

05.23.17 СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Моделирование нелинейной работы бетона монолитной плиты перекрытия методом конечных элементов

УДК 624.04

Кравченко Г.М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

Труфанова Е.В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Шеремет В.Ю.

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: victoria95s@mail.ru

Шарап А.В.

Магистрант кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: mad.alina.sazonova@yandex.ru

Статья получена: 12.07.2019. Рассмотрена: 23.10.2019. Одобрена: 01.11.2019. Опубликовано онлайн: 26.11.2019. ©РИОР

Аннотация. В статье рассмотрено моделирование нелинейной работы материала плиты перекрытия монолитного каркасного здания. Исследовано два закона деформации материалов при расчете методом конечных элементов. Анализ влияния законов деформирования на прогибы плиты перекрытия, главных напряжений и схем разрушения плиты перекрытия по слоям позволил дать рекомендации по учету нелинейных свойств материалов при выполнении прочностных расчетов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, физическая нелинейность, закон деформирования материала, экспоненциальная зависимость, напряженно-деформированное состояние.

При проектировании современных зданий и сооружений необходимо учитывать не только требования безопасности, но и экономичности. Один из вариантов снижения расхода материалов и повышения надежности конструктивных

MODELING THE NONLINEAR WORK OF CONCRETE OF A MONOLITHIC FLOOR SLAB USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: Galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Viktoriya Sheremet

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: victoria95s@mail.ru

Alina Sharap

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: mad.alina.sazonova@yandex.ru

Manuscript received: 12.07.2019. **Revised:** 23.10.2019. **Accepted:** 01.11.2019. **Published online:** 26.11.2019. ©РИОР

Abstract. The article discusses the modeling of the nonlinear work of the material of the floor slab of a monolithic frame building. Two laws of the deformation of materials in the calculation by the finite element method are investigated. An analysis of the influence of the laws of deformation on the deflections of the floor slab, the main stresses and the destruction schemes of the floor slab by layers allowed us to give recommendations on the consideration of the nonlinear properties of materials when performing strength calculations.

Keywords: finite element method, physical nonlinearity, material deformation law, exponential dependence, stress-strain state.

решений проектируемого объекта соответствует использованию точных методов оценки напряженно-деформированного состояния, учитывая специфические свойства железобетона, таких как трещинообразование, пластические деформации бетона и арматуры.

Развитию методов нелинейных расчета конструкций посвящено достаточное количество теоретических и экспериментальных работ [1–5]. Но при этом нет единой методики расчета конструкций, с помощью которой можно оценить их напряженно-деформированное состояние на всех этапах нагружения вплоть до стадии разрушения.

Конечные элементы тонких пластин используют для прочностного расчета с учетом физической нелинейности материала [6–7]. Элементы матрицы жесткости конечного элемента определяют по форме:

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} ([E]\{\varepsilon_i\})^T \{\varepsilon_i\} d\Omega,$$

где Ω — область конечного элемента;

$[E]$ — матрица интегральных жесткостей k -го шага;

$\{\varepsilon\}$ — вектор деформаций.

В нелинейных расчетах применяется шагово-итерационный метод с расчетом новых значений модуля Юнга и приведенного коэффициента Пуассона по выбранному пользователем закону деформирования материала на основании определенной в данной точке обобщенной деформации.

Для зависимости, показанной на рис. 1, *a*, задается предельное значение деформации и коэффициента запаса по обобщенному напряжению вручную. Экспоненциальная зависимость может применяться для основного и армирующего материала конструкции и формируется автоматически в программном комплексе (рис. 1, *b*).

Выполнено исследование влияния законов деформации на прогибы монолитных плит перекрытия. Объектом исследования является двухэтажный монолитный железобетонный каркас здания начальной школы в г. Новочеркасск Ростовской области. Для анализа модели с учетом нелинейной работы материала рассмотре-

на плита перекрытия подвала. В соответствии с архитектурными решениями исследуемая плита нагружена массивными перегородками высотой 8,5 м. На площади исследуемой плиты расположены душевые комнаты, кабинеты, технические помещения с ограждением кирпичными перегородками.

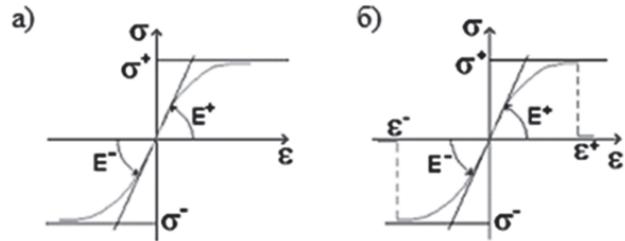


Рис. 1. Законы деформации материалов: *a*) значения характеристик задаются вручную; *b*) автоматически в программном комплексе

Расчетная модель разработана по плитно-стрельневой схеме в программном комплексе Лира-САПР. Граничные условия соответствуют закреплению стен и колонн по направлениям степеней свободы (рис. 2) [8; 9].

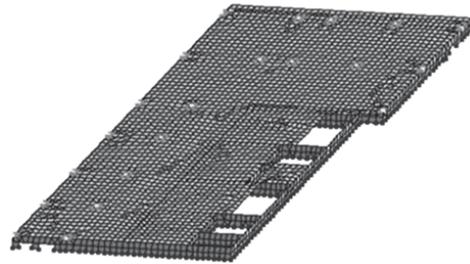


Рис. 2. Конечно-элементная модель плиты перекрытия подвала

Плита перекрытия моделируется конечными элементами с шестью степенями свободы в узле. При определении напряженно-деформированного состояния конструкций железобетонная оболочка рассматривается как система с изотропным физически нелинейным материалом бетона [10].

Рассмотрены два варианта экспоненциальных законов нелинейного деформирования материала плиты перекрытия (рис. 3).

В расчетной модели учтены нагрузки от собственного веса плиты перекрытия, полов, перегородок, ограждающих стен, а также нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации здания.

Для моделирования нелинейного нагружения использован шаговый метод.

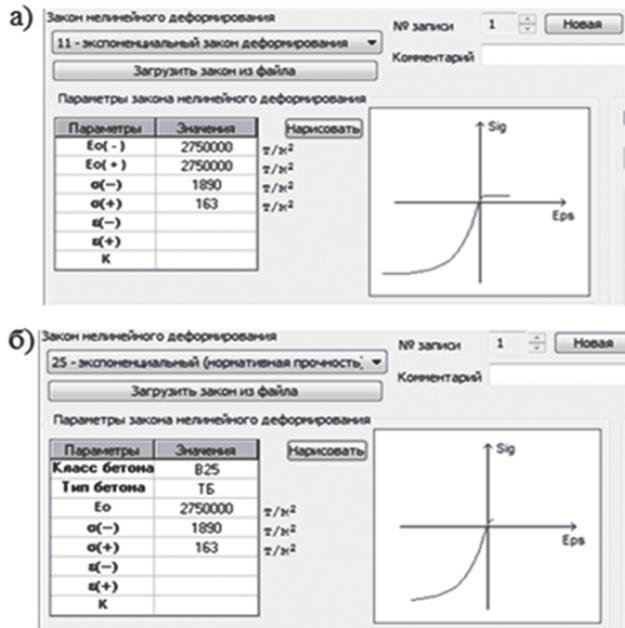


Рис. 3. Законы нелинейного деформирования бетона B25: а) модель 1; б) модель 2

В результате расчета получено напряженно-деформированное состояние плиты перекрытия. Максимальный прогиб в зоне концентрации напряжений кирпичных перегородок по первой расчетной модели составляет 8 мм, по второй — 12 мм (рис. 4).

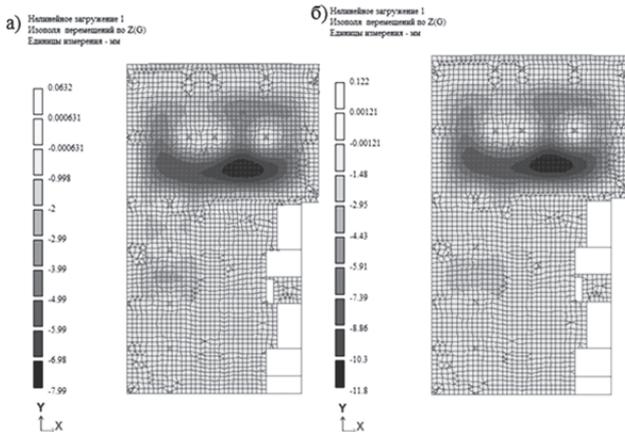


Рис. 4. Прогибы плиты перекрытия: а) модель 1; б) модель 2

Анализ результатов показал, что при использовании закона экспоненциальной зависимости для железобетона (модель 2) прогибы плиты перекрытия увеличились на 48% по сравнению

с прогибами, полученными по первой расчетной модели.

Выполнено исследование картины разрушений по верхнему и нижнему слою плиты перекрытия. На рис. 5 и 6 показаны направления развития трещин на фоне изополей главных напряжений.

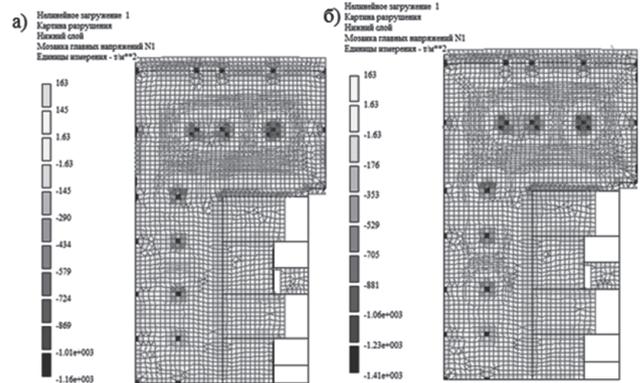


Рис. 5. Разрушений бетона по верхнему слою: а) модель 1; б) модель 2

Концентрация напряжений соответствует расположению массивных кирпичных перегородок, усиленных армирующей сеткой и металлическими стойками.

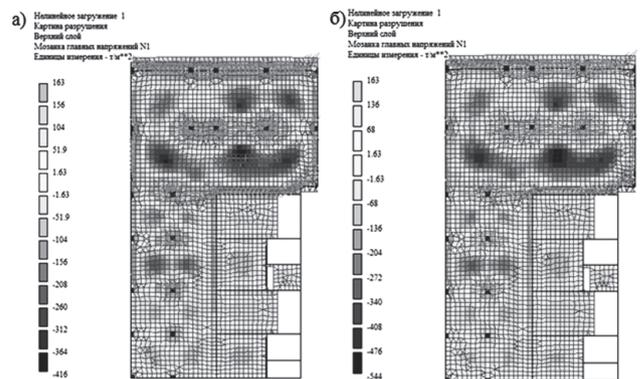


Рис. 6. Разрушений бетона по нижнему слою: а) модель 1; б) модель 2

Картина разрушения бетона по верхнему слою соответствует расположению несущих конструкций каркаса здания. Предельное состояние наступает в нижних слоях бетона, не доводя конструкцию до разрушения. Ширина раскрытия трещин соответствует нормативным значениям.

Анализ изолиний главных напряжений позволяет сделать вывод, что напряжения в верхнем слое одинаковы для первого и второго варианта расчетных моделей. Напряжения в ниж-

нем слое плиты перекрытия по второй схеме увеличились на 31% при автоматическом учете нелинейных свойств бетона.

Площадь развития трещин в зоне расположения массивных перегородок по верхнему слою больше при расчете по второй модели. Раскрытие трещин нижнего слоя бетона плиты перекрытия больше по первой модели и не превышает предельных значений.

По результатам исследования можно сделать вывод, что при расчете прогибов и напряжений монолитных железобетонных плит перекрытий достаточно использовать экспоненциальную зависимость, задаваемую программой автоматически. При определении картины разрушений по слоям рекомендуется выполнять расчет с использованием нескольких законов деформирования материалов.

Литература

1. *Гениев Г.А.* Теория пластичности бетона и железобетона [Текст] / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. — М.: Стройиздат, 1974. — С. 316.
2. *Лейтес Е.С.* К уточнению одного из условий прочности бетона. Поведение бетонов и элементов железобетонных конструкций при воздействии различной длительности [Текст] / Е.С. Лейтес. — М.: НИИЖБ, 1980. — С. 37–40.
3. *Яшин А.В.* Критерий прочности и деформирования бетона при простом нагружении для различных видов напряженных состояний / Расчет и конструирование железобетонных конструкций [Текст] / А.В. Яшин. — М.: Стройиздат, 1977. — С. 48–57.
4. *Муртазалиев Г.М.* Алгоритм расчета нелинейного поведения тонкостенных систем [Текст] / Г.М. Муртазалиев, М.М. Пайзулаев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2019. — № 46 (2). — С. 176–184.
5. *Агаханов Э.К.* Реализация метода кинематической декомпозиции для расчетов в нелинейной постановке [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Л.Н. Панасюк, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2014. — № 35 (4). — С. 14–19.
6. *Савостьянов В.Н.* Об эквивалентности воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела [Текст] / В.Н. Савостьянов, Э.К. Агаханов // Изв. вузов. Строительство. — 1995. — № 10. — С. 26–30.
7. *Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Султанова Л.М., Хизриева З.А.* Conditions of equivalence of effects for the solid body from incompressible material. MATEC Web of Conferences. 196, 01031 (2018). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601031> XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering.
8. *Кравченко Г.М.* Расчет здания общежития технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) с применением различных моделей основания [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Д.И. Назаренко, Э.Р. Шарипов // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3. — С. 112.
9. *Кравченко Г.М.* Исследование неравномерной осадки основания спортивно-оздоровительного комплекса технопарка РГСУ методом конечных элементов [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.А. Думбай, Ю.А. Камеш // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1. — С. 42.
10. *Панасюк Л.Н.* О точности определения напряженно-деформированного состояния и конструктивных параметров в областях с особенностями [Текст] / Л.Н. Панасюк, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Интернет-журнал «Науковедение». — 2013. — № 3. — С. 101.

References

1. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. *Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona* [The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Strojizdat Publ., 1974, p. 316.
2. Leites E.S. *K utocnениyu odnogo iz uslovij prochnosti betona. Povedenie betonov i elementov zhelezobetonnih konstrukcij pri vozdejstvii razlichnoj dlitel'nosti* [To clarify one of the conditions of concrete strength. Behavior of concrete and reinforced concrete structures when exposed to different durations]. Moscow: NIIZhB Publ., 1980, pp. 37–40.
3. Yashin A.V. *Kriterij prochnosti i deformirovaniya betona pri prostom nagruzhении dlya razlichnyh vidov napryazhennyh sostoyanij* [The criterion of strength and deformation of concrete under simple loading for various types of stress conditions]. *Raschet i konstruirovaniye zhelezobetonnih konstrukcij* [Calculation and design of reinforced concrete structures]. Moscow: Strojizdat Publ., 1977, pp. 48–57.
4. Murtagaliev G.M., Pajzulaev M.M. *Algoritm rascheta nelinejnogo povedeniya tonkostennyh system* [Algorithm for calculating the nonlinear behavior of thin-walled systems]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2019. I. 46(2), pp. 176–184.
5. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Panasyuk L.N., Trufanova E.V. *Realizaciya metoda kinematischej dekompozicii dlya raschetov v nelinejnoj postanovke* [Implementation of the kinematic decomposition method for calculations in a nonlinear setting]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2014. I. 35(4), pp. 14–19.
6. Savost'yanov V.N., Agahanov E.K. *Ob ekvivalentnosti vozdejstvij v staticheskoj zadache mekhaniki deformiruемого tverdogo tela* [On the equivalence of actions in the static problem of the mechanics of a deformable solid]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo* [Izv. Universities. Construction]. 1995, I. 10, pp. 26–30.
7. Agahanov E.K., Agahanov M.K., Sultanova L.M., Hizrieva Z.A. *Conditions of equivalence of effects for the solid body from incompressible material*. MATEC Web of Conferences. 196, 01031 (2018). Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819601031> XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering.

8. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Nazarenko D.I., Shari-pov E.R. Raschet zdaniya obshchezhitiya tekhnoparka Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta (RGSU) s primeneniem razlichnyh modelej osnovaniya [Calculation of the hostel building of the Technopark of the Rostov State University of Civil Engineering (RGSU) using various foundation models]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Don Engineering Journal]. 2015, I. 3, p. 112.
9. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Dumbaj V.A., Kamesh Yu.A. Issledovanie neravnomernej osadki osnovaniya sportivno-ozdorovitel'nogo kompleksa tekhnoparka RGSU metodom konechnykh elementov [Investigation of uneven settlement of the foundation of the sports and recreation complex of the RSSU technopark by the finite element method]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Don Engineering Journal]. 2016, I. 1, p. 42.
10. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. O tochnosti opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i konstruktivnykh parametrov v oblastiakh s osobennostyami [On the accuracy of determining the stress-strain state and structural parameters in areas with features]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet Journal of Science]. 2013, I. 3, p. 101.