

УДК 624.04:624.94.012.45

А.Н. БОЛГОВ, канд. техн. наук (200651@mail.ru), С.И. ИВАНОВ, канд. техн. наук (5378018@mail.ru),
А.З. СОКУРОВ, канд. техн. наук (6618188@gmail.com), А.В. НЕВСКИЙ, канд. техн. наук (lokop888@gmail.com)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона –
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство», Лаборатория № 2 (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях

Приведены результаты исследования работы узлов сопряжения железобетонных плит с колоннами, выполненных из бетонов разного класса по прочности, в монолитно-каркасных высотных зданиях. Кратко представлены результаты анализа отечественных и зарубежных нормативных документов по теме исследования. На основе обзора и обобщения результатов лабораторных испытаний узлов сопряжения плит с колоннами сформулированы факторы, оказывающие влияние на их прочность при сжатии. Описанные в статье численные исследования работы узлов типа «плита–колонна» выполнены с проведением предварительных верификационных расчетов, показавших хорошее совпадение с опытными данными по качественной картине разрушения и разрушающим нагрузкам. На основании результатов расчетов конечно-элементных моделей средних, крайних и угловых узлов «плита–колонна», в которых варьировались соотношения размеров колонн и толщин плит, их классов бетона по прочности при сжатии, а также действующего усилия на плиту и его предельного значения, предложены зависимости для расчета их прочности при сжатии.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, высотные здания, монолитный железобетонный каркас, стык плиты с колонной, узел «плита–колонна», высокопрочный бетон, прочность, смятие.

Для цитирования: Болгов А.Н., Иванов С.И., Сокуров А.З., Невский А.В. О расчете прочности узлов сопряжения железобетонных колонн и плит в монолитно-каркасных высотных зданиях // *Бетон и железобетон*. 2021. № 4 (606). С. 39–44.

A.N. BOLGOV, Candidate of Sciences (Engineering) (200651@mail.ru), S.I. IVANOV, Candidate of Sciences (Engineering) (5378018@mail.ru),
A.Z. SOKUROV, Candidate of Sciences (Engineering) (6618188@gmail.com), A.V. NEVSKII, Candidate of Sciences (Engineering) (lokop888@gmail.com)
Research, Design and Technological institute of Concrete and Reinforced Concrete – NIIZHB named after A.A. Gvozdev
JSC “Research Center “Stroitel’stvo”, Laboratory No. 2 (6, build. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

Strength's Calculation of Reinforced Concrete Slab-Columns Joints in Monolithic Frame of High-Rise Buildings

The article presents the research work aimed at developing a methodology for calculating strength of reinforced concrete slab-columns joints made of different strength grade of concrete in monolithic frame of high-rise buildings. The results of Russian and foreign regulatory documents analysis and technical literature on this issue are briefly presented. On the basis of review and generalization of laboratory tests of slab-columns joints the factors influencing their compressive strength were formulated. Numerical analysis of “slab-column” type units' behavior was carried out with preliminary verification calculations, which showed good accuracy with experimental data on fracture pattern and ultimate breaking loads. Based on results of calculations of finite element models of middle, extreme and corner slab-columns joints, which had a variation of ratios of column dimensions and slab thicknesses, strength grade of concrete, stress acting on the slab and its maximum value, the formulas for compressive strength analysis were derived.

Keywords: reinforced concrete structures, high-rise buildings, monolithic reinforced concrete frame, slab-column connection, slab-column joint, high-strength concrete, strength, crushing.

For citation: Bolgov A.N., Ivanov S.I., Sokurov A.Z., Nevsky A.V. Strength's calculation of reinforced concrete slab-columns joints in monolithic frame of high-rise buildings. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 39–44. (In Russian).

Нормы проектирования высотных зданий в РФ СП 267.1325800.2016 [1] содержат общие требования к выбору конструктивных решений зданий, включая здания с монолитными железобетонными конструкциями. В стандарте указано, что расчет отдельных конструктивных элементов выполняют по СП 63.13330.2018 [2], при этом в стандарте приведены рекомендуемые классы бетона по прочности при сжа-

тии для вертикальных и горизонтальных конструкций. Указано, что для вертикальных конструкций – колонн, пилонов, стен и ядер жесткости следует применять тяжелые бетоны классов по прочности не менее:

- В35 – для зданий высотой 75–150 м (включительно);
- В45 – для зданий высотой 150–200 м (включительно);

– В60 – для зданий высотой 200–250 м (включительно);

– В80 – для зданий высотой более 250 м.

В то же время в перекрытиях следует применять легкие и тяжелые бетоны классов по прочности при сжатию не менее В30. Таким образом, нормами допускается отличие в классах бетона колонн и плит до 2,7 раза и более, при этом не приводится каких-либо расчетных положений или конструктивных мероприятий по обеспечению прочности узлов сопряжений плит с колоннами.

С целью обеспечения прочности узлов «плита–колонна» на действие сжимающих сил возможно выполнение примыкающего к колоннам участка плиты из бетона того же класса по прочности, что и колонны (рис. 1, а). Однако такое решение требует существенного усложнения технологии устройства перекрытий и большей продолжительности работ.

Исследования узлов «плита–колонна» из бетона различного класса по прочности (рис. 1, б) показывают, что бетон плиты, находясь в объемном напряженном состоянии, может иметь большую прочность, чем при осевом сжатии, т. е. проявляется так называ-

емый эффект обоймы, который может позволить применять в плитах в данных узлах более низкий класс бетона по прочности, чем у бетона колонн, без ущерба эксплуатационной надежности здания.

Обзор отечественных и зарубежных норм проектирования

Ряд зарубежных стандартов, таких как ACI 318-14 [3] и CSA A.23.3-04 [4], указывают допустимые диапазоны соотношений классов бетонов колонн и плит, обеспечивающих прочность узлов при сжатии.

В своде правил СП 63.13330.2018 [2] отсутствуют прямые требования к расчету узлов «плита–колонна» при выполнении сопрягаемых конструкций из бетона различного класса по прочности. В то же время в стандарте предусмотрен расчет железобетонных элементов на действие местного сжатия, в котором не оговорен класс конструкций или расчетные случаи, когда следует применять данную методику расчета.

Методика расчета на местное сжатие предполагает проверку прочности железобетонного элемента, нагруженного сжимающей силой по ограниченной

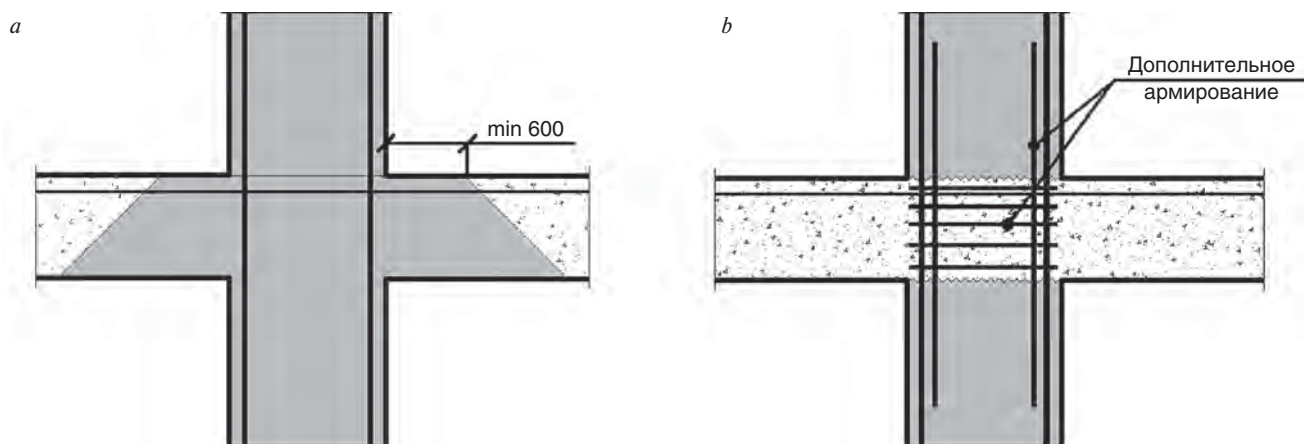


Рис. 1. Варианты конструирования стыков плит с колоннами: а – выполнение примыкающего к колонне участка плиты из бетона того же класса по прочности, что и колонны; б – выполнение плиты и колонны из бетонов различного класса по прочности

Fig. 1. Variants of designing joints between slabs and columns: a – execution of a slab section adjacent to a column from concrete of the same strength class; b – execution of slabs and columns made of concrete of various strength classes

Таблица 1
Table 1

Зависимости по расчету приведенной прочности бетона узлов «плита–колонна»
Formulas for calculating reduced concrete strength of «slab-column» joints

Нормативный документ	Расположение стыка		
	среднее	крайнее	угловое
ACI 318-19	$f'_{ce} = 0,75f'_{cc} + 0,35f'_{cpl}$ $f'_{cc} \leq 2,5f'_{cpl}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$
CSA A.23.3-04	$f'_{ce} = 1,05f'_{cc} + 0,25f'_{cs}$ $\leq f'_{cc}$	$f'_{ce} = 1,45f'_{cs}$ $\leq f'_{cc}$	$f'_{ce} = f'_{cs}$
СП 63.13330.2018	$R_j = 2,4R_{b,s}$	$R_j = 1,96R_{b,s}$	$R_j = 1,6R_{b,s}$

Примечание. f'_{cc} , f'_{cpl} (f'_{cs}) – цилиндровая прочность бетона колонны и плиты соответственно; $R_{b,s}$ – призмная прочность бетона плиты.

площадке. В табл. 1 приведены зависимости по расчету приведенной прочности бетона узлов «плита–колонна» по зарубежным нормам, а также согласно отечественному своду правил СП 63.13330.2018 при рассмотрении только прочности бетона плиты на смятие. Из представленных в табл. 1 данных следует, что формулы СП 63.13330.2018 приводят к значительно большим оценкам прочности рассматриваемых узлов.

Анализ опытных данных, содержащихся в литературных источниках

В 1960 г. в США Bianchini A.C., Wood R.E. [5] провели испытания 45 опытных образцов, моделирующих поведение угловых, крайних и средних узлов «плита–колонна», в том числе крайних и средних узлов с балками; еще девять образцов представляли собой колонны, в части которых бетон принимался одной прочностью по высоте, а в других – средний участок, равный толщине плиты, принимался из бетона прочностью ниже. Нагружение образцов выполнялось при приложении осевой сжимающей нагрузки к колоннам. Целью исследований было определение соотношения прочностей бетонов колонн и плиты, при котором не происходит снижения прочности бетона колонн, а также выявление несущей способности колонн при нарушении этой границы соотношений прочностей бетонов. В испытаниях варьировалось соотношение прочности бетона колонны и плиты, размеры сечения колонны и толщина плит. В результате авторы установили, что эффективная прочность бетона узла выше прочности бетона плиты; при отношении прочности бетона плиты к бетону колонн не ниже 1,4–1,5 несущую способность узла можно оценивать с использованием в расчете прочности бетона колонн. При большем соотношении приведенную прочность промежуточных узлов было предложено рассчитывать по формуле:

$$f'_c = 1,5f'_{cf} + (f'_{cc} - 1,5f'_{cf}). \quad (1)$$

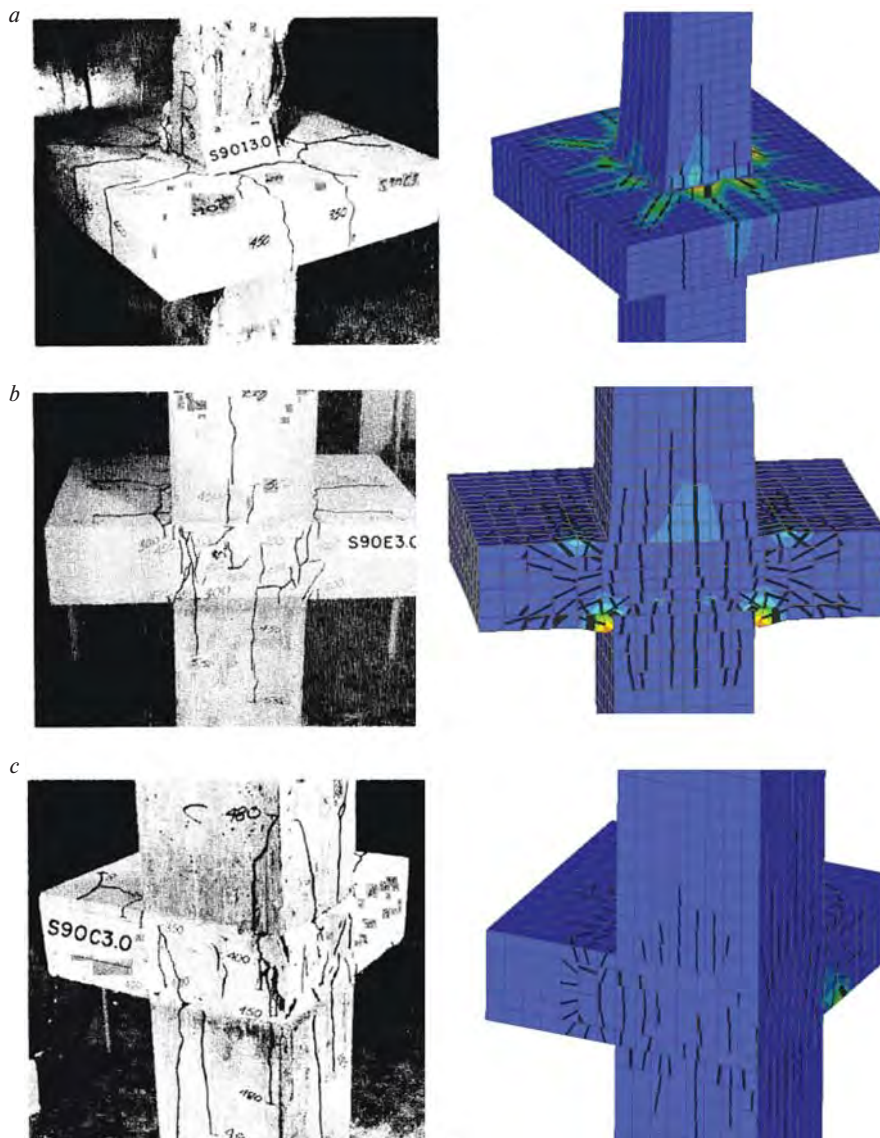


Рис. 2. Схемы трещинообразования узлов сопряжения плиты с колонной, полученные при испытании опытных образцов (слева) и в результате расчета их численных моделей (справа): а – средний узел (образец S90I3.0); б – крайний узел (образец S90E3.0); в – угловой узел (образец S90C3.0)

Fig. 2. Schemes of slab-column joints cracking obtained during testing of prototypes (left) and as a result of calculating their computational model (right): a – middle joint (sample S90I3.0); b – edge joint (sample S90E3.0); c – corner joint (sample S90C3.0)

В 1991 г. Gambel W.L., Klinar J.D [6] опубликовали статью, посвященную испытаниям узлов «плита–колонна», в которых прочность бетона колонны значительно превосходила прочность бетона плиты. Авторы привели результаты испытаний тринадцати опытных образцов, в которых варьировались положение узла (среднее, крайнее) и отношение прочности бетона колонны и плиты, при этом прочность бетона колонны составляла 96 МПа, плиты – от 21 до 42 МПа.

Все образцы испытывались с приложением сжимающей нагрузки к колоннам, изгибающие моменты в плите отсутствовали. Разрушение образцов происходило при выпучивании арматуры колонны в зоне узла и дроблении бетона в этой зоне.

Авторы предложили следующие расчетные зависимости прочности промежуточных и крайних узлов:

– для промежуточных узлов:

$$f'_{cp} = 0,67f'_{cs} + 0,47f'_{cc} \geq 1,45f'_{cs}; \quad (2)$$

– для крайних узлов:

$$f'_{cp} = 0,35f'_{cs} + 0,75f'_{cc} \geq 1,4f'_{cs}. \quad (3)$$

При прочности бетона плиты $1,4f'_{cs} \geq f'_{cc}$ эффективную прочность бетона узла рекомендовано принимать равной f'_{cc} .

В 1998 г. в Канаде Ospina C.E., Alexander S.D.B. [7] получили новые данные о работе узлов «плита–колонна». В своих исследованиях авторы справедливо указывают на недостатки в ранее проведенных опытах Bianchini A.C., Wood R.E. [5], а также в работе Gambel W.L., Klinar J.D [6], указывая на отсутствие нагрузки на плиту перекрытия при испытании узлов при сжатии и недостаточно изученную работу узлов с колоннами прямоугольной формы сечения. Авторами было испытано 20 образцов средних узлов «плита–колонна», в которых, помимо соотношения прочности бетона колонн и плит, варьировались: соотношение толщины плиты и колонны, величина нагрузки на плиту и соотношение сторон сечения колонн.

Авторы предложили следующие зависимости для расчета прочности средних узлов:

$$\text{– при } \frac{f'_{cc}}{f'_{cs}} \leq 1,4 \quad f'_{cc} = f'_{cs}; \quad (4)$$

$$\text{– при } \frac{f'_{cc}}{f'_{cs}} > 1,4 \quad f'_{cc} = \left(\frac{0,25}{h/c}\right)f'_{cc} + \left(1,4 - \frac{0,35}{h/c}\right)f'_{cs}. \quad (5)$$

В формуле (5) значение h/c принимают не менее 0,33. Для колонн прямоугольного сечения за c принимают длину меньшей стороны.

Интерес с точки зрения работы крайних и угловых узлов представляют испытания 54 образцов «сэндвич-колонн», проведенные в 1992 г. Shu C.C., Hawkins N.M. [8].

В своих исследованиях авторы приходят к следующим выводам: формулы ACI 318-83 небезопасны в отношении крайних и угловых узлов при отношении прочности бетона колонны к плите менее 1,4, тогда как выше этого отношения может иметься чрезмерный запас; формулы ACI 318-83 для средних узлов также не могут быть признаны безопасными, так как не учитывают изменения отношения h/c , при отдельных значениях которых прочность узлов может быть ниже. На

основании этого эффективную прочность крайних и угловых узлов авторы предложили вычислять по формуле:

$$f'_{cp} = f'_{cf} + A(f'_{cc} - f'_{cf}), \text{ где } A = 1 / (0,4 + 2,66 \cdot h/c) \quad (6)$$

Таким образом, учитывая имеющиеся сведения из испытаний, можно выделить основные влияющие на прочность узлов «плита–колонна» факторы, а именно:

1. *Расположение колонны* в среднем, крайнем или угловом положении оказывает существенное влияние на проявление эффекта обоймы и, как следствие, на эффективную прочность и деформативность узла, которую непременно следует учитывать.

2. *Соотношение прочности бетона колонны и плиты ($R_{b,c}/R_{b,s}$)*, как показывают опытные данные, оказывает косвенное влияние через изменение жесткости в поперечном направлении и, как следствие, изменение напряженно-деформированного состояния колонн и плиты в зоне узла.

3. *Соотношение размеров колонны и толщины плиты (c/h)* оказывает влияние на жесткость плиты: экспериментальными данными установлено, что с ростом отношения c/h прочность узла повышается и наоборот.

4. *Напряженное состояние плиты в зоне узла*, согласно опытным данным Ospina C.E., Alexander S.D.B. [7] и позднее Shu C.C., Hawkins N.M. [8], также является фактором влияния на прочность узла сопряжения конструкций: напряжения вблизи узла, вызванные действием изгибающего момента и поперечных сил, могут привести существенный вклад в снижение прочности для промежуточных узлов. Этот

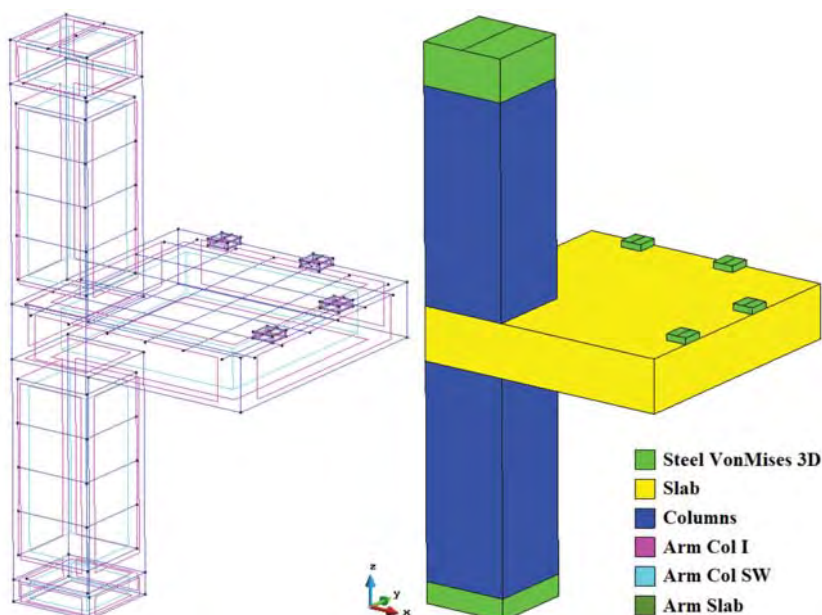


Рис. 3. Расчетная модель углового узла (1/4 часть)
Fig. 3. Computational model of corner joint (1/4 part)

Таблица 2
Table 2

Сопоставление разрушающих нагрузок, полученных в опытах и по результатам численных расчетов
Comparison of ultimate breaking loads obtained in experiments and from the results of numerical analysis

Марка узла	Тип	В опытах (N_{test}), тс	ATENA (N_{calc}), тс	N_{test}/N_{calc}
S90I3.0	Средний	311,4	274,7	1,13
S90E3.0	Крайний	252,6	223,4	1,13
S90C3.0	Угловой	213,5	230,7	0,93

эффект непременно требует учета при исследовании прочности узлов.

Ряд исследователей отмечают возможность повышения прочности узлов «плита–колонна» за счет устройства в плите «колодца» в зоне ядра колонны и последующего его заполнения бетоном вышележащей колонны, а также положительную роль дополнительной продольной арматуры в колонне в зоне узла. Данные приемы также могут быть рассмотрены как меры по повышению несущей способности узлов на сжатие.

Численные исследования

Проведены численные исследования узлов «плита–колонна», выполненные с применением программного комплекса Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis (ATENA), реализующего метод конечных элементов.

При моделировании конструкции образцов для численных исследований использовались объемные конечные элементы для бетона и опорных элементов, а также стержневые конечные элементы для арматуры.

Поведение материалов бетона и арматуры задавалось с применением стандартных наборов материалов, включенных в библиотеку программы, учитывающих их физическую нелинейность. При этом принимались средние (фактические) характеристики для бетона и арматуры. Для бетона применялась модель CC3DNonlinCementitious2, для арматуры – CCReinforcement, для стальных элементов опор – CCDElastIsotropic. При назначении характеристик материалов задавались значения кубиковой прочности бетона при сжатии (стандартный куб с размером ребра 150 мм), остальные параметры для бетона принимались стандартными внутрпрограммно.

Перед проведением численных исследований были выполнены верификационные расчеты для трех опытных образцов S90I3.0, S90E3.0, S90C3.0, испытанных в работе [5], представляющих собой средний, крайний и угловой узлы «плита–колонна» соответственно. К сожалению, авторы [5] не привели сведений о деформациях бетона при работе узлов, поэтому сравнение выполнялось только по качественной картине трещинообразования при их разрушении, а также по величине несущей способности.

Таблица 3
Table 3

Описание варьируемых параметров образцов для численных исследований
Description of variable parameters of samples for numerical analysis

Расположение узла	B_c/B_s	c/h	F/F_{ult}
Средний	$\frac{25 \pm 60}{25} = 1 \div 2,4$	$2 \div 3,2$	$0 \div 0,5$
Крайний		$2 \div 1,6$	
Угловой			

На рис. 2 приведены фотографии после испытания опытных образцов узлов сопряжения плиты с колонной и схемы образования трещин, полученные в результате расчета их численных моделей, а в табл. 2 – разрушающие нагрузки. В целом была обнаружена хорошая согласованность результатов моделирования с опытными данными как по разрушающим нагрузкам, так и качественно по трещинообразованию в бетоне моделей.

Численные исследования выполнялись для средних, крайних и угловых узлов. Коэффициент продольного армирования колонн принимался равным 0,3%, то же для верхнего армирования плиты – 1,1%. Хомуты колонн в зоне пересечения с плитой отсутствовали. В табл. 3 варьируемые параметры моделей, выраженные соотношениями классов бетона колонны (B_c) и плиты (B_s), высоты поперечного сечения колонны (c) и толщины плиты (h), действующего усилия на плиту (F) и его предельного значения (F_{ult}). Размеры плиты в плане принимались равными 2,4×2,4 м для среднего, 2,4×1,2 м для – крайнего и 1,2×1,2 м – для угловых узлов. Общий вид расчетной модели углового узла приведен на рис. 3.

Предельное значение продавливающего усилия на плиту (F_{ult}) устанавливалось по результатам предварительного численного моделирования при отсутствии сжимающей нагрузки на узел. В исследованиях прочности узлов при сжатии усилие на плиту принималось в процентах от расчетного значения, вычисляемого по формуле (7) и принимаемого по табл. 3:

$$\bar{F} \cdot \gamma_f = \frac{F_{ult}}{\gamma_{bt} \gamma_f}, \tag{7}$$

где \bar{F} – фактическое значение нагрузки при эксплуатации; F_{ult} – предельная несущая способность узла

Таблица 4
Table 4

Зависимости для расчета прочности узлов «плита–колонна», установленные по результатам численных исследований
Formulas for calculating strength of «slab–column» joints, established by results of numerical analysis

Положение узла	Зависимость	Коэффициент точности	σ , тс	ν , %
Среднее	$\frac{N_j}{N_c} = 1,46 - \frac{R_{b,c}/R_{b,s} + c/d}{8,3}$	0,98	0,05	5,4
Крайнее	$\frac{N_j}{N_s} = \frac{R_{b,c}/R_{b,s} + c/d}{3} - 0,31$	1	0,12	12,3
Угловое	$\frac{N_j}{N_s} = \frac{R_{b,c}/R_{b,s} + c/d}{9,5} - 0,39$	0,97	0,06	5,9

(среднее значение); γ_{br} , γ_f – коэффициенты надежности по нагрузке и материалу, принимаемые равными 1,15 и 1,5 соответственно.

Численные исследования показали, что разрушение узлов в зависимости от их положения (среднее, крайнее или угловое) отличается по своему механизму. Если разрушение средних узлов начиналось либо с дробления бетона колонн, либо с дробления бетона плиты, то крайние и угловые узлы, как правило, разрушались вследствие дробления бетона плиты.

В этой связи при анализе средних узлов выполнялось сравнение с прочностью колонны, рассчитываемой по формуле:

$$N_c = R_{bc}A_b + R_{sc}A_{sc} \quad (8)$$

где R_{bc} – призмная прочность бетона колонны, вычисляемая как $R_{ц}/1,16$ ($R_{ц}$ – прочность бетона образца цилиндра размером 150×300 мм).

Крайние и угловые узлы сравнивались с теоретической прочностью плиты при сжатии с площадью, ограниченной площадью колонны, рассчитываемой по формуле:

$$N_s = R_{bs}A_b + R_{sc}A_{sc} \quad (9)$$

где R_{bs} – призмная прочность бетона плиты, вычисляемая как $R_{ц}/1,16$ ($R_{ц}$ – прочность бетона образца цилиндра размером 150×300 мм).

В табл. 4 приведены зависимости для расчета прочности узлов «плита–колонна», полученные по результатам обработки численных исследований, а также их статистические параметры точности.

Выводы

1. При выполнении конструкций колонн и плит из бетонов разного класса по прочности наряду с проверкой прочности отдельных конструктивных элементов согласно СП 63.13330.2018 необходи-

мо проводить проверку прочности узла сопряжения «плита–колонна».

2. При расчете узлов необходимо учитывать следующие факторы: положение узла (среднее, крайнее или угловое), отношение классов бетона колонны и плиты, а также отношение размеров сечений колонны и толщины плиты.

3. При разработке инженерной методики расчета прочности узлов необходимо учитывать, что механизм разрушения зависит от положения узла: в случае если узел расположен в средней зоне, его прочность может определяться как прочностью верхней колонны, так и прочностью плиты между колоннами, а в случае крайнего либо углового узла его прочность определяется главным образом прочностью зоны плиты между колоннами.

Список литературы / References

- СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. М.: Минстрой России, 2016. 95 с.
- SP 267.1325800.2016. High rise buildings and complexes. Design rules. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. 2016. 95 p.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 143 с.
- SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete constructions. General provisions. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation. 2018. 143 p.
- ACI 318-2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Reported by ACI Committee 318. USA, Farmington Hills: ACI. 2014. 519 p.
- CSA A23.3-04. Design of concrete structures. Canadian Standards Association. Canada, Ontario, Mississauga: CSI. 2006. 258 p.
- Bianchini A.C., Wood R.E. Effect of floor concrete strength on column strength. *Journal of the American Concrete Institute*. 1960. Vol. 31. No. 11, pp. 1149–1169.
- Gambel W.L., Klinar J.D. Test of high-strength concrete columns with intervening floor slabs. *Journal of Structural Engineering*. 1991. Vol. 117. No. 5, pp. 1462–1476.
- Ospina C.E., Alexander S.D.B. Transmission of interior concrete columns loads through floor. *Journal of Structural Engineering*. 1998. Vol. 124. No. 6, pp. 602–610.
- Shu C.C., Hawkins N.M. Behavior of columns continuous through concrete floors. *Journal of The American Concrete Institute*. 1992. Vol. 89. No. 4, pp. 405–414.