

Минстройархитектуры Украины
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
(Н И И С К)

На правах рукописи

МИХАЙЛИЧЕНКО Александра Владимировна

УДК 624.073.72-012.2.851

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ,
РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

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

Киев 1993

7В 20.000
Работа выполнена в Научно-исследовательском институте
строительных конструкций.

Научный руководитель -
доктор технических наук,
старший научный сотрудник М. А. Янкелевич

Научный консультант -
кандидат технических наук А. М. Лисеный

Официальные оппоненты -
доктор технических наук,
старший научный сотрудник А. В. Шимановский

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник В. А. Критов

Ведущая организация - ГПИ Киевский Промстройпроект

Защита состоится 21 11 1993г. в 14⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета К 033.09.01 по присуж-
дению ученой степени кандидата технических наук Научно-иссле-
довательского института строительных конструкций по специаль-
ности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения
по адресу: 252037, г. Киев, ул. Ивана Клименко, 5/2 (актовый
зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан 19 11 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

Ю. М. Кундюцкий

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00802623 (L)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Актуальность работы. Одной из основных задач в области строительства в настоящее время является создание прогрессивных индустриальных железобетонных конструкций промышленных и гражданских зданий, обладающих высокой экономической эффективностью. Важнейшими элементами зданий являются конструкции покрытия и перекрытия, воспринимающие вертикальные нагрузки.

В последние годы в практике строительства находят применение изгибаемые железобетонные конструкции (балки, ригели, плиты) со смешанным армированием. Применение смешанного армирования возможно для тех марок конструкций, для которых сечение рабочей арматуры определяется требованиями прочности, а расчет по предельным состояниям II группы не является лимитирующим. В этом случае может быть уменьшена величина предварительного напряжения и произведена замена части напрягаемой арматуры на ненапрягаемую, устанавливаемую в соответствии с эпюрой моментов в средней части пролета. При использовании смешанного армирования в конструкциях массового применения экономический эффект может быть значительным за счет экономии арматуры, кроме того уменьшается металлоемкость силовых форм, трудоемкость и энергоемкость изготовления.

Вместе с тем конструкции со смешанным армированием имеют особенности, которые должны быть учтены при расчете и конструировании. Расчет конструкций, у которых в незагруженном состоянии напрягаемая арматура растянута, а ненапрягаемая сжата, и имеется существенное различие в уровне напряжения арматур при одной и той же нагрузке, при недостаточно подробном учете нелинейности работы конструкций не дает возможности достоверно оценить напряженно-деформированное состояние.

Это обусловило необходимость проводить расчет изгибаемых элементов со смешанным армированием с привлечением диаграмм деформирования материалов, близких к реальным, что позволяет более полно оценить при проектировании неупругие свойства железобетона. Такие расчеты целесообразно выполнять с применением ЭВМ.

Назначение оптимальных по стоимости соотношений между напрягаемой и ненапрягаемой арматурой для арматур различных классов, обеспечивающих полное использование прочностных свойств

обеих арматур требует решения задачи оптимизации.

Целью работы является разработка расчетного аппарата, позволяющего проектировать изгибаемые конструкции со смешанным армированием с минимальным расходом арматурной стали при соблюдении требований норм проектирования и безопасной эксплуатации конструкций.

Научную новизну работы составляют:

1. Методика расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием, основанная на учете полных диаграмм работы материалов и позволяющая определить напряженно-деформированное состояние конструкции на любой стадии нагружения при кратковременном и длительном нагружении, а также с учетом разгрузки.

2. Методика и алгоритм оптимизации смешанного армирования с учетом поперечной арматуры.

3. Экспериментальные данные об особенностях напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов со смешанным армированием при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении.

Практическое значение работы состоит в том, что на основе предлагаемых методик разработан алгоритм расчета с применением ЭВМ, позволяющий более достоверно определять несущую способность, прогибы и ширину раскрытия трещин в изгибаемых элементах со смешанным армированием, а также проектировать конструкции минимальной стоимости.

Автор защищает:

1. Методику расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении, основанную на учете полных диаграмм деформирования бетона и арматуры.

2. Методику оптимизации по стоимостному критерию параметров смешанного армирования с учетом поперечного армирования.

3. Методику и результаты экспериментального исследования ребристых плит покрытия со смешанным армированием при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении.

4. Алгоритм расчета конструкций со смешанным армированием, реализованный в программе для ЭВМ.

5. Рекомендации по назначению предельного содержания не-напрягаемой арматуры для конструкций массового применения при различных классах арматур.

Реализация работы. Программа поверочного расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием ВЕАМ передана в Отраслевой фонд алгоритмов и программ.

Методика расчета и оптимизации изгибаемых элементов со смешанным армированием, предлагаемая в диссертации, была использована при расчете многопустотных панелей перекрытия, производимых на Николаевском заводе ЖБИ-1, а также на Одесском заводе ЖБИ треста "Черноморгидрострой".

Достоверность результатов подтверждена согласованностью данными экспериментального исследования, выполненного в настоящей работе, а также с данными проводившихся ранее в НИИСК экспериментальных исследований конструкций со смешанным армированием.

Апробация. Основные положения диссертации доложены на XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона, г. Москва, 1991г., на всесоюзном координационном совещании "Экономичное армирование железобетонных конструкций", г. Фрунзе, 1990г.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 4 статьях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 108 наименований, изложена на 88 страницах машинописного текста и иллюстрирована 23 рисунками и 8 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Первая глава посвящена анализу состояния вопроса и постановке задач исследования. Выполненный обзор работ по проблеме смешанного армирования позволяет сделать вывод, что железобетонные конструкции со смешанным армированием являются более экономичными, чем полностью преднапряженные. Об этом говорится в работах И.И. Градюка и М.И. Стасюка, И.Г. Головина, И.А. Трифонова, Н.А. Калашникова и К.Г. Синегуба, Н.А. Крамаря, М.Н. Шпака, Д.А. Чалкатряна, А.А. Светова и других ученых, а также ряда зарубежных авторов, в числе которых П. Абелес, Х. Бахман, М. Кох и А. Макроз, А. Нааман, Ф. Эмпрегер. Применение смешанного армирования в плитно-балочных конструкциях позволяет экономить до 25% рабочей арматуры, что составляет от 6 до 9% общего расхода арматурной стали.

Исследования, проведенные в НИИЖБ, НИИСК, МИСИ, ЛПИ и других организациях выявили ряд особенностей работы элементов со смешанным армированием и определили область их рационального применения. Экспериментальные данные показывают, что по деформативности и трещиностойкости такие конструкции отличаются от обычных, особенно в стадии, близкой к расчетной нагрузке. Вследствие того, что в напрягаемой арматуре начальные деформации растягивающие, а в ненапрягаемой - сжимающие, напряженно-деформированное состояние конструкций со смешанным армированием отличается от обычных конструкций. Многие авторы отмечают возможность ранней текучести напрягаемой арматуры.

Рассмотренные в данном разделе экспериментальные исследования проводились при кратковременном нагружении и носили в основном частный характер, в них конструкции со смешанным армированием оценивались с точки зрения удовлетворения требований стандарта на испытания железобетонных конструкций и не учитывалось влияние всех параметров смешанного армирования на напряженно-деформированное состояние изгибаемых элементов. Для более подробного изучения рассматриваемых конструкций представляет интерес результаты экспериментальных исследований натуральных образцов и моделей продольных ребер плит со смешанным армированием, которые проводились в НИИСК.

До настоящего времени расчет конструкций со смешанным армированием выполнялся в основном по нормам проектирования железобетонных конструкций. Расчет по прочности при этом велся по общему случаю. Так рассчитывали конструкции со смешанным армированием Г.И. Бердичевский, А.А. Светов, В.Г. Крамарь, Д.А. Чалкатрян, И.И. Градюк и М.И. Стасюк, И.А. Трифонов и Н.И. Филимонов. Некоторые авторы дают уточнение методики, используемой в нормах проектирования путем введения в расчет различных эмпирических коэффициентов. Общим недостатком перечисленных работ является то, что в них недостаточно внимания уделяется достоверному отражению реальной деформативности и трещиностойкости элементов со смешанным армированием. Вместе с тем, такие конструкции имеют особенности, обуславливающие необходимость подробного учета нелинейной работы железобетона. Для практических расчетов наиболее предпочтительной является методика, основанная на учете полных диаграмм деформирования бетона и арматуры. Автором рассмотрены различные предложения по аналитическому представле-

нию этих диаграмм как при кратковременном, так и при длительном действии нагрузки.

Наряду с достоверной методикой расчета большое значение для выбора наиболее экономичного варианта смешанного армирования имеет назначение оптимальных соотношений между напрягаемой и ненапрягаемой арматурами. Весьма простой, практичный и в то же время эффективный метод оптимизации смешанного армирования предложен М. А. Янкевичем. Замена части напрягаемой арматуры на ненапрягаемую при соблюдении требований первой и второй групп предельных состояний осуществляется исходя из минимума суммарной стоимости арматуры:

$$C = C_{sp} A_{sp} l_{sp} + C_s A_s \frac{\sum_{s=1}^{N-1} l_{s1}}{N} \rightarrow \min$$

Минимизируя целевую функцию, М. А. Янкевич получил выражение для определения оптимального содержания ненапрягаемой арматуры. Следует отметить, что зависимости, приведенные в работах этого автора, составлены в предположении заведения обрываемых в пролете ненапрягаемых стержней за точку теоретического обрыва, которая определяется прочностью нормальных сечений без учета влияния поперечного армирования на длину анкеровки ненапрягаемой арматуры. Рассмотренная методика оптимального проектирования конструкций со смешанным армированием может быть уточнена путем учета поперечной арматуры в составе целевой функции.

Исходя из изложенного, задачи исследований формируются следующим образом:

- выполнить анализ данных проведенных ранее экспериментальных исследований и выявить факторы, которые необходимо учесть методикой расчета;
- разработать и реализовать в программе для ПЭВМ методику расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием с учетом неупругой работы железобетона;
- уточнить методику оптимизации смешанного армирования с учетом влияния поперечной арматуры на длину ненапрягаемых стержней;
- экспериментально исследовать железобетонные плиты со смешанным армированием, в том числе при длительном нагружении;
- проверить достоверность предлагаемой методики расчета путем сопоставления опытных и расчетных данных;

на основании численного анализа получить значения предельного содержания ненапрягаемой арматуры для конструкций массового применения при различных сочетаниях классов напрягаемой и ненапрягаемой арматур.

Во второй главе приводится анализ проведенных в НИИСК экспериментальных исследований изгибаемых элементов со смешанным армированием. Киевский Промстройпроект с участием НИИСК и НИИЖБ запроектировал серию плит покрытий размером 3x12 м со смешанным армированием, опалубочные размеры плит были приняты по серии 1.465.1-3/80 I и II типоразмеров. В НИИСК были проведены испытания опытных образцов этих плит. Испытания проводились под руководством М. А. Янкелевича, было испытано двенадцать натуральных образцов плит.

Анализируя результаты испытаний, можно отметить следующее.

Прогибы конструкций и ширина раскрытия трещин при контрольных нагрузках не превышали допустимых величин.

Однако, при нагрузках, близких к расчетным по прочности, наблюдалось резкое увеличение прогибов и ширины раскрытия трещин. Как правило, такое явление при испытаниях свидетельствует о работе напрягаемой арматуры в зоне пластических деформаций.

После разгрузки и повторного нагружения прогибы и ширина раскрытия трещин при соответствующих нагрузках в ряде образцов намного превысили предельно допустимые значения.

Для более детального изучения особенностей работы изгибаемых элементов со смешанным армированием при различных классах и соотношениях площадей напрягаемой и ненапрягаемой арматуры были проведены экспериментальные исследования образцов балок таврового сечения длиной 3 м. Соотношение размеров сечений образцов соответствовало продольным ребрам плит 3x12 м. Испытания проводил А. Д. Филатов под руководством М. А. Янкелевича.

Было изготовлено 17 серий опытных образцов со смешанным армированием. Серии различались между собой классами напрягаемой и ненапрягаемой арматуры, содержание ненапрягаемой арматуры изменялась в различных сериях образцов от 24% до 50%.

Кроме того были испытаны 4 серии полностью преднапряженных образцов для сравнения их работы с аналогичными образцами со смешанным армированием.

Автором диссертации проведена детальная обработка резуль-

татов этих испытаний опытных образцов. Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы.

Опытные прогибы и ширина раскрытия трещин при контрольных нагрузках близки к вычисленным по формулам норм.

При нагрузках, близких к расчетным прогибы и ширина раскрытия трещин в элементах со смешанным армированием в 1,5-2 раза больше, чем аналогичные величины для полностью преднапряженных элементов, а при повторном нагружении прогибы возрастают в 1,5-2 раза, а ширина раскрытия трещин в 2-2,5 раза по сравнению с однократным нагружением. Для полностью преднапряженных конструкций это превышение составляет соответственно 1,2-1,3 раза для прогибов и 1,3-1,5 раза для ширины раскрытия трещин. Это можно объяснить более ранним достижением текучести напрягаемой арматуры в элементах со смешанным армированием, чем в полностью преднапряженных конструкциях. В элементах, в которых содержание ненапрягаемой арматуры превышало 30%, напрягаемая арматура работала в зоне пластических деформаций при нагрузках, меньших чем расчетные.

В тех элементах, где напрягаемая арматура имеет меньший предел текучести, чем ненапрягаемая, последняя используется неэффективно, ее текучесть наступает значительно позднее приложения расчетной нагрузки.

Таким образом, при расчете изгибаемых элементов со смешанным армированием необходимо учитывать следующее. Недопустимым для нормальной эксплуатации конструкций является достижение напряжений текучести в арматуре при эксплуатационных нагрузках. В связи с этим процентное содержание ненапрягаемой арматуры в конструкциях со смешанным армированием должно быть ограничено на основании численного анализа. Методика расчета должна позволять определять напряжения в арматуре и бетоне при любом уровне нагружения, прогибы и ширину раскрытия не только при контрольных нагрузках, а также при повторных и длительных нагружениях. При контрольных испытаниях, очевидно, следует проводить частичную разгрузку и повторное нагружение конструкций.

В третьей главе разрабатывается методика расчета изгибаемых железобетонных элементов со смешанным армированием при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении, основанная на учете физической нелинейности железобетона.

При разработке методики расчета ставились задачи:

- обеспечение возможности оценки напряженно-деформированного состояния конструкции на всех этапах нагружения вплоть до разрушения с определением предельных нагрузок по прочности максимально нагруженного сечения и сечений в местах обрыва ненапрягаемой арматуры;

- определение прогибов и ширины раскрытия трещин при соответствующих расчетных нагрузках при однократном нагружении и при повторном нагружении после приложения расчетной по прочности нагрузки и разгрузки.

В основу методики положен учет действительных диаграмм деформирования арматуры и бетона, что с одной стороны дает возможность определять напряжения и деформации в сечениях на всех стадиях работы элемента, а с другой не вызывает больших трудностей при расчетной реализации.

При расчете элемент разбивается по длине на ряд сечений. Типы сечений отличаются опалубочными размерами и армированием. Для всех типов сечений с учетом обрыва ненапрягаемой арматуры в пролете строятся диаграммы зависимости "момент-кривизна".

При построении диаграммы "момент-кривизна" исходят из предпосылок, основанных на использовании гипотезы плоских сечений для усредненного напряженно-деформированного состояния участка конструкции.

Диаграммы "момент-кривизна" строятся для сечения, приведенного к двутавровому. При действии кратковременной нагрузки диаграммы "момент-кривизна" строятся с использованием полных "расчетных" и "нормативных" диаграмм деформирования бетона и арматуры; полные диаграммы деформирования бетона задаются в соответствии с методикой, разработанной в лаборатории теории расчета железобетона НИИСК. (А. Б. Гольшев, В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура). Напряжения в бетоне при этом определяются по зависимости, описывающей диаграмму " $\sigma_b - \epsilon_b$ " с ниспадающей ветвью полиномом 5-й степени. При действии длительной нагрузки диаграммы "момент-кривизна" строятся с учетом полных "длительных" диаграмм деформирования бетона, каждая точка которых соответствует деформациям ϵ к сроку ∞ при загрузении до напряжений σ на 28-й день. За основу были взяты зависимости, разработанные в НИИЖБ, согласно которым деформации бетона выражаются через напряжения с помощью коэффициента изменения секущего модуля ν_b .

С использованием этих зависимостей в лаборатории конструкций одноэтажных зданий были вычислены коэффициенты полинома 3-й степени, описывающего диаграмму " $\sigma_b - \epsilon_b$ " при учете длительности нагружения для различных классов бетона.

Параметры диаграммы "момент-кривизна" в различных точках определяются путем решения за несколько итераций уравнений равновесия сечения, составленных с учетом начальных деформаций от предварительного напряжения.

В качестве критерия разрушения сечения принимается достижение предельных деформаций в сжатом бетоне, в напрягаемой или ненапрягаемой арматуре.

Построение кривой разгрузки производится по упрощенному методу определения зависимости "момент-кривизна" железобетонного изгибаемого элемента при одноцикловом знакопеременном нагружении, предложенному А.В. Войцеховским. Напряжения и деформации в арматуре при разгрузке из заданной точки определяются из предположения, что модуль деформаций арматуры при разгрузке равен первоначальному модулю упругости.

При вычислении параметров диаграмм "момент-кривизна" в сечениях попутно определяются напряжения и деформации в напрягаемой и ненапрягаемой арматуре для определения ширины раскрытия трещин.

Прогибы конструкции определяются с помощью численного интегрирования по кривизнам в сечениях, определенным в зависимости от вида действующей нагрузки с учетом разгрузки.

Ширина продолжительного раскрытия трещин определяется по формуле (144) СНиП 2.03.01-84, в которую вместо (σ_s/E_s) вводятся значения деформации арматуры крайнего ряда (или приращения деформаций в напрягаемой арматуре) с учетом коэффициента ψ_a , определяемого по нормам.

Ширина непродолжительного раскрытия трещин определяется как сумма продолжительного раскрытия трещин и приращения ширины раскрытия трещин, соответствующего приращению деформаций в арматуре от действия кратковременной нагрузки.

Ширина непродолжительного раскрытия трещин после загрузки конструкций до расчетной по прочности нагрузки и разгрузки до нормативной определяется с учетом величины приращения раскрытия трещин вычисляемой с учетом приращения деформаций арматуры после разгрузки.

В этой же главе формулируется задача оптимизации смешанного армирования с учетом поперечной арматуры

Для обеспечения прочности наклонных сечений в местах обрыва арматуры стержни должны быть заведены за сечение, в котором они не требуются, исходя из прочности наклонных сечений по моменту, на длину не менее $5d_1$. В этом случае длина заводки стержней за точку теоретического обрыва должна составлять при отсутствии нагрузки на длине зоны заводки:

$$W = \frac{Q_x S_1}{2A_{sw1} R_{sw} q_{sw1}} + 5d_1.$$

а при равномерно распределенной нагрузке q

$$W = \frac{Q_x}{q_{sw1} + q} - \frac{Q_x}{q} + \sqrt{\left(\frac{Q_x}{q}\right)^2 + \frac{q_{sw1}}{q} \left(\frac{Q_x}{q_{sw1} + q}\right)^2} + 5d_{s1}.$$

где Q_x - перерезывающая сила в точке теоретического обрыва;
 q_{sw1} - погонное усилие, воспринимаемое поперечной арматурой в наклонном сечении в зоне заводки обрываемых стержней;
 A_{sw1} - площадь поперечных стержней в сечении;
 S_1 - шаг поперечных стержней.

Таким образом, требуемая длина стержней зависит от сечения поперечной арматуры в точке теоретического обрыва. Поэтому при оптимизации соотношения между сечениями напрягаемой и ненапрягаемой арматуры при смешанном армировании в качестве критерия оптимальности следует принимать общую стоимость продольной и поперечной арматуры. Если исходить из того, что сечение поперечной арматуры A_{sw1}/S_1 постоянно в пределах участка с постоянным сечением продольной арматуры и изменяется в точках теоретического обрыва арматуры, то целевая функция задачи оптимизации может быть представлена в виде:

$$C^* = C_{sp} A_{sp} l_{sp} + C_s A_s \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_0 - 2x_i + 2w_i) +$$

$$2C_{sw} A_{sw1} h_w \sum_{i=1}^N \frac{x_i - x_{i-1}}{s}.$$

- где C_{sw} - стоимость единицы объема поперечной арматуры;
 h_w - длина поперечных стержней;
 x_1 - расстояние от опоры до 1-той точки теоретического обрыва стержней ($x_0 = 0$);
 C^* - суммарная стоимость продольной напрягаемой и ненапрягаемой арматуры и поперечной арматуры на опорных участках элемента между точками теоретического обрыва последней группы стержней.

Автором предлагается алгоритм для решения задачи оптимизации смешанного армирования с учетом поперечной арматуры.

В четвертой главе описывается методика и результаты экспериментального исследования двух образцов ребристых плит покрытия 3х6 м. Испытания проводились с целью проверки прочности, жесткости и трещиностойкости конструкций со смешанным армированием из бетона на основе ВНВ при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении, а также для оценки достоверности предлагаемой методики расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием.

Выбранные в качестве опытных образцов плиты запроектированы под нагрузку, близкую к максимальной по серии 1.465.1-3/80 (11,75 кН/м² с учетом собственного веса плиты).

Плиты изготавливались в опалубке ГОСТ 22701.0-77* из тяжелого бетона класса В30 на основе ВНВ. Высота продольных ребер - 30 см, поперечных - 15 см, толщина полки - 3 см. Опытные образцы были армированы одинаково. Сечение напрягаемой и ненапрягаемой арматуры продольных ребер, а также длина ненапрягаемого стержня определялись по уточненной методике оптимизации смешанного армирования, изложенной в третьей главе. Содержание ненапрягаемой арматуры составило при этом 33,3% от общего содержания продольной арматуры. Таким образом, продольные ребра опытных образцов были армированы двумя напрягаемыми стержнями 014ATV и одним ненапрягаемым стержнем 014ATV.

Натяжение арматуры продольных ребер производилось на упоры металлической формы электротермическим способом. Твердение бетона осуществлялось в естественных условиях.

Испытания первого образца плиты проводились в 2 этапа:

1 этап - загрузка статической равномерно распределенной нагрузкой, равной длительно действующей нагрузке и выдерживание

плиты под нагрузкой в течение 155 дней; величина длительно действующей нагрузки - 6,8 кН/м².

2 этап - разгрузка и нагружение плиты до расчетной по прочности нагрузки с фиксацией контрольных по жесткости и по ширине раскрытия трещин нагрузок и замером прогибов и раскрытия трещин, затем - разгрузка до проектной постоянной нагрузки с замером остаточного прогиба и раскрытия трещин и дальнейшее нагружение плиты до контрольной по прочности нагрузки. Проводилось несколько циклов нагружения - до стабилизации остаточных прогибов. После этого плита нагружалась до исчерпания несущей способности с контролем нарастания прогибов и ширины раскрытия трещин.

Испытания второго образца плиты проводились кратковременным нагружением аналогично испытаниям первого образца.

Для обоих образцов было проведено по 5 циклов нагружения и разгрузки. При каждом цикле нагружения фиксировались прогибы и ширина раскрытия трещин при контрольных по жесткости и раскрытию трещин нагрузках, а также при повторных нагружениях величины остаточных прогибов и ширины раскрытия трещин.

Кроме основных испытаний в лаборатории теории расчета железобетона были проведены испытания по построению полной (с ниспадающей ветвью) диаграммы деформирования бетона, а также длительные испытания призм, по материалам которых автором построена условная длительная диаграмма для бетона. Полученные экспериментально диаграммы деформирования бетона и арматуры были использованы при расчете опытных образцов по разработанной методике.

Основные результаты испытаний в сопоставлении с опытными данными представлены в таблице 1.

Расчетные значения прогибов и ширины раскрытия трещин, полученные при расчете с использованием экспериментальных диаграмм деформирования бетона приводятся в числителе, а вычисленные с введением в расчет аналитических зависимостей " $\sigma_b - \epsilon_b$ " - в знаменателе.

Анализируя результаты испытаний можно отметить следующее.

При действии длительной нагрузки испытываемая плита со смешанным армированием не имела существенных отличий от обычной конструкции (прогибы и ширина раскрытия трещин соответствовали величинам, полученным при расчете и не превышали предельно до-

Таблица 1. Сопоставление результатов испытаний с расчетными данными.

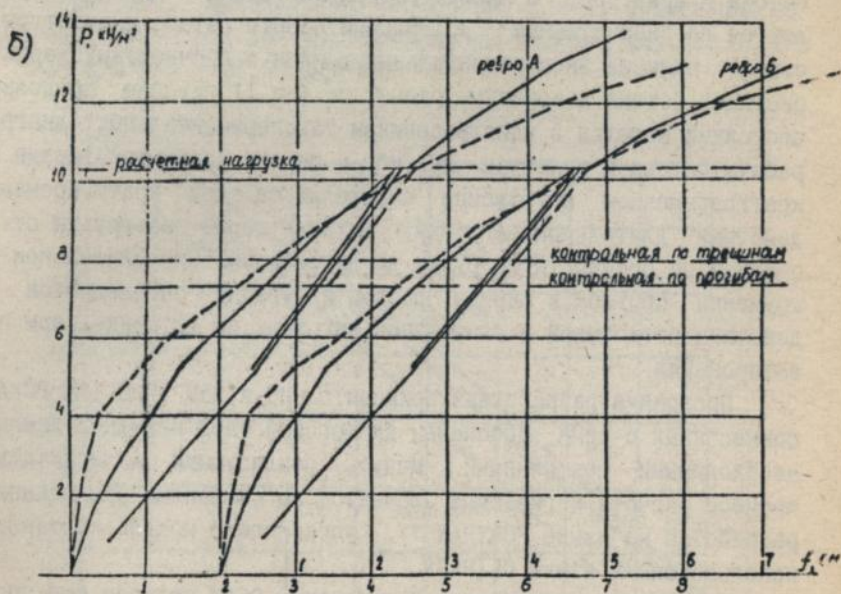
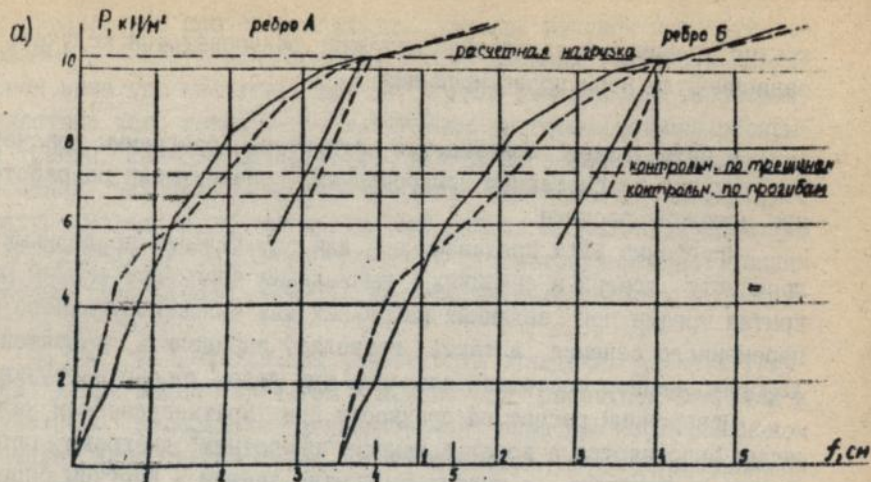
	Ед. ИЗМ	Образец 1		Образец 2		
		ребро А	ребро В	ребро А	ребро В	
Прогиб продольных ребер при контрольных нагрузках - кратковременный опытный при загрузении длительнодействующей нагрузкой - то же, вычисленный - длительный опытный - то же, вычисленный - кратковременный опытный - то же, вычисленный - опытный при повторном загрузении - то же, вычисленный	см					
	"	1.04	1.17	-	-	
	"	<u>0.93</u> 1.16	<u>1.15</u> 1.24	-	-	
	"	2.15	2.25	-	-	
	"	<u>1.94</u> 2.70	<u>2.20</u> 3.28	-	-	
	"	1.77	1.95	2.57	2.63	
	"	<u>1.68</u> 1.90	<u>1.75</u> 2.21	<u>2.42</u> 2.76	<u>2.46</u> 2.76	
	"	2.92	3.08	3.22	3.41	
	"	<u>3.12</u> 2.68	<u>3.37</u> 2.89	<u>3.41</u> 3.12	<u>3.52</u> 3.15	
	Ширина раскрытия трещин в продольных ребрах - при длительно нагружении - опытная - то же, вычисленная - при кратковременном нагружении - опытная - то же, вычисленная - при повторном нагружении - опытная - то же, вычисленная	мм				
		"	0.120	0.080	-	-
		"	<u>0.082</u> 0.25	<u>0.089</u> 0.28	-	-
"		0.100	0.050	0.180	0.200	
"		<u>0.079</u> 0.08	<u>0.083</u> 0.10	<u>0.186</u> 0.15	<u>0.188</u> 0.155	
"		0.200	0.130	0.250	0.300	
"		<u>0.152</u> 0.158	<u>0.159</u> 0.164	<u>0.183</u> 0.22	<u>0.186</u> 0.25	
Расчетная нагрузка		кН М	11.8		11.8	
Опытная максимальная нагрузка	"	15.9		15.6		
Вычисленная несущая способность	"	14.9	15.3	15.7	15.7	

пустимых по нормам.

При кратковременных испытаниях опытных образцов прогибы и ширина раскрытия трещин при соответствующих нагрузках также соответствовали требованиям норм. В то же время, нагружение до расчетной нагрузки с последующей разгрузкой привели к резкому возрастанию прогибов и ширины раскрытия трещин. При повторном нагружении прогибы продольных ребер увеличились в 1,57-1,65 раза в первом образце и в 1,7-1,9 раза во втором образце, а ширина раскрытия трещин в первом образце увеличилась на 40-50 %, во втором - на 50%, что по абсолютной величине близко к предельно допустимым величинам или незначительно превышает их. В обоих образцах при термическом натяжении была ослаблена напрягаемая арматура, текучесть наступила до расчетной нагрузки (по данным тензометрии во второй плите текучесть напрягаемой арматуры нижнего ряда наступила при нагрузке, равной 0,9 от расчетной). Это сказалось на прогибах и ширине раскрытия трещин опытных образцов при повторном нагружении. Прогибы продольных ребер при кратковременном нагружении показаны на рис. 1.

С использованием разработанной методики расчета, реализованной в программе для ЭВМ, выполнено сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами расчета. При кратковременном и многократно повторном нагружении прогибы, по предлагаемой методике отличаются от опытных в пределах 9%, а ширина раскрытия трещин - 27%. Характер разрушения обеих плит, полученный расчетом, соответствует экспериментальному, вычисленная несущая способность отличается от опытной максимальной нагрузки не более, чем на 6%. Такое соответствие расчетных и опытных величин свидетельствует о достоверности разработанной методики расчета для кратковременных нагружений.

Величины прогибов и ширины раскрытия трещин, полученные при расчете на длительное загрузение с использованием экспериментальных "длительных" диаграмм деформирования бетона, дают хорошее соответствие с данными эксперимента и отличаются в пределах 9% и 25%. Вместе с тем, результаты, полученные с введением в расчет зависимостей длительных напряжений и деформаций бетона, предлагаемых НИИЖБ, не соответствуют экспериментальным данным. Поэтому до получения более достоверных данных об аналитическом представлении диаграмм деформирования бетона при длительном нагружении величины длительных прогибов и ширины рас-



- - опытные зависимости;
- - расчетные зависимости.

Рис. 1. Прогибы продольных ребер опытных образцов при кратковременном нагружении (а - первой плиты, б - второй плиты).

крытия трещин в предлагаемой методике рекомендуется получать по зависимостям норм проектирования.

В пятой главе описывается структура программы расчета конструкций со смешанным армированием, реализующей разработанную методику расчета.

Программа BEAM предназначена для определения предельных по прочности усилий в сечениях, вычисления прогибов, ширины раскрытия трещин при заданных нагрузках для балок постоянного или переменного сечения, а также позволяет определить напряженно-деформированное состояние элемента при любом уровне нагрузки.

Поверочный расчет по прочности при кратковременном нагружении выполняется с использованием "расчетных" диаграмм работы бетона и арматуры, а ширина раскрытия трещин и прогибы определяются по "нормативным" диаграммам работы бетона и арматуры. В случае наличия экспериментальных данных о прочностных характеристиках бетона и арматуры расчет по I и II группам предельных состояний ведется с использованием "экспериментальных" диаграмм работы бетона и арматуры. Прогибы и ширина раскрытия трещин при кратковременном нагружении определяются при кратковременном действии длительной нагрузки, а также после разгрузки от расчетной по прочности нагрузки до длительной. При длительном нагружении прогибы и ширина раскрытия трещин определяются при действии постоянной и длительной нагрузок по методике норм проектирования.

Программа разработана применительно к ЭВМ типа IBM PC/AT и совместимых с ними. Обеспечен диалоговый ввод исходных данных с необходимыми пояснениями. Модуль, реализующий вычислительный процесс расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием, разработан на языке FORTRAN 77, управляющий модуль составлен с использованием языка CLIPPER.

При помощи разработанной программы BEAM автором был проведен численный анализ работы изгибаемых конструкций со смешанным армированием на примерах плит покрытия 3x12 м в опалубке серии 1.465.1-3/80 I-го типоразмера. Для подробного анализа напряженно-деформированного состояния сечений изгибаемых элементов варьировался процент содержания ненапрягаемой арматуры от 5% до 45% для арматуры классов АIIIв, АIV, АV при проценте армирования $\mu=1, 2$ и 3%.

Результаты расчетов показали, что при высоком проценте содержания ненапрягаемой арматуры в конструкциях текучесть напрягаемой арматуры наступает при нагрузках, меньших чем расчетные, вследствие чего имеют место остаточные прогибы и ширина раскрытия трещин, намного превышающие предельные величины. При проектировании рекомендовано ограничивать содержание ненапрягаемой арматуры исходя из условия упругой работы напрягаемой арматуры до достижения расчетной нагрузки. В рассмотренных конструкциях предельно допустимое содержание ненапрягаемой арматуры составляет от 20 до 35%.

На рис. 2 представлены зависимости отношения момента текучести напрягаемой арматуры к моменту от расчетной нагрузки и процентного содержания ненапрягаемой арматуры при различном проценте армирования и для арматуры класса АIV. По графикам можно определить максимально допустимый процент содержания ненапрягаемой арматуры для рассматриваемых конструкций (20,8% для $\mu=1$, 24% для $\mu=2$ и 25,5% для $\mu=3$).

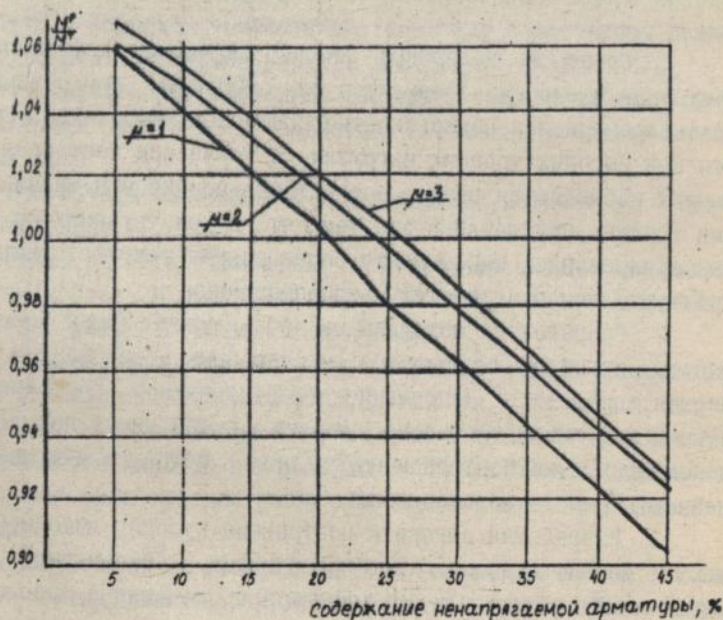


Рис. 2. Зависимость отношения расчетного момента к моменту текучести напрягаемой арматуры от содержания ненапрягаемой арматуры.

При помощи разработанной методики расчета аналогично можно получить максимально допустимый процент ненапрягаемой арматуры для любых изгибаемых конструкций со смешанным армированием.

Разработанная методика расчета и оптимизации применена при проектировании многопустотных плит перекрытий со смешанным армированием. Опытное производство таких плит осваивается Одесским заводом ЖБИ треста "Черноморгидрострой" и Николаевским заводом ЖБИ-3. Экономия арматурной стали составляет 7-8% от общего расхода арматурной стали на конструкцию, что составит около 110 т металла в год.

Плиты изготавливаются в опалубке серии 1.141-1, выпуск 63 и отличаются от серийных смешанным армированием. В качестве напрягаемой арматуры применяется сталь класса АIV, в качестве ненапрягаемой - дополнительные сетки из проволоки класса ВрI, укладываемые поверх напрягаемых стержней в середине пролета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен подробный анализ напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов со смешанным армированием при кратковременной и многократно повторном нагружении. Выявлено, что при высоких уровнях нагрузки, а также при повторных нагружениях наблюдается резкое возрастание прогибов и ширины раскрытия трещин. Обусловлено это тем, что в конструкциях со смешанным армированием имеет место более ранняя текучесть напрягаемой арматуры, чем в полностью преднапряженных.

2. Разработана методика расчета, учитывающая особенности работы изгибаемых элементов со смешанным армированием и позволяющая определить напряженно-деформированное состояние конструкций при любом уровне нагружения, в том числе при длительном и многократно повторном нагружении. Методика учитывает нелинейность работы железобетона.

3. Разработан алгоритм построения кусочно-линейной зависимости "момент-кривизна" для приведенных к общему виду сечений, основанный на модели эквивалентного сечения с использованием деформационного критерия разрушения. При этом учитывается полная диаграмма деформирования бетона при кратковременном нагружении, выраженная полиномом, а также преднапряжение арматуры.

4. Уточнена методика оптимизации смешанного армирования.

разработан общий алгоритм оптимизации смешанного армирования, учитывающий поперечную арматуру.

5. Разработана методика экспериментального исследования и проведены испытания двух натуральных образцов ребристых плит покрытия 3×6 м со смешанным армированием продольных ребер при кратковременном, длительном и многократно повторном нагружении.

При длительном действии постоянной и длительной нагрузки опытная плита не имела существенных отличий от полностью преднапряженных конструкций. При кратковременном нагружении опытные образцы также не имели отклонений от требований норм. В то же время нагружение до расчетной нагрузки с последующей разгрузкой приводят к резкому возрастанию прогибов и ширины раскрытия трещин, в том числе остаточных. Это обстоятельство требует учета при проектировании и контрольных испытаниях плит со смешанным армированием.

6. Результаты экспериментального исследования плит покрытия использованы при оценке достоверности разработанной методики расчета. Хорошее соответствие опытных и расчетных данных позволяет считать методику расчета достаточно достоверной.

Достоверность разработанной методики подтверждена также сопоставлением результатов расчетов с данными экспериментов других авторов.

7. Результаты выполненных исследований внедрены по следующим направлениям.

Методика расчета изгибаемых элементов со смешанным армированием реализована в программе для ЭВМ ВЕАМ, которая включена в отраслевой фонд алгоритмов и программ.

При помощи программы выполнен численный анализ влияния параметров смешанного армирования на прочность, жесткость и трещиностойкость плит покрытия 3×12 м серии 1.465.1-3/80. На основании численного анализа рекомендуется ограничивать содержание ненапрягаемой арматуры для различных классов арматур и процента армирования.

С использованием разработанной методики расчета и оптимизации запроектированы многопустотные плиты перекрытий в опалубке панелей серии 1.141-1 со смешанным армированием, предназначенные для опытно-производственного выпуска на предприятиях стройиндустрии.

Основные результаты диссертации приведены в следующих печатных работах и отчетах.

1. Янкелевич М.А., Михайличенко А.В. Железобетонные изгибаемые элементы со смешанным армированием (экспериментальные исследования, расчет, оптимизация)/ Киев, НИИСП. - 1990, - 35с.

2. Янкелевич М.А., Михайличенко А.В. Экспериментальные исследования и расчет изгибаемых элементов со смешанным армированием. // Экономичное армирование железобетонных конструкций. Тезисы докладов Всесоюзного координационного совещания/ Фрунзе, изд. ФПИ, 1990, т.1, с. 82-85.

3. Янкелевич М.А., Михайличенко А.В. Экспериментальные исследования железобетонных ребристых плит со смешанным армированием из бетона на ВНВ// Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона. - Москва: Стройиздат, 1991, - с. 424-425.

4. Yankelevitsh M.A., Micheilitshenko A.W. Specific features of stress-strain state of partially prestressed flexural elements// "Modern Applications of prestressed concrete". Proceedings of the International symposium. September 3-6, 1991. - Publishers. - Beijing, China. Volume 2, pp. 361-368.

463166

AB 28.568

AB 28.568