

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 натурного 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. GORDEEV²¹АО «ЦНИИПромзданий», 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.

Введение

Применение петлевых стыков стержневой арматуры в монолитных железобетонных конструкциях является одним из перспективных методов стыковки арматурных стержней без применения сварки или механических приспособлений [1]. Такой тип соединений обладает большей универсальностью на этапе строительно-монтажных и проектных работ, так как для него нет требований по строгой соосности стыкуемых стержней, как в сварных и муфтовых соединениях, и его использование не приводит к перерасходу арматуры, как при соединениях внахлест. Однако остается открытым вопрос оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), прежде всего, бетонного ядра при различных вариациях стыка.

Как отмечено в [1], несмотря на имеющиеся результаты испытаний для более широкого применения петлевых соединений при возведении монолитных зданий только физических экспериментов недостаточно. Во-первых, невозможно физически испытать все разнообразные варианты стыкуемых элементов. Во-вторых, исследуемые участки стыка расположены глубоко в теле бетона, и наблюдение за ними при натурных испытаниях крайне затруднено.

Отметим также сложность аналитического описания НДС бетона ядра в условиях многоосного напряженного состояния, но как показывают результаты исследований ряда авторов [2-11 и др.], современные математические модели материалов, реализованные в методе конечных элементов, позволяют оценить напряжения и деформации как в конструкции в целом, так и в отдельных ее областях.

Также следует отметить, что проблема численного моделирования железобетонных конструкций достаточно объемна и не имеет на сегодняшний день единственного общепринятого решения. Ей посвящено множество работ как в России, так и за ее пределами. В отечественных работах проблема моделирования и сопоставления с результатами экспериментов, в том числе при численном описании эффектов кратковременной ползучести и раннего нагружения бетона, исследована, например, в [3-5,12]. Отметим также работы чешского коллектива [8-10], описывающие проблемы учета в КЭ моделях сцепления и работу бетона при действии поперечных сил и развитию при этом наклонных трещин.

Цель данной работы – на основе анализа результатов серий итерационных расчетов подобрать численные значения параметров модели пластически повреждаемого бетона с учетом, прежде всего, факторов сцепления с арматурой, многоосного НДС, кратковременной ползучести.

Описание модели материалов

Как правило, численное моделирование строительных конструкций начинается с выбора математической модели материала, способной описать реальные или приближенные к реальным исследуемые свойства. В данной статье рассмотрена так называемая модель пластически повреждаемого бетона Concrete Damaged Plasticity (CDP) [13-16].

Как и большинство современных моделей, CDP включает в себя ряд параметров, таких как угол дилатансии (*Dilation Angle*), отношение второго инварианта тензора напряжений на меридиане растяжения (K_c) и эксцентриситет потенциала потока (*Eccentricity*), от правильного назначения которых зависят результаты численного моделирования [13,17].

Модель CDP позволяет получить детальное напряженно-деформированное состояние в стадии разрушения бетона с учетом повреждений, реализуя модифицированную модель прочности основанную на критерии Друкера-Прагера [13,14], которую можно графически отобразить в виде трехмерной поверхности (см. рисунок 1).

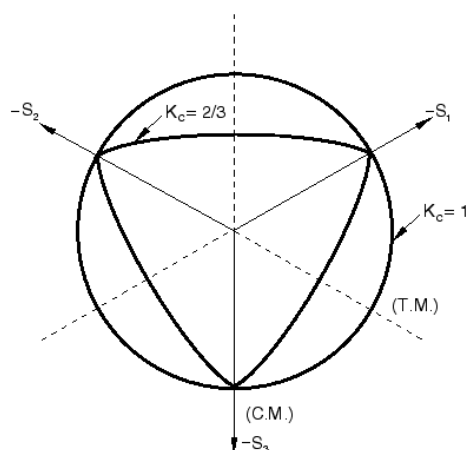


Рисунок 1 - Поверхность прочности при трехосном НДС

Функция, описывающая поверхность прочности имеет вид:

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\varepsilon}^{pl})\langle\hat{\sigma}_{max}\rangle - \gamma\langle-\hat{\sigma}_{max}\rangle) - \sigma_c(\hat{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (1)$$

Подробное описание функции представлено в [12].

Также, описанная модель позволяет учитывать возможность накопления повреждений на ветви разгрузки. Данный прием реализован путем использования коэффициентов повреждения бетона при сжатии (d_c) и растяжении (d_t) [13, 15, 16]. Диаграммы деформирования бетона в общем виде представлены на рисунке 2.

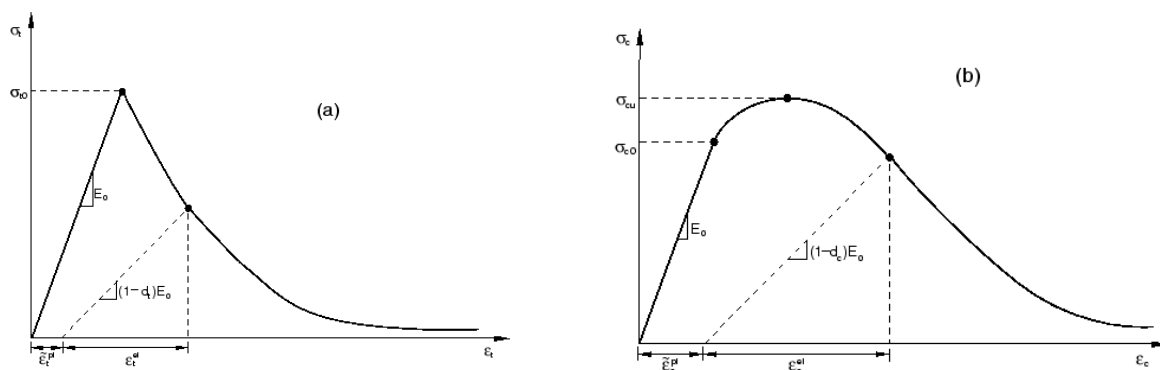


Рисунок 2 - Диаграммы деформирования бетона при одноосном растяжении (а) и сжатии (б)

Для моделирования арматуры использовались стержневые конечные элементы типа truss, физико-механические характеристики которых описаны моделью plastic, позволяющей описать одноосное напряженно-деформированное состояние стальной арматуры с учетом как упругой работы, так и зоны пластических деформаций.

Для верификации модели материала проводился ряд численных экспериментов по нагружению бетонной призмы 100x100x400 мм, выполненной из бетона В30. Численная модель разработана на основе материала CDP, на основе рекомендаций и опыта других авторов [13, 17-19].

Указанные далее в данной работе численные значения различных параметров модели являются результатом серий итерационных расчетов, выполненных в результате подбора и представлены читателям в их окончательном варианте. Основные параметры модели отображены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры модели CDP

<i>Dilation Angle</i>	<i>Eccentricity</i>	f_{b0}/f_{c0}	K_c	<i>Viscosityparameter</i>
31	0.1	1.16	0.667	0

Принятые зависимости напряжений от деформаций, а также коэффициенты повреждения бетона при растяжении и сжатии, используемые в верификационной задаче, представлены в таблице 2.

Принятые диаграммы деформирования, характерны наличием ниспадающей ветви как при сжатии, так и при растяжении. Если ниспадающая ветвь при сжатии описывает реальное поведение бетона и подтверждено результатами многочисленных экспериментов, то ниспадающая ветвь при растяжении является особенностью математической модели, косвенно учитывающая работу бетона между трещинами и сцепление бетона с арматурой. Необходимость такого приема связана с тем, что размер конечного элемента гораздо больше ширины раскрытой трещины и выключение из работы целого элемента при достижении предела прочности бетона при растяжении (R_{bt}) привело бы к неоправданному снижению жесткости моделируемой конструкции. Общий вид принятых графиков представлен на рисунке 3.

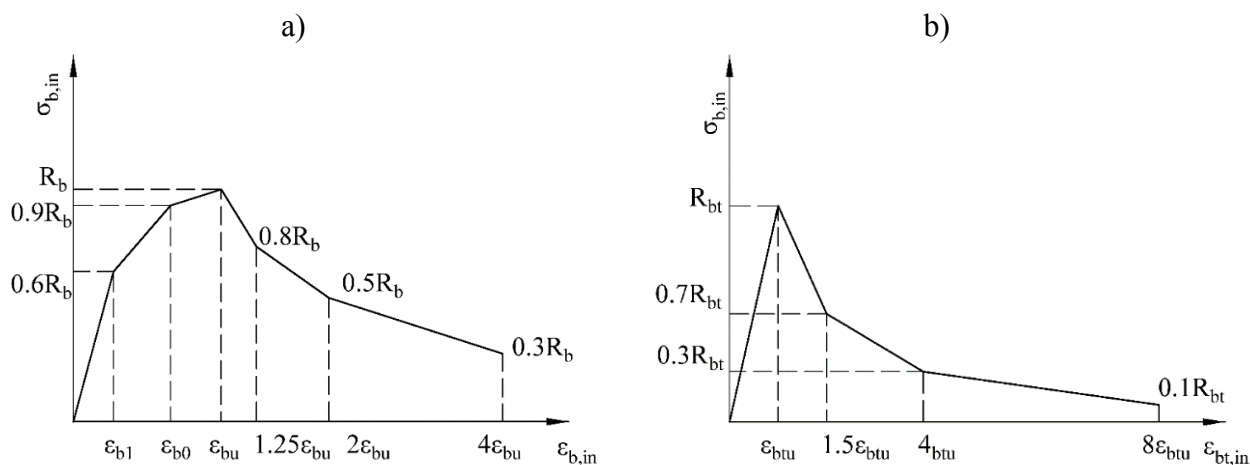


Рисунок 3 - Диаграмма состояния бетона при сжатии (а) и растяжении (b)

Таблица 2 - Параметры модели, описывающие напряженно-деформированное состояние.

<i>Зависимость напряжений от деформаций при сжатии</i>		<i>Коэффициенты повреждения бетона при сжатии</i>	
σ_b МПа	ε_{pl}	D_c	ε_{pl}
15.45	0.00000	0.0000	0.00000
37.08	0.00057	0.0737	0.00057
41.2	0.00191	0.1938	0.00191
32.96	0.00310	0.3280	0.00310
20.6	0.00621	0.6096	0.00621
12.36	0.01352	0.8501	0.01352
σ_b МПа	ε_{crc}	D_t	ε_{pl}
2.98	0.000000	0.0000	0.000000
2.09	0.000144	0.2640	0.000116
0.89	0.000565	0.7662	0.000452
0.3	0.001188	0.9538	0.000951

Так как у экспериментального образца имеется трение между поверхностью бетона и прессом, в численной модели были введены связи по горизонтальным степеням свободы торцевых поверхностей.

Результаты

Результаты конечно-элементного анализа и их сравнение с экспериментальными данными представлены на рисунках 4-6.

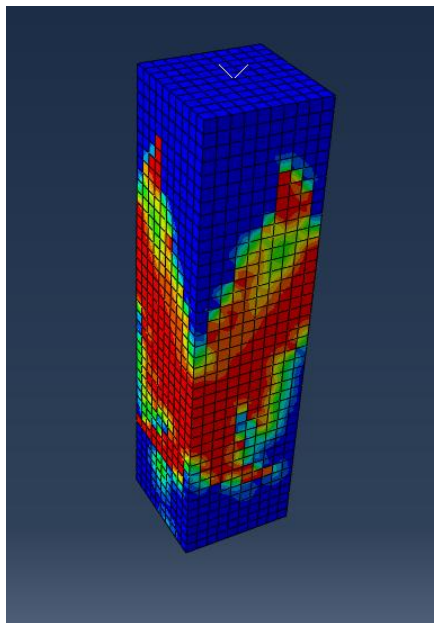


Рисунок 4 - Картина повреждения бетонной призмы в процессе нагружения.

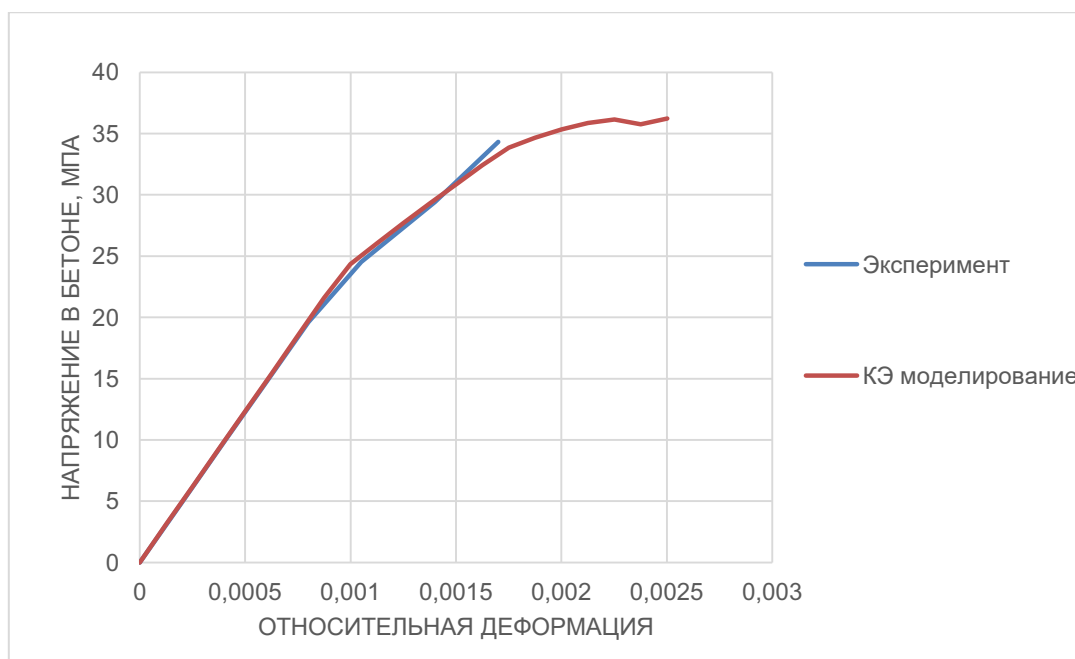


Рисунок 5 - Графики нагрузка-относительная деформация

Результаты сопоставления численного моделирования и эксперимента говорят о высокой сходимости, что позволяет сделать вывод о том, что принятые параметры

численной модели при сжатии верны, и данный подход может быть применен для дальнейшего численного моделирования работы сжатого бетона.

Для верификации модели материала на примере железобетонной конструкции с петлевыми стыками арматуры, обратимся к экспериментальным исследованиям Николаева [20-22], в рамках которых была проведена большая работа по исследованию несущей способности железобетонных изгибаемых элементов с такими стыками. Для численного моделирования примем балку, описанную в [20], нагружаемую двумя сосредоточенными силами, образующими зону чистого изгиба (рисунок 6).

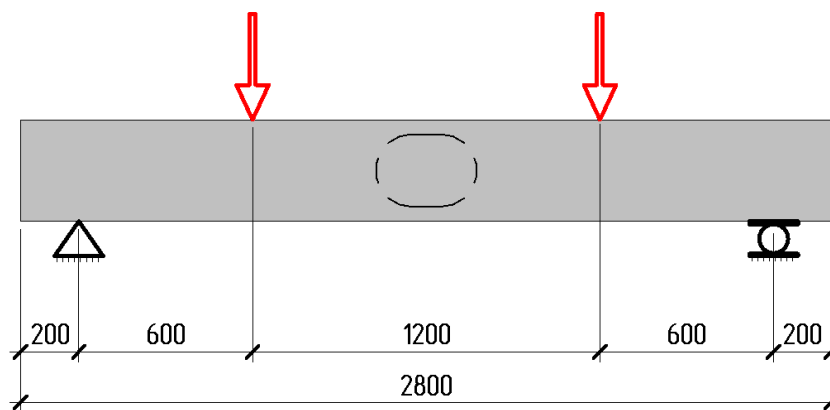


Рисунок 6 - Схема испытаний железобетонной балки с петлевым стыком

Результаты конечно-элементного анализа и их сравнение с экспериментальными данными представлены на рисунках 7 и 8.

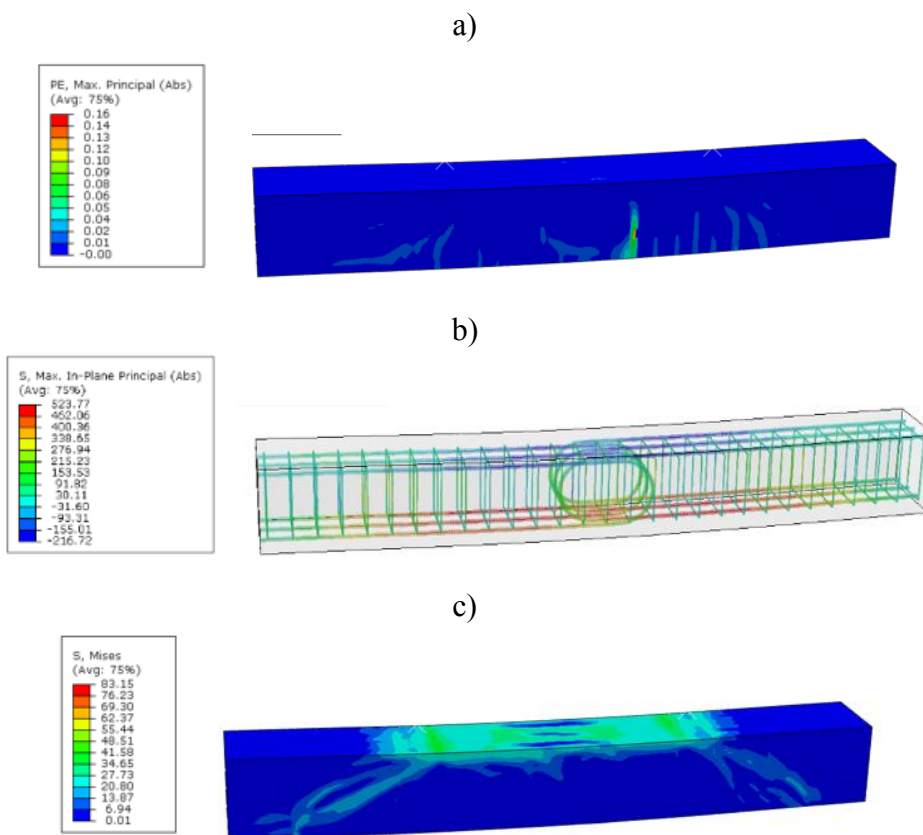


Рисунок 7 - Результаты численного моделирования в виде пластических деформаций (a), эквивалентных напряжений в бетоне (b) и главных напряжений в арматуре (c)

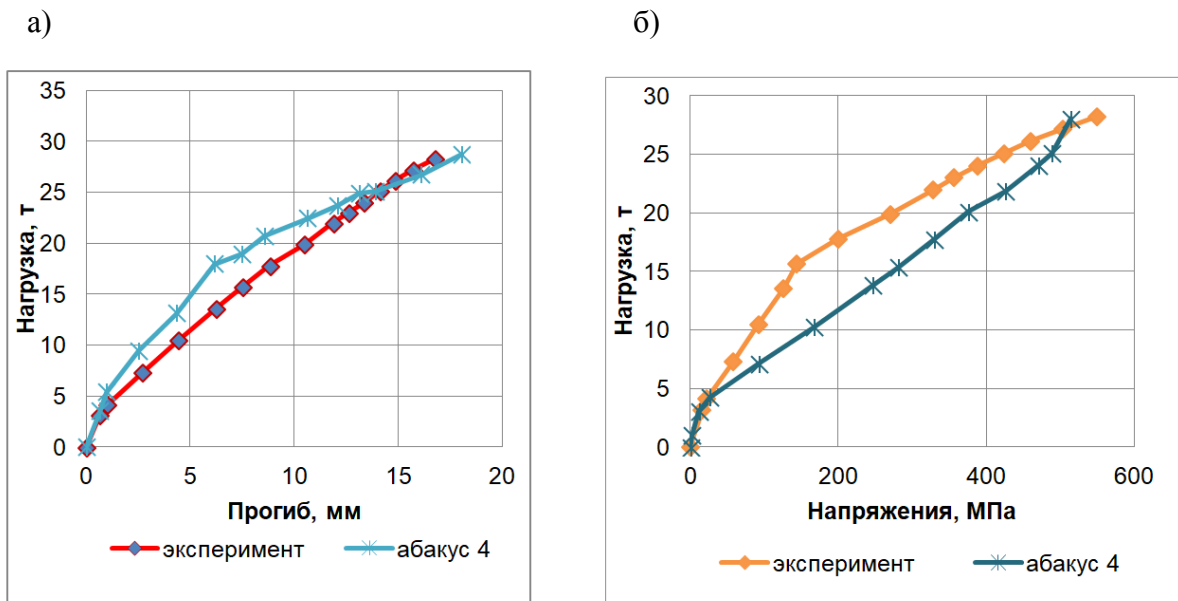


Рисунок 8 - Графики зависимости прогиба от нагрузки (а) и напряжений в арматуре от нагрузки (б).

Как видно из графиков, для изгибаемой балки сходимость результатов конечно-элементного анализа с экспериментальными данными также довольно высока, особенно на начальных этапах нагружения и перед разрушением, что достаточно для практических расчетов. Однако, по сравнению с призмой, на средних этапах сходимость немного ниже, что, вероятно, вызвано влиянием несколько условного моделирования растянутого бетона с трещинами.

В результате конечно-элементных расчетов перед разрушением получены напряжения в арматуре 514 МПа, которые близки к напряжениям, зафиксированным на последнем этапе натурного эксперимента 550 МПа. Величина прогиба при достижении разрушающей нагрузки в эксперименте составила 16,7 мм, в КЭ модели 18,07 мм.

Выводы

Для широкого применения петлевых соединений в монолитных зданиях необходимы дополнительные исследования. Из-за объективных трудностей невозможно ограничиться только натурными испытаниями и аналитическим описанием НДС в зоне стыков. Для различных вариантов стыкуемых элементов следует провести численные эксперименты с помощью конечно-элементного анализа на основе современных математических моделей материалов.

Рассмотрена так называемая модель пластически повреждаемого бетона, позволяющая определить его напряженно-деформированное состояние с учетом повреждений на всех этапах нагружения, включая стадию разрушения. По результатам анализа результатов серий итерационных расчетов подобраны численные значения различных параметров модели.

В результате расчетов получены напряжения в арматуре 514 МПа, близкие к величине 550 МПа, полученной в результате натурного эксперимента. Величина прогиба при достижении разрушающей нагрузки в эксперименте составила 16,7 мм, в КЭ модели – 18,07 мм.

Сопоставление данных численных исследований с натурными испытаниями показало, что применение конечно-элементного анализа с описанными в статье параметрами рассматриваемой модели позволяет достаточно корректно описывать напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций. Разработанный подход может быть использован с достаточной точностью в практических расчетах и рекомендован для описания НДС конструкций с петлевыми стыками при проведении численных экспериментов.

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 Mechanics 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. Байбурун 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 промышленных бессварных 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., Mod  r 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