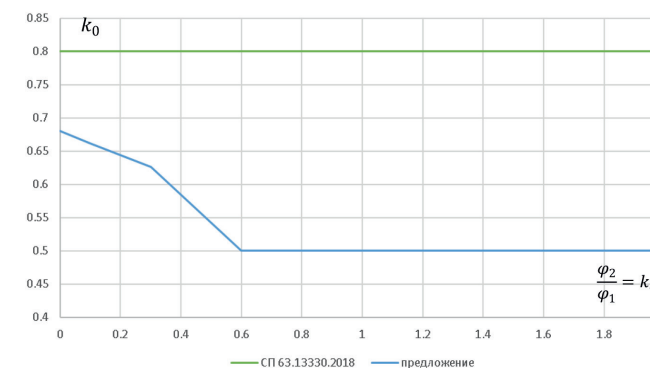


Рис. 4. Сравнение значений коэффициента расчетной длины k_0 по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 для элементов с несмещающимися податливыми заделками на двух концах (допускающими ограниченный поворот) при равнозначных углах поворота заделок при $\varphi_1 > \alpha$

Как видно, в зависимости от соотношения угла поворота заделок, а также соотношения наибольшего угла поворота заделок φ_1 к условному углу α коэффициенты расчетной длины k_0 по предлагаемой методике отличаются от указаний СП 63.13330.2018 [1] в меньшую сторону на 17-60%.

Значение расчетной длины в явном виде оказывает влияние на несущую способность гибкого внецентренно-сжатого элемента, поэтому полученные отклонения в коэффициенте расчетной длины k_0 по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 [1] требуют дополнительной оценки в отношении их влияния на прочность нормальных сечений, что также было выполнено.

Как показали результаты сравнительного анализа, при невысокой прочности бетона в целом наблюдается удовлетворительная сходимость результатов, особенно при малых гибкостях стержней. Значение несущей способности согласно СП 63.13330.2018 [1] не зависит от значений и направления углов поворота. Ввиду учета углов поворота в предлагаемой методике коэффициент расчетной длины k_0 изменяется с увеличением углов поворота в заданных пределах, что согласуется с результатами натурных экспериментов. Также при увеличении углов поворота по предлагаемой методике происходит изменение (снижение) условной критической силы N_{cr} , что приводит к снижению несущей способности по сравнению со значениями по СП 63.13330.2018 [1]. При углах поворота, близких к условным критическим ($\varphi=\alpha$), а также при продольных усилиях, близких к условным критическим N_{cr} , значение несущей способности снижается, что в целом логично. С увеличением гибкости ($\lambda \geq 25$) при малых процентах армирования (0,39-0,785%) наблюдается тенденция, когда при малых углах поворота несущая способность по предлагаемой методике выше от 25% до 1,8 раз. Причем, как показал сравнительный анализ, с увеличением содержания арматуры (2,5-5%) указанная разница нивелируется до 9-28%. При величине продольной силы, близкой к условной критической N_{cr} , значения несущей способности по СП 63.13330.2018 [1] выше в разы, чем по предлагаемой методике, что может быть связано с тем, что по предлагаемой методике в данном случае значение условной критической силы N_{cr} снижается.

Сравнительный анализ несущих способностей при более высоких классах бетона показал, что в целом результаты похожие.

Дополнительно была проведена оценка несущей способности, определяемой согласно СП 63.13330.2018 [1] и по предлагаемой методике для испытанных образцов по работе [13]. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 1. Как видно, и методика СП 63.13330.2018 [1], и предлагаемая методика показывают весьма хорошую сходимость с опытными данными. Обе методики дают в целом достаточно осторожные решения по сравнению с опытными данными. При этом в отдельных случаях сходимость предлагаемой методики с опытными данными несколько выше.

Следует отметить, что сформулированные предложения касаются методики определения расчетной длины для расчета внецентренно сжатых железобетонных элементов по прочности. Влияние закрепления опор в ортогональном направлении может быть учтено посредством расчета прочности по деформационной модели, в которой значения изгибающих моментов при расчете по недеформированной схеме определяют с учетом влияния соответствующих прогибов.

Таблица 1
Результаты сравнительного анализа несущей способности внецентренно сжатых гибких элементов с определением коэффициента расчетной длины по предлагаемой методике и по методике СП 63.13330.2018 [1] для опытных образцов по работе [13]

Образец по [18]	b	h	a	a'	l	R_b	E_b	R_s	R_{sc}	E_s	A_s	A_s'	φ_1	φ_2	h_0	λ	N	x	x_r	x	$\frac{e_0}{h}$	I_b	I_s
	мм	мм	мм	мм	м	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	мм ²	мм ²	мин	мин	мм		кН	мм	мм	мм		м ⁴	м ⁴
КГ-43-1	113	245	18	18	4.0	30.0	32609	425	425	200000	230	230	0.00	0.00	227	16.3	746	220	121	185	0.15	0.000138	0.000005
КГ-43-2	114	245	18	18	4.0	31.5	33158	432	432	200000	230	230	21.50	-7.16	227	16.3	780	217	121	184	0.15	0.000140	0.000005
КГ-43-3	112	242	18	18	4.0	31.7	33229	430	430	200000	230	230	98.00	-8.00	224	16.5	645	182	119	160	0.15	0.000132	0.000005
КГ-43-4	115	245	30	30	4.0	31.7	33229	436	436	200000	230	230	97.00	0.00	215	16.3	750	206	115	173	0.15	0.000141	0.000004
КГ-43-5	110	245	17	17	4.0	32.0	33333	430	430	200000	230	230	52.00	52.00	228	16.3	885	251	122	207	0.15	0.000135	0.000005
КГ-43-6	113	247	17	17	4.0	32.0	33333	420	420	200000	230	230	69.00	-22.00	230	16.2	750	207	123	179	0.15	0.000142	0.000005

			СП 63					предложение								
Образец по [18]	B_s	D	k_0	N_{cr}	η	e	N_{ult}	α	k_0	N_{cr}	η	e	N_{ult}	$\frac{N_{ult,СП63}}{N_{ult,пред}}$	$\frac{N_{on}}{N_{ult,СП63}}$	$\frac{N_{on}}{N_{ult,пред}}$
														кН	мм	кН
КГ-43-1	3455	2209	0.8	2129	1.54	161.1	651	0.65	0.50	5449	1.16	147.1	713	0.91	1.15	1.05
КГ-43-2	3478	2247	0.8	2166	1.56	161.9	679	11.45	0.79	2241	1.53	160.9	684	0.99	1.15	1.14
КГ-43-3	3313	2148	0.8	2071	1.45	155.7	656	49.71	0.71	2658	1.32	150.9	677	0.97	0.98	0.95
КГ-43-4	3320	2112	0.8	2036	1.58	150.7	661	49.20	0.68	2817	1.36	142.6	699	0.95	1.13	1.07
КГ-43-5	3401	2215	0.8	2135	1.71	168.3	663	0.18	0.50	5464	1.19	149.4	747	0.89	1.34	1.18
КГ-43-6	3552	2307	0.8	2224	1.51	162.4	687	35.18	0.78	2327	1.48	161.2	692	0.99	1.09	1.08

Заключение

В рамках работы на основе предварительного анализа состояния исследуемой проблемы выполнены соответствующие расчетно-теоретические исследования по назначению расчетной длины внецентренно сжатых вертикальных железобетонных элементов, включая элементы простой прямоугольной формы с закреплениями опор типа «заделка – заделка». Сформулированы основные предпосылки для проведения расчетных исследований, выбраны наиболее подходящие критерии для анализа результатов выполненных расчетов, установлены наиболее подходящие опытные данные для верификации результатов расчетов, а также выполнены непосредственно сами расчетные исследования.

Полученные результаты расчетно-теоретических исследований были детально проанализированы и сопоставлены с опытными данными. На основе полученных результатов расчетно-теоретических исследований и их анализа при выполнении НИР разработаны предложения по уточнению методики назначения параметров расчетных длин внецентренно сжатых элементов с условиями закрепления опор типа «заделка – заделка» при расчете по прочности. Проведенные верификационные расчеты показали в целом хорошую сходимость предлагаемой методики с результатами опытных данных.

По результатам описанной работы сформированы предложения по применению результатов НИР в отечественной нормативной базе, среди которых можно отметить рекомендации

по учету результатов работы в СП 430.1325800.2018 [25], для чего сформулированы конкретные предложения. Также необходимо отметить целесообразность выполнения дальнейших дополнительных научных поисковых работ в виде НИР и НИОКР, направленных на развитие результатов, полученных в рассмотренной работе, и совершенствование нормативной базы.

Список литературы

1. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
2. СНиП II-21-75 Бетонные и железобетонные конструкции.
3. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции.
4. СНиП II-B.1-62 Бетонные и железобетонные конструкции.
5. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. – М.: Стройиздат. – 1949. – 280 с.
6. Гвоздев А.А. Метод предельного равновесия в применении к железобетонным конструкциям // Инженерный сборник, 1949. – Том 5, Вып. 2. – С. 3-20.
7. Байков В.Н., Горбатов С.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1977. №6. – С. 15-18.
8. Гуца Ю.П., Лемыш Л.Л. Расчет деформаций конструкций на всех стадиях при кратковременном и длительном нагружении // Бетон и железобетон. – 1985. – №11. – С. 13-16.
9. Васильев Б.Ф., Розенблюм А.Я. Железобетонные колонны одноэтажных производственных зданий. – М.: Стройиздат, 1974. – 195 с.
10. Гвоздев А.А., Чистяков Е.А., Шубик А.В. Исследование деформаций и несущей способности гибких сжатых железобетонных элементов с учетом длительного действия нагрузки. – М.: НИИЖБ, 1971. – 202 с.
11. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / Под ред. А.А. Гвоздева. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
12. Чистяков Е.А., Шубик А.В. Деформации гибких железобетонных колонн при различном опирании // Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1979. – С. 83-93.
13. Чистяков Е.А. Основы теории, методы расчета и экспериментальные исследования несущей способности сжатых железобетонных элементов при статическом нагружении. Дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1988. – 638 с.
14. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения.
15. Нисканен И.А. Исследование работы гибких сжатых железобетонных элементов при различных схемах опирания. Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 156 с.
16. Чистяков Е.А., Нисканен И.А. Расчет гибких сжатых железобетонных стержней с приближенной оценкой изменения кривизны по их длине / Влияние скорости нагружения, гибкости и крутящих моментов на прочность железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1970. – С. 111-126.
17. СП 356.1325800.2017 Конструкции каркасные железобетонные сборные многоэтажных зданий. Правила проектирования.

18. СП 355.1325800.2017 Конструкции каркасные железобетонные сборные одноэтажных зданий производственного назначения. Правила проектирования.

19. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003).

20. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции».

21. EN 1992-1-1 Eurocode-2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings.

22. ACI 318M-14 Building Code Requirements for Structural Concrete.

23. fib Model Code 2010.

24. ACI SP-17(14) The Reinforced Concrete Design Handbook. A Companion to ACI 318-14.

25. СП 430.1325800.2018 Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования.

Информация об авторах/Information about authors

Сергей Алексеевич ЗЕНИН, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey ZENIN, Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of reinforced concrete and constructive systems of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: lab01@mail.ru

тел.: +7(499) 174-75-17

Равиль Шамильевич ШАРИПОВ, канд. техн. наук, заместитель директора НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ravil SHARIPOV, Ph. D. (Engineering), Deputy Director of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: wander-er1@yandex.ru

тел.: +7(499) 174-75-10

Олег Владимирович КУДИНОВ, заместитель заведующего лабораторией теории железобетона и конструктивных систем НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Oleg KUDINOV, Deputy Head of the Laboratory of the Theory of reinforced concrete and constructive systems of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: lab01@mail.ru

тел.: +7(499) 174-75-17