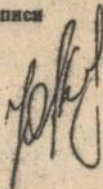


ПРИДНЕПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

на правах рукописи

КОЖАНОВ Юрий Алексеевич



**ПРОЧНОСТЬ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
ПРОДОЛЬНОЙ И ДИСКРЕТНО УСТАНОВЛЕННОЙ
ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции

здания и сооружения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск 1995

АВ 33.868

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре железобетонных и каменных конструкций Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.

Научный руководитель - доктор технических наук,

профессор

БАТАШЕВ В.М.

Научный консультант

- доктор технических наук,
профессор САВИЦКИЙ Н.В.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор КЛИМОВ Ю.А.

- кандидат технических наук
ИЗЮТОВ Ю.Л.

Ведущая организация - Приднепровский Промстройпроект

Защита состоится "27" 12 1995 г. в "13⁰⁰" часов на заседании специализированного совета по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры по адресу: 320060, г. Днепрпетровск, ул. Чернышевского, 24а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПГАСиА.

Автороферат разослан "27" 11 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного
совета

А. Лукьян

ЛУКЬЯНСКОВА А.Н.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00754802 (Q)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Имеющиеся в настоящее время методы расчета достаточно точно определяют несущую способность наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов с поперечной арматурой, устанавливаемой согласно расчету, но в отдельных случаях недооценивают несущую способность наклонных сечений железобетонных элементов без поперечной арматуры или с небольшим ее количеством, а также с дискретно расположенными поперечными стержнями, т.е. установленными с шагом, превышающим максимально допустимый нормативными документами.

Существующая в настоящее время методика конструирования поперечного армирования требует совершенствования, так как не имеется достаточного теоретического и экспериментального обоснования требований по его назначению.

Таким образом, совершенствование теоретических основ сопротивления, практических методов расчета прочности наклонных сечений и методики проектирования поперечного армирования железобетонных изгибаемых элементов были и остаются одними из наиболее актуальных вопросов в теории и практике железобетона.

Цель работы. Разработка методики расчета прочности и методики проектирования армирования наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов с учетом влияния продольной и дискретно установленной поперечной арматуры.

Научную новизну работы составляют:

- новые экспериментальные данные о влиянии определяющих параметров на прочность наклонных сечений;
- зависимости для определения поперечной силы в наклонном сечении изгибаемого элемента, воспринимаемой продольной арматурой в предельном состоянии с учетом продольного усилия в ней;

ЛНБ им. В. Стефанюка
АН Украины

- методика расчета прочности наклонных сечений изгибаемых элементов без поперечного армирования и с дискретным расположением хомутов;

- методика проектирования и предложения по совершенствованию поперечного армирования изгибаемых железобетонных элементов.

Автор защищает:

- результаты анализа данных о прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при отсутствии поперечного армирования;

- экспериментальные данные, а также результаты анализа напряженно-деформированного состояния наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при изменении количества продольной и поперечной арматуры, величины пролета среза и расположения стержней поперечной арматуры;

- полученные аналитические зависимости, описывающие влияние усилия в продольной арматуры на прочность изгибаемых элементов по наклонным сечениям;

- методику расчета прочности наклонных сечений изгибаемых элементов без поперечного армирования и с дискретным расположением поперечных стержней;

- методику проектирования поперечного армирования и предложения по совершенствованию конструктивного поперечного армирования изгибаемых железобетонных элементов.

Практическая ценность работ заключается в том, что разрабатываемая методика расчета прочности наклонных сечений изгибаемых элементов без поперечного армирования и с дискретным расположением поперечных стержней позволяет усовершенствовать конструкцию поперечного армирования. Использование предлагаемой методики при проектировании и конструировании изгибаемых железобетонных конструкций позволяет получить более надежное и экономичное решение, а в некоторых случаях расширяет область применения железобетонных конструкций без поперечного армиро-

ван.я. Сформулированы предложения для корректировки нормативных документов и рабочей документации на типовые конструкции массового применения в части проектирования поперечного армирования. Результаты исследований использованы при переработке проектной документации типовых многопустотных плит серий 1.141.1 выпусков 29, 60 и 63, серии 125 и внедрены в производство на Люберецком ЗКПД, в тресте "Криворожжелезобетон" и Новоносковском ЗЖБК.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной конференции (г.Велгород, 1991 г.), на II и III Международных конференциях "Материалы для строительства" (г.Днепропетровск, 1993, 1994), на Межгосударственной научно-технической конференции (г.Магнитогорск, 1993 г.), на Международной научно-практической конференции (г.Сумы, 1994г.).

По теме диссертации опубликовано шесть работ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников из 89 наименований, приложения. Работа содержит 104 стр. машинописного текста, 9 таблиц, 59 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется состояние вопроса и поставлены задачи исследований. На основе анализа, в т.ч. и регрессионного, отечественных и зарубежных исследований посвященных изучению напряженно-деформированного состояния и механизма сопротивления железобетонных элементов в наклонном сечении при действии поперечных сил, сделаны следующие выводы:

1. На настоящее время накоплены обширные результаты исследований прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов без поперечной арматуры и с распределенной (установленной с шагом, соответствующим нормативным требованиям) поперечной арматурой. Имеющиеся экспериментальные данные о

прочности изгибаемых элементов с дискретно установленной (с шагом, превышающим нормативные требования) весьма ограничены.

2. Несмотря на большой объем экспериментальных данных о влиянии продольной арматуры на прочность наклонных сечений изгибаемых элементов, механизм этого влияния и количественная оценка остаются наименее изученными вопросами.

3. Анализ и сопоставление различных методов расчета прочности свидетельствует, что наиболее полно отражает физический процесс сопротивления и разрушения изгибаемых элементов от действия поперечных сил методика Ю.А.Климова. Эта методика может быть принята за основу при ее совершенствовании в части учета усилий, воспринимаемых продольной арматурой и распространении на случай дискретного расположения поперечной арматуры.

4. Требования по назначению конструктивного поперечного армирования (количества и шага) как в нормах стран СНГ, так и ЕС не имеют достаточного теоретического и экспериментального обоснования, требуется совершенствование методики конструирования поперечной арматуры.

С учетом состояния вопроса сформулированы основные задачи исследования:

- выполнить комплексные экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов при отсутствии поперечного армирования и дискретно расположенных поперечных стержней;

- провести численное моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов методом конечных элементов для выявления особенностей влияния продольной и дискретно установленной поперечной арматуры;

- выполнить экспериментальные и теоретические исследования влияния пролета среза, шага и места положения хомутов на напряженно-деформированное состояние стержней продольной арматуры;

- усовершенствовать методику расчета прочности наклонных сечений изгибаемых элементов и констр. проармирования поперечного армирования.

Вторая глава посвящена результатам экспериментальных исследований трех серий образцов, выполненных в соответствии с выводами и задачами.

Образцы представляли собой свободн. опертые однопролетные балки прямоугольного поперечного сечения 22 x 40 см и длиной 3 м, нагружаемые двумя сосредоточенными силами, расположенными на одинаковом расстоянии от опор. В первой серии варьировались количество продольной арматуры (2, 3 и 4 стержня \varnothing 22 АIII) и пролет среза. В балках второй и третьей серий изменялось поперечное армирование образцов. Во второй серии изменялись шаг и диаметр поперечных стержней, в третьей серии диаметр хомутов принимался равным \varnothing 8 АIII, а шаг увеличивался от 15 см, (предельно допускаемый СНиП 2.03.01 - 84^н для данных геометрических размеров поперечного сечения), до 40 см. Пролет среза принимался равным 2.5 h_0 . Наряду с балками в каждой серии изготавливались сопутствующие образцы-кубы и призмы для контроля кубиковой, призмочной прочности на сжатие и прочности на растяжение бетона, определяемой по испытаниям призм на изгиб.

В результате проведенных испытаний и анализа результатов установлено следующее.

Прочность наклонных сечений изгибаемых элементов без поперечного армирования зависит от количества продольной арматуры. Степень влияния количества продольной арматуры изменяется в связи с величиной относительного пролета среза - с увеличением пролета среза влияние продольной арматуры снижается.

Относительный уровень нагрузки, при которой образуются критические наклонные трещины в балках без поперечной арматуры, снижается с увеличением коэффициента продольного армирования и с уменьшением величины относительного пролета среза.

Для элементов без поперечной арматуры длина горизонталь-

ной проекции критической наклонной трещины возрастает с увеличением пролета среза и практически не зависит от количества продольной арматуры.

Изменение количества продольной арматуры вызывает перераспределение усилий, действующих в наклонном сечении балок без поперечной арматуры. С увеличением коэффициента продольного армирования:

- повышается доля поперечной силы, воспринимаемая бетоном сжатой зоны под вершиной наклонной трещины;
- понижается доля поперечной силы, воспринимаемая бетоном сжатой зоны над наклонной трещиной;
- повышается доля поперечной силы, воспринимаемая продольной арматурой;
- снижается вертикальная составляющая сил зацепления по наклонной трещине.

Установка минимального количества поперечной арматуры (даже одной плоскости хомутов в середине пролета среза) изменяет напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента.

Увеличение шага хомутов влияет на характер образования и развития наклонных трещин и трещин, развивающихся вдоль стержней продольной арматуры. Уровень поперечной силы образования критической наклонной трещины относительно разрушающей повышается с увеличением шага хомутов и уменьшением интенсивности поперечного армирования. Основание наклонных трещин находится в местах соединения поперечных стержней с продольной арматурой и у опор.

При увеличении шага хомутов от 0.4 до 0.8 h_0 прочность балок по наклонным сечениям остается на одном уровне. При дальнейшем увеличении шага хомутов свыше 0.8 h_0 происходит снижение прочности наклонных сечений до величины разрушающей поперечной силы для балок без хомутов.

Увеличение шага поперечных стержней повышает долю попе-

речной силы, воспринимаемую продольной арматурой, при постоянной интенсивности хомутов, снижает относительную величину вертикальной проекции сил зацепления и практически не влияет на соотношение поперечн. х сил над и под вершиной наклонной трещины.

В сопротивлении поперечной силе участвуют не только хомуты, пересекаемые критической наклонной трещиной, но и хомуты, вовлекаемые в работу стержнями продольной арматуры.

Деформации краевого волокна бетона сжатой зоны в нормальном сечении по середине пролета балки на стадии, предшествующей разрушению, не являются постоянной величиной.

Третья глава посвящена результатам численного моделирования напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов. Исследования были проведены на моделях из конечных элементов для уточнения и подтверждения выявленных закономерностей, а также для выяснения некоторых экспериментально установленных особенностей (например, образование нисходящих вертикальных трещин в сжатой зоне бетона в пределах пролета среза и др.).

Исследования проводились на ПЭМ IBM PC/AT с помощью интерактивной системы конечно-элементных расчетов "ИСКРА", являющегося адаптацией программного комплекса CASA/GIFTS, разработанного в Аризонском университете (США).

Задачи исследований включали:

- выявление закономерностей изменений напряженного состояния изгибаемого элемента в зависимости от количества продольной арматуры на стадии, предшествующей образованию критической наклонной трещины;
- анализ напряженно-деформированного состояния стержней продольной арматуры на всех стадиях работы балок как с поперечной арматурой, так и без нее;
- выявление изменений напряженного состояния изгибаемого элемента при изменении места положения стержней поперечной ар-

матуры.

За основную была принята расчетная схема в виде балки - стенки из конечных элементов двух типов: плоских четырехугольных для бетона и линейных стержневых для стержней продольной и поперечной арматуры. Для пластинчатых элементов был принят ортотропный материал, имеющий экспериментально полученные характеристики бетона на сжатие и растяжение во взаимно перпендикулярных направлениях. При этом разбивка на конечные элементы производилась таким образом, чтобы направления осей свойств материала в элементах совпадали с траекториями действия главных напряжений. Для стержневых элементов приняты фактические прочностные и геометрические характеристики арматуры. По мере увеличения нагрузки при исключении из работы пластинчатых элементов, в которых главные напряжения превышали эквивалентные напряжения по третьей и четвертой теории прочности, изменялась расчетная схема посредством имитации прохождения нормальных и критической наклонной трещин. Модуль деформаций в пластинчатых элементах сжатой зоны корректировался в соответствии с кусочно-линейно аппроксимированной диаграммой деформирования бетона.

При анализе результатов численного моделирования установлено:

1. На величину поперечной силы, воспринимаемой продольной арматурой при пересечении ее наклонной трещиной, оказывают существенное влияние условная свободная длина изгиба стержня, величины продольного усилия в нем и взаимного вертикального смещения его концов.

2. При пересечении стержня продольной арматуры нормальной трещиной в плоскости приложения сосредоточенной силы в нем возникает поперечное усилие, составляющее 7-15 % от приложенной силы.

3. Отмеченные в опытах образование вертикальных развивающихся от верхней грани трещин в пределах пролета среза является

ся следствием изменения направления траекторий главных растягивающих напряжений в этих зонах с вертикального на горизонтальное и достижения ими величины R_{bt} .

4. Влияние процента продольного армирования на величину "нагельного эффекта" увеличивается с уменьшением пролета среза.

5. Смещение плоскости хомутов от осяз к точке приложения сосредоточенной силы при одинаковой нагрузке повышает величину напряжений в сжатой зоне бетона.

6. Установка поперечных стержней приводит к снижению поперечной силы, воспринимаемой бетоном сжатой зоны над вершиной наклонной трещины, продольной арматурой в наклонном сечении и приходящейся на силы зацепления, за счет включения в работу хомутов и увеличения доли поперечной силы, воспринимаемой бетоном ниже вершины наклонной трещины.

7. Величина пролета среза, наличие и местоположение поперечных стержней оказывают влияние на форму траекторий главных напряжений.

8. Численный эксперимент выявил достаточную точность следующих предпосылок и положений, принятых при построении расчетной модели:

а) эпюры напряжений в бетоне имеют практически прямоугольную форму над вершиной критической наклонной трещины и треугольную форму под ней;

б) доля поперечной силы, воспринимаемой продольной арматурой вследствие "нагельного эффекта" зависит от величины осевого усилия в ней, относительного перемещения заделок условного стержня, его длины и жесткости.

На основании анализа распределения внутренних усилий в наклонном сечении моделей и сопоставления с аналогичными железобетонными балками показана приемлемость принятой диско-связевой расчетной схемы для описания процесса и механизма сопротивления изгибаемого элемента действию поперечных сил.

Четвертая глава посвящена совершенствованию методики расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов на основе следующих уточнений и предпосылок, сформулированных по результатам численного моделирования и экспериментальных исследований:

а) Доля поперечной силы, воспринимаемой продольной арматурой вследствие "нагельного эффекта" зависит от величины осевого усилия в ней, относительного перемещения заделок условного стержня, его длины и жесткости;

б) Предельное значение доли поперечной силы, воспринимаемой продольной арматурой находится из условия равновесия "нагельного" усилия с прочностью защитного слоя при отрывании по смещению концов стержней продольной арматуры, вызывающих предельное состояние при изгибе с растяжением и по наступлению предельного состояния сжатой зоны бетона;

в) Условная длина изгиба стержней продольной арматуры увеличивается при возрастании уровня нагружения за счет откалывания (раскалывания) бетона защитного слоя и увеличения расстояния между точками условного защемления стержней продольной арматуры;

г) Доля поперечной силы, воспринимаемой поперечными стержнями определяется как сопротивлением хомутов, пересекаемых критической наклонной трещиной, так и за счет соседних хомутов, вовлекаемых в работу стержнями продольной арматуры посредством их изгиба;

д) Прочность изгибаемых элементов по наклонным сечениям определяется как максимум функции равновесных состояний, описывающей зависимость между поперечной силой, воспринимаемой элементом и величиной продольных деформаций бетона сжатой зоны, определяющих деформации опорного блока.

Для вывода аналитических зависимостей для усилий, воспринимаемых стержнем продольной арматуры, рассматривалась расчетная схема в виде стержня, защемленного обоими концами,

растягиваемого продольной силой и изгибаемого вертикальным смещением опор. Зависимости для определения величин поперечной силы и изгибающего момента в стержне, полученные при решении дифференциального уравнения изогнутой оси стержня при учете краевых условий, имеют вид:

$$Q_s = \frac{17 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \Delta V_s}{l_s^3} \eta_1, \quad (1)$$

$$M_s = \frac{6 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \Delta V_s}{l_s^2} \eta_2, \quad (2)$$

где E_s - модуль упругости для арматурной стали, I_s - момент инерции стержня продольной арматуры, ΔV_s - взаимное вертикальное смещение концов стержня, l_s - условная длина изгиба стержня, а значения коэффициентов учета влияния продольной силы равняются:

$$\eta_1 = \frac{l_s^3 \cdot n^3 \cdot \text{sh } n l_s}{12 \cdot ((1 - \text{ch } n l_s)^2 + \text{sh } n l_s \cdot (n l_s - \text{sh } n l_s))}, \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{l_s^2 \cdot n^2 \cdot (1 - \text{ch } n l_s)}{6 \cdot ((1 - \text{ch } n l_s)^2 + \text{sh } n l_s \cdot (n l_s - \text{sh } n l_s))}, \quad (4)$$

$$a \quad n = \sqrt{\frac{N_s}{E_s \cdot I_s}}$$

На рис. показаны графики зависимости поперечного усилия в стержне продольной арматуры и коэффициента η_1 от продольного усилия.

Напряженно-деформированное состояние стержней продольной арматуры, согласно принятым предположкам, выражено в виде двух уравнений, описывающих условия:

- равновесия суммарной поперечной реакции стержней продольной арматуры Q_s и прочности на отрыв или раскалывание защитного слоя бетона $Q_{s,b}$.

$$Q_s = Q_{s,b}; \quad (5)$$

- достижения в продольном стержне предельного состояния на изгиб с растяжением

$$M_s / W_s = R_s, \quad (6)$$

где W_s - момент сопротивления круглого сечения,

После определения всех входящих в уравнения (5) и (6) величин они принимают вид:

$$\frac{12 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \Delta V_s \cdot n_1 \cdot n_s}{l_s^3} = R_{bt} \cdot b_s \cdot l_s, \quad (7)$$

$$\frac{6 \cdot E_s \cdot I_s \cdot \Delta V_s \cdot n_2}{l_s^2 \cdot W_s} = k_s, \quad (8)$$

где: ΔV_s - вертикальное смещение концов стержня, R_{bt} - прочность бетона при растяжении, b_s - ширина сечения бетона при отрыве или раскалывании, равная $b_s = b - n_s \cdot d_s$ при $b < n_s \cdot (d_s + 2a_s)$ (случай отрыва арматурного пояса) и $b_s = n_s \cdot a_s$ при $b > n_s \cdot (d_s + 2a_s)$ (случай раскалывания бетона защитного слоя); n_s , d_s - количество и диаметр стержней продольной арматуры; a_s - толщина защитного слоя бетона, R_s - сопротивление арматуры при растяжении.

Принятая за основу диско-связевая модель позволяет составить систему уравнений для определения прочности наклонных сечений изгибаемых элементов без хомутов. Система уравнений включает 10 неизвестных: прочность наклонного сечения Q_u , высота сжатой зоны бетона над вершиной наклонной трещины X , высота сжатой зоны бетона в нормальном сечении под сосредоточенной силой X_0 , горизонтальная проекция критической наклонной трещины C , напряжение в бетоне под вершиной критической наклонной трещины b_b , продольные усилия в стержнях продольной арматуры в нормальном сечении под нагрузкой N_{s1} и в основании критической наклонной трещины N_s , поперечное усилие в бетоне

сжатой зоны под вершиной наклонной трещины Q_b , условная длина изгиба l_s и вертикальное смещение концов стержня продольной арматуры ΔV_s , связанное геометрическим соотношением с величиной предельной сжимаемости бетона $\epsilon_{b,u}$. В систему уравнений входят:

- три уравнения равновесия для опорного блока;
- три уравнения равновесия для изгибаемого элемента в нормальном сечении под нагрузкой;
- два уравнения деформирования элемента как диско-связевой системы.

Дополнительно в систему введены уравнен. (7) и (8), характеризующие напряженно-деформированное состояние стержней продольной арматуры.

Решение системы осуществляется методом последовательных приближений, включающим четыре итерационных процесса: по X , по l_s при совместном решении уравнений (7) и (8) и по Q_u и $\epsilon_{b,u}$ при совместном решении всех уравнений системы. Прочность наклонного сечения считается определенной, когда найдено такое $\epsilon_{b,u}$, при котором Q_u максимальна.

Точность усовершенствованного метода расчета проверялась при сопоставлении с экспериментальными данными автора и других исследователей. Обработывалось 165 образцов без поперечного армирования, в которых исследуемые факторы изменялись в диапазонах: пролет среза от 1.5 до 4 h_0 ; коэффициент продольного армирования от 0.5 до 2.96 %.

Анализ результатов сопоставления показывает, что предложенные уточнения дают более близкие значения несущей способности наклонных сечений элементов без поперечного армирования в зависимости от пролета среза и количества продольной армату-

ры (среднее значение отношения расчетной прочности к экспериментальной составило 0.923 при коэффициенте вариации 0.18).

Величина предельной сжимаемости бетона краевого волокна $\epsilon_{b,c}$ в момент разрушения, при которой получено максимальное значение расчетной прочности наклонного сечения, изменялась с повышением количества продольной арматуры при пролетах среза 1.5-2.0 h_0 и увеличением прочности бетона, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Для определения прочности наклонных сечений изгибаемых элементов с поперечными стержнями в имеющиеся уравнения вводится усилие, воспринимаемое хомутами и определяемое по формуле:

$$Q_{sw} = Q_{sw1} \cdot k, \quad (9)$$

где $Q_{sw1} = R_{sw} \cdot A_{sw}$ - предельное усилие, воспринимаемое одной плоскостью хомутов; k - количество плоскостей хомутов, пересекаемых наклонной трещиной, $k = C / S$; S - шаг хомутов.

Из условий равенства прочности защитного слоя и нагельного усилия в продольной арматуре и достижения предельного состояния на изгиб в продольном стержне находится условная длина изгиба продольного стержня l_g . Величина l_g сравнивается с шагом поперечных стержней и расстоянием от плоскости хомутов до опорной плоскости, и принимается минимальной из этих величин. Величина вертикального смещения принимается минимальной из значений:

- смещения, вызывающего предельное состояние в продольной арматуре;

- смещения, определяемого из геометрических соотношений деформирования всего элемента на основании заданного значения предельной сжимаемости бетона.

При найденных l_s и ΔV_s вычисляется значение Q_s и сравнивается с величиной Q_{sw1} . Если Q_s больше Q_{sw1} , то к поперечной силе Q_{sw} необходимо прибавить Q_{sw1} :

$$Q_{sw} = Q_{sw1} \cdot (C / S + 1). \quad (10)$$

Таким образом, в сопротивлении действию поперечной силы участвуют хомуты, пересекемые наклонной трещиной, хомуты, вовлеченные в работу продольными стержнями при их изгибе.

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на образцах второй и третьей серий показало, что предложенная методика расчета прочности изгибаемых элементов с дискретно расположенными поперечными стержнями, т.е. при изменении шага хомутов от $0.8 h_0$ до $1.2 h_0$ (от 0.3 до $0.5 a$), дает достаточно близкие к опытным результаты. Среднее отношение расчетной прочности к опытной составило 0.975 при коэффициенте вариации 0.062 .

В пятой главе сформулированы предложения по совершенствованию проектирования поперечного армирования изгибаемых железобетонных элементов.

Разработанная методика расчета прочности наклонных сечений с дискретным поперечным армированием справедлива при проектировании изгибаемых железобетонных элементов со стержневой арматурой без предельного напряжения, нагруженных сосредоточенными силами. При этом должна быть обеспечена анкеровка продольной арматуры конструктивными мероприятиями или расчетом длины анкеровки продольных стержней. При действии распределенной нагрузки в уравнения равновесия исходной системы вносятся изменения, отражающие приведение внешней нагрузки к сосредоточенной. При использовании многорядного армирования должна вводиться корректировка в условие прочности защитного слоя про-

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

дольной арматуры на отрыв или раскалывание.

Предложена следующая последовательность проектирования поперечного армирования.

При заданных размерах поперечного сечения, продольном армировании и поперечном усилии Q , действующем в наклонном сечении, в соответствии со СНиП 2.03.01 - 84* выполняется проверка на обеспечение прочности по наклонной сжатой полосе между наклонными трещинами и в соответствии с п.4.4. СНиП 2.03.01-84* определяется поперечная сила, при которой образуются наклонные трещины $Q_{срс}$.

По предложенной методике определяется несущая способность наклонного сечения Q_{ult} без поперечного армирования.

В зависимости от соотношения величин внешней поперечной силы Q и расчетной прочности наклонного сечения Q_{ult} могут быть три случая:

- при величине нагрузки $Q < Q_{срс}$ допускается поперечное армирование не ставить;

- при нагрузке $Q_{срс} < Q < Q_{ult}$ устанавливается конструктивное поперечное армирование;

- при нагрузке $Q > Q_{ult}$ поперечное армирование определяется вариантным проектированием, при котором изменяются диаметр, шаг и место расположения стержней поперечной арматуры.

В первом случае, основываясь на положении, что поперечная арматура включается, главным образом, в работу только после образования наклонных трещин, при уровне нагружения меньше $Q_{срс}$ можно не устанавливать поперечную арматуру.

Во втором случае конструктивное поперечное армирование должно воспринимать часть поперечного усилия, равную разности $\Delta Q = Q - Q_{срс, inc}$. Вначале при решении системы уравнений опре-

деляется величина горизонтальной проекции наклонной трещины C_0 , как для изгибаемого элемента без поперечной арматуры. При этом остается ограничение СНиП 2.03.01-84* : $h_0 < C_0 < 2h_0$. Затем назначается шаг конструктивного поперечного армирования из условия пересечения критической наклонной трещиной минимум двух плоскостей комут, т.е. $S = C_0/3$. После чего определяется диаметр поперечных стержней, исходя из условия что $Q_{sw} = \Delta Q$. Условие пересечения критической наклонной трещиной не менее двух плоскостей комут основывается на результатах экспериментальных исследований, показавших существенное увеличение разброса значений прочности наклонных сечений балок при пересечении трещиной только одной плоскости комут.

В третьем случае при вариантном проектировании поперечного армирования шаг комут в приопорных зонах не должен превышать $0.7 h_0$, что обеспечивает стабильность результатов при испытании. В этом случае вначале назначается шаг и диаметр комут из условия $A_{sw} \cdot R_{sw} \cdot C_0/S = Q - Q_{ult}$. Затем после решения системы уравнений и определения несущей способности сечения уточняются параметры поперечного армирования или остаются ранее принятыми при условии выполнения условия $Q < Q_{ult}$.

На основании регрессионного анализа многочисленных экспериментальных данных предложена статистическая модель для определения прочности изгибаемого элемента без поперечной арматуры в зоне действия поперечных сил, которая бы учитывала влияние на предельную поперечную силу, воспринимаемую сжатой зоной бетона, количества продольной арматуры коэффициентом φ_s :

$$Q_b = \frac{\varphi_{b4} \cdot (1 + \varphi_r + \varphi_s) \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{C}, \quad (11)$$

$$\text{где } \varphi_s = \frac{\mu_s - 0.5}{\frac{0.6C}{h_0}} \cdot \frac{C}{h_0}; \quad (12)$$

$$\varphi_{b4} = e$$

e - основание натурального логарифма; коэффициенты φ_{54} и φ_7 , учитывающий влияние на прочность наклонного сечения наличия полки в сжатой зоне бетона, определяются согласно СНиП 2.03.01-84*. При $\mu_s < 0.5$ влияние продольного армирования не учитывается, т.е. φ_s принимается равным 0. Остается ограничение СНиП по минимальной прочности наклонного сечения без поперечной арматуры.

Формулы (11), (12) позволяют достаточно точно оценить прочность наклонного сечения элемента без поперечного армирования. Среднее отношение расчетной прочности к опытной составило 0.91 при коэффициенте вариации 0.25.

Усовершенствованная методика проектирования поперечного армирования была апробирована на предварительно напряженных и обычных железобетонных круглопустотных плитах серии 1.141.1 выпусков 29, 61 и 63 и серии 125.

Расчет прочности наклонных сечений указанных конструкций по разработанной методике показал, что величина действующей поперечной силы в наклонных сечениях плит при расчетных нагрузках не превышает поперечной силы образования наклонных трещин. Таким образом, согласно выше приведенной методике проектирования поперечное армирование в пустотных плитах указанных серий можно не устанавливать. Испытания 52 плит при варьировании ширины и длины плит в пределах 0.8 - 2.4 м и 3 - 6.4 м, соответственно, подтвердили выводы, полученные в результате расчетов.

При внедрении данной разработки в производство был получен экономический эффект за счет сокращения расхода металла на

конструктивное армирование плит в количестве от 8 до 20 % на одну конструкцию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ и сопоставление различных методов расчета прочности свидетельствует, что наиболее полно отражает физический процесс сопротивления и разрушения изгибаемых элементов действием поперечных сил методика, основанная на диско-связевой физической модели. Эта методика может быть принята за основу при ее совершенствовании в части учета усилий, воспринимаемых продольной арматурой и распространении на случай дискретного расположения поперечной арматуры.

2. Проведенные экспериментальные исследования и численно-моделирование на железобетонных элементах показали, что принятая расчетная схема в виде диско-связевой системы достаточно точно описывает процесс сопротивления железобетонного изгибаемого элемента действию поперечных сил, и выявили механизм участия в этом процессе стержней продольной и поперечной арматуры.

3. Из общего решения дифференциального уравнения изогнутой оси стержня получены выражения для усилий, воспринимаемых продольной арматурой за счет "нагельного эффекта" которые зависят от основных факторов: продольного осевого усилия, относительного перемещения заделок, условной длины и жесткости стержней.

4. В систему уравнений при расчете прочности наклонных сечений (уравнения равновесия для опорного блока, нормального сечения в месте приложения нагрузки, уравнения деформирования

элемента как дисково-связевой системы) введены дополнительно два уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние стержней продольной арматуры.

5. Предложена физическая модель участия дискретно установленной поперечной арматуры в сопротивлении железобетонных изгибаемых элементов поперечной силе. Доля поперечной силы, воспринимаемой поперечными стержнями определяется как сопротивлением комут, пересекаемых критической наклонной трещиной, так и за счет комут, вовлекаемых в работу стержнями продольной арматуры при их изгибе.

6. Разработан алгоритм расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, определяемой как максимум функции равновесных состояний, описывающей зависимость между поперечной силой, воспринимаемой элементом и величиной продольных деформаций бетона сжатой зоны, определяющих деформации опорного блока.

7. На основе проведенного регрессионного анализа экспериментальных данных предложены эмпирические зависимости для учета влияния продольной арматуры на прочность наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов без поперечной арматуры в форме, принятой в СНиП 2.03.01-84*.

8. Сопоставление результатов расчета и эксперимента свидетельствует о том, что принятые физическая и расчетная модель достаточно точно отражают механизм процесса сопротивления и разрушения железобетонных элементов при действии поперечных сил и о достаточной точности усовершенствованной методики: для элементов без поперечной арматуры среднее отношение прочности, рассчитанной по предложенной методике, к опытной составило 0.923 при коэффициенте вариации 0.18; и среднее значение отно-

нения прочности, рассчитанной по предложенной эмпирической зависимости, к опытной составило 0.91 при коэффициенте вариации 0.25 ; для элементов с поперечной арматурой - 0.975, при коэффициенте вариации 0,062.

9. На основе усовершенствованной методики расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов с дисперсно установленной поперечной арматурой сформулированы предложения для методики проектирования поперечного армирования изгибаемых железобетонных элементов.

10. Внедрение предложенной методики проектирования поперечного армирования при совершенствовании типовых круглопустотных плит перекрытий позволило снизить на 16-22 % расход арматурной стали.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Прядко В.М., Кожанов Ю.А. Устройство для демонстрации деформаций железобетонной балки - А.с.№ 1176371, ГИ № 32, 1985.

2. Баташев В.М., Кожанов Ю.А. Расчет и конструирование поперечной арматуры в изгибаемых элементах // Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии / Тезисы докладов к предстоящей Всесоюзной конференции. Часть 7. Новые технологии возведения зданий, расчет строительных конструкций. - Белгород, 1991. - с.9-10.

3. Баташев В.М., Кожанов Ю.А. Прочность изгибаемых железобетонных элементов без поперечного армирования при действии поперечных сил // Материалы для строительства / Тезисы докладов

II Международной научно-технической конференции ICMB'93. - Днепрпетровск, 1993. - с.227-228.

4. Кожанов Ю.А. О роли продольной арматуры в сопротивлении изгибаемым железобетонным элементам без поперечного армирования по наклонному сечению //Межгосударственная научно-техническая конференция "Исследование действительной работы и усиление строительных конструкций промышленных зданий и сооружений"/ Сборник материалов, - Магнитогорск,1993. - с.26-28.

5. Кожанов Ю.А. Моделирование работы железобетонных балок по наклонному сечению методом конечных элементов// Сборник "Материалы для строительных конструкций" подготовлен III Международной конференцией ICMB'94. - Днепрпетровск,1994. - с.156.

6. Кожанов Ю. ... применение метода конечных элементов при моделировании работы железобетонных конструкций// Международная научно-практическая конференция "Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях" / Сборник материалов, - Сумы, 1994. - с.120-121.

45252

AB 33.868