

УДК 624.012.35/45 Замалиев Ф.С. – кандидат технических наук, доцент Гурьянов И.А. – магистр Шаймарданов Р.И. – инженер Хайрутдинов Ш.Н. – инженер Е-mail: <u>em_z@mail.ru</u> Казанский государственный архитектурно-строительный университет Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Численные и натурные эксперименты в исследованиях сталежелезобетонных конструкций

Аннотация

Для выявления напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций использован численный эксперимент с помощью программного комплекса ANSYS. Расчетная модель откорректирована по результатам натурных испытаний крупномасштабных моделей балок при кратковременных и длительных нагружениях. Приведены результаты численных экспериментов и сравнения с натурными испытаниями по напряжениям и прогибам при различных видах нагружения.

Ключевые слова: сталежелезобетонные конструкции, расчетная модель, эксперименты, напряжения, прогибы.

В последние наметилась тенденция расширения применения годы сталежелезобетонных конструкций в отечественной строительной практике, что актуализирует исследования особенностей напряженно-деформированного состояния, поведения сталежелезобетонных конструкций при различных режимах нагружения. Исследования особенностей их напряженного состояния помогут разработать отечественные методы расчета, основанные на учете фактического напряженнодеформированного состоянии, режимов нагружения, реальной диаграммы работы материалов, в отличие от существующих методов расчета [1, 2]. На сегодняшний день напряженно-деформированного для выявления состояния сталежелезобетонных конструкций используются различные математические модели и экспериментальные исследования крупномасштабных натурных моделях. Но на проведение экспериментальных исследований на натурных моделях требует значительных временных, людских и физических затрат. Поэтому выбирают математические модели, которые дешевле и приводят к более быстрым результатам. Многие исследователи в поисках эффективных математических моделей используют численный эксперимент, прикладных программных комплексах. Однако достоверность основанный на полученных данных во многом зависит от правильного выбора модели численного эксперимента, которая по всем параметрам соответствовала бы физической сути работы натурной конструкции. Существует множество программных комплексов ПК (SCAD, Microfe, ЛИРА, ANSYS и т.п.), используемых исследователями для моделирования работы элементов строительных конструкций. При выборе ПК встает вопрос, насколько они приближены к действительной работе конструкций и насколько точно могут оценивать поведение конструктивного элемента от нулевого его нагружения вплоть до разрушения и учитывать напряженно-деформированное состояние при различных режимах нагружения (кратковременные, длительные, повторно-статические нагружения).

Расчетные комплексы используют конечные элементы, и исследуемая конструкция заменяется множеством дискретных элементов, связанных между собой в узлах. При созлании математической модели исследуемый элемент превращается в расчетную систему идеализированную схему, представляющую линейных алгебраических уравнений. Переходя от реального конструктивного элемента к расчетной схеме, формулируются граничные условия, узлы сетки элементов располагаются исходя из требований условий задачи, чаще или реже. Для проведения численных исследований сталежелезобетонный элемент моделировался в программном комплексе ANSYS. Элементы моделировались с учетом прочностных свойств бетона, арматуры, стального проката, с заданием геометрических параметров всей балки, стального проката, железобетонной плиты и анкерных стержней (рис. 1).



Рис. 1. Моделирование сталежелезобетонной балки: а) общий вид экспериментальной балки; б) расчетная модель по ПК ANSYS

Моделирование физической нелинейности бетона и стали производилось с помощью конечных элементов, оперирующих библиотекой законов деформирования материалов. В результате нелинейный расчет позволяет произвести оценки развития упругих и пластических деформаций в стальном профиле, анкерных связях и в железобетонной плите сталежелезобетонного элемента на каждом этапе нагружения и получить разрушающую нагрузку, при которой расчетная схема становится геометрически изменяемой.

Путем последовательного приближения, корректировки модели по результатам анализа численного эксперимента с данными натурных испытаний, на первоначальном этапе выбрана модель расчета по программному комплексу.

Экспериментальные исследования по выявлению действительного напряженнодеформированного состояния осуществлены на крупномасштабных моделях на кратковременные и длительные статические нагружения [3, 4].

Крупномасштабные модели сталежелезобетонных балок имели следующие геометрические параметры: длина – 2000 мм, высота – 170 мм; стальная часть – прокатный двутавр № 12 по ГОСТ 8239-89, бетонная часть – с размерами 400х50 мм, армированная арматурными сетками из проволоки Ø4 Вр-I. Материалы составной балки: прокатный профиль из стали С245, бетон плиты – В30. Для обеспечения совместной работы плиты и стального профиля к его верхней полке по всей длине приварены в два ряда вертикальные анкерные стержни, в зависимости от предполагаемых нагрузок – разного диаметра и с разным шагом.

Сталежелезобетонные балки испытывались по схеме свободно – опертой балки, нагруженной в средней части пролета двумя сосредоточенными силами, отстающими от вертикальной оси балки на 250 мм, с расчетным пролетом 1900 мм. Для исключения местного продавливания железобетонный плиты сосредоточенные нагрузки передавались через распределительные пластины. При статических кратковременных испытаниях нагрузка передавалась посредством гидравлического домкрата через рычажную установку на испытываемую балку, с помощью траверсы в двух точках через катки Ø50 мм и длиной на всю ширину плиты, один из которых закреплен неподвижно [3]. Для исключения закручивания балок во время испытаний между траверсой и рычагом испытательной установки устанавливался полусферический шарнир. Кратковременная статическая нагрузка передавалась с интервалом 200 кг от нуля до разрушения. Деформации на стальном профиле и на бетонной плите замерялись с помощью электротензодатчиков, прогибы – прогибомерами Бурковского, а также с помощью линейки и струны.

Сталежелезобетонные балки разрушались по нормальному сечению в зоне чистого изгиба из-за местного раздробления бетона сжатой зоны плиты и вследствие развития пластических деформаций в стальном профиле. Развитие пластических деформаций в балке начинается в нижних её фибрах между двумя сосредоточенными силами и проникают вглубь сечения балки по мере нарастания нагрузки.

Анализ закономерностей развития деформаций по высоте сечения балок показывает, что до достижения деформации стали нижнего пояса стальной балки значений $\varepsilon_s=0,2$ % наблюдается совместная работа бетона и стали по линейному закону, то есть с одной нейтральной осью, при этом в бетоне достигаются деформации сжатия, в среднем равные $\varepsilon_6=0,08-0,1$ %. С дальнейшим увеличением уровня нагружения в зависимости от степени податливости контакта «сталь-бетон» наблюдается плавное искривление эпюры продольных деформаций по высоте сечения балки, причем в стальной части балки это искривление происходит более резче, чем в бетонной плите. Необходимо отметить, что на границе контакта «сталь-бетон» всегда наблюдается скачок деформаций, то есть деформации стали ε_s и бетона ε_6 на границе контакта различны. Очевидно, что чем больше деформативность контактного шва, тем больше скачок.

Закономерности развития прогибов опытных образцов балок также зависели от степени податливости шва контакта «сталь-бетон». Во всех испытанных образцах происходило увеличение прогибов при возрастании уровня нагружения, причем интенсивность их развития была различной на разных этапах и зависела как от типа анкерной связи, так и от его шага по длине балки. При начальных этапах загружения наблюдается практически прямая пропорциональность между изгибающим моментом и прогибами, а затем, с увеличением податливости контакта шва и изменением эпюры деформаций по высоте СЖБ сечения, происходит интенсивный рост прогибов при незначительном увеличении нагружения, т.е. излом графика прогибов (рис. 6).



Рис. 2. Экспериментальная установка испытания балок на длительные нагружения

При испытаниях на длительное воздействие нагрузок [4], испытательная установка представляла рычажную систему, к одному концу которой подвешивалась люлька с тарированным грузом (рис. 2), а другой конец передавал нагрузку на испытываемую балку через металлическую траверсу.

Методика замеров деформаций и прогибов балки была такая же, как и при кратковременном нагружении [3]. По результатам анализа напряженнодеформированного состояния балок под воздействием кратковременной статической нагрузки определялся уровень начальной нагрузки. Начальная нагрузка принималась в пределах 0,85-0,95 величины кратковременной разрушающей нагрузки, исследуемые балки находились под воздействием длительной нагрузки в течение более шести месяцев.

Во всех случаях опытные образцы сталежелезобетонных балок разрушались по нормальному сечению в зоне чистого изгиба, аналогично балкам при действии кратковременной нагрузки. Наблюдалось образование продольной вертикальной трещины в верхней части бетонной плиты по всей длине балки и нормальных трещин в нижней части плиты в зоне чистого изгиба. В нескольких образцах с наиболее податливыми анкерными связями происходил срез анкеров приопорной части и отрыв

бетонной полки от стальной балки. В целом, для всех балок характерно значительное увеличение прогибов в начальных циклах нагружения, дальнейший их медленный равномерный рост с потерей несущей способности после приложения разрушающей нагрузки. Распределение деформаций по высоте сечения во время действия длительной нагрузки во всех балках характеризуется эпюрой, близкой к треугольной, без разрыва совместности деформаций на контакте «сталь-бетон», который происходил уже непосредственно перед загружением балки дополнительной разрушающей нагрузкой.



Рис. 3. Компьютерная картина развития деформаций в сталежелезобетонной балке при кратковременном нагружении



Рис. 4. Компьютерная картина развития деформаций в сталежелезобетонной балке при длительном нагружении

Исследованиями по ПК ANSYS получены картины развития деформаций при кратковременном и длительном нагружениях (рис. 3, 4). Картины деформаций наглядно показывают последовательность развития деформаций в стальном профиле и железобетонной плите, как деформации развиваются от более напряженной зоны к менее напряженной; от середины к концам балок и от крайних волокон вглубь сечения. В стальной балке развитие деформаций по мере увеличения нагрузки идет интенсивнее, чем в железобетонной плите, что можно объяснить меньшим сечением растянутого пояса, чем сжатая железобетонная полка. Компьютерная картина деформаций подтверждает динамику распределения экспериментальных фибровых деформаций в сечениях как по высоте, так и по длине балки. Полученная картина также наглядно показывает развитие деформаций в анкерных стержнях: деформации и напряжения в них увеличиваются по мере отдаления от середины балки, напряжения увеличиваются по высоте стержней по мере приближения к контактной зоне «сталь-бетон», на поверхности верхнего пояса стального профиля отчетливо видны зоны напряжений, по которым можно судить о величине зон смятия или раскалывания бетона полки составной балки. На рис. 4 для наглядности деформаций анкерных стержней условно железобетонная плита не показана. Построены графики распределения напряжений по высоте балки (рис. 5) и диаграммы изменения прогибов при разных режимах нагружения. Анализ распределения напряжений по высоте нормального сечения балки по результатам расчета на ANSYS и сопоставление с данными испытаний показывает, что при малых нагрузках в зоне упругих деформаций результаты схожи. Однако в численном эксперименте изменение положения границы сжатой зоны по мере увеличения нагрузки не соответствует экспериментальным данным. Большие расхождения получаются и при развитии пластических деформаций, в численном эксперименте пластические деформации развиваются интенсивнее, чем в натурном эксперименте. При больших нагрузках напряжения по ANSYS в зоне контакта «сталь-бетон» сильно отличаются от данных испытаний, как по величине, так и по характеру. Сравнение графиков прогибов балки показывает, что наибольшая сходимость результатов расчета с данными натурного эксперимента получается при задании геометрии расчетной модели в АВТОКАДЕ, чем в ANSYS (рис. 6).



a)

б)

Рис. 5. Распределение напряжений по высоте сечения балки при кратковременных нагрузках: а) по результатам испытаний; б) по результатам расчета на ANSYS



Рис. 6. Графики развития прогибов балки: а) по данным эксперимента и по ANSYS при кратковременных нагрузках; б) по данным эксперимента при длительных нагрузках

Заключение

1. При расчетах по программному комплексу, базируясь на расчетную модель, откорректированную на данным натурных испытаний, можно получить достаточно достоверную картину распределения деформаций, напряжений и прогибов.

2. При расчетах по программному комплексу за пределом упругости сначала необходимо анализировать библиотеку законов деформирования материалов и использовать откорректированные диаграммы материалов библиотеки, приближаясь к аналитическим диаграммам работы материалов.

Список литературы

- 1. СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы. М.: Стройиздат, 1996. 210 с.
- 2. EN 1994-1-1:2004 Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. (Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий). 103 с.
- 3. Замалиев Ф.С., Шаймарданов Р.И. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкции на крупномасштабных моделях. // Известия КазГАСУ, 2008, № 2 (10). С. 47-52.
- 4. Замалиев Ф.С., Хайрутдинов Ш.Н. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций при длительном действии нагрузок. // Известия КазГАСУ, 2008, № 1 (9). – С. 65-67.
- 5. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженные и деформированные состояния сооружений. М.: Госстройиздат, 1963. 258с.

Zamaliev F.S. – candidate of technical science, associate professor Gurianov I.A. – magistrate Khairutdinov Sh.N. – engineer Shaymardanov R.I. – engineer E-mail: <u>em_z@mail.ru</u> Kazan State University of Architecture and Engineering The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st. 1

Numerical and natural experiments in probes of composite steel and concrete structures

Resume

In connection with the tendency of increased use of composite steel and concrete structures in Russian construction industry there is a need to analyze the stress-and-strain mode of such structural elements for various modes of loading. Different mathematical approaches are used in order to define stress-and strain mode. At the moment many researchers in search of effective model engage application software complexes, that is numerical experiment. However reliability of received data depends heavily on the chosen model of numerical experiment which should correspond to the physical model of structural behavior. Application software complex ANSYS was used for numerical experiment here. For initial data strength and geometrical parameters of experimental large-scale samples of composite steel and concrete structures were taken, testing of which took place at laboratory facilities of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Experimental composite T-beams are depicted in the paper, as well as the method of full-scale tests and analysis of test result. Computer-aided pictures of stresses in composite steel and concrete T-beam are shown, stress and strain diagram of steel beam and RC slab for different level of loads is analyzed. Pictures of stresses in shear connectors at steel-concrete contact zone. Stress diagrams of composite steel and concrete beam height according to calculations by software complex ANSYS and to results of full-scale experiment are given for comparison analysis. Comparison analysis of deflection diagram obtained from calculations by ANSYS program and from full-scale beam model test results, is shown.

Keywords: composite steel and concrete structures, settlement model, experiments, pressure, deflections.

References

- 1. SNIP 2.05.03-84* Towers and tubes. M.: SI, 1996. 210 p.
- 2. EN 1994-1-1, 2004. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 103 p.
- 3. Zamaliev F.S., Shaimardanov R.I. Experimental research of steel-ferroconcrete structures on large scale models. // News of the KSUAE, 2008, № 2 (10). P. 47-52.
- 4. Zamaliev F.S., Khayrutdinov Sh.N. The experimental investigation of composite steel and concrete bending constructions under sustained loads. // News of the KSUAE, 2008, № 1 (9). P. 65-67.
- 5. Prokopovich I.E. Influence of long processes on the intense and deformed conditions of constructions. M.: GSI, 1963. 258 p.