

на правах рукописи

Колчин Ярослав Евгеньевич

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЗОН КОНТАКТА
ЭЛЕМЕНТОВ СОСТАВНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел, 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК».

- Научный руководитель: - академик РААСН, доктор технических наук, профессор
Колчунов Виталий Иванович
- Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Смоляго Геннадий Алексеевич
- кандидат технических наук, доцент
Крыгина Алевтина Михайловна
- Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»

Защита состоится «23» декабря 2011 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.182.05 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» и на официальном сайте – www.gu-unpk.ru.

Автореферат разослан « 22 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

А.И. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с увеличением объемов реконструкции зданий и сооружений, а также в связи с расширением области применения современных многослойных ограждающих и сборно-монолитных несущих конструкций различного типа, все шире используются конструктивные элементы, относящиеся к классу составных конструкций. К этому же классу конструкций можно отнести и так называемый реконструируемый железобетон, полученный в результате усиления путем наращивания или подрачивания элементов конструктивных систем из железобетонных элементов. Сечения конструкций, усиленных таким способом, состоят из двух и более элементов, узлы, сопряжения которых представляют собой контактные швы с разной степенью податливости.

Анализ подходов к расчету составных конструкций показал, что расчетные методики, существующие на данный момент, в большинстве своем основываются на приведении конструкций к квазисплошному сечению или на использовании простейших нелинейных и даже линейных законов деформирования материалов с учетом различной прочности бетонов брусьев. При этом моделирование структуры сечения элементов (податливости швов, типа их сопряжения и др.) весьма условно. Работ, в достаточной мере учитывающих специфику деформирования конструкций такого класса, сравнительно мало, и практически отсутствуют исследования по определению деформационных характеристик зон контакта составных железобетонных элементов. В связи с этим изучение особенностей деформирования и разрушения таких элементов, направленное на наиболее полный учет деформативности зоны контакта, представляется актуальным.

Цель работы – разработка расчетной модели сопротивления зоны контакта составных железобетонных элементов с учетом специфики деформирования и конструктивных особенностей исполнения контактного шва.

Научную новизну работы составляют:

- опытные данные о характере деформирования и разрушении контактной зоны железобетонных составных образцов с различными типами сопряжения элементов сечения (неармированная зона контакта различных бетонов; нагельное сопряжение смежных элементов; комбинированный контакт элементов из различных бетонов, соединяемых нагелями);

- расчетные зависимости для оценки параметров деформирования и разрушения контактной зоны составных железобетонных элементов, учитывающие податливость шва сдвига, влияние сил зацепления и нагельного эффекта поперечной арматуры;

- методика и алгоритм расчета для определения приведенного модуля сдвига зоны контакта составных железобетонных элементов с различными типами сопряжения элементов сечения;

- результаты численных исследований деформирования контактной зоны при варьировании параметров шва сдвига и рекомендации по расчету железобетонных элементов составного сечения.

Автор защищает:

- методику испытаний и новые экспериментальные данные о деформировании и разрушении составных железобетонных образцов с различными типами сопряжения элементов;

- расчетную модель сопротивления контактной зоны и методику определения приведенного модуля сдвига зоны контакта на произвольном уровне нагружения, учитывающую влияние нагельного эффекта и сил зацепления по берегам шва сдвига;

- алгоритм расчета и результаты численных исследований жесткостных характеристик контактной зоны железобетонных элементов составного сечения при варьировании их конструктивных параметров.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов основывается на использовании общепринятых допущений строительной механики и механики железобетона, сопоставлении теоретических результатов с экспериментальными (включая опыты других авторов), а также подтверждается результатами многовариантных численных исследований, в т.ч. расчетами реальных конструкций.

Практическое значение и реализация результатов работы

Разработанный вариант расчетной модели контактной зоны и составленные на его основе алгоритм позволяет определять ключевую деформационную характеристику податливого контактного шва – приведенный модуль сдвига на заданном уровне нагружения. Это позволяет более строго по сравнению с существующими методами производить расчет по деформациям и несущей способности составных железобетонных элементов с различными конструктивными решениями контактной зоны.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме: «Исследование энерго-, ресурсоэффективных конструктивных систем с высоким уровнем конструктивной безопасности и живучести» (шифр заявки «2009-1.1-232-031-011»). Результаты исследований использованы при выполнении научно-исследовательской работы Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) по теме: «Развитие теории живучести конструктивных систем из железобетона с элементами составного сечения» (2008-2010 гг.).

Результаты проведенных исследований применены Орловским академцентром, ЗАО «Промстройэнергомонтаж» при выполнении ряда проектов по усилению железобетонных несущих элементов при реконструкции зданий и сооружений.

Результаты работы внедрены в учебный процесс Госуниверситета-УНПК, БГИТА, ЮЗГУ при изучении студентами и магистрами строительных специальностей дисциплин «Железобетонные и каменные конструкции», «Технические вопросы реконструкции зданий и сооружений».

Апробация работы и публикации

В полном объеме работа рассмотрена и одобрена на расширенном заседании кафедры «Строительные конструкции и материалы» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» (г. Орел, сентябрь 2011 г.).

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 4 в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения с основными выводами, списка литературы и приложений. Работа изложена на 176 страницах, включающих 144 страницы основного текста, 45 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 178 наименований и 4 приложений (32 стр.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по рассматриваемой теме, приведены общая характеристика диссертационной работы и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе рассмотрены конструктивные решения железобетонных элементов составного сечения, применяемые на практике. Выполнен анализ экспериментально-теоретических исследований составных железобетонных конструкций, в том числе предложений по учету податливости шва сдвига и определению приведенного модуля сдвига контактной зоны конструкций рассматриваемого типа. Обобщены и проанализированы современные физические модели деформирования зоны контакта, применяемые при расчете железобетонных составных конструкций.

Значительное число железобетонных конструкций в связи с особенностями конструктивного решения и статической работы можно отнести к классу составных. В частности, к этому классу конструкций относятся элементы с сечением, усиленным наращиванием и подрачиванием, сборно-монолитные конструкции, многослойные ограждающие панели, ригели с терморазъемами, плиты с комплексным поперечным сечением и др.

Фундаментальные положения теории составных конструкций заложены в трудах В.З. Власова, А.Р. Ржаницына, И.Е. Милейковского, Г.А. Гениева и других. Изучению вопросов, касающихся особенностей расчета и конструирования железобетонных составных элементов посвящены экспериментальные и теоретические исследования В.М. Бондаренко, Т.И. Барановой, А.Б. Гольшева, А.С. Залесова, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунова, Вл.И. Колчунова, В.И. Коробко, Е.А. Король, П.Г. Лабозина, С.И. Меркулова, В.С. Плевкова, В.И. Римшина,

Р.С. Санжаровского, Г.А. Смоляго, В.С. Федорова, Ю.В. Чиненкова, А.Г. Юрьева, Р.В. Балендран, Х.И. Леюнг, М.В. Лескела, Ф.А. Ритчи и др.

Отдельные результаты экспериментально-теоретических исследований прочностных и деформативных параметров контактной зоны приведены в работах И.С. Абдрахманова, П.А. Гвозкова, С.Н. Горностаева, А.И. Демьянова, М.О. Калашникова, А.А. Квасникова, Е.А. Король, Н.А. Митякиной, Л.А. Панченко, П.В. Сапожникова, Д.Р. Сафина, А.С. Семченкова, Е.А. Скобелевой, С.Д. Степанова, А.В. Туркова, Р.Р. Хасанова, Ю.В. Чиненкова, И.Ф. Шакирова, Е. Витмер, Х.И. Леюнг, Д. Мередит и др.

Главными элементами в теории расчета составных железобетонных элементов является принимаемая физическая модель деформирования шва сдвига и способ определения приведенной жесткости на сдвиг зоны контакта элементов. Наиболее часто податливость шва сдвига между элементами составной конструкции предлагается учитывать в расчете введением коэффициента жесткости шва сдвига ξ или приведенного модуля шва сдвига G_0 . Однако, как показал проведенный анализ, расчеты составных конструкций, используемые на сегодняшний день, в большинстве своем основываются на приведении конструкций к квазисплошному сечению, на использовании простейших законов деформирования материалов с учетом различной прочности бетонов брусьев при весьма условном моделировании структуры сечения элементов (податливости швов, типа их сопряжения и др.). Такие подходы не позволяют моделировать различные типы конструктивных решений швов контакта элементов составных конструкций, и как следствие, реальное поведение составного железобетонного элемента под нагрузкой.

В связи с этим изучение особенностей деформирования и разрушения железобетонных составных элементов, направленное на наиболее полный учет деформативности зоны контакта с различными конструктивными особенностями, представляется актуальным.

На основе представленного обзора и анализа известных научных публикаций сформулированы цель и задачи настоящих исследований.

Вторая глава диссертации посвящена построению расчетной модели сопротивления зон контакта составных железобетонных элементов с учетом специфики деформирования и конструктивных особенностей исполнения контактного шва.

При построении расчетных зависимостей использованы традиционные гипотезы составных стержней, а также следующие дополнительные гипотезы:

- связь между касательными напряжениями и относительными деформациями сдвига бетона и арматуры в зоне контакта принимается в виде расчетных диаграмм деформирования нелинейного типа;
- функция изменения приведенного модуля сдвига контактной зоны \bar{G}_0 афиноподобна функции изменения модуля деформации бетона;

- в работе на сдвиг по шву между элементами учитывается работа материала контактной зоны, прилегающей к зоне сопряжения соединяемых брусьев, а также работа на сдвиг поперечных стержней-нагелей, при этом толщина контактной зоны определяется областью разрушения бетона в зоне нагельного эффекта;
- работа связей сдвига между брусьями в составном стержне описывается двухстадийной физической моделью: до и после образования трещин, при этом после образования трещин учитываются силы зацепления, линейно-распределенные по длине шва сдвига.

Расчетная модель сопротивления узла сопряжения элементов составных железобетонных конструкций представлена в виде трех основных типов контактной зоны, моделирующих наиболее часто применяемые варианты конструктивного решения зон контакта – неармированная зона контакта; контакт двух элементов, разделенных слоем материала с малым модулем сдвига; армированная зона контакта (рис. 1).

Согласно принятой расчетной модели, критерий прочности узла сопряжения элементов составной конструкции при разрушении по материалу зоны контакта можно записать в общем виде:

$$T \leq Q_{ult}, \quad (1)$$

где T – суммарное сдвигающее усилие в плоскости сопряжения смежных элементов, определяемое с использованием общего дифференциального уравнения составного стержня в форме А.Р. Ржаницына; Q_{ult} – предельное сдвигающее усилие, воспринимаемое контактной зоной.

Анализ экспериментальных данных показал, что предельное значение сдвигающей силы Q_{ult} , воспринимаемое зоной контакта, можно представить в виде суммы трех слагаемых:

$$Q_{ult} = Q_{b,sh} + Q_{s,tot} + Q_{zn}, \quad (2)$$

где $Q_{b,sh}$ – усилия сдвига, воспринимаемые бетоном зоны контакта; $Q_{s,tot}$ – то же, воспринимаемые арматурными стержнями-нагельями, Q_{zn} – то же, воспринимаемые за счет зацепления берегов зоны контакта.

На стадии работы *неармированной зоны контакта* без трещин (рис. 1, а), усилие, возникающее по поверхности сдвига, воспринимается только за счет работы на срез бетона зоны контакта толщиной t_0 . После возникновения и раскрытия трещин в контактной зоне происходит потеря несущей способности узла сопряжения элементов составной конструкции. Т.к. силы зацепления до момента трещинообразования не возникают в шве сдвига, то слагаемое Q_{zn} можно принять равным нулю, а критерий прочности контактной зоны, выполненной без армирования до момента трещинообразования в шве в таком случае примет вид:

$$T \leq Q_{b,sh} \cdot \quad (3)$$

В случае контакта двух элементов, разделенных слоем материала с малым модулем сдвига, сдвигающие усилия в контактной зоне воспринимаются только за счет работы поперечных стержней-нагелей, пересекающих шов сдвига (рисунок 1, б).

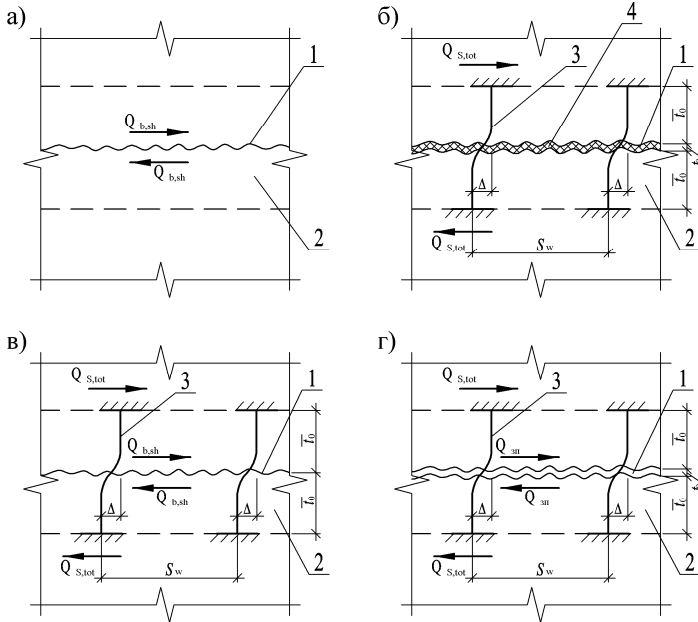


Рисунок 1 – Рассматриваемые варианты зоны контакта составных железобетонных конструкций: неармированная зона контакта (а); зона контакта с вставкой из материала с малым модулем сдвига (б); армированная зона контакта до стадии трещинообразования (в); то же после образования трещин (г); 1 – шов сдвига; 2 – материал контактной зоны; 3 – поперечный стержень-нагель; 4 – вставка из материала с малым модулем сдвига

Арматурные стержни, заделанные в податливое бетонное основание, работают как микробалки (рис. 2, а), а воспринимаемое такими стержнями поперечное усилие $Q_{s,tot}$ носит название «нагельного эффекта». Формула (1) для указанного типа сопряжения записывается в виде:

$$T \leq Q_{s,tot} \cdot \quad (4)$$

Армированная зона контакта представляет собой общий случай, при котором сдвигающие усилия воспринимают как бетон шва сдвига, так и поперечные стержни, пересекающие зону сопряжения. На стадии работы бетона до образования трещин (рис. 1, в) сдвигающие усилия в шве контакта воспринимаются как за счет сопротивления бетона контактной зоны сдвигу $Q_{b,sh}$, так и за счет работы поперечных стержней-нагелей $Q_{s,tot}$. Критерий прочности в этом случае примет вид:

$$T \leq Q_{b,sh} + Q_{s,tot} . \quad (5)$$

После образования и раскрытия трещин в контактном шве, сдвигающие усилия воспринимаются за счет нагельного эффекта в поперечных стержнях, а также за счет сил зацепления Q_{zn} по берегам продольной трещины (рис. 1, з). В этом случае выражение (1) может быть записано в следующем виде:

$$T = Q_{s,tot} + Q_{zn} . \quad (6)$$

Зацепление берегов зоны контакта, следуя теории Н.И. Карпенко, обусловлено тем, что при нагрузках, соответствующих уровню трещинообразования, в контактной зоне могут сохраняться некоторые бетонные связи между краями трещин в виде так называемых бетонных мостиков. Кроме того, возможно непосредственное зацепление зерен заполнителя или цементного камня в контактирующих элементах составных образцов.

Непосредственное определение сил зацепления встречает значительные трудности, т.к. их величина зависит от характера выступов и впадин по берегам шва сдвига, формы трещины, ширины ее раскрытия в зоне контакта. Для возможности количественной оценки этого усилия предложено зацепление берегов зоны контакта моделировать эквивалентными равномерно распределенными по длине шва погонными силами Q_{zn} .

При этом значение параметра Q_{zn} может быть определено из выражения:

$$Q_{zn} = b \bar{G}_{zn} \frac{\Delta}{l_t} , \quad (7)$$

где b – ширина элемента; \bar{G}_{zn} – модуль деформаций связей зацепления, Δ – величина относительного сдвига смежных элементов зоны контакта, l_t – расстояние между связями зацепления.

Слагаемое $Q_{b,sh}$ можно определить по формуле:

$$Q_{b,sh} = R_{b,sh} A_{sh} , \quad (8)$$

где $R_{b,sh}$ – прочность на срез бетона контактной зоны; A_{sh} – площадь зоны контакта.

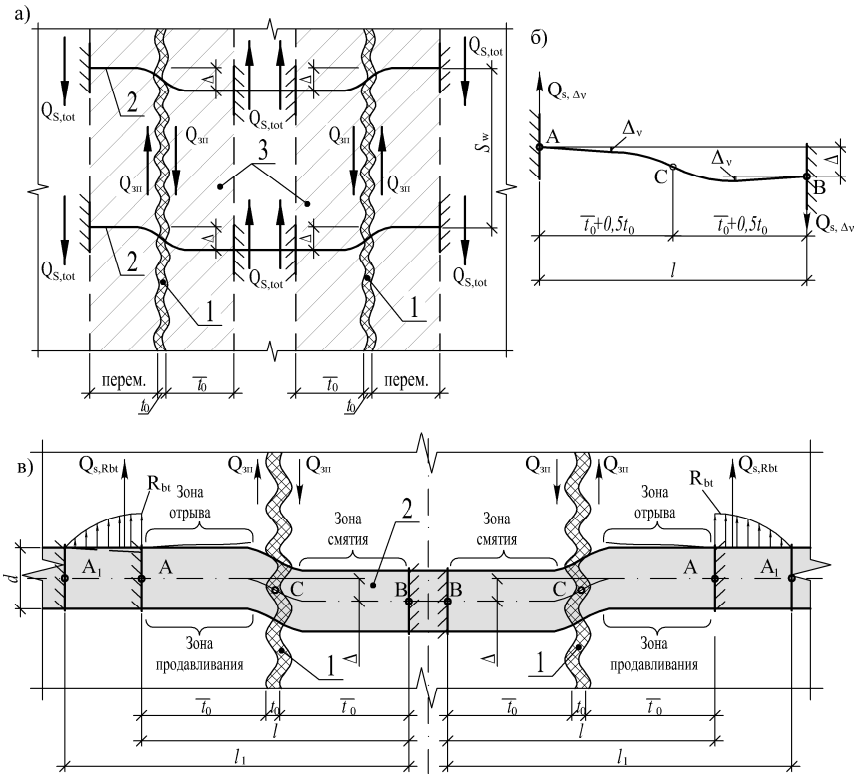


Рисунок 2 – К определению нагельного эффекта в зоне контакта элементов составного сечения: схема деформирования нагеля и шва в зоне контакта (а); расчетная схема нагеля (б); расчетная схема для определения поперечных сил в нагеле от перемещения Δ и от поворота арматурного стержня (в); 1 – шов сдвига; 2 – поперечный стержень-нагель; 3 – зона контакта

Суммарная поперечная сила $Q_{s,tot}$, моделирующая усилия нагельного эффекта, выражена в следующем виде:

$$Q_{s,tot} = Q_{s,\Delta} + Q_{s,R_{bt}} + Q_{s,\Delta v} \quad (9)$$

Здесь $Q_{s,\Delta}$, $Q_{s,R_{bt}}$, $Q_{s,\Delta v}$ – составляющие поперечной силы в арматурном стержне, соответственно, от перемещения Δ , от усилий отрыва в бетоне, от поворота арматурного стержня в точках заделки A_1 и B (рис. 2, б, в).

Первое слагаемое правой части формулы (9) связано с изгибом поперечного стержня-нагеля и определяется как:

$$Q_{S,\Delta} = \frac{12EI\Delta}{(2\bar{t}_0 + t_0)^3}, \quad (10)$$

где EI – изгибная жесткость поперечного стержня-нагеля; Δ – величина сдвига; \bar{t}_0 – расстояние до точки заделки арматурного стержня; t_0 – толщина шва сдвига.

Составляющая усилия нагельного эффекта, обусловленная отрывными усилиями в бетоне, может быть определена по формуле:

$$Q_{s,R_{bt}} = 0,8R_{bt}b\left(\frac{l_1}{2} - l\right), \quad (11)$$

где l – расстояние между точками заделки поперечного стержня, l_1 – толщина включения в работу бетонного слоя.

Параметр $Q_{s,\Delta\nu}$ в формуле (1) следует учитывать лишь при $l_1 > 10d$. Его значения определяются методом сил. Применительно к выявленной расчетной схеме при повороте заделки A на угол $\Delta\nu$ это решение может быть представлено в виде:

$$Q_{s,\Delta\nu} = -\frac{6EI\Delta\nu}{l_1^2} \quad (12)$$

Вычисление значения l_1 осуществляется итерационным способом.

Одной из важных задач, требующих специального рассмотрения при уточнении расчетной модели зоны контакта составной конструкции, является определение приведенного модуля контактной зоны для любого из описанных типа сопряжения элементов.

В общем случае для обеих стадий работы контактной зоны до и после трещинообразования приведенный модуль сдвига предложено представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\bar{G}_0 = \bar{G}_S + \bar{G}_{0,b}, \quad (13)$$

где \bar{G}_S – приведенный модуль сдвига поперечных стержней; $\bar{G}_{0,b}$ – приведенный модуль деформаций сдвига бетона зоны контакта.

Первое слагаемое определяется нагельным эффектом поперечных стержней-связей, второе обусловлено деформированием бетона шва сдвига толщиной t_0 . Этим слагаемым учитываются деформации сдвига бетона, а также действие сил зацепления по берегам зоны контакта. Приведенный модуль сдвига бетона зоны контакта $\bar{G}_{0,b}$ может быть представлен в виде суммы модуля сдвига бетона зоны контакта и модуля деформаций связей зацепления.

$$\bar{G}_{0,b} = \bar{G}_b + \bar{G}_{3n}. \quad (14)$$

Переходя от единичной ширины шва сдвига составного бруса к заданной, равной b , выражение для приведенного модуля жесткости сдвига рассматриваемого варианта соединения железобетонных элементов составного сечения записывается в виде:

$$\bar{G}_0 = \frac{Q_{S,tot}}{S_{\omega}\Delta} + \frac{(\bar{G}_b + \bar{G}_{3n}) \cdot b}{t_0}, \quad (15)$$

где S_{ω} – шаг поперечных стержней-нагелей.

Опираясь на гипотезу о том, что функция изменения \bar{G}_0 подобна функции изменения модуля деформации бетона в конце ниспадающей ветви диаграммы « $\tau - \gamma$ » бетонных образцов, для определения модуля деформаций связей зацепления \bar{G}_{3n} используем диаграмму, предложенную С.Н. Карпенко, полученную путем многоточечного задания напряжений τ_i и относительных деформаций сдвига γ_i в виде многозвенной ломаной линии, определяемой секущими и касательными модулями деформации (рис. 3).

При построении диаграмм « $\tau - \gamma$ » использован подход в виде связей секущих и касательных модулей с уровнями деформаций. При этом:

$$\tau = \gamma \bar{G}_0 v; \quad d\tau = \bar{G}_0 v^k d\gamma, \quad (16)$$

где v, v^k – коэффициенты перехода от начального модуля сдвига к секущему ($\bar{G}_0^c = \bar{G}_0 v$) и касательному ($\bar{G}_0^k = \bar{G}_0 v^k$) модулям, которые связаны зависимостью:

$$v^k = v + \gamma \frac{dv}{d\gamma}. \quad (17)$$

При условии кусочной линеаризации диаграмм в ходе шагового нагружения зависимость между приращениями напряжений сдвига и приведенными модулями сдвига при переходе ($i \rightarrow i+1$) примет вид:

$$\Delta\tau = \bar{G}_0 v^k \Delta\gamma; \quad \bar{G}_0 v^k = tg\alpha^*, \quad (18)$$

где α^* – угол наклона участка $i \div i+1$ к оси γ , $\Delta\gamma = \gamma_{i+1} - \gamma$. При этом условный коэффициент касательного модуля v^k выражается через коэффициент секущего модуля в начале (точке i) и конце (точке $i+1$) шага нагружения по зависимости:

$$v^k = \frac{\gamma_{i+1} v_{i+1} - \gamma_i v_i}{\Delta\gamma}. \quad (19)$$

На некотором участке $\tau_i, \gamma_i \div \tau_{i+1}, \gamma_{i+1}$ для произвольной точки m с известной координатой τ_m или γ_m секущие $(\bar{G}_0^c, \bar{G}_0^v)$ и касательные $(\bar{G}_0^k, \bar{G}_0^v^k)$ приведенные модули сдвига вычисляются по зависимостям:

$$\bar{G}_0^v v^k = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}; \quad \bar{G}_0^v v = \frac{\tau_m}{\gamma_m}, \quad (20)$$

где τ_m или γ_m определяются из соотношения:

$$\frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i} = \frac{\tau_m - \tau_i}{\gamma_m - \gamma_i}. \quad (21)$$

Определение касательных модулей выполняется с использованием зависимостей, связывающих секущие модули сдвига с относительными деформациями сдвига.

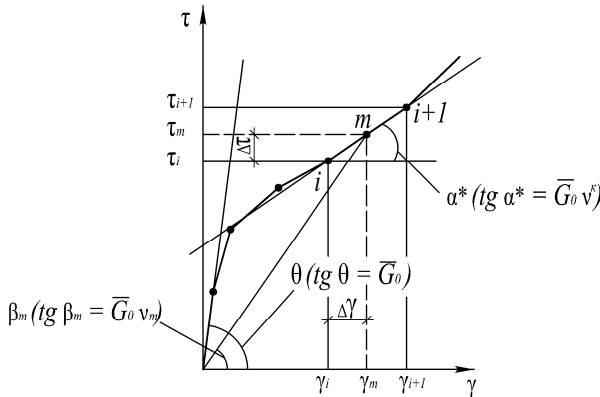


Рисунок 3 – Фрагмент диаграммы « $\tau - \gamma$ » контактной зоны составных железобетонных элементов, построенный по методике конечных приращений

Указанные зависимости аналогичны коэффициентам, используемым для связи нормальных напряжений с касательными и секущими модулями деформаций, и записываются в виде:

$$v = v_b = \hat{v}_b + \hat{v}_b(1 - \eta_d) + 2(v_0 - \hat{v}_b)(1 - \eta_d)^n - v_0(1 - \eta_d)^m; \quad (22)$$

$$v^k = v_b^k = v_b - \eta_d(\hat{v}_b + 2n(v_0 - \hat{v}_b)(1 - \eta_d)^{n-1} - m v_0(1 - \eta_d)^{m-1}), \quad (23)$$

где n, m – величины, зависящие от класса бетона и вида деформаций $\eta = \gamma_b / \gamma_b^{ult}$ – уровень деформаций; γ_b, γ_b^{ult} – деформации сдвига бетона (те-

кущие и в момент разрушения); $\hat{\nu}_b$ и $\nu_0 = 1$ – значения ν в вершине и в начале диаграммы.

В третьей главе изложены методика и результаты экспериментальных исследований деформирования и разрушения железобетонных элементов составного сечения. В задачи исследований включалось: изучение особенностей деформирования и разрушения образцов составного сечения с различными типами контактной зоны; определение опытных значений приведенного модуля сдвига контактной зоны.

Для решения сформулированных задач были запроектированы и изготовлены две группы специальных опытных составных образцов (рис. 4): первая группа – составные призмы, состоящие из трех брусьев высотой 400 мм, сечением 100x100 мм. Средний брус призм был выполнен из бетона класса В15, крайние брусья – из бетона класса В22,5. Образцы 2-й группы испытаний были выполнены в форме составных трехэлементных балочек длиной 400 мм, сечением 100x100 мм, средний элемент образцов выполнен из бетона класса В10, крайние – из бетона класса В22,5.

Указанные опытные образцы моделировали три основные типа швов сопряжения: 1 – составные балки и призмы с контактным слоем бетона, выполненным без армирования (образцы типа ОБ); 2 – то же с воздушным зазором между смежными элементами и поперечным армированием провололочной арматурой (образцы типа ОН); 3 – то же с контактным бетонным слоем между элементами и поперечным армированием (образцы типа ОБН). Армирование образцов типа ОН и ОБН принято в виде плоских сеток из проволоки диаметром 2 мм по ГОСТ 3282-74. Шаг поперечных стержней в образцах 1 группы испытаний принят 50 мм, в образцах второй группы – 20 мм.

Перед проведением испытаний на подготовленные боковые поверхности образцов с обеих сторон были установлены механические приборы – индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм для измерения суммарного сдвига.

Испытания опытных образцов производили на специальном стенде, включающем опорные, нагрузочные и распределительные устройства. Нагружение образцов осуществлялось поэтапно долями $0,08 \div 0,1$ от расчетной разрушающей нагрузки, на каждом этапе производилась выдержка 10-15 минут. В качестве нагружающего устройства использовалась платформа гидравлического пресса.

В процессе испытаний измерялись и фиксировались: величина взаимного смещения элементов; характер деформирования и разрушения опытных образцов.

Проведенными экспериментальными исследованиями были выявлены некоторые особенности деформирования, трещинообразования и разрушения

составных балочных элементов с различными конструктивными решениями контактной зоны.

В испытанных образцах 1-й группы типа ОБ отсутствовало поперечное армирование контактных швов. Вследствие этого восприятие сдвигающих усилий, возникающих в шве, происходило лишь за счет работы бетона шва на срез. При достижении нагрузки на образец $P = 2,2 - 2,4$ кН в контактном шве образовалась продольная трещина, и практически одновременно происходило хрупкое разрушение контактного шва между призмами по этой трещине, вследствие достижения прочности бетона шва на срез.

а)



б)

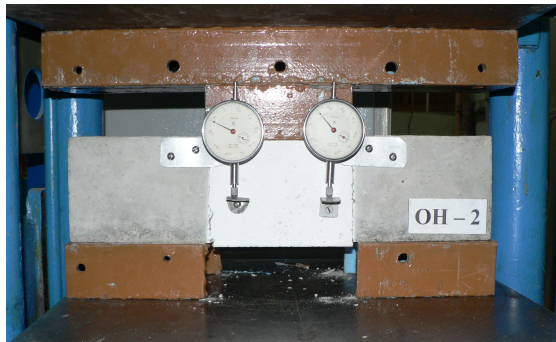


Рисунок 4 – Общий вид опытных образцов первой группы (а), то же второй группы (б)

В образцах типа ОН отсутствовал бетон между отдельными элементами-призмами. Поэтому восприятие сдвигающих усилий происходило только за счет работы поперечных стержней-нагелей. При нагружении опытного образца поперечные стержни работали на изгиб как двухконсольные элементы. С увеличением нагрузки смещение между смежными железобетонными призмами увеличивалось, и при достижении значения $\Delta_{sh} = 1,5 - 2$ мм проявилось неупругое деформирование стержней-нагелей. Перед разрушением образцов абсолютные деформации сдвига резко увеличивались, что и приводило к раздроблению бетона в околоарматурной зоне.

Образцы 1-й группы испытаний типа ОБН запроектированы с контактным бетонным слоем, армированным поперечными стержнями-нагелями. Сдвигающие усилия в шве воспринимались бетоном и арматурой. При значении нагрузки $3,8 - 4,2$ кН в швах между призмами образовывались видимые продольные трещины. Благодаря включению в работу поперечных стержней-

нагелей разрушение образца происходило при более высоком уровне нагружения (7,8–8,0 кН), чем образцов серии ОБ.

Разрушение образцов 1-й и 2-й группы испытаний типа ОН произошло «от текучести поперечной арматуры», что подтверждается значительным нарастанием деформаций сдвига при практически неизменном уровне нагрузки. В отличие от образцов типа ОН, в образцах с неармированным швом сдвига (тип ОБ) разрушение бетона шва сдвига происходило мгновенно из-за раздробления бетона шва, что характерно для хрупкого типа разрушения. Испытание опытных образцов типа ОБН, в работу шва которых включались арматура и бетон, характеризовалось типом разрушения, аналогичным образцам типа ОН, и носило «мягкий» характер со значительным нарастанием прогибов. Исчерпанию несущей способности предшествовал значительный рост смещений брусьев относительно друг друга вдоль продольной трещины. Полученные картины разрушения подтвердили принятые критерии разрушения составных элементов по различным схемам.

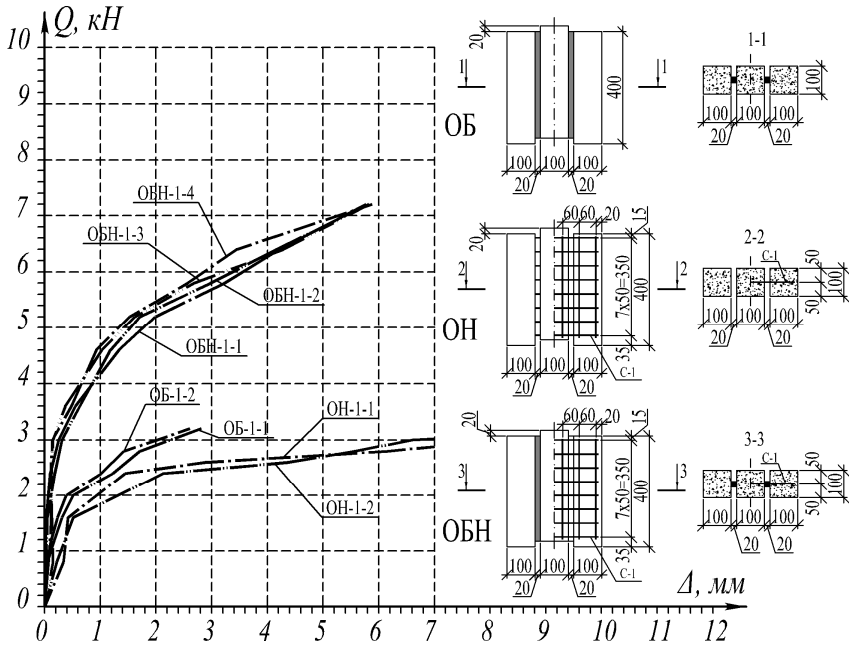


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости « $Q-\Delta$ » для опытных образцов 1-й группы

Для экспериментальных образцов обеих групп испытаний получены опытные зависимости сдвига (Δ) от сдвигающих усилий (Q) в зоне контакта элементов составной балки (рис. 5). Анализ опытных графиков позволяет отметить следующее: при заданном значении уровня деформаций значения относительной сдвигающей силы в образцах с монолитным бетонным швом контакта, армированным поперечной арматурой, превышают соответствующие значения усилий, полученных суммированием ординат графиков для образцов с неармированной и с незамоноличенной контактными зонами. Это подтверждает действие сил зацепления по берегам шва сдвига. До уровня трещинообразования жесткость неармированного бетонного и армированного образцов различаются незначительно, что подтверждается опытными значениями (7-8%). После образования продольных трещин в контактной зоне армированных элементов сопротивление сдвигу оказывают силы зацепления, и в связи с этим разница в значениях жесткости шва контакта достигает 20% и более.

Сравнение результатов экспериментальных и аналитических исследований показывает, что степень влияния сил зацепления тем выше, чем больше жесткость шва сдвига в направлении нормальном к плоскости контакта. Для образцов с воздушной прослойкой в зоне контакта – до 10%, а для опытных балочек с монолитным контактом значение сил зацепления составило порядка 18 - 20%.

В четвертой главе на основе предложенной расчетной модели разработан алгоритм для определения параметров деформирования и разрушения железобетонных составных элементов с различными типами конструктивного решения контактной зоны. В соответствии с этим алгоритмом в среде *Maple* составлена программа расчета рассматриваемых конструкций, позволяющая выполнять исследования с широким варьированием геометрических и жесткостных параметров брусев, параметров шва сдвига и структуры расчетного сечения.

При алгоритмизации решения нелинейной задачи был предусмотрен двухуровневый итерационный цикл. На внешнем уровне определяются внутренние усилия и перемещения на рассматриваемой ступени нагружения. Внутренний итерационный цикл позволяет вычислить жесткостные характеристики сечения с учетом образования и развития трещин и неупругих свойств материалов.

С помощью разработанного алгоритма проведены численные исследования составных элементов с различными типами конструктивного решения контактной зоны с варьированием исходных данных: формы и структуры сечений, схем поперечного армирования элементов, прочностных и деформативных характеристик материала контактной зоны.

Численными исследованиями установлено следующее. Доля сил зацепления в общем значении усилия сопротивления сдвигу зависит от интенсивности армирования шва поперечными стержнями-нагельями. При изменении интенсивности поперечного армирования (A_{Se}/S_w) от 0,05% до 0,5% доля сил зацепления возрастает с 7% до 18%.

Исследовано влияние прочностных характеристик материалов соединяемых элементов на трещиностойкость контактной зоны. При повышении класса

бетона контактирующих элементов с В15 до В40 величина усилия трещинообразования увеличивается на 17-20%.

Глубина вовлечения бетона соединяемых элементов в работу контактной зоны также зависит от прочности бетона соединяемых элементов и интенсивности поперечного армирования. Увеличение шага поперечных стержней-нагелей и их диаметра приводит к увеличению толщины бетонного слоя, включаемого в работу шва контакта. Повышение класса бетона по прочности приводит к снижению толщины такого слоя.

При увеличении приведенного модуля сдвига (\bar{G}_0) наблюдался рост усилия трещинообразования контактной зоны изгибаемого составного элемента (до 20%) и его предельной несущей способности (на 10-20%). При этом замечено, что существенное влияние приведенный модуль сдвига шва G_0 оказывает при его значениях от 10^3 до 10^4 МПа.

Проведенные исследования позволили сделать заключение о том, что расчет элементов составного сечения по схеме элементов квазисплошного сечения без учета сдвига между брусками приводит в ряде случаев к существенным погрешностям, при этом, как правило, расчетные значения жесткости и прочности оказываются ниже фактических.

Сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований автора и других исследователей показало их удовлетворительную сходимость. В частности, экспериментами подтверждены опытные картины трещинообразования и разрушения различных вариантов контактной зоны составных конструкций. Количественные различия расчетных и опытных значений деформаций сдвига для образцов рассматриваемых типов в зависимости от конструктивного решения зоны контакта находятся в пределах 15-22%.

На основании выявленных особенностей деформирования и разрушения зоны контакта составных железобетонных элементов даны практические рекомендации по расчету и их конструированию.

В **приложении** к диссертации включены подробные результаты численных и экспериментальных исследований, акты внедрения результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена физическая модель деформирования, трещинообразования и разрушения зоны контакта элементов составных железобетонных конструкций, учитывающая сопротивление на сдвиг бетона, арматурных стержней-нагелей и зацепление берегов трещины вдоль шва контакта. При этом рассмотрены наиболее характерные типы зон контакта – неармированная зона контакта; контакт двух элементов, разделенных слоем материала с малым модулем сдвига; армированная зона контакта.

2. По результатам экспериментальных исследований на специальных опытных образцах построены характерные диаграммы деформирования, трещи-

нообразования и разрушения в осях «нагрузка-сдвиг» для рассматриваемых типов контактной зоны.

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что при заданном значении уровня деформаций значения относительной сдвигающей силы в образцах с монолитным бетонным швом контакта, армированным поперечной арматурой, превышают соответствующие значения усилий, полученные суммированием ординат графиков для образцов с неармированной и с незамоноличенной контактными зонами, что подтверждает действие сил зацепления по берегам шва сдвига.

4. Анализ экспериментально-теоретических данных и диаграмм деформирования «нагрузка-сдвиг» позволил установить уточненные значения приведенного модуля сдвига \bar{G}_0 для рассмотренных типов зоны контакта при различных уровнях нагружения.

5. Численными исследованиями и анализом экспериментальных данных выполнена оценка влияния типа конструктивного решения зоны контакта, схемы и процента поперечного армирования, а также прочностных характеристик материалов контактной зоны на изменение жесткостных параметров и несущую способность узла сопряжения брусьев составного железобетонного элемента. При этом установлено, что значительное влияние приведенный модуль сдвига шва \bar{G}_0 на деформирование и разрушение составного элемента оказывает при его значениях в интервале $10^3 - 10^4$ МПа (в изгибаемых элементах).

6. Разработаны рекомендации по расчету и конструированию железобетонных элементов составного сечения с учетом работы на сдвиг бетона контактной зоны, арматурных стержней-нагелей и сил зацепления берегов трещины вдоль шва контакта.

7. Эффективность разработанного расчетного аппарата апробирована при расчете и конструировании железобетонных элементов для проектируемых объектов, разрабатываемых ЗАО «Промстройэнергомонтаж», Орловским академцентром. Использование предложенной расчетной модели позволило более полно учесть фактическую несущую способность и жесткость составных железобетонных элементов. В отдельных случаях конструирования составных железобетонных элементов была достигнута экономия 7–10%.

Основное содержание диссертации представлено в следующих публикациях:

1. Стадольский, М.И. Экспериментальные исследования по определению приведенной жесткости на сдвиг в железобетонных элементах составного сечения [Текст] / М.И. Стадольский, *Я.Е. Колчин*, В.И. Колчунов, Вл. И. Колчунов // *Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение)*: Сб. статей. – Вып. 11. – М.:

МОО «Пространственные конструкции». – 2008. – С. 137–144. (0,45 п.л./0,11 п.л. автора).

2. **Колчин, Я.Е.** Экспериментальные исследования по определению приведенной жесткости на сдвиг в железобетонных элементах составного сечения [Текст] / **Я.Е. Колчин**, М.И. Стадольский, Вл.И. Колчунов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – №2: – С. 62 – 67. (0,49 п.л./0,16 п.л. автора).

3. **Колчин, Я.Е.** Исследование закономерностей деформирования и разрушения зон контакта железобетонных составных конструкций [Текст] / **Я.Е. Колчин**, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ. – 2010. – № 2. – С. 17 – 22. (0,53 п.л./0,27 п.л. автора).

4. Колчин, Я.Е. К определению сил зацепления в зоне контакта элементов составных железобетонных конструкций [Текст] / **Я.Е. Колчин**, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – Орел: ОрелГТУ. – 2010. – № 6: – С. 25 – 30. (0,53 п.л./0,27 п.л. автора).

5. Колчунов, В.И. К определению приведенного модуля сдвига зоны контакта составных железобетонных элементов [Текст] / В.И. Колчунов, **Я.Е. Колчин** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №3: – С. 12 – 16. (0,49 п.л./0,25 п.л. автора).

Подписано в печать 18.11.2011 г.
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 123

Типография Госуниверситета-УНПК
302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65