

There are the results and analysis of calculations of the intense-deformed condition of beams with the rectilinear and bent armature at the stage of creation preliminary grasping of concrete and at the stage of the action of the external load. It is established that the presence of the preintense bent armature changes the character of the intense-deformed condition at preliminary grasping of concrete and the given circumstance is reflected in work of a beam at the stage of loading.

УДК 624.012.36:624.046.5

Бондаренко В.М.

УЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РАСЧЕТЕ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение. Как известно, одним из основных недостатков центрально сжатых сталетрубобетонных элементов круглого поперечного сечения является необходимость обеспечения совместной работы в поперечном направлении бетонного ядра и стальной оболочки. Существует возможность нарушения целостности композитного сечения на границе двух материалов (отслоения бетонного ядра от стальной оболочки), что может происходить по двум причинам:

- развитие усадочных деформаций в бетоне (главным образом – аутогенной усадки), что создает опасность отслоения бетонного ядра от стальной оболочки еще до приложения эксплуатационных нагрузок;
- при работе элемента во второй стадии напряженно-деформированного состояния (в соответствии с классификацией, изложенной в [1]), соответствующей уровню эксплуатационных нагрузок.

При этом последний фактор характерен как при передаче нагрузки на все поперечное сечение сталетрубобетонного элемента в виде жесткого штампа – совместность продольных деформаций обеспечивается конструктивно, так и при нагружении только бетонного ядра – совместность продольных деформаций обеспечивается на некотором расстоянии от торцов элемента после перераспределения продольных напряжений пропорционально жесткостям оболочки и ядра за счет сил сцепления и (или) трения.

Для решения обозначенной проблемы предлагается целый ряд мероприятий конструктивно-технологического характера [2-4], направленных на создания предварительных растягивающих напряжений в стальной оболочке. Однако данные предложения недостаточно разработаны для практической реализации [2], либо трудно-выполнимы в построечных условиях [3, 4].

Появление предварительных растягивающих напряжений в стали и сжимающих напряжений в бетоне меняет кинетику взаимодействия ядра с оболочкой при нагружении, что требует соответствующего учета начального давления при расчете прочности таких элементов. Особенное внимание следует обратить на то, что при построении аналитических моделей (решений) расчета прочности преднапряженных сталетрубобетонных элементов базовые уравнения записываются для предельной стадии работы, а величина обжатия ядра определяется на этапе прогнозирования расчетом (или экспериментально на опытных образцах) в зависимости от способа создания предварительного напряжения и соответствует моменту до приложения нагрузки на элемент. Следовательно, необходим механизм трансформации начального значения преднапряжения в величину обжатия ядра в предельной стадии, учитываемую в прочностных расчетах.

На сегодняшний день в доступных для анализа источниках [2-4, 6-8], посвященных расчету прочности при центральном сжатии предварительно напряженных сталетрубобетонных элементов, отсутствуют решения, в которых непосредственно учитывается величина обжатия ядра в предельной стадии, полученная за счет предварительного напряжения. Так, в исследовании [2] нормируется

минимальное значение обжатия ядра для обеспечения совместности поперечных деформаций, а расчет прочности предлагается вести в соответствии с рекомендациями [5], не учитывающими величину обжатия. В работах [4, 6-8] в расчет прочности входит величина начального обжатия ядра, получаемого на стадии изготовления сталетрубобетонных предварительно напряженных элементов.

Одной из предпосылок при построении расчета прочности самонапряженных сталетрубобетонных элементов при центральном сжатии [9, 10] является то, что в предельной стадии взаимодействие бетонного ядра и стальной оболочки обуславливается двумя параллельными процессами – это распор ядра, возникающий от дилатационного эффекта, и давление ядра вследствие самонапряжения бетона (при этом значение самонапряжения в предельной стадии является постоянной величиной). Ниже остановимся на более подробном анализе данных предположений.

1. Определение величины самонапряжения в предельной стадии. При нагружении сталетрубобетонных элементов без предварительных напряжений в оболочке вследствие разницы коэффициентов Пуассона стали и бетона ($\nu_s \approx 0,3$; $\nu_c \approx 0,2$) совместность деформаций обеспечивается только в продольном направлении. В поперечном (или радиальном) направлении условие совместности деформаций не выполняется, а бетонное ядро работает в условиях одноосного сжатия. После достижения уровня напряжений или деформаций в бетоне значений, соответствующих верхней границе микротрещинообразования, возникает давление ядра на оболочку вследствие дилатации бетона.

При наличии предварительных напряжений в оболочке, вызванных собственными деформациями ядра из напрягающего бетона, при нагружении совместность поперечных деформаций обеспечивается. Ядро при этом работает в условиях трехосного сжатия. При этом часть величины преднапряжения оболочки в поперечном направлении расходуется на компенсацию возможной разности поперечных деформаций, что влечет за собой и изменение уровня обжатия бетонного ядра (величины самонапряжения). После достижения уровня напряжений или деформаций в бетоне значений, при которых коэффициент его поперечных деформаций начинает превышать коэффициент поперечных деформаций стали, возникает давление ядра на оболочку вследствие дилатации бетона, а значение самонапряжения с этого этапа нагружения остается постоянным вплоть до предельной стадии.

Таким образом, для расчета прочности сталетрубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе необходимо знать не только величину начального самонапряжения $\sigma_{CE,0}$, определяемую на этапе прогнозирования собственных деформаций ядра из напрягающего бетона, но и значение самонапряжения в предельной стадии $\sigma_{CE,u}$.

При наличии аналитического описания диаграммы деформирования бетона в условиях трехосного сжатия

Бондаренко Владимир Михайлович, ассистент кафедры «Строительные конструкции, основания и фундаменты» Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Беларусь, УО БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.

$$\varepsilon_{cc} = f(\eta_{\sigma}; \sigma_{\rho}), \quad (1)$$

выраженного через уровень напряжений η_{σ} и величину бокового обжатия σ_{ρ} , и зависимости для определения коэффициента Пуассона бетона

$$v_c = f(\eta_{\sigma}), \quad (2)$$

выраженной через уровень напряжений η_{σ} , значение самонапряжения в предельной стадии $\sigma_{CE,u}$ определяется в следующей последовательности (ε_{cc} – текущие продольные деформации в бетоне при трехосном сжатии; $\eta_{\sigma} = \sigma_{cc} / f'_{cc}$ – уровень продольных напряжений в бетоне, σ_{cc} – текущие продольные напряжения в бетоне при трехосном сжатии, f'_{cc} – прочность бетона при трехосном сжатии):

1) принимаем начальные продольные напряжения в бетоне $\sigma_{cz,0} = 0$ и задаемся их приращением

$$\sigma_{cz,i} = \sigma_{cz,i-1} + \Delta\sigma_{cz} \quad (i \in [1;n]), \quad (3)$$

при этом начальные продольные напряжения сжатия в бетонном ядре, твердеющем в условиях трехосного упругого ограничения, за счет собственных деформаций считаем благоприятными для формирования структуры бетона (не вызывающими нарушений структуры) и в расчете не учитываем;

2) на каждом этапе приращения продольных напряжений неизвестным является их уровень $\eta_{\sigma,i}$, так как одновременно изменяется и величина обжатия бетона $\sigma_{CE,i}$, а следовательно и значение трехосной прочности $f'_{cc,i}$, поэтому для определения текущих значений продольных деформаций $\varepsilon_{cz,i}$ и коэффициента Пуассона $v_{c,i}$, принимаем значение бокового обжатия постоянной величиной, не изменяющейся с предыдущего этапа

$$\sigma_{CE,i-1} = \text{const}; \quad (4)$$

3) определяем приращение продольных относительных деформаций $\Delta\varepsilon_{cz,i}$ с помощью принятой зависимости (1);

4) вычисляем значение коэффициента Пуассона $v_{c,i}$, соответствующее уровню напряжений на i -ом этапе в соответствии с уравнением (2);

5) совместность продольных деформаций предполагает равенство приращений относительных продольных деформаций бетона и стали

$$\Delta\varepsilon_{cz,i} = \Delta\varepsilon_{sz,i}; \quad (5)$$

6) приращение тангенциальных деформаций преднапряженной стальной оболочки, компенсирующей разность поперечных деформаций материалов композитного сечения, определяем по формуле

$$\Delta\varepsilon_{s0,i} = (v_s - v_{c,i}) \cdot \Delta\varepsilon_{sz,i}; \quad (6)$$

7) приращение соответствующих тангенциальных напряжений в стальной оболочке определяем с помощью обобщенного закона Гука

$$\Delta\sigma_{s0,i} = \frac{E_s}{1 - v_s^2} (\Delta\varepsilon_{s0,i} + v_s \Delta\varepsilon_{sz,i}), \quad (7)$$

E_s – модуль упругости стали;

8) предполагая равенство тангенциальных и радиальных напряжений в бетонном ядре, вычисляем значение бокового обжатия ядра для i -го этапа по формуле

$$\sigma_{CE,i} = \sigma_{CE,i-1} - \Delta\sigma_{s0,i} \cdot \rho_{\theta}, \quad (8)$$

а с учетом (5)-(7) имеем

$$\sigma_{CE,i} = \sigma_{CE,i-1} - \left[\frac{E_s}{1 - v_s^2} \cdot \Delta\varepsilon_{cz,i} \cdot (2v_s - v_{c,i}) \right] \cdot \rho_{\rho}, \quad (9)$$

где ρ_{θ} , ρ_{ρ} – коэффициенты тангенциального и радиального армирования сталетрубобетонного элемента соответственно, определяемые по формулам

$$\rho_{\theta} = \frac{2\pi \cdot r_c \cdot t_s}{2\pi \cdot r_c \cdot r_c} = \frac{t_s}{r_c}, \quad (10.1)$$

$$\rho_{\rho} = \frac{2t_s}{d_c} = \frac{t_s}{r_c}, \quad (10.2)$$

r_c , d_c – радиус и диаметр бетонного ядра соответственно, t_s – толщина стенки стальной оболочки;

9) на каждом этапе необходима проверка следующего условия

$$\frac{\sigma_{CE,i-1}}{\sigma_{CE,i}} > 0, \quad (11)$$

т.е. значение бокового обжатия не должно менять знак, в противном случае делается вывод о недостаточности величины начального самонапряжения $\sigma_{CE,0}$ для обеспечения условия совместности поперечных деформаций композитного сечения, а расчет прочности выполняется как для сталетрубобетонных элементов без предварительного напряжения;

10) число итераций n определяется условием выравнивания коэффициентов Пуассона двух материалов

$$v_{c,n} = v_s, \quad (12)$$

или для практических расчетов

$$\frac{|v_s - v_{c,n}|}{v_{c,n}} \leq \varepsilon, \quad (13)$$

ε – точность вычислений;

11) искомое значение самонапряжения в предельной стадии получаем из следующего равенства

$$\sigma_{CE,u} = \sigma_{CE,n}. \quad (14)$$

При наличии аналитического описания диаграммы деформирования бетона в условиях трехосного сжатия

$$\sigma_{cc} = f(\eta_{\sigma}; \sigma_{\rho}), \quad (15)$$

выраженного через уровень деформаций η_{σ} и величину бокового обжатия σ_{ρ} , а также зависимости (2) для определения коэффициента Пуассона бетона, выраженной через уровень напряжений η_{σ} , значение самонапряжения в предельной стадии $\sigma_{CE,u}$ определяется аналогичным образом ($\eta_{\sigma} = \varepsilon_{cc} / \varepsilon_{cc}^*$ – уровень продольных деформаций в бетоне, ε_{cc}^* – значение продольной деформации соответствующее трехосной прочности f'_{cc}). Отличие состоит в том, что, задаваясь приращением относительных продольных деформаций бетона ядра ε_{cz} , вычисляем значение уровня напряжений $\eta_{\sigma,i}$ на i -ом этапе и соответствующего ему коэффициента Пуассона $v_{c,i}$. Дальнейший расчет выполняем в соответствии с (5)-(14).

Значительно упрощает расчет использование зависимости для определения коэффициента Пуассона бетона

$$v_c = f(\eta_{\sigma}; \sigma_{\rho}), \quad (16)$$

выраженной через уровень деформаций η_{σ} и величину бокового обжатия σ_{ρ} . При этом, задаваясь приращением относительных продольных деформаций ε_{cz} , непосредственно с помощью формул (5)-(14) определяем значение самонапряжения в предельной стадии $\sigma_{CE,u}$.

2. Определение минимального начального значения самонапряжения. Представленный выше алгоритм позволяет определить минимальное значение начального самонапряжения $\sigma_{CE,0,min}$,

необходимого для обеспечения условия совместности поперечных деформаций стальной оболочки и бетонного ядра.

Для этого принимаем $\sigma_{CE,0} = 0$ и затем задаемся приращением начального самоупругения

$$\sigma_{CE,j} = \sigma_{CE,j-1} + \Delta\sigma_{CE} \quad (j \in [1; k]). \quad (17)$$

Выполняя вышеизложенный расчет по определению самоупругения в предельной стадии $\sigma_{CE,j,u}$ для j -го значения начального самоупругения $\sigma_{CE,j}$, определяем минимальное значение начального самоупругения $\sigma_{CE,0,min}$, руководствуясь следующим условием:

$$\sigma_{CE,0,min} = \sigma_{CE,k}, \quad (18)$$

при

$$\sigma_{CE,k,u} = \sigma_{CE,k,n} = 0, \quad (19)$$

или для практических расчетов при

$$\frac{\sigma_{CE,k,u}}{\sigma_{CE,k}} = \frac{\sigma_{CE,k,n}}{\sigma_{CE,k}} \leq \varepsilon. \quad (20)$$

Заключение. Разработанный алгоритм позволяет определить величину бокового давления, полученную за счет предварительного напряжения, на границе двух материалов сталетрубобетонных элементов в предельной стадии, необходимую для расчета прочности таких элементов, а также минимальное значение начального самоупругения необходимого для обеспечения совместности поперечных деформаций стальной оболочки и бетонного ядра в зависимости от механических и геометрических характеристик материалов.

Представленные положения по расчету значения предварительного напряжения в предельной стадии и величины минимально необходимого преднапряжения для обеспечения совместности поперечных деформаций композитного сечения справедливы при любом способе создания начальных предварительных напряжений в сталетрубобетонных элементах.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лукша, Л.К. Прочность трубобетона / Л.К. Лукша. – Минск: Высшая школа, 1977. – 96 с.

2. Мартиросов, Г.М. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе / Г.М. Мартиросов, А.И. Шахворостов // Бетон и железобетон. – 2001. – № 4. – С. 12–13.
3. Кришан, А.Л. Сталетрубобетонные колонны с предварительно обжатым ядром / А.Л. Кришан, М.Ш. Гареев, А.И. Сагадатов // Бетон и железобетон. – 2004. – № 6. – С. 9–13.
4. Сахаров, А.А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.А. Сахаров; Самар. гос. арх.-строй. акад. – Самара, 1999. – 23 с.
5. Фонов, В.М. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии / В.М. Фонов, И.Г. Людковский, А.П. Нестерович // Бетон и железобетон. – 1989. – № 1. – С. 4–6.
6. Гареев, М.Ш. Прочность сжатых сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / М.Ш. Гареев. – Магнитогорск, 2004. – 161 с.
7. Сагадатов, А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / А.И. Сагадатов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2006. – 22 с.
8. Кузнецов, К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / К.С. Кузнецов; Магнитогор. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2007. – 19 с.
9. Бондаренко, В.М. Исследование и разработка общей методики расчета трубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе / В.М. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2007. – С. 242-244.
10. Бондаренко, В.М. Расчет прочности сталетрубобетонных элементов с ядром из бетона на напрягающем цементе при центральном сжатии / В.М. Бондаренко, Л.К. Лукша // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XV междунар. науч.-метод. семинара : в 2-х т. / под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.А. Хотько. Новополоцк, ПГУ, 27-28 ноября 2008 г. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т.1. – С. 206-214.

Материал поступил в редакцию 10.03.09

BONDARENKO V.M. Accounting of prestressing for concrete filled steel tubes strength calculation

It is analysed the stress-strain condition prestressed concrete filled steel tubes of round cross-section at action of longitudinal compressing forces. Algorithms of definition of size of a self-pressure in a strength limit stage, and also - calculation minimally necessary for condition of compatibility of cross-section strains of initial value of a self-pressure are offered.

УДК 624.012.46

Бондаренко В.М., Павлова И.П.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕТОНОВ НА НАПРЯГАЮЩЕМ ЦЕМЕНТЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СТАЛЕТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение. Одним из способов обеспечения совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра сталетрубобетонных элементов в поперечном направлении при действии продольных сжимающих усилий является применение бетонов на напрягающем цементе. Такие бетоны изготавливают на основе портландцемента и расширяющихся добавок. Среди разнообразия применяемых добавок особый интерес представляют алюминатно-сульфатные и алюмооксидные добавки, а также их комбинации, свойства которых определяются условиями гидратации и твердения алюминатов и сульфалюминатов кальция, а также их соединений с силикатами и сульфатами.

Изучением условий образования гидрата сульфалюмината

кальция, его модификаций, порядка их превращений и устойчивостью структуры занимаются многие исследователи [1-3]. Однако единого взгляда относительно свойств гидратов сульфалюмината кальция не установлено. Наоборот, во многих случаях высказывают прямо противоположные мнения.

По выдвинутой профессором В.В. Михайловым теории расширения цементного камня [4, 5] образование гидрата сульфалюмината кальция и появление свободных и связанных деформаций объясняется тем, что при гидратации исходных минералов и химических соединений в среде, насыщенной гидроокисью кальция, сначала образуется низкосульфатная форма гидрата сульфалюмината

Павлова Инесса Павловна, к.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.