

УДК 624.016

Кришан А.Л. – доктор технических наук, профессор

E-mail: kris_al@mail.ru

Мельничук А.С. – ассистент

E-mail: amel@list.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Адрес организации: 455000, Россия, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38

Прочность и деформативность коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения

Аннотация

В статье приведены основные зависимости для определения прочности и деформативности коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения. Теоретическим путем получены новые формулы для расчета предельного напряжения в бетонном ядре и напряжения осевого направления в стальной оболочке. Выведена формула для вычисления относительной деформации в вершине диаграммы деформирования бетонного ядра. Результаты расчетов по предложенным зависимостям хорошо совпали с данными экспериментов.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, квадратное, поперечное сечение, прочность, деформативность, бетонное ядро, стальная оболочка.

Одной из тенденций в современном строительстве является увеличение объемов возведения высотных зданий. Повышение этажности зданий благоприятно оказывается на стоимости единицы площади, а также уменьшает площади застройки городов.

Высотные здания характеризуются относительно высокими нагрузками на их несущие конструкции, в частности, колонны. Для таких зданий требуются высокопрочные, экономичные, безопасные в эксплуатации вертикальные несущие конструкции.

Опыт проектирования и строительства нескольких сотен высотных зданий по всему миру показал, что вышеупомянутыми свойствами обладают трубобетонные колонны (ТБК).

Широкое применение трубобетонных колонн в настоящее время сдерживается, в основном, отсутствием в действующих нормативных документах методики расчета их прочности, учитывающей основные особенности их напряженно-деформированного состояния.

Прочность коротких центрально сжатых трубобетонных колонн (ТБК) обычно определяют по формуле, которая еще в 1935 г. теоретическим путем была получена А.А. Гвоздевым и может быть записана в следующем виде:

$$N = \sigma_{bz} A + \sigma_{pz} A_p, \quad (1)$$

где σ_{bz} – предельное напряжение бетонного ядра в осевом направлении;

σ_{pz} – напряжение осевого направления в стальной оболочке;

A и A_p – площади поперечных сечений бетонного ядра и стальной оболочки.

Следовательно, для определения прочности ТБК сначала необходимо вычислить значения напряжений σ_{bz} и σ_{pz} . Сначала покажем, как теоретически можно найти эти напряжения для колонн, имеющих круглое поперечное сечение.

Известно, что бетонное ядро ТБК круглого поперечного сечения работает в условиях трехосного сжатия типа $|\sigma_1| > |\sigma_2| = |\sigma_3|$ (рис.). В нашем случае $\sigma_3 = \sigma_{br}$ и $\sigma_1 = \sigma_{pz}$, где σ_{br} – боковое давление на бетон со стороны стальной оболочки.

Большинство исследователей для нахождения прочности объемно сжатого бетона σ_{bz} при равномерном обжатии элемента напряжениями $|\sigma_{br}| < |\sigma_{bz}|$ используют достаточно простую зависимость:

$$\sigma_{bz} = R_{bu} + k\sigma_{br}, \quad (2)$$

в которой k – коэффициент бокового давления.

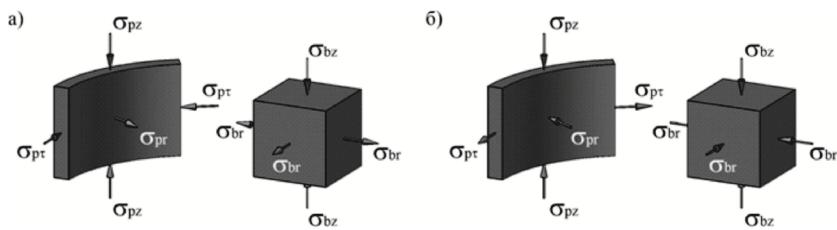


Рис. Напряженное состояние стальной трубы и бетонного ядра в различных стадиях загружения:
а – при $v_p > v_b$; б – при $v_p < v_b$

Основная сложность расчета связана с определением второго слагаемого в правой части уравнения (2). Величина бокового давления на бетон в предельном состоянии σ_{br} зависит от геометрических и конструктивных параметров трубобетонного элемента, т.е. в начальной стадии расчета она не известна. То же можно сказать про значение коэффициента бокового давления. Ранее большинство исследователей принимали коэффициент k постоянным и примерно равным 4. В настоящее время доказано [1, 2, 3], что значение k в формуле (2) применительно к бетонному ядру ТБК может меняться в довольно широком интервале (чаще всего $k = 3 \div 7$) в зависимости от уровня обжатия $m = \sigma_{br}/\sigma_{bz}$ и вида бетона. В частности, для плотных бетонов предложена [1] дробная функция вида:

$$k = \frac{1}{0,1 + 0,9m}. \quad (3)$$

Следует иметь ввиду, что перед разрушением ТБК боковое давление σ_{br} может достигать величины 10 \div 15 МПа и более, поэтому даже незначительные неточности в определении величины k могут привести к существенным ошибкам в определении прочности бетона σ_{bz} и разрушающей нагрузки для колонны.

Более точную зависимость для вычисления σ_{bz} можно получить из совместного решения уравнений (2) и (3):

$$\sigma_{bz} = R_{bu} + \left[\frac{\bar{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10\bar{\sigma}} \right] R_{bu}, \quad (4)$$

где $\bar{\sigma}$ – относительная величина бокового давления со стороны стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{br}/R_{bu}. \quad (5)$$

Напряжение осевого направления в стальной оболочке с учетом условия текучести Генки-Мизеса также выражим через относительное боковое давление:

$$\sigma_{pz} = R_{bu} \left(\sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2} - \bar{\sigma} \right) \frac{A}{A_p}, \quad (6)$$

где ρ – конструктивный коэффициент трубобетона, определяемый по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_y A_p}{R_{bu} A}, \quad (7)$$

в которой σ_y – предел текучести стали внешней оболочки ТБК.

После подстановки (4) и (6) в уравнение (1) имеем следующую зависимость:

$$N = R_{bu} A \left(\frac{1 - \bar{\sigma}}{2} + \sqrt{\left(\frac{1 - \bar{\sigma}}{2} \right)^2 + 10\bar{\sigma} + \sqrt{\rho^2 - 3\bar{\sigma}^2}} \right). \quad (8)$$

Замечаем, что при фиксированных значениях геометрических и конструктивных параметров ТБК суммарная продольная сила, воспринимаемая бетоном и сталью в нормальном сечении, зависит только от относительного бокового давления $\bar{\sigma}$.

Максимальному значению продольной силы соответствует условие:

$$\frac{dN}{d\bar{\sigma}} = 0. \quad (9)$$

Относительное боковое давление стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии ТБК можно определить по формуле:

$$\bar{\sigma} = \frac{3\rho}{6,67 + \rho}. \quad (10)$$

Найденный параметр $\bar{\sigma}$ позволяет определять не только прочность коротких центрально сжатых трубобетонных элементов круглого поперечного сечения, но и напряжения σ_{bz} и σ_{pz} .

С помощью полученных зависимостей определяется теоретическое значение разрушающей нагрузки ТБК круглого поперечного сечения. Далее, по формуле (10) находится относительная величина осредненного бокового давления, а по формуле (8) – значение разрушающей нагрузки.

Исходная формула для вычисления относительной деформации ε_{b00} в вершине диаграммы деформирования « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ » бетонного ядра ТБК имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{b00} = \frac{\sigma_{bz}}{v_{b3}E_b}, \quad (11)$$

где v_{b3} – коэффициент упругости бетона в вершине диаграммы « $\sigma_{bz} - \varepsilon_{bz}$ »; E_b – начальный модуль упругости бетона.

Подставив зависимость (2) в формулу (11) и проведя очевидные преобразования, получим следующую формулу:

$$\varepsilon_{b00} = \frac{v_{bu}}{v_{b3}} \left(\varepsilon_{bo} + \frac{k\sigma_{br}}{v_{bu}E_b} \right), \quad (12)$$

где v_{bu} – коэффициент упругости в вершине диаграммы одноосно сжатого бетона; ε_{bo} – относительная деформация бетона при осевом сжатии и однородном напряженном состоянии.

Согласно СП 63.13330.2012, величина ε_{bo} может быть принята равной 0,002.

Произведение выражения, заключенного в правой части формулы (4) в квадратные скобки, на прочность бетона R_{bu} равно произведению коэффициента бокового давления k на величину σ_{br} в формуле (2).

Используя зависимость (4) и связь между деформациями и напряжениями для одноосно сжатого бетона аналогичную формуле (11), выражение (12) запишем в виде:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{bo} \frac{v_{bu}}{v_{b3}} \left(\frac{\bar{\sigma}+1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}-1}{2} \right)^2 + 10\bar{\sigma}} \right). \quad (13)$$

В механике железобетона соотношение коэффициентов упругости в вершинах диаграмм одноосно и объемно сжатого бетона принимают в обратно пропорциональной зависимости от соотношения соответствующих напряжений:

$$\frac{v_{bu}}{v_{b3}} = \left(\frac{\sigma_{bz}}{R_{bu}} \right)^n. \quad (14)$$

В работе [1] принято, что $n \approx 1$. Анализ многочисленных экспериментальных данных, полученных по результатам, как собственных исследований, так и исследований японских ученых [2] показал, что отношение v_{bu}/v_{b3} не является константой. Оно определяется конструктивным коэффициентом трубобетона и может быть найдено по приближенной зависимости:

$$\frac{v_{bu}}{v_{b3}} = 1 + 0,35\rho^{0,5}. \quad (15)$$

Следовательно, значение относительной деформации сжатия бетонного ядра ТБК в основном зависит от двух факторов: деформации бетона в вершине соответствующей диаграммы при осевом сжатии и конструктивного коэффициента трубобетона.

Трубобетонные колонны квадратного поперечного сечения имеют свои особенности. Стенка оболочки таких колонн находится в сложном напряженном состоянии и работает не только на растяжение-сжатие, как в колоннах круглого сечения, но и на изгиб. Кроме того, величина и направление напряжений σ_l по сечению бетонного ядра меняются [4, 5].

Первое обстоятельство возможно учесть при помощи коэффициента γ_p , введенного в учитывающего условия работы стальной оболочки ТБК квадратного сечения. Найти его можно по формуле:

$$\gamma_p = 0,7\alpha_p \quad (16)$$

где α_p – коэффициент, учитывающий величину упрочнения холодногнутых профилей; в случае использования для стальной оболочки ТБК горячекатанных или сварных профилей $\alpha_p = 1,0$.

Неравномерность распределения напряжений по сечению бетонного ядра была отмечена как в ходе собственных проведенных экспериментальных исследований, так и в работах других авторов, например, [6]. Анализ многочисленных экспериментальных данных позволил описать неоднородность напряженно-деформированного состояния ядра колонны при помощи коэффициента ξ , определяемого по формуле:

$$\xi = \left(1 - 0,01 \frac{h}{\delta}\right)^2 \geq 0, \quad (17)$$

в ней δ – толщина стенки стальной оболочки; h – размер стороны сечения колонны.

С учетом вышеизложенного, предложена формула для определения сопротивления бетонного ядра сжатию в осевом направлении:

$$\sigma_{bz} = R_{bu} \left[1 + \xi \gamma_p \left(\frac{\bar{\sigma} - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma} - 1}{2} \right)^2 + 10\bar{\sigma}} \right) \right], \quad (18)$$

где R_{bu} – призменная прочность бетона ядра; $\bar{\sigma}$ – относительное боковое давление стальной оболочки на бетонное ядро в предельном состоянии ТБК, определяемое по формуле (10).

При определении напряжений осевого направления в стальной оболочке с учетом условия текучести Генки-Мизеса для ТБК квадратного сечения следует использовать зависимость (6).

С использованием полученных формул были определены теоретические значения разрушающей нагрузки для ранее испытанных 50 образцов ТБК круглого поперечного сечения, 24 образцов ТБК кольцевого поперечного сечения [7, 8], 66 образцов ТБК квадратного поперечного сечения. Результаты расчетов хорошо совпали с данными экспериментов.

Таким образом, получены теоретические зависимости, позволяющие с достаточной точностью определять прочностные и деформативные свойства коротких ТБК круглого, кольцевого и квадратного поперечных сечений.

Список библиографических ссылок

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Tokyo, 2002. – 176 p.
3. Кришан А.Л., Заикин А.И., Сагадатов А.И. Трубобетонные колонны высотных зданий. – Магнитогорск: ООО «Минитип», 2010. – 195 с.
4. Кришан А.Л., Мельничук А.С. Трубобетонные колонны квадратного сечения // Жилищное строительство, 2012, № 2. – С. 19-22.
5. Кришан А.Л., Мельничук А.С. Прочность трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения. – Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. – 105 с.
6. Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии // Бетон и железобетон, 1993, № 3. – С. 13-15.
7. Кришан А.Л., Трошкина Е.А. Расчет прочности бетонного ядра трубобетонных колонн кольцевого поперечного сечения. Сб. науч. тр. SWORLD. Материалы междунар. практич. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012». Вып. 4, том 47. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – С. 55-60.
8. Кришан А.Л., Заикин А.И., Трошкина Е.А. Прочность коротких трубобетонных колонн круглого и кольцевого поперечного сечения // Архитектура. Строительство. Образование: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 204-210.

Krishan A.L. – doctor of technical science, professor

E-mail: kris_al@mail.ru

Melnichuk A.S. – assistant

E-mail: amel@list.ru

Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov

The organization address: 455000, Russia, Magnitogorsk, Lenin pr., 38

Durability and strain capacity of short concrete-filled steel tube columns with square cross-section

Resume

The concrete-filled steel tube columns (CFST) carries the high durability, reliability, a low material capacity and low cost. Using of the CFST currently constrained by absence of a method of calculation of their durability considering the main features of their intense-strained state in construction norms.

Durability of the short CFST usually defined as the sum of the strengths of the concrete core and the steel pipe. However, the core and the shell of the CFST with square cross-section experienced by a complex stress-strain state.

The concrete core column experiences multi-axial compression. In addition, the stress distribution in the transverse direction over the cross section core varies, that considered by proposed theoretical formula based on statistical processing of the experimental data. The wall of the shell of CFST is in the complex stress state and working not only in the tension-compression (as in the columns with circular cross-section), but also to bending. This fact considered by the coefficient of working conditions, which depends on the type of the type of a shell.

Obtained dependences for calculation of durability and strain capacity of the CFST based on well-known provisions of mechanics of a solid state and allow defining the strength and deformation properties of the short CFST with round, circular and square cross-sections.

Keywords: concrete-filled steel tube columns, square, cross-section, durability, stress-strain behavior, concrete core, steel tube.

Reference list

1. Karpenko N.I. Universal models of reinforced concrete mechanics. – M.: Stroyizdat, 1996. – 416 p.
2. Nishiyama I., Morino S., Sakino K., Nakahara H. Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures. – Tokyo, 2002. – 176 p.
3. Krishan A.L., Zaikin A.I., Sagadatov A.I. Concrete-filled steel tube columns of high-rise buildings. – Magnitogorsk: LTD «Minitip», 2010 – 195 p.
4. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Concrete-filled steel tube columns with square cross-section // Housing construction, 2012, № 2. – P. 19-22.
5. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Durability of concrete-filled steel tube columns with square cross-section. – Magnitogorsk: MGTU, 2013. – 105 p.
6. Chihladze E.D., Arslanhanov A.D. Calculation of durability at an axial compression of steel-concrete elements with rectangular cross-section // Concrete & reinforced concrete, 1993, № 3. – P. 13-15.
7. Krishan A.L., Troshkina E.A. Calculation of durability of concrete core of concrete-filled steel tube columns with ring-shaped cross-section. The collection of proceedings SWORLD. Materials of international research and practical conference: «The modern problems and paths of their decision in science, transport, production and education 2012». Issue 4, Vol. 47. – Odessa: KUPRIENKO, 2012. – P. 55-60.
8. Krishan A.L., Zaikin A.I., Troshkina E.A. Durability of short concrete-filled steel tube columns with round and ring-shaped cross-sections // Architecture. Building. Education: Materials of international research and practical conference. – Magnitogorsk: MGTU, 2014. – P. 204-210.