

УДК 624.078.412

Лизунова Н.С. – ассистент

E-mail: Lis258.86@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420023, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния штепсельных стыков железобетонных колонн при сдвиге

Аннотация

В статье изложены результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния штепсельных стыков сборных железобетонных колонн при действии поперечной силы. Получены диаграммы деформирования стыков, выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на сдвиговую податливость. Результаты расчетов представлены в виде изополей напряжений и диаграмм, иллюстрирующих влияние перечисленных факторов на напряженно-деформированное состояние стыка и использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований и разработке методики расчета сдвиговой податливости штепсельных стыков.

Ключевые слова: штепсельный стык, соединение колонн, компьютерное моделирование, соединение колонн, диаграммы деформирования, сдвиговая податливость, горизонтальные перемещения.

Штепсельные стыки колонн, состоят из цилиндрических полостей в торце одной колонны и выпусков рабочей арматуры из торцов другой колонны. Заделка стыка происходит за счет введения и последующего твердения раствора, заливаемого в отверстия и горизонтальные швы между торцами колонн. По существующей классификации такие стыки относятся к бессварным несущим, так как воспринимают различные усилия и воздействия, обеспечивая несущую способность и эксплуатационную пригодность конструктивной системы.

Однако, несмотря на применение штепсельных стыков, анализ научной литературы показал отсутствие методик по их расчету. Но существуют рекомендации и нормативные подходы к расчету отдельных элементов [1, 2, 3]. Учитывая это, возникает необходимость комплексного изучения действительной работы стыков с целью разработки методики их расчета и рекомендаций по их конструированию.

Испытания штепсельных стыков проектного решения [4] показали низкую прочность и высокую податливость при действии сдвигающих усилий, из-за необоснованного выбора диаметра стержней сеток косвенного армирования в торцах колонн, недостаточной прочности сварных соединений между стержнями, шага сеток, низких адгезионных свойств растворов. Перечисленное выше, привело к необходимости проведения исследований в трех направлениях:

- стыков проектного решения с целью выявления характера работы элементов, входящих в стык, и выделения из них наиболее влияющих на прочность и податливость;
- штепсельных стыков новых конструктивных решений;
- стыков, усиленных стальной обоймой с целью определения наиболее эффективных вариантов их конструктивного решения.

Разработке методики расчета сдвиговой податливости предшествовало компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния стыков.

Исследование проводилось с использованием ПК «Лира САПР-2013». Анализ работы стыков и их аналогов, показал, что на сдвиговую податливость стыков оказывают влияние следующие факторы, на изучение которых направлено компьютерное моделирование:

- марка раствора в шве и его толщина; соотношение толщины раствора к толщине контактной поверхности (учет адгезионных и когезионных свойств);
- физико-механические свойства раствора заполняемого скважины;
- продольное армирование, диаметры арматуры;
- прочностные характеристики арматуры.

Программа численных исследований представлена на рис. 1.

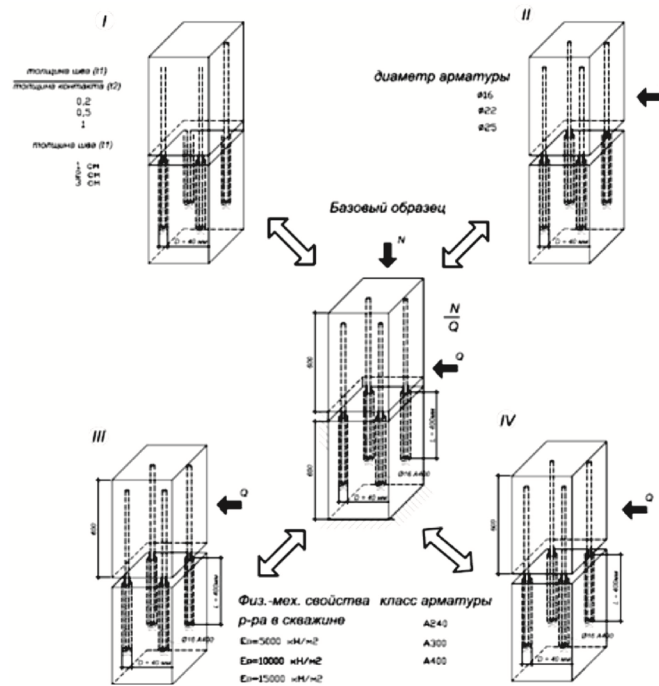


Рис. 1. Программа численных исследований стыков проектного решения

Для изучения напряженно-деформированного состояния стыка (НДС) на всех стадиях, в т.ч. в предельном состоянии, сформирована модель из физически нелинейных элементов. Объемная модель стыка состоит из изопараметрических конечных элементов КЭ-236. В зоне контакта бетона с арматурой размеры кэ уменьшались, а для бетона – $5 \times 5 \times 2,5$ см (x,y,z), кэ арматуры и окружающего раствора в скважине задавали триангуляцией контура с количеством узлов на сетке разбивки $n=12$. Класс продольной арматуры А400. Бетон тяжелый класса В30. Предельные деформации бетона и арматуры приняты по нормативным документам. При расчете без учета растворного шва конечные элементы в объеме шва удалялись. Геометрические и физические параметры соответствовали натурным – $30 \times 30 \times 120$ см.

Нагружение производилось поэтапно с доведением бетона и арматуры до разрушения (достижения предельных напряжений, соответственно на сжатие и растяжение).

Расчетная модель стыка показана на рис. 2.

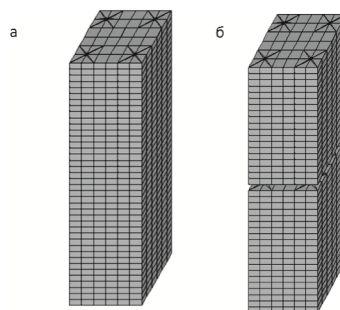


Рис. 2. Разбивка рассчитываемых моделей на кэ: с раствором швом (а) и без него (б)

В соответствии с поставленными задачами на этих образцах исследовали влияние толщины контактного слоя бетона и марки раствора, прочностных характеристик и площади сечения арматуры на напряженно-деформированное состояние стыка.

По результатам выполненного компьютерного моделирования были получены значения сдвиговых перемещений, диаграммы деформирования и данные о распределении касательных и нормальных напряжений в области контакта «раствор-бетон», «раствор-арматура», в области смятия бетона под арматурными стержнями. Результаты расчетов представлены в виде изополей напряжений и диаграмм, иллюстрирующих влияние перечисленных факторов на напряженно-деформированное состояние стыка.

В расчетах рассмотрена пространственная задача с учетом физической нелинейности бетона. Для раствора и бетона стыка физическая нелинейность описывается двумя законами: «законом деформирования Гениева Г.А.» и экспоненциальным (расчетной прочностью) законом деформирования; для арматуры – диаграммой « σ - ϵ » [6]. Диаграммы деформирования, полученные по результатам расчетов с использованием этих критериев, представлены на рис. 3.

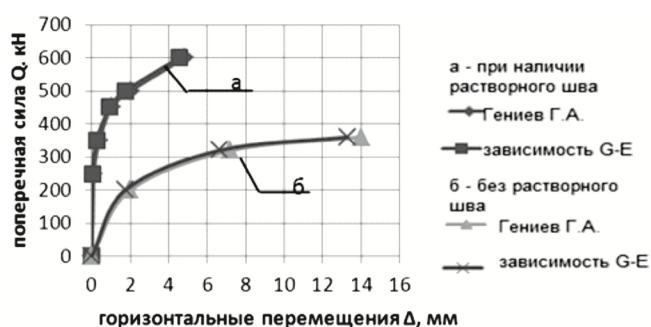


Рис. 3. Зависимость « $Q - \Delta$ »

Из рис. 3 видно, что данные расчетов с использованием «закона деформирования Гениева Г.А.» и экспоненциального (расчетная прочность) закона деформирования практически совпадают. Оба подхода могут быть использованы в дальнейших расчетах. Расхождение составило не более 10 %. Также из рис. 3. видно, что деформативность стыков без растворного шва, превышает деформативность стыков с растворным швом в 2,5 раза.

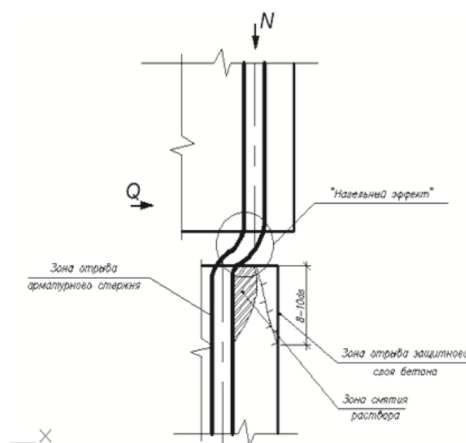


Рис. 4. К расчету образцов

Результаты расчета базового образца в соответствии с рис. 4

После нарушения сцепления по контактной поверхности «раствор-бетон», напряжения в областях отрыва защитного слоя увеличились, значительно выросли горизонтальные перемещения сдвига. В области сдвига (нарушения сцепления по контактной поверхности) напряжения в растворе достигли 11-12 МПа, а непосредственно под арматурным стержнем в области смятия 20-25 МПа. Напряжения растяжения в арматурном стержне в области отрыва (по верхней грани) составили 560 МПа, в области смятия раствора (по нижней грани) 224 МПа. Собственный изгибающий момент в

арматурном стержне в зоне контакта составил 24,19 Нм, продольная сила в стержне 37,6 кН. Нормами не установлено величин предельных смещений контактных швов пронизанных продольной арматурой на горизонтальные нагрузки, полагая соединение жестким. Что же касается жесткости нагельных узлов при сдвиге, то варьируемые факторы, принятые в основу расчета в большей или меньшей степени влияют на изгиб продольной арматуры в плоскости сдвига, увеличение угла наклона арматуры, что повышает деформативность стыка, а следовательно, сдвиговую податливость.

Серия 1. Исследовалось влияние соотношения толщины растворного шва к толщине контакта. Ставилась задача исследования адгезионных и когезионных характеристик слоя контакта «раствор-бетон». Контактные поверхности моделировались двумя способами:

- заданием одноузловых элементов трения КЭ-263 на поверхности контакта «бетон-раствор». В результате проведенных расчетов наблюдался сдвиг одного фрагмента колонны относительно другого;
- введением значения модуля упругости в области контакта близкого к нулю.

Моделирование нарушения контакта осуществлялось путем исключения из расчетной схемы кэ на высоту растворного шва, т.е. переходили ко второй, третьей стадии напряженно-деформированного состояния. Все напряжения сосредоточены в арматурных стержнях в области контакта на длину 8-10 d_s , поэтому более подробно в сериях представлено изучение влияния продольного армирования на деформативность стыка.

Результаты расчетов в виде зависимости « $Q-\Delta$ » представлены на рис. 5.

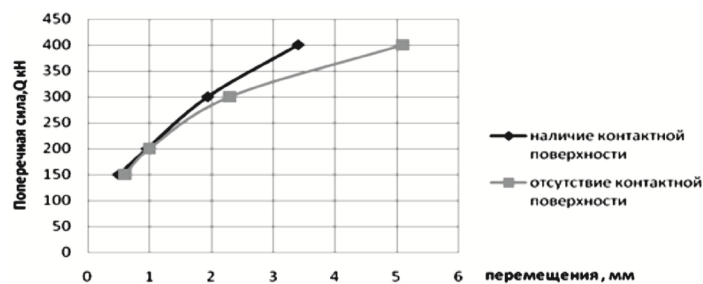


Рис. 5. Зависимость « $Q - \Delta$ »

Серия 2, 4. За варьируемый параметр принималась площадь сечения арматуры при проценте армирования соответственно 0,9-2,18 %.

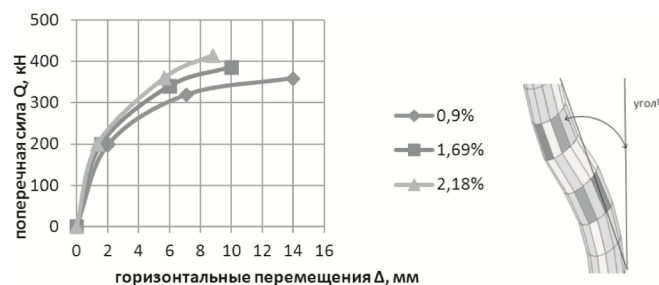


Рис. 6. Зависимость « $Q - \Delta$ » при различном проценте армирования

Получена следующая картина работы продольной арматуры. В плоскости сдвига стержень начинает изгибаться, образуется так называемый «нагельный эффект». Несущая способность повышается пропорционально площади продольной арматуры. В местах изгиба арматуры напряжения достигали расчетного сопротивления. Угол наклона стержней продольного армирования уменьшался с ростом площади сечения арматуры, так при диаметре 16 мм – составил 53,8°, 25 мм – 29,8°. Увеличение площади сечения арматуры привело к повышению деформативности. Горизонтальные перемещения чистого сдвига при диаметре стержня 25 мм составили 8 мм, при диаметре стержней 16 мм – 13 мм.

Серия 3. Изменение модуля упругости раствора в скважине повлияло на деформативность стыка. При $E_r=5000 \text{ кН/м}^2$ – горизонтальные деформации составили 25 мм, а при $E_r=15000 \text{ кН/м}^2$ – 13 мм.

Низкие модуль упругости раствора не препятствовали изгибу продольной арматуры в области сдвига, это привело к изменению угла наклона арматуры в области шва с 30° до 38° .

В зонах контакта арматуры с бетоном образовались площадки смятия, прочность раствора на сжатие в этих местах превысила 150 %.

Выводы:

1. проведено компьютерное моделирование штепсельных стыков с учетом различных факторов, учетом физической нелинейности железобетона. Выполнено 26 расчетов. Уточнены геометрические и физические параметры расчетных схем. Установлено, что на сдвиговую податливость стыка влияют следующие характеристики: толщина шва омоноличивания, жесткостные характеристики бетона и арматуры, количественные характеристики продольной и поперечной арматуры, соотношение контактных поверхностей бетона и тела колонны;

2. наличие сцепления между раствором шва и бетоном торца колонны, является существенным фактором при определении сдвиговой податливости. При наличии сцепления по контакту «бетон-раствор» сдвиговая податливость близка к нулю, а при нарушении сцепления сдвиговые перемещения составили 13 мм;

3. продольная арматуры при нарушении сцепления контактной поверхности воспринимает на поперечное усилие, несущая способность стыка обеспечивается в дальнейшем за счет работы арматуры на сдвиг, при изменении угла наклона с $53,8^\circ$ до $29,8^\circ$ и с увеличением диаметра арматуры с 16 до 25 мм – сдвиговые перемещения изменялись в диапазоне от 15 до 8 мм;

4. в области шва в продольной арматуре наблюдается «нагельный эффект» (изгиб стержня), что в значительной степени влияет на сдвиговую податливость стыка (8-15 мм). Под продольной арматурой произошло смятие раствора в скважине, предельные значения напряжений в этих участках превысили предел прочности на сжатие в 2,5 раз.

Выполненные численные исследования проектных решений стыков позволили уточнить параметры конструктивных элементов, входящих встык, и оптимизировать программу физического эксперимента.

Список библиографических ссылок

1. Рекомендации по проектированию и выполнению контактных стыков с обрывом арматуры железобетонных колонн многоэтажных зданий. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 49 с.
2. Пособие по проектированию жилых зданий, Вып. 3. Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85). // ЦНИИЭП жилища. – М.: Стройиздат, 1989. – 304 с.
3. Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости узловых сопряжений сборных железобетонных конструкций. – М.: ЦНИИПромзданий, 2002. – 39 с.
4. Соколов Б.С., Латыпов Р.Р. Прочность и податливость штепсельных стыков железобетонных колонн при действии статических и сейсмических нагрузок: Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 128 с.
5. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом, Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 352 с.
6. Лизунова Н.С. Растворы омоноличивания, как фактор, влияющий на деформативность штепсельных стыков железобетонных колонн // Сб. материалов, V Международной научно-практической конференции «Наука и практика: проблемы, идеи, инновации». – Чистополь, 2011. – С. 71-73.
7. Соколов Б.С., Лизунова Н.С. Экспериментальные исследования новых решений штепсельных стыков колонн // Сб. научных трудов «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». – Челябинск, 2012. – С. 160-164.

8. Соколов Б.С., Лизунова Н.С. Анализ результатов экспериментальных исследований сдвиговой податливости штепсельных стыков железобетонных колонн // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, выпуск 31. – Волгоград, 2013. – С. 52-57.

Lizunova N.S. – assistant

E-mail: Lis258.86@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420023, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Computer modeling of the stress-strain state of plug joints reinforced concrete columns under shear

Resume

The article presents the results of computer modeling of the stress-strain state of socket joints of precast concrete columns under shear forces.

To study the stress-strain state interface (SSS) at all stages, including limit state, formed the model of physically nonlinear elements. The study was conducted using a PC «Lira SAPR-2013». Analysis of joints and their analogs, showed that the shear yielding of the joints affected by the following factors, which are directed to the study of computer simulation: a seam mark solution and its thickness; ratio of the thickness of the solution to a thickness of the contact surfaces (keeping the adhesion and cohesion properties), mechanical properties of the solution to be filled well; longitudinal reinforcement, the diameters of the valve; the strength characteristics of the reinforcement.

The results of the computer simulations were obtained values of the shear displacement, strain diagrams and data on the distribution of shear and normal stresses in the contact area «solution-concrete», «solution-valves» in the crushing of concrete under the reinforcement bars. Performed numerical studies of design decisions joints allowed to specify the parameters of structural elements involved in the joint, and optimize the program of physical experiment.

Keywords: shear compliance, plug joint, experimental studies, the compound columns, strain diagrams, fracture mechanism, linear displacement, solution embedment.

Reference list

1. Recommendations for the design and implementation of contact joints with edged bars reinforcement concrete columns of multistory buildings. – M.: NIIZhB USSR State, 1985. – 49 p.
2. Sokolov B.S., Lizunova N.S., Latypov R.R. Experimental studies gain plug-joints of reinforced concrete columns // Proc. scientific papers II All-Russian scientific-practical conference «Urban planning, reconstruction and engineering for sustainable cities of the Volga region». – Toliatti, 2009. – P. 167-173.
3. Lizunova N.S. Grouting solutions as a factor influencing the deformation socket joints of reinforced concrete columns // Proc. Materials of V International scientific and practical conference «Science and Practice: issues, ideas and innovations». – Chistopol, 2011. – P. 71-73.
4. Sokolov B.S., Lizunova N.S. Experimental research of new solutions socket joints columns // Proc. scientific papers «Actual problems of computer modeling of structures and facilities». – Chelyabinsk, 2012. – P. 160-164.
5. Sokolov B.S., Lizunova N.S. Analysis of the results of experimental studies of shear compliance plug-joints of reinforced concrete columns // Bulletin of the Volgograd State Architectural University, issue 31. – Volgograd, 2013. – P. 52-57.
6. Manual for the design of residential buildings. Issue 3. Construction of residential buildings (SNIP 2.08.01-85), TSNIIEP. – M.: Stroyizdat, 1989. – 304 p.
7. Recommendations for calculation of multistory buildings frames considering compliance nodal pairings precast. – M.: TsNIIPromzdany, 2002. – 39 p.
8. Kodysh E.N., Trekin N.N., Nikitin I.K. Design of multistory buildings with a concrete frame, Monography. – M.: publishing house of the ASV, 2009. – 352 p.