

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ТРУБОБЕТОНА

Несветаев Г.В., Резван И.В.

ГОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет»,
Ростов-на-Дону, e-mail: rezvan.pec@gmail.com

Проведен анализ существующих российских и европейских методик расчета прочности трубобетонных элементов. Выявлены разногласия по приложению коэффициентов упрочнения к составляющим формул прочности, характеризующих несущую способность стальной оболочки и бетонного ядра трубобетонных колонн. Предложена обобщенная форма записи зависимостей для определения несущей способности трубобетонных элементов, отражающая физическую сущность явления совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра. Подчеркнута определяющая роль зависимости упрочнения бетонного ядра от усилий пассивного бокового обжатия со стороны стальной оболочки. Показана характерная форма записи данной зависимости как произведения величины напряжений бокового обжатия на коэффициент упрочнения бетонного ядра. Выявлены разногласия в определении значений коэффициентов упрочнения бетонного ядра различными учеными. В связи с существующими разногласиями обоснована актуальность дальнейших исследований по оценке несущей способности трубобетонных элементов с применением высокопрочных бетонов.

Ключевые слова: трубобетон, несущая способность, коэффициент упрочнения бетонного ядра

RESISTIBILITY EVALUATION OF THE COMPOSITE COLUMNS

Nesvetaev G.V., Rezvan I.V.

Rostov State Civil Engineering University, Rostov-on-Don, e-mail: rezvan.pec@gmail.com

The analysis of existing Russian and European methods for resistibility calculation of the composite columns is conducted. Differences on the localization of the strengthening factors according to the resistibility equation components evaluating the bearing capacity of steel envelopment and concrete core of the composite columns are showed up. A generalized form of the function for determination of the composite columns sustaining capacity, reflecting the physical essence of the phenomenon of joint work of the steel envelopment and the concrete core is introduced. The decisive role of functional connection between the additional concrete core strengthening and the passive lateral compression from the steel envelopment is emphasized. The typical form of this functional connection is defined as a multiplication of the lateral compression value with the factor of the concrete core strengthening. Diversity of the coefficients of the concrete core strengthening defined by different scientists is brought to light. The urgency in the research of the sustaining capacity of the composite columns with high-strength concrete is established according to the existing dissidence.

Keywords: composite columns, sustaining capacity, coefficient of the concrete core strengthening

Исторически одна из первых зависимостей для оценки несущей способности трубобетонных центрально сжатых колонн круглого сечения представлялась как [4]

$$N = R_b F_b + \alpha F_c R_c, \quad (1)$$

где R_b , F_b – предел прочности и площадь сечения бетонного ядра; R_c , F_c – предел прочности и площадь сечения трубы, причем за предел прочности трубы принимался предел текучести стали; α – коэффициент упрочнения.

Формула (1) не адекватно отражает физическую суть несущей способности трубобетона, т.к. известно, что упрочняется не стальная оболочка, а бетонное ядро, обжатое оболочкой, причем уровень обжатия зависит от соотношения толщины стенки оболочки и диаметра бетонного ядра. Большую часть появившихся позднее зависимостей можно представить в обобщенном виде:

$$N = (cR_b + d) F_b + \alpha F_c R_c, \quad (2)$$

где k , d , α – коэффициенты (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов в ф. (1)

Автор	d	c	α
Гвоздев А.А [4]	0	1	2
Передерий Г.П. [4]	0	1	2,2
Росновский В.А. [4]	18	1	1
Маренин В.Ф., Ренский А.Б. [4]	0	1	α ?
Долженко А.А. [4]	0	1	α ?
Санжаровский Р.С. [4]	13,5	0,6	1
Фонов В.М., Людковский И.Г., Нестерович А.П. [10]	0	1,15–1,42	α^*
Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. [6]	$k\sigma_{br}$	1	0,1–0,5
EN 1992-1-1	$k_2\sigma$	k_1	?
EN 1994-1-1	0	$1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}$	η_a

В табл. 1:
Величина α^* определяется по формуле

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

где

$$k = 4,8D^{-0,18}(0,03\mu^{-0,72} + 1); \quad (4)$$

здесь D – диаметр трубы (100–1220 мм); μ – коэффициент армирования (0,01–0,14).

Величины η_a и h_c при малых эксцентриситетах $e/D < 0,1$, где e – эксцентриситет приложения нагрузки, D – наружный диаметр трубы, принимаются равными величинам η_{a0} и h_{c0} соответственно. Формула действительна для коротких стержней с условной гибкостью $\lambda \leq 0,5$.

$$\eta_{a0} = 0,25 \cdot (3 + 2\bar{\lambda}), \quad \eta_{a0} \in [0,75; 1]; \quad (5)$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2, \quad \eta_{c0} \in [0; 4,9]. \quad (6)$$

Таким образом, по мере изучения особенностей разрушения трубобетона при оценке его несущей способности все боль-

шее внимание уделялось эффекту упрочнения бетонного ядра трубобетонного элемента. По некоторым данным бетон, твердеющий в условиях бокового обжатия напряжением 2–3 МПа, характеризуется повышенной до 50% прочностью, меньшими деформациями усадки и ползучести. При нагружении в условиях объемного сжатия бетон также характеризуется повышенной прочностью, некоторые источники отмечают повышение прочности от 1,15 до 2,7 раза [5].

Согласно [9] несущая способность бетонного ядра трубобетонного элемента принималась в виде

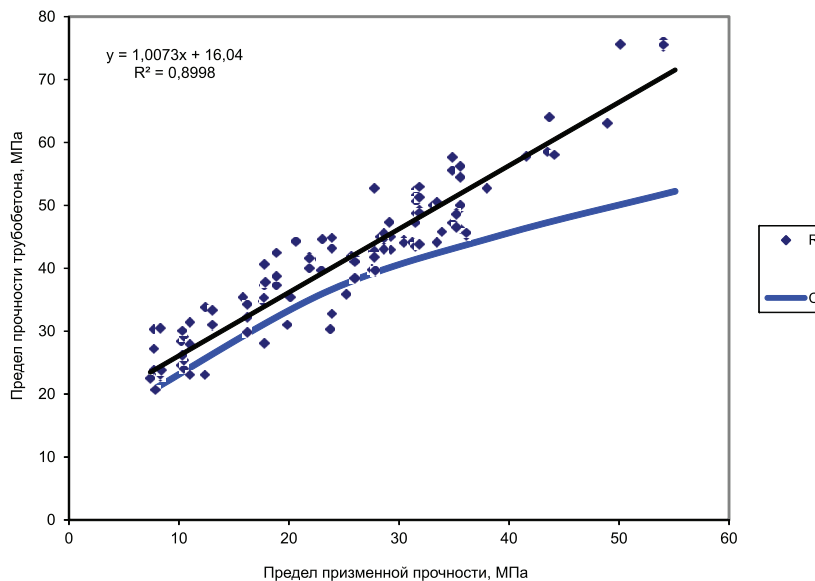
$$R_{b,3} = R_b + 18. \quad (7)$$

В [4] прочность бетонного ядра трубобетона предлагается определять по формуле

$$R = -296,6 + 0,2 R_k + 258,6 \lg R_k, \quad (8)$$

где R_k – кубиковая прочность, кгс/см².

На рисунке представлен анализ соответствия зависимости (8) экспериментальным данным, представленным в [4].



Зависимость предела прочности бетонного ядра трубобетона от предела прочности на центральное осевое сжатие по данным [4], C – по формуле (8) с учетом соотношения $R_{pr} = 0,787R_k$ и размерности прочности МПа

Из рисунка видно, что ф. (8) демонстрирует достаточную сходимость с экспериментальными данными лишь в интервале $R_k \in (10; 30)$ МПа, что явно недостаточно для современных условий.

По экспериментальным данным, представленным в [4], авторами статьи получена зависимость предела прочности бетонного ядра трубобетона, хорошо согласующаяся с ф. (7) в виде (см. рисунок)

$$R_{b,3} = R_b + 16. \quad (9)$$

Более общая зависимость предела прочности трубобетона от предела прочности при кратковременном центральном осевом сжатии часто представляется в виде [3]

$$R_{b,3} = k\sigma_0 + R_b. \quad (10)$$

Очевидно, что для практического использования ф. (10) требуется определение значений коэффициента k и величины ра-

диального напряжения σ_0 в бетонном ядре. Из ф.(7,9,10) следует, что

$$k\sigma_0 = 16...18. \quad (11)$$

Следовательно, при известном значении k (или σ_0) легко определяется значение второй величины. Проблема заключается в том, что ф.(7,9) получены на достаточно ограниченном диапазоне прочности бетонов, что предопределяет необходимость уточнения указанных зависимостей. Поставленная задача приобретает особую актуальность в связи с все более широким применением в строительной практике высокопрочных бетонов, работа которых в составе трубобетонных колонн до настоящего времени изучена недостаточно.

Согласно [4]

$$R_{b,3} = k\sigma_0 + c, \quad (12)$$

причем условием работы трубы как обоймы в момент наивысшей нагрузки является $k = 4$, (σ_0 – радиальное напряжение в бетонном ядре, $c = R_b$).

Согласно [3]

$$\sigma_3 = -R_{bc} + m\sigma_1, \quad (13)$$

причем по данным [1] при трехосном сжатии $m = 4,1$, ($-R_{bc} = R_b$, $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_3 = R_{b,3}$).

Согласно [7], предел прочности объемно-сжатого бетонного ядра $R_{b,3}$ определяется как

$$R_{b,3} = R_b + k\sigma_{br,u}, \quad (14)$$

где

$$k = 5,3 - 0,8 \frac{R_p A_p}{R_b A_b}; \quad (15)$$

$$\sigma_{br,u} = 0,45 \frac{R_p A_p}{A_b}; \quad (16)$$

здесь R_b , R_p – расчетные сопротивления бетона и стальной трубы; A_b , A_p – площади поперечного сечения бетона и стальной трубы; $\sigma_{br,u}$ – величина бокового давления бетонного ядра на стальную оболочку в предельном состоянии.

Согласно [8]

$$R_{b,3} = R_b + k\sigma_{br,u}, \quad (17)$$

где величина k определяется по предложенной Н.И. Карпенко формуле

$$k = \frac{1}{0,1 + 0,9 \frac{\sigma_{br,u}}{R_b}} \quad (18)$$

или с учетом предложенного в [8] уточнения, учитывающего исходную прочность бетона

$$k = \frac{1}{0,1 + 0,9 \frac{\sigma_{br,u}}{R_b}} + 2,9 - \ln R_b. \quad (19)$$

Согласно [2]

$$R''' = R_b \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{\sigma_0}{R_b} \right)^{2/3} \right]^{3/2}. \quad (20)$$

Жиренков А.Н. [2], по результатам изучения влияния пропорционального и непропорционального бокового гидростатического обжатия на прочность бетона в продольном направлении, предлагает альтернативную зависимость величины k

$$k = D \sigma^{-1/3} \quad (21)$$

для подстановки в формулу вида ф. (10), где $D = 16$ для пропорционального бокового гидростатического обжатия, аналогичного обжатию бетона стальной обоймой в трубобетонных конструкциях.

Согласно EN 1992-1-1

$$R_{b,3} = R_b \left(k_1 + k_2 \frac{\sigma}{R_b} \right), \quad (22)$$

где $\sigma = \sigma_0$, $k_1 = 1$ и $k_2 = 5$ при $\frac{\sigma}{R_b} < 0,05$,

$k_1 = 1,125$ и $k_2 = 2,5$ при $\frac{\sigma}{R_b} > 0,05$.

Величина σ_0 , т.е. напряжение обжатия бетонного ядра трубобетонного элемента в предельном состоянии, зависит от жесткости стальной оболочки. Это отражено в ф. (17), а также учтено в методике расчета трубобетонных элементов по EN 1994-1-1:

$$R_{b,3} = R_b \left(1 + \eta_c \frac{t}{df} \frac{f_y}{f_{ck}} \right), \quad (23)$$

при $f_y = R_c$, $f_{ck} = R_b$, $d = D$ – величине наружного диаметра колонны после приведения к виду ф. (10):

$$R_{b,3} = R_b + \eta_c \frac{t}{D} R_c, \quad (24)$$

откуда

$$\eta_c \frac{t}{D} R_c = k\sigma_0, \quad (25)$$

тогда для коротких стержней при $\bar{\lambda} \cong 0,05$ $\eta_c = k \cong 4$.

При коэффициенте армирования $\mu < 14\%$, ф.(17) будет являться частным случаем выражения:

$$\frac{t}{D} R_c = \sigma_0 = n \frac{R_c F_c}{F_b}, \quad (26)$$

где $n \in [4,5; 5]$. При подстановке полученного значения напряжения обжатия бетона в ф. (22) значение прочности бетона в трехосном напряженном состоянии будет ниже результата, определенного по ф.(23) при превышении напряжением бокового обжатия уровня 5% от призменной прочности, т.к. на дальнейшем интервале по EN 1992-1-1 принимается пониженный коэффициент бокового обжатия.

Определению значения коэффициента k посвящено немало исследований, и значения k , представленные в разных источниках, достаточно различны (табл. 2).

Таблица 2

Значение коэффициентов зависимости упрочнения бетонного ядра от усилия обжатия по данным различных источников

EN 1994-1-1	4,9*
EN 1992-1-1	2,5**
Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С.	$5,3 - 0,8 \frac{R_p A_p}{R_b A_b}$
Карпенко Н.И.	$\frac{1}{0,1 + 0,9 \frac{\sigma_{br,u}}{R_b}}$
Кузнецов К.С.	$\frac{1}{0,1 + 0,9 \frac{\sigma_{br,u}}{R_b}} + 2,9 - \ln R_b$
Жиренков А.Н.	$16\sigma^{-\frac{1}{3}}$
Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А.	4

Примечания :

*для предельно коротких стержней;

** если величина обжатия выше 5% от призменной прочности, при этом призменная прочность повышается на 25% дополнительным коэффициентом, иначе $k = 5$.

Таким образом, несмотря на достаточно обширные исследования в области оценки несущей способности трубобетона, про-

веденные в течение длительного времени, во-первых, отсутствует единое мнение о влиянии условий обжатия на повышение несущей способности бетона в ядре, во-вторых, значительная часть исследований выполнена с применением бетонов с относительно невысокой прочностью. Указанные моменты предопределяют актуальность исследований по оценке несущей способности трубобетона, особенно с применением высокопрочных бетонов.

Список литературы

1. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.
2. Жиренков А.Н. Деформирование и прочность обычного тяжелого бетона при сложном напряженном состоянии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 26 с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
4. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Труль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
5. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №4. – С. 75–80.
6. Кришан А.Л., Заикин А.И., Купфер М.С. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов // Бетон и железобетон. – 2008. – №2. – С. 22–25.
7. Кришан А.Л., Ремнев В.В. Трубобетонные колонны для высотных зданий // Промышленное и гражданское строительство – 2009. – №10. – С. 22–24.
8. Кузнецов К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2007. – 24 с.
9. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. – М.: Трансжелдориздат, 1963.
10. Фонов В.М., Людковский И.Г., Нестерович А.П. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии // Бетон и железобетон. – 1989. – №1. – С. 4–6.

Рецензент –

Перцев В.Т., д.т.н., профессор кафедры «Технология строительных изделий и конструкций» Воронежского государственного архитектурно-строительного университета, г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 09.09.2011.