

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ПОЛТАВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДО ХОГАН АКПАН



УДК 624.042.12

СЕТЧАТО-СТЕРЖНЕВОЕ АРМИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Полтава - 1994



00756385 (Y)

АВ 30,058

Робота виконана в Харківському інституті інженерів
городського господарства.

Научний керівитель: - кандидат технічних наук,
доцент
Е.Г.Стоянов;

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук,
професор
Л.И.Стороженко;

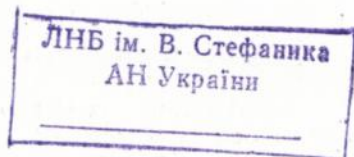
кандидат технічних наук,
доцент
Я.Г.Жиляков.

Ведущая організація: - Харківський ПромстройНИИпроект

Захита состоится "14" шочня 1994 г. в "14⁰⁰" часов
на засіданні спеціалізованого Совету К 068.46.01 по
спеціальності "будівельні конструкції, збудовані та споруди"
Полтавського інженерно-будівельного інституту по адресу:
г.Полтава, проспект Первотмайський, 24 ауд. 234.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий "13" мая 1994 г.



Учений секретар
спеціалізованого совета,
кандидат технічних наук,
доцент

В.А.Бондарь

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Работа посвящена вопросу повышения трещиностойкости изгибаемых железобетонных конструкций путем применения сетчато-стержневого армирования, где наряду с продольной ненапрягаемой арматурой в растянутой зоне устанавливается штампованная безотходная просечно-вытяжная сетка, которая вместе с включающимися в совместную с ней работу слоем растянутого бетона препятствует образованию и раскрытию трещин при изгибе.

Актуальность работы. Перспективы строительства в настоящее время связаны с созданием новых материалов и конструктивных типов сооружений, с решением проблемы снижения веса конструкции, с уменьшением расхода материалов, с совершенствованием и уточнением существующих методов расчета.

Непрерывное увеличение и расширение использования бетона и железобетона выдвинуло перед учеными, исследователями и конструкторами ряд новых задач, связанных с целым рядом особенностей этих материалов, таких как, например, ползучесть, усадка, изменение во времени основных физико-механических свойств бетона и др.

Особое внимание заслуживает вопрос трещиностойкости железобетонных конструкций. Наибольший эффект трещиностойкости дает применение предварительного напряжения, однако трудоемкость и энергоемкость (что в настоящее время является очень актуальным) изготовления предварительно напряженных конструкций существенно удорожает строительство, а в некоторых регионах (в странах Африки, Азии, Латинской Америки) предварительно напряженный железобетон вообще не имеет широкого применения. Поэтому наряду с применением предварительного напряжения ведутся разработки по созданию новых типов конструкций повышенной трещиностойкости без предварительного напряжения. К таким направлениям и относится предлагаемое исследование с разработкой методик расчета прочности и трещиностойкости многокомпонентной железобетонной конструкции.

Цель работы. Создание, исследование напряженного состояния и разработка рекомендаций по проектированию железобетонных изгибаемых элементов повышенной трещиностойкости с комбинированным армированием стержневой ненапрягаемой арматурой и стальной сеткой в защитном слое.

Задачи исследования:

- экспериментально - теоретическое исследование работы изгибаемых элементов с комбинированным сетчато-стержневым армированием в стадиях I и Ia;

- построение методики определения момента трещинообразования для комбинированно - армированного изгибаемого элемента;

- анализ эффективности применения комбинированного армирования в сравнении с обычными и предварительно-напряженными конструкциями;

- анализ работы изгибаемого элемента с комбинированным армированием в стадии после образования трещин вплоть до разрушения.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Выполнены экспериментальные исследования по определению характеристик нового комплексного материала "сетка+бетон":

- эффективной толщины слоя бетона, включающегося в совместную работу на растяжение вместе с сеткой;

- модулей деформаций комплексного материала при различных коэффициентах армирования слоя "сетка+бетон";

- величины предельной прочности на растяжение комплексного материала при различных коэффициентах армирования слоя;

2. Разработана методика расчета трещиностойкости изгибаемых элементов с комбинированным сетчато-стержневым армированием.

3. Выработаны рекомендации по практическому применению комбинированного армирования.

На защиту выносятся:

- предложения по созданию нового типа армирования изгибаемых железобетонных элементов, позволяющего получить конструкции повышенной трещиностойкости;

- разработанные экспериментальным путем рекомендации по практическому применению комбинированного сетчато-стержневого армирования;

- методика определения напряженного состояния изгибаемого элемента в различных стадиях его работы;

- методика практического расчета трещиностойкости и прочности изгибаемых железобетонных элементов.

Практическое значение работы состоит в том, что предлагаемое решение открывает возможность в значительной степени снизить стоимость изготовления железобетонных изгибаемых конструкций повышенной трещиностойкости за счет экономии тепло- и энергоресурсов.

Результаты исследования внедрены в ЗЖБИ треста "Харьковметрострой", где в порядке эксперимента изготовлены шпалы без предварительно-напряженной арматуры с использованием пресечно-вытяжной сетки вместе со стержневой арматурой, в экспериментальных ригелях промышленных зданий, изготовленных

на ЗЖБИ треста "Харьковжелезобетон", в арендном предприятии "Жилстрой-2" (г. Харьков) при строительстве учебного комбината предприятия в железобетонных перемичках.

Аиробация работы. Основные результаты работы обсуждались на республиканской конференции "Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформации, и их внедрение в строительную практику" (г. Полтава, 1989 г.) и всесоюзной конференции "Новые технологии возведения зданий, расчет строительных конструкций" (г. Белгород, 1991 г.), межвузовских научно-технических конференциях в городе Харькове (1989-1992 г.г.).

Публикации Основное содержание работы отражено в 6-ти печатных трудах.

Объем работы. Диссертация состоит из 5-ти глав, выводов, списка использованной литературы из 151 наименования и приложений. В работе 168 страниц, в том числе: 128 страниц основного текста, 40 - рисунков, 51 - таблица.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована научная новизна исследования, приведены результаты, которые выносятся на защиту и имеют практическое значение.

В первой главе рассматривается состояние вопроса по применению нетрадиционных видов железобетона: сталебетонных, сталежелезобетонных конструкций, конструкций с дисперсным армированием. При этом термин "внешнее армирование" является достаточно общим, объединяющим различные направления таких типов конструкций, как комбинированные сталежелезобетонные, брусковые, трубобетонные, трубожелезобетонные и др. Применение таких конструкций связано либо с целью уменьшения массы конструкции, ее размеров, или для уменьшения трудоемкости и стоимости строительства (при использовании внешней арматуры как опалубки). Специалисты некоторых стран (Франция, Германия) считают, что применение листовой стали является также и эффективным средством увеличения жесткости.

Главный же эффект внешнего армирования - повышение трещиностойкости. В литературе достаточно освещены результаты исследований работы конструкции с внешним армированием, сталебетонных конструкций, конструкций с дисперсной арматурой (работы Ф.Е. Клименко, Р.С. Санжаровского, Л.И. Стороженко, А.Л. Шагина, И.Я. Подольского и др.)

Методика расчета сталебетонных конструкций аналогична методике расчета обычных железобетонных конструкций. По результатам исследований работы сталежелезобетонных конструкций определяют эффект повышения трещиностойкости по сравнению с обычными железобетонными элементами в 1.5 раза.

Ширина раскрытия трещины в сталебетонных элементах примерно в 2 раза меньше, чем в железобетонных балках-близнецах. При этом ширина раскрытия трещин вблизи полосовой арматуры на 10-15% меньше, чем на некотором удалении (на 30 мм) от кромки листа, что является следствием повышенной растяжимости бетона в зоне влияния полосовой арматуры.

А.Л. Шагин доказал возможность увеличения трещиностойкости железобетонных конструкций за счет применения арматуры повышенной прочности без предварительного напряжения в комплексе с дополнительной внешней арматурой в виде стеклопластиковой полосы или обоймы, которая наносится на растянутую грань элемента.

Значительного эффекта повышения трещиностойкости можно достичь применением фибробетона. Так, ширина раскрытия трещин при нагрузках около $0.7 R_{разр}$ составляет около 0.01 мм. Трещины располагаются по длине элемента регулярно, примерно с шагом 2-3 см. В дальнейшем при разрушении трещины не превышают ширины раскрытия 0.2 мм.

Описанные приемы повышения трещиностойкости однако, имеют ряд недостатков. Так, например, возникают трудности обеспечения совместной работы внешнего стального листа с бетоном в сталебетонных элементах. Применение стеклопластиковых обойм, в основном, используется при реконструкции и характеризуется повышенной трудоемкостью. Недостатком фибробетонных конструкций является то, что при их изготовлении необходимо отдельно готовить два вида бетонной смеси - обычную и дисперсно армированную.

Применение просечно-вытяжного листа было предложено В.С.Шмуklerом, Э.Д.Чихладзе, М.П.Межлборским для создания специфической металло-бетонной оболочки, повышающей прочность, надежность и огнестойкость конструкций.

В настоящей работе предлагается применить просечно-вытяжной лист в виде сетки с ромбическими ячейками в растянутой зоне изгибаемого элемента. Предлагаемый вариант железобетонного изгибаемого элемента с сетчато-стержневым армированием является наиболее эффективным с точки зрения технологичности и стоимости.

При применении нетрадиционных типов железобетонных конструкций возникают вопросы правомочности применения всех тех гипотез, допущений и теорий, которые приняты для обычных железобетонных конструкций.

Рассматриваются классические и современные подходы к вопросу о напряженном состоянии железобетонных изгибаемых элементов (работы А.Р.Лолейта, М.Я.Штаермана, А.А.Гвоздева, А.С.Залесова). Известно, что бетон обладает явно выраженными неупругими свойствами. При этом диаграмма $\sigma - \epsilon$ не имеет стабильного характера, что не позволяет принимать для расчета какую-либо определенную диаграмму $\sigma - \epsilon$ для бетона и по ней находить эпюру напряжений в сжатой зоне.

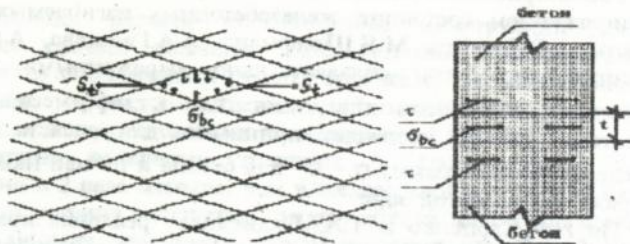
По Н.И.Карпенко и Т.А.Мухамедиеву реальная криволинейная эпюра напряжений высотой X_1 может быть заменена эквивалентной по площади прямоугольной эпюрой высотой X так, чтобы напряжения в заменяющей эпюре совпадали с напряжением σ_{bc} , вычисленным в центре тяжести реальной эпюры.

На основании анализа современных подходов к вопросу о напряженно-деформированном состоянии изгибаемого элемента определяется необходимость построения математической модели, отражающей истинную работу бетона сжатой и растянутой зоны, арматуры и слоя "сетка+бетон". Для предлагаемого типа армирования отсутствует достаточное количество исследований, что и определяет цель работы и позволяет сформулировать задачи диссертации.

Во второй главе рассматривается сущность предлагаемого комбинированного армирования и определяются прочностные и деформативные характеристики такого специфического материала, как "сетка+бетон".

Безотходная просечно-вытяжная сетка помещается в защитном слое бетона изгибаемого элемента. Эта сетка имеет значительное преимущество перед другими компонентами, используемыми при комплексном армировании. Во-первых, сетка имеет хорошее сцепление с бетоном, во-вторых, бетон в ячейках сетки в защитном слое образует "клинья", хорошо сопротивляющиеся при всех видах напряженного состояния. Как показали и последующие эксперименты, растяжение нижних фибр железобетонных балок при изгибе сопровождается работой бетона на сжатие σ_{bc} в ячейках - "клинях" и на срез τ при вытягивании ромбов сетки.

В-третьих, сетка находится в слое бетона, тем самым она защищается от внешних воздействий (коррозии и др.). Кроме того, слой "сетка + бетон" надежно защищает рабочую продольную арматуру от этих воздействий.



где t - толщина стального листа, из которого изготовлена сетка.

Рис. 1.

В-четвертых, для изготовления железобетонных элементов не требуется отдельного технологического процесса как, например, для изготовления фибробетонной смеси с дисперсной арматурой.

Применение просечно-вытяжной сетки повышает также прочность и надежность конструкции за счет создания наружной металлической оболочки в виде ромбической решетки.

Для предлагаемой конструкции с сетчато-стержневым армированием толщина d слоя комплексного материала "сетка + бетон" является величиной весьма условной, хотя и принимаемой в небольших пределах (10...30 мм), определяемых толщиной защитного слоя бетона.

Очевидно, что силовые и деформационные характеристики этого слоя (расчетные сопротивления R_M^c , модуль деформации E_c , предельное относительное удлинение $\epsilon_{M \text{ lim}}$) будут зависеть от принимаемой в расчете условной толщины d , от геометрических и физических характеристик применяемой сетки, от применяемого класса бетона.

Поэтому перед решением задачи трещиностойкости или прочности изгибаемого элемента предварительно необходимо определить вышеуказанные характеристики слоя "сетка + бетон".

Эти характеристики определяются экспериментальным путем. Таким образом, на первом этапе экспериментальных исследований ставится цель определения таких прочностных и деформативных характеристик комплексного материала, как предел трещиностойкости материала "сетка+бетон", предел прочности материала при полном разрушении, модуль деформации, предельная растяжимость материала при образовании трещин и при полном разрушении. Здесь же исследуется влияние коэффициентов армирования слоя "сетка+бетон" на величины искомых

характеристик и определяется оптимальный вариант армирования слоя "сетка+бетон".

Испытания показали специфический характер разрушения образцов - "восьмерок" при растяжении, который приведен на рис. 2.

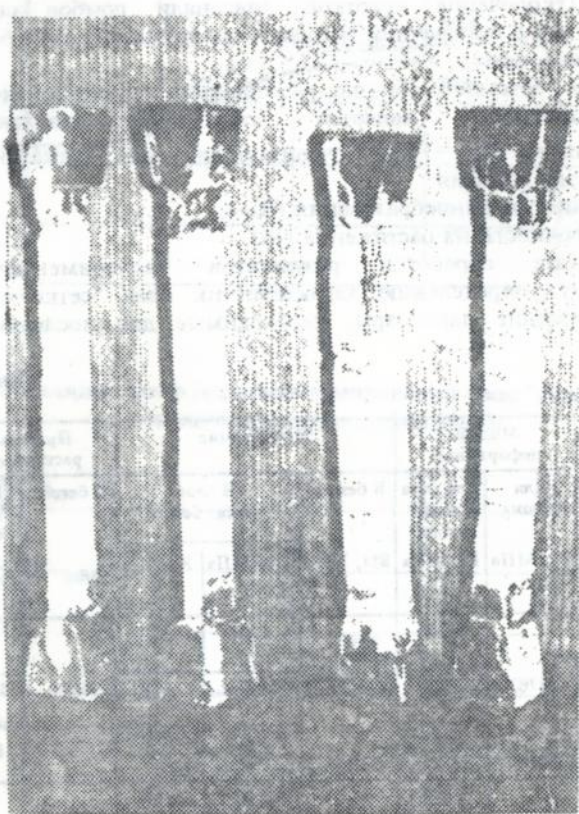


Рис. 2.

Так, в начальной стадии разрушения появляются волосяные поперечные трещины по всей длине образца, затем при увеличении нагрузки в наиболее слабом месте трещина развивается, и вскоре обнаруживаются продольные трещины на большей части длины образца. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит откалывание бетона от сетки с одной или с другой стороны наступает полное разрушение. Это свидетельствует о том, что разрушение происходит не только от влияния растягивающих напряжений в бетоне, но и от деформации сетки в поперечном направлении (укорочение короткой диагонали ромбов сетки). Деформации сетки в поперечном направлении вызывают срез бетона по границе сетка - бетон.

В отличие от бетонного образца, работающего на растяжение, где критерием прочности является достижение напряжений трещинообразования $\sigma_{bt} = R_{bt}$, очевидно для слоя "сетка+бетон" следует ввести два понятия:

- напряжение трещинообразования ($R_{crс}$),
- предел прочности на растяжение (R_t).

В результате обработки результатов экспериментальных исследований по определению характеристик слоя "сетка+бетон" определены средние параметры, необходимые для последующих расчетов.

Табл. 1.

Класс бетона	Толщина слоя "сетка+бетон" Коэфф. армиров. μ	Модуль деформации		Напряжение			Предельная растяжимость	
		Для бетона E_b , МПа	Для слоя "сетка+бетон" E_c , МПа	В бетоне R_{bt} , МПа	В слое "сетка+бетон"		В бетоне $\epsilon_{btim} \cdot 10^4$	В слое "сетка+бетон" $\epsilon_{ctim} \cdot 10^4$
					$R_{crс}$, МПа	R_t , МПа		
B15	$\frac{10}{0.026}$	23762	36000	1.20	2.40	5.30	0.94	0.75
	$\frac{20}{0.013}$		30000		1.80	2.70		1.1
	$\frac{30}{0.0088}$		24000		1.40	1.90		0.95
B20	$\frac{10}{0.026}$	26470	39000	1.35	2.50	6.00	1.95	0.95
	$\frac{20}{0.013}$		32000		2.10	3.1		1.4
	$\frac{30}{0.0088}$		27500		1.60	2.4		0.97

На прочностные и деформационные характеристики существенно влияет коэффициент армирования расчетного слоя

"сетка + бетон". На рис. 3...6 построены графики влияния коэффициента насыщения расчетного слоя сеткой (толщины слоя) на изменение модулей деформации, предельной растяжимости слоя до образования трещин, напряжений трещинообразования и предела прочности на растяжение.

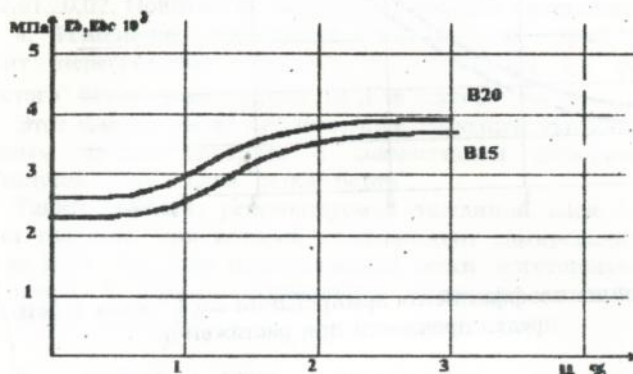


Рис.3. Влияние коэффициента армирования слоя "сетка+бетон" на величину модуля деформации.

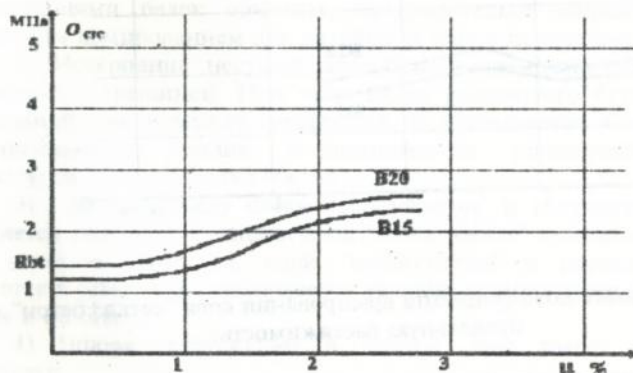


Рис.4. Влияние коэффициента армирования слоя "сетка+бетон" на величину напряженности трещинообразования.

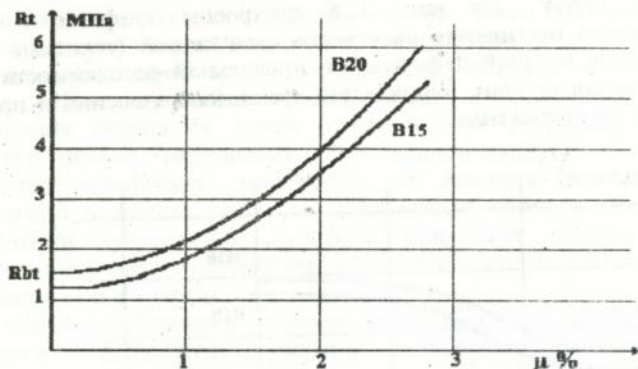


Рис.5. Влияние коэффициента армирования слоя "сетка + бетон" на предел прочности при растяжении.

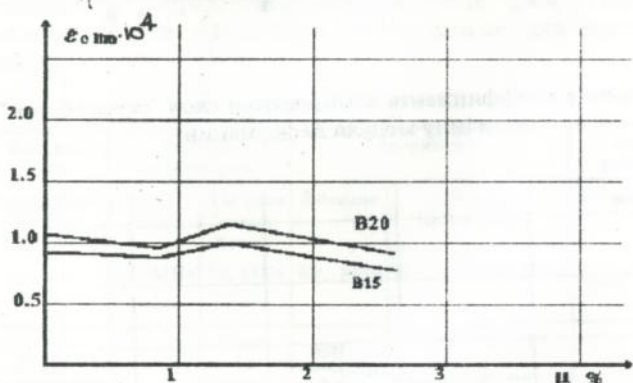


Рис.6. Влияние коэффициента армирования слоя "сетка+бетон" на предельную растяжимость.

В результате анализа можно сделать следующие выводы:

1. Напряжения трещинообразования R_{ctc} в слое "сетка+бетон" становятся выше предела прочности на растяжение в чистом бетоне R_{bt} при коэффициентах армирования $\mu = 0,008...0,02$ в среднем на 80%. При дальнейшем увеличении коэффициента армирования эффект от применения сетки в слое "сетка+бетон" затухает.

2. Исходя из принятого ранее критерия прочности материала "сетка+бетон" на растяжение следует отметить, что прочность (R_t)

возрастает по сравнению с величиной R_{yk} в чистом бетоне практически по линейному закону в зависимости от коэффициента армирования μ слоя "сетка+бетон".

3. Модуль деформации в слое "сетка+бетон" наиболее интенсивно возрастает также при коэффициентах армирования $\mu=0,01...0,02$. Повышение модуля деформации составляет около 40%.

4. Изменение предельной растяжимости слоя "сетка+бетон" носит нерегулярный характер и отличается от растяжимости "чистого" бетона максимально на 30% (при $\mu=0,015$).

Этот фактор имеет существенное значение, так как позволяет с полным правом говорить о совместности деформаций бетона растянутой зоны и слоя "сетка+бетон".

Таким образом, рекомендуемой толщиной слоя "сетка+бетон" будет толщина, при которой коэффициент армирования составляет около 1,5%. Так, при использовании сетки, изготовленной из листа толщиной 1 мм, оптимальная толщина слоя "сетка+бетон" составляет 23...25 мм.

В третьей главе предлагается методика оценки трещиностойкости и напряженного состояния изгибаемого элемента сетчато-стержневой арматурой.

Предлагаемая методика определения напряженного состояния базируется на следующих исходных предпосылках и допущениях:

1) Сечения элемента сохраняются плоскими, что подтверждено испытаниями балок обычных, предварительно напряженных и с внешним армированием для различных типов поперечных сечений.

2) Истощение несущей способности элементов происходит в сечениях с трещиной. При этом вклад растянутого бетона как над трещиной, так и между трещинами не учитывается. Считается, что растягивающее усилие воспринимается растянутой стальной арматурой и слоем "сетка+бетон".

3) Граница между слоем "сетка+бетон" и растянутым бетоном является условной, толщина слоя "сетка+бетон" принимается исходя из рекомендаций гл.2, слой "сетка+бетон" и растянутый бетон работают совместно, соблюдается условие совместности деформаций слоя и бетона.

4) Эпюра напряжений в сжатой зоне имеет нелинейный характер.

5) Напряжения в пределах толщины слоя "сетка+бетон" принимаются постоянными ввиду малости толщины этого слоя.

Для описания напряженного состояния предлагается математическая модель, базирующаяся на исследовании уточненных диаграмм работы компонентов рассматриваемого изгибаемого элемента: сжатого и растянутого бетона, стальной арматуры и компонента "сетка+бетон".

Для аппроксимации принятых диаграмм рассмотрены уравнения вида:

$$\sum_{i=1}^n E_i \varepsilon_i^j = \alpha_j R \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, 8;$

$j = 1, 2, 3, \dots, 6;$

$n = 8;$

α_j - отношение напряжения в данной точке к призмной прочности.

Для решения такой системы уравнения приводятся к виду

$$Y = AX; \quad (2)$$

где A - детерминант неизвестных значений деформации в системе уравнений данного класса;

X - вектор модуля деформации E_i и коэффициентов E для сжатого и растянутого бетона;

Y - вектор нормальных напряжений сжатого и растянутого бетона.

Аналогичный вид имеют и уравнения для арматуры и слоя "сетка+бетон".

В результате определяется модуль деформации в любой конкретной точке на диаграммах.

Для составления уравнений равновесия, которые в общем виде рассматриваются как

$$\sum F_i z = 0, \quad (3)$$

$$\sum M_{i.i.}(F_i) = 0 \quad (4)$$

используются результаты решения системы (2), учитывая, что

$$\sigma_s(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n E_i \varepsilon_i^s, \quad (5)$$

$$\sigma_n(\varepsilon) = \sum_{i=1}^n E_n \varepsilon_i^n, \quad (6)$$

$$\sigma_s(\varepsilon) = \sum_{i=1}^v E_u \varepsilon_i^s, \quad (7)$$

$$\sigma_c(\varepsilon) = \sum_{i=1}^w E_a \varepsilon_i^c, \quad (8)$$

где $n = 8, v = 9, w = 5.$

При уточненных эпюрах напряжений в сечениях изгибаемого элемента (рис. 7.)

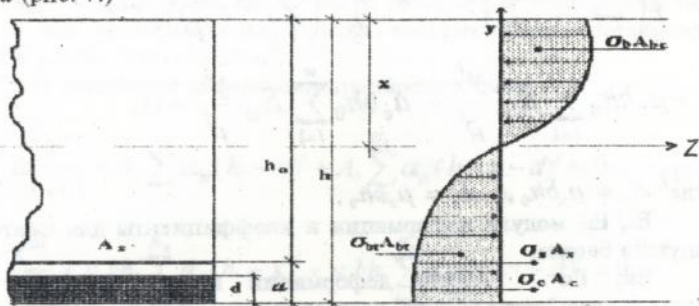


Рис. 7

уравнение равновесия $\sum Z = 0$ запишется в виде:

$$-\int_0^x \sigma_b(\varepsilon) b dy + \int_0^{h-x-d} \sigma_{st}(\varepsilon) b dy + \sigma_s A_s + \sigma_c A_c = 0 \quad (9)$$

где $A_c = bd$.

Подставляя уравнения (5), (6), (7) и (8) в уравнение (9), получим

$$-\int_0^x \left(\sum_{l=1}^n E_l \varepsilon^l \right) b dy + \int_0^{h-x-d} \left(\sum_{l=1}^n E_n \varepsilon^l \right) b dy + A_s \sum_{l=1}^v E_{sl} \varepsilon_s^l + A_z \sum_{l=1}^w E_{cl} \varepsilon_c^l = 0 \quad (10)$$

Исходя из гипотезы плоских сечений

$$\varepsilon^i = \frac{y^i}{\rho^i} \quad (11)$$

Для удобства решения задачи вводим коэффициенты

$$\alpha_l = \frac{E_l}{\rho^l} b, \quad \alpha_n = \frac{E_n}{\rho^n} b, \quad (12)$$

$$\alpha_{sl} = \frac{E_{sl}}{\rho^l} b, \quad \alpha_{cl} = \frac{E_{cl}}{\rho^l} b.$$

Тогда уравнение (10) примет вид:

$$\begin{aligned}
 & - \int_0^x \left(\sum_{i=1}^n E_i \frac{y^i}{\rho^i} \right) b dy + \int_0^{h-x-d} \left(\sum_{i=1}^n E_{ii} \frac{y^i}{\rho^i} \right) b dy + \\
 & + \mu_s b h_0 \sum_{i=1}^v E_{si} \frac{y^i}{\rho^i} + \mu_c b h_0 \sum_{i=1}^w E_{ci} \frac{y^i}{\rho^i} = 0, \quad (13)
 \end{aligned}$$

где $A_s = \mu_s b h_0$, $A_c = \mu_c b h_0$,

E_s, E_c - модули деформации и коэффициенты для сжатого и растянутого бетона,

E_{si}, E_{ci} - модули деформации и коэффициенты для арматуры и слоя "сетка+бетон" соответственно,

b - ширина сечения,

μ_s - коэффициент армирования продольной рабочей арматурой,

μ_c - d/h_0 ;

h_0 - рабочая высота сечения,

ρ - кривизна,

y - расстояние от центра тяжести до крайнего волокна.

Выполнив интегрирование для учета работы бетона в растянутой зоне, окончательно получим уравнение вида:

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{i=1}^{N_1} \frac{x^{i+1}}{i+1} + \sum_{i=1}^{N_2} \alpha_{ii} \frac{(h-x)^{i+1}}{i+1} + \mu_s b h_0 \sum_{i=1}^{N_3} \alpha_{si} (h_0 - x)^i + \\
 & + \mu_c b h_0 \sum_{i=1}^{N_4} \alpha_{ci} (h_0 - x)^i. \quad (14)
 \end{aligned}$$

Второе уравнение равновесия $\sum M = 0$ запишется в виде:

$$\int_0^x \sigma_b(\varepsilon) b y dy - \int_0^{h-x-d} \sigma_{bt}(\varepsilon) b y dy + \sigma_s A_s (h_0 - x) + \sigma_c A_c \left(h - x - \frac{d}{2} \right) - M = 0. \quad (15)$$

Выполнив интегрирование, окончательно получим

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i \frac{x^{i+2}}{i+2} + \sum_{i=1}^{N_2} \alpha_{ii} \frac{(h-x-d)^{i+2}}{i+2} + \mu_s b h_0 \sum_{i=1}^{N_3} \alpha_{si} (h_0 - x)^{i+1} + \\
 & + \mu_c b h_0 \sum_{i=1}^{N_4} \alpha_{ci} (h-x-d)^{i+1} - M = 0, \quad (16)
 \end{aligned}$$

где M - действующий момент.

Согласно исходных предпосылок, на стадии разрушения, в момент исчерпания несущей способности бетон в растянутой зоне не работает, а все растягивающие усилия воспринимаются стальной арматурой и слоем "сетка+бетон".

При этом уравнения равновесия приобретают вид:

$$1) - \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i \frac{x^{i+1}}{i+1} + A_s \sum_{i=1}^{N_2} \alpha_{si} (h_0 - x)^i + A_c \sum_{i=1}^{N_4} \alpha_{ci} (h - x - d)^i = 0, \quad (17)$$

$$\text{или} \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i \frac{x^{i+1}}{i+1} + \mu_s b h_0 \sum_{i=1}^{N_2} \alpha_{si} (h_0 - x)^i + \mu_c b h_0 \sum_{i=1}^{N_4} \alpha_{ci} (h - x - d)^i = 0;$$

$$2) \sum_{i=1}^{N_1} \alpha_i \frac{x^{i+2}}{i+2} + \mu_s b h_0 \sum_{i=1}^{N_2} \alpha_{si} (h_0 - x)^{i+1} + \mu_c b h_0 \sum_{i=1}^{N_4} \alpha_{ci} (h - x - d)^{i+1} - M = 0. \quad (18)$$

По приведенной методике были произведены расчеты на компьютере РС IBM AT-286. В результате получены действительные значения коэффициентов E_{b1} , E_{s1} , E_{s2} , E_{c1} при различных уровнях напряженного состояния при сжатии и растяжении.

Значения этих коэффициентов, как исходные данные, наряду с классами арматуры и бетона, коэффициентами армирования μ слоя "сетка+бетон", действующей нагрузкой, закладываются в программу расчета, по которой определяются все интересующие нас параметры ($x, \beta, \sigma_s, \sigma_{bt}, \sigma_s, \sigma_c$).

Та величина изгибающего момента, при которой напряжения в слое "сетка+бетон" достигают значения напряжений трещинообразования ($\sigma_c = R_{сгс}$) и будет являться моментом образования трещин $M_{сгс}^c$.

Величина изгибающего момента, при которой напряжения в арматуре достигают своего предела прочности ($\sigma_s = R_s$) или при которой напряжения в сжатом бетоне достигают предела прочности на сжатие ($\sigma_b = R_b$), будет являться разрушающим моментом M .

В практическом расчете при напряжениях в бетоне сжатой зоны, не превышающих $0,7R_b$, эпюру напряжений в сжатом бетоне рекомендуется принимать треугольной.

Если принять, что при изгибе прочность бетона на растяжение $R_{bt}^{ис}$ выше $\sim 1,7$ раза, чем прочность при чистом растяжении R_b , то тем правомочнее будет принять эпюру сжатого бетона треугольной, так как условие $\sigma_b < 0,7 R_{bt}^{ис} \approx 1,2R_b$ практически всегда будет выполняться при отсутствии предварительного напряжения.

При этом остаются в силе следующие допущения:

- 1) сечение сохраняется плоским;

2) эпюра нормальных напряжений в бетоне растянутой зоны принимается прямоугольной;

3) толщина слоя "сетка+бетон" условно принимается равной нулю (по аналогии с диаметром арматуры), а усилие N_c принимается приложенным в центре тяжести этого слоя;

4) нормальные напряжения в слое "сетка+бетон" по его толщине распределяются равномерно.

При этом величина M_{crc} может быть записана в виде

$$M_{crc}^c = R_{кр}^{уз} \left[\frac{R_{кр}^{уз}}{R_{кр}^{уз}} \cdot b(h-d-x) \left(\frac{h-d}{2} + \frac{x}{6} \right) + 2\alpha_s A_s \left(h_0 - \frac{x}{3} \right) + bd \left(h - \frac{d}{2} - \frac{x}{3} \right) \right] \quad (19)$$

В практическом расчете можно принять рекомендованную в литературе величину $X=h/2$; тогда момент образования трещин запишется в виде

$$M_{crc}^c = R_{кр}^{уз} \left[\frac{R_{кр}^{уз}}{R_{кр}^{уз}} \cdot b \left(\frac{h}{2} - d \right) \left(\frac{7}{12} h - \frac{d}{2} \right) + 2\alpha_s A_s \left(h_0 - \frac{h}{6} \right) + bd \left(\frac{5}{6} h - \frac{d}{2} \right) \right] \quad (20)$$

Как показывают результаты экспериментов, трещины в бетоне растянутой зоны возникают лишь непосредственно перед разрушением изгибаемого элемента. Практически при изгибе элемента с комбинированным армированием стадии II и III напряженного состояния совпадают.

В практическом расчете прочности высоту сжатой зоны при изгибе рекомендуется принимать равной $0,3h$.

При этом величина изгибающего момента, соответствующая исчерпанию несущей способности, будет равна:

$$M = 0,045 R_b b h^2 + R_s A_s (h_0 - 0,3h) + R_c b d (0,7h - 0,5d) \quad (21)$$

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований работы изгибаемых элементов.

Целью исследований было экспериментальное определение параметров трещиностойкости (момента образования трещин, ширины раскрытия трещин) и предела прочности изгибаемых элементов с сетчато-стержневой арматурой и сравнение их с характеристиками, полученными теоретически.

При проведении экспериментальных исследований ставились следующие задачи:

- 1) выявление характера изменения напряженно-деформированного состояния при нагружении;
- 2) определение характера образования и развития трещин от момента их появления до разрушения балки с комбинированным армированием;
- 3) определение характера изгиба балок под нагрузкой и оценка их жесткости;
- 4) сравнение результатов, полученных для комбинированно-армированных балок с результатами, полученными экспериментально для обычных железобетонных балок-близнецов;
- 5) оценка достоверности предлагаемой методики расчета изгибаемых элементов с комбинированным армированием.

Анализ результатов испытания обычных железобетонных балок с балками, армированными сетками в зоне чистого изгиба, показал, что все балки, имеющие комбинированное армирование, являются более трещиностойкими.

Первые трещины появляются в зоне наибольших изгибающих моментов (зоне чистого изгиба) при нагрузках, соответствующих примерно половине разрушающих. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки появившиеся трещины практически не развиваются, а появляются новые трещины.

В бетоне растянутой зоны над арматурой трещины появляются значительно позже, практически при нагрузках, соответствующих $(0,8...0,9) R_{разр}$. Тогда напряжения в растянутом бетоне достигают величины $R_{сгс}^{23}$, после чего бетон "течет".

Полное разрушение всех балок, армированных продольной арматурой и сеткой, произошло не в зоне чистого изгиба (зоне максимальных изгибающих моментов), а по трещинам, проходящим от точки приложения сосредоточенной силы до места обрыва сетки.

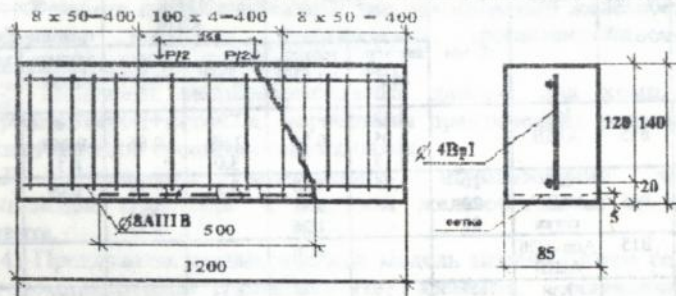


Рис. 8. Схема комбинированного армирования балок.

Ширина раскрытия трещин в зоне, армированной сеткой, в момент разрушения не превысила величины $0,15...0,2$ мм.

Сравнение трещиностойкости и прочности балок с комбинированным и обычным армированием показало, что момент образования трещин в балках с сетчато-стержневой арматурой превышает момент образования трещин обычных балок в среднем на 45...50%.

При нагрузках, соответствующих началу процесса образования трещин ($\sim 0,5 R_{раз}$) высота сжатой зоны составляет около половины высоты сечения балок, что подтверждает исходные предпосылки и возможность определять $M_{сг}^c$ по формуле (20).

При уровне нагрузки $\sim 0,8 R_{раз}$ высота сжатой зоны составляет $\sim (0,35...0,4)h$.

Предельная растяжимость бетона растянутой зоны в обычных армированных балках составляет $3 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-4}$, а в слое "сетка+бетон" в балках с сетчато-стержневой арматурой $6 \cdot 10^{-4} \dots 7 \cdot 10^{-4}$.

В балках с сетчато-стержневой арматурой рост прогибов носит квазилинейный характер вплоть до момента разрушения. В балках, имеющих только продольную арматуру, график прогибов носит нелинейный характер, и величина прогиба в момент разрушения превышает прогиб для балки с сеткой в 5-6 раз.

Сравнение результатов теоретических расчетов трещиностойкости и прочности с результатами экспериментов приведено в таблице 2.

Таблица 2.

№ п/п	Класс бетона	Армирование	Толщина на d, мм	Величина $M_{сг}$ кНм		Величина $M_{раз}$ кНм		Ширина раскрытия трещин $a_{сг}$, мм	
				экспер. $M_{сг}^{ср}$	теорет. по (20)	экспер. $M_{ср}$	теорет. по (21)	экспер. (средн.)	теорет. по СНиП
1	B15	IØ8 АШВ		1.12	0.94	2.94	2.86	0.07	0.11
-2				1.05		2.99		0.068	
3				1.13		3.0		0.11	
1с	B15	IØ8 АШВ+	10	1.35	1.38	3.1	3.35	0.04	-
2с			20	-	1.35	-	3.33	-	-
3с			30	-	1.26	-	3.33	-	-
п.н.	B15	Асп-Ø8 АШВ		-	1.36	-	-	-	-
4	B20	IØ8 АШВ		1.23	1.06	3.15	2.97	0.11	0.11
5				1.26		3.19		0.08	
6				1.35		3.20		0.085	
4с	B20	IØ8 АШВ+	10	1.56	1.49	3.45	3.73	0.038	-
5с			20	-	1.51	-	3.72	-	-
6с			30	-	1.44	-	3.76	-	-
п.н.	B20	Асп-Ø8 АШВ		-	1.48	-	-	-	-

Из таблицы видно, что величины моментов трещинообразования и разрушающих моментов, определенные экспериментально и по предлагаемой методике, практически совпадают. Разница не превышает 8%.

Для сравнения в таблице приведены величины $M_{ср}$ и $M_{рмр}$ для балок-близнецов без сеток с предварительно напряженной продольной арматурой того же класса АШв.

В пятой главе рассматривается внедрение результатов настоящей работы в строительство и определяется экономический эффект.

В предлагаемом варианте, очевидно, речь может идти о создании конструкции II категории трещиностойкости (реже - I категории) с повышенной сопротивляемостью трещинообразованию по сравнению с обычными ненапрягаемыми конструкциями.

Рекомендован оптимальный коэффициент армирования слоя "сетка + бетон", который является величиной $\sim 0,015$ (1,5%).

Также рассматривается экономическая эффективность применения сетчато-стержневого армирования.

Сравнение производится для равнопрочных балок-близнецов: - с обычной арматурой класса А-III;

- предварительно-напряженных с рабочей арматурой класса А-IIIв;

- с комбинированным сетчато-стержневым армированием (арматура ненапрягаемая, класса АШв).

Экономический эффект от применения сетчато-армированных изгибаемых железобетонных элементов составляет 20% на одно изделие по сравнению с преднапряженными изгибаемыми железобетонными элементами.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1) В работе предложен новый тип армирования железобетонного изгибаемого элемента повышенной трещиностойкости без предварительного напряжения.

2) Получены экспериментальные данные для комплексного материала "бетон+сетка" и разработаны практические рекомендации по изготовлению трещиностойких балок.

3) Определена возможность использования арматуры повышенной прочности в обычном железобетонном изгибаемом элементе.

4) Предложена математическая модель напряженного состояния многокомпонентного изгибаемого элемента, основанная на уточненных диаграммах работы материалов, позволяющая определить для любого уровня нагрузки истинные величины кривизны, высоты сжатой зоны, модуля деформации и напряжения в каждой точке.

5) Предложена прикладная инженерная методика практического расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых элементов прямоугольного сечения с сетчато-стержневой арматурой.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Стоянов Е.Г., Удо Х.А. К уточнению расчета изгибаемых железобетонных элементов // Тез. докл. республиканской научно-техн. конференции "Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформации и их внедрение в строительную практику" / Полтавский ИСИ. - Полтава, 1989. - Ч.1. - С.170-171.

2. Стоянов Е.Г., Удо Х.А. Экспериментально-теоретический анализ работы изгибаемых железобетонных элементов // Тез. докл. всесоюзной конференции "Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии" / Белгородский тех. институт строительных мат. - Белгород, 1991.-Ч.7.- С. 100.

3. Удо Х.А. Исследование напряженного состояния железобетонного изгибаемого элемента таврового сечения // В сб. научных трудов "Повышение эффективности и надежности городского хозяйства" / ХИИГХ. - К.: Высшая школа, 1993. - С.36-38.

4. Стоянов Е.Г., Удо Х.А. Экспериментально-теоретический анализ и новая методика расчета изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения // В сб. научных трудов "Повышение эффективности и надежности городского хозяйства." / ХИИГХ.-К.: Высшая школа, 1993.- С. 39-40.

5. Стоянов Е.Г., Удо Х.А. Исследование трещиностойкости изгибаемого элемента с комбинированным сетчато-стержневым армированием // В сб. научных трудов "Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства." / ХИИГХ.- К.: Высшая школа, 1994.- С. 14-15.

6. Удо Х.А. Экспериментальные исследования трещиностойкости балок с комбинированным сетчато-стержневым армированием // В сб. научных трудов "Коммунальное хозяйство городов." / ХИИГХ.-К.: Техника, 1994.- вып. 3.-С.50-51.

Подп.к печати 10.5.94г. Формат 60x84 1/16
бумага писч.№ 3 Печать офсетная
Тираж 100 экз. зак. № 4 бесплатно
Услов.печат.листов 0,96

Харьковский Промстройниипроект
310022, Харьков, пл.Независимости,8

AB 30.058

AB 30.058