

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Промышленное и гражданское строительство»

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальностей
6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью»
и 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений»
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 624.012.45
ББК 38.5
Ж51

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
«7» апреля 2025 г., протокол № 11

Составитель ст. преподаватель Е. С. Хмельницкий

Рецензент Н. В. Курочкин

В методических рекомендациях к лабораторным работам по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» изложены сведения по подготовке, проведению и оформлению лабораторных работ для студентов специальностей 6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью» и 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений» 2 дневной и заочной форм обучения. Описаны методы проведения статических испытаний бетонных, арматурных, железобетонных образцов. Даны рекомендации по математической обработке и анализу полученных результатов испытаний.

Учебное издание

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Ответственный за выпуск	С. В. Данилов
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Общие положения.....	5
2 Лабораторная работа № 1. Определение основных прочностных и деформативных характеристик бетона.....	9
3 Лабораторная работа № 2. Испытание железобетонной балки с разрушением по сечению, нормальному к продольной оси.....	20
4 Лабораторная работа № 3. Исследование работы железобетонной балки при разрушении по наклонному сечению.....	26
5 Лабораторная работа № 4. Исследование работы внецентренно сжатой колонны.....	31
Список литературы.....	36

Введение

Методические рекомендации предназначены для студентов специальностей 6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью» и 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений», а также для преподавателей, осуществляющих проведение лабораторных работ по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции».

Целью изучения учебной дисциплины является формирование знаний, умений и навыков у студентов, обучающихся по специальностям 6-05-0732-02 «Экспертиза и управление недвижимостью» и 7-07-0732-01 «Строительство зданий и сооружений», позволяющих принимать оптимальные решения в практической работе с решением задач в области проектирования, изготовления и возведения конструкций зданий и сооружений.

Методические рекомендации к лабораторным работам ставят своей целью закрепление теоретических знаний, полученных в ходе изучения дисциплины «Железобетонные и каменные конструкции», на примере испытания образцов конструкций и исследования их работы под нагрузкой.

При изучении дисциплины «Железобетонные и каменные конструкции» уделяется особое внимание действительной работе конструкций под нагрузкой, чему способствует выполнение испытаний лабораторных образцов, материалов и изделий.

Основная цель проведения лабораторных работ состоит в том, чтобы углубить и закрепить полученные теоретические знания о работе конструкций под нагрузкой, научить ставить опыты с применением необходимых приборов и оборудования, обрабатывать и анализировать полученные данные, делая правильные выводы. Кроме того, выполнение лабораторных работ позволяет привить студентам навыки научно-исследовательской работы.

1 Общие положения

Во время проведения лабораторной работы № 1 определяются основные прочностные и деформативные характеристики бетона.

При проведении лабораторных работ № 2–4, как правило, образцы конструкций испытываются до разрушения, что позволяет изучить их поведение на всех стадиях напряженно-деформированного состояния.

В качестве основных характерных случаев разрушения конструкций под нагрузкой в лабораторных работах № 2–4 рассматриваются:

- разрушение от достижения в рабочей арматуре нормального или наклонного сечения напряжений, соответствующих пределу текучести стали, ранее, чем раздробление сжатого бетона;

- разрушение от раздробления бетона сжатой зоны над нормальной или наклонной трещиной в конструкции до достижения предела текучести стали в растянутой арматуре.

После испытаний выполняется сравнение опытных и расчетных значений усилий, деформаций, трещин, перемещений и дается оценка надежности и достоверности экспериментальных данных.

Материалы каждой проведенной лабораторной работы оформляются в виде отчета, в котором отражаются все этапы работы и делаются выводы по результатам испытаний.

1.1 Испытательное оборудование и средства измерений

При проведении испытаний для нагружения используется оборудование, обеспечивающее возможность опирания образцов конструкций и приложения к ним нагрузки по заданной схеме и позволяющее производить нагружение с погрешностью не более $\pm 5\%$ от контрольной величины.

Рекомендуется использовать для нагружения гидравлические прессы или стенды с гидравлическими домкратами и насосными станциями, а также механические рычажные установки и штучные грузы. Для измерения усилий применяются манометры, динамометры, динамометрические вставки распределительных траверс и нагружающих тяжей.

Для измерения прогибов и перемещений следует применять измерительные приборы и инструменты с ценой деления не более 0,1 мм: прогибомеры, индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 и 0,001 мм, тензометры, тензорезисторы, штангенциркули, нивелиры и теодолиты. Измерение ширины раскрытия трещин рекомендуется проводить измерительными микроскопами, лупами с ценой деления не более 0,05 мм и металлическими щупами.

1.2 Методика проведения испытаний

Однопролетные свободно опертые и работающие в одном направлении балки следует опирать при испытании на две шарнирные линейные опоры, одна

из которых должна быть неподвижной, а другая подвижной, допускающей перемещение конструкций вдоль пролета. В случаях, когда свободному перемещению испытываемых конструкций вдоль пролета препятствуют загрузочные устройства, опоры должны быть подвижными. Опирающие конструкции на шарнирные опоры должно осуществляться через стальные плиты, симметрично расположенные относительно оси опоры.

Нагрузку следует прикладывать поэтапно ступенями (долями), каждая из которых не должна превышать 10 % контрольной нагрузки по прочности и по образованию и ширине раскрытия трещин и 20 % контрольной нагрузки по жесткости.

После каждой доли нагрузки испытываемая конструкция выдерживается под нагрузкой не менее 4...5 мин. После приложения контрольной нагрузки по жесткости и образованию трещин следует выдерживать конструкцию под этой нагрузкой в течение 30 мин, после чего продолжать поэтапное нагружение.

Во время выдерживания на каждой ступени нагружения необходимо производить осмотр поверхности образца и фиксировать появившиеся трещины, результаты измерения перемещений, осадки опор, ширину раскрытия трещин и смещения арматуры относительно бетона на торцах образца. Контролируемые показатели фиксируются в начале и в конце каждой выдержки.

В изгибаемых конструкциях ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси конструкции, измеряют на уровне центра тяжести нижнего ряда арматуры, а ширину раскрытия трещин, наклонных к продольной оси, – на уровне центра тяжести нижнего ряда продольной арматуры и в местах пересечения наклонными трещинами хомутов, а также отогнутых стержней.

При проверке жесткости изгибаемых конструкций следует измерять перемещения в середине пролета и осадку опор. Прогиб образца конструкции определяется как разность между значениями перемещений, измеренных в пролете, и полусуммой значений осадок опор.

При испытании конструкции следует доводить до исчерпания прочности, что характеризуется непрерывным нарастанием прогибов, развитием и раскрытием трещин в бетоне при практически неизменной достигнутой максимальной нагрузке (первый случай разрушения) либо резким снижением нагрузки после достижения ее максимального значения, при котором происходит разрыв арматуры, проскальзывание ее в бетоне или раздробление бетона сжатой зоны (второй случай разрушения).

1.3 Оценка надежности и достоверности результатов

Опытные (фактические) значения исследуемых в лабораторных работах величин в каждом отдельном испытании для одной серии образцов будут, как правило, разными. Под серией подразумевается группа образцов, изготовленных из арматурной стали одной партии и бетона одного замеса. Все образцы одной серии проходят одинаковый цикл термовлажностной обработки (или твердеют в одинаковых естественных условиях). Характеристики прочности арматуры и бетона вычисляются на основании испытаний образцов бетона и

арматуры и являются постоянными для одной серии образцов.

Изменчивость опытных (фактических) значений усилий в одной серии образцов является закономерной и объясняется определенными причинами. Поэтому для более обоснованных расчетных и опытных значений усилий и деформаций следует учесть результаты не только настоящих испытаний, но и результаты предыдущих испытаний в одной серии образцов и, выполнив несложную статистическую обработку, дать вероятностную оценку результатам испытаний.

При вероятностной оценке решаются две нижеследующие задачи:

- 1) является ли результат проведенного испытания достоверным или его нужно признать неудовлетворительным;
- 2) оценивается сходимость расчетного значения усилия (деформации) с опытными.

Количественная оценка особенности изучаемой величины (фактора, характеристики) производится по его типичной средней величине с помощью среднего арифметического, а её изменчивость – через среднее квадратическое отклонение и точность его определения посредством средней ошибки среднего арифметического.

Среднее арифметическое X_m вычисляется по формуле

$$X_m = \sum_{i=1}^n X_i / n, \quad (1.1)$$

где X_i – отдельные наблюдаемые значения измеряемой величины;

n – число измерений.

Среднее квадратическое отклонение σ рассчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_m - X_i)^2 / (n-1)} . \quad (1.2)$$

Пользуясь величиной σ , можно установить, какое количество измерений в данной партии будет находиться в тех или иных заданных пределах отклонения от среднего арифметического.

Для оценки точности определения общего значения среднего арифметического изучаемой величины по среднему арифметическому, найденному из ограниченного (небольшого) количества наблюдений, пользуются средней ошибкой среднего арифметического m , определяемой по формуле

$$m = \pm \sigma / \sqrt{n}. \quad (1.3)$$

С помощью m можно судить о надежности полученной средней характеристики X_m изучаемой величины, а именно: 68,3 % измерений должно находиться в пределах $X_m \pm m$; 95,4 % – в пределах $X_m \pm 2m$; 99,7 % – в пределах $X_m \pm 3m$.

Среди серии результатов необходимо выявить неудовлетворительные («выпадающие») результаты, которые резко отличаются от среднего результата

для всей серии. Такие результаты являются следствием плохого качества опытных образцов или ошибок при проведении эксперимента. Подобного рода заключение основывается на принципе, согласно которому отдельный результат испытаний, значительно отличающийся от среднего значения, считается маловероятным и практически невозможным. И если он имеет место, то его отбрасывают.

В технических дисциплинах принято считать, что можно пренебречь результатом, который может встретиться с вероятностью $\alpha = 1\%$ (эта величина называется уровнем значимости). При этом предполагается нормальное распределение результатов. Коэффициенты $g_{\alpha,n}$ и $t_{\alpha,n}$, соответствующие этому уровню значимости и зависящие от числа испытаний n , приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения коэффициентов $g_{\alpha,n}$ и $t_{\alpha,n}$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$g_{\alpha,n} (\alpha = 1\%)$	–	–	1,414	1,723	1,995	2,13	2,265	2,374	2,464	2,54
$t_{\alpha,n} (\alpha = 1\%)$	63,66	9,925	5,841	4,604	4,032	3,707	3,499	3,355	3,25	3,169

Отдельный опытный результат признается неудовлетворительным и отбрасывается, если он не удовлетворяет неравенству

$$(X_m - \sigma \cdot g_{\alpha,n}) < X_i < (X_m + \sigma \cdot g_{\alpha,n}) . \quad (1.4)$$

Вероятностная оценка сходимости расчетного и опытного значений исследуемой величины в среднем основывается на том принципе, что при нескольких испытаниях образцов из одной серии за истинное значение опытных величин для данной серии принимается среднее арифметическое значение X_m , с которым и сравнивается расчетное теоретическое значение. Между средним арифметическим X_m и расчетным X допускается некоторая величина расхождения. Расхождение больше этой величины считается с вероятностью $\alpha = 1\%$ практически невозможным. Расхождение Δ между X_m и X вычисляют по формуле

$$\Delta = \pm t_{\alpha,n} \cdot \sigma / \sqrt{n} , \quad (1.5)$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от уровня значимости α и числа испытаний n по таблице 1.1.

Если расхождение между X_m и X будет меньше величины Δ , то сходимость между X_m и X признается удовлетворительной, т. е. проверяется неравенство

$$(X_m - t_{\alpha,n} \cdot \sigma / \sqrt{n}) < X < (X_m + t_{\alpha,n} \cdot \sigma / \sqrt{n}) . \quad (1.6)$$

Если неравенство не соблюдается (что возможно с вероятностью $\alpha = 1\%$), то это событие считается практически невозможным и соответствующая ему сходимость неудовлетворительная.

При увеличении числа испытаний n расхождение между X_m и X уменьшается.

2 Лабораторная работа № 1. Определение основных прочностных и деформативных характеристик бетона

Цель работы: усвоить сущность и назначение основных механических характеристик бетона; изучить методы определения прочностных и деформативных характеристик бетона, правила обработки результатов испытаний, используемое оборудование и приборы.

В процессе проведения лабораторной работы должны быть определены нормативные и расчетные характеристики бетона, коэффициент вариации, класс бетона, модуль упругости и упругопластичности, коэффициент упругости бетона.

2.1 Общие понятия о прочностных и деформативных характеристиках бетона

Обычно на производстве контролируется только кубиковая прочность бетона на сжатие. Она представляет собой предел прочности f_{cm} , МПа, бетонных кубов, испытанных при нормальных условиях:

$$f_{c,cube} = \frac{F \cdot 10}{A_{cm}} \alpha, \quad (2.1)$$

где F – разрушающая нагрузка, кН;

A_{cm} – среднее арифметическое площадей двух противоположных граней, по которым производилось сжатие, см²;

α – масштабный коэффициент перехода к прочности образцов базового размера. Для кубов с размером ребра $a = 100$ мм $\alpha = 0,95$; при $a = 150$ мм $\alpha = 1$; при $a = 200$ мм $\alpha = 1,05$;

$f_{c,cube}$ – величина прочности i -го куба, кПа.

Из-за неоднородности бетонной смеси прочность каждого куба, изготовленного из одного и того же замеса, будет разная. Качество бетона отдельного замеса или партии оценивают средним значением прочности и ее разбросом.

Среднее значение прочности бетона f_{ci} определяется по формуле

$$f_{ci} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cmi}, \quad (2.2)$$

где f_{cmi} – единичный результат прочности бетона;

n – количество испытанных образцов, $n \geq 3$.

Разброс отдельных результатов определения прочности бетона принято оценивать среднеквадратическим отклонением S_m , называемым также «стан-

дартом», и коэффициентом вариации V_m .

Среднее квадратичное отклонение при числе испытанных образцов $n > 6$ вычисляют по формуле

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cm} - f_{ci})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

а при числе испытанных образцов $n \leq 6$ – по формуле

$$S_m = \frac{1}{\alpha} W_m, \quad (2.4)$$

где W_m – размах единичных значений прочности бетона в партии, определенной как разность между максимальным и минимальным единичными значениями прочности;

α – коэффициент, зависящий от числа единичных значений n .

Независимо от значения прочности, однородность бетона характеризуется коэффициентом вариации, равным отношению среднеквадратического отклонения (стандарта) к среднему значению прочности бетона:

$$V_m = \frac{S_m}{f_{cm}}. \quad (2.5)$$

Нормируемое значение этого коэффициента для тяжелого и легкого бетона – 0,135. Если фактическое значение коэффициента вариации бетона отдельного замеса или партии меньше нормируемого, то качество бетона высокое, и наоборот.

Класс бетона – характеристика его в стадии проектирования конструкции [5]. Класс бетона по прочности на сжатие определяется как среднее значение прочности f_{cm} путем испытания эталонных образцов по методике государственных стандартов с вероятностью 95 %. Согласно теории вероятности, такая обеспеченность будет достигнута, если класс бетона C будет меньше средней прочности бетона на $1,64V_m$. Следовательно, между классом бетона C и средней прочностью будет зависимость

$$C = f_{cm} (1 - 1,64V_m). \quad (2.6)$$

В производственных условиях приходится оценивать прочность бетона на различных стадиях изготовления и загрузки конструкции: передаточная и отпускная прочность, прочность бетона в промежуточном и проектном возрастах. Партия подлежит приемке, если выполняется условие

$$f_{cm} \geq f_t, \quad (2.7)$$

где f_t – требуемая прочность бетона для рассматриваемой стадии,

$$f_t = K_t C_{норм}; \quad (2.8)$$

$C_{норм}$ – нормируемое значение прочности бетона данного класса для рассматриваемой стадии (передаточная и отпускная прочность, прочность в промежуточном возрасте или проектном возрасте);

K_t – коэффициент требуемой прочности.

Прочность бетона на растяжение f_{ct} используют при расчете прочности бетонных элементов, при расчете железобетонных конструкций по деформациям, образованию и раскрытию трещин. Прочность бетона на осевое растяжение f_{ct} определяют путем испытания на разрыв восьмерок или призмы, изготовленных со специальными захватными устройствами. Сопротивление осевому растяжению получают путем деления разрушающего усилия на площадь поперечного сечения (аналогично формуле (2.1)).

Прочность бетона на растяжение при изгибе $f_{ct,fl}$ определяют посредством испытания бетонных призм $10 \times 10 \times 40$, $15 \times 15 \times 60$ и $20 \times 20 \times 80$ см на изгиб двумя сосредоточенными силами. При этом прочность бетона растяжению при изгибе вычисляют, с учетом пластических деформаций, по формуле

$$f_{ct,fl} = \frac{3,5Fl_1}{a^3} \cdot 10, \quad (2.9)$$

где F – разрушающая сосредоточенная сила, кН;

l_1 – расстояние от опоры до линии действия силы, см;

a – сторона сечения призмы, см;

$f_{ct,fl}$ – прочность бетона растяжению при изгибе, МПа.

Сопротивление бетона растяжению при раскалывании $f_{ct,sp}$ определяют путем сжатия кубов через прокладки, помещенные между гранями куба и плитами пресса:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F\gamma}{\pi A} 10, \quad (2.10)$$

где F – разрушающая сила, кН;

A – площадь поперечного сечения, см²;

γ – масштабный коэффициент. При размере ребра куба $a = 100$ мм $\gamma = 0,92$, при $a = 150$ мм $\gamma = 1,0$; при $a = 200$ мм $\gamma = 1,05$.

Расчетные сопротивления бетона при расчете конструкций по первому предельному состоянию определяются при коэффициентах условий работы γ_f , которые учитывают свойства бетона, длительность действия нагрузки и др. Так, коэффициенты надежности бетона всех видов, кроме ячеистого, работающего на сжатие, принимаются $\gamma_f = 1,5$; на растяжение $\gamma_f = 1,8$.

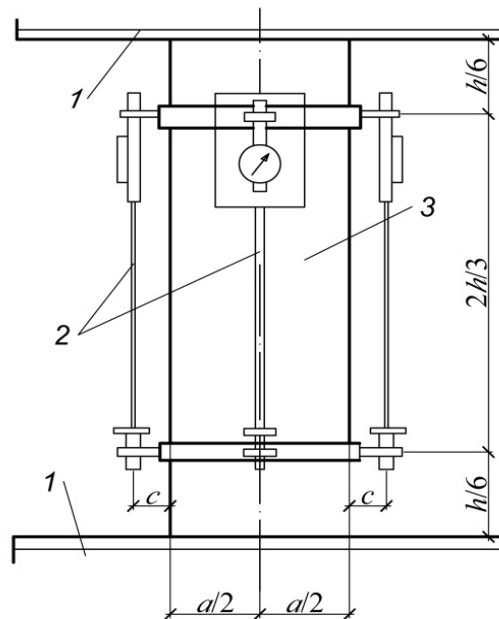
При расчете сжимаемых, изгибаемых и внецентренно растянутых бетонных и железобетонных элементов используют цилиндрическую прочность f_{ck} ,

которая представляет предел прочности осевому сжатию цилиндра размерами $10 \times 10 \times 20$ или $15 \times 15 \times 40$ см. Соотношение высоты цилиндра и его основания принято таким, чтобы исключить влияние на прочность гибкости цилиндра, а также трения между пластинами пресса и гранями цилиндра. Экспериментальное значение призмной прочности получим, разделив разрушающую нагрузку на площадь сечения цилиндра.

Призмную прочность, модуль упругости следует определять на образцах-призмах квадратного сечения. За базовый принимают образец размерами $15 \times 15 \times 60$ либо $10 \times 10 \times 40$ см. Размеры образцов выбираются в зависимости от наибольшей крупности заполнителя бетона.

Для измерения деформаций следует применять тензорезисторы, наклеиваемые на поверхность бетона, тензометры, обеспечивающие измерение относительных деформаций с точностью не ниже $1 \cdot 10^{-5}$, или индикаторы часового типа с ценой деления не выше 0,01 мм.

Тензометры и индикаторы для измерения деформации устанавливают на образце с помощью прижимных приспособлений (рамок, струбцин, опорных вставок) в соответствии с фиксируемой базой измерения деформаций (рисунок 2.1). Прижимные приспособления должны обеспечивать неизменное положение тензометров и индикаторов относительно образца в процессе измерения деформации.



1 – опорная плита пресса; 2 – индикаторные тензометры; 3 – бетонная призма

Рисунок 2.1 – Схема испытания при кратковременном осевом сжатии

Отклонение размеров и формы образцов от номинальных, неплоскостность их опорных поверхностей, прилегающих к плитам пресса, а также отклонение от перпендикулярности опорных и боковых поверхностей образцов не должны превышать предельно допустимых значений.

Не на всех заводах строительной индустрии можно изготовить и испытать образцы цилиндра. Поэтому в производственной практике призмную прочность определяют по эмпирической зависимости, используя результаты испытания стандартных кубов,

$$f_{ck,005} = f_{ck} = f_{cm} - t \cdot s, \quad (2.11)$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона на сжатие, МПа;

s – среднеквадратическое отклонение;

t – параметр распределения (статистика). При обеспеченности 0,95 $t = 1,64$.

Без испытания образцов на растяжение по результатам испытания кубов на сжатие можно вычислить среднюю прочность бетона на растяжение по формуле Р. Фэре

$$f_{ctm} = \alpha_r \sqrt[3]{f_{cm}^2}, \quad (2.12)$$

где f_{ctm}, f_{cm} – средняя прочность бетона на растяжение и на сжатие соответственно;

α_r – опытный коэффициент, $\alpha_r = 0,3$.

Модуль упругости бетона E_{cm} вычисляют по результатам испытания призм при уровне нагружения не более 0,3. В процессе нагружения измеряют продольные деформации бетона механическими приборами (индикаторами часового типа) или тензометрическим способом сразу же после приложения каждой ступени нагрузки и после выдержки под нагрузкой в течение 4...5 мин. Модуль упругости вычисляют по формуле

$$E_{cm} = \frac{\sigma_{cl}}{\varepsilon_{el}}, \quad (2.13)$$

где σ_{cl} – напряжение в сжатом бетоне при нагрузке, не превышающей 30 % от разрушающей, МПа;

ε_{el} – относительные упругие деформации бетона при нагрузке $F_1 = 0,3$,

$$\varepsilon_{el} = \varepsilon_l - \Sigma \varepsilon_{lpe}; \quad (2.14)$$

ε_l – полные относительные деформации бетона при нагрузке $F_1 = 0,3F_{раз}$;

$\Sigma \varepsilon_{lpe}$ – суммарные пластические деформации бетона до уровня $F_1 = 0,3F_{раз}$.

Модуль упругости можно принимать по нормам при известном классе бетона или вычислять по эмпирическим формулам. Профессор В. И. Мурешов предложил использовать в расчетах модуль упругопластичности (секущий модуль), который вычисляют по формуле

$$E'_{cm} = \nu E_{cm}. \quad (2.15)$$

Профессор Л. П. Макаренко предложил методику определения модуля

упругопластичности бетона при любых уровнях нагружения. Она заключается в том, что по результатам испытания призм на осевое сжатие по оси абсцисс откладывают уровень напряжения $\eta = \sigma_c / f_{ck}$, а по оси ординат – значение σ_c / ε_c , соответствующее каждому уровню. Соединив образованные точки, получают наклонную прямую, пересечение которой с линией $\eta = 0$ дает модуль упругости E_{cm} , а пересечение с линией $\eta = 1$ – модуль упругопластичности E'_{cm} . Исходя из формулы (2.15), отношение E'_{cm} / E_{cm} – это значение коэффициента упругости при кратковременном нагружении.

2.2 Проведение испытаний

Точность результатов испытаний в значительной степени зависит от качества экспериментальных образцов, состояния прессового оборудования, знания правил проведения испытаний. Перед испытанием все образцы маркируются, замеряются их размеры линейкой или рулеткой с точностью до 1 мм, значения записываются в таблицу 2.1. Шкалу силоизмерительной установки выбирают таким образом, чтобы разрушающая нагрузка составляла 25 %...75 % от максимальной нагрузки выбранной шкалы.

Таблица 2.1 – Определение прочностных характеристик бетона

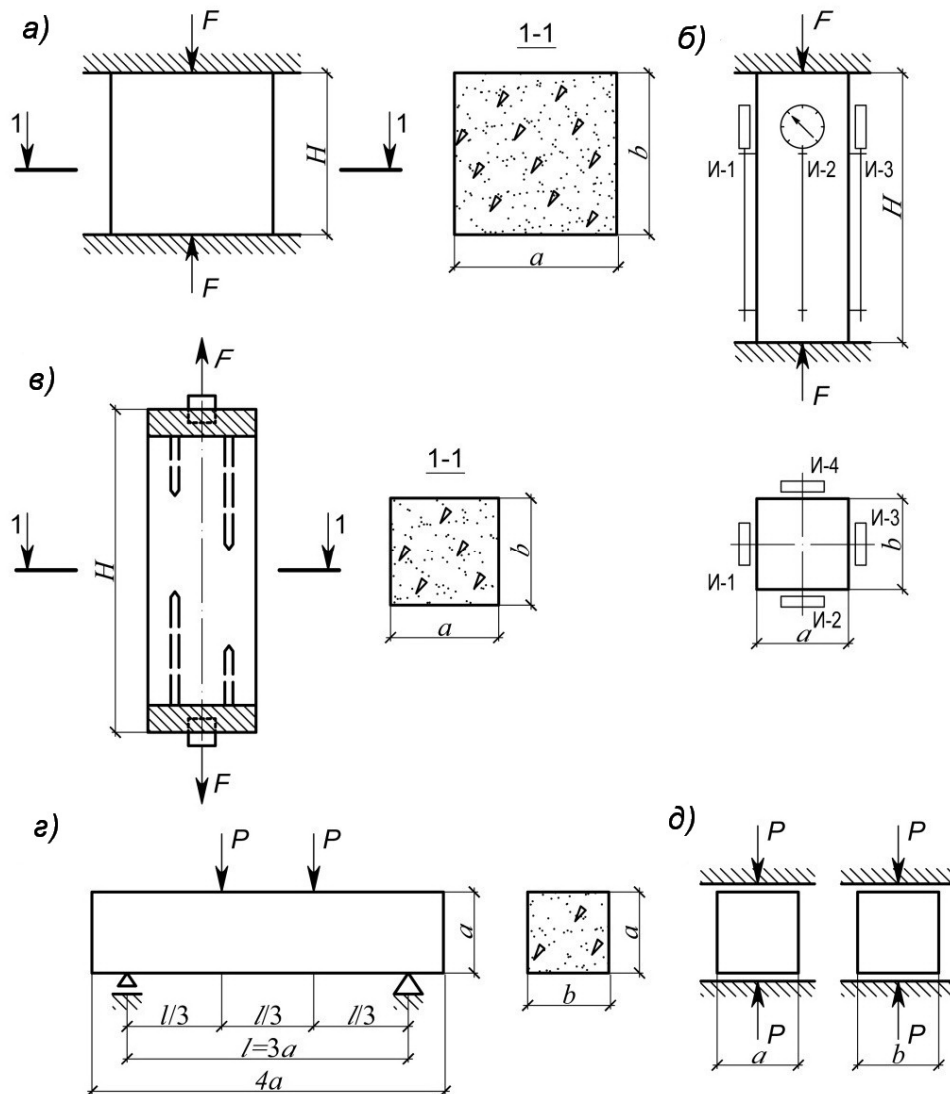
Характеристическое значение прочности	Маркировка образцов	Размер, см			A/W , см ⁻¹	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность, МПа	Средняя прочность, МПа	Теоретическая прочность, МПа	Отклонение, %	Примечание
		a	b	$H(l)$							
$F_{c,cube}$	К-1										
	К-2										
	К-3										
f_{ck}	ПБ-1										
	ПД-1										
	П-1										
$f_{ct,fl}$	ПБ-1										
$f_{ct,sp}$	КР-1										
	КР-2										
	КР-3										

После выбора шкалы на чистой плите пресса центрируется испытуемый образец при помощи диагональных линий, а затем устанавливается «нуль» шкалы пресса. При этом кубы должны размещаться так, чтобы сила действовала перпендикулярно слоям бетонирования.

Схемы испытания образцов при определении основных характеристик бетона представлены на рисунке 2.2.

Нагрузка на образцы подаётся так, чтобы напряжения в них возрастали

непрерывно с постоянной скоростью: при определении кубиковой и призмочной прочности скорость должна составлять $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с; при определении прочности бетона на растяжение – $(0,05 \pm 0,02)$ МПа/с [2].



а – при определении кубиковой прочности на сжатие $f_{c,cube}$; б – при определении призмочной прочности f_{ck} , модуля упругости E_{cm} ; в – при определении прочности на растяжение f_{ctm} ; г – при определении прочности на растяжение при изгибе $f_{ct,fl}$; д – при определении прочности на растяжение при раскалывании $f_{ct,sp}$

Рисунок 2.2 – Схемы испытаний образцов

Испытание призм на сжатие производят не только с целью определения призмочной прочности, но и деформативных свойств бетона. Перед испытанием образцы следует осмотреть, определить имеющиеся дефекты, отдельные выступы на гранях снять наждачным камнем, измерить линейные размеры, проверить отклонение формы и размеров [3].

При определении модуля упругости шкалу силоизмерителя испытательного пресса выбирают из условия, что ожидаемое значение разрушающей

нагрузки F_P должно быть от 70 % до 80 % от максимальной, допускаемой выбранной шкалой. Перед испытанием образец с приборами устанавливают центрально по разметке плиты пресса и проверяют совмещение начального отсчета с делением шкалы прибора.

Значение ожидаемой разрушающей нагрузки при испытании образцов устанавливают по данным о прочности бетона, принятой в технической документации, или по прочности на сжатие изготовленных из одного замеса образцов-кубов. Ее значение при одинаковых сечениях кубов и призм следует принимать от 70 % от средней разрушающей нагрузки образцов-кубов.

При центрировании образцов необходимо, чтобы в начале испытания от условного нуля до нагрузки, равной $(40 \pm 5) \% F_P$, отклонения деформаций по каждой грани (образующей) не превышали 15 % их среднего арифметического значения. При несоблюдении этого требования при нагрузке, равной или большей $(15 \pm 5) \% F_P$, следует разгрузить образец, сместить его относительно центральной оси разметки плиты пресса в сторону больших деформаций и вновь произвести его центрирование.

При определении призмной прочности, модуля упругости бетона нагружение образца до уровня нагрузки, равной $(40 \pm 5) \% F_P$, нужно производить ступенями, равными 10 % ожидаемой разрушающей нагрузки, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с [4].

На каждой ступени следует производить выдержку нагрузки от 4 до 5 и записывать отсчеты по приборам в начале и в конце выдержки ступени нагрузки в журнал (таблица 2.2).

2.3 Обработка результатов испытаний

Обработка результатов испытаний заключается в определении величины прочностных и деформативных характеристик бетона. По формуле (2.2) вычисляют среднюю кубиковую прочность. Используя формулы (2.4)–(2.6), вычисляют S_m , V_m , C . Разделив разрушающую нагрузку на площадь поперечного сечения образца при осевом растяжении, получают f_{ctm} , а по формулам (2.9) и (2.10) определяют $f_{ct,fl}$ и $f_{ct,sp}$. Все полученные значения заносят в таблицу 2.2.

В тех случаях, когда есть возможность сравнить экспериментальные и теоретические значения искомых величин, вычисляют относительные отклонения по формуле

$$\Delta\% = \frac{\mathcal{E} - T}{\mathcal{E}} \cdot 100, \quad (2.16)$$

где $\mathcal{E}$ – экспериментальное значение;

T – теоретическое значение.

Призменную прочность f_{ck} рассчитывают для каждого образца по формуле

$$f_{cki} = \frac{F_{sup}}{A_c}, \quad (2.17)$$

где F_{sup} – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале силоизмерителя прессы;
 A_c – среднее значение площади поперечного сечения образца, определяемое по его линейным размерам.

Модуль упругости E_c вычисляют для каждого образца при уровне нагрузки, составляющей 30 % от разрушающей, по формуле

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{0,3}}{\varepsilon_{0,3y}}, \quad (2.18)$$

где $\varepsilon_{0,3y}$ – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $F_1 = 0,3F_{sup}$ и замеренное в начале каждой ступени ее приложения;

$\sigma_{0,3}$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30 % от разрушающей,

$$\sigma_{0,3} = F_{0,3}/A_c; \quad (2.19)$$

$F_{0,3}$ – соответствующее приращение внешней нагрузки.

В пределах ступени нагружения деформации определяют по линейной интерполяции. Для описания полной диаграммы деформирования бетона в условиях осевого сжатия используется зависимость

$$\sigma_c = f_{ck} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad \text{при } 0 \leq |\varepsilon_{cl}| \leq |\varepsilon_{cu}|, \quad (2.20)$$

где f_{ck} – прочность на осевое сжатие (см. таблицу 2.1);

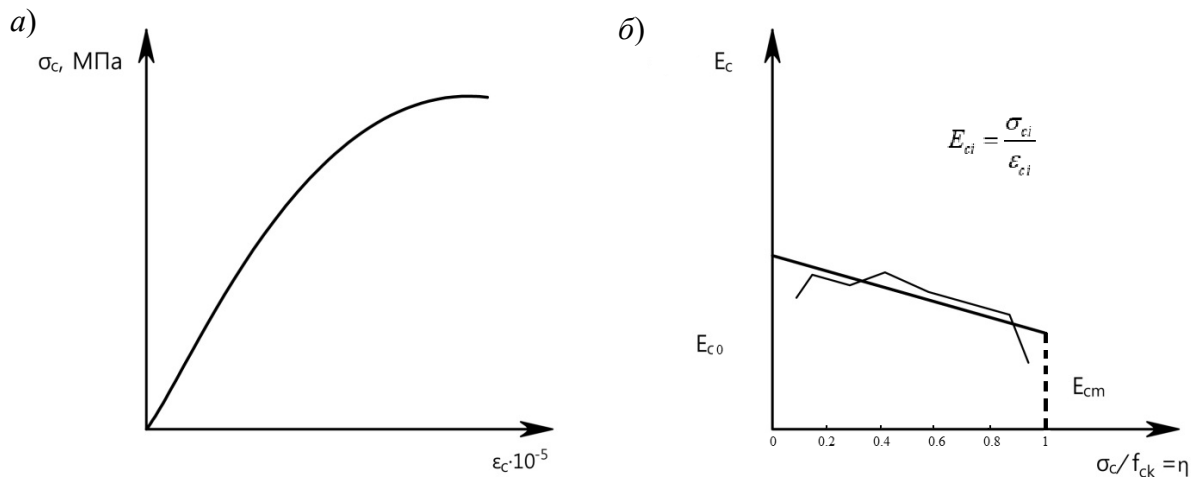
$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{cl}$ при $\varepsilon_{cl} < 0$;

ε_{cl} – относительная деформация, соответствующая пиковой точке диаграммы (разрушению образца);

$$k = \frac{1,1E_c \cdot |\varepsilon_{cl}|}{f_c}. \quad (2.21)$$

По результатам обработки строят графики (рисунок 2.3) зависимости $\sigma_c - \varepsilon_c$ и изменения секущего модуля деформаций от уровня напряжений $E_{cm} - \eta$. По графику $\sigma_c - \varepsilon_c$ находят E_{c0} (при $\eta = 0$) и E_{cm} (при $\eta = 1$), а по их значениям вы-

числяют коэффициент упругости $\nu = E_{cm}/E_c$.



a – графики зависимости $\sigma_c - \epsilon_c$; *b* – графики зависимости $E_c - \eta$

Рисунок 2.3 – Графики зависимостей $\nu = \frac{E_{cm}}{E_c}$

Последовательность выполнения работы

- 1 Измерить линейные размеры, установить возможные дефекты бетонных образцов.
- 2 Закрепить на боковых гранях бетонной призмы тензометры (индикаторы часового типа) и определить базу измерения деформаций.
- 3 Выполнить центрирование образцов в прессе.
- 4 Испытать образцы до разрушения.
- 5 Обработать данные измерений, вычислить величины прочностных и деформативных характеристик, построить диаграмму деформирования бетона.
- 6 Определить класс бетона.

Контрольные вопросы

- 1 Какие цели и задачи данной работы?
- 2 Что такое кубиковая прочность бетона и как она определяется?
- 3 Как учитывается масштабный фактор для кубиковой прочности?
- 4 Как определяется средняя кубиковая прочность?
- 5 Что такое математическое ожидание и стандарт? Как они вычисляются?
- 6 Что такое размах единичных значений прочности?
- 7 Как вычисляется коэффициент вариации (изменчивости)?
- 8 Что такое класс бетона по прочности на сжатие? Какая его доверительная вероятность?
- 9 Какая зависимость между классом бетона и средней кубиковой прочностью?
- 10 Как оценить качество бетона замеса или партии?

- 11 Как определяют прочность бетона на осевое растяжение?
- 12 На каких образцах определяют прочность бетона на растяжение при изгибе? Какая схема испытания?
- 13 На каких образцах определяют прочность бетона на растяжение при раскалывании? Как вычисляют данную прочность?
- 14 Какая связь между прочностью на растяжение и кубиковой прочностью?
- 15 Что такое призменная прочность бетона и как она определяется?
- 16 Какая зависимость между кубиковой и призменной прочностью?
- 17 Как определяют модуль упругости бетона?
- 18 Как экспериментально определить значение коэффициента упругости бетона?
- 19 Какие основные правила испытания контрольных образцов?
- 20 Опишите приборы для испытания призм. Что такое база прибора?
- 21 Как вычисляют относительные отклонения экспериментальных и теоретических величин?
- 22 Как определить абсолютную и относительную деформации бетона?

3 Лабораторная работа № 2. Испытание железобетонной балки с разрушением по сечению, нормальному к продольной оси

Цель работы: изучить характер напряженно-деформированного состояния балки на всех стадиях работы, включая стадию разрушения по сечению, нормальному к продольной оси элемента, и степени соответствия расчетных формул результатам опыта.

Задачи

- 1 Ознакомиться со схемой образования и развития трещин, а также определить теоретический момент появления первых трещин и сравнить его с полученным из опыта.
- 2 Ознакомиться с характером прогибов балки под нагрузкой и определить расчетные прогибы (перемещения) балки в середине пролета l_1 , сравнив их с экспериментальными данными.
- 3 Ознакомиться с характером разрушения балки по нормальному сечению и определить теоретический разрушающий момент, сравнить его с опытным моментом.

3.1 Подготовка образцов к испытанию и проведение испытаний

Железобетонную балку прямоугольного сечения помещают на две опоры, одна из которых шарнирно подвижна, а вторая шарнирно неподвижна, и загружают двумя сосредоточенными силами, чтобы образовалась зона чистого изгиба. Схема армирования балки, расстановка приборов, расчетная схема и эпюра усилий приведены на рисунке 3.1.

Рисунок 3.1 – Испытание балки по нормальному сечению

Балку загружают ступенями, величина которых должна быть не более 0,1 от предполагаемой разрушающей нагрузки, установленной по пробным испытаниям. После каждой ступени загрузки делают выдержку под нагрузкой в течение 4...5 мин и записывают показания приборов, установленных на балке. Для измерения деформаций арматуры используют тензометр Гугенбергера Т-1 с базой 20 мм и ценой деления 0,001 мм. Если напряжения (деформации) в растянутой арматуре не измеряются, в качестве опытного разрушающего момента принимают тот, которому соответствует максимальная нагрузка. Деформацию бетона замеряют индикаторами часового типа И-1 с базой 200 мм и ценой деления 0,001 мм, а прогибы балки и осадку опор – прогибомерами П-1, П-2 и П-3 или индикатором часового типа с ценой деления 0,1 мм. Результаты измерения записывают в таблицу 3.1.

Конструкция балки запроектирована таким образом, что в сечении, нормальном к продольной оси элемента, в предельной стадии по прочности (третья стадия напряженно-деформированного состояния) предполагается разрушение, характерное либо для первого (достижение предела текучести стали), либо для второго случая (раздробление бетона сжатой зоны до достижения предела текучести стали, т. е. арматуры растянутой зоны).

Таблица 3.1 – Вedomость испытаний балки по прочности нормальных сечений

[illegible]

До нагружения конструкции необходимо определить требуемые характеристики прочности, жесткости и трещиностойкости балки путем расчета соответствующих усилий (изгибающих моментов и сосредоточенных сил принятой схемы нагружения), используя фактические данные о механических характеристиках материалов, полученных в лабораторных работах № 1 и 2.

3.2 Обработка результатов испытаний

Расчетный разрушающий момент M_{u1} определяют (согласно методике в СП 5.03.01–20) по фактическим характеристикам материалов:

$$M_{u1} = f_{yk} A_s (d - 0,5x_1), \quad (3.1)$$

где f_{yk} – предел текучести арматуры (см. лабораторную работу № 1);

A_s – площадь продольной рабочей арматуры балки;

d – рабочая высота сечения балки;

x_1 – высота сжатой зоны бетона в сечении балки,

$$x_1 = f_{yk} A_s / f_{ck} b_1; \quad (3.2)$$

f_{ck} – средняя прочность на сжатие призмы (см. лабораторную работу № 1, таблицу 2.1);

b_1 – ширина сечения балки.

Значение опытного разрушающего изгибающего момента M_u можно найти по формуле

$$M_u = 0,5F_u l_1, \quad (3.3)$$

где F_u – сила, при которой разрушилась балка;

l_1 – расстояние от линии действия силы до опоры (см. рисунок 3.1).

Опытное значение изгибающего момента M_{cr} , соответствующего образованию трещин, ориентировочно принимают при $M_{cr} = 0,6M_u$.

Расчетное значение изгибающего момента M_{cr1} , соответствующего образованию трещин в бетоне растянутой зоне балки, определяют по формуле

$$M_{cr1} = f_{ctk} W_c, \quad (3.4)$$

где f_{ctk} – прочность бетона в балке на растяжение [5];

W_c – упругопластический момент сопротивления сечения прямоугольной формы,

$$W_c = 1,75bh^2/6. \quad (3.5)$$

Прогиб балки в середине пролета вычисляют по формуле

$$a = \Delta_2 - (\Delta_1 + \Delta_3)0,5, \quad (3.6)$$

где Δ_2 – перемещение, измеренное прогибомером П-1;

Δ_1, Δ_3 – перемещения (осадки опор), измеренные прогибомерами П-1 и П-3.

Расчетный прогиб балки для стадии работы до образования трещин в бетоне растянутой зоны ($M < M_{crc}$, первая стадия напряженно-деформированного состояния) определяется по формуле

$$a_1 = \left(\frac{a}{48} \right) \frac{ML_0^2}{B_0}, \quad (3.7)$$

где B_0 – изгибаемая жесткость элемента при кратковременных нагрузках,

$$B_0 = E_c I_1. \quad (3.8)$$

Момент инерции площади приведенного поперечного сечения

$$I_1 = bh^3/12 + bh(x_1 - 0,5h)^2 + a_e A_{s2}(x_1 - c_1)^2 + a_e A_{s1}(d - x_1)^2. \quad (3.9)$$

Расстояние от верхней грани до центра тяжести приведенного сечения

$$x_1 = \frac{0,5bh^2 + a_e(A_{s1}d + A_{s2}c_1)}{bh + a_e(A_{s1} + A_{s2})}. \quad (3.10)$$

Коэффициент приведения площади сечения

$$a_e = E_s / E_c. \quad (3.11)$$

Разрушение балки и образование нормальных трещин представлены на рисунке 3.2.

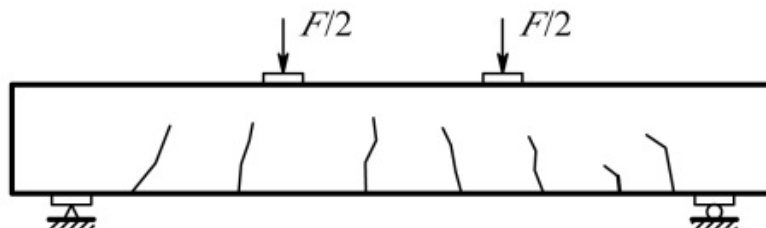


Рисунок 3.2 – Схема образования трещин и разрушения образцов

Опытные и теоретические результаты работы оформляются в табличной форме (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Опытные и теоретические результаты работы

Разрушающий изгибающий момент, кН·м			Изгибающий момент, соответствующий образованию трещин, кН·м			Прогиб балки, мм			Ширина раскрытия трещин	
Опыт- ный M_u	Рас- чёт- ный M_{u1}	$(M_u - M_{u1}) \times 100/M_u$	Опыт- ный M_{cr}	Рас- чёт- ный M_{cr1}	$(M_{cr} - M_{cr1}) \times 100/M_{cr}$	Опыт- ный α	Рас- чёт- ный α_1	$(\alpha - \alpha_1) \times 100/\alpha$	Опыт- ная W_k	Расчёт- ная W_{k1}

Для более глубокого понимания работы балки под нагрузкой строят график зависимостей относительных деформаций арматуры и бетона, а также прогибов от нагрузки. С этой целью вычисляют прогибы, абсолютные и относительные деформации по показаниям приборов для каждой ступени, а результаты вычислений заносят в таблицу 3.1. Абсолютные и относительные деформации вычисляют, как в лабораторной работе № 2. Напряжения в арматуре получают, умножая относительные деформации арматуры ϵ_s на модуль упругости E_s .

Последовательность выполнения работы

- 1 Измерить и изобразить на чертеже геометрические параметры конструкции балки.
- 2 Изобразить схему испытания балки с описанием испытываемого оборудования и средств измерений.
- 3 Определить расчетные значения: прогиба α_1 балки; изгибающего момента образования трещин M_{cr1} ; разрушающего изгибающего момента M_{u1} .

Контрольные вопросы

- 1 Какие цели и задачи данной работы?
- 2 Опишите расчетную схему балки, принятую при проведении испытаний.
- 3 Какой изгиб называется чистым и поперечным?
- 4 Как вычислить усилия в изгибаемом элементе?
- 5 Как армирована опытная балка?
- 6 Какие приборы используют при проведении испытаний? Их назначение.
- 7 Укажите порядок загрузки балки и снятия отсчетов по приборам.
- 8 Как определяют предел текучести продольной рабочей арматуры балки?
- 9 Как определяют прочностные характеристики бетона?
- 10 Как определяются расчетные характеристики арматуры и бетона?
- 11 Как определяется опытный разрушающий момент?
- 12 По каким критериям оценивают соответствие расчетных формул действительной работе изгибаемого элемента?
- 13 Как вычисляют теоретический прогиб балки?

14 Как определяют предельно допустимые прогиб и ширину раскрытия трещин?

15 Когда партия балок признается пригодной по жесткости и трещиностойкости?

4 Лабораторная работа № 3. Исследование работы железобетонной балки при разрушении по наклонному сечению

Цель работы: изучить характер напряженно-деформированного состояния балки на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения по сечению, наклонному к продольной оси элемента, и степени соответствия расчетных формул результатам опыта.

Задачи

- 1 Ознакомиться с характером разрушения изгибаемых элементов по сечениям, наклонным к продольной оси.
- 2 Установить величину опытного прогиба.
- 3 Определить расчетные значения ширины раскрытия трещин и разрушающей нагрузки, выполнить их сравнение с опытными значениями.

4.1 Подготовка образцов к испытанию и проведение испытаний

Конструкция и схема нагружения балки подбираются таким образом, чтобы получить разрушение образца по наклонной трещине в результате достижения предела текучести поперечной арматуры либо раздробление бетона над вершиной наклонной трещины. Для этого увеличена площадь сечения продольной арматуры, уменьшен диаметр поперечных стержней, сосредоточенные силы F сдвинуты ближе к опорам.

Чтобы проследить поведение балки под нагрузкой, используются приборы: для измерения деформаций продольной и поперечной арматуры – тензометры Гугенбергера Т-1 и Т-2 с базой 20 мм и ценой деления 1 мк; для измерения деформации сжатого бетона – индикатор часового типа И-1 с базой 200 мм и ценой деления 0,001 мм; для измерения деформации растянутого бетона в месте возможного появления наклонной трещины – индикатор часового типа И-2 с базой 150 мм и ценой деления 0,001 мм; для определения прогибов – прогибомер П-1 с ценой деления шкалы 0,01 мм. Схема испытания балки и размещения на ней приборов показана на рисунке 4.1.

Перед испытанием замеряют и заносят в журнал пролет балки l_0 , высоту и ширину сечения балки h и b . После испытания, удалив участок бетона, замеряют защитный слой бетона, рабочую высоту сечения h_0 , устанавливают класс и диаметр d_b . Результаты замеров заносят в таблицу 4.1.

До нагружения конструкции необходимо определить контрольные характеристики прочности и трещиностойкости путем расчета соответствующих

усилий (поперечных сил принятой схемы нагружения), используя фактические данные о механических свойствах материалов и геометрических параметрах балки. На основании теоретических расчетов следует определить размеры ступеней и число этапов нагружения.

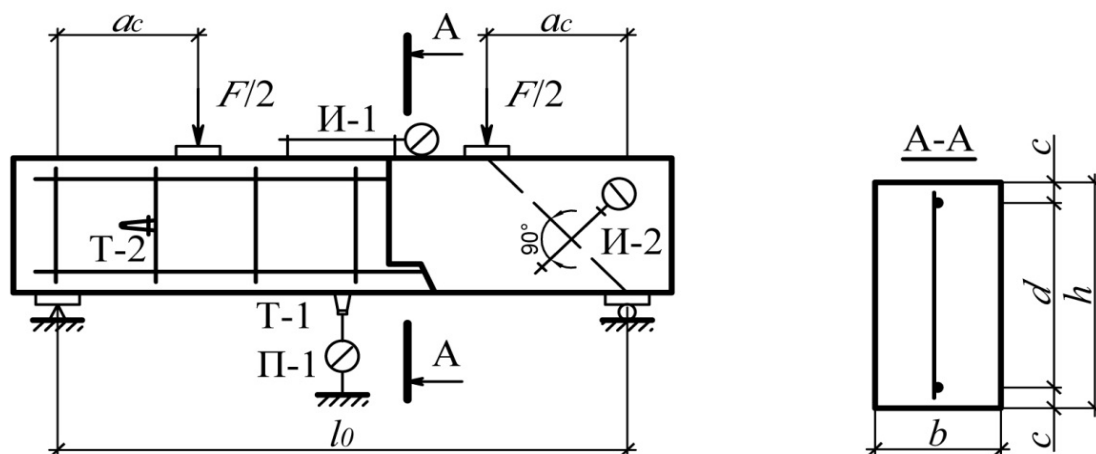


Рисунок 4.1 – Армирование балки. Схема нагружения и расстановки приборов

Нагружение балки осуществляют ступенями, величину которых назначают так же, как в лабораторной работе № 2.

4.2 Обработка результатов испытаний

Прочностные характеристики поперечной арматуры получают в результате испытания двух контрольных стержней на растяжение, а прочностные характеристики бетона принимают по данным лабораторной работы № 1, если классы бетонов совпадают, или получают путем испытания кубов на сжатие.

При принятой расчетной схеме балки величина воспринимаемой силы будет равна разрушающей поперечной силе в балке: $F = C_{c2}$.

Расчетное сопротивление поперечной арматуры f_{ywd} принимают по нормам в зависимости от класса поперечной арматуры в испытываемой балке [5]. Расчетную поперечную силу V_{Rd} (рисунок 4.2), соответствующую исчерпанию прочности балки, вычисляют по формуле

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{sw}, \quad (4.1)$$

где V_{cd} – поперечное усилие, воспринимаемое бетоном над вершиной наклонной трещины;

V_{sw} – сумма проекций на нормаль к продольной оси элемента предельных усилий в поперечных стержнях (хомутах), пересекающих опасную наклонную трещину (см. рисунок 4.2).

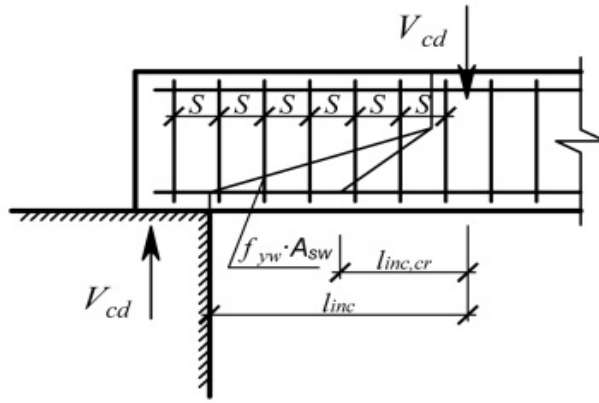


Рисунок 4.2 – Схема усилий в сечении, наклонном к продольной оси железобетонного элемента, при расчете его на прочность на действие поперечной силы

Поперечное усилие V_{cd} , воспринимаемое бетоном, определяется по формуле

$$V_{cd} = \frac{2f_{ctd}b_w d^2}{l_{inc}}, \quad (4.2)$$

где f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона растяжению, определяется согласно [5] или по формуле Фэре (см. лабораторную работу № 1, формулу (2.12));

b_w – ширина сечения балки;

d – рабочая высота сечения;

l_{inc} – длина проекции наиболее опасного сечения на продольную ось элемента.

Длина проекции наклонной трещины для элементов с поперечной арматурой в виде хомутов, нормальных к продольной оси элемента и имеющих постоянный шаг в пределах наклонного сечения,

$$l_{inc,cr} = \sqrt{\frac{2f_{ct}b_w d^2}{v_{sw}}}, \quad (4.3)$$

где v_{sw} – усилие на единицу длины элемента,

$$v_{sw} = \frac{f_{ywd}A_{sw}}{s}; \quad (4.4)$$

s – шаг поперечной арматуры (хомутов).

Поперечное усилие в поперечных стержнях (хомутах), пересекающих наклонную трещину,

$$V_{sw} = v_{sw} l_{inc,cr}. \quad (4.5)$$

Расчетная ширина раскрытия наклонных трещин определяется по формуле

$$W_k = S_{m,\theta} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}), \quad (4.6)$$

где $S_{m,\theta}$ – среднее расстояние между трещинами;

ε_{sm} , ε_{cm} – средние относительные деформации арматуры и бетона.

Среднее расстояние между наклонными трещинами $S_{m,\theta}$ можно найти по формуле

$$S_{m,\theta} = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{S_{m,x}} + \frac{\cos \theta}{S_{m,y}}}, \quad (4.7)$$

где $S_{m,x}$ – средний шаг трещин в направлении, параллельном продольной оси;

$S_{m,y}$ – средний шаг трещин в направлении, перпендикулярном к продольной оси элемента;

θ – угол между продольной осью элемента и направлением главных сжимающих напряжений. Значение θ принимается из расчета прочности наклонных сечений (допускается принимать $\theta = 45^\circ$).

Среднее расстояние $S_{m,x}$ и $S_{m,y}$

$$S_{m,x} = 2 \left(C_x + \frac{S_x}{10} \right) + 0,25 K_1 \frac{\varnothing_x}{\rho_{l,x}}; \quad (4.8)$$

$$S_{m,y} = 2 \left(C_y + \frac{S_y}{10} \right) + 0,25 K_1 \frac{\varnothing_{sw}}{\rho_{sw}}, \quad (4.9)$$

где $\varnothing_x$, $\varnothing_{sw}$ – диаметр продольных и поперечных стержней соответственно;

C_x , C_y – расстояние до центра продольной и поперечной арматуры от центра тяжести;

K_1 – коэффициент, учитывающий сцепление арматуры с бетоном. Для стержней периодического профиля – $K_1 = 0,4$; для гладких – $K_1 = 1,6$.

Среднее значение относительных деформаций растяжения для железобетонного элемента с диагональными трещинами ε_{sm} определяют из расчета с использованием общей деформационной модели при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил. Опытные и теоретические результаты работы оформляют в табличной форме (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Опытные и теоретические результаты работы

Ширина раскрытия наклонных трещин, мм			Разрушающая поперечная сила, кН		
Опытная W_{k2}	Расчетная W_{k1}	$\left(\frac{W_{k2} - W_{k1}}{W_{k2}} \right) \cdot 100 \%$	Опытная V_{c2}	Расчетная V_{c1}	$\left(\frac{V_{c2} - V_{c1}}{V_{c2}} \right) 100 \%$

Последовательность выполнения работы

- 1 Измерить и изобразить на чертеже геометрические параметры и армирование балки.
- 2 Изобразить схему испытания балки с описанием испытательного оборудования и средств измерения.
- 3 Определить расчетное значение разрушающей поперечной силы V_{c1} и ширины W_{k1} раскрытия наклонной трещины по формулам (4.1)–(4.7).
- 4 Назначить размер ступени нагружения и провести испытания балки, регистрируя результаты измерения в журнале (см. таблицу 4.1).
- 5 Описать развитие трещин и характер разрушения (см. рисунок 4.2).
- 6 Провести сравнение опытных и теоретических результатов, оформить в табличной форме (см. таблицу 4.2).

Контрольные вопросы

- 1 Какие цели и задачи лабораторной работы?
- 2 Как армирована балка?
- 3 Каковы схема испытания балки и порядок загрузки опытной нагрузкой?
- 4 Какие измерительные приборы применяют при проведении работы и их характеристики?
- 5 Расположение измерительных приборов на балке и назначение каждого из них.
- 6 Какие усилия приводят к разрушению балки по наклонному сечению?
- 7 Возможные случаи разрушения балки по наклонному сечению.
- 8 Какую нагрузку принимают за нормативную?
- 9 На каких образцах определяют прочностные характеристики материалов?
- 10 Расскажите о факторе, характеризующем соответствие расчетных формул действительной работе балки под нагрузкой.
- 11 Как рассчитывается теоретическая ширина раскрытия трещин?

5 Лабораторная работа № 4. Исследование работы внецентренно сжатой колонны

Цель работы: изучить характер напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого железобетонного элемента на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения.

Задачи

- 1 Ознакомиться с характером разрушения сжатых элементов.
- 2 Определить деформации растянутой и сжатой граней бетона.
- 3 Изучить характер развития трещин.
- 4 Вычислить теоретическую нагрузку и сравнить её с опытной.

5.1 Подготовка образцов к испытанию и проведение испытаний

Программой работы предусматривается проведение испытания колонны прямоугольного сечения, опирающейся на две шарнирные опоры, находящиеся на расстоянии e_0 от оси колонны.

Нагружение конструкций осуществляется гидравлическим прессом. Нагрузка передается через оголовки, установленные по торцам колонны. Нагрузка F контролируется по показаниям силоизмерителя прессы.

Механические характеристики бетона колонны принимаются по результатам, полученным при испытаниях образцов в лабораторной работе № 1; механические характеристики арматуры колонны – по результатам испытания арматурных стержней.

Геометрические параметры поперечного сечения и армирования (рисунок 5.1), длина колонны и положение точек приложения сил испытательной нагрузки измеряются линейкой, рулеткой и штангенциркулем.

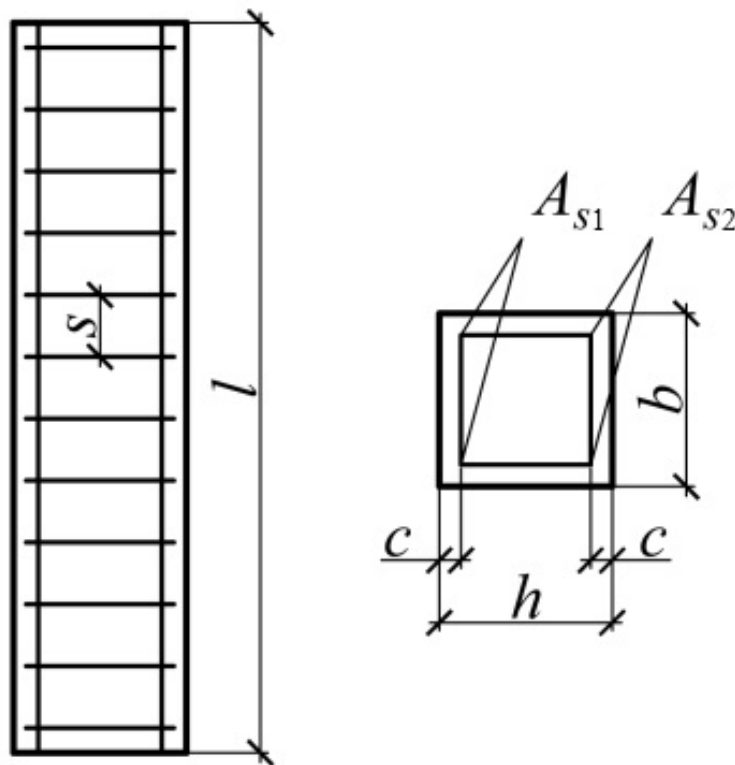


Рисунок 5.1 – Геометрические размеры и армирование колонны

До нагружения конструкции необходимо определить контрольные характеристики прочности путем расчета соответствующих усилий (сосредоточенных сил принятой схемы нагружения), используя фактически данные о механических характеристиках материалов и геометрических параметрах колонны. На основании теоретических расчетов следует определить размеры ступеней и число этапов нагружения (аналогично лабораторной работе № 2).

Конструкция колонны и приложение нагрузки запроектированы таким об-

разом, чтобы получить разрушение при раздроблении бетона сжатой зоны до достижения предела текучести арматуры растянутой зоны.

Деформации в растянутой и сжатой зонах бетона измеряются при помощи тензометров или индикаторов часового типа, установленных на растянутой и сжатой гранях колонны согласно схеме, представленной на рисунке 5.2. Результаты измерения записывают в таблицу 5.1. По результатам этих измерений строятся графики деформирования бетона сжатой и растянутой зон.

За опытную разрушающую продольную силу N принимается максимальная нагрузка гидравлического силового оборудования.

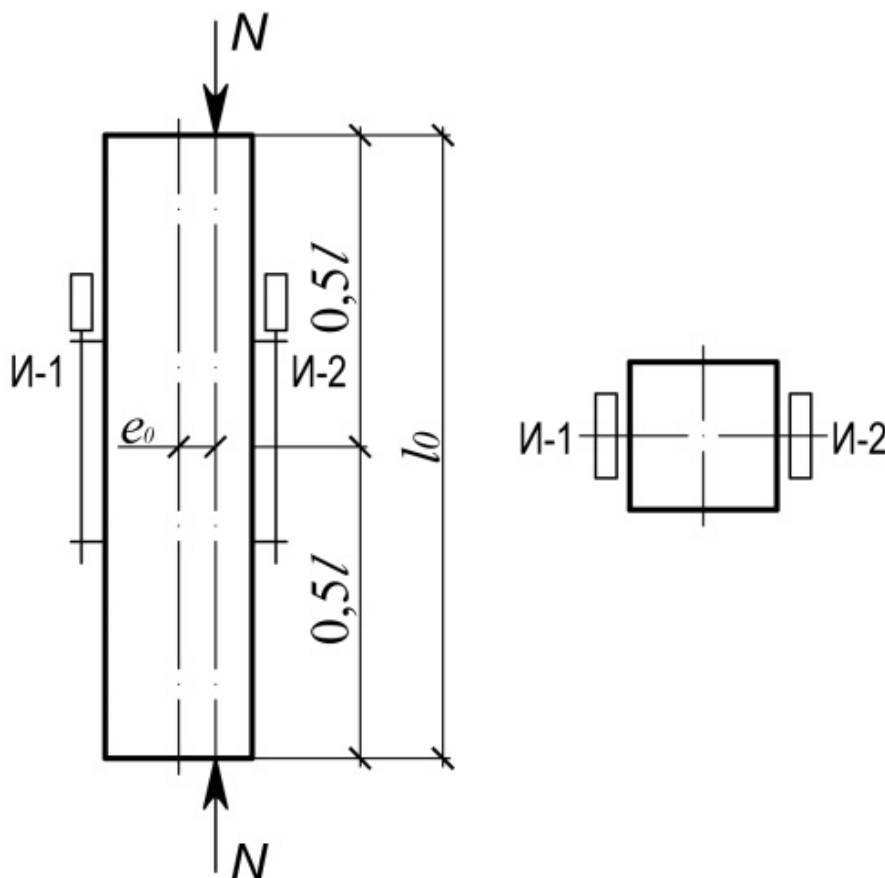


Рисунок 5.2 – Схема загрузки колонны и размещения приборов

5.2 Обработка результатов испытаний

В таблице 5.1 приведены показания приборов.

Расчетное значение разрушающей продольной силы N_{u1} вычисляется по формуле

$$N_{u1} = f_{ck}bx_1 + f_{yk}^1 A_s^1 - f_{yk} A_s, \quad (5.1)$$

где f_{yk}^1, f_{yk} – нормативные значения прочности арматуры, полученные при испытании образцов;

A_s^1, A_s – площадь арматуры, установленной в сжатой и растянутой гранях

образца колонны;

b – ширина образца колонны;

x_1 – высота сжатой зоны бетона.

$$x_1 = (d - e) + \sqrt{(d - e)^2 + \frac{2(f_{yk} A_s e \pm f_{yk}^1 A_s^1 e^1)}{f_{ck} b}}, \quad (5.2)$$

где $e = e_0 + e_a + 0,5d - c$;

$e^1 = e_0 + e_a + 0,5d - c^1$.

e_a – случайный эксцентриситет [5].

Таблица 5.1 – Показания приборов

Номер этапа	Показа- ние мано- метра	Про- дольная сила N	Изгибаю- щий мо- мент в зоне чистого изгиба	Индикатор И-1 Заводской № _____ Цена деления _____ База _____			Индикатор И-2 Заводской № _____ Цена деления _____ База _____		
				Отсчеты	Разность отсчетов	Дефор- мации	Отсчеты	Разность отсчетов	Дефор- мации
0									
1									
2									
3									
...									

В формуле знак «–» при $e > d - a^1$.

Сравнение опытной (фактической) разрушающей продольной силы N_u с вычисленной (теоретической) N_{u1} выполняется так же, как и в предыдущих лабораторных работах. В ходе выполнения следует использовать фактические механические характеристики материалов железобетонных колонн, полученные в лабораторных работах № 1 и 4.

Опытные и теоретические результаты работы оформляются в табличной форме (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Опытные и теоретические результаты

Разрушающая продольная сила, кН		
Опыт N_{u1}	Расчет N_{u1}	$\frac{N_u - N_{u1}}{N_u} 100 \%$

Качественные характеристики трещинообразования и разрушения колонны должны быть представлены в графическом исполнении (рисунок 5.3).

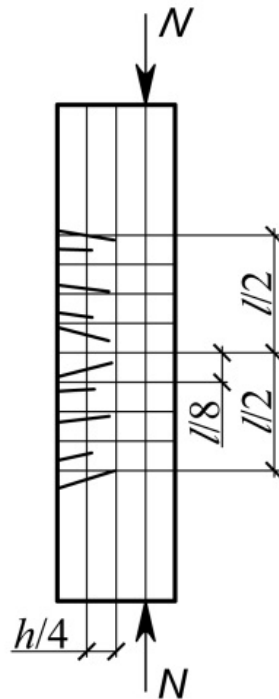


Рисунок 5.3 – Схема разрушения конструкции

Последовательность выполнения работы

- 1 Измерить и изобразить на чертеже геометрические параметры и армирование колонны (см. рисунок 5.1).
- 2 Изобразить схему испытания колонны с описанием испытательного оборудования и средств измерения (см. рисунок 5.2).
- 3 Определить расчетное значение разрушающей продольной силы.
- 4 Построить графики зависимости относительных деформаций в бетоне сжатой и растянутой зон от величины нагрузки F .
- 5 Назначить размер ступени нагружения и провести испытание колонны, регистрируя результаты измерения в журнале (см. таблицу 5.1).
- 6 Описать развитие трещин и характер разрушения (см. рисунок 5.3).
- 7 Провести сравнение опытных и теоретических результатов, оформить в табличной форме (см. таблицу 5.2).

Контрольные вопросы

- 1 Какие цели и задачи настоящей работы?
- 2 Какие элементы называются внецентренно сжатыми?
- 3 Какими усилиями вызывается внецентренное сжатие?
- 4 Чем вызвано появление случайных эксцентриситетов e_a в железобетонных сжимаемых элементах?
- 5 Какое значение случайных эксцентриситетов принимают при расчёте сжатых элементов?
- 6 Какие возможны случаи разрушения внецентренно сжатых элементов?

- 7 Как работают арматура и бетон при различных случаях разрушения?
- 8 Как учитывается влияние прогиба на увеличение эксцентриситета продольной силы?
- 9 Опишите характер разрушения опытного образца колонны.

Список литературы

- 1 Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 12004–81. – Взамен ГОСТ 12004–66; введ. 01.07.2003 – М. : Госстандарт, 1983. – 18 с.
- 2 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. – Взамен ГОСТ 10180–90; введ. 01.02.2016. – М. : Стандартинформ, 2018. – 36 с.
- 3 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона: ГОСТ 24452–80. – М.: Гос. строит. ком., 1985. – 16 с.
- 4 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности: ГОСТ 18105–2018. – Взамен ГОСТ 18105–2010; введ. 01.03.2020. – М.: Стандартиформ, 2019. – 22 с.
- 5 Бетонные и железобетонные конструкции: СП 5.03.01–2020. – С отменой СНиП 2.03.01–84 и СНБ 5.03.01–02; введ. 16.09.2020. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 245 с.