

УДК 624.012.4:624.073

ББК 38.53

III-60

Шиляева Ольга Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель Ростовского государственного строительного университета, т.: 88632277562, e-mail: Lejla-25@mail.ru;

Хунагов Руслан Азметович, старший преподаватель ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет»;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПАНЕЛИ

(рецензирована)

В статье рассмотрена двухслойная железобетонная панель. Исследуется ее устойчивость. Учены нелинейные свойства материала и процесс трещинообразования. Приведены результаты численного расчета.

Ключевые слова: железобетон, анализ устойчивости, критическая сила, нелинейные свойства, метод конечных элементов.

Shilyaeva Olga Victorovna, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of Rostov State University of Civil Engineering, tel: 88632277562, e-mail: Lejla-25@mail.ru;

Khunagov Ruslan Azmetovich, senior lecturer of FSBEI HPE "Maikop State Technological University";

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Construction and General Professional Disciplines, FSBEI HPE "Maikop State Technological University".

FERRO-CONCRETE PANEL RESISTANCE MODELING

(reviewed)

The article describes a two-layer reinforced concrete panels. Its stability has been investigated. Nonlinear properties of the material and the process of cracking have been considered. The results of numerical calculation have been given.

Keywords: ferro-concrete, stability analysis, critical force, nonlinear properties, finite element method.

При проектировании конструкций из железобетона при наличии разнородных элементов, преднапряжений необходимо рассматривать его работу в условиях пространственного, сложного напряженного состояния. При этом реальное поведение материала бетона и железобетона характеризуется физической нелинейностью, неоднородностью свойств, в том числе различным поведением при растяжении-сжатии, старением, трещинообразованием и связанным с этим явлением увеличением объема или дилатации. Все перечисленное обусловило большое число теоретических моделей и подходов к описанию данного материала, достаточно подробный обзор которых можно найти в работах [1-3]. В последнее время при существенном развитии возможностей вычислительной техники наиболее перспективным является использование численных подходов на основе метода конечных элементов (МКЭ). Исторически, начиная с работы D. Ngo и A.C. Scordelis [4], где бетон и арматура моделировались конечными элементами с линейным поведением, большое внимание было уделено применению МКЭ в описании железобетона как упруго-пластического материала [5], при наличии трещин и трещинообразования [6-7]. Значительный интерес представляют исследования, в которых предлагается формулировка МКЭ с размазывание неоднородностей (арматуры, трещин) по сечению или полному объему тела, начатые в [8-10]. При этом получаемые матрицы жесткости элементов фактически соответствуют анизотропному поведению материала [2].

В настоящей работе в качестве пакета МКЭ анализа был выбран Ansys, представляющий для исследователя максимальные возможности по реализации указанные выше специфических свойств поведения железобетона, а также реализующий параметрическую оптимизацию конструкции.

2. Постановка задачи об устойчивости железобетонной панели

Рассматривается расчет устойчивости двухслойной железобетонной панели под действием сосредоточенной силы P , приложенной на верхней грани. Боковая поверхность панели свободна от напряжений, нижняя грань – закреплена. Контакт слоев панели предполагается жестким с требованием непрерывности векторов напряжений и перемещений при переходе через границу раздела слоев.

Пусть панель (рис. 1.а) описывается в декартовой системе координат в виде:

$$D = D_1 \cup D_2,$$

где $D_1 : \{(x, y, z), x \in (0, a), y \in (0, b), z \in (0, t_1)\}$, $D_2 : \{(x, y, z), x \in (0, a), y \in (0, b), z \in (t_1, t_2)\}$,

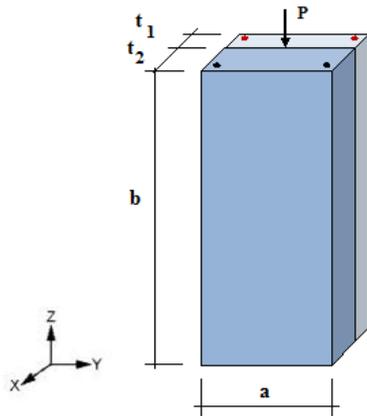
$$P = p \cdot \delta\left(x - \frac{a}{2}\right) \cdot \delta(z - t_1 - e_0), \quad e_0 - \text{эксцентриситет приложения нагрузки.}$$

Армирование является продольным по всей высоте панели с положением в сечении рис. 1б, защитный слой бетона – 30 мм.

Физические свойства материалов слоев железобетонной панели – различны и отражены в таблице 1.

Анализ устойчивости используется как для определения уровня критической нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость, так и для выяснения, сохраняет ли конструкция устойчивость при заданном уровне нагрузки.

а)



б)

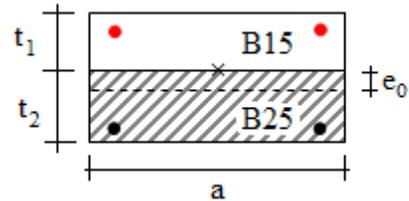


Рис. 1 – Геометрические параметры исследуемой конструкции

Таблица 1 - Физические свойства материалов

	Бетон	Арматура
Слой толщиной t_1	B15	A800, d=12 мм
Слой толщиной t_2	B25	A800, d=12 мм

Под устойчивостью панели предполагается неограниченное увеличение деформации панели в процессе возможного пластического течения или трещинообразования в бетоне. Нелинейные свойства бетона описываются трехлинейной диаграммой зависимости σ – ϵ (табл. 2) в соответствии с рекомендациями [11].

Таблица 2 - Свойства материала

Номер материала	Тип элемента	Свойства материала		
		EX, МПа	PRXY	
1	LINK8 (A800)	<i>Linear Isotropic</i>		
		EX, МПа	1.9E5	
		PRXY	0.3	
2	SOLID65 (B15)	<i>Linear Isotropic</i>		
		EX, МПа	24E3	
		PRXY	0.3	
		<i>MultiLinear Isotropic</i>		
			Strain	Stress, МПа
		<i>Point 1</i>	0.0	0
		<i>Point 2</i>	0.325E-3	7.8
<i>Point 3</i>	2.0E-3	13.0		
<i>Point 4</i>	3.5E-3	13.0		

Номер материала	Тип элемента	Свойства материала		
3	SOLID65 (B25)	<i>Linear Isotropic</i>		
		EХ, МПа	30E3	
		PRXY	0.3	
		<i>MultiLinear Isotropic</i>		
			Strain	Stress, МПа
		<i>Point 1</i>	0.0	0
		<i>Point 2</i>	0.37E-3	11.1
		<i>Point 3</i>	2.0E-3	18.5
	<i>Point 4</i>	3.5E-3	18.5	

В программе Ansys существует возможность выполнять два типа анализа устойчивости: в линейной и нелинейной постановке.

При выполнении линейного анализа устойчивости решается задача на собственные значения. В такой формулировке определяются значения масштабных факторов для матрицы эффективной жесткости, при которых компенсируется влияние матрицы жесткости системы. Разрешающее уравнение для линейного подхода имеет следующий вид:

$$([K] - \lambda[S])\{u\} = 0, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости конструкции; $[S]$ – матрица эффективной жесткости; λ – собственное значение (масштабный фактор); $\{u\}$ – собственный вектор, определяющий форму выпучивания.

В нашем случае использован нелинейный подход, позволяющий учесть нелинейности любого рода и несовершенства системы. Это приводит к снижению критических нагрузок.

В случае нелинейного анализа устойчивости программа Ansys корректирует ориентацию элементов конструкции, используя комбинированный способ решения на основе метода Ньютона-Рафсона в сочетании с техникой корректирующих дуг Рикса. Подход, использующий процедуру последовательных приближений Ньютона-Рафсона, приводит к следующему соотношению, справедливому для некоторой равновесной итерации:

$$[K]_{i-1} \{\Delta u\}_i = \{F\} - \{F^{el}\}_{i-1}, \quad (2)$$

где $[K]_{i-1}$ – матрица жесткости на предыдущей итерации; $\{\Delta u\}_i$ – вектор, компонентами которого являются приращения перемещений двух последовательных итераций $\{u\}_i = \{u\}_{i-1} + \{\Delta u\}_i$; $\{u\}_i$ – вектор перемещений, относящихся к текущей итерации; $\{F\}$ – вектор приложенных к системе сил; $\{F^{el}\}_{i-1}$ – вектор упругих сил, соответствующих перемещениям предыдущей итерации с номером $(i-1)$.

В программе Ansys нелинейный анализ устойчивости выполняется за счет постоянного контроля за поведением приращений Δu в итерационном процессе. Обычно при решении задач с учетом больших смещений факт уменьшения прироста перемещений между итерациями свидетельствует о достижении системой стабильного, устойчивого состояния. Однако если конструкция нагружена выше критического уровня, то приращения Δu будут расти от итерации к итерации (т.е. решение расходится). Критической нагрузкой (нагрузкой, соответствующей потере устойчивости) является тот ее уровень, при котором решение начинает расходиться.

3. Переход к конечно-элементной модели исследуемой конструкции

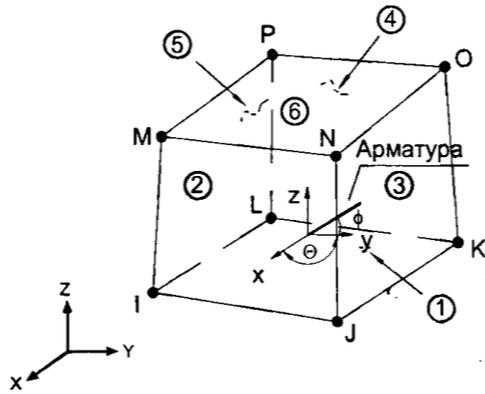
При моделировании конструкции в программном комплексе ANSYS бетон представлен объемными конечными элементами типа SOLID65, армирование панелей моделировалось линейными конечными элементами типа LINK8.

Для моделирования бетона в среде ANSYS принята комбинация двух материалов: Linear Isotropic и Multilinear Isotropic. Материал Linear Isotropic предназначен для задания начального модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона. Материал Multilinear Isotropic предназначен для задания криволинейной диаграммы мультилинейной аппроксимацией.

Для моделирования арматурной стали в среде ANSYS принят материал Linear Isotropic предназначенный, так же как и при моделировании бетона, для задания начального модуля упругости и коэффициента Пуассона арматурной стали.

Трехмерный объемный элемент железобетона SOLID65 (рис. 2а), определяется восьмью узлами с тремя поступательными степенями свободы в каждом узле $\{U_x, U_y, U_z\}$. Он используется для трехмерного моделирования объемных тел, имеющих или не имеющих арматуру. Самой важной особенностью этого элемента является использование нелинейных свойств материала и учет трещиностойкости.

а)



б)

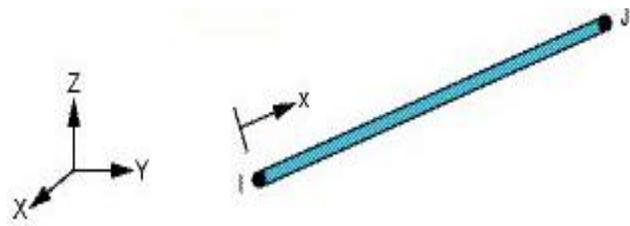


Рис. 2 – Геометрия элемента: а) SOLID65; б) LINK8

Трехмерный стержневой элемент LINK8 (рис. 2б) определяется 2-мя узлами и тремя степенями свободы в каждом узле $\{U_x, U_y, U_z\}$. Как стержневой элемент он не имеет свойств изгиба, но обладает свойствами пластичности.

В силу описанного выше процесса расходимости итерационного процесса поиска критической силы определяющим является выбор оптимального размера сетки конечных элементов. Для выбора размера сетки использовано два критерия. Первый критерий опирался на сравнении результатов по величине критической силы решения задачи о потере устойчивости в линейной постановке для рассматриваемой пространственной конструкции и моделей на основе стержневой теории и теории тонких плит. Второй основывался на выявлении сходимости результатов решения при статическом анализе исследования конструкции с уменьшением размеров сетки.

В результате применения обоих критериев выбраны оптимальные размеры сетки, обусловившие следующие общие параметры модели (табл. 3).

Таблица 3 - Общие параметры модели

Общее число узлов	27552
Общее число элементов	24624

Характер разбиения области конечными элементами приведен на рис. 3.

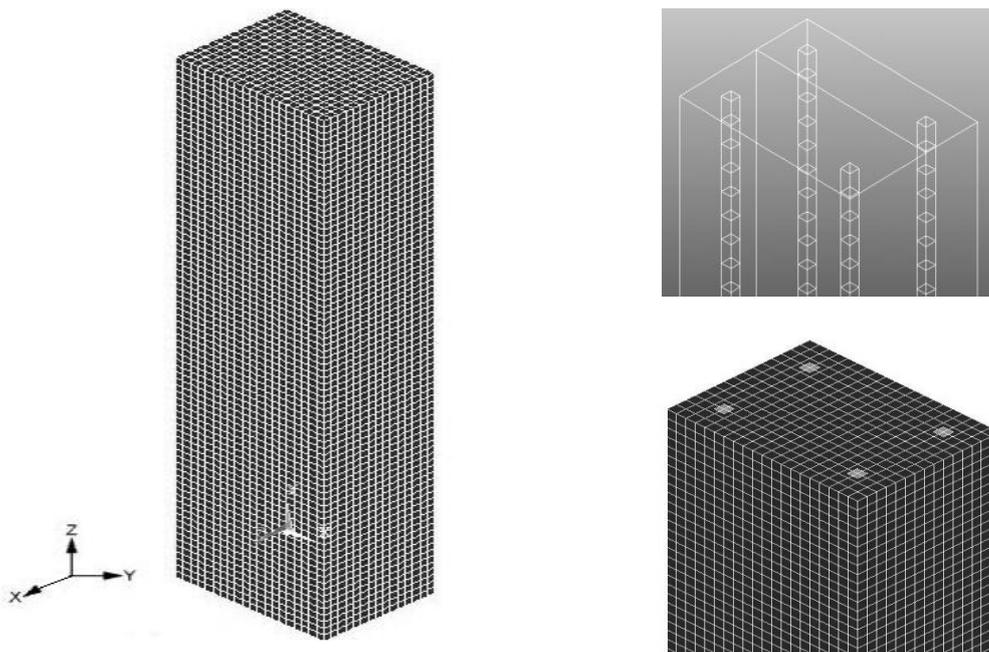


Рис. 3 – Конечно-элементная модель исследуемой конструкции

4. Анализ полученных результатов

Программа Ansys позволяет провести анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при фиксированном нагружении, а также осуществить параметрическую оптимизацию конструкции в пространстве параметров состояния $\{a, b, t_1, t_2, e_0\}$ по определению критического усилия.

На рис.4 приведена зависимость критической силы от высоты исследуемой конструкции, на котором виден ее монотонно-убывающий характер с ростом высоты. Влияние различной толщины слоев железобетонной панели на величину критической силы показано на рисунке 5.

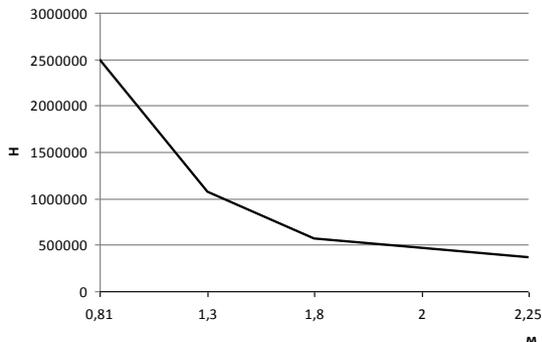


Рис. 4 – Зависимость критической силы от высоты конструкции

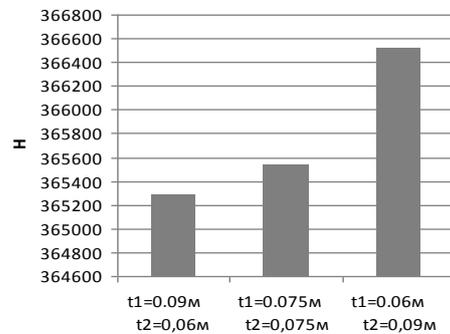


Рис. 5 – Зависимость критической силы от толщины слоев железобетонной панели

Литература:

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
2. Клованич С.Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций. Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. 89 с.
3. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и евростандарты. СПб., 2008. 211 с.
4. Ngo D., Scordelis A.C. Finite element analysis of reinforced concrete beams // Journal of ACI. 1967. Vol. 64, №3. P. 152-163.
5. Suidan M.T., Schnobrich W.C. Finite element analysis of reinforced concrete // Journal of the structural division. 1973. Vol. 99. P. 2109-2122.
6. Franklin H.A. Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Frames and Panels // Division of Structural Engineering and Structural Mechanics. University of California Berkeley. 1970. 140 p.
7. Nayak G.C., Zienkiewicz O.C. Elasto-Plastic stress analysis // International journal of numerical methods in engineering. 1972. Vol. 5. P. 113-135.
8. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И. Работа железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // Строительная механика и расчет сооружений. 1965. №2. С. 20-23.
9. Rashid Y.R. Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels // Nuclear Engineering and Design. 1968. Vol. 7, №4. P. 334-344.
10. Мурашев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. М.: Машстройиздат, 1958. 268 с.
11. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры: СП52-101-2003: введ в действие с 01.03.2004. М., 2004.

References:

1. Karpenko N.I. General models of mechanics of reinforced concrete. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p.
2. Klovanych S.F., Bezushko D.I. The finite element method in nonlinear analysis of spatial concrete constructions. Odessa: ONMU Publishing, 2009. 89 p.
3. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. Theory of calculation of reinforced concrete structures for strength and stability. Modern standards and European standards. St. Ptb., 2008. 211 p.
4. Ngo D., Scordelis A.C. Finite element analysis of reinforced concrete beams // Journal of ACI. 1967. Vol. 64, №3. P. 152-163.
5. Suidan M.T., Schnobrich W.C. Finite element analysis of reinforced concrete // Journal of the structural division. ASCE, 1973. Vol 99. P. 2109-2122.
6. Franklin H.A. Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Frames and Panels. Division of Structural Engineering and Structural Mechanics: University of California. Berkeley, 1970. 140 p.

7. Nayak G.C., Zienkiewicz O.C. *Elasto-Plastic stress analysis // International journal of numerical methods in engineering.* 1972. Vol. 5. P. 113-135.
8. Gvozdev A.A., Karpenko N.I. *Work of ferro-concrete with cracks in the flat stress condition // Structural Mechanics and calculation of structures.* 1965. №2. P. 20 - 23.
9. Rashid Y.R. *Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels / / Nuclear Engineering and Design.* 1968 Vol. 7. №4. P. 334-344.
10. Murashev V.I. *Fracture toughness, hardness and strength of concrete.* M.: Mashstroyizdat, 1958. 268 p.
11. *Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement: SP52-101-2003: introd. since 01.03.2004.* M., 2004.