

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, Н.С. КУРЧЕНКО¹, М.Д. АНТОНОВ¹, Д.В. МОРОЗОВА¹
¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АВАРИЙНО ДОГРУЖАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН С НАЧАЛЬНЫМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ

Аннотация. Рассмотрен подход к численному моделированию напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн квадратного сечения с различными типами начальных несовершенств. Определена их предельная несущая способность с учетом возможного динамического догружения продольной силой и изгибающим моментом. Для исследований используется численная модель, описывающая конструкцию колонны объемными элементами для бетона и стержневыми элементами для арматурного каркаса. Начальные несовершенства моделируются путем физического удаления элементов, расшивки элементов, расшивки с возможностью последующей шивки нелинейными связями, моделирующими зазоры и сцепление на границе раздела сред. Численный анализ выполнялся в динамической постановке по неявной схеме на основе шагового метода, решение нелинейной задачи выполнялось с использованием метода Ньютона-Рафсона с невязкой по значению узловых сил. Установлена степень влияния начальных несовершенств, связанных с отклонениями геометрии и повреждениями материала на несущую способность сжато-изгибаемых элементов при аварийном воздействии. Показано, что для сооружений повышенного уровня ответственности целесообразно при проектировании предусматривать дополнительный запас прочности догружаемых колонн в рамных конструкциях в пределах 10%.

Ключевые слова: живучесть, численное моделирование, железобетонные конструкции, колонны, конечно элементный анализ, динамическое догружение, начальные несовершенства, безопасность.

A.V. ALEKSEYTSSEV¹, N.S. KURCHENKO¹, M.D. ANTONOV¹, D.V. MOROZOVA¹
¹Moscow State University of Civil Engineering

BEARING CAPACITY OF EMERGENCYLY LOADED REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH INITIAL IMPERFECTIONS

Abstract. An approach to numerical simulation of the stress-strain state of reinforced concrete square columns with various types of initial imperfections is considered. Their ultimate bearing capacity is determined taking into account the possible dynamic additional loading by the longitudinal force and the bending moment. For research, a numerical model is used that describes the design of the column with volumetric elements for concrete and rod elements for the reinforcing cage.

Initial imperfections are modeled by physical removal of elements, unzipping of elements, unzipping with the possibility of subsequent stitching by nonlinear bonds that simulate gaps and adhesion at the interface between media. Numerical analysis was carried out in a dynamic formulation according to an implicit scheme based on the direct method, the solution of a nonlinear problem was performed using the Newton-Raphson method with a discrepancy in the value of nodal forces. The degree of influence of initial imperfections associated with deviations of geometry and damage to the material on the bearing capacity of compressed-bent elements under emergency impact has been established. It is shown that for structures with an increased level of responsibility, it is advisable when designing to provide for an additional margin of safety for additionally loaded columns in frame structures within 10%.

Keywords: *survivability, numerical simulation, reinforced concrete structures, columns, finite element analysis, dynamic loading, initial imperfections, structural safety.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий А.М., Дмитриев Д.С., Петряшев С.О., Нагибович Т.Е. Расчетная оценка влияния геометрических отклонений от проекта на параметры механической безопасности многоярусных промышленных металлоконструкций (этажерок) в рамках научно-технического сопровождения строительства // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 19-29.
2. Игошин В.Л., Лебедев В.В. Учет начальных несовершенств крена зданий на стадии проектирования // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 2-6.
3. Митасов В.М., Себешев В.Г., Асташенков Г.Г., Логунова М.А. К вопросу учета и уменьшения влияния начальных геометрических несовершенств при возведении многоэтажных каркасных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 2 (638). С. 91-97.
4. Мондрус В.Л., Смирнов В.А. Закритическое деформирование сжатой стойки со случайными несовершенствами // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 113-118.
5. Savin S.Yu, Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Т. 17(3). С. 120–131.
6. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29-35.
7. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. С. 04005.
8. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 4 (80). С. 73-80.
9. Гичко В.В. Расчет устойчивости гибких железобетонных стоек деформационным методом // Современное промышленное и гражданское строительство. 2014. Т. 10. № 2. С. 103-112.
10. Савин С.Ю. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 49-58.
11. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 3(103). P. 10306.
12. Nazmeeva T.V., Vatin N.I. Numerical investigations of notched c-profile compressed members with initial imperfections // Magazine of Civil Engineering. 2016. № 2 (62). С. 92-101.
13. Hajdú G, Rubert A. Eigenshape based imperfection method for beam-columns with mono-symmetric I-section. Eigenformbasierte Imperfektionsmethode für Tragwerke mit monosymmetrischen I-Profilen. Stahlbau. 2021. No. 90(8). Pp. 600–13.
14. Garifullin M., Bronzova M.K., Heinisuo M., Mela K., Pajunen S. Cold-formed rhs t joints with initial geometrical imperfections // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 4 (80). С. 81-94.
15. Корсун Н.Д., Простакишина Д.А. Анализ НС составного сечения из тонкостенных профилей с учетом начальных геометрических несовершенств // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 4 (39). С. 83-88.
16. Mageirou G.E., Lemonis M.E. Influence of imperfections on the progressive collapse of steel moment resisting frames // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Т. 183.
17. Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Грудцына И.Е. Численный анализ критического равновесия гибкой подкрепленной пластины с учетом влияния начальных геометрических несовершенств. Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 1 (288). С. 30-36.
18. Иноземцев В.К., Нащинцев Е.А. Общая бифуркационная устойчивость и деформации крена высотных объектов. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 6. С. 32-36.
19. Rzeszut K. Post-Buckling Behaviour of Steel Structures with Different Types of Imperfections // Applied Sciences. 2022. Т. 12(18).
20. Wu K., Xing Z. Stability of imperfect prestressed stayed beam-columns under combined axial load and bending // Engineering Structures. 2021. Т. 245.
21. Литвинов С.В., Клименко Е.С., Кулинич И.И., Языева С.Б. Расчет на устойчивость полимерных стержней с учетом деформаций ползучести и начальных несовершенств. Инженерный вестник Дона. 2011. № 2(16). С. 75-79.
22. Radwan M, Kövesdi B. Equivalent Geometric Imperfections for Local Buckling of Slender Box-section Columns. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. Т. 65(4). С. 1279–1287.
23. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждении плит продавливанием. Строительство и реконструкция. 2021. № 4(96). С. 23-34.

24. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42-51. doi:10.33622/0869-7019.
25. Алексейцев А.В. Поиск рациональных параметров строительных конструкций на основе многокритериальной эволюционной оптимизации. Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 18-22.

REFERENCES

1. Belostotskiy A.M., Dmitriyev D.S., Petryashev S.O., Nagibovich T.Ye. Raschetnaya otsenka vliyaniya geo-metricheskikh otkloneniy ot proyekta na parametry mekhanicheskoy bezopasnosti mnogoyarusnykh promyshlennykh metallokonstruktsiy (etazherok) v ramkakh nauchno-tekhnicheskogo soprovozhdeniya stroitel'stva. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2021. T. 17. No. 1. Pp. 19-29.
2. Igoshin V.L., Lebedev V.V. Uchet nachal'nykh nesovershenstv krena zdaniy na stadii proyektirovaniya // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2010. No. 1. Pp. 2-6.
3. Mitasov V.M., Sebeshev V.G., Astashenkov G.G., Logunova M.A. K voprosu ucheta i umen'sheniya vliya-niya nachal'nykh geometricheskikh nesovershenstv pri vozvedenii mnogoetazhnykh karkasnykh zdaniy // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2012. No. 2 (638). Pp. 91-97.
4. Mondrus V.L., Smirnov V.A. Zakriticheskoye deformirovaniye szhatoy stoyki so sluchaynymi nesovershenstvami // *Nauchnoye obozreniye*. 2015. No. 4. Pp. 113-118.
5. Savin S.Yu, Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17(3). Pp.120–131.
6. Tamrazyan A.G. Raschet vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhenii v usloviyakh ognevykh vozdeystviy. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. No. 3. Pp. 29-35.
7. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports. *E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019*. Pp. 04005.
8. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4 (80). Pp. 73-80.
9. Gichko V.V. Raschet ustoychivosti gibkikh zhelezobetonnykh stoyek deformatsionnym metodom // *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2014. T. 10. No. 2. Pp. 103-112.
10. Savin S.YU. Ustoychivost' vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri osobykh vozdeystviyakh s uchedom deformatsiy sdviga // *Vestnik MGSU*. 2021. T. 16. No. 1. Pp. 49-58.
11. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3(103). P. 10306.
12. Nazmeeva T.V., Vatin N.I. Numerical investigations of notched c-profile compressed members with initial imperfections // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 2 (62). Pp. 92-101.
13. Hajdú G., Rubert A. Eigenshape based imperfection method for beam-columns with mono-symmetric I-sections. *Eigenformbasierte Imperfektionsmethode für Tragwerke mit monosymmetrischen I-Profilen. Stahlbau*. 2021. No. 90(8). Pp. 600–613.
14. Garifullin M., Bronzova M.K., Heinisuo M., Mela K., Pajunen S. Cold-formed rhs t joints with initial geo-metrical imperfections // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4 (80). Pp. 81-94.
15. Korsun N.D., Prostakishina D.A. Analiz NS sostavnogo secheniya iz tonkostennykh profiley s uche-tom nachal'nykh geometricheskikh nesovershenstv. *Akademicheskii vestnik UralNIIProyekt RAASN*. 2018. No. 4 (39). Pp. 83-88.
16. Mageirou G.E., Lemonis M.E. Influence of imperfections on the progressive collapse of steel moment resisting frames // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. T. 183.
17. Manuylov G.A., Kositsyn S.B., Grudtsyna I.Ye. Chislennyy analiz kriticheskogo ravnovesiya gibkoy podkreplennoy plastiny s uchedom vliyaniya nachal'nykh geometricheskikh nesovershenstv. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2020. No. 1 (288). Pp. 30-36.
18. Inozemtsev V.K., Nashchintsev Ye.A. Obshchaya bifurkatsionnaya ustoychivost' i deformatsii krena vysot-nykh ob'yektov. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2015. No. 6. Pp. 32-36.
19. Rzeszut K. Post-Buckling Behaviour of Steel Structures with Different Types of Imperfections // *Applied Sciences*. 2022. T. 12(18).
20. Wu K, Xing Z. Stability of imperfect prestressed stayed beam-columns under combined axial load and bending // *Engineering Structures*. 2021. T. 245.
21. Litvinov S.V., Klimenko Ye.S., Kulinich I.I., YAzyyeva S.B. Raschet na ustoychivost' polimernykh sterzhney s uchedom deformatsiy polzuchesti i nachal'nykh nesovershenstv. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2011. No. 2(16). Pp. 75-79.

22. Radwan M, Kövesdi B. Equivalent Geometric Imperfections for Local Buckling of Slender Box-section Columns. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021. Т. 65(4). Pp. 1279–1287.
23. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dinamika bezbalochnykh zhelezobetonnykh karkasov sooruzheniy pri povrezhdeniyakh plit prodavlivaniyem // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. No. 4 (96). Pp. 23-34.
24. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.YU. Dinamicheskiye efekty v staticheski neopredelimykh fizicheski i konstruktivno nelineynykh sistemakh // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2022. No. 9. Pp. 42-51. doi:10.33622/0869-7019.
25. Alekseytsev A.V. Poisk ratsional'nykh parametrov stroitel'nykh konstruksiy na osnove mnogokriterial'noy evolyutsionnoy optimizatsii. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. No. 7. Pp. 18-22.

Информация об авторах:

Алексейцев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».
E-mail: aalexw@mail.ru

Курченко Наталья Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».
E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Антонов Михаил Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».
E-mail: mishany96969@mail.ru

Морозова Дарья Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
студент, специальность 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».
E-mail: moroz_dk@mail.ru

Information about authors:

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor of engineering, associate professor of department «Concrete and reinforced concrete structures».
E-mail: aalexw@mail.ru

Kurchenko Natalia S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Ph.D of Engineering, associate professor of department «Concrete and reinforced concrete structures».
E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Antonov Mikhael D.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
post-graduate student of department «Reinforced concrete and stone structures».
E-mail: mishany96969@mail.ru

Morozova Daria V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
student, specialty 08.05.01 «Construction of unique buildings and structures».
E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru