**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
РАСЧЕТА ИЗГИБАЕМЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО РАСТЯНУТЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК**

**IMPROVEMENT OF THE DEFORMATION MODEL FOR THE
CALCULATION OF BENDING ECCENTRICALLY STRETCHED
REINFORCED CONCRETE BEAMS**

**Карпюк В.М. д.т.н., проф., Петров Н.Н. к.т.н., доц., Целикова А.С.
аспирантка, (Одесская государственная академия строительства и
архитектуры, г. Одесса)**

**Karpiuk V.M., Doctor of Engineering, Professor, Petrov N.N., Assistant
Professor, Tselikova A.S., graduate student, (Odessa State Academy of Civil
Engineering and Architecture, Odessa)**

**В данной статье исследовалось трещинообразование изгибаемых
внецентренно растянутых железобетонных балок. При помощи
эффективной компьютерной программы COMPEX были получены
математические модели продольных растягивающих сил, вызывающих
появление нормальных трещин. Также был проведен анализ
полученных моделей, который показал, что решающее влияние на
величину продольной силы, вызывающей появление нормальных
трещин, оказывает эксцентриситет ее приложения.**

**The study of the processes of formation and development of cracks in
exploited reinforced concrete structures remains to this day one of the most
urgent and at the same time the most complex issue in the theory of reinforced
concrete. As practice shows, for the majority of exploited reinforced concrete
structures, the onset of the limiting state is not due to the exhaustion of the
bearing capacity, but to the formation and excessive crack opening at the
operating load levels.**

**In this article, the authors investigated the cracking of bent eccentrically
stretched reinforced concrete beams. After processing of the experimental
data with the help of an effective computer program COMPEX, mathematical
models of longitudinal tensile forces were obtained, causing the appearance of
normal cracks in stretched and later compressed bending fibers. The authors
also analyzed the models obtained, which showed that the eccentricity of its
application exerts a decisive influence on the magnitude of the longitudinal
force that causes the appearance of normal cracks. Comparison of the
calculated values of the longitudinal force with the help of the layered**

deformation model adapted by the authors, which causes the occurrence of normal cracks in this or that zone of the beam, with experimental data confirmed the need to take into account the initial technological damage of the concrete of the elements under study, since it significantly (by 10 ... 20%) reduces their real crack resistance.

It is established that the eccentricity of the longitudinal force affects the strength of the prismatic sites of the prototypes indifferent ways. Thus, the strength of inclined sections of eccentrically stretched beams with an increase in the relative eccentricity e / h_0 from -0.25 to +0.25, on average, decreases by 38%.

Ключевые слова:

Трещиностойкость, эксцентриситет, продольная сила, нормальные трещины, изгиб, математическая модель.

Crack resistance, eccentricity, longitudinal force, normal cracks, bending, mathematical model.

Введение. Исследование процессов образования и развития трещин в эксплуатируемых железобетонных конструкциях до настоящего времени остается одним из наиболее актуальных и вместе с тем наиболее сложным вопросом в теории железобетона. Как показывает практика, для большинства эксплуатируемых железобетонных конструкций наступление предельного состояния связано не с исчерпанием несущей способности, а с образованием и чрезмерным раскрытием трещин при эксплуатационных уровнях нагрузок. Опасность образования и чрезмерного раскрытия трещин, связывается с повышением риска возникновения коррозионных повреждений стальной арматуры (снижается долговечность конструкции), со значительным снижением жесткости конструкции (увеличению прогибов) и ухудшением эстетического и психологического восприятия конструкции.[4] Следует также отметить, что появление трещины в железобетонном элементе приводит к качественному изменению напряженно-деформированного состояния не только непосредственно в сечении и вблизи берегов трещины, но и всего элемента в целом, превращая железобетонный элемент в сложную систему блоков, объединенную в единое целое арматурой и нетреснувшим бетоном[5].

Анализ последних источников исследований и публикаций. Проблема трещинообразования в железобетонных элементах остаётся до конца не изученной, но данный вопрос детально изучался нашими авторами [1], [3], а также зарубежными [4], [5].

Постановка задачи. Нашей задачей является изучение трещинообразования изгибаемых внецентренно растянутых железобетонных

балок и совершенствование деформационной модели расчета исследуемых элементов.

Изложение основного материала. На кафедре были проведены экспериментальные исследования. Исследовали трещиностойкость свободно опертых однопролетных балок прямоугольного сечения 1975*200*100мм и расчетной длиной пролета $L=1575$ мм. Для изготовления опытных образцов-балок использовался тяжелый бетон класса В25 на гранитном щебне фракции 5...10мм и кварцевом песке с модулем крупности 1,5. В результате эксперимента, в котором к однопролетным свободно опертым балкам на двух опорах в возрасте 100...120 суток, вначале прикладывали продольные растягивающие силы с эксцентриситетом (к торцам), а потом ступенчато возрастающую поперечную нагрузку. После обработки полученных экспериментальных данных при помощи эффективной компьютерной программы COMPEX, разработанной под руководством проф. Вознесенского В.А.[2], получены математические модели продольных растягивающих сил, вызывающих появление первых (т.н. первичных) нормальных трещин в растянутых, сжатых впоследствии от изгиба волокнах, а также посередине высоты сечения балки имеют следующий вид:

$$\hat{Y}N_{срс, \perp, \frac{h}{2}}^H = 31,03 - 107,77X_{2,e} + 91,20X_{2,e}^2, \text{ кН}; \quad (1)$$

$$\hat{Y}N_{срс, \perp, -\frac{h}{2}}^B = 17,52 + 70,0X_{2,e} + 62,47X_{2,e}^2, \text{ кН}; \quad (2)$$

$$\hat{Y}N_{срс, \perp, 0}^{серед} = 22,01 + 5,00X_{2,e} + 2,99X_{2,e}^2, \text{ кН}. \quad (3)$$

Геометрическая интерполяция указанных моделей представлена на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость появления первичных трещин в зоне «чистого» изгиба и на приопорных участках внецентренно растянутых железобетонных балок от эксцентриситета приложенной нагрузки.

Анализ моделей (1)...(3) показывает, что решающее влияние на величину продольной силы, вызывающей появление нормальных трещин в той или иной зоне балки, оказывает эксцентриситет ее приложения (см. рис.1). С увеличением эксцентриситета (в сторону растянутой грани) нагрузка, соответствующая появлению трещин в растянутой от изгиба зоне $N_{crc,1,h/2}$ падает, а в сжатой - $N_{crc,1,-h/2}$ возрастает в несколько раз по сравнению со значением продольной силы $N_{crc,1,0}$ вызывающей появление нормальных трещин посередине высоты балки.

Сопоставление расчетных значений продольной силы с помощью адаптированной авторами слоистой деформационной модели, вызывающей появление нормальных трещин в той или иной зоне балки, с опытными данными подтвердило необходимость учета начальной технологической поврежденности бетона исследуемых элементов, так как она заметно (на 10...25%) снижает их реальную трещиностойкость [3].

По мере увеличения поперечной нагрузки трещины в сжатой от изгиба зоне постепенно закрываются, а в растянутой области «чистого» изгиба ранее образовавшиеся от воздействия продольной растягивающей силы N_p трещины с шагом около h_0 раскрываются и между ними появляются новые (вторичные) нормальные трещины [1].

Математическая модель, характеризующая составляющую момента появления новых нормальных трещин в зоне «чистого» изгиба от поперечной нагрузки, может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{M}_{crc,1}^F = 1,59 + 0,37X_{7,N_p} - 0,97X_{9,e} + 0,32X_{7,N_p}^2 - 0,96X_{7,N_p}X_{9,e}, \text{ кНм.} \quad (4)$$

геометрическое отображение которой показано на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость момента появления вторичных трещин в зоне «чистого» изгиба и на приопорных участках внецентренно растянутых железобетонных балок от величины продольной растягивающей силы и эксцентриситета её приложения.

Анализ выражения (4) показывает, что указанный момент $M_{crc,1}^F$ нелинейно зависит от величины продольной растягивающей силы N_p .

Так, $M_{crc,1}^F$ увеличивается по отношению к среднему значению 1,59 кНм:

- с увеличением значения N_p от 22,31 до 156,19 кН на 47%,
- с уменьшением величины e/h_0 от 0,25 до -0,25 на 122%.

Знак «+» при квадратичном эффекте X_{7,N_p}^2 свидетельствует о том, что с увеличением продольной силы N_p за пределами варьирования величина $M_{cr,c,l}^F$ резко возрастает. Имеет место взаимодействие обеих исследуемых в этой серии факторов. Так, $M_{cr,c,l}^F$ значительно возрастает при одновременном увеличении N_p и отрицательных значениях e/h_0 .

С физической точки зрения данное явление легко объясняется тем, что с повышением точки приложения растягивающей силы и увеличением ее значения возрастает разгружающий момент по отношению к обычному изгибающему.

Дальнейшее увеличение поперечной нагрузки приводит к образованию первых наклонных трещин на участках балки в средних по высоте частях. При больших значениях растягивающей продольной силы N_p (порядка 156 кН) и положительном эксцентриситете ее приложения (с направлением в сторону растянутой от изгиба грани) значения поперечной нагрузки, соответствующие появлению как новых дополнительных нормальных трещин в зоне «чистого» изгиба, так и первых наклонных трещин на приопорных участках исследуемых элементов в некоторых опытах совпадают.

Обработка полученных данных позволила вывести следующую простую модель:

$$\hat{V}_{cr}' = 18,46 - 3,75X_{7,N_p} - 0,85X_{e,e} \text{ , кН} \quad (5)$$

анализ которой показывает, что она линейно зависит от общих исследуемых факторов. Причем, превалирующее значение имеет фактор X_{7,N_p} . Так, величина поперечной силы V_{cr}' , [6] уменьшается по отношению к среднему значению 18,46 кН (рис.3) с увеличением продольной растягивающей силы N_p от 22,31 до 156,19 кН на 41%, увеличением относительного эксцентриситета e/h_0 от -0,25 до +0,25 на 9%.

Рис. 3. Влияние величины продольной растягивающей силы и эксцентриситета её приложения на величину поперечной силы V_{cr}' , соответствующей появлению первых наклонных трещин на приопорных участках.

Выводы:

1. В зависимости от эксцентриситета приложения сжимающей силы на растянутой грани от действия созданного ею изгибающего момента возникают т.н. первичные нормальные трещины. При этом, расчетное значение момента трещинообразования превышает на 10...20% опытные данные, что свидетельствует о необходимости учета при проектировании начальной технологической поврежденности бетона.

2. Эксцентриситет продольной силы по-разному влияет на прочность приопорных участков опытных образцов. Так, прочность наклонных сечений внецентренно растянутых балок с увеличением относительного эксцентриситета e/h_0 от -0,25 до +0,25, в среднем, снижается на 38%.

1. Дорофеев В.С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций / В.С. Дорофеев, В.Н. Выровой. – О.: Город мастеров, 1998. – 168 с.

2. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков – К.: Вища школа, 1989. – 328с.

3. Петров Н.Н. Прочность, деформативность и трещиностойкость приопорных участков внецентренно растянутых и сжатых железобетонных балок : дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук, ОГАСА, 2011. – 252 с.

4. Deric John Oehlers, Matthew Haskett, Wade Lucas FPP-Reinforced Concrete Beams : Unified Approach Based on IC Theory, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, Univ. of Adelaide, South Australia , Australia June 2011

5. Zhenhai Guo Principles of Reinforced Concrete - Tsinghua University Press, Published by Elsevir Inc. Oxford, USA, 2014

6. ДБН В.2.6-98:2009 (на заміну СНиП 2.03.01-84)Бетоні та залізобетоні конструкції. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 75с.

1. Dorofeev V.S. Technological damage to building materials and structures/ Dorofeev, V.N. Vyrovoy. - Odessa: City of Masters, 1998. - 168 p.

2. Voznesensky V.A. Numerical methods for solving construction-technological problems on a computer./ Voznesensky, T.V. Lyashenko, B.L. Ogarkov - K .: Vishcha school, 1989. - 328p.

3. Petrov N.N. Strength, deformability and crack resistance of the pricked sections of eccentrically stretched and compressed reinforced concrete beams: dis. for scientific research. degree of Cand. those. Sciences, OGASA, 2011. - 252 p.

4. Deric John Oehlers, Matthew Haskett, Wade Lucas FPP-Reinforced Concrete Beams : Unified Approach Based on IC Theory, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, Univ. of Adelaide, South Australia , Australia June 2011

5. Zhenhai Guo Principles of Reinforced Concrete - Tsinghua University Press, Published by Elsevir Inc. Oxford, USA, 2014

6. DBN V.2.6-98: 2009 (replacing SNiP 2.03.01-84) Concrete and reinforced concrete structures. - Kyiv: Minregionstroy of Ukraine, 2011. - 75s.