УДК 624.04:624.012.45

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ АРМАТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Шеин Александр Иванович,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Земцова Ольга Григорьевна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Азимова Яна Александровна,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза,

аспирант, ассистент кафедры «Механика».

Аннотация

В статье рассмотрена методика создания и расчета математической модели композитной системы с арматурными стержнями. Описаны способы применения данной математической модели при возникновении и движении трещин. Кроме того, показана постановка задачи оптимизации арматуры композитных систем.

Ключевые слова: метод конечных элементов, МКЭ, композитный материал, математическая модель, трещина, оптимизация.

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THE ARMATURE OF COMPOSITE SYSTEMS BY THE METHOD OF FINITE ELEMENTS

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department “Mechanics”.

Zemtsova Olga Grigorevna,
Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Mechanics".
Azimova Jana Aleksandrovna,
Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
Post-graduate student, Assistant of the department "Mechanics".

Abstract

The article considers the method of creating a mathematical model of a composite system with reinforcing bars. The methods of applying this mathematical model are described with allowance for the occurrence and movement of cracks. In addition, the problem of optimization of reinforcement is formulated.

In the article the technique of formation and calculation of a mathematical model of a composite system. The methods of application of this mathematical model for the occurrence and movement of cracks are described. In addition, the optimization problem of the reinforcement of the composite system is formulated.

Keywords: finite element method, FEM, composite material, mathematical model, crack, optimization.

Введение. Механические системы, состоящие из композитных материалов, завоевывают все большую популярность. Они широко применяются в строительстве, авиастроении, судостроении. Такие материалы обычно состоят из двух или нескольких компонентов. В основе композитов лежит ***связующий*** материал-матрица. Прочность по заданным направлениям обеспечивает ***армирующий*** материал – стальная или углепластиковая арматура, волокна, фибра, нитевидные кристаллы. В связи с этим работа конструкции из композита существенно зависит от расположения армирующего материала, или от упорядоченности композита.

Чаще всего расчет композитных систем методом конечных элементов (МКЭ) содержит процедуру «размазывания» характеристик армирующих структур по телу конечного элемента [1]. Практически это заключается в подборе констант ортотропии при решении плоских задач или констант анизотропии при решении объемных задач. В расчетном комплексе ANSYS [2] имеется возможность создавать комбинированные конечные элементы из кубических элементов связующего материала с шарнирными узлами и шарнирно-стержневых армирующих. Кроме того, в ANSYS можно представлять композит в виде кубиков (прямоугольных параллелепипедов), состоящих из наборов слоев материалов с различной ориентацией и свойствами ортотропного материала в каждом слое. Подобный подход предложен и в [3]. В работе [4] предлагается альтернативный простой, надежный и физически наглядный метод конечно-элементного представления композита. В данной статье описывается развитие этого метода.

Модель композита. Представим отдельно кинематическую схему арматуры, наилучшим способом аппроксимирующую армирующий материал, и кинематическую конечно-элементную схему тела связующего материала, наиболее подходящую для его расчета. Поставим только одно условие: **все** узлы кинематической схемы арматуры должны совпадать с частью узлов кинематической схемы тела связующего.

Покажем данный способ на примере конечно-элементной модели симметричной относительно центральной вертикальной оси железобетонной балки. На рисунке 1а показана кинематическая конечно-элементная схема бетонного тела балки. На рисунке 1б приведена кинематическая схема арматуры.

После формирования отдельных матриц жесткости бетонного тела и арматуры, последняя должна быть расширена до размерности первой. Затем обе матрицы складываются, образуя тем самым глобальную матрицу жесткости композитной системы – железобетонной балки. В ряде случаев матрица жесткости арматуры может содержать нулевые строки и столбцы. Физически это означает, что арматурные стержни могут быть не сопряжены в один каркас.

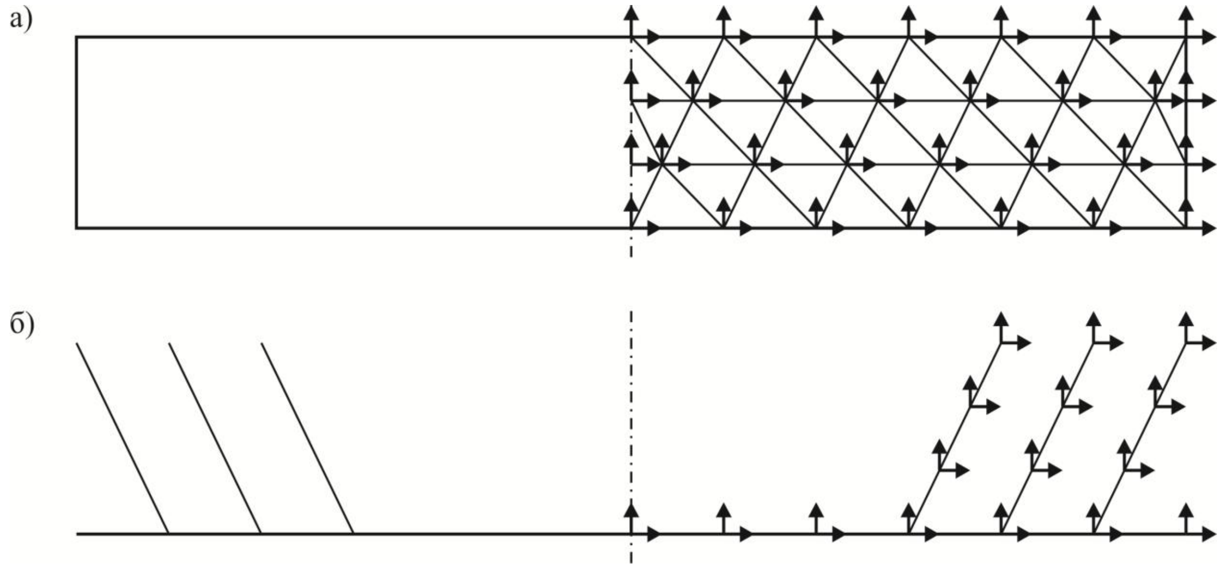

Рисунок 1 – Кинематические модели компонентов композита

а) кинематическая модель тела бетона (справа от оси симметрии);

б) кинематическая модель арматуры

При наложении кинематических схем одновременно складываются и матрицы жесткости.

Расчет в условиях трещинообразования [4] лучше производить в виде серии численных экспериментов при возрастающей нагрузке. Если при выполнении какого-либо расчета деформации конечного элемента превышают предельные, то число перемещений одного из узлов этого конечного элемента тела бетона удваиваем. На рисунке 2 показана кинематическая схема тела бетона после разрыва заштрихованного элемента. Кроме того, процесс возникновения и движения трещин можно моделировать введением дополнительных двух узлов в тело того бетонного элемента деформации которого превышают предельные (рисунок 3).

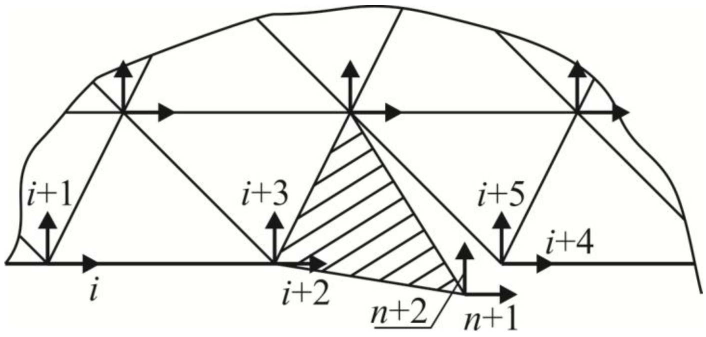

Рисунок 2 – Модель трещинообразования
с введением одного дополнительного узла

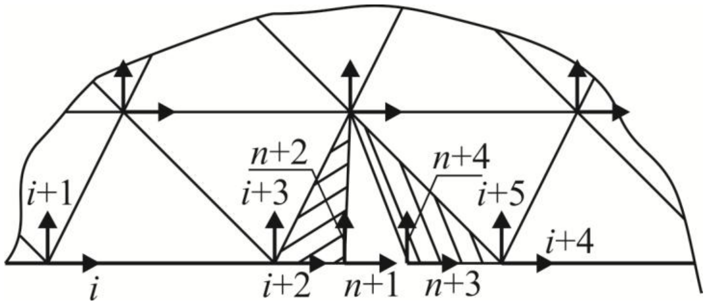

Рисунок 3 – Модель трещинообразования
с введением двух дополнительных узлов

Направление главных деформаций [4], а, следовательно, и направление перпендикулярное разрыву определяется соотношением

$$tg(2\alpha) = \gamma_{xy} / (\varepsilon_x - \varepsilon_y),$$

где α – угол наклона главной деформации к оси *x*.

Если, например, образуется нормальная трещина, то в зоне ее зарождения образуется новый элемент длиной

$$l_{m+1} = (\varepsilon_x - [\varepsilon^+]) \cdot a,$$

где *a* – длина первоначального конечного элемента вдоль растянутой арматуры.

Оптимизация. Задача оптимизации арматуры в железобетонных балках может быть направлена на минимизацию расхода арматуры за счет уменьшения сечений, шага, углов наклона стальных стержней. Математически задачу оптимизации арматуры при заданной нагрузке (или при заданных векторах нагрузок) можно представить в виде:

Найти $\quad min \quad V=\sum_{i=1}^{n}\rho A_i l_i$

при

$$K(A_i,\beta_i)\cdot U=P,$$
$$\varepsilon_{1j}\le\left[\varepsilon^{+}\right],$$
$$\varepsilon_{2j}\ge\left[\varepsilon^{-}\right].$$

Здесь V – объем арматуры, ρ – плотность стали, A_i – площадь сечения i-ого стержня, β_i – углы наклона поперечной арматуры, l_i – длина i-ого стержня, ε_{1j} – наибольшая главная деформация бетона в конечных элементах, $[\varepsilon^{+}]$ – допустимая деформация растяжения бетона, ε_{2j} – наименьшая главная деформация бетона в конечных элементах, $[\varepsilon^{-}]$ – допустимая деформация сжатия бетона.

Выводы. Используя предложенную математическую модель можно осуществлять следующие расчетные действия для композитных систем с арматурными стержнями: 1) выполнять поверочный расчет с определением напряжений и деформаций в бетоне и арматуре; 2) определять траектории развития трещин; 3) оптимизировать массу и расположение арматуры; 4) определять действительные прогибы.

Библиографический список:

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с., ил.

2. Kachlakev D., Miller T., Chansawat K., Potisuk T. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates: Final Report State Research Project #316. Oregon Department of Transportation Research Group.

3. Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. Одесса, 2007. 110 с.

4. ШеинА.И. Метод ограниченных деформаций при решении проектной задачи для железобетонных конструкций // Науковедение. 2017. №2. Том 9. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/08TVN217.pdf (доступ свободный).

5. Shein A., Zemtsova O. Method of limited deformations for the calculation of parameters of reinforced concrete structures sections // Ponte. Apr. 2017. Volume 73.Issue 4.

6. Справочник по строительной механике корабля.Том 2 / Под общей редакцией О.М. Палия. Ленинград: Судостроение, 1982.

7. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Москва: НИИЖБ, 2004. Дата актуализации: 01.02.2017.

8. Шеин А.И., Земцова О.Г., Бучин Ю.Д. Метод ограниченных деформаций при расчете приопорных участков железобетонных балок и диафрагм жесткости [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №5. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no5/stroitelnaya-mehanika/5.2/at_download/file