

А.Н. МАМИН^{1,2}, А.А. БАММАТОВ², Н.С. ГОРДЕЕВ²¹АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕТЛЕВЫМИ СТЫКАМИ АРМАТУРЫ

Аннотация. В статье описана постановка задачи исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных монолитных конструкций с петлевыми стыками арматуры с применением метода конечных элементов. Представлен краткий обзор модели пластического повреждаемого бетона *concrete damaged plasticity*, описание основных ее параметров и их подбора на примерах задачи верификации математической модели материала результатами натурных испытаний бетонной призмы и балки с петлевым стыком над статической нагрузкой.

Представлено подробное описание параметров модели, диаграмм состояния бетона и арматуры, включая графики напряжения-деформации с учетом особенностей моделей, а также даны графики сопоставления экспериментального и численного исследования бетонной призмы и изгибаемой железобетонной балки с петлевым стыком, включающей помимо модели бетона, и модель арматуры.

В результате расчетов получены максимальные напряжения в арматуре 514 МПа, близкие к полученным в результате натурального эксперимента 550 МПа (рисунок 8). Величина прогиба при достижении разрушающей нагрузки в эксперименте составил 16.7 мм, в КЭ модели 18,07 мм.

Ключевые слова: петлевой стык арматуры, *concrete damaged plasticity*, диаграмма деформирования бетона, испытания статической нагрузкой, бетонная призма, изгибаемая железобетонная балка.

A.N. MAMIN^{1,2}, A.A. BAMMATOV², N.S. GORDEEV²¹AO «CNIIPromzdaniy», Moscow, Russia²Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURES WITH LOOP JOINTS OF REBAR

Abstract. The article describes the statement of a problem of research of the stress-strain state of reinforced concrete monolithic structures with loop joints of rebar using the finite element method. A review of plastic damaged concrete model, a description of its basic parameters and their selection by the example of the problem of verification of mathematical material model by the results of full-scale tests of concrete prism and beam with a loop joint over a static load have been presented.

The detailed description of the model parameters, diagrams of concrete and reinforcement state, including stress-strain diagrams with regard to the models features, as well as graphs comparing the experimental and numerical research of a concrete prism and a bendable reinforced concrete beam with a loop joint, including a model of concrete, and reinforcement model are presented.

The results of numerical calculations obtained stresses in the reinforcement of 514 MPa, which is close to those resulting from the full-scale experiment of 550 MPa (Fig. 8). The value of deflection when the failure load in the experiment was 16.7 mm, in the FE model it was 18.07 mm.

Keywords: loop joint of rebar, concrete damaged plasticity, concrete deformation diagram, static load tests, concrete prism, flexural reinforced concrete beam.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бамматов А.А. и др. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6. С. 4-11.
2. Силантьев А.С. Расчет прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов методом конечных элементов в КЭ-комплексах Ansys и Abaqus // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 2. С. 49-52.
3. Крылов А.С. Численные расчеты сталежелезобетонных балок с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 2. С. 175-184.
4. Krylov S. B. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks [Электронный ресурс] / S.B. Krylov, V.I. Travush, D.V. Konin, A.S. Krylov // *IOP Conference Series. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1–8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456.
5. Квасников А.А. Методика расчета взаимодействия бетона и арматуры железобетонных конструкций в программном комплексе Abaqus // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2019. №1. С. 65-70
6. Силантьев А.С., Лучкин Е.А. Моделирование стыка круглой колонны с плоской плитой с использованием комплекса" Abaqus" // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 10. С. 74-80.
7. Rahman R., Akbar I., Rofriantona R. 3D Finite Element Model for Shear-dominant Failure of Reinforced Concrete Beams // *Journal of Applied Materials and Technology*. 2021. Т. 3. № 1. С. 12-21.
8. Cervenka V. et al. Prediction of shear failure of large beams based on fracture mechanics // *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanis of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9, Prague, Czech Republic*. 2016. Т. 29.
9. Cervenka V., Dolezel J., Novak D. Shear failure of large lightly reinforced concrete beams. Part II– Assessment of global safety of resistance // *The 3rd International congress of the international federation for structural concrete (fib), Washington, DC, USA*. 2010.
10. Jendele L., Cervenka J. Finite element modelling of reinforcement with bond // *Computers & structures*. 2006. Т. 84. № 28. С. 1780-1791.
11. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS // *Engineering structures*. 2015. Т. 98. С. 38-48.
12. Байбурин А.Х. Раннее нагружение монолитных железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 2. № 2. С. 13–21.
13. Abaqus Documentation. Abaqus Analysis User's manual. Materials. Other plasticity models. Concrete.
14. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // *Cement and concrete research*. 1976. Т. 6. № 6. С. 773-781.
15. Lee J., Fenves G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // *Journal of engineering mechanics*. 1998. Т. 124. № 8. С. 892-900.
16. Lubliner J. et al. A plastic-damage model for concrete // *International Journal of solids and structures*. 1989. Т. 25. № 3. С. 299-326.
17. Wahalathantri B. et al. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS // *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing. – Queensland University of Technology, 2011. С. 260-264.*
18. Chaudhari S.V., Chakrabarti M. A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS // *International Journal of Computer Applications*. 2012. Т. 44. № 7. С. 14-18.
19. Hafezolghorani M. et al. Simplified damage plasticity model for concrete // *Structural Engineering International*. 2017. Т. 27. № 1. С. 68-78.
20. Николаев В.Б. и др. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций АЭС с модифицированными петлевыми стыками на крупномасштабных железобетонных моделях балочного типа // *Безопасность энергетических сооружений*. 2016. № 1. С. 66-81.
21. Николаев В.Б., Рубин О.Д., Селезнев С.В.. Расчет прочности и конструирование петлевых стыков сборных элементов // *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 38-40.
22. Климов Е.А., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета индустриальных бесшовных петлевых стыков арматуры железобетонных конструкций ГЭС и АЭС по предельным состояниям // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 5. С. 3-10.

REFERENCES

1. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bammatov A.A. et al. Loop Joints of Bar Reinforcement. The History of Development, Problems and Relevance // Construction and Reconstruction. 2022. No. 6. Pp. 4-11.
2. Silantiev A.C. Calculation of the Strength of Inclined Sections of Bending Reinforced Concrete Elements by Finite Element Method in Ansys and Abaqus Complexes // Industrial and Civil Engineering. 2012. No. 2. Pp. 49-52.
3. Krylov A.S. Numerical calculations of steel reinforced concrete beams taking into account the contact interaction of the steel core with concrete / A. S. Krylov // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. T. 21. No. 2. Pp. 175-184.
4. Krylov S.B. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks [Electronic resource] / S.B. Krylov, V.I. Travush, D.V. Konin, A.S. Krylov // IOP Conference Series. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1-8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456.
5. Kvasnikov A.A. Method of calculation of interaction of concrete and reinforcement of reinforced concrete structures in the software package Abaqus // Building Mechanics and Calculation of Structures. 2019. No. 1. Pp. 65-70
6. Silantiev A.S., Luchkin E.A. Modeling the joint of a round column with a flat plate using the complex "Abaqus" // Industrial and Civil Engineering. 2018. No. 10. Pp.74-80.
7. Rahman R., Akbar I., Rofriantona R. 3D Finite Element Model for Shear-dominant Failure of Reinforced Concrete Beams //Journal of Applied Materials and Technology. 2021. T. 3. No. 1. Pp. 12-21.
8. Cervenka V. et al. Prediction of shear failure of large beams based on fracture mechanics //Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanis of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9, Prague, Czech Republic. 2016. T. 29.
9. Cervenka V., Dolezel J., Novak D. Shear failure of large lightly reinforced concrete beams. Part II– Assessment of global safety of resistance // The 3rd International congress of the international federation for structural concrete (fib), Washington, DC, USA. 2010.
10. Jendele L., Cervenka J. Finite element modelling of reinforcement with bond //Computers & structures. 2006. T. 84. No. 28. Pp. 1780-1791.
11. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS // Engineering structures. 2015. T. 98. Pp. 38-48.
12. Bayburin A.Kh. Early loading of monolithic reinforced concrete structures // Reinforced Concrete Structures. 2023. T. 2. No. 2. Pp.13-21.
13. Abaqus Documentation. Abaqus Analysis User's manual. Materials. Other plasticity models. Concrete.
14. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and concrete research. 1976. T. 6. No. 6. Pp.773-781.
15. Lee J., Fenves G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // Journal of engineering mechanics. 1998. T. 124. No. 8. Pp. 892-900.
16. Lubliner J. et al. A plastic-damage model for concrete //International Journal of solids and structures. 1989. T. 25. No. 3. Pp. 299-326.
17. Wahalathantri B. et al. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS // Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing. – Queensland University of Technology, 2011. Pp. 260-264.
18. Chaudhari S. V., Chakrabarti M. A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS // International Journal of Computer Applications. 2012. T. 44. No. 7. Pp. 14-18.
19. Hafezolghorani M. et al. Simplified damage plasticity model for concrete //Structural Engineering International. 2017. T. 27. No. 1. Pp. 68-78.
20. Nikolaev V.B. et al. Experimental Investigations of Reinforced Concrete Structures of NPPs with Modified Loop Joints on Large-Scale Reinforced Concrete Beam Models // Bezopasnost energeticheskikh sooruzheniy. 2016. No. 1. Pp.66-81 (in Russian).
21. Nikolaev V.B., Rubin O.D., Seleznev S.V.. Calculation of Strength and Design of Loop Joints of Prefabricated Elements // Beton i jelozobeton. 1987. No. 1 Pp. 38-40. (in Russian).
22. Klimov E.A., Nikolaev V.B. Improvement of calculation methods of industrial non-welded loop joints of reinforcement of reinforced concrete structures of HPP and NPP on the limiting states // Stroitel'naya mekhanika i inzhenernih konstruksii i sooruzheniy. 2016. No. 5. (in Russian).

Информация об авторах:

Мамин Александр Николаевич

АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, начальник отдела обследований зданий и сооружений.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

профессор кафедры Железобетонные и каменные конструкции.

E-mail: otozs@yandex.ru

Бамматов Арслан Асельдерович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва Россия,

аспирант кафедры Железобетонные и каменные конструкции.

E-mail: a.bammatof@yandex.ru

Гордеев Никита Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва Россия,

студент.

E-mail: gordey1999@list.ru

Information about authors:

Mamin Aleksandr N.

АО «CNIIPromzdaniy», Moscow, Russia,

doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of Surveys of Buildings and Structures.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,

professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: otozs@yandex.ru

Bammatov Arslan As.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,

postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: a.bammatof@yandex.ru

Gordeev Nikita S.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,

student.

E-mail: gordey1999@list.ru