

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ "ПРИНС"**

В.П. АГАПОВ<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, профессор*

А.В. ВАСИЛЬЕВ<sup>2</sup>, *инженер-конструктор*

<sup>1</sup> – *Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337;*

<sup>2</sup> – *ООО «Родник», ул. Коминтерна, 22, Тверь, 170000*

*Разработанный авторами ранее на основе трехмерной теории упругости суперэлемент колонны прямоугольного сечения, выполненной из однородного материала, развит применительно к расчету железобетонных колонн. Элемент адаптирован к вычислительному комплексу ПРИНС, и в составе этого комплекса может использоваться для линейных расчетов строительных сооружений, содержащих железобетонные колонны прямоугольного сечения.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительные конструкции, железобетонные колонны прямоугольного сечения, метод конечных элементов.

Железобетонные колонны прямоугольного сечения находят широкое применение в сборных и монолитных железобетонных конструкциях, поэтому разработке методики расчета таких элементов уделялось и уделяется большое внимание. В настоящее время основным инструментом исследования прочности строительных конструкций является метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый в виде программ для ЭВМ. В расчетной практике нашли широкое применение такие программы, как NASTRAN [1], ANSYS [2], ADINA [3,6], AB-AQUS [4] и др. Во всех этих программах используется набор конечных элементов, позволяющих рассчитывать одномерные, двухмерные и трехмерные конструкции, а также всевозможные комбинированные системы [5]. Линейный расчет отдельно стоящих колонн прямоугольного сечения как в одномерной, так и в трехмерной постановках с использованием имеющихся программ не представляет трудностей. Однако при расчете этих колонн в составе сложных пространственных конструкций возникают проблемы. Эти проблемы связаны с использованием в таких случаях для моделирования колонн одномерных конечных элементов (стержней). Как указывают многие авторы (см., например, [7]), даже в линейных расчетах применение стержневых моделей колонн приводит к искажению напряженно-деформированного состояния в местах соединения колонн с сопрягаемыми элементами (плитами перекрытий, фундаментами). В нелинейных расчетах ситуация усугубляется необходимостью учета искривления осей колонн, произвольным поворотом поперечных сечений, их депланацией и изменением формы, а также необходимостью контролировать параметры напряженно-деформированного состояния по всему объему колонны.

Чтобы избежать указанных выше трудностей авторами ранее на основе трехмерной теории упругости и пластичности был разработан и реализован в вычислительном комплексе ПРИНС суперэлемент колонны прямоугольного сечения, предназначенный для линейных и нелинейных расчетов колонн прямоугольного сечения, выполненных из однородных материалов [8-11]. В разработанном элементе колонна моделировалась объемными элементами с произвольной разбивкой по длине и по сечению, как показано на рис.1, но на стадии формирования характеристик элемента промежуточные узлы исключались. В результате все характеристики суперэлемента приводились к узлам, лежащим в концевых сечениях. Это позволяло устранить все недостатки, присущие одномерной модели.

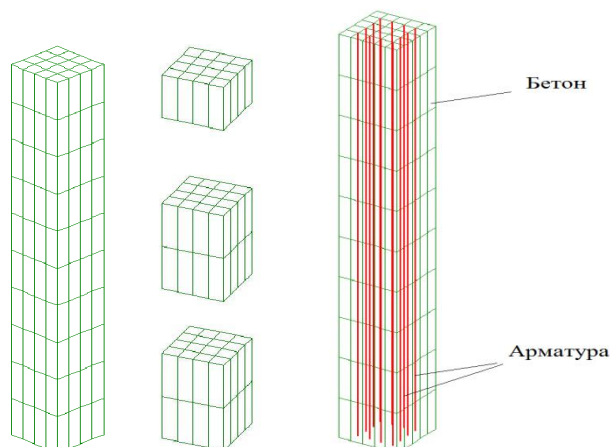


Рис. 1. Суперэлемент колонны из однородного материала

Рис. 2. Суперэлемент железобетонной колонны

В данной работе предложенная ранее технология использована для построения суперэлемента железобетонной колонны прямоугольного сечения, показанной на рис. 2. При этом использовались два типа конечных элементов: восьмиузловые элементы сплошной среды для моделирования бетона и двухузловые стержневые элементы, работающие на растяжение и сжатие, для моделирования арматуры. Элементы соединялись между собой в узлах конечно-элементной сетки, что обеспечивало совместную работу бетона и арматуры. Поскольку методика формирования матрицы жесткости и вектора нагрузки суперэлемента подробно описана в работе [8], в данной статье ограничимся изложением результатов тестирования новой конечно-элементной модели.

Тестирование проводилось на примере расчета отдельно стоящей железобетонной колонны квадратного сечения, защемленной внизу и нагруженной сосредоточенной силой  $P = 50$  кН на свободном конце. Высота колонны принималась равной 4 м, размер стороны поперечного сечения равнялся 40 см. Колонна имела 12 арматурных стержней, площадью сечения  $3 \text{ см}^2$  каждый. Расположение арматурных стержней показано на рис.3. Материалы имели следующие характеристики: модуль упругости бетона  $E_b = 3,25 \times 10^7 \text{ КПа}$ , модуль упругости арматуры  $E_a = 2 \times 10^8 \text{ КПа}$ , коэффициент Пуассона бетона  $\nu = 0,2$ .

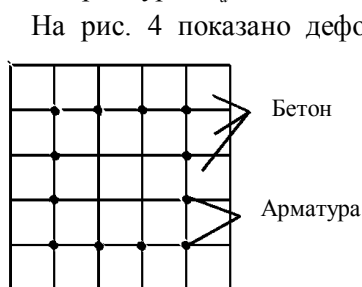


Рис. 3. Сечение колонны

На рис. 4 показано деформированное состояние колонны. Максимальное значение перемещения составило 0,0139 м. Нетрудно убедиться, что теоретическое значение прогиба для колонны с принятыми размерами и свойствами материала составляет 0,0142 м. Расхождение в 2,11% свидетельствует о высокой точности разработанного суперэлемента. На рис.4 для сравнения приведены результаты расчета колонны с помощью балочных элементов с эквивалентной изгибной жесткостью. Макси-

мальные значения перемещений для трехмерной и одномерной моделей практически совпали, что подтверждает высказанный выше тезис о том, что в линейных расчетах отдельно стоящих колонн проблем практически нет.

Для исследования особенностей использования предложенного суперэлемента в составе пространственных комбинированных систем был рассчитан фрагмент конструкции, состоящий из шарнирно-опертой по углам бетонной

плиты с установленной на ней колонной (рис.5). Толщина плиты принималась равной 20 см, а размер в плане - 6,8 × 6,8 м. Колонна нагружалась так же, как и в предыдущем случае.

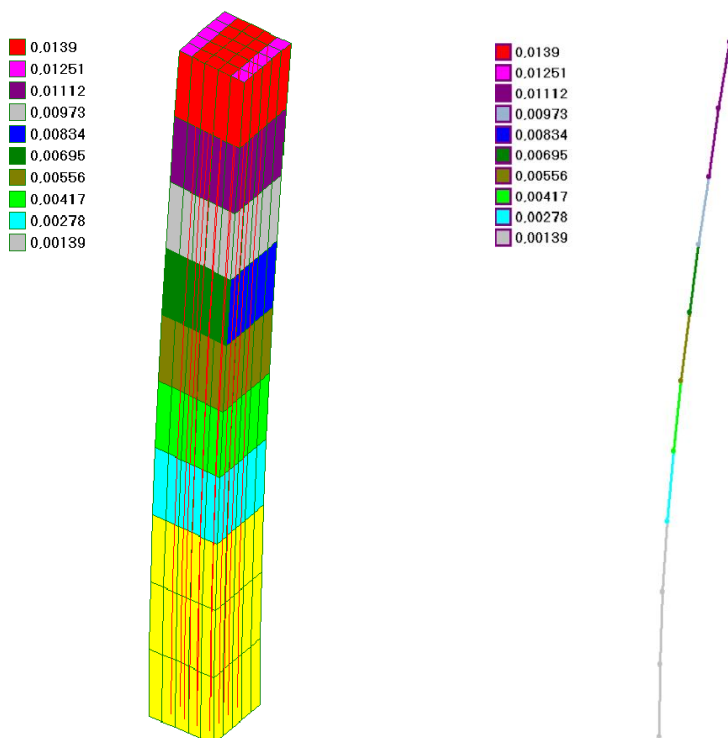


Рис. 4. Результаты расчета колонны с использованием трехмерных и одномерных элементов

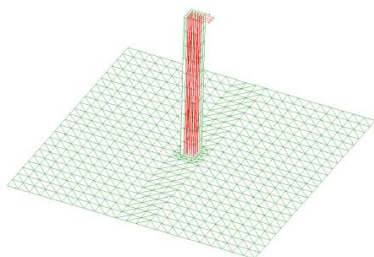


Рис. 5. Плита с колонной, представленной объемным суперэлементом

Деформированное состояние под нагрузкой для рассчитанного фрагмента конструкции представлено на рис.6,а. Максимальное значение перемещения в данном случае составило 0,0234 м, что, естественно, больше значения, полученного для защемленной колонны. При замене трехмерной модели колонны одномерной деформированное состояние конструкции существенно изменилось, как это следует из рис.6,б. Максимальное значение перемещения

в данном случае составило 0,0329 м. Этот результат превышает значение, полученное для трехмерной модели, на 40,6%. В этом и заключается суть проблемы, связанной с передачей усилия в точке. На первый взгляд, проблема может быть решена "ужесточением" плиты под подошвой колонны. Так, например, при увеличении толщины плиты под подошвой с 20 до 30 см максимальное значение перемещения составило 0,0243 м (см.рис.7), что несущественно отличается от результата, полученного при использовании объемной модели. Однако наличие жесткой вставки в плите приводит к искажению напряженного состояния в зоне подошвы колонны и ее окрестности, как это видно из рис. 8-10.

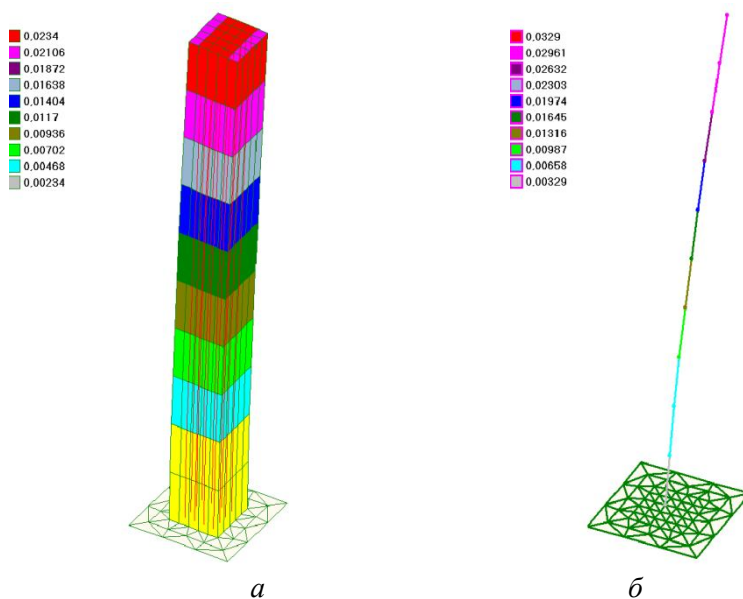


Рис. 6. Деформированное состояние плиты с колонной, представленной: а) объемным суперэлементом; б) одномерным элементом

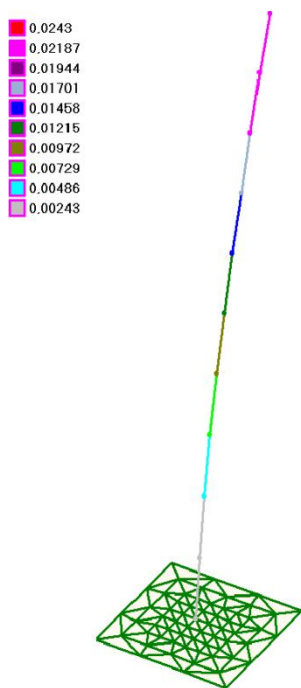


Рис. 7. Деформированное состояние плиты с колонной, представленной балочным элементом, после "ужесточения" опорной зоны плиты

Таким образом, предложенный способ моделирования железобетонной колонны прямоугольного сечения позволяет избежать недостатков, присущих традиционным подходам и может быть рекомендован для использования в расчетной практике.

#### Л и т е р а т у р а

1. Samuel S., Stevenson B., Weeks E. Advanced Simulation Using Nastran -NX5/NX6. – Design Visonaries Inc., 2008. – 384 p.
2. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: Изд-во "ДМК-Пресс", 2005 – 637 с.
3. Bathe K.J. and Wiener P.M. On Elastic-Plastic Analysis of I-Beams in Bending and Torsion// *Computers and Structures* . – 1983. – Vol. 17. – P. 711-718.
4. Khennane A.. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. – CRC Press, 2013. – 487 p.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Sixth edition. - McGraw-Hill, 2005. – 631 p.
6. Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. – Prentice Hall, Inc., 1996. – 1037 p.
7. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. – М.: Изд-во АМК, 2007. – 595 с.
8. Агапов В.П., Васильев А.В. Моделирование колонн прямоугольного сечения объемными элементами с использованием суперэлементной технологии// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2012. – № 4. – С. 48-54.
9. Агапов В.П., Васильев А.В. Суперэлемент колонны прямоугольного сечения с физической нелинейностью// *Вестник МГСУ*. – 2013. – № 5. – С. 34-39.

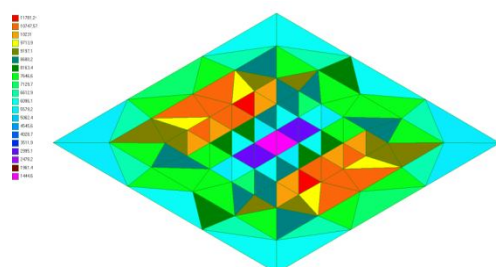


Рис. 8. Напряжения в плите под подошвой колонны и в ее окрестности при использовании трехмерной модели;  
 $\sigma_{\max} = 11,78$  КПа

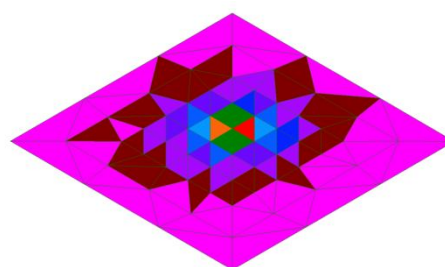


Рис. 9. Напряжения в плите под подошвой колонны и в ее окрестности при использовании одномерной модели модели;  $\sigma_{\max} = 91,30$  КПа

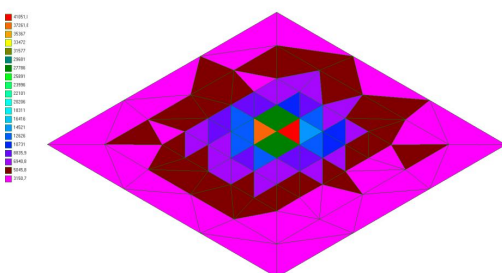


Рис. 10. Напряжения в плите под подошвой колонны и в ее окрестности при использовании одномерной модели и при наличии жесткой вставки;  
 $\sigma_{\max} = 41,06$  КПа

10. *Агапов В.П., Васильев А.В.* Супер-элемент колонны прямоугольного сечения с геометрической нелинейностью// *Вестник МГСУ*. – 2013. – № 6. – С. 57-67.

11. *Агапов В.П.* Исследование прочности пространственных конструкций в линейной и нелинейной постановках с использованием вычислительного комплекса «ПРИНС»// *Пространственные конструкции зданий и сооружений (исследование, расчет, проектирование, применение)*: Сб. статей/ МОО «Пространственные конструкции», под ред. В.В. Шугаева и др. – М.: 2008. – Вып. 11. – С. 57-67.

#### References

1. *Samuel, S, Stevenson, B, Weeks E* (2008), *Advanced Simulation Using Nastran -NX5/NX6*, Design Visonaries Inc., 384 p.
2. *Basov, KA* (2005), *ANSYS: Reference Book*, Moscow: Izd-vo "DMK -Press", 637 p.
3. *Bathe, KJ, Wiener, PM* (1983), On Elastic-Plastic Analysis of I-Beams in Bending and Torsion, *Computers and Structures*, Vol. 17, 711-718.
4. *Khennane, A* (2013), *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus*, CRC Press, 487 p.
5. *Zienkiewicz, OC, Taylor, RL* (2005), *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Sixth edition, McGraw-Hill, 631 p.
6. *Bathe, KJ* (1996), *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Inc, 1037 p.
7. *Perel'muter, AV, Slivker, VI* (2007), *Designed Models of Erections and opportunity of their Analysis*, Moscow: Izd-vo AMK, 595 c.
8. *Agapov, VP, Vasiljev, AV* (2012), Modelling of columns of rectangular cross-section by volume elements with using of super-element technology, *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*, № 4. – С. 48-54.
9. *Agapov, VP, Vasiljev, AV* (2013), Super-element of column of rectangular cross-section with material non-linearity, *Vestnik MGSU*, № 5. – С. 34-39.
10. *Agapov, VP, Vasiljev, AV* (2013), Super-element of column of rectangular cross-section with geometrical non-linearity, *Vestnik MGSU*, № 6. – С. 50-56.
11. *Agapov, VP*(2008), Research of strength of spatial structures in linear and non-linear arrangements with using of computer complex "PRINS", *Prostr. Konstruktzii Zdanii i Soor.*, MOO "Prostranstv. Konstruktzii", Moscow, Vol. 11, 57-67.

### MODELLING OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS OF RECTANGULAR CROSS SECTION IN COMPUTER PROGRAM "PRINS"

V.P. Agapov, A.V. Vasiljev

The super-element of column with rectangular cross section, suggested by authors earlier for linear analysis of columns of homogeneous materials, was developed with the purpose of

reinforced concrete columns analysis. The element was implemented into a finite element program PRINS, and consisting of this program can be used for linear analysis of building structures containing the reinforced concrete columns.

KEY WORDS: building structures, reinforced concrete columns of a rectangular cross-section, finite element method, super-elements.

