

ТАМРАЗЯН А.Г., МАНАЕНКОВ И.К.

ИСПЫТАНИЕ ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ АРМИРОВАНИЯ

В статье изложена методика и результаты испытания коротких трубобетонных элементов малого диаметра с относительно высоким коэффициентом армирования. В качестве обоймы для бетонного ядра использовались электросварные прямошовные стальные трубки 42х1,4 мм и 41,5х1,7 мм. При таком виде косвенного армирования бетон, поперечные деформации которого ограничены, работает в условиях трехосного сжатия, что повышает его прочностные и деформационные характеристики. Представлены данные о несущей способности образцов, диаграммы продольных деформаций, поперечных деформаций и коэффициента Пуассона в зависимости от уровня сжимающей нагрузки. Приведен расчет несущей способности на основании EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 и на основании зависимостей, предложенных различными авторами. Произведено сравнение теоретических значений несущей способности со значениями, полученными по результатам эксперимента.

Ключевые слова: трубобетон, косвенное армирование, коэффициент армирования, объемное напряженное состояние.

Введение

Косвенное армирование является одним из эффективных способов повышения несущей способности бетона на сжатие. При таком виде армирования бетон, поперечные деформации которого ограничены, работает в условиях трехосного сжатия. За счет этого повышаются его прочностные и деформационные характеристики, и может быть достигнута существенная экономия материалов.

Эффект косвенного армирования известен с начала 20 века. Существует множество предложений по применению косвенного армирования для сжатого бетона в различных конструкциях [1-2]. При этом до сих пор появляются новые варианты усиления сжатых и изгибаемых элементов при помощи косвенного армирования, и совершенствуются методики расчета [3-10].

Одним из самых эффективных вариантов косвенного армирования является применение в качестве обоймы для бетона стальных труб круглого сечения.

Методика проведения и результаты эксперимента

Авторами были испытаны на центральное сжатие 2 серии коротких ($L/d \leq 4$) трубобетонных образцов малого сечения (Рисунок 1.а)). Длина образцов $L=170$ мм. В качестве косвенного армирования применялись электросварные прямошовные трубы диаметром $d \approx 42$ мм с толщиной стенки для первой серии $t_I=1,4$ мм; для второй серии $t_{II}=1,7$ мм. Из-за малости сечения, даже при достаточно тонкой стенке трубы, коэффициент армирования $\mu_{ху}$ получался относительно высоким. Для бетонного ядра применялся тяжелый бетон с гранитным заполнителем крупности 3-10 мм.

Чтобы не допустить разрушения торцов опытных образцов устраивались сварные стальные оголовки. Относительные деформации замерялись при помощи электротензорезисторов с базой 5 мм, которые размещались в среднем сечении по периметру образца (4 шт. для измерения продольных деформаций; 2 шт. для измерения поперечных деформаций). При построении опытных диаграмм показания датчиков осреднялись. Также поперечные деформации замерялись тензодатчиками с базой 1 мм, размещенными на электросварном шве.

Образец вначале центрировался пробной нагрузкой $(0,1 \dots 0,2)N_u$, после чего подвергался нагружению ступенями по $0,1N_u$ с десятиминутными выдержками между ступенями. Потеря несущей способности образцов происходила после потери местной устойчивости стенкой

трубы и образования складок на поверхности образцов (Рисунок 1.б)). При дальнейшем нагружении происходило плавное падение несущей способности образцов при быстром росте деформаций. Поперечные деформации, замеренные на электросварном шве на начальных этапах загрузения, практически не отличались от деформаций на остальной поверхности образца и только при нагрузках более $(0,6...0,7)N_u$ начинали превышать значения, полученные по остальным тензодатчикам (до 25% превышения). Но из-за малости зоны электросварного шва, разницей можно пренебречь.

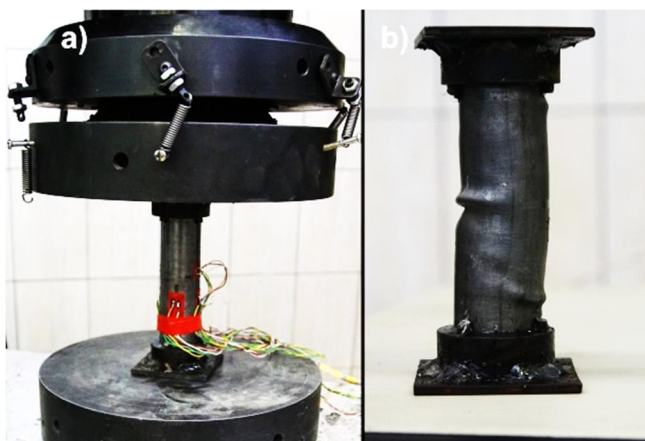


Рисунок 1 - а) Испытание образцов;
б) Образец после испытания

Основные параметры опытных образцов и результаты испытаний представлены в таблице 1. Диаграммы деформирования образцов, полученные после обработки тензометрических данных, приведены на рисунке 2.

После достижения относительных деформаций 0,01 отдельные тензодатчики начинали выходить из строя и в целом точность измерений, при деформациях превышающих это значение, невелика, но полученные данные позволяют определить порядок относительных деформаций.

Прочностные и деформационные характеристики для бетона определялись испытанием прямоугольных призм 15х15х60 см, для стали – испытанием образцов труб на разрыв. Во избежание смятия трубы в местах захватов, в торцах трубы размещались вкладыши из стального проката круглого сечения.

Таблица 1 - Параметры опытных образцов и результаты испытаний

Образец	Сечение трубы $d \times l$, мм	Коэффициент армирования, μ_{ky}	Прочность трубы по пределу текучести R_s , МПа	Применная прочность бетона R_b , МПа	Несущая способность трубо-бетонного образца, N_u , кН	Средняя несущая способность для серии, $N_{um,exp}$, кН
I-1	42х1,4	0,148	324,59	23,51	126,75	126,55
I-2	42х1,4	0,148	324,59	23,51	126,63	
I-3	42х1,4	0,148	324,59	23,51	127,21	
I-4	42х1,4	0,148	324,59	23,51	125,60	
II-1	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,58	144,10
II-2	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,76	
II-3	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	142,12	
II-4	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,94	

Сравнение опытных данных с существующими методиками расчета

При расчете несущей способности трубобетонных элементов повышаются прочностные характеристики бетона в зависимости от коэффициента эффективности косвенного армирования, зависящего от уровня обжатия, которое в свою очередь зависит от ряда факторов.

В EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 для определения несущей способности приведена зависимость:

$$N_u = \eta_s A_s R_s + A_b f_c [1 + \eta_b (t/d) (R_s/f_c)], \quad (1)$$

где A_s и A_b – площади сечений стальной трубы и бетонного ядра соответственно, мм²;
 f_c – цилиндрическая прочность бетона, МПа;
 η_s и η_b – коэффициенты, зависящие от относительной гибкости $\bar{\lambda}$.

Таким образом, уровень обжатия зависит от толщины стенки, диаметра трубы и соотношения прочностных характеристик стали и бетона. При этом к прочности стали вводится понижающий коэффициент η_s . При расчете по выражению (1) цилиндрическая прочность бетона принималась $f_{cm}=25$ МПа.

Аналогичный подход к определению несущей способности трубобетона использован С.Б. Крыловым [11]:

$$N_u = 0,75 R_s A_s + R_b A_b \left\{ 1 + [a + b \cdot e^{\frac{-1}{c}(R_s A_s + R_b A_b)}] \frac{t}{d - 2t} \frac{R_s}{R_b} \right\}, \quad (2)$$

где e – случайный эксцентриситет;

a , b , c – эмпирические коэффициенты, полученные на основании анализа большого числа опытных данных.

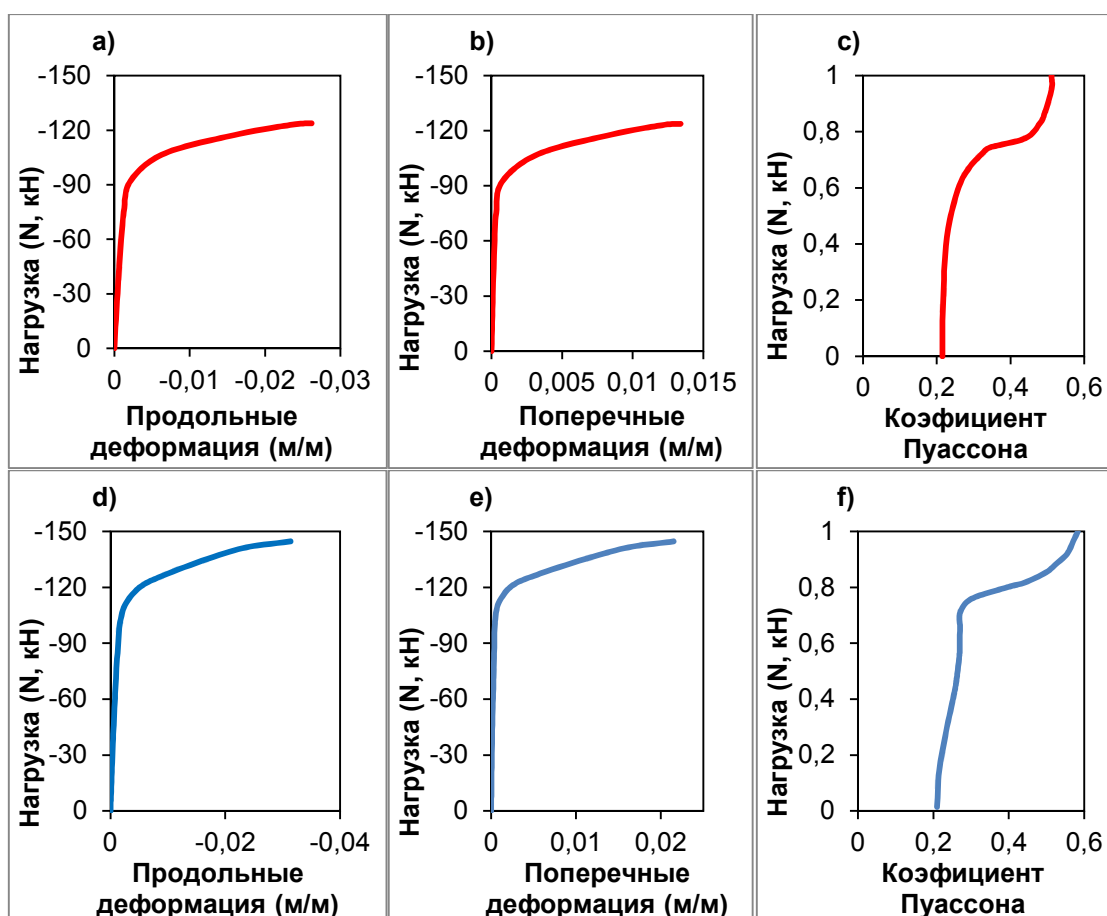


Рисунок 2 - Зависимости относительных продольных деформаций, поперечных деформаций и коэффициента Пуассона от сжимающей нагрузки N (относительной сжимающей нагрузки N/N_u) для образцов серии I [a),b),c)] и серии II [d),e),f)] соответственно.

Видно, что в зависимости (2), также как и в (1), помимо повышающего коэффициента для бетона, вводится понижающий коэффициент 0,75 для стали. Это объясняется сложным напряженно-деформированным состоянием трубы, испытывающей помимо продольного сжатия, тангенциальное растяжение из-за давления бетонного ядра.

И.Г. Лютковским [12] для определения несущей способности трубобетонных элементов предлагается зависимость:

$$N_u = R_b A_b + \alpha R_s A_s, \quad (3)$$

где $\alpha = \sqrt{1 + \frac{(k-1)^2}{3}},$

$$k = 4,8 d^{0,18} (0,03 \mu_{xy}^{-0,72} + 1).$$

Таблица 2 - Сравнение экспериментальных и теоретических значений несущей способности трубобетонных элементов

	Серия I	Среднее отклонение от экспериментального значения	Серия II	Среднее отклонение от экспериментального значения
$N_{um,exp}$, кН	126,55	-	144,10	-
$N_{u,theory}$, кН (Eurocode)	107,93	-14,7%	135,16	-6,2%
$N_{u,theory}$, кН (С.Б. Крылов)	135,08	6,7%	175,19	21,6%
$N_{u,theory}$, кН (И.Г. Лютковский)	148,59	17,4%	192,44	33,5%
$N_{u,theory}$, кН (А.Л. Кришан)	133,62	5,6%	145,51	1,0%

В данном случае коэффициент α вводится только к прочностным характеристикам стали и при этом $\alpha > 1$.

А.Л. Кришан для определения разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов [13] использовал выражение:

$$N_u = (R_b + k \sigma_{br}) A_b + \alpha_s R_s A_s. \quad (4)$$

Здесь боковое давление σ_{br} и коэффициент α_s зависят от площадей стали и бетона и коэффициента бокового давления k , который в свою очередь можно определить по формуле [14]:

$$k = 5,3 - 0,8 \frac{R_s A_s}{R_b A_b}, \quad (5)$$

Сравнение экспериментальных данных о несущей способности с теоретическими значениями, рассчитанными по зависимостям (1)-(5) приведено в таблице 2.

Выводы

Обойма в виде стальной трубы позволяет существенно повысить прочность на сжатие бетонного ядра.

Значительная разница опытной несущей способности и теоретической (особенно для серии II), вычисленной по зависимостям, предлагаемым С.Б. Крыловым и И.Г. Лютковским, объясняется тем, что они включают эмпирические коэффициенты, полученные для образцов с $\rho_l < 0,14$ и $d > 100$ mm. Очевидно, они не подходят для образцов малого сечения с высоким коэффициентом армирования.

Зависимость (1), приведенная в EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4, дает более близкие к опытным значения несущей способности (по крайней мере, для трубобетонных элементов малого сечения).

Наилучшая сходимость получена на основании выражения (4) А.Л. Кришана. Среднее отклонение от экспериментальных значений составило 5,6% для серии I и 1,0% для серии II.

В дальнейшем подобные трубобетонные элементы предполагается применять в качестве сжатых элементов ферм и для усиления сжатой зоны изгибаемых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, Н.Н. Влияние косвенного армирования на деформации бетона [Текст] / Н.Н. Попов, Н.Н. Трекин, Н.Г. Матков // Бетон и железобетон. - 1988. - №11. - С. 33-36.
2. Манаенков, И.К. Учет свойств ограниченного бетона в российских нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций [Текст] / И.К. Манаенков // Новая наука: стратегии и векторы развития. - 2015. - №4. - С. 89-92.
3. Alacali, S.N. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation / S.N. Alacali, B. Akbas, B. Dorana // Appl. Soft Comput. – 2010. - №11. - pp. 2645-2655
4. Masoudnia, R. Badaruzzaman An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill / R. Masoudnia, S. Amiri, W.H. Wan Badaruzzaman // Aust. j. basic appl. sci. - 2011. - №5, - pp. 1715-1721
5. E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui, J. Alloys Compd. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns / E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui // Alloys Compd. – 2013. №577S. – pp. 756-759
6. Naeef, M. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5 Machine Learning Method / M. Naeef, M. Bali, M.R. Naeef, J.V. Amir // Journal of Civil Engineering. – 2013, - №17(7). - pp. 1714-1719.
7. Ванус, Д.С. Деформативность и трещиностойкость изгибаемых элементов с косвенным армированием [Текст] / Д.С. Ванус // Промышленное и гражданское строительство. - 2009. - №4. - С. 57-61.
8. Тамразян, А.Г. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны [Текст] / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - №7. - С. 41-44.
9. Тамразян, А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы [Текст] / А.Г. Тамразян // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - № 7. - С. 51-54.
10. Тамразян, А.Г. Динамическая устойчивость сжатого железобетонного элемента как вязкоупругого стержня [Текст] / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. - 2011. - № 1-2. - С.193-196.
11. Крылов, С.Б. Расчетные сопротивления бетона и стали в центрально и внецентренно сжатых трубобетонных конструкциях [Текст] / С.Б. Крылов, П.П. Смирнов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. - №3. - С. 20-24
12. Людковский, И.Г. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии [Текст] / И.Г. Людковский, В.М. Фонов, А.П. Нестерович // Бетон и железобетон. – 1989. - №1. - С.4-6
13. Кришан, А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов [Текст] / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // Бетон и железобетон. – 2008. - №2, - С.22-24
14. Кришан, А.Л. Трубобетонные колонны для высотных зданий [Текст] / А.Л. Кришан, В.В. Ремнев // Промышленное и гражданское строительство. - 2009. - №10. - С.22-24.

Тамразян Ашот Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, доктор технических наук, профессор

E-mail: tamrazian@mail.ru

Манаенков Иван Константинович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Аспирант

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

A.G. TAMRAZIAN, I.K. MANAENKOV

TESTING OF SMALL-DIAMETER PIPE-CONCRETE SAMPLES WITH A HIGH REINFORCEMENT FACTOR

The article describes the technique and results of testing short pipe elements with a small diameter and a relatively high reinforcement factor. Electric-welded straight-through steel tubes 42x1,4 mm and 41,5x1,7 mm were used as a cradle for the concrete. With this type of indirect reinforcement concrete whose transverse deformations are limited works under conditions of triaxial compression that increases

its strength and deformation characteristics. The article presents data on the load-bearing capacity of the samples, the longitudinal strain diagram, the transverse deformations and the Poisson's ratio depending on the level of the compressive load. The load-carrying capacity is calculated on the basis of EN 1994-1-1: 2004 Eurocode 4 and based on the dependencies offered by different authors. The theoretical values of the load-carrying capacity were compared with the values obtained from the results of the experiment.

Key words: pipe-concrete, indirect reinforcement, reinforcement factor, volumetric stress state.

BIBLIOGRAPHY

1. Popov, N.N. Vliyaniye kosvennogo armirovaniya na deformatsii betona [Tekst] / N.N. Popov, N.N. Trekin, N.G. Matkov // Beton i zhelezobeton. - 1988. - №11. - S. 33-36.
2. Manayenkov, I.K. Uchet svoystv ogranichenogo betona v rossiyskikh normakh proyektirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Tekst] / I.K. Manayenkov // Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya. - 2015. - №4. - S. 89-92.
3. Alacali, S.N. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation / S.N. Alacali, B. Akbas, B. Dorana // Appl. Soft Comput. - 2010. - №11. - pp. 2645-2655
4. Masoudnia, R. Badaruzzaman An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill / R. Masoudnia, S. Amiri, W.H. Wan Badaruzzaman // Aust. j. basic appl. sci. - 2011. - №5. - pp. 1715-1721
5. E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui, J. Alloys Compd. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns / E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui // Alloys Compd. - 2013. №577S. - pp. 756-759
6. Naej, M. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5 Machine Learning Method / M. Naej, M. Bali, M.R. Naej, J.V. Amir // Journal of Civil Engineering. - 2013, - №17(7). - pp. 1714-1719.
7. Vanus, D.S. Deformativnost' i treshchinostoykost' izgibayemykh elementov s kosvennym armirovaniyem [Tekst] / D.S. Vanus // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2009. - №4. - S. 57-61.
8. Tamrazyan, A.G. K raschetu izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem szhatoy zony [Tekst] / A.G. Tamrazyan, I.K. Manayenkov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2016. - №7. - S. 41-44.
9. Tamrazyan, A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2014. - № 7. - S. 51-54.
10. Tamrazyan, A.G. Dinamicheskaya ustoychivost' szhatogo zhelezobetonno elementa kak vyazkouprugogo sterzhnya [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Vestnik MGSU. - 2011. - № 1-2. - S.193-196.
11. Krylov, S.B. Raschetnyye soprotivleniya betona i stali v tsentral'no i vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh konstruktsiyakh [Tekst] / S.B. Krylov, P.P. Smirnov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. - 2016. - №3. - S. 20-24
12. Lyudkovskiy, I.G. Prochnost' i deformativnost' trubobetonnykh elementov pri osevom szhatii [Tekst] / I.G. Lyudkovskiy, V.M. Fonov, A.P. Nesterovich // Beton i zhelezobeton. - 1989. - №1. - S.4-6
13. Krishan, A.L. Opredeleniye razrushayushchey nagruzki szhatykh trubobetonnykh elementov [Tekst] / A.L. Krishan, A.I. Zaikin, M.S. Kupfer // Beton i zhelezobeton. - 2008. - №2, - S.22-24
14. Krishan, A.L. Trubobetonnyye kolonny dlya vysotnykh zdaniy [Tekst] / A.L. Krishan, V.V. Remnev // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2009. - №10. - S.22-24.

A.G. Tamrazyan

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Doctor of Techn. Science, Prof., Head of the Reinforced Concrete and Masonry Structures Department

E-mail: tamrazian@mail.ru

I.K. Manaenkov

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Post graduated student

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com