

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, Г. М. КУЗЁМКИНА, О. И. ЯКУБОВИЧ
Белорусский государственный университет транспорта

Постановка арматуры в матрицу композита дает возможность увеличения прочности и жесткости машиностроительных и строительных конструкций. Качества композитного материала в значительной степени зависят от свойств поверхностей сцепления его контактирующих фаз. Ранее нами разработана конечноэлементная модель железобетонной конструкции, отличительной особенностью которой является моделирование арматуры трехмерным деформируемым твердым телом, что позволило установить некоторые особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, находящихся под нагрузкой.

В представленной работе поставлена задача о нахождении влияния свойств контакта арматуры с матрицей композита и расположения арматуры на напряженно-деформированное состояние несущей балки.

Вычисления выполнены исходя из того, что между материалами композита имеется сухое трение, определяемое законом Кулона. Значения коэффициентов трения принимались в диапазоне от 0 до 1, который соответствует разным физическим свойствам поверхностей контактирующих фаз композита. Учет адгезии между материалами может приводить к значениям коэффициента трения, превышающим 1.

Анализ состояния контакта между соприкасающимися поверхностями показал, что проскальзывание отсутствует только на небольших участках соприкосновения между арматурой и матрицей композита. Эти участки расположены в верхних частях арматурных стержней на расстояниях, не превышающих пяти диаметров арматуры от места защемления. Различия в модулях упругости материалов композита приводит к тому, что между арматурой и матрицей образуется зазор. Установлена его зависимость от коэффициента трения между деталями несущей балки.

Расчеты показали, что при отсутствии трения максимальные эквивалентные напряжения наблюдаются в заделанном поперечном сечении. При увеличении коэффициента трения место с максимальными эквивалентными напряжениями смещается от защемленного конца балки на величину, соответствующую 2–3 диаметрам арматуры. Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в материале арматуры монотонно возрастают по мере увеличения коэффициента трения. Аналогичная зависимость обнаружена и для первого главного напряжения.

Анализ влияния коэффициента трения на жесткость конструкции показал, что значения деформаций при увеличении трения между фазами композита могут быть снижены на 15 % и более. Учет когезии может еще больше увеличить этот эффект.

Помимо расчета напряженно-деформированного состояния балки при малых коэффициентах трения между арматурой и бетоном выполнен анализ ее деформирования при коэффициентах трения, превышающих единицу. Результаты расчетов показали, что при малых значениях параметра f силы трения недостаточны для того, чтобы удержать арматуру от скольжения относительно матрицы. При увеличении коэффициента трения до значения $f = 4$ прекращается относительное смещение верхних стержней, а нижние стержни смещаются внутри бетонной матрицы. При больших значениях коэффициента трения относительное смещение стержней прекращается. Отметим, что при «средних» значениях коэффициента трения существенно ухудшается сходимость решения, и время расчета увеличивается на порядок. Например, при коэффициенте трения $f = 0$ время расчета составило 3 часа, при $f = 2 \dots 147$ часов, при $f = 10 \dots 3,5$ часа.

Выполнен ряд расчетов с целью установления влияния расположения арматурных стержней на напряженно-деформированное состояние балки. При этом изменялось расположение осей арматурных стержней внутри матрицы композита.

При изменении положения стержней по горизонтали деформации конструкции, а также напряжения в бетоне практически не изменяются. Напряжения в арматуре при смещении боковых арматурных стержней от продольной вертикальной плоскости симметрии балки к ее боковым стенкам незначительно увеличиваются (с 30,8 до 31,4 МПа). Таким образом, изменение положения арматурных стержней по горизонтали практически не оказывает влияния на прочность и жесткость балки.

В то же самое время смещение арматурных стержней по вертикали оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние балки. Увеличение расстояния от арматурных стержней до горизонтальной плоскости симметрии матрицы приводит к увеличению жесткости конструкции. Этот вывод очевиден и подтверждает результаты, получаемые с применением приближенных теорий деформирования армированных стержневых элементов конструкций.

Напряжения в арматурных стержнях увеличиваются при смещении арматурных стержней от середины балки к верхней и нижней граням. Максимальные первое главное и эквивалентное напряжения в бетоне при таком смещении арматуры уменьшаются. Теория деформирования, предполагающая сохранение плоской

формы поперечными сечениями балки, дает противоположный результат.

Заметим, что максимальные первые главные напряжения соответствуют напряжениям образования первых трещин в железобетоне. Таким образом, полученный результат позволяет выработать рекомендации по обеспечению прочности железобетонных конструкций путем изменения расположения упрочняющей арматуры в бетонной матрице.

УДК 624.04

КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Н. С. ЦЕТЬКО
БелНИИС

В отечественной и зарубежной литературе имеется значительное количество публикаций по нелинейной динамике строительных конструкций, посвященных вопросам геометрической нелинейности протяженных и гибких конструкций, а также по статическим расчетам всех видов строительных конструкций с учетом нелинейного характера деформирования материала. Каждый из этих подходов признан единственно возможным для корректного описания процесса деформирования конструкции и определения требуемых в рамках этих расчетов параметров. Эти же идеи в настоящее время реализованы во всех современных расчетных программных комплексах.

Вопросы учета физической нелинейности материала в расчетах на динамику (сейсмике, пульсации ветра, действие машин и механизмов) до настоящего времени не нашли должного отражения ни в теоретических исследованиях, ни в практике проектирования. Это отчасти можно объяснить сравнительной сложностью задач динамики и тем разнообразием возможных проявлений нелинейных эффектов, которые имеют место при решении нелинейных уравнений движения. Подготовка и реализация численных алгоритмов решения задач нелинейной динамики также представляет собой более трудоемкий и ресурсоемкий процесс по сравнению со статикой и линейной динамикой. Однако все материалы несущих строительных конструкций в той или иной степени нелинейны, и пренебрежение этим фактом в задачах динамики сооружений может привести к ошибкам как качественного, так и количественного характера.

В рамках выполненных автором исследований по физически-нелинейной динамике балочных элементов строительных конструкций решены следующие задачи:

- получены точные формулы для периода и амплитуды колебаний простых балок с одной степенью свободы из физически нелинейного материала, движение которых описывается уравнением Дюффинга;
- определено значение количества начальной энергии, необходимого для существования устойчивых колебаний;
- построены графики начальных условий, определяющих область устойчивых нелинейных колебаний балок с одной степенью свободы с различными опорными закреплениями для характерных конструктивных материалов;
- построен алгоритм решения задачи о свободных и вынужденных нелинейных колебаниях балок с различными опорными закреплениями с одной степенью свободы с учетом и без учета сил сопротивления;
- получено решение задачи о физически нелинейных колебаниях свободно опертой балки с одной степенью свободы при учете поправки на сдвиг и инерцию вращения, определено выражение для частоты свободных нелинейных колебаний модели балки Тимошенко;
- показаны два способа выражения потенциальной энергии изгиба системы: через определенный интеграл по объему тела от деформации и через зависимость «момент – кривизна»;
- предложен метод решения задачи о нелинейных колебаниях балок с различными опорными закреплениями с несколькими степенями свободы;
- решены задачи о свободных колебаниях балки с бесконечным числом степеней свободы при различных граничных условиях в нелинейной постановке;
- обозначен алгоритм уточненного исследования нелинейных колебаний железобетонных балок с учетом трещинообразования и несимметричной жесткости;
- выведены уравнения, определяющие границы безопасных начальных условий по критериям трещиностойкости и прочности (по I и II группам предельных состояний) для колебаний железобетонных балок в линейной и нелинейной постановках.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1 Применение нелинейных зависимостей ведет к изменению поведения балок под нагрузкой, изменению периода и амплитуды колебаний по сравнению с линейным решением. Обозначенные изменения прослежи-