



УДК [691.3 +669.14]: 621.643+624.046.2

П. А. ХАЗОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики, зав. лабораторией непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений; **О. И. ВЕДЯЙКИНА**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры общей физики и теоретической механики; **И. С. ХОХЛОВА**, студент; **Д. В. АРТЕМЬЕВА**, студент

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96, +7 (951) 919-0-919
Ключевые слова: трубобетон, напряженно-деформированное состояние, поперечный изгиб, прочность, деформирование, несущая способность.

Приведены результаты экспериментальных исследований деформирования трубобетонных образцов при трехточечном поперечном изгибе. Показано, что в сравнении с полый стальной трубой происходит определенный прирост общей изгибной жесткости. Анализируется характер разрушения образцов, обусловленный образованием трещины в растянутой зоне как бетона, так и стальной оболочки.

Развитие высотного строительства, наблюдаемое в настоящее время, требует разработки и внедрения технологий, позволяющих значительно повысить несущую способность материалов, применяемых в качестве несущих конструкций. При этом особое внимание уделяется рациональному использованию основных преимуществ отдельных материалов, объединенных в общий несущий элемент. Применение композитных конструкций во всех отраслях, связанных с термосиловыми нагрузками, позволяет значительно увеличить ресурс системы. В последнее время повышенный интерес вызывают сталежелезобетонные конструкции [1, 2], позволяющие нелинейно увеличить несущую способность дифференцированных составляющих системы [3]. В частности, достаточно серьезное внимание уделяется исследованию работы трубобетонных конструкций в условиях центрального и внецентренного сжатия экспериментальными и численными методами как в России [1–7], так и за рубежом [8–10]. Трубобетонная конструкция представляет собой композитную систему, образованную в результате заполнения стальной оболочки бетонной смесью и ее последующего затвердевания, набора прочности и образования единого конгломерата (рис. 1). Сердечник может состоять только из бетона (рис. 1а) или усиливаться продольной арматурой (рис. 1б). При этом суммарная (интегрированная) несущая способность трубобетона значительно превосходит сумму «отдельных» (дифференцированных) несущих способностей составляющих – трубы-оболочки и бетонного сердечника [3].

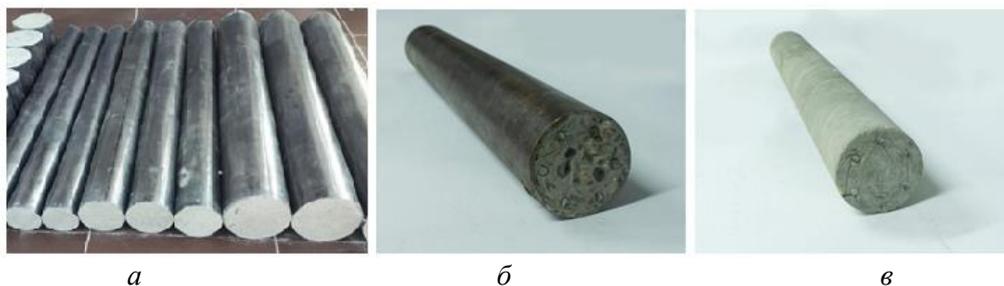


Рис. 1. Модели колонн: *а* – неармированная трубобетонная, *б* – армированная трубобетонная, *в* – железобетонная

Характер разрушения трубобетонного элемента отличается от железобетонного. Рассматривая работу бетона в составе трубобетонных колонн, можно отметить, что в нем создается трехосное напряженное состояние за счет наличия трубы-оболочки, ограничивающей поперечное деформирование (по Пуассону) и потенциальное разрушение в данном направлении (рис. 2).



Рис. 2. Образцы трубобетонных конструкций после испытания на продольное деформирование: *а* – с хрупким разрушением оболочки, *б* – с пластическим деформированием обоймы, *в* – схема распределения радиальных напряжений, где $\sigma_{b,r}$ ($\sigma_{t,r}$) – радиальное напряжение в бетоне (трубе), вызванное стальной оболочкой (бетонным сердечником)

Несмотря на то, что трубобетонные элементы проектируются для работы в условиях сжатия и применяются, как правило, в качестве колонн, стоек, свай и пр., изучение их работы в условиях поперечного изгиба необходимо для создания адекватной расчетной схемы, поскольку изгибная жесткость стержневых элементов значительно влияет на последующее распределение усилий.

В настоящей работе приводятся результаты испытаний трубобетонных стержней при трехточечном изгибе. Для этого были изготовлены трубчатые образцы ($\text{Ø}60 \times 2$ мм, $l = 700$ мм) из стали 09Г2С, заполненные бетоном марки В12,5. Марка стали и бетона были определены на контрольных образцах прессом П-125 [3].

Для построения диаграммы деформирования при изгибе, определения приведенной изгибной жесткости и анализа характера разрушения трубобетонного образца при изгибе была реализована испытательная установка с применением универсальной испытательной машины УИМ-30 (рис. 3).

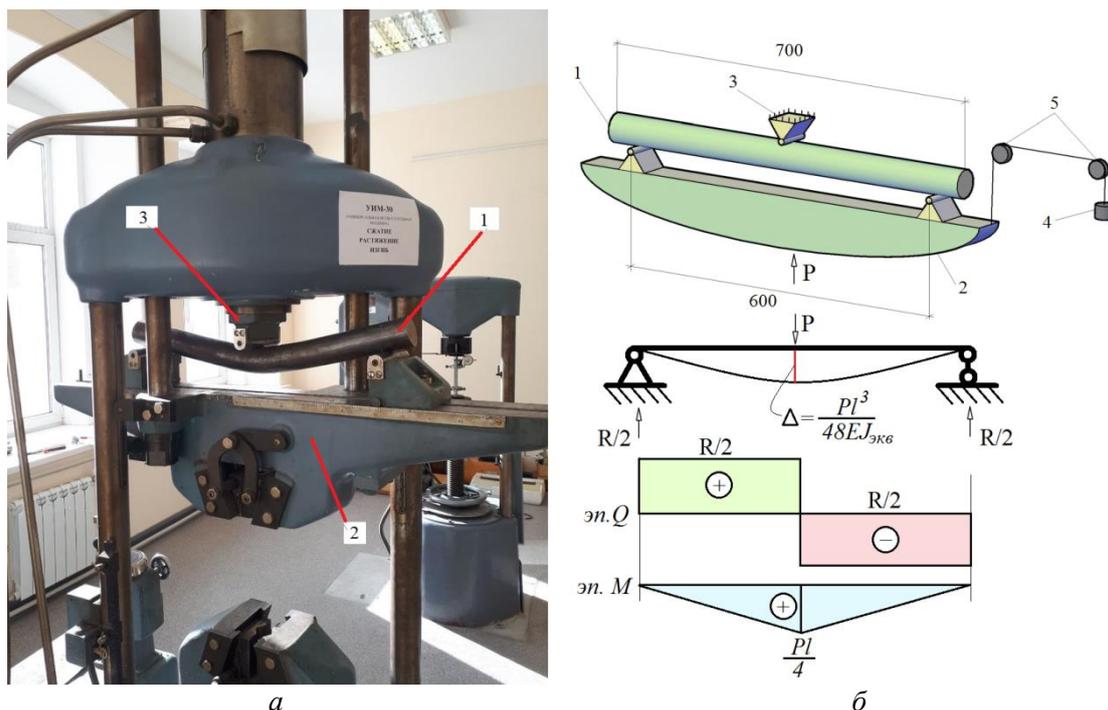


Рис. 3. Общий вид испытательной установки (а) и расчетная схема эксперимента (б); 1 – исследуемый образец, 2 – подвижная грузовая траверса, 3 – неподвижная траверса, 4 – груз для работы системы блоков 5, регистрирующих сближение траверс. P – внешняя нагрузка (кН), l (м) – пролет, $EJ_{экв}$ (кНм²) – эквивалентная изгибная жесткость образца

Эквивалентная изгибная жесткость может быть определена по формуле: $EJ_{экв} = Pl^3 / (48\Delta)$, где Δ – прогиб образца, соответствующий нагрузке P ; l – пролет между опорами. На рис. 4 представлены диаграммы деформирования, согласно которым изгибная жесткость системы составляет 40,2 кНм².

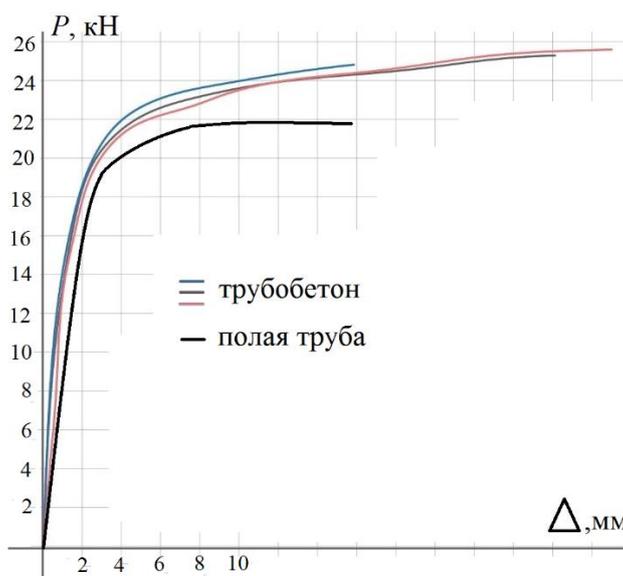


Рис. 4. диаграммы деформирования трубобетонных образцов и стальной трубы того же диаметра при изгибе

Для количественной оценки вклада бетона в работу конструкции выполнено сравнение обобщенной диаграммы деформирования при изгибе трубобетонных образцов с аналогичной диаграммой деформирования стальной трубы (рис. 4). Прирост изгибной жесткости за счет введения бетонного сердечника составил примерно 26 %.

На рис. 5 показан внешний вид разрушенного образца после испытаний. Несмотря на то, что в растянутой зоне стальной оболочки образовалась трещина, разрушение и потеря несущей способности происходит достаточно плавно, что может оказаться немаловажным при наступлении аварийной ситуации в реальном режиме эксплуатации. Введение бетонного сердечника позволило увеличить несущую способность по сравнению с полой трубой примерно на 10 %. Скорее всего это произошло за счет усиления сжатой зоны образца. Такое изменение вряд ли может считаться значительным для использования трубобетона в балочных конструкциях, работающих преимущественно на изгиб, особенно учитывая утяжеление элемента. Поэтому, как было сказано ранее, трубобетонные стержни используются в основном как центрально и внецентренно, сжатые с преобладанием продольных усилий и деформаций.



Рис. 5. Диаграммы деформирования трубобетонных образцов и стальной трубы того же диаметра при изгибе

Изгибная жесткость требуется в первую очередь для грамотного определения усилий и впоследствии – расчета несущей способности элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кришан, А. Л. Новое конструктивное решение трубобетонных колонн / А. Л. Кришан. – Текст : непосредственный // III тысячелетие – новый мир : труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. – Москва, 2006. – Том 2. – С. 81–84.
2. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Г. В. Чесноков, Е. С. Михалдыкин. – Текст : электронный // Наукоеведение : Интернет-журнал. – 2015. – Том 7, № 4. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (дата обращения: 28.07.2022).
3. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений / П. А. Хазов, В. И. Ерофеев, Д. М. Лобов,



А. К. Ситникова. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 3. – С. 36–43.

4. Канищев, Р. А. Анализ местной устойчивости трубобетонных конструкций прямоугольного сечения / Р. А. Канищев. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 4 (64). – С. 59–68.

5. 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. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2021. – № 3. – С. 9–16.

6. Белый, Г. И. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом / Г. И. Белый, А. А. Ведерникова. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85). – С. 26–35.

7. Тамразян, А. Г. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования / А. Г. Тамразян, И. К. Манаенков. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2017. – № 4 (72). – С. 57–62.

8. Mesnager, A. Le pont des Ibis, an vesinet (seine-et-oise) / A. Mesnager, F. Barthes, I. Vevrier // Le Genie Civil. – 1931. – N 2527/3.

9. Morino, S. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan / S. Morino, K. Tsuba // Earthquake and Engineering Seismology. – 2005. – Vol. 4, № 1. – P. 51–73.

10. Cai S.-H. Modern Street Tube Confined Concrete Structures / Cai S.-H. – China : Communication Press, 2003. – 358 p.

KHAZOV Pavel Alekseevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics, head of the laboratory of continuous monitoring of the technical condition of buildings and structures; VEDYAYKINA Olga Ivanovna, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the chair of general physics and theoretical mechanics; KHOKHLOVA Irina Sergeevna, student; ARTEMYEVA Diana Vladimirovna, student

DEFORMATION AND DESTRUCTION OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBE SAMPLES DURING TRANSVERSE BENDING

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-96,
+7 (951) 919-0-919; e-mail: khazov.nngasu@mail.ru

Key words: steel tube confined concrete structures, stress-strain state, transverse bending, strength, deformation, bearing capacity.

The article presents the results of experimental studies of deformation of concrete-filled steel tube samples at three-point transverse bending. The total bending stiffness of the sample increases compared to a hollow steel tube. The nature of the destruction of samples caused by the formation of a crack in the stretched zone of concrete and steel shell is analyzed.



REFERENCES

1. Krishan A. L. Novoe konstruktivnoe reshenie trubobetonnykh kolonn [New constructive solution for steel tube confined concrete columns] // III tysyacheletie – novy mir: Trudy mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya [III millennium – a new world: Proceedings of the international forum on problems of science, technology and education]. – 2006. – Vol. 2. – P. 81–84.
2. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin E. S. O probleme raschyota trubobetonnykh konstruktsiy s obolochkoy iz raznykh materialov. Chast 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoy obolochkoy [On the problem of calculating steel tube confined concrete structures with a shell of different materials. Part 1. Experience with steel tube confined concrete] // Naukovedenie : Internet-zhurnal. – 2015 – Vol. 7, № 4. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (data obrascheniya: 28.07.2022).
3. Khazov P. A., Erofeev V. I., Lobov D. M., Sitnikova A. K. Eksperimentalnoe issledovanie prochnosti kompozitnykh trubobetonnykh obraztsov malogabaritnykh secheniy. [The experimental research of the strength of composite steel tube confined concrete samples of small-sized sections] / Privolzhskiy nauchny zhurnal / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2022. – № 3. – P. 36–43.
4. Kanishev R. A. Analiz mestnoy ustoychivosti trubobetonnykh konstruktsiy pryamougolnogo secheniya [Analysis of local stability of pipe-concrete structures of rectangular section] // Inzhenerno-stroitelny zhurnal [Magazine of Civil Engineering]. 2016. № 4(64). P 59–68.
5. Lapshin A. A., Khazov P. A., Kozhanov D. A., Likhachyova S. Yu. Otsenka prochnosti i ustoychivosti kompozitnykh stalezhelezobetonnykh elementov s sovместnym primeneniem sterzhnevnykh i tverdotelnykh raschyotnykh modeley [Assessment of the strength and stability of composite steel-reinforced concrete elements with joint use of rod and solid-state calculation models] / Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2021. – № 3. – P. 9–16.
6. Bely G. I., Vedernikova A. A. Issledovanie prochnosti i ustoychivosti trubobetonnykh elementov konstruktsiy obratnym chislenno-analiticheskim metodom [Investigation of the strength and stability of pipe-concrete structural elements by the inverse numerical-analytical method] / Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. – 2021. – № 2(85). – P. 26–35.
7. Tamrazyan A. G., Manaenkov I. K. Ispytanie trubobetonnykh obraztsov malogo diametra s vysokim koeffitsientom armirovaniya [Testing small diameter pipe concrete samples with a high coefficient of reinforcement] // Stroitelstvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]. 2017. № 4 (72). – P. 57–62.
8. Mesnager A., Barthes F., Vevrier I. Le pont des Ibis, an vesinet (seine-et-oise). // Le Genie Civil – 1931. – N. 2527/3.
9. Morino S., Tsuba K. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan // Earthquake and Engineering Seismology. – 2005. – Vol. 4, № 1. – P. 51–73.
10. Cai S.-H. Modern Street Tube Confined Concrete Structures. // Communication Press China. – 2003. – 358 p.

© П. А. Хазов, О. И. Ведяйкина, И. С. Хохлова, Д. В. Артемьева, 2023

Получено: 28.03.2023 г.