

В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

ПРОБЛЕМА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОНЕ

Аннотация. В статье рассмотрены различные аспекты проблемы оценки раскрытия трещин в железобетоне, опираясь на экспериментальные данные, полученные в исследованиях последних лет. Автором предложена классификация типов трещин, введен ряд новых гипотез, установленных экспериментально эффектов деформирования железобетона в зоне трещин. Сформулированные на этой основе принципы включают схемы распределения силовых потоков между трещинами, понятие о прогрессирующих магистральных трещинах и деформационном эффекте в железобетоне - специальном двухконсольном элементе в местной области около берегов трещины, новые обобщенные гипотезы, теоремы и функционалы о линейных и угловых деформациях сжатой и растянутой зон сечений железобетонных элементов на всех уровнях упруго-пластического деформирования. Предложенная модель составных стержней в виде единичных полосок для определения жесткости участка железобетона с пересекающимися трещинами позволила на порядок сократить дифференциальные уравнения теории составных стержней. Установлена связь и приведены аналитические зависимости для перемещений в трещине с раскрытием и сдвигом ее берегов, определен главный вектор перемещений и угол равнодействующей усилий в арматуре, пересекающей трещину. Построены расчетные зависимости для определения уровневых расстояний между трещинами и ширины раскрытия трещин. В рамках общей методологии рассматриваемой проблемы раскрытия трещин в железобетоне с использованием сформулированных принципов построена общая комбинированная численно – аналитическая модель строительной механики железобетона (МРМС), учитывающая деформационный эффект в трещине, моделируемый двухконсольным элементом (ДКЭ), типы трещин, пространственную поверхность распределения деформаций в сечении с трещиной и другие установленные экспериментально особенности механики железобетона.

Ключевые слова: эффект железобетона, гипотезы, расчетные модели, деформационный эффект, ширина раскрытия трещин, двухконсольный элемент, численно-аналитический метод.

VL.I. KOLCHUNOV¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia

²Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

THE PROBLEM OF CRACK OPENING IN REINFORCED CONCRETE

Abstract. The article discusses various aspects of the problem of assessing crack opening in reinforced concrete based on experimental data obtained in recent studies. The author proposed a classification of crack types, introduced a number of new hypotheses, established experimentally the effects of deformation of reinforced concrete in the crack zone. The principles formulated on their basis include schemes for the distribution of force flows between cracks, the concept of progressing main cracks and the deformation effect in reinforced concrete - a special two-console element in the local region near the crack banks, new generalized hypotheses, theorems and functionals about linear and angular deformations of the compressed and tensile zones of reinforced concrete element sections at all levels of elastic-plastic deformation. The proposed model of composite rods in the form of single strips for determining the stiffness of a section of reinforced concrete with intersecting cracks has made it possible to reduce the differential equations of the theory of composite rods by an order of magnitude

when solving such problems. The connection is established and analytical dependences for displacements in the crack with opening and shear of the crack banks are given. The main vector of displacements and the angle of equidirectional forces in the reinforcement crossing the crack are determined. Calculated dependences for determining the level distances between cracks and crack opening widths are constructed. Within the framework of the general methodology of the considered problem of crack opening in reinforced concrete, using the formulated principles, a general combined numerical-analytical model of the structural mechanics of reinforced concrete is constructed, which takes into account the deformation effect in the crack modeled by a double cantilever element, the types of cracks, the spatial surface of strain distribution in the cross section with the crack and other experimentally determined features of the mechanics of reinforced concrete, cracks types, spatial surface of strain distribution in the cross-section with a crack and other experimentally determined features of reinforced concrete mechanics.

Keywords: reinforced concrete effect, hypotheses, computational models, deformation effect, crack opening width, two-concole element, numerical-analytical method.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gintaris Kaklauskas, Aleksandr Sokolov, Karolis Sakalauskas Strain compliance crack model for RC beams: primary versus secondary cracks // *Engineering Structures*, 281 (2023) 115770
2. Justas Slaitas, Juozas Valivonis Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials // *Composite Structures*, Volume 260, 2021, 113265, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113265>
3. Qian Feng, Peng Wei, Xingxi Liu, Guannan Wang, Rongqiao Xu Short-term load-deflection behavior of corroded RC beams with confinement effect based on the partial-interaction segmental approach // *Engineering Structures* 220 (2020) 111014.
4. Justas Slaitas, Juozas Valivonis. Concrete cracking and deflection analysis of RC beams strengthened with prestressed FRP reinforcements under external load action. <https://doi.org/1016/j.compstruct.2020.113036>.
5. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Is. 5. Pp. 1367–1370. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.19425.51045>.
6. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp. 1477-1497.
7. Kandekar S.B., Talikoti R.S. Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 465–474. <http://doi.org/10.1007/s40091-018-0208-y>.
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 412 с.
9. Баширов Х.З., Колчунов Вл.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. М.: Издательство АСВ, 2017. 248 с.
10. Колчунов Вл.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 8. С. 16–23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>.
11. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 6(80). С. 32-43.
12. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Тугай Т.В. Методика расчета жесткости плосконапряженных железобетонных конструкций с привлечением программного комплекса «Лира-Про» // *Сборник научных трудов (серия отраслевое машиностроение, строительство)*. Полтава: ПолтНТУ, 2014. Вып. 3(42). Т. 2. С. 55–66.
13. Колчунов Вл.И. Численно-аналитический метод в механике железобетона // *Строительная механика инженерных конструкций сооружений*. 2022. Т. 18(6). С. 525–533. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-525-533>.
14. Колчунов Вл.И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. Т.19. № 3. С. 261-275.
15. Гольшев А.Б., Колчунов Вл.И. Сопротивление железобетона. К.: Основа. 2009. 432 с.
16. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.

17. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(13). Pp. 2750. <http://doi.org/10.3390/app9132730>.
18. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Гуца Ю.П. и др. Новое в проектировании бетонных железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1978. 204 с.
19. Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. К.: «Талком», 2015. 371 с.
20. Колчунов Вл.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций с крестообразной пространственной трещиной при кручении с изгибом / В. И. Колчунов, А. И. Демьянов, М. М. Михайлов // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 6(92). С. 13–25.
21. Колчунов Вл.И. Обобщенные гипотезы депланации линейных и угловых деформаций в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2023. № 1 (69). С. 9-26.
22. Верюжский Ю.В., Колчунов Вл.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с.
23. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.

REFERENCE

1. Gintaris Kaklauskas, Aleksandr Sokolov, Karolis Sakalauskas Strain compliance crack model for RC beams: primary versus secondary cracks. *Engineering Structures*. 2023. 281. 115770
2. Justas Slaitas, Juozas Valivonis Full moment-deflection response and bond stiffness reduction of RC elements strengthened with prestressed FRP materials. *Composite Structures*. 2021. Volume 260. 113265, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113265>
3. Qian Feng, Peng Wei, Xingxi Liu, Guannan Wang, Rongqiao Xu Short-term load–deflection behavior of corroded RC beams with confinement effect based on the partial-interaction segmental approach. *Engineering Structures*. 2020. 220. 111014.
4. Justas Slaitas, Juozas Valivonis. Concrete cracking and deflection analysis of RC beams strengthened with prestressed FRP reinforcements under external load action. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113036>.
5. Adheena Thomas, Afia S Hameed. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4. Is. 5. Pp. 1367–1370. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.19425.51045>.
6. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp. 1477-1497.
7. Kandekar S.B., Talikoti R.S. Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 465–474. <http://doi.org/10.1007/s40091-018-0208-y>.
8. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics], Moscow: Stroyizdat, 1996, 412 p. (rus)
9. Bashirov H.Z., Kolchunov V.I., Fedorov V.S., Yakovenko I.A. Reinforced concrete composite structures of buildings and structures, - Moscow: ASV, 2017. 248 p.
10. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual hierarchy of models in the theory of resistance of building structure. *Industrial and civil engineering*. 2020. No. 8. Pp. 16–23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>
11. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. The results of experimental studies of structures square and box sections in torsion with bending. *Building and Reconstruction*. 2018. No. 80(16). Pp. 32–43. (rus)
12. Kolchunov V.I., Yakovenko I.A., Tugay T.V. [Methodology for calculating the rigidity of plane-stressed reinforced concrete structures using the Lyra-Pro software package], Coll. of science works (industry mechanical engineering, construction), Poltava, 2014. Vol. 2. No. 3(42). Pp. 55-66. ((rus), abstract in Eng.).
13. Kolchunov V.I. Numerical-analytical method in reinforced concrete mechanics. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2022. Vol.18 (6). Pp. 525–533. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-525-533>
14. Kolchunov V. I. Method of calculated resistance models for reinforced concrete. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2023. Vol.19. No. 3. Pp. 261-275.
15. Golyshov A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance. Kiev: Osнова. 2009. 432 p.

16. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
17. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(13). Pp. 2750. <http://doi.org/10.3390/app9132730>.
18. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Gushcha Yu.P., etc. New in the design of concrete reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat, 1978. 204 p.
19. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in difficult engineering and geological conditions. Kiev: Talcom, 2015. 371 p.
20. Kolchunov V.I. Demyanov A.I., Mihailov M.M. Experimental studies of reinforced concrete structures with gross-shaped apatial grack under torsion with bendlng. *Building and Reconstruction*. 2018. No. 80(16). Pp. 32–43. (rus) doi:10.33979/2073-7416-2020-92-6-13-25
21. Kolchunov V.I. Generalized hypotheses of the deplanation of linear and angular deformations in reinforced concrete structures during bending with torsion. *Journal of Building and Architechure*. 2023. No. 1 (69). Pp. 9-26.
22. Veruzhsky Yu.V., Kolchunov V.I. Methods of mechanics of reinforced concrete. Textbook. Kiev: NAU, 2005. 653 p.
23. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation models of the force resistance of reinforced concrete. Moscow: ASV, 2004. 472 p.

Информация об авторе:

Колчунов Владимир Иванович

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

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия, ведущий научный сотрудник.

E-mail: vlik52@mail.ru

Information about author:

Kolchunov Vladimir Iv.

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

Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia,

leading researcher.

E-mail: vlik52@mail.ru