

Рисунок 2. Результаты расчета S-образной плиты под действием равномерно распределенной нагрузки

**ПРИМЕР РАСЧЕТА**

В качестве примера была рассмотрена плита (рис. 1) на упругом полупространстве, загруженная равномерно распределенной нагрузкой  $q$ . При расчете плита разбивалась на 216 участков (по Жемочкину). Принято:  $R_1 = R'_1$ ,  $R_2 = R'_2 = 2R_1$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \pi/2$ ,  $\xi = 50$ . Численные результаты, полученные с использованием ПЭВМ, приведенные в таблице, показывают значения коэффициентов  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$  при учете нескольких решений Клебша. Анализ данных

таблицы показывает, что только слагаемые ряда (3), где степень при  $r$  четная, дают сходимость ряда (3), соответствующего решению данной задачи.

$$\begin{aligned}
 a &= B_{12} r^2 \cos 2\theta; & \bar{b} &= C_{12} r^2 \sin 2\theta; & v &= B_{21} r^3 \cos \theta; \\
 z &= C_{21} r^3 \sin \theta; & d &= B_{24} r^4 \cos 2\theta; & e &= C_{24} r^4 \sin 2\theta; \\
 \varkappa &= B_{13} r^3 \cos 3\theta; & z &= C_{13} r^3 \sin 3\theta; \\
 u &= B_{23} r^5 \cos 3\theta; & \kappa &= C_{23} r^5 \sin 3\theta; \\
 l &= B_{14} r^4 \cos 4\theta; & m &= C_{14} r^4 \sin 4\theta.
 \end{aligned}$$

Для этой же плиты в двух сечениях на рис. 2 приведены эпюры радиальных моментов  $M_r$  и осадок  $W$ .

**ВЫВОДЫ**

Полученные результаты показывают, что предлагаемый подход позволяет рассчитывать пластинки любой гибкости, имеющие любую форму в плане в полярных координатах, на произвольном упругом основании при действии произвольных внешних сил. Однако при выборе координатных функции необходимо рассматривать принимать во внимание сходимость получаемого решения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва: Наука, 1979. – С. 560.
2. Жемочкин Б. Н., Сеницын А. П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. Москва: Стройиздат, 1962. – С. 237.
3. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. Москва: Стройиздат, 1984. – С. 657.
4. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. Москва: Физматгиз, 1963. – С. 627.
5. Развитие теории контактных задач в СССР. М.: Наука, 1976. – С. 490.
6. Босаков С. В., Генфуд С. Расчет сложной формы жестких пластинок на упругом основании любого типа в полярных координатах// *Материалы технологии, инструменты.* – 1999. –№ 2. – С. 24–26.
7. Босаков С. В., Генфуд С. Построение функции Грина для бесконечной изгибаемой пластинки с заземленной точкой под действием сосредоточенной силы// *Вестник БПИ.* – 2000. –№ 1.
8. Кончковский З. Плиты. Статические расчеты. Москва: Стройиздат, 1984. – С. 469.

УДК 624.012.4: 539.432

*Драган В.И., Шалобыта Т.П., Шалобыта Н.Н.*

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КОНТАКТОВ САМОНАПРЯЖЕННЫХ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

В настоящее время использование сборно-монолитных железобетонных конструкций в различных отраслях промышленности находят широкое применение, как при новом

строительстве, так и при реконструкции. Использование данных конструкций создает специфические особенности подхода к определению их сопротивления эксплуатационным

*Драган Вячеслав Игнатьевич. К.т.н., профессор, зав. каф. строительных конструкций, проректор по научной работе Брестского государственного технического университета.*

*Шалобыта Татьяна Петровна. К.т.н., ст. преподаватель каф. технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.*

*Шалобыта Николай Николаевич. Ст. преподаватель каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.*

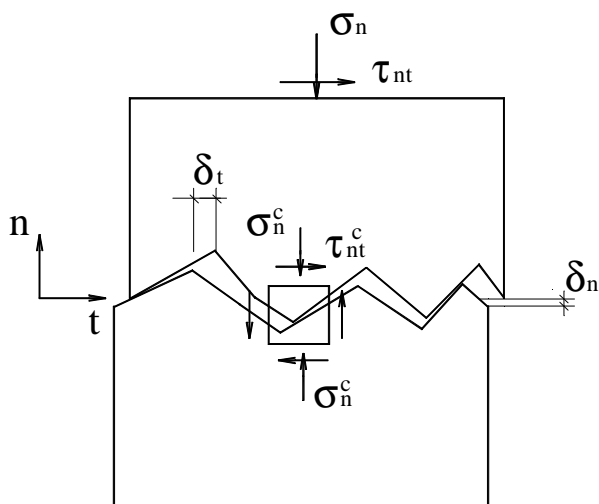


Рисунок 1. Напряженно-деформированное состояние стыкового соединения

воздействиям, их стойкости и долговечности в условиях сложных режимов комплекса силовой и не силовой нагрузки.

В соответствии с требованиями проекта норм [1], железобетонную конструкцию следует считать сборно-монолитной, если среди прочих выполнены следующие основные требования:

- обеспечена прочность контактного соединения монолитного бетона и сборного элемента на всех этапах работы конструкции, то есть вплоть до наступления предельного состояния, исключены предпосылки для расслоения составной конструкции по контакту;
- сохраняется неразрывность (сплошность) нормального сечения при передаче продольных усилий по его высоте.
- рассматривая работу стыкового соединения, следует иметь в виду следующие обстоятельства:
- стыковое соединение при действии системы нагрузок находится в условиях плоского напряженного состояния (рис.1);
- стыковое соединение представляет собой искусственно созданную трещину между составляющими сечение материалами, работающую в условиях фрикционного среза [2].

Исследования работы стыкового соединения выполнялись на сборно-монолитных образцах цилиндрической формы и испытанных в условиях чистого сдвига при действии статических и циклических нагрузок. Выбор данной конструкции образцов обусловлен рядом факторов, главным из которых являлось возможность придать касательным напряжениям равномерный характер распределения по высоте сечения.

Опытные образцы имели переменный коэффициент поперечного армирования стыка монолитную часть, выполненную из напрягающего бетона. Применение напрягающего бетона в данном случае позволило получать варьируемый уровень начальных сжимающих напряжений, действовавших на стыковое соединение. Поверхность стыкуемых элементов имела шероховатость с глубиной выступов-впадин до 5 мм, которая была образована путем обнажения заполнителя после бетонирования "сборной" части образца.

Конструкция опытных образцов показана на рис.2.

Испытания образцов производили на универсальной усталостной машине малой мощности УММ-01 (рис.3). Данная установка предназначена для испытаний на кручение, как при циклическом, так и при статическом нагружении. В зависи-

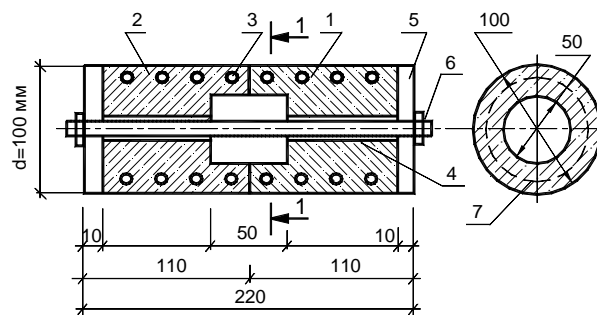


Рисунок 2. Конструкция опытных сборно-монолитных образцов

- 1-сборная часть из портландцемента;
- 2-монолитная часть на напрягающем бетоне;
- 3-косвенное армирование  $d=3$  Вр-1, шаг 30 мм;
- 4-продольный стержень  $d=(5-10)$  в кембрике;
- 5- пластины фиксаторы  $t=10\text{мм}$ ;
- 6-гайка.

Характеристики образцов

Таблица 1

Наименование характеристики образца			
Призменная прочность, МПа	Кубиковая прочность, МПа	Самонапряжение, МПа	Напряжение обжатия в стыковом соединении $\sigma_{се,j}$ , МПа
32	47,3	1.88	1.707
43	61,5		

Примечание: \*в числителе значения для обычного в знаменателе для напрягающего бетонов.

мости от того, какой вид нагружения требуется применить, используется различная конфигурация усталостной машины.

Конструктивные особенности устройства для испытания на статическое кручение представлены на рис. 3.

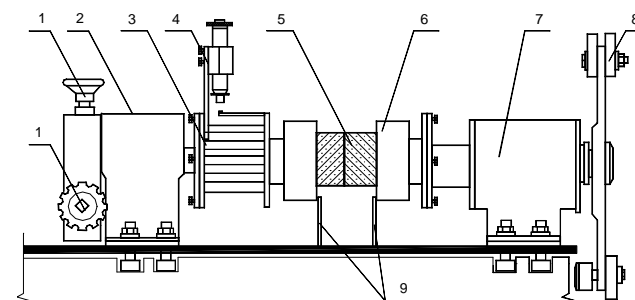


Рисунок 3. Схема устройства: УММ-01

- 1 — механизм фиксации статической нагрузки,
- 2 — передний неподвижный захват,
- 3 — упругий динамометр,
- 4 — оптическая система силоизмерения,
- 5 — образец,
- 6 — захваты образца,
- 7 — задняя неподвижная бабка,
- 8 — траверса шатуна с механизмом циклического нагружения,
- 9 — система измерительного моста тензодатчиков.

Циклическое нагружение осуществляется от возбудителя динамических перемещений через шатун 8. Траверсе шатуна сообщаются угловые колебания, которые воспринимаются образцом и динамометром испытательной установки-3. При

статическом нагружении динамометр поворачивают на заданный угол при помощи винта 1.

Измерение статической и динамической нагрузки, воспринимаемой образцом, оценивается по упругой деформации динамометра при помощи микроскопа 4, в поле зрения которого находится риска, укрепленная на кронштейне. Риска освещается боковым светом от электрической лампочки. При работе устройства риска совершает колебания, образуя световую полосу (линию в статике), пропорциональную закручиванию динамометра и нагруженности образца.

Под действием переменных напряжений в стыке происходят различные процессы, приводящие к нелинейной зависимости между усилиями и деформациями в процессе циклического нагружения, свидетельствующие о неупругом характере деформирования. Измерение величин неупругой деформации (ширина петли гистерезиса) рассеянной в материале за цикл, производилось при непосредственном построении петель гистерезиса в координатах напряжение-деформация. Метод состоит в том, что на экране осциллографа воспроизводится зависимость между напряжениями и деформациями непосредственно в процессе циклического нагружения. Сигналы, снимаемые с датчиков, усиливаются двухканальным тензоусилителем. Далее, через фильтр и фазовращатель сигналы подаются на вход осциллографа. При испытаниях на кручение два моста тензодатчиков наклеены на динамометр, один из них предназначен непосредственно для измерения крутящего момента, другой служит для контроля отсутствия в аппаратуре сдвига фаз. Для устранения влияния крупнозернистой структуры бетонного образца угол закручивания образца фиксировался с помощью тензодатчиков, наклеенных на упругие промежуточные элементы, представляющие собой консольные балочки 9. Тензодатчики, наклеенные на упругие элементы, включены в измерительную схему так, что общий сигнал с двух пар датчиков пропорционален углу закручивания образца. Для исключения влияния люфтов на полученные результаты, деформация балочки не меняет своего знака, что осуществляется путем предварительного ее деформирования на величину, большую максимальной амплитуды деформации образца. Размеры поперечного сечения упругой палочки и ее длина определяют величину полезного сигнала, а, следовательно, и точность определения угла закручивания. При выборе размеров балочки предполагалось, что ее жесткость должна быть значительно меньше жесткости образца, и что сигнал в этом случае должен быть соизмерим с сигналом, который бы поступал с тензодатчиков, наклеенных непосредственно на образец. Изменением напряжений в образце, вызванное жесткостью балочек можно пренебречь, так как жесткость балочки составляет 0.005 жесткости образца.

Информация о напряжениях в образце снималась с датчиков, наклеенных на тарированный динамометр, последовательно включенный с испытуемым образцом. Таким образом, сигнал от тензодатчиков, наклеенных на динамометр и фиксирующих изменение усилия, подается на вертикальный канал осциллографа и вызывает отклонение электронного луча по вертикали, а сигнал с датчиков, наклеенных на упругих элементах и фиксирующих деформацию (угол закручивания образца), подается на горизонтальный канал осциллографа и вызывает отклонение электронного луча по горизонтали. В процессе испытания перемещение луча становится непрерывным, и на экране осциллографа будет вычерчиваться линия, характеризующая зависимость между усилиями и деформациями.

В качестве обобщенной зависимости, описывающей как прочностные, так и деформативные характеристики стыкового соединения, следует рассматривать диаграмму деформирования “ $\tau_{nc,j} - \delta_i$ ” для контакта статических нагрузках. Для описания диаграмм циклического деформирования использо-

вались зависимости  $\tau_{nc,j} - \gamma_n$ , полученные при различных уровнях амплитуды напряжения.

Для построения зависимостей описывающих работу стыкового соединения при циклических нагрузках использовались соотношения [3]:

$$\tau^- = \frac{M_b \cdot r}{I_p} = \frac{M_b}{W_p} \quad (1)$$

где  $W_p$  – полярный момент сопротивления сечения;

$\tau^-$  – средние напряжения, соответствующие  $M_k$ ;

Примем, что суммарный угол закручивания образца

$$\varphi_a = \varphi_0^- + \frac{\Delta\varphi^-}{2} \quad (2)$$

$$\varphi_0^- = \frac{M_b \cdot l_0}{G \cdot I_p} = \frac{\tau^- \cdot l_0}{G \cdot I_p} \quad (3)$$

Введем формулу для  $\Delta\varphi_n^c$  с функциями от  $\Delta x_n/x_a$ , где  $\Delta x_n$  – сигнал, пропорциональный  $\Delta\varphi_n^c$ , и  $x_a$  – сигнал, пропорциональный  $\varphi_a$  и, перейдя к относительному сдвигу, окончательно получим:

$$\gamma_a = \frac{\tau^-}{G} + \frac{\Delta\gamma^-}{2} = \frac{\tau^-}{G} \cdot \left( 1 + \frac{I}{2 \cdot \left( \frac{x_a}{\Delta x} - \frac{I}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

Достоинством формулы (4) является то, что в нее входят не абсолютные значения величин сигналов с датчика деформаций, а их отношения, не зависящие от коэффициента усиления аппаратуры. Используя приведенные выше соотношения, можно построить петлю гистерезиса в координатах напряжение – относительная деформация.

Для удобства анализа полученных экспериментальных данных диаграммы циклического деформирования совмещены с кривыми многоциклового усталости, в координатах амплитуда напряжения – число циклов до разрушения (рис 3).

Как следует из диаграмм деформирования, описывающих нелинейное поведение стыкового соединения, можно выделить характерные участки [2]: участок линейного деформирования, участок проявления нелинейной зависимости между напряжениями и перемещениями на восходящей ветви диаграммы, нисходящую ветвь. При статических и циклических испытаниях разрушение происходило по стыку образца. Начало разрушения регистрировали при помощи микроскопа при появлении трещин по поверхности образцов длиной 2-5 мм.

Возможность регулирования величины прикладываемых к образцу перемещений – при статических испытаниях, и количества циклов до разрушения, при заданном уровне напряжений – при циклических испытаниях, позволили исследовать закономерности развития трещины по длине стыкового соединения. В процессе нагружения контакта образцов, на всех образцах можно было выделить стадии развития трещины. С момента регистрации трещин размером 3 ÷ 5 мм и до достижения ими размеров 30 ÷ 40 мм на поверхности образца, трещины развивались за счет сдвига вдоль стыка. По всей протяженности стыка можно было наблюдать несколько таких участков. Трещины имели форму полуэллипса с соотношением полуосей в пределах 4 : 1. Основываясь на данных параметрах повреждения можно предположить, что более

обоснованным параметром повреждения будет являться площадь поверхности, образующейся при появлении трещины. При этом за момент усталостного разрушения следует принимать число циклов, соответствующее достижению данной величины критического значения. Далее в процессе разрушения (долома) образца развивались трещины, идущие под углом  $45^0$  к оси образца (контакта), что при чистом кручении вполне объяснимо действием главных нормальных напряжений, и стремлением разрушиться по типу нормального отрыва. Но в следствии того, что длина трещин невелика спустя некоторое время был отмечен полный переход к направлению максимального сдвига т.е. имеет место сдвиговая форма трещины, по которой произошло полное разрушение контакта сборно-монолитной конструкции.

Анализируя начальные участки диаграмм циклического и статического деформирования, можно сделать вывод, что так как участки диаграмм циклического деформирования расположены ниже диаграммы статического деформирования, исследованные контакты конструкции ведут себя при многоцикловом нагружении как циклически разупрочняющиеся материалы.

### ВЫВОДЫ

1. Точность экспериментальных данных испытания контактов сборно-монолитных конструкций при циклических нагрузках по данной методике позволяет получить данные по деформативности контактов с точностью  $10^{-5}$  мм/мм, и зафиксировать взаимные сдвиги в конструкции порядка  $2 \cdot 10^{-4}$  м, что при испытаниях статической статической нагрузкой получить довольно сложно ( $1 \cdot 10^{-2}$ ).

УДК 519.3:681.3

*Игнатюк В.И., Бондарук Н.С.*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСОЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА БАЗЕ МКЭ

Применение ЭВМ в расчётах строительных конструкций и сооружений – необходимость сегодняшнего дня, дающая возможность быстро и надёжно решать и анализировать сложные и трудоёмкие задачи и способствующая прогрессу в строительной отрасли. Одним из методов расчета конструкций и сооружений, усиленно и эффективно развивающихся в последние годы, применение которого самым непосредственным образом связано с развитием и использованием ЭВМ, является метод конечных элементов (МКЭ)[1]. Этот метод в настоящее время стал одним из основных и наиболее мощных инструментов численного исследования конструкций и сооружений[2].

В данной работе рассматривается расчёт пространственных стержневых систем произвольной структуры на действие статических нагрузок методом конечных элементов с применением ЭВМ. Такие системы могут быть представлены в виде “ансамбля” прямолинейных стержней, соединённых между собой в жестких либо шарнирных узлах, а с помощью опор – с основанием, которые и принимаются в качестве конечных элементов. Для расчёта принят МКЭ в форме метода перемещений, в которой в качестве основных неизвестных

2. Механизм деформирования стыка при циклических нагрузках допускает взаимное смещение в зоне контакта при первых циклах нагружения. Данный результат хорошо вписывается в аналитическую модель работы контакта представляющую собой модель системы фрикционной передачи усилий среза (рис 1).
3. Начальные участки диаграмм циклического деформирования контактного слоя сборно-монолитных образцов расположены ниже диаграммы их статического деформирования. На основании этого экспериментального результата можно сделать вывод, что материал контактного слоя ведет себя при многоцикловом нагружении как циклически разупрочняющийся материал.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пособие по проектированию сборно-монолитных конструкций (проект к СНБ 5.03.01–98).— ГП «Стройтехнорм».— 1999.— С. 152.
2. Тур В.В., Шалобыта Т.П., Шалобыта Н.Н. К построению аналитической модели работы стыкового соединения железобетонных сборно-монолитных конструкций// Проблемы и перспективы современных строительных конструкций и технологий: Сб. тр./ Под редакцией В.И. Драгана.— Брест: БПИ, 1998.— С.74-78.
3. Трошенко В.Т., Драган В.И.. Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении// Проблемы прочности. — 1982.— №5. — С. 3-10.

выступают перемещения узлов соединения конечных элементов. Число перемещений в каждом из узлов пространственной стержневой системы равно шести – три угловых и три линейных. Тогда общее число неизвестных для системы будет равно шестикратному числу узлов в ней. Рассматриваются линейно-деформируемые сооружения.

Система разрешающих уравнений метода конечных элементов для таких сооружений записывается в виде:

$$-[K]\{\Delta\} + \{P\} + \{R\} = 0 \quad (1)$$

где:  $[K]$  – матрица жесткости системы;  $\{\Delta\}$  – вектор перемещений узлов системы;  $\{P\}$  – вектор внешних узловых нагрузок;  $\{R\}$  – вектор опорных реакций.

Матрицы жесткости системы в целом или отдельных конечных элементов могут быть получены с помощью вариационных принципов строительной механики, например принципа Лагранжа, согласно которому для системы, находящейся в равновесии, из всех возможных перемещений, удовлетворяющим граничным условиям, в действительности имеют место те перемещения, при которых полная потенциальная энергия принимает минимальное значение. Записав полную потенци-

*Игнатюк Валерий Иванович. К.т.н., доцент, зав. каф. строительной механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская 267.*

*Бондарук Николай Сергеевич. Инженер.*