

Важнейшим условием формирования в Республике Беларусь эффективной научно-технической политики является учет приоритетов стратегии социально-экономического развития. Современная стратегия предусматривает инновационное развитие национальной экономики, повышение ее конкурентоспособности, энерго- и ресурсосбережение. Поэтому главной целью строительного комплекса республики является наиболее полное обеспечение потребностей населения и народного хозяйства в высокоэффективной строительной продукции путем повышения ее качества и конкурентоспособности при снижении материало- и энергоемкости. Приоритеты совершенствования строительного комплекса включают в себя создание новых производств и расширение масштабов внедрения ресурсосберегающих технологий, развитие и модернизацию производственной базы строительства, разработку новых технологий производства строительных материалов.

УДК 624.012.35:529.3/4

РАСЧЕТ НА МЕСТНОЕ СЖАТИЕ ОГОЛОВКОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ПОЛОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. Н.А. РАК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены особенности расчета на местное сжатие оголовков железобетонных колонн, изготавливаемых методом центрифугирования. Для обеспечения надежного опирания на них стальных или железобетонных конструкций необходимо создать внутреннее утолщение полого сечения колонны. При создании такого утолщения используются различные технологические приемы, при которых в оголовке колонны образуются два концентричных продольных слоя бетона, различающихся структурой и физико-механическими характеристиками. Геометрические параметры слоев бетона и их физико-механические характеристики существенно зависят от используемой технологии создания утолщения. Приложение нагрузки от стальных или железобетонных конструкций на оголовок колонны происходит по площадкам, строго привязанным к разбивочным осям здания. В результате может быть несколько вариантов расположения площадок опирания относительно образованных при изготовлении оголовков слоев бетона. В существующих нормативных документах рассмотрен только случай расчета на местное сжатие элементов, полностью выполненных из одного бетона. В статье предложена методика расчета на местное сжатие бетонных и железобетонных элементов, изготовленных с продольными слоями из бетонов различной структуры и прочности. Приведены зависимости для расчета прочности таких элементов на местное сжатие для различных случаев взаимного расположения слоев бетона и площадок приложения нагрузки при косвенном армировании поперечными сварными сетками и спиральным армированием, а также при наличии пластин закладных изделий оголовка и пластин соединительных элементов.

Введение и цель исследований. Одним из важных вопросов применения в практике строительства центрифугированных колонн различной формы сечения является обеспечение надежного опирания на них стропильных конструкций. Для этого при существующих привязках центров площадок опирания необходимо выполнить утолщение сечения колонны.

Наиболее известен способ создания утолщения, когда оно формируется непосредственно в процессе центрифугирования с подачей дополнительной порции бетонной смеси через отверстие в торцевой крышке формы (рис. 1, а). При этом наружная граница внешнего центрифугированного слоя бетона может иметь различные внешние очертания (круглое, квадратное, прямоугольное), но внутренняя граница утолщения всегда очерчена по окружности. После этого колонна подвергается тепловой обработке по стандартному режиму. После окончания тепловой обработки остающееся отверстие в оголовке заделывается бетоном (внутренний слой).

При другом способе создания утолщения оголовка сначала по традиционной технологии формируется имеющий постоянное сечение по длине ствол колонн (наружный слой оголовка) без подачи дополнительной порции бетона в процессе центрифугирования (рис. 1, б). По окончании формования наружного слоя при помощи растворонасоса во внутреннюю полость оголовка под давлением подается мелкозернистый бетон до полного заполнения полости. После этого колонна подвергается тепловой обработке

по стандартному режиму. Центрифугированный бетон внешнего слоя оголовка имеет прочность на сжатие, соответствующее классам бетона $C^{40/50}$... $C^{50/60}$, а бетон замоноличивания и мелкозернистый бетон заполнения имеет прочность на сжатие, соответствующее классам бетона $C^{12/15}$... $C^{16/20}$.

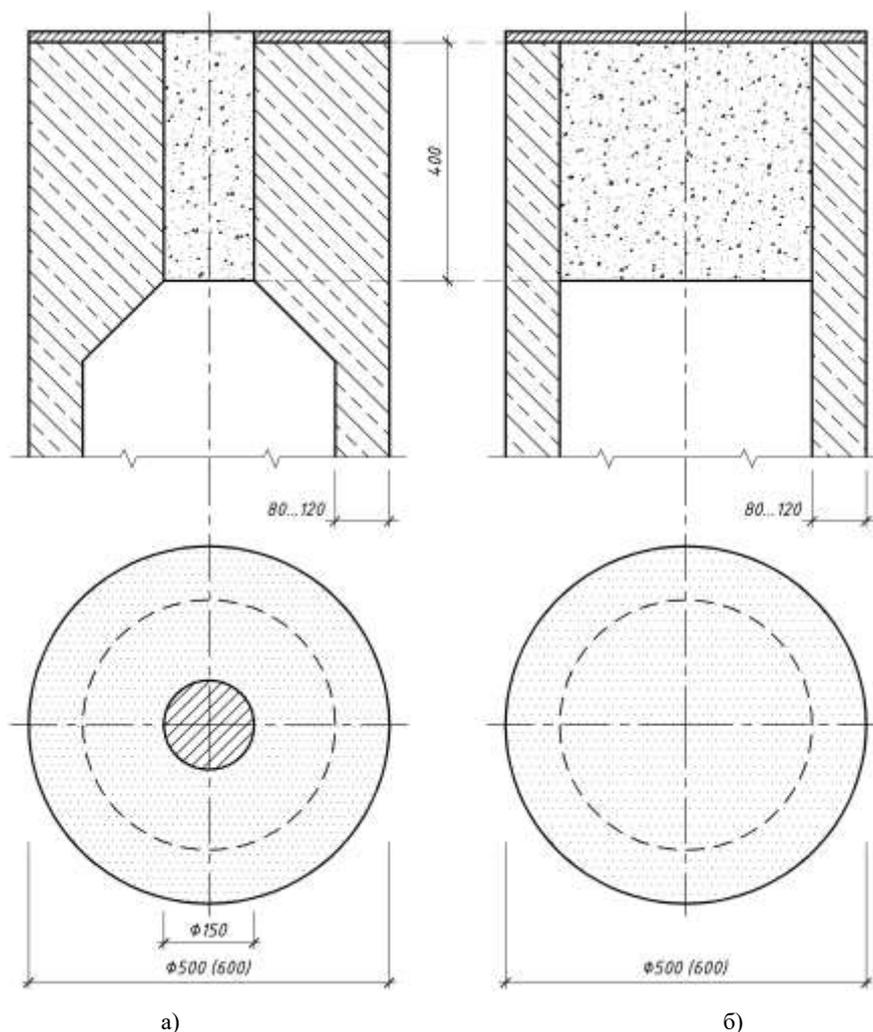


Рис. 1. Конструкция оголовков колонн кольцевого сечения при различных способах формирования утолщения

Передача нагрузки от стальных или железобетонных конструкций покрытия на оголовок колонны происходит по площадкам, строго привязанным к разбивочным осям здания. В результате может быть несколько вариантов расположения площадок опирания относительно образованных при изготовлении слоев бетона (рис. 2).

В 1986 – 1987 годах автором были проведены экспериментальные исследования опытных образцов узлов опирания стальных стропильных конструкций на оголовки крайних и средних центрифугированных колонн кольцевого и квадратного полого сечения [1]. Все оголовки в этих исследованиях были изготовлены при первом способе формирования утолщения. Проведенные статические испытания 8 опытных образцов (по два образца средних и крайних колонн кольцевого и квадратного полого сечений) показали, что во всех образцах сначала происходило образование вертикальных трещин в зоне расположения стальных штампов.

Дальнейший характер образования и развития трещин в опытных образцах, а также характер разрушения образцов определялся взаимным расположением штампов по отношению к слоям бетона оголовка. При расположении штампа на внутреннем слое бетона происходил сдвиг этого слоя относительно наружного слоя и раскалывание последнего. В случае расположения штампов только на бетоне наружного слоя оголовка разрушение происходило от местного сжатия бетона под штампами. Во всех образцах напряжения в бетоне основного сечения колонны при разрушении не превысили 60 % от их фактической прочности бетона на сжатие. Из этого можно сделать вывод, что прочность колонн лимитируется прочностью оголовков при местном действии сжимающей нагрузки от стропильных конструкций.

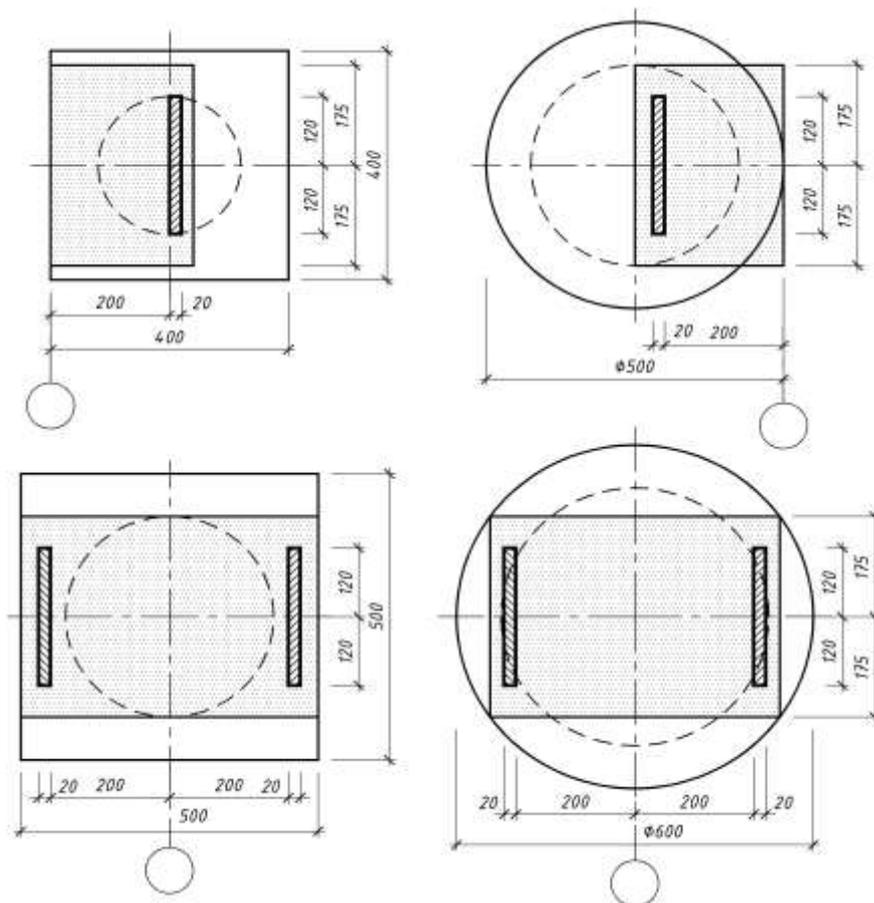


Рис. 2. Расположение опорных ребер стальных стропильных конструкций на оголовках колонн

В продолжение исследований [1] в 1989 – 1991 годах в Белорусском политехническом институте аспирантом Т.И. Лассо при участии и консультировании автора были выполнены экспериментальные исследования прочности оголовков центрифугированных колонн, изготовленных при втором способе формования утолщения оголовка [2]. Были изготовлены и испытаны 24 опытных образца оголовков колонн (4 серии, в каждой по 6 образцов). Все образцы имели длину 800 мм при длине зоны утолщения 400 мм. Серии образцов различались формой и размерами поперечного сечения, количеством и расположением штампов, размеры которых соответствовали размерам опорного ребра стальной стропильной конструкции. В пределах каждой серии образцы различались толщиной наружного центрифугированного слоя оголовка. Из 24 образцов только 6 образцов разрушилось в зоне перехода от утолщения к основному сечению, а остальные образцы разрушились от местного сжатия бетона под штампами.

Следует отметить, что в действовавших в то время нормах проектирования [3] был рассмотрен только случай расчета на местное сжатие элементов, полностью выполненных из одного бетона по структуре и прочности. Однако на основе анализа результатов испытаний [1, 2] было предложено использовать методику расчета норм [3] и в случае расположения в пределах площади приложения местной сжимающей нагрузки двух бетонов, различающихся структурой и прочностью. Для этого в формулы норм [3], предназначенные для определения приведенной прочности бетона при местном смятии $R_{b,loc}$, вместо призменной прочности бетона R_b было рекомендовано подставлять усредненную по площади смятия A_{loc1} призменную прочность бетона $R_{b,m}$, определяемую по формуле:

$$R_{b,m} = (R_{b1} \cdot A_{loc11} + R_{b2} \cdot A_{loc12}) / A_{loc1} ,$$

где R_{bi} , A_{loc1i} – соответственно призменная прочность и площадь смятия i -того бетона.

При определении коэффициента ϕ_b , учитывающего влияние бетонной обоймы на повышение несущей способности бетона при смятии, необходимо ограничивать габариты расчетной площади смятия A_{loc2} таким образом, чтобы ни один из ее размеров не превышал более чем в три раза соответствующий размер площади смятия.

Предложенный подход позволил с удовлетворительной точностью оценить расчетом результаты экспериментальных исследований [1, 2]. Однако, как показал проведенный в работах [4, 5] анализ, в ос-

новые методики расчета прочности на местное сжатие норм [3] и др. положены эмпирические зависимости, не основанные на ясных физических моделях и в связи с этим не дающие пользователю возможность применения этих зависимостей в нестандартных случаях.

В связи с этим автором в работах [4, 5] предложена для расчета бетонных элементов более обоснованная расчетная модель, исходящая из ясного физического понимания природы повышения прочности бетона при местном сжатии. Повышение прочности является результатом работы бетона, расположенного под площадью нагружения, в условиях многоосного сжатия под действием бокового давления, создаваемого работой на растяжение окружающего бетона.

Указанная расчетная модель была включена в разработанные впервые отечественные нормы проектирования [6]. Уже после введения этих норм в действие автором в развитие этой расчетной модели были разработаны более совершенные зависимости для расчета конструкций на местное сжатие [7 – 9].

В настоящее время ведется работа по разработке технических кодексов установившейся практики Республики Беларусь (ТКП) в области проектирования железобетонных конструкций, основным из которых является ТКП 45-5.03-01-2008 «Бетонные и железобетонные конструкции. Строительные нормы проектирования. Часть 1. Основные положения». Разрабатываемый ТКП должен сохранять преемственность с действующими нормами [6], включать в себя, как правило, только те методы расчета, которые основаны на максимально приближенных к реальным физическим расчетным моделях. При этом расчетные зависимости указанных методов расчета должны содержать наиболее существенные параметры реального напряженного состояния конструкций, а второстепенные факторы могут быть учтены эмпирическими зависимостями.

Цель исследований, представленных в кратком виде в данной статье, заключается в расширении области применения методики расчета норм [6] на основе новых расчетных зависимостей, предложенных в работах [7 – 9], на случай расчета на местное сжатие двухслойной бетонной конструкции. При этом должны быть рассмотрены различные случаи взаимного расположения слоев бетона и площадок приложения нагрузки, наличие косвенного армирования поперечными сварными сетками и спиральным армированием, а также наличие пластин закладных изделий оголовка и соединительных пластин.

Учет взаимного расположения слоев бетона и площадок приложения местной нагрузки. Согласно предложениям [7], расчетное сопротивление бетона при местном сжатии (для простоты изложения в статье рассмотрен случай концентричного сжатия) следует рассчитывать по следующей зависимости:

$$f_{cud} = \omega_u f_{cd}, \tag{1}$$

где f_{cd} – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; ω_u – коэффициент, учитывающий повышение прочности бетона при смятии, который следует определять по формуле:

$$\omega_u = 1 + k_u \frac{f_{ctk}}{f_{ck}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \leq \omega_{u,max}. \tag{2}$$

Здесь k_u – коэффициент эффективности бокового обжатия при смятии, принимаемый для тяжелого (трехкомпонентного бетона): $k_u = 12,5$; $\omega_{u,max}$ – предельное значение коэффициента повышения расчетного сопротивления бетона при местном сжатии; f_{ck} и f_{ctk} – нормативные сопротивления бетона сжатию и осевому сжатию.

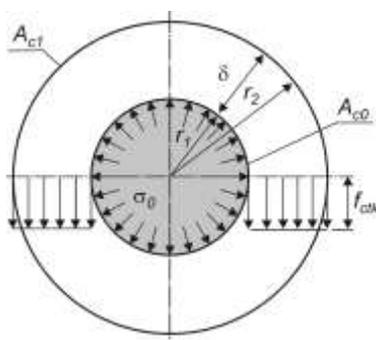


Рис. 3. Расчетная схема для определения значения бокового давления при местном действии сжимающей нагрузки на однослойный бетонный элемент

Физический смысл параметров рассматриваемой методики расчета может быть выражен после подстановки зависимости (2) в (1) следующим образом:

$$f_{cud} = f_{cd} \left(1 + k_u \frac{f_{ctk}}{f_{ck}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \right) = f_{cd} \left(1 + k_u \frac{\sigma_0}{f_{ck}} \right),$$

где σ_0 – боковое обжатие бетона под площадкой приложения нагрузки, создаваемой обоймой из работающего на растяжение окружающего бетона, определяемое по зависимости (3), полученной исходя из расчетной схемы, представленной на рисунке 3.

$$\sigma_0 = \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) f_{ctk}. \tag{3}$$

Принимая во внимание результаты исследований [9] рассмотрим различные случаи расположения слоев бетона и площадок приложения местной нагрузки. Следует отметить, что для всех рассматриваемых расчетных зависимостей этого подраздела A_i определяется как полная площадь внутри i -того контура, показанного на рисунках.

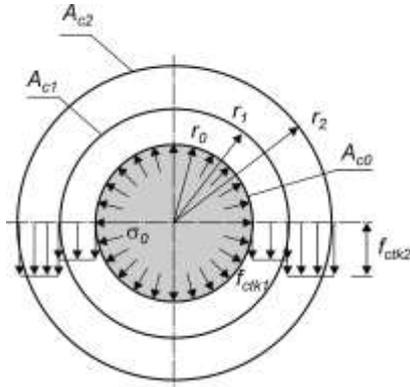


Рис. 4. Расчетная схема для определения значения бокового давления при местном действии сжимающей нагрузки в пределах внутреннего слоя двухслойного бетонного элемента

Для случая расположения площадки приложения нагрузки только в пределах внутреннего слоя расчетная схема для определения бокового обжатия приведена на рисунке 4.

Значение бокового обжатия согласно расчетной схеме (см. рис. 4) можно определить по зависимости:

$$\sigma_0 = \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \cdot f_{ctk1} + \left(\sqrt{\frac{A_{c2}}{A_{c0}}} - \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \right) \cdot f_{ctk2}.$$

Расчетное сопротивление бетона при местном сжатии можно рассчитать по следующей зависимости:

$$f_{cud} = f_{cd1} \cdot \left(1 + k_u \cdot \frac{\sigma_0}{f_{ck1}} \right).$$

Для случая расположения площадки приложения нагрузки в пределах как первого, так и второго слоев расчетная схема для определения бокового обжатия приведена на рисунке 5.

Тогда значение бокового обжатия определится по зависимости:

$$\sigma_0 = \left(\sqrt{\frac{A_{c2}}{A_{c0}}} - 1 \right) \cdot f_{ctk2}.$$

Затем определяются приведенное нормативное сопротивление бетона осевому сжатию в пределах площади приложения нагрузки:

$$f_{ck,red} = f_{ck2} + (f_{ck1} - f_{ck2}) \frac{A_{c1}}{A_{c0}},$$

и приведенное расчетное сопротивление бетона осевому сжатию в пределах площади приложения нагрузки:

$$f_{cd,red} = f_{cd2} + (f_{cd1} - f_{cd2}) \frac{A_{c1}}{A_{c0}}.$$

Тогда приведенное расчетное сопротивление бетона при местном сжатии можно рассчитать по следующей зависимости:

$$f_{cud} = f_{cd,red} \cdot \left(1 + k_u \cdot \frac{\sigma_0}{f_{ck,red}} \right).$$

Учет косвенного армирования поперечными сварными сетками и спиральным армированием. Рассмотрим последовательность расчета для случая расположения площадки приложения нагрузки в пределах как первого, так и второго слоев. Расчетная схема для определения бокового обжатия приведена на рисунке 6.

Тогда значение бокового обжатия (при одинаковой интенсивности косвенного армирования в обоих направлениях) определится по зависимости:

$$\sigma_0 = \left(\sqrt{\frac{A_{eff}}{A_{c0}}} - 1 \right) \cdot (f_{ctk2} + \rho_x \cdot f_{yk}).$$

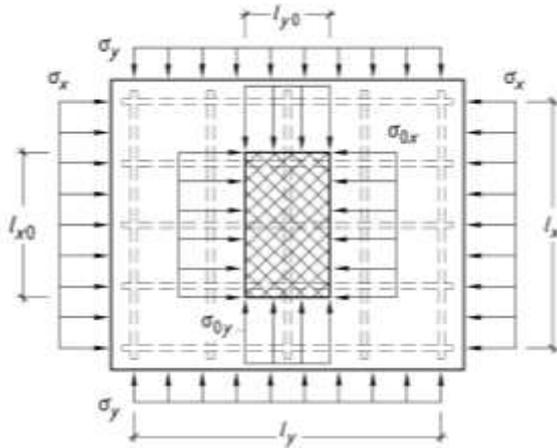


Рис. 6. Расчетная схема для определения значения бокового давления при местном действии сжимающей нагрузки в пределах обоих слоев косвенно армированного двухслойного бетонного элемента

Значение коэффициента косвенного армирования ρ_x определим как

$$\rho_x = \frac{n_x \cdot A_{sx}}{l_y \cdot s_n} + \frac{2A_{s,cir}}{l_{core} \cdot s_{cir}},$$

где n_x , A_{sx} , l_x – соответственно число стержней, площадь поперечного сечения и габаритный размер сетки (считая в осях крайних стержней) в одном направлении; l_y – габаритный размер сетки (считая в осях крайних стержней) в другом направлении; s_n – расстояние между сетками; $A_{s,cir}$, l_{core} , s_{cir} – соответственно площадь поперечного сечения спирали, диаметр сечения внутри спирали, шаг спирали. При этом площадь спирали должна быть откорректирована с учетом соотношения нормативных сопротивлений стержней сетки и спирали.

Приведенное нормативное сопротивление бетона сжатию внутри площади приложения нагрузки определим как

$$f_{ck,red} = f_{ck2,eff} + (f_{ck1,eff} - f_{ck2,eff}) \frac{A_{c1}}{A_{c0}},$$

где приведенное нормативное сопротивление косвенно армированного бетона i -того слоя при осевом сжатию

$$f_{cki,eff} = f_{cki} + \varphi_0 2\rho_x f_{yk}.$$

Приведенное расчетное сопротивление косвенно армированного бетона i -того слоя при осевом сжатию определим по формуле:

$$f_{cdi,eff} = f_{cdi} + \varphi_0 2\rho_x f_{yd},$$

в которой φ_0 – коэффициент эффективности косвенного армирования при осевом сжатию:

$$\varphi_0 = 1 / (0,23 + \psi_s).$$

Здесь $\psi_s = 2\rho_x f_{yk,xy} / (f_{ck,i} + 10)$; ($f_{yk,xy}$ и f_{ck} – в Н/мм²); $f_{yk,xy}$ – нормативное сопротивление арматуры сеток; $f_{ck,i}$ – нормативное сопротивление i -того слоя бетона.

Приведенное расчетное сопротивление бетона сжатию внутри площади приложения нагрузки

$$f_{cd,red} = f_{cd2,eff} + (f_{cd1,eff} - f_{cd2,eff}) \frac{A_{c1}}{A_{c0}}.$$

Тогда расчетное сопротивление бетона при местном сжатию можно рассчитать по следующей зависимости:

$$f_{cud} = f_{cd,red} \left(1 + k_u \frac{\sigma_0}{f_{ck,red}} \right).$$

Значение коэффициента эффективности бокового давления k_u согласно исследованиям [8] можно определить по формуле:

$$k_u = 14 / (1 + 1,5\psi) \leq 12,5,$$

где $\psi = \sigma_0 / f_{ck,red}$.

Учет влияния пластин закладных изделий оголовка и пластин соединительных элементов. Пластины закладных изделий оголовка и соединительных пластин обладают высокой распределительной способностью. Степень распределения зависит от толщины пластин δ_{pl} , расчетного сопротивления стали пластины $f_{yd,pl}$, и что особенно важно, от расчетного сопротивления бетона, расположенного под пластиной f_{cud} .

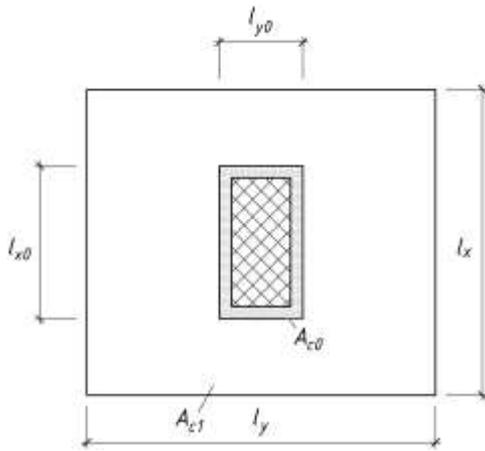


Рис. 7. К учету влияния пластин закладных изделий оголовка и соединительных пластин на прочность оголовка при местном сжатии

Тогда условная ширина полосы бетона a_d (рис. 7), на который распределяет пластина нагрузку на бетон, расположенный по периметру площади приложения нагрузки на пластину A_{pl} , будет равна

$$a_d = \delta_{pl} \sqrt{\frac{f_{yd}}{3f_{cud}}}; \quad (4)$$

полная площадь нагружения бетона

$$A_{c0} = A_{pl} + pa_d + 4a_d^2, \quad (5)$$

где p – периметр площади приложения нагрузки на пластину.

В свою очередь значение расчетного сопротивления бетона, расположенного под пластиной f_{cud} , зависит от соотношения площади торца A_{c1} и полной площади нагружения бетона A_{c0}

$$f_{cud} = f_{cd} \left[1 + k_u \frac{f_{ctk}}{f_{ck}} \left(\sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right) \right]. \quad (6)$$

Решение системы нелинейных уравнений (4) – (6) целесообразно выполнять методом последовательных приближений.

Закключение. Предложена методика расчета бетонных и железобетонных элементов на местное сжатие для бетонных и железобетонных элементов, изготовленных с продольными слоями бетонов различной структуры и прочности.

Приведены зависимости для расчета прочности таких элементов на местное сжатие для различных случаев взаимного расположения слоев бетона и площадок приложения нагрузки при косвенном армировании поперечными сварными сетками и спиральным армированием, а также при наличии пластин закладных изделий оголовка и пластин соединительных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработать, исследовать и внедрить новые центрифугированные железобетонные конструкции различных форм поперечного сечения широкой номенклатуры, каркасы одноэтажных и многоэтажных зданий: отчет о НИР (промеж.) / Бел. политехн. ин-т; рук. темы Т.М. Пецольд. – Минск, 1987. – 82 с. – № ГР01860100607.
2. Лассо, Тамер Исса. Исследование напряженно-деформированного состояния оголовков центрифугированных колонн: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Тамер Исса Лассо. – Минск, 1991. – 168 л.
3. Строительные нормы и правила. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84*. – Введен 01.01.1986. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 80 с.
4. Rak, N. Plain Concrete Strength Under Local Compression According To Belarusian Building Code / N. Rak // Behavior of Concrete at High Temperatures and Advanced Design of Concrete Structures. – Минск: Технопринт, 2003. – С. 206 – 217.
5. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест, 2003. – 252 с.
6. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Строительные нормы Респ. Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Введен 01.07.03. – Минск: Мин-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 140 с.
7. Рак, Н.А. О расчете прочности железобетонных элементов с косвенным армированием при местном сжатии / Н.А. Рак // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2007. – № 1(43) – С. 33 – 39.
8. Рак, Н.А. Расчет прочности стыков железобетонных колонн многоэтажных зданий при местном сжатии / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2007. – № 3(12). – С. 54 – 59.
9. Рак, Н.А. Совершенствование методики расчета бетонных элементов при местном сжатии с использованием банка экспериментальных данных / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5(14). – С. 84 – 90.

Поступила 29.10.2007