

женно-деформированного состояния, что в свою очередь позволит избежать образования вторичных горизонтальных трещин. Это дает возможность с достаточной надежностью производить расчет изгибаемых элементов с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном по первой и второй группам предельных состояний согласно общим методикам расчета изгибаемых элементов проекта норм СНБ 5.03.01-98, рассматривая усилие предварительного обжатия, определенное с учетом всех потерь, как внешнее усилие, приложенное к конструкции. Допускается расчет сечений по прочности производить по методу предельных усилий, условно принимая напряжения в напрягаемой арматуре равными величине предварительного напряжения с учетом всех потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев П.И., Пересыпкин Е.Н. Метод расчета раскрытия швов и трещин в массивных бетонных конструкциях. Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 58, М., Энергия, 1970.
2. Белов В.В. Блочная модель деформирования массивных бетонных и железобетонных элементов с макротрещинами // Гидротехническое строительство. 1994, №9, С.147-151.
3. Белов В.В. Пространственная блочная модель деформирования нетрещиностойких предварительно напряженных балок таврового сечения // Совершенствование методов расчета и исследования новых типов железобетонных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. СПбГАСУ, СПб, 1995, С.51-57.
4. Деркач В.Н. Совершенствование армирования железобетонных изгибаемых элементов с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном // Экспериментальные исследования и расчет строительных конструкций: Сборник научных трудов ЦНИИпромзданий.-М., 1992, С.3-6.

УДК 624.012.45

Жукьян А.П.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА И АРМАТУРЫ

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет эффективно решать самые различные задачи в области расчетов строительных конструкций. При этом он допускает введение расчетных схем сложной геометрической конфигурации, назначение любых граничных условий, введение в расчет элементов с различными характеристиками или даже описываемых разными математическими моделями. Вычислительные комплексы МКЭ (MSC/NASTRAN, COSMOS-M, RSTAB, ЛИРА, МИРАЖ, SCAD) позволяют с высокой точностью определить поля напряжений и деформаций для плоских и пространственных конструкций от нагрузок и воздействий различной природы (гравитационных, тепловых и др.). Однако, для физически и геометрически нелинейного анализа железобетонных конструкций они мало пригодны, так как не учитывают реальную работу сечения с трещиной. Большинство прикладных программ для расчета конструкций по методу конечных элементов в качестве геометрических характеристик использует жесткость сечения без трещины, а в качестве ха-

рактические характеристики материала — модуль упругости бетона. Особую значимость учет физической нелинейности имеет для статически неопределимых конструкций, так как ошибка при определении внутренних усилий железобетонных конструкций с использованием линейных методов строительной механики может достигать 50-150% [1]. В общем случае расчет железобетонных статически неопределимых конструкций представляет собой как физически, так и геометрически нелинейную задачу. В отличие от металлических элементов, у которых геометрические сечения постоянны и физические свойства материала характеризуются либо модулем упругости, либо диаграммой "напряжение-деформация", железобетонные сечения в зависимости от внутренних усилий имеют непостоянные геометрические и физические характеристики. Дополнительная сложность определения геометрических характеристик железобетонного сечения возникает из-за перераспределения усилий внутри самого сечения при изменении внешней нагрузки.

Исследования показали, что изгибная жесткость железобетонного сечения с трещиной при достижении несущей способности уменьшается в десятки раз по сравнению с первоначальной. Однако, для расчета статически неопределенных конструкций определение каких-либо фиксированных значений жесткости, отличных от первоначальной, невозможно, вследствие отсутствия точных данных об уровне внутренних усилий от действия заданной нагрузки. Использование функций вместо постоянных в матрице жесткости для конечно-элементного анализа также невозможно. Для преодоления этого препятствия расчет конструкции по методу конечных элементов включается в некоторый итерационный процесс, использующий в качестве переменной жесткость элемента. Внешняя нагрузка прикладывается в несколько этапов, после каждого уточняется жесткость, которая переносится в матрицу жесткости системы для расчета следующего этапа. При решении нелинейной задачи используется итерационный алгоритм с построением матриц жесткости всей системы и вычислением невязок в условиях равновесия узлов на каждом шаге итерации. Решение завершается при величинах невязок, не превышающих заранее заданной точности расчета. Итерационный процесс прекращается при приложении всей внешней нагрузки. В результате определяется напряженно-деформированное состояние статически неопределимой системы с учетом реального перераспределения внутренних усилий от начала работы конструкции до ее разрушения.

Проблема определения истинной деформированной схемы и напряженного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций имеет ряд сложностей, связанных с необходимостью раскрытия как внешней статической неопределимости (расчет конструкции в целом) так и внутренней статической неопределимости композитных элементов и их сечений. Для исследования напряженно-деформированного состояния статически неопределимых конструкций получили применение итерационные методы расчета. Их общим признаком является наличие той или иной схемы последовательных приближений для определения жесткостных характеристик элементов конструкции. В ранее предложенных алгоритмах итерационный процесс, как правило, расходится при достижении текучести арматуры, т.е. они определяют напряженно-деформированное состояние конструкции только в эксплуатационной стадии.

По существующей в действующих нормах проектирования методике не представляется возможным определить жесткостные параметры сечения на произвольной стадии нагружения.

В последнее время широкое применение получил метод сечений с использованием деформационной модели, позволяющей с единых универсальных позиций рассчитывать железобетонные элементы любой формы поперечного сечения, со

произвольными классами арматуры и бетона, различным распределением арматуры в сечении. Характерной особенностью модели является применение, кроме уравнений равновесия усилий, условий деформирования сечения и диаграмм состояния бетона и арматуры. Используя зависимость $\frac{1}{r} = \frac{M}{B}$, разбив интервал от $M_{\min}$ до $M_{\max}$ на определенное число участков, определяем в зависимости от действующего момента в сечении изгибную жесткость.

Характер изменения жесткости в сечении получен расчетом с использованием разработанной в ПГУ программы "Beta" по расчету нормальных сечений железобетонных элементов, в которой реализована деформационная модель [2, 3], предложенная в проекте СНБ 5.03.01.

В качестве примера рассмотрим железобетонную плиту сечением 720x220 мм, армированную 2 стержнями диаметром 12 мм с временным сопротивлением 735 МПа, бетон С25/30. Результаты расчета плиты без предварительного напряжения арматуры представлен на рис. 1, с предварительным напряжением (уровень напряжения 480 МПа) представлен на рис. 2.



Рис. 1. Результаты численного эксперимента плитной конструкции без предварительного напряжения арматуры

Жесткость изгибаемых конструкций после появления трещин незначительно зависит от применяемой диаграммы деформирования бетона, тогда как жесткость до момента трещинообразования имеет различные значения. Особая важность определения фактической жесткости имеет место для статически неопределимых конструкций, так как именно изменение жесткостных параметров по длине определяет характер внутренних усилий с учетом перераспределения. Для построения зависимости момент – кривизна необходимо применять диаграмму деформирования бетона на сжатие с ниспадающей ветвью, так как проведенные исследования показали, что применение обычных диаграмм деформирования дает занижение значений изгибной жесткости, что в конечном итоге влияет на масштаб перераспределения усилий.

Зависимость жесткости сечения от изгибающего момента

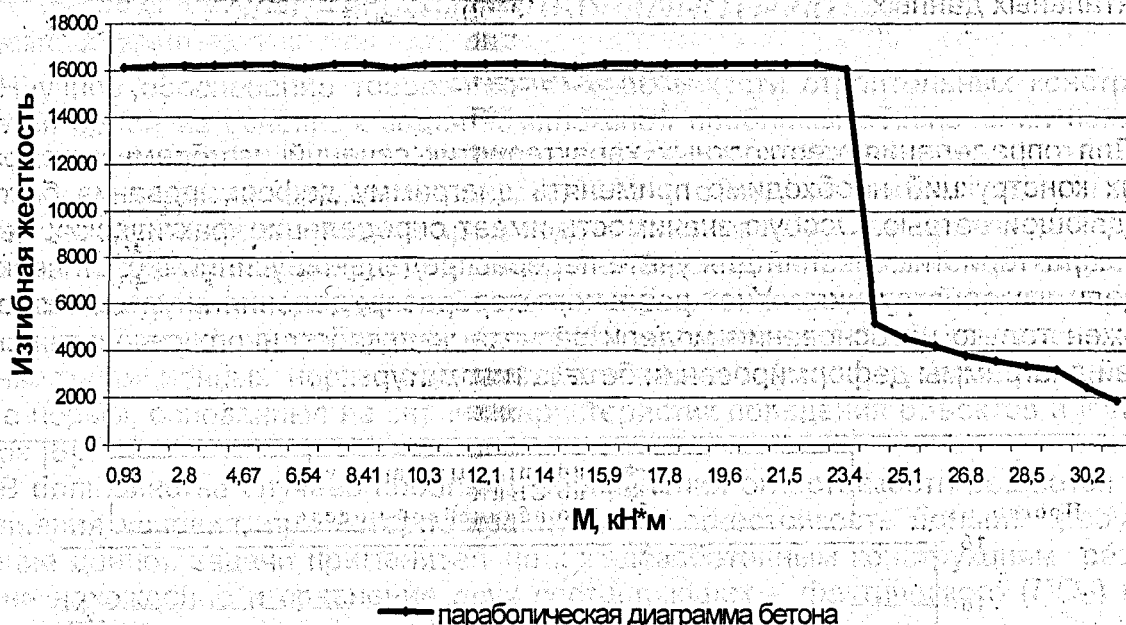


Рис. 2.

Результаты численного эксперимента плитной конструкции с предварительным напряжением арматуры

Для подтверждения теоретических предположений были проанализированы результаты испытаний железобетонных трех плит-"близнецов", имеющих отношение l/h равное 17. Плиты сечением $380 \times 120 \times 2000$ мм армированы арматурной проволокой класса В500, имеющей предел текучести 575 МПа, временное сопротивление 720 МПа. Нормативное сопротивление бетона 22 МПа, что соответствует классу В30. При испытании бетонных призм на сжатие и образцов арматуры на растяжение для сопоставления с расчетными, кроме основных прочностных и деформационных показателей, определялись диаграммы деформирования бетона для восходящей ветви и арматуры. Испытания конструкций проводили согласно методике ГОСТ 8829-94. За разрушающий изгибающий момент согласно разработанной теории расчета принят изгибающий момент, соответствующий не физическому или условному пределу текучести арматуры, а максимальному значению приложенной нагрузки. Конструкции испытывали на специально разработанных испытательных стендах на действие кратковременной нагрузки, прикладываемой при помощи гидравлического домкрата через распределительные траверсы. Нагрузку прикладывали ступенями, каждая из которых не превышала $1/15$ предполагаемой расчетной разрушающей нагрузки с выдержкой на этапе 10 минут. После появления трещин выдержку на этапах увеличивали до 20 минут. Отсчеты по приборам снимали дважды - сразу после приложения нагрузки и в конце выдержки.

Для сравнения опытных прогибов плит и расчетных, были произведены расчеты с учетом фактических диаграмм растяжения арматуры, действительных геометрических размеров балок и прочности бетона в день испытания по методике СНиП 2.03.01-84* и по предложенной нелинейной модели. Результаты испытаний и расче-

тов различными методиками плит по второй группе предельных состояний представлен на рис. 3.

Характер изменения жесткости сечений принят с использованием параболической диаграммы деформирования бетона, которая была получена на основе экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения жесткостных характеристик сечений изгибаемых железобетонных конструкций необходимо применять диаграмму деформирования бетона с ниспадающей ветвью. Особую значимость имеет определение фактических жесткостных характеристик сечений для учета перераспределения усилий в статически неопределимых конструкциях. Учет реального перераспределения внутренних усилий возможен только на основании модели расчета железобетонного сечения, использующей диаграмму деформирования бетона и арматуры.

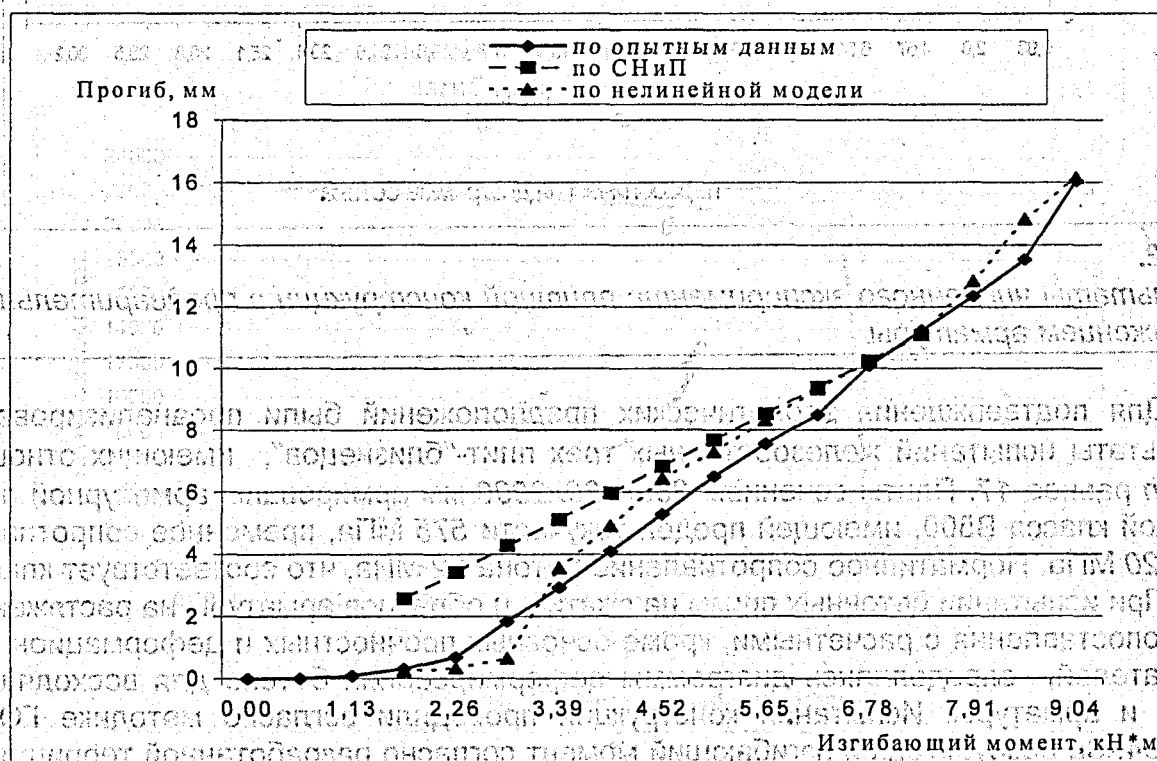


Рис. 3. Опытный и расчетный прогиб конструкции в зависимости от изгибающего момента

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьев Д.О. Теория и расчет реконструируемых железобетонных конструкций: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — СПб, 1995. — 40 с.
2. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. Минск: Изд-во ..., 1998. — 200 с.
3. Лазовский Д.Н., Пецольд Т.М. Усиление железобетонных конструкций: Пособие П 01-98 к СНиП 2.03.01-84*. — Минск: Министерство арх. и стр-ва Республики Беларусь, 1998. — 195 с.