УДК 539.4

© Н. А. Евсеев, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: 3763380@gmail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-66-70

© N. A. Evseev, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: 3763380@gmail.ru

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ

ACCOUNTING OF PHYSICAL NONLINEARITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AT COMPUTATION OF STRUCTURAL SYSTEMS

Рассматривается определение величин понижающих коэффициентов жесткости упругого конечного элемента, позволяющих учесть физически нелинейную работу железобетона, из решения задач о нелинейном деформировании железобетонных конструкций. Выявлено несоответствие значений понижающих коэффициентов, указанных в СП 52-103-2007, полученным по результатам численной оценки.

Ключевые слова: физическая нелинейность железобетона конструкций, численный анализ конструктивных систем.

The paper presents the analysis results of decreasing rigidity coefficient values of the elastic finite element, which allows calculating the physically nonlinear performance of reinforced concrete, solving the tasks on nonlinear deformation of reinforced concrete designs. The author indicates that the values of the decreasing coefficients offered by the SP 52-103-2007 standard do not correspond to the results of the computation calculation.

Keywords: physical nonlinearity of reinforced concrete structures, numerical analysis of structural systems.

В настоящее время наиболее передовым методом расчета конструктивных систем зданий является расчет в пространственной постановке, учитывающий работу надземных и подземных конструкций совместно с грунтовым основанием, позволяющий наиболее корректно оценить перераспределение усилий, действующих в элементах конструктивной системы, и оценить ее деформации. Значимости подобного подхода к расчетам конструктивных схем зданий посвящено множество работ [5–9]. При этом для железобетонных конструкций здания, так же как и его основания, характерна физическая нелинейность, связанная с образованием и развитием трещин в бетоне, явлениями ползучести и усадки бетона, нарушением сцепления арматуры с бетоном [4].

В практике проектирования учет нелинейности железобетона выполняется в два этапа [1].

На первой стадии расчета конструктивной системы, когда армирование неизвестно, используются упругие конечные элементы, а нелинейная работа железобетона учитывается путем понижения их жесткостей с помощью условных коэффициентов. На следующей стадии определяется конкретное армирование элементов конструкции и выполняются расчеты деформаций с учетом физической нелинейности в соответствии с требованиями норм. При этом ввиду сложности и длительности нелинейного совместного расчета здания с основанием, зачастую несовместимого с темпом процесса проектирования, задача нелинейного расчета здания обычно ограничивается нелинейными расчетами по деформациям отдельных конструктивных элементов. Оценкой перераспределения усилий в конструкциях за счет нелинейной работы железобетона здания в целом пренебрегают, учитывая ее исключи-

тельно путем понижения их жесткостей с помощью понижающих коэффициентов. В нормах СП 52-103-2007 при расчете деформаций конструкций в первом приближении значения понижающих коэффициентов относительно начального модуля упругости бетона с учетом длительности действия нагрузки приняты: для вертикальных несущих элементов — 0,6, а для горизонтальных — 0,2 при наличии трещин или 0,3 при их отсутствии. При этом нужно помнить, что распределение усилий в элементах конструктивной системы существенно зависит от соотношения жесткостей ее элементов, а величина деформаций конструкций зависит напрямую от значения жесткостных характеристик железобетонных элементов. Поэтому вопрос корректного учета понижающих коэффициентов жесткости железобетонных конструкций является крайне актуальным и нуждается в исследовании. Однако, несмотря на важность задачи нахождения адекватных величин подобных коэффициентов для возможности аналитического моделирования нелинейной работы железобетонных конструкций, а также совместных численных расчетов сложных конструктивных схем, о чем упоминается в различных работах [2, 10, 11], формулы их аппроксимации не предложены в нормативных документах и научной литературе.

Рассмотрим более подробно определение жесткости упругого конечного элемента из решения задач о нелинейном деформировании железобетонных конструкций. Коэффициент снижения жесткости в этом случае можно определить путем сравнения величины деформаций в расчетной схеме с использованием упругой и физически нелинейной модели работы железобетона. Отношение величин деформаций в этом случае будет определять величину понижающего коэффициента: $K = \Delta_{\text{упр}} / \Delta_{\text{физ.нел}}$.

Проведем подобную оценку в программном комплексе (ПК) Lira 11.3 для сжато-изгибаемого элемента. Общий вид расчетной схемы приведен на рис. 1. Для учета физической нелинейности бетона используем экспоненциальный вариант аппроксимации кривой деформирования бетона, предложенный в ПК Lira 11.3 (рис. 2, график 3), с учетом модуля деформации бетона при продолжительном действии нагрузки согласно СП 63.13330 по формуле

$$E_{b,\tau} = E_b / (1 + \varphi_{b,cr}).$$

где E_b — начальный модуль упругости бетона; $\varphi_{b,cr}$ — коэффициент ползучести бетона.

В расчетах принимался класс прочности бетона В20. В качестве расчетной диаграммы деформирования арматуры класса по прочности А400 с физическим пределом текучести в соответствии с рекомендациями СП 63.13330 используем билинейную диаграмму (рис. 3). Армирование симметричное. Процент армирования $\mu = 1,3$ %. Для задачи с упругой моделью работы железобетона принят начальный модуль деформации бетона $E_b = 27\,500$ МПа.

График предельных значений внутренних усилий M , кН · м, и N , кН, при сжатии для рассматриваемого сечения представлен на рис. 4.

По результатам расчетов была построена диаграмма зависимости величины понижающего коэффициента изгибной жесткости сечения от величины силовых факторов N и M (рис. 5, 6). На рис. 6 представлены сечения данной диаграммы при разных процентах армирования ($\mu = 1,31$ %, $\mu = 1,89$ %, $\mu = 2,23$ %), сечение 1 (рис. 6, а), сечение 2 (рис. 6, б), сечение 3 (рис. 6, в).

По результатам анализа диаграммы можно сделать следующие выводы. Рекомендации СП 52-103-2007 по предварительному назначению жесткостей элементов в ряде случаев, выявленных в численных экспериментах, существенно отличаются от полученных в результате моделирования нелинейной работы железобетона.

Рис. 1. Расчетная схема сжато-изгибаемого элемента

Рис. 2. Билинейная (график 1), трехлинейная (график 2) диаграммы аппроксимации кривой деформирования сжатого и растянутого бетона по СП 63.13330 и экспоненциальная диаграмма деформирования бетона с учетом ползучести (график 3)

Рис. 3. Билинейная диаграмма деформирования арматуры

В результате эти рекомендации ведут к завышению жесткости вертикальных несущих конструкций и могут приводить к некорректному распределению усилий в сжато-изогнутых и изгибаемых элементах. Изгибная жесткость по результатам выполненных расчетов при учете ползучести железобетона ни при каких соотношениях усилий не достигала значения 0,6, рекомен-

Рис. 4. График предельных значений силовых факторов M , кН · м, и N , кН, для рассматриваемого сечения

Рис. 5. Диаграмма зависимости понижающего коэффициента изгибной жесткости K , учитывающего неупругую работу элемента от величины силовых факторов M и N для рассматриваемого сечения при экспоненциальном законе деформирования бетона

Рис. 6. Графики зависимости понижающего коэффициента изгибной жесткости от величины $M/M_{пред}$ для элемента с разным процентом армирования при трех значениях $N/N_{пред}$: а — сечение 1, $N/N_{пред} = 0,00$; б — сечение 2, $N/N_{пред} = 0,15$; в — сечение 3, $N/N_{пред} = 0,80$

дуемого СП 52-103-2007 для сжато-изогнутых элементов. Более того, при существенном нагружении элемента продольной силой (порядка 80 % от предельного значения) изгибная жесткость сжато-изогнутого элемента может быть ниже, чем при изгибе без сжатия. Данные обстоятельства могут весьма существенно влиять на результаты расчетов. Так, при рекомендуемом СП 52-103-2007 соотношении понижающих коэффициентов жесткостей изгибаемых и сжато-изогнутых элементов (0,2:0,6) наибольшие моменты будут наблюдаться в сжато-изогнутых элементах, пролетные моменты в балках и перекрытиях будут занижены. Напротив, при более корректном учете нелинейной работы железобетона изгибная жесткость сжатых элементов снижается, что приводит к увеличению моментов в балках и плитах перекрытий. В результате расчеты по рекомендациям СП 52-103-2007 могут привести к дефициту прочности балок и плит в конструкциях зданий и сооружений.

Согласно результатам расчетов в первом приближении значения понижающих коэффициентов изгибной жесткости для изогнутых и сжато-изогнутых элементов с учетом ползучести возможно принимать для совместных расчетов равными и не более величины $1/(1 + \varphi_{b,cr})$, определяемой по СП 63.13330.

Также нужно учитывать, что фактически при назначении приведенной жесткости железобетонным элементам следует различать жесткости на изгиб и на продольное сжатие (данный факт совершенно игнорируется в рекомендациях СП 52-103-2007).

Вопрос о корректном назначении понижающих коэффициентов жесткости, учитывающих физическую нелинейность железобетонных конструкций, в совместных расчетах здания и основания нуждается в дальнейшем изучении. Для практических расчетов рекомендуется либо выполнять расчет с учетом нелинейной работы железобетонных конструкций, либо строить для принятых сечений диаграммы, подобные построенной на рис. 5.

Библиографический список

1. Залесов А. С., Мухамедиев Т. А., Чистяков Е. А. Учет физической нелинейности при расчете железобетонных конструкций.

бетонных монолитных конструкций высотных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2005. № 1. С. 4–8.

2. Иванов А. Развитие теории и прикладных методов оценки силового сопротивления монолитных гражданских зданий с учетом нелинейности деформирования: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 361 с.

3. Карпенко Н. И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона // Строительные конструкции. Минск, 1983. С. 164–173.

4. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 413 с.

5. Лучкин М. А. Учет развития деформаций основания во времени при совместном расчете системы «основание–фундамент–здание»: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 162 с.

6. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Васенин В. А. Расчетная оценка взаимного влияния зданий и подземных сооружений // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. № 8. С. 68–82.

7. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Основные закономерности взаимодействия оснований и надземных конструкций зданий // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2006. № 10. С. 63–92.

8. Шашкин В. А. Напряженно-деформированное состояние конструкций, взаимодействующих с нелинейно-деформируемой средой: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 124 с.

9. Шашкин К. Г. Расчет напряженно-деформированного состояния основания, фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2001. № 4.

10. Annette Beedholm Rasmussen. Analytical and numerical modeling of reinforced concrete in serviceability limit state: Master's thesis. Aarhus: Aarhus university, 2012. 105 p.

11. Neville A. M. Properties of Concrete. Final Edition. Wiley, New York, and Longman, London, 2000.

References

1. Zalesov A. S., Mukhamediev T. A., Chistyakov E. A. *Uchet fizicheskoy nelineynosti pri raschete zhelezobetonnykh monolitnykh konstruksiy vysotnykh zdaniy* [Accounting of physical nonlinearity at the calculating of steel concrete monolithic constructions of high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of constructions*, 2005, no 1, pp. 4–8.

2. Ivanov A. *Razvitie teorii i prikladnykh metodov otsenki silovogo soprotivleniya monolitnykh grazhdanskikh zdaniy s uchetom nelineynosti deformirovaniya*. Diss. dokt.

tekhn. nauk [Development of the theory and application-oriented assessment methods of force resistance of monolithic civil buildings taking into account the deformation nonlinearity. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2008, 361 p.

3. Karpenko N. I. *K postroeniyu obobshchennoy zavisimosti dlya diagrammy deformirovaniya betona* [About creation of the generalized dependence for the concrete deformation graph]. *Stroitel'nye konstruksii – Building constructions*, Minsk, 1983, pp. 164–173.

4. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 413 p.

5. Luchkin M. A. *Uchet razvitiya deformatsiy osnovaniya vo vremeni pri sovmestnom raschete sistemy «osnovanie-fundament-zdanie»*. Diss. kand. tekhn. nauk [Accounting of the development deformation of the base during a time period in case of joint calculation of the “base-foundation-building system” system. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2007, 162 p.

6. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G., Vasenin V. A. *Raschetnaya otsenka vzaimnogo vliyaniya zdaniy i podzemnykh sooruzheniy* [Estimated assessment of mutual influence of buildings and underground constructions]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of the cities and geotechnical construction*, 2004, no. 8, pp. 68–82.

7. Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Osnovnye zakonomernosti vzaimodeystviya osnovaniy i nadzemnykh konstruksiy zdaniy* [Main regularities of interaction of the bases and superstructures]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of the cities and geotechnical construction*, 2006, no. 10, pp. 63–92.

8. Shashkin V. A. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie konstruksiy, vzaimodeystvuyushchikh s nelineynno-deformiruemoy sredoy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Intense deformed state of constructions interacting with non-linear deformable environment. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 124 p.

9. Shashkin K. G. *Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniya, fundamentov i zdaniya s uchetom ikh vzaimodeystviya* [Calculation of the intense deformed state of the base, the foundations and the building taking into account their interaction]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 2001, no. 4.

10. Annette Beedholm Rasmussen. *Analytical and numerical modeling of reinforced concrete in serviceability limit state*. Master's thesis. Aarhus, Aarhus University Publ., 2012, 105 p.

11. Neville A. M. *Properties of Concrete*. Final Edition. Wiley, New York, London, Longman Publ., 2000.