

Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий Engineering geometry and computer graphics. Digital support for product lifecycle

Научная статья
УДК 514.85+624.046
DOI: 10.14529/build240409

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПОТЕРИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ

П.А. Хазов, khazov.nngasu@mail.ru
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье приводится математическая модель процесса деформирования коротких сталебетонных стержней и геометрический критерий потери несущей способности. Для исследования поведения сталебетонных элементов под действием кратковременной сжимающей нагрузки были изготовлены лабораторные образцы из стальных труб с бетонным сердечником. Приведены диаграммы продольного деформирования, построенные по экспериментальным данным, а также инженерная модель, позволяющая получить зависимость $P - \Delta$ для трубобетонных элементов при помощи масштабирования известной диаграммы для стальной трубы, оценен вклад бетонного сердечника в работу составного сечения. Предложена кусочно-заданная монотонно возрастающая функция, аналитически описывающая деформирование композитных стержней. Разработан геометрический критерий потери несущей способности при монотонно возрастающей кривой деформирования, позволяющий однозначно определить критическое значение продольной силы. Результат исследования может быть заложен в алгоритм работы программно-вычислительных комплексов, используемых при автоматизированном расчете и проектировании конструкций и конструктивных систем.

Ключевые слова: прочность, жесткость, несущая способность, геометрическое моделирование кривых, продольное деформирование, сталебетонные конструкции

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>.

Для цитирования. Хазов П.А. Геометрический критерий потери несущей способности сталежелезобетонных стержней // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 4. С. 64–71. DOI: 10.14529/build240409

Original article
DOI: 10.14529/build240409

GEOMETRIC CRITERION OF BEARING CAPACITY LOSS OF STEEL-REINFORCED CONCRETE RODS

P.A. Khazov, khazov.nngasu@mail.ru
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents a mathematical model of the deformation process of short steel-concrete rods and a geometric criterion for the loss of bearing capacity. It studies the behavior of steel-concrete elements under the action of a short-term compressive load using laboratory samples made from steel pipes with a concrete core. The article presents the diagrams of longitudinal deformation based on experimental data, as well as an engineering model that makes it possible to obtain the $P - \Delta$ dependence for tubular concrete elements by scaling a known diagram for a steel pipe. It also estimates the contribution of a concrete core to the operation of a composite section. The article proposes a piecewise monotonically increasing function that analytically describes the deformation of composite rods. It presents a geometric criterion for the loss of bearing capacity with a monotonously increasing deformation curve, which makes it possible to uniquely determine the critical value of the longitudinal force. The result of the research can be incorporated

© Хазов П.А., 2024.

into the algorithm of operation of software and computing complexes used in the automated calculation and design of structures and structural systems.

Keywords: strength, stiffness, bearing capacity, geometric modeling of curves, longitudinal deformation, steel-concrete structures

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>.

For citation. Khazov P.A. Geometric criterion of bearing capacity loss of steel-reinforced concrete rods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(4):64–71. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240409

Введение

Большинство процессов, происходящих в природе и технике, носят необратимый характер, при этом имеют достаточно строгое и точное аналитическое описание. Именно поэтому могут быть построены математические модели, позволяющие не только оценить текущее состояние инженерной системы или конструкции, но также спрогнозировать ее поведение при определенном развитии и изменении внешних факторов (температурного режима, силовых воздействий и т. д.).

Для разработки математических моделей необходимо проведение экспериментальных исследований с получением точных данных, а также геометрическое описание изученных процессов и построение кривых, описывающих те или иные явления. Однако помимо кривых и поверхностей, описывающих данные явления, необходима разработка геометрических критериев, являющихся индикатором наступления того или иного характерного или критического состояния. В частности, при описании кривых деформирования важной задачей является разработка геометрического критерия, фиксирующего потерю прочности или несущей способности того или иного материала или инженерной конструкции.

Разработка математических моделей и геометрическое описание процессов деформирования применяется при создании систем автоматизированного проектирования и расчета (САПР), поскольку результат исследования может быть заложен в алгоритм работы программно-вычислительных комплексов с целью использования аналитических соотношений для численного решения задач по определению напряженно-деформированного состояния конструкций. Таким образом, создание геометрических моделей необходимо при всем информационном сопровождении жизненного цикла изделий и конструкций [1].

Современная наука и техника нашли новаторский подход в использовании конструкционных материалов, объединяя их в уникальные сочетания. Так, труботетон – это одно из передовых решений, где стальная труба заполняется бетоном, образуя композитную конструкцию. Такая инновация позволяет объединить лучшие качества стальных и железобетонных элементов, минимизируя из недостатка и повышая эффективность.

Сталежелезобетонные конструкции в последние годы находят широкое применение в строительстве [1–4], в связи с чем обретают повышенный интерес как отечественных [3–9], так и зарубежных [10–14] ученых. Активно проводятся экспериментальные [6, 10–13], численные [4] и аналитические [3, 5–8, 14–16] исследования, однако существующая нормативная документация [17] до сих пор имеет достаточное количество неосвещенных вопросов, а расчетные методики не позволяют точно описать напряженно-деформированное состояние трубобетонных элементов.

Предметом настоящего исследования являются лабораторные образцы коротких сталебетонных стержней, испытываемые кратковременной сжимающей нагрузкой с целью дальнейшего аналитического описания их процесса деформирования и разработки геометрического критерия потери несущей способности.

Метод

Для построения математических моделей деформирования, используемых при разработке геометрического критерия потери несущей способности сталебетонных стержней малогабаритных сечений, были подготовлены лабораторные образцы, состоящие из прямошовных электросварных стальных труб, заполненных бетонным сердечником (рис. 1). Дополнительное армирование сердечника гибкой стержневой арматурой не применялось ввиду стесненности поперечных сечений. Для равномерной передачи нагрузки торцы стальных труб были фрезерованы, заполнялись высокоподвижной бетонной смесью с избытком и последующей торцовкой при помощи алмазного диска. Помимо сталебетонных стержней для каждого типоразмера также были изготовлены полые образцы стальных труб.

Для проведения испытаний образцов длиной 100 мм использовалась экспериментальная установка (рис. 2), оснащенная прессом П-125, при помощи которой подавалась осевая сжимающая нагрузка на установленные между загружающими пластинами стержни. Нагрузка прикладывалась плавно и считается кратковременной, в связи с чем не учитывается явление ползучести. На протяжении всего периода нагружения образцов при помощи индикатора часового типа фиксировалось

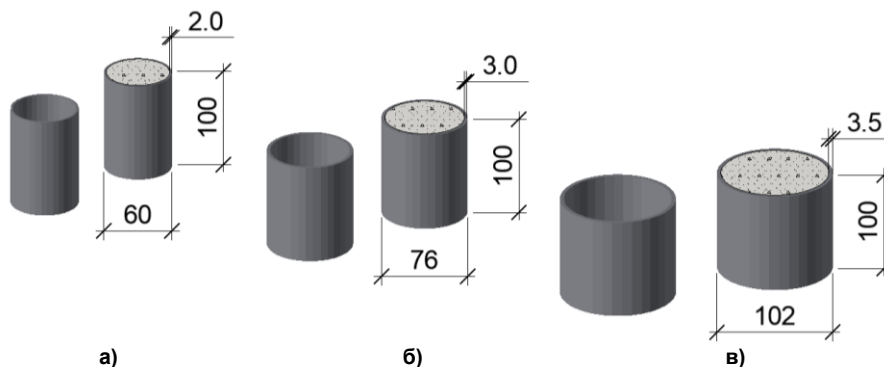


Рис. 1. Лабораторные образцы стальных и сталебетонных стержней для экспериментального исследования: внешний диаметр трубы $D = 60$ мм и толщина стенки $t_{cr} = 2,0$ мм (а), $D = 76$ мм и $t_{cr} = 3,0$ мм (б), $D = 102$ мм и $t_{cr} = 3,5$ мм (в)

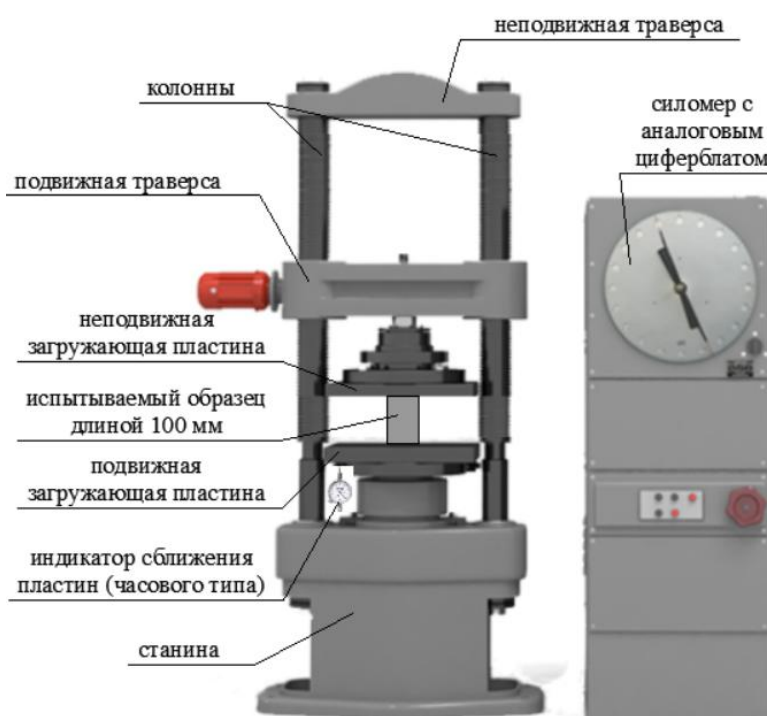


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для испытаний стальных и сталебетонных стержней осевой сжимающей нагрузкой в испытательном прессе П-125 [18]

сближение пластин прессы, соответствующее полной продольной деформации стержня при сжатии.

Результаты экспериментальных исследований были обработаны и представлены в виде диаграмм продольного деформирования (рис. 3). Помимо исследуемых диаграмм для сталебетонных стержней также строились графики для полый стальной трубы. Прослеживается очевидная зависимость между графиками – диаграмма для стержней с бетонным сердечником подобна диаграмме для полый трубы с соответствующими размерами. Кроме того, область упругих деформаций для стальных и сталебетонных образцов имеет одни и те же пределы. Таким образом, наличие в трубе сердечника

вносит определенный вклад в несущую способность конструкции, причем этот вклад постоянный на каждом этапе деформирования, чем вызвано подобие изучаемых диаграмм. На предположении о соизмеримости вклада бетона на всех этапах нагружения также основана методика, предложенная в [19].

В статье [20] предлагается инженерная модель деформирования, при помощи которой может быть вычислено значение осевой сжимающей силы P при произвольном значении продольной деформации Δ :

$$P_{tb}(\Delta) = P_t(\Delta) \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{P_b^{cr}}{P_t^{cr}}\right), \quad (1)$$

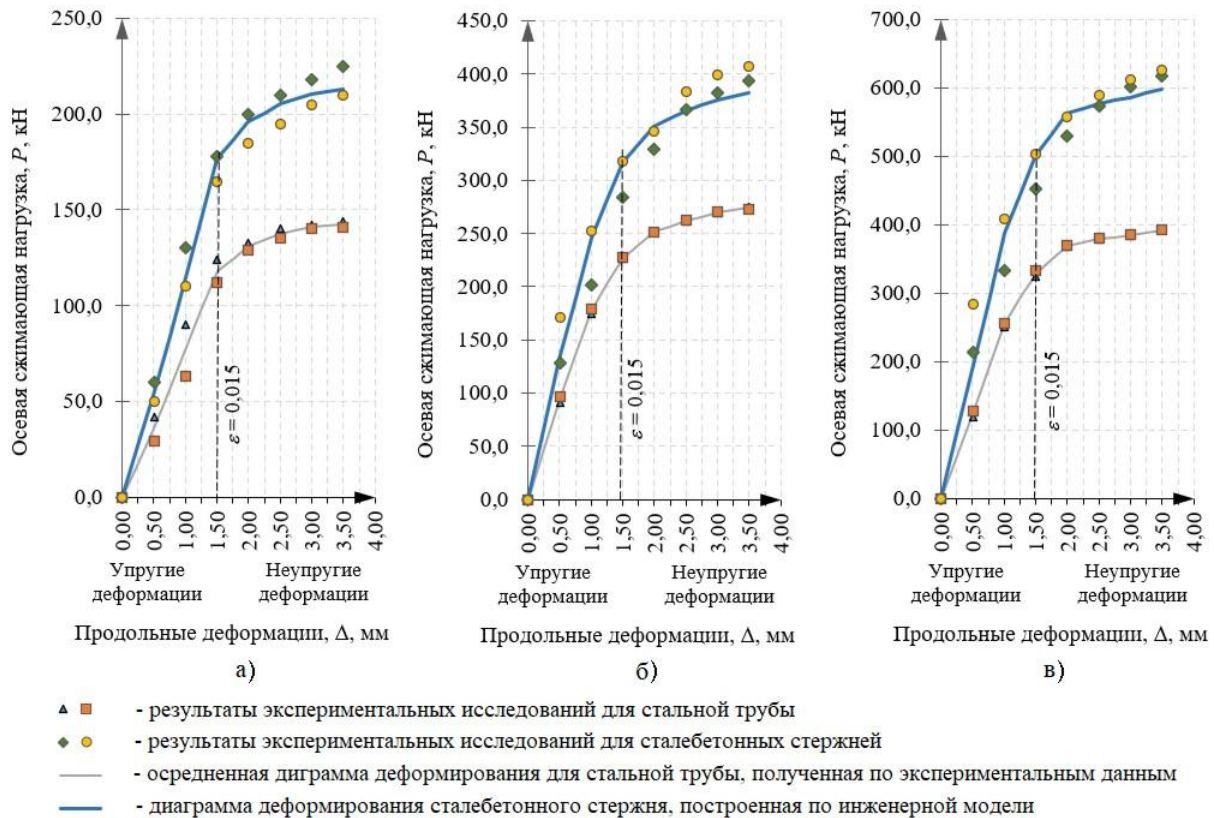


Рис. 3. Диаграммы продольного деформирования стальных и сталебетонных образцов при сжатии осевой нагрузкой, полученные экспериментально и при помощи инженерной модели: труба 60 × 2,0 (а), труба 76 × 3,0 (б), труба 102 × 3,5 (в)

где $P_{tb}(\Delta)$ и $P_t(\Delta)$ – продольная сила в сталебетонном стержне и стальной трубе, соответствующая продольному перемещению торцов Δ ;

P_t^{cr} и P_b^{cr} – предельная несущая способность стальной трубы (обоймы) и бетонного сердечника при их раздельной работе, которые могут быть определены по существующим нормативным методикам для проектирования.

Предложенная формула удобна, поскольку позволяет оценить порядок деформаций и скорость деформирования сжатых сталебетонных стержней малой гибкости и подходит для расчета элементов с различными размерами сечений. Однако данная методика не является универсальной, которая могла бы аналитически описать деформирование трубобетона для последующего внедрения в САПР, поскольку для получения искомого графика $P_{tb}(\Delta)$ необходимо сначала построить график для стальной трубы $P_t(\Delta)$.

Результаты и обсуждения

В ходе анализа полученных диаграмм были подобраны аналитические функции, позволяющие описать процесс деформирования сталебетонных элементов при помощи математического моделирования. При этом диаграмма представлена в виде непрерывной кусочно-заданной функции (рис. 4):

линейной AB на участке с относительными деформациями $0 \leq \epsilon \leq 0,01$ (упругий участок деформирования) и логарифмической BC при больших деформациях ($\epsilon > 0,01$):

$$P_{tb}(\Delta) = P_t(\Delta) \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{P_b^{cr}}{P_t^{cr}}\right), \quad (2)$$

где Δ – осевое укорочение образца (смещение торцов), мм;

A – постоянная для конструкции, зависящая от геометрических характеристик сечений и применяемых материалов:

$$A = k_m \cdot P_t^{cr} \cdot \left(1 + k_b \cdot \frac{P_b^{cr}}{P_t^{cr}}\right), \quad (3)$$

$k_m = 0,85$ – коэффициент масштабирования модели;

$k_b = 2,5$ – коэффициент, учитывающий вклад бетона в работу конструкции;

$k_\Delta = 5$ – коэффициент масштабирования перемещений.

Логарифмическая функция BC подобрана так, чтобы она соответствовала действительному процессу деформирования, полученного путем построения и обработки диаграмм по экспериментальным данным. Линейная функция (прямая AB) определяется из условия, что прямая проходит через начало координат (точка 0;0) и что линейная функция должна непрерывно переходить в логарифмическую (общая точка B).

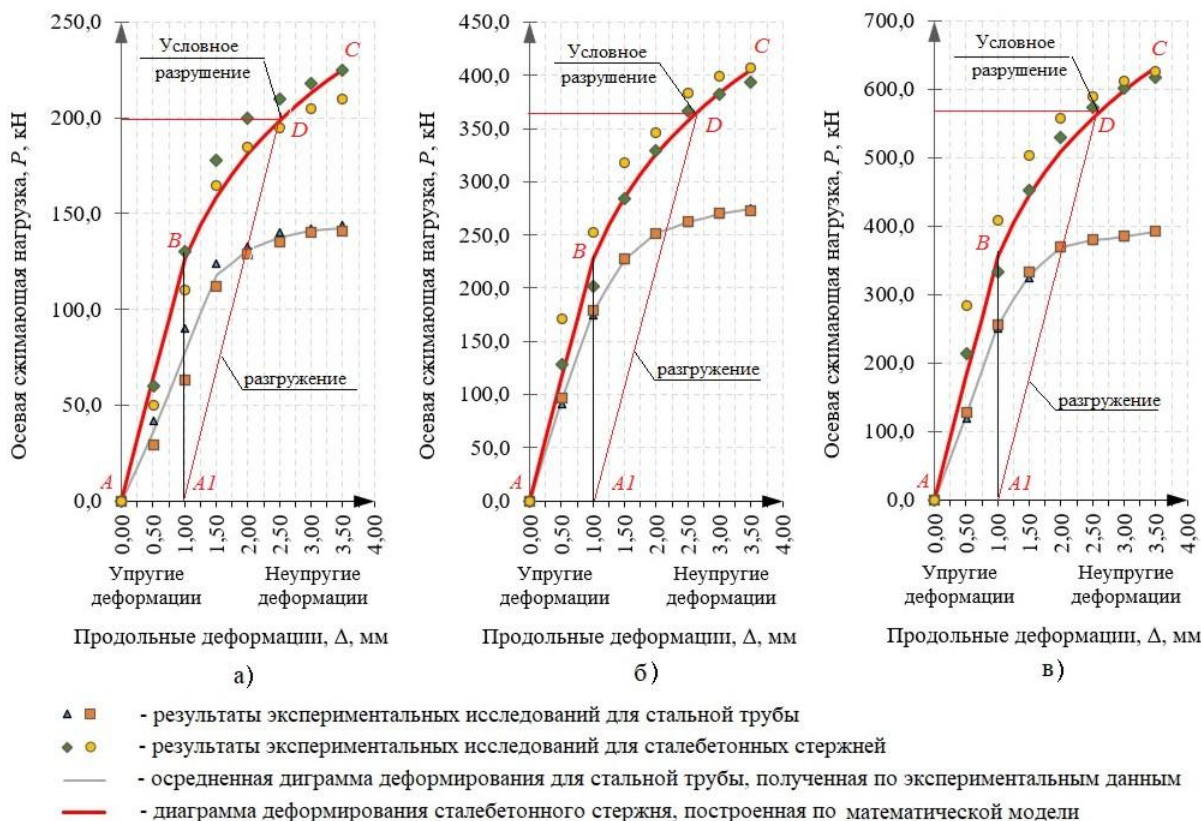


Рис. 4. Диаграммы продольного деформирования стальных и сталебетонных образцов при сжатии осевой нагрузкой, полученные экспериментально и при помощи математической модели в виде кусочно-заданной функции: труба 60 × 2,0 (а), труба 76 × 3,0 (б), труба 102 × 3,5 (в)

Традиционно для материалов, диаграммы деформирования которых не имеют явно выраженной площадки текучести, за условный предел текучести принимается значение напряжения σ_y , при котором остаточная относительная деформация образца достигает некоторого критического значения $\epsilon_{ост}^{cr}$ [21].

Поскольку сталебетонный стержень имеет неоднородное поперечное сечение, состоящее из материалов с различными прочностными и деформационными характеристиками, то в этом случае необходимо говорить не о классической диаграмме деформирования в напряжениях и относительных деформациях $\sigma - \epsilon$, а о зависимости между продольной сжимающей силой и абсолютным укорочением исследуемого образца $P - \Delta$.

Диаграммы деформирования [18] показывают, что при лабораторных испытаниях сжимающей нагрузкой деформации неограниченно возрастают, не вызывая явного разрушения образца. Возникает необходимость введения однозначного критерия потери несущей способности, т. е. сжимающей силы, при которой невозможна дальнейшая эксплуатация конструкции.

На графике кусочно-заданной функции точка В является граничным значением между линейным и логарифмическим участками. За момент услов-

ного разрушения сталебетонного стержня предлагается принять продольную силу, соответствующую пересечению логарифмической кривой BC и «линии разгрузки» A₁D, которая параллельна начальному этапу деформирования AB и соответствует критическому значению остаточных деформаций $\epsilon_{ост}^{cr} = 0,01$.

$$\begin{cases} P_{tb}(\Delta) = \lg(k_{\Delta}) \cdot (\Delta - \Delta_{ост}^{cr}) \\ P_{tb}(\Delta) = \lg(k_{\Delta} \cdot \Delta) \end{cases}, \quad (4)$$

Приравнивая правые части приведенных функций, получаем уравнение, являющееся критерием потери несущей способности:

$$\lg(k_{\Delta}) \cdot (\Delta^{cr} - \Delta_{ост}^{cr}) = \lg(k_{\Delta} \cdot \Delta^{cr}), \quad (5)$$

где $\Delta_{ост}^{cr} = \epsilon_{ост}^{cr} \cdot L_0$ – критическое абсолютное значение остаточных осевых деформаций образца при его разгрузении, мм;

L_0 – первоначальная длина образца, мм.

Приведенное выше уравнение не имеет аналитического решения, однако графики исследуемых функций (см. рис. 4) указывают на то, что уравнение однозначно имеет единственное решение, которое можно получить численным или графоаналитическим методами. Решением уравнения является критическая деформация Δ^{cr} , по которой может быть определена критическая сила, соот-

Значения критических осевых деформаций и условного предела несущей способности сталебетонных образцов, полученные численным решением

| Типоразмер трубы-обоймы | $\Delta_{ост}^{cr}$, мм | $\varepsilon_{ост}^{cr}$ | P_{tb}^{cr} , кН | P_t^{cr} , кН | P_b^{cr} , кН | $\frac{P_{tb}^{cr}}{P_t^{cr} + P_b^{cr}} \cdot 100\%$ |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---|
| 60×2.0 | 2,59 | 0,0259 | 201,3 | 142 | 28,2 | 118 % |
| 76×3.0 | 2,59 | 0,0259 | 362,4 | 275 | 43,5 | 114 % |
| 102×3.5 | 2,59 | 0,0259 | 564,9 | 392 | 82,3 | 119 % |

ветствующая условной потере несущей способности P_{tb}^{cr} , по формуле

$$P_{tb}^{cr} = A \cdot \lg(k_{\Delta} \cdot \Delta^{cr}). \quad (6)$$

Численное решение системы уравнений для каждого из трех типоразмеров образцов приведено в таблице.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований и их аналитической обработки были сделаны следующие выводы:

1. Деформирование сталебетонных стержней малой гибкости происходит аналогично деформированию стальной трубы, при этом вклад бетонного сердечника в общую несущую способность постоянный в течение всего процесса нагружения. И для полых образцов, и для образцов с сердечником область упругих деформаций находится в одинаковых пределах.

2. Предложена кусочно-заданная функция, позволяющая описать процесс деформирования методами математического моделирования. При малых деформациях при $0 \leq \varepsilon \leq 0,01$ образцы деформируются упруго по линейному закону. При $\varepsilon > 0,01$ имеют место пластические деформации, увеличивается скорость деформаций, что соответствует логарифмической зависимости $P - \Delta$.

3. Разработан геометрический критерий потери несущей способности при монотонно возрастающей кривой деформирования, позволяющий определить значение критической продольной сжимающей силы, при которой остаточные деформации превышают допустимые значения. Предложенный критерий однозначно определяет значение сжимающей силы, при которой невозможна дальнейшая эксплуатация конструкции.

Список литературы

1. Оценка прочности и устойчивости композитных сталежелезобетонных элементов с совместным применением стержневых и твердотельных расчетных моделей / А.А. Лапшин, П.А. Хазов, Д.А. Кожанов, С.Ю. Лихачева // Приволжский научный журнал. 2021. № 3. С. 9–16.
2. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan // Earthquake and Engineering Seismology. 2005. No. 1. Vol. 4. P. 51–73.
3. Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов // Бетон и железобетон. 2008. № 2. С. 22–25.
4. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6 (21). С. 89–103.
5. Белый Г.И., Ведерникова А.А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2(85). С. 26–35.
6. Исследования несущей способности центрально-сжатых сталетрубобетонных колонн / В.И. Римшин, А.Л. Кришан, М.А. Астафьева [и др.] // Жилищное строительство. 2022. № 6. С. 33–38. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-6-33-38
7. Несущая способность коротких трубобетонных колонн круглого сечения / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, В.А. Рахманов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4(370). С. 220–225.
8. Колмогоров Г.Л., Акулова А.А. Прочность и предельная несущая способность трубобетонных колонн // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2016. С. 29–33.
9. Стороженко Л.И., Семко А.В. Сравнение методик расчета трубобетонных конструкций // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. 2005/9/22. № 63. С. 59–67.
10. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. Advances in Materials Science and Engineering. 2018. P. 1–15. DOI: 10.1155/2018/4059675
11. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression / Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. // Construction and Building Materials. 2015. No. 95. P. 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114
12. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural Behaviour of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tube Columns during the Top-Down Construction Method. Applied Sciences. 2022. No. 12(8), 3771. DOI: 10.3390/app12083771

13. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube with Different Kinds of Concrete Infill. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, Vol. 2021, Article ID 6645757, 12 p. DOI: 10.1155/2021/6645757
14. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression / Wang Z.B., Tao Z., Han L. H. et al. // *Engineering Structures*, 2017, 15(135). P. 209–221. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.049
15. Хашхожев К.Н. Определение предельной нагрузки для центрально сжатых трубобетонных колонн на основе деформационной теории пластичности бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 8. С. 408–414.
16. Snigireva V.A., Gorynin G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7 (83). P. 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7
17. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования: свод правил: утвержден Приказом Минстроя России от 30.12.2016 № 1030/пр: дата введения 01 июля 2017 г.: редакция от 15.12.2020. URL: <http://www.consultant.ru>. Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. Версия Проф. Текст: электронный.
18. Хазов П.А., Помазов А.П. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии. // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 77–86.
19. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12–3. С. 580–583.
20. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections / P.A. Khazov, V.I. Erofeev, E.A. Nikitina, A.P. Pomazov // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. Т. 19, № 4. С. 410–418. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-410-418
21. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. 608 с.

References

1. Lapshin A.A., Khazov P.A., Kozhanov D.A., Lihacheva S.Yu. [Assessment of strength and stability of composite steel-reinforced concrete elements with joint use of rod and solid-state calculation] . *Privolzhskij nauchnyj zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2021, no. 3, pp. 9–16. (in Russ.).
2. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan. *Earthquake and Engineering Seismology*, 2005, vol. 4, no. 1, pp. 51–73.
3. Krishan A.L., Zaikin A.I., Kupfer M.S. [Determination of the destructive load of compressed pipe concrete elements]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2008, no. 2, pp. 22–25. (in Russ.).
4. Duvanova I.A., Sal'manov I.D. [Concrete filled steel tubes in the construction of high-rise buildings and structures]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of Unique Buildings and Structures], 2014, no. 6(21), pp. 89–103. (in Russ.).
5. Belyy G.I., Vedernikova A.A. [Investigation of strength and stability of concrete filled steel tubes structural elements by the inverse numerical-analytical method]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2021, no. 2(85), pp. 26–35. (in Russ.) DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35
6. Rimshin V.I., Krishan A.L., Astaf'eva M.A. et al. [Studies of the bearing capacity of centrally compressed concrete filled steel tubes]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction], 2022, no. 6, pp. 33–38. (in Russ.) DOI: 10.31659/0044-4472-2022-6-33-38
7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Rahmanov V.A. et al. [Bearing capacity of short round-section concrete filled steel tubes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of Higher Educational Institutions. Technology of the Textile Industry], 2017, no. 4(370), pp. 220–225 (in Russ.).
8. Kolmogorov G.L., Akulova A.A. [Strength and ultimate load-bearing capacity of pipe-concrete columns]. *Obrabotka sploshnyh i sloistyh materialov*. [Processing of Solid and Layered Materials], 2016, pp. 29–33. (in Russ.)
9. Storozhenko L.I., Semko A.V. [Comparison of methods of calculation of tube-concrete structures]. *Kommunalnoe khozyaystvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Municipal Services of Cities. Scientific and Technical Collection], 2005/9/22, no. 63, pp. 59–67. (in Russ.)
10. Li P., Zhang T., Wang C. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2018/4059675
11. Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, 2015, no. 95, pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114
12. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural Behaviour of Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tube Columns during the Top-Down Construction Method. *Applied Sciences*, 2022, no. 12(8), 3771. DOI: 10.3390/app12083771

13. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the Performance of Concrete-Filled Steel Tube with Different Kinds of Concrete Infill. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, Article ID, 6645757, 12 p. DOI: 10.1155/2021/6645757
14. Wang, Z.B., Tao, Z., Han, L. H., Uy, B., Lam, D., Kang, W.H. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression. *Engineering Structures*, 2017, 15(135), pp. 209–221. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.049
15. Hashkhozhev K.N. [Determination of the maximum load for centrally compressed pipe concrete columns based on the deformation theory of concrete plasticity]. *Inzheneryj vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*, 2021, no. 8, pp. 408–414. (in Russ.)
16. Snigireva V.A., Gorynin G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 7 (83), pp. 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7
17. SP 266.1325800.2016 Konstruktsii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya utverzhd. Prikazom Minstroya Rossii ot 30.12.2016 № 1030/pr: data vved. 01 iyulya 2017 g.: redaktsiya ot 15.12.2020. [Set of Rules 266.1325800.2016 Steel-reinforced concrete structures. Design rules]. (in Russ.)
18. Khazov P.A., Pomazov A.P. [Strength and longitudinal bending of pipe concrete rods under central compression]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktsii [Structural Mechanics and Structures]*, 2023, no. 2(37), pp. 77–86. (in Russ.)
19. Nesvetaev G.V., Rezvan I.V. [Assessment of the strength of concrete filled steel tube]. *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2011, no. 12-3, pp. 580–583. (in Russ.)
20. Khazov P.A., Erofeev V.I., Nikitina E.A., Pomazov A.P. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections. *Stroitel'naya mekhanika inzhenerykh konstruktsiy i sooruzheniy [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 410–418. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-410-418
21. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov [Strength of materials]*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 608 p. (in Russ.)

Информация об авторе:

Хазов Павел Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теории сооружений и технической механики, старший научный сотрудник, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия; khazov.nngasu@mail.ru

Information about the author:

Pavel A. Khazov, PhD, associate professor of the department of theory of structures and technical mechanic, senior researcher, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia; khazov.nngasu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.07.2024, принята к публикации 15.07.2024.

The article was submitted 05.07.2024, approved after reviewing 15.07.2024.