

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.079.23

Кришан А.Л., Мельничук А.С.

## ПРОЧНОСТЬ ТРУБОБЕТОННЫХ КОЛОНН КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Статья содержит результаты анализа конечноэлементных моделей трубобетонных образцов квадратного поперечного сечения с различной толщиной оболочки. Расчет выполнен на ЭВМ в расчетном комплексе «Лира 9.6».

**Ключевые слова:** трубобетон, квадратное поперечное сечение, центральное сжатие, прочность, Лира 9.6.

Article contains results of the analysis of concrete filled steel tube columns with square cross-section with various thickness of a cover. The calculation was per-formed on a PC with «Lira 9.6» software.

**Keywords:** concrete filled steel tubes, square cross section, axial compression, durability, Lira 9.6.

Современное строительство все больше нуждается в прочных, надежных, экономичных строительных конструкциях. Для возведения протяженных мостов, большепролетных цехов, высотных зданий требуются вертикальные несущие конструкции, которые бы обладали всеми вышеперечисленными качествами. Примером таких несущих элементов служат трубобетонные колонны (ТБК), широко внедряемые на стройплощадках в экономически развитых странах мира.

ТБК представляют собой композитную конструкцию из стальной трубы, заполненной бетоном. Их достоинства и недостатки достаточно хорошо описаны в литературе [1].

В настоящее время наиболее изучены трубобетонные конструкции круглого поперечного сечения. В них особенно заметно проявляется эффект обоймы. Кроме того, стальные трубы круглого сечения в нашей стране наиболее доступны.

Однако область практического применения ТБК круглого сечения имеет свои ограничения. Так, с увеличением эксцентриситета приложения сжимающей нагрузки их несущая способность резко падает, что связано с геометрическими особенностями формы поперечного сечения. Кроме того, круглая поверхность колонны усложняет их применение с конструктивной точки зрения. Возникают дополнительные сложности при устройстве стыков колонн с несущими элементами перекрытий.

Применение ТБК квадратного сечения сдерживается отсутствием методики расчета таких конструкций, позволяющей учесть основные особенности их работы под нагрузкой. В Еврокоде и нормативных документах Китая, США, Японии для ТБК квадратного поперечного сечения работа бетона в условиях объемного сжатия не учитывается. Это приводит к недоиспользованию ресурса их несущей способности. В актуализированных строительных нормах России подобной методики вообще нет.

В связи с этим, основной целью данных исследований является разработка методики расчета прочности ТБК квадратного сечения, адекватно учитывающая основные особенности их напряженно-деформиро-

ванного состояния.

На первом этапе работы было выполнено экспериментально-теоретическое исследование прочности центрально сжатых ТБК квадратного поперечного сечения. Для численной оценки эффекта обоймы были испытаны шесть серий коротких ( $h/b = 4$ ) образцов таких конструкций при кратковременном сжатии.

Каждая серия включала в себя по 3 образца-близнеца. Размеры поперечного сечения образцов составляли 100×100, 160×160, 180×180 мм, толщины стенок оболочки – 4, 6, 8 мм соответственно. В качестве оболочки использовались трубы из стали 09Г2С с пределом текучести 360 МПа и стали Ст4сп с пределом текучести 305 МПа (для профиля сечением 180×180). В качестве ядра применялся тяжелый бетон на шлакопортландцементе М400.

Кроме того, были изготовлены две серии образцов с ядром из бетона на расширяющемся цементе «MACFLOW», а также серия с применением бетона, твердеющего под давлением. При изготовлении образцов последней серии использовалось длительное пресование бетонной смеси путем последовательного вдавливания в нее вдоль направляющего стержня, расположенного коаксиально внешней обойме, трех стальных трубок, имеющих увеличивающиеся диаметры. Более подробное описание такого способа изготовления приведено в монографии [1].

Образцы испытывались по стандартной методике и доводились до разрушения. В процессе испытания замерялись деформации стальной оболочки и бетонного ядра.

Основные результаты испытаний представлены в таблице, где обозначены:

$P$  – длительное прессующее давление;

$N_u^{exp}$  – максимальная величина нагрузки, полученная в ходе эксперимента;

$N_u^{th}$  – максимальная величина нагрузки, рассчитанная по предложенной ниже методике;

$N_{bs}$  – суммарное усилие несущих способностей бетонного ядра и трубы, испытанных отдельно ( $N_{bs} = R_b A + R_s A_s$ );

$R_b$  и  $A$  – призменная прочность исходного бетона и площадь сечения ядра;

$R_s$  и  $A_s$  – предел текучести и площадь сечения стальной оболочки.

Эффективность работы трубобетонных элементов оценивалось по отношению максимальной нагрузки и суммарной несущей способности бетонного ядра и трубы, испытанных отдельно ( $N_u/N_{bs}$ ).

Наибольшую эффективность показали образцы сечением 160×160 мм с ядром из бетона, твердеющего под давлением величиной 2,1 МПа. Прочность исследуемых элементов увеличилась в среднем на 51% в сравнении с несущей способностью бетонного ядра и оболочки, испытанных по отдельности.

Серия	P, МПа	$R_b$ , МПа	$N_{u,exp}$ , кН	$N_{bs}$ , кН	$N_u/N_{bs}$	$N_{u,th}$ , кН	$N_{u,exp}/N_{u,th}$
ЦН100	0	44,3	1070	899	1,19	1074	1,00
ЦН160	0	24,3	2466	1843	1,34	2218	1,11
ЦН180	0	25,1	3272	2572	1,27	3145	1,04
ЦР100	1,6	48,2	1190	994	1,20	1136	1,05
ЦО160	2,1	24,3	2796	1843	1,51	2313	1,20
ЦР180	1,4	49,3	3966	3420	1,16	3872	1,02

Несколько меньший (порядка 34%), но также весьма существенный рост прочности наблюдался и у образцов-аналогов из обычного бетона. Значительный эффект обоймы в образцах этих серий связан прежде всего с относительно высоким пределом текучести стали их оболочки.

В образцах с оболочкой из профиля 180×180 мм эффект обоймы оказался заметно меньшим по причине менее прочной оболочки.

В образцах сечением 100×100 мм, как отпрессованных, так и без прессования, прирост прочности за счет эффекта обоймы оказался наименее заметным (порядка 19–20%), что обусловлено относительно высокой прочностью исходного бетона. Примерно такие же данные были получены другими исследователями [2].

Полученные в ходе эксперимента данные по несущей способности были сопоставлены с несущей способностью круглых образцов, исследованных ранее [1]. Сравнение показало, что прочность образцов ТБК квадратного поперечного сечения примерно на 15–20% ниже прочности образцов круглого сечения с аналогичными параметрами, однако все еще остается достаточно высокой.

На втором этапе для качественной оценки распределения напряжений по сечению трубобетонной стойки квадратного сечения был выполнен анализ трех конечно-элементных моделей таких конструкций. Анализ выполнялся в компьютерном расчетном комплексе ЛИРА 9.6. Размеры смоделированных трубобетонных элементов рассматриваемой конструкции составляли 160×160×640 мм, толщины стенок оболочки 1, 6 и 10 мм. Расчетные модели были скомпонованы из изопараметрических физически нелинейных объемных

восьмиузловых конечных элементов 236 типа. В соответствии со схемами армирования и разбиения образца трубобетонного элемента на конечные элементы, последние имели два типа жесткости: 1 – КЭ с параметрами стальной оболочки; 2 – КЭ с параметрами бетонного ядра. Их жесткостные характеристики были аналогичны физико-механическим параметрам материалов лабораторных образцов, испытанных на первом этапе работы.

На узлы нижнего торца исследуемого элемента были наложены связи, запрещающие перемещения по всем координатным осям, а также вращение вокруг них. На узлы верхнего торца накладывались только связи, не допускающие перемещения в направлениях, перпендикулярных продольной оси образца. Перемещения узлов верхнего торца объединялись. В процессе загрузки на верхний торец была приложена равномерно распределенная по площади нагрузка. Загрузка образца осуществлялась ступенчатой нагрузкой равномерного шага по 5% от номинальной величины. Расчет выполнялся пошагово-итерационным методом с учетом физической нелинейности материалов.

В качестве критерия разрушения было выбрано достижение интенсивности напряжений в стальной оболочке величины предела текучести стали.

По результатам расчета были получены картины распределения напряжений по нормальному сечению смоделированных образцов. На рис. 1, 2 представлены мозаики главных напряжений N1 и N2 в бетонном ядре элемента с толщиной стенки 6 мм. Для двух других расчетных моделей главные напряжения распределялись аналогичным образом.

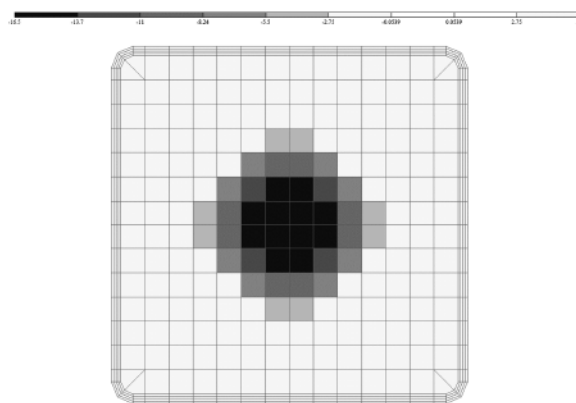


Рис. 1. Мозаика распределения главных напряжений N1 в бетонном ядре для образца с толщиной стенки 6 мм

Анализ полученных результатов показал, что главные сжимающие напряжения N1 сконцентрированы преимущественно в центре сечения образца. Аналогичные по знаку напряжения N2 образуют симметричную по всем направлениям крестообразную фигуру, «опирающуюся» на углы сечения (см. рис. 2).

Подобная картина распределения главных напряжений может свидетельствовать о том, что в процессе нагружения углы элемента выступают в качестве элементов с повышенной жесткостью по сравнению с элементами, располагающимися возле центральной части стенки. Аналогичная картина напряженного состояния в нормальном сечении ТБК получена другими авторами [3].

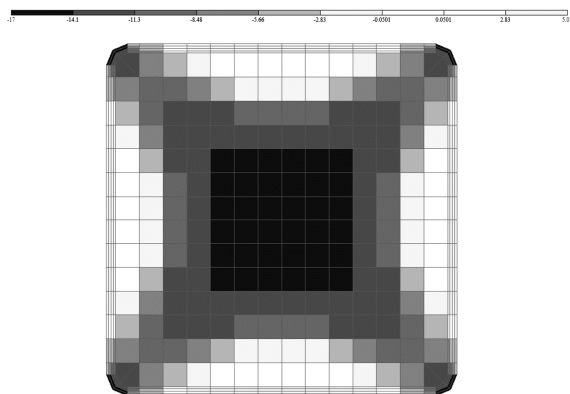


Рис. 2. Мозаика распределения главных напряжений N2 в бетонном ядре для образца с толщиной стенки 6 мм

В процессе последующего анализа было выполнено наложение мозаик напряжений N1 и N2 и определена зона поперечного сечения, где главные напряжения обоих направлений имели знак минус. С учетом главного сжимающего напряжения N3, для всех зон действующего по направлению, практически совпадающему с продольной осью рассматриваемого элемента, данная зона поперечного сечения соответствует области объемного сжатия бетонного ядра. Эта зона представляет собой квадрат с закругленными углами со стороной порядка  $(0,52 - 0,58)b_b$ , где  $b_b$  – ширина сечения бетонного ядра, и располагается в центральной части сечения образца (рис. 3). Причем в самом центре зоны объемного сжатия можно выделить участок с размерами, равными половине всей зоны, на котором главные сжимающие напряжения N1 и N2 равны между собой и соответствуют радиальным напряжениям трубобетонных колонн круглого поперечного сечения с аналогичными геометрическими и конструктивными параметрами. Эти напряжения предлагается вычислять по формуле

$$\sigma_{br} = \frac{\mu_p R_{s,p}}{k}, \quad (1)$$

в которой  $\mu_p$  – коэффициент армирования трубобетонной колонны;  $R_{s,p}$  – предел текучести стали оболочки;  $k$  – коэффициент бокового давления, определяемый по формуле

$$k = 7 - 1,2 \frac{\mu_p R_{s,p}}{R_b}, \quad (2)$$

где  $R_b$  – прочность бетона при одноосном сжатии.

Количественный и качественный анализ полученной картины распределения главных напряжений в бетонном ядре позволил предложить формулу для вычисления осредненной величины радиального напряжения по всему сечению в бетоне  $\sigma_{brm}$ , оказывающей определяющее влияние на его прочность при объемном сжатии  $R_{b3}$ . Эта прочность при известном наименьшем по величине боковом сжимающем напряжении с достаточной для практики точностью определяется простой зависимостью

$$R_{b3} = R_b + k\sigma_{brm}. \quad (3)$$

Учитывая, что часть поперечного сечения ТБК работает в условиях, близких к одноосному сжатию, примем для этой части предельное напряжение в бетоне равным  $R_b$ . На рис. 3, а это незаштрихованная часть сечения с площадью  $A_1 = b_b^2 - \xi^2 b_b^2$ , где  $\xi = 0,52 - 0,58$  – безразмерный параметр, определяющий размер стороны зоны объемного сжатия.

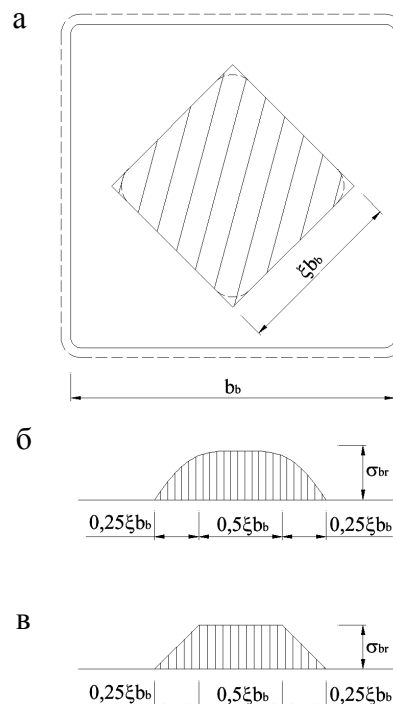


Рис. 3. Расчетная схема для определения осредненной величины бокового сжимающего напряжения (а – поперечное сечение с зоной объемного сжатия в центре; б – фактическая эпюра боковых сжимающих напряжений; в – принятая к расчету эпюра боковых сжимающих напряжений)

Как отмечалось выше, зона объемного сжатия состоит из двух равных по площади участков с различными закономерностями распределения главных сжимающих напряжений N1 (рис. 3, б). Суммарная площадь данных участков  $A_2 = \xi^2 b_b^2$ . Приняв рас-

пределение этих напряжений по рис. 3, в, получим следующее выражение для усилия, воспринимаемого бетоном:

$$N_b = R_b A_1 + R_b A_2 + 0,25k\sigma_{br}\xi b_b^2 + 0,5k\sigma_{br}\xi b_b^2, \quad (4)$$

которое после небольших преобразований может быть записано в виде

$$N_b = (R_b + 0,75\xi k\sigma_{br})A, \quad (5)$$

где  $A$  – площадь сечения всего бетона.

Если по результатам выполненного численного анализа принять наиболее осторожное значение  $\xi = 0,52$ , то с учетом (1) получаем следующую формулу для расчета прочности бетонного ядра:

$$R_{b3} = R_b + 0,4\mu_p R_{s,p}. \quad (6)$$

Тогда прочность короткого центрально сжатого трубобетонного элемента квадратного сечения может быть вычислена по формуле

$$N = R_{b3}A + 0,9R_{s,p}A_p. \quad (7)$$

где  $A_p$  – площадь сечения стальной оболочки.

Результаты сопоставления рассчитанных по фор-

муле (7) значений прочности исследованных образцов ТБК с полученными опытными данными свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости. Немаловажно, что все полученные расхождения идут в запас прочности.

Таким образом, в результате выполненных экспериментально-теоретических исследований удалось предложить простую инженерную методику расчета прочности коротких центрально-сжатых трубобетонных колонн квадратного сечения, что должно позволить существенно увеличить масштабы их практического применения в строительстве.

#### Список литературы

1. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром: монография. Ростов н/Д.: Рост. гос. строит. ун-т, 2011. 372 с.
2. Сталебетонные фермы из гнутосваренных профилей / Людковский И.Г., Фонов В.М., Кузьменко С.М., Самарин С.И. // Бетон и железобетон. 1982. №7.
3. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии // Бетон и железобетон. 1993. № 1. С. 13–15.

#### Bibliography

1. Krishan A.L. 2011. Concrete filled tubes with pre-stressed concrete core. Rostov-on-Don: Rostov state building university. 372.
2. Lydkovskiy I.G., Fonov V.M., Kuzmenko S.M., Samarina S.I. Reinforced concrete truss with bent welded profiles. // Concrete and reinforced concrete. 1982. №7.
3. Chihladze E.D., Arslanov A.D. Calculation of steel-concrete elements of rectangular cross-section strength under axial compression // Concrete and reinforced concrete. 1993. № 1. P. 13–15.