

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ НАГРУЗКИ ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ

Р.Н. Гонтар, А.Ю. Климович, студенты гр. ЗПГС-604М,
Н.Д. Трутин, студент гр. ПГС-506МН

*Научные руководители – д.т.н., профессор, В.М. Каршук,
к.т.н., доцент Н.Н. Петров*

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

В статье рассматриваются особенности моделирования напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с учетом действия малоциклового нагружения высоких уровней.

Введение

Большинство пролетных железобетонных конструкций во время эксплуатации подвергается действию малоцикловых повторных и знакопеременных нагрузок, которые возникают в пределах эксплуатационного уровня, а иногда и превышают его. Такие явления возникают при ветровых, технологических, сейсмических, температурно-влажностных и других воздействиях, а также при реконструкции зданий и сооружений. Существует реальная необходимость совершенствования существующих методов расчета нормальных, наклонных и особенно пространственных сечений указанных конструкций на указанные нагрузки, прежде всего, потому, что изменение знака нагрузки, его уровня и неопределенные повторения в процессе эксплуатации может привести к последствиям, качественно отличных от полученных при расчете на постоянные нагрузки одного знака.

Целью выполняемых магистерских работ являются экспериментальные и численные исследования влияния знакопеременной малоциклового нагружения высоких уровней на прочность, деформативность и трещиностойкость пролетных железобетонных конструкций с учетом действия конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия.

Задачи исследований

1. Проверить разработанную на кафедрах ЖБ и КК, а также сопротивления материалов методику, которая позволила бы экспериментально

льным и числительным путем изучить механизмы деформирования и разрушения приопорных участков железобетонных элементов, подверженные воздействию малоциклового нагружения при различных соотношениях конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия.

2. Разработать расчетные конечно-элементные нелинейные деформационные модели напряженно-деформированного состояния исследуемых балочных элементов с учетом их конструктивных особенностей и циклического нагружения.

3. Получить изополя перемещений и напряжений в исследуемых элементах, а также величину разрушающей поперечной нагрузки, сравнить расчетные данные с результатами экспериментов.

В этой статье рассматривается методика нелинейного конечно-элементного расчета исследуемых конструкций с использованием ПК «Ли́ра 9.6», «Ли́ра SAPR».

Изучению физической нелинейности бетона и железобетона посвящены пионерные разработки А.Ф. Лолейта, В.И. Мурашева. Они создали предпосылки для развития инженерных методов расчета изгибаемых железобетонных конструкций, которые нашли отражение во многих нормативных документах.

Для того, чтобы более детально охарактеризовать процесс деформирования исследуемых железобетонных элементов нужно, как оказалось, применить теорию пластичности, методы механики деформирования и разрушения твердого тела.

Начало исследованиям пластичности материалов при сложном напряженно-деформированном состоянии положено работами L. Prandtl, Рейсса, А.А. Ильюшина [4] и др. Однако, достаточно быстро выяснилось непригодность указанных классических теорий для описания пластичности бетона, поскольку бетон имеет неодинаковую прочность на сжатие и растяжение, в нем могут образовываться трещины, появляется деформационная анизотропия и эффект дилатации при трехосном сжатии, т.е. увеличение объема.

В определяющей работе Г.А. Гениева, В.Н.Киссюка, Г.А. Тюпина [3] впервые предложено учесть все вышеперечисленные особенности деформирования бетона, который рассматривается как нелинейно-упругий изотропный материал, а железобетон - трансверсально изотропным как до, так и после образования трещин.

Работы А.И. Козачевского [7], С.Ф. Клованича [6], В.И. Корсуна [8] существенно развили предложенную теорию пластичности бетона и железобетона.

В работе А.А. Гвоздева [2] и Н.И. Карпенка [5] используется гипотеза о деформационной ортотропии материала, т.е. принимается гипо-

теза о том, что направление осей ортотропии совпадает с направлением главных напряжений. В последующих исследованиях Н.И. Карпенка и его ученики развивают теорию малых упруго-пластических деформаций, в которой бетон как до, так и после появления трещин рассматривается как анизотропный материал, характеризующейся деформационной анизотропией, обусловленной трещинообразованием и дискретным расположением арматуры.

Анализ указанных и других работ показал, что как ортотропная, так и анизотропная теории малых упруго-пластических деформаций бетона, по сути, являются деформационными теориями, оперирующими конечными величинами деформаций и напряжений. И если они хорошо согласуются с опытом при простом пропорциональном нагружении, то при сложном режиме нагрузки расчетные и фактические деформации и напряжения существенно отличаются друг от друга.

Относительно недавно выяснилось, что напряжения и деформации при разгрузке и повторном нагружении, температурных воздействиях и т.д. удовлетворительно могут быть связаны между собой только на базе теории течений с учетом их приращений.

Приращения деформаций образованы из упругой (обратимой) и пластической (необратимой) составляющих. При этом, пластическая составляющая приращений деформаций и напряжений согласно этой теории может быть охарактеризована некоторой поверхностью, называемой поверхностью нагрузок или поверхностью пластического потенциала. Пластическое течение развивается по нормали к этой поверхности (ассоциированная теория) или с отклонением от нормали (неассоциированная теория). Как правило, эти поверхности строятся на базе предельных поверхностей материала путем их трансформации (деформационного упрочнения) или смещения (трансляционное упрочнение). Различные варианты теорий течений отличаются способом построения этих поверхностей.

Теории течений, которые можно было бы применить к расчету бетонных и железобетонных конструкций, развиты значительно меньше по сравнению с деформационными. Первые исследования по применению теорий течений для бетона выполнены В.С. Ленским, С. Бажантом, В.М. Кругловым [9] и др. Как выяснилось, современные варианты деформационной теории, и теорий течений базируются на предельных поверхностях материала, описывающих прочность бетона и железобетона при сложном (трехосном) напряженном состоянии. В деформационной теории указанные поверхности определяют параметры нелинейности, а в теориях течения они используются для построения поверхностей нагрузок, пластического потенциала и т.д.

Основы современных представлений о теории прочности бетона при трехосном напряженном состоянии были заложены М.М. Филоненко-Бородичем, Г.А. Гениевим, В.Н. Киссюком, Г.А. Тюпиним [3], Г.С. Писаренком, А.А. Лебедевым, Т.А. Баланом, С.Ф. Клованичем [6], Н.И. Карпенком [5] и его учениками, S. Dei Poli [10], К.Н. Gerstle [11], Н.В. Kupfer [12] и др.

Появление современных скоростных ЭВМ с большим объемом памяти сделало возможным решение задач со сложными расчетными моделями численными методами. В такой ситуации главным является вопрос о выборе эффективного численного метода.

На сегодняшний день метод конечных элементов (МКЭ) занял ведущее место благодаря своим очевидным преимуществам, возможности приведения задачи к системе линейных или нелинейных алгебраических уравнений без предварительной формулировки их дифференциальных аналогов, условного разбиения сплошной среды конструкции на ряд элементов, которые сохраняют ее свойства.

В работе D. Ngo [13] и A.C. Scordelis впервые использовали МКЭ для расчета конструкций, которые работали в условиях плоского напряженного состояния. В настоящее время в большинстве численных исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций по предложению А.А. Гвоздева [2] и Н.И. Карпенка [5] используются однотипные конечные элементы, образованные комплексным, нелинейным, анизотропным композиционным материалом, который состоит из двух сплошных сред - бетона и "размазанной" с помощью коэффициента армирования арматуры. Наибольшие успехи в моделировании работы железобетона с трещинами на основе МКЭ были достигнуты исследователями при использовании теории Н.И. Карпенка, которая стала известным обобщением традиционной теории В.И. Мурашева для случая сложного напряженного состояния, и которая прошла широкую апробацию в отечественных программных комплексах.

Для достижения поставленной цели по принятому четырехфакторному плану Бокса B_4 были реализованы численные эксперименты с помощью ПК «Лира 9.6», «Лира SAPR»

Бетон и арматура в опытных образцах работают совместно, но имеют разные физико-механические свойства (табл. 1), характеризуются нелинейными зависимостями между напряжениями и деформациями. В связи с этим для реализации конечно-элементных моделей исследуемых железобетонных элементов в ПК «Лира 9.6» и «Лира SAPR» дополнительно были введены апробированные полные диаграммы де-

формирования бетона ГП "НИИСК" (А. Н. Бамбура [1]) и двухлинейные диаграммы деформирования арматуры, представленные на рис.1.

Таблица 1. Физико - механические характеристики материалов

№ п/п	Характеристика	Бетон			Арматура	
		C16/20	C30/35	C40/50	A 500С	BpI
1	Предельный прочность на сжатие, σ_{cm}^{np} , МПа	15,3	25,5	35,7	500	395
2	Предельные прочность на растяжение, σ_p^{np} , МПа	1,69	2,37	2,97	500	395
3	Начальный модуль упругости, E_b , МПа	23665	30600	34995	190000	200000
4	Сжимаемость, $\varepsilon_{bR} \cdot 10^{-5}, \varepsilon_{so} \cdot 10^{-5}$	166	181	194	263	198
5	Предельная сжимаемость, $\varepsilon_{bu} \cdot 10^{-5}, \varepsilon_{su} \cdot 10^{-5}$	496	395	321	2500	2500
6	Предельная растяжимость, $\varepsilon_{bu} \cdot 10^{-5}, \varepsilon_{su} \cdot 10^{-5}$	16,6	18,1	19,4	2500	2500
7	Коэффициент Пуассона, ν	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25

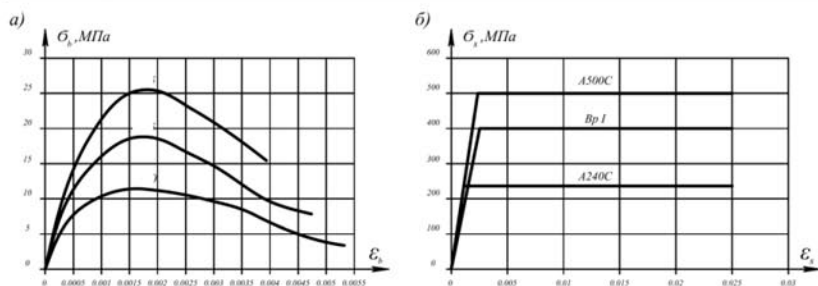


Рис.1 - Диаграммы деформирования материалов: а) бетона б) арматуры

Анализ ранее указанных теорий показал, что наибольшее практическое и прикладное значение для оценки прочности бетона при сложных напряженных состояниях имеют феноменологические теории прочности. Поэтому, предел прочности бетона при сложном неравномерном напряженном состоянии при исследовании работы указанных элементов определяли с помощью феноменологического критерия прочности Г.А. Гениева, В.Н. Киссюка, Г.А. Тюпина [3].

При моделировании напряженно-деформированного состояния исследуемых элементов в численных экспериментах первой серии опытов выполнены нелинейные расчеты 25 балочных элементов с учетом ступенчатого возрастающей нагрузки в соответствии с вышеуказанным планом.

Учитывая симметрию исследуемых элементов, расчет осуществляли только для одной половины балки. Балки условно разбивали на объемные восьмиузловые изопараметрические конечные элементы № 236 с размерами $1 \times 1 \times 1$ см для удобства моделирования арматуры, а также в связи с тем, что в реальных балках в качестве крупного заполнителя был использован гранитный щебень фракций 5-10 мм. Количество элементов в модели исследуемых балок составляло, соответственно, 18800.

В расчетах применялся шаговый и шагово-итерационный методы с использованием кусочно-линейной зависимости № 14 библиотеки с соответствующим алгоритмом: если значение обобщенной деформации выходит за пределы заданной ломаной, то моделируется исключение материала ($E_i = 1$) элементарной площадки с работы сечения. При этом, выполнение численного эксперимента осуществляли по схеме однопролетной свободно опертой балки, поочередно загруженной то сверху, то снизу двумя сосредоточенными силами без изменения ее (балки) положения.

Выводы

1. Разработанная на кафедрах ЖБ и КК, а также сопротивления материалов методика, позволила экспериментально изучить трещиностойкость, жесткость, механизмы деформирования и разрушения приопорных участков железобетонных элементов, которые подвержены действию малоцикловой знакопеременной нагрузки при различных соотношениях конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия:

- величины относительного пролета среза (a/h_0);
- класса бетона (С);
- количества поперечной арматуры в пролете среза (ρ_{sw});
- режима нагружения балок (η).

2. Использование нелинейного конечно-элементного расчёта в апробированных программных комплексах «Ли́ра 9.6», и «Ли́ра SAPR» и адаптированной слоистой деформационной модели даёт возможность достоверно моделировать напряженно-деформированное состояние

балочных элементов, испытывающих действие малоциклового нагружения высоких уровней, реально прогнозировать их несущую способность.

Литература

1. Бамбура А.Н. Использование полных диаграмм деформирования бетона в расчетах балок на деформируемом основании / А.Н. Бамбура, А.И. Давиденко // Совершенствование методов расчета и проектирования современных видов строительных конструкций: тезисы докладов научно-практ.конф. – Ровно, 1988. – С. 93-94.
2. Гвоздев А.А. Прочность элементов с двухзначной эпюрой моментов на действие поперечных сил / А.А. Гвоздев, А.С. Залесов, Х.А. Зиганшин // Бетон и железобетон. - 1982, №3 - с. 38-39.
3. Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
4. Ильюшин А.А. Пластичность / Ильюшин А.А. – М.: Ан СССР, 1963. – 424с.
5. Карпенко Н.И. К построению общих критериев деформирования и разрушения железобетонных элементов / Н.И. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2002. - №5 – С. 19-23.
6. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С.Ф. Клованич, И.Н. Мироненко.// – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110с.
7. Козачевский А.И. Модификация деформационной теории пластичности бетона и плоское напряженное состояние железобетона с трещинами / А.И. Козачевский // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – №4. – С.12-16.
8. Корсун В.И. Расчёт конструкций на температурные и силовые воздействия с учётом неоднородности свойств материалов [Текст]: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Корсун Володимир Иванович; Донецька держ. акад. буд-ва та арх-ри. – Макіївка, 2005. – 365 с. – Бібліогр.: С. 326-364.
9. Круглов В.М. Нелинейные соотношения и критерий прочности бетона в трехосном напряженном состоянии / В.М. Круглов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987.– №1. – С.40-44.
10. Dei Poli S. Present State of Some basic Resear – ches on Concrete: The behavior Until Failure, under Multiaxial Stresses / Dei Poli S.// J. Ital. Cem. – 1980. – V.50, №9. –P. 633-658.
11. Gerstle K.H. Simple Formulation of Triaxial Concrete Behavior / Gerstle K.H. // ACI Journal. – 1985. – №5. – P.382-387.
12. Kupfer H., Hilsdorf H., Rush H. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H. Kupfer, H. Hilsdorf, H. Rush // “ACI Journal”, proc. V.66, №8, 1969.
13. Ngo D. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam / Ngo D., Scordelis A.C. // ACI Joarnal. – 1967. – V.64, №3. – P.152-163.