

Бондарь Вадим Викторович, магистр техн. наук,
ассистент кафедры «Железобетонные и каменные
конструкции», УО «Белорусский национальный
технический университет», г. Минск

Рак Николай Александрович, канд. техн. наук,
доцент, профессор кафедры «Железобетонные и каменные
конструкции», УО «Белорусский национальный
технический университет», г. Минск

КОНТАКТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКОГО БЕТОНА, АРМИРОВАННЫХ ПОПЕРЕЧНЫМИ СЕТКАМИ, ПРИ КОНЦЕНТРИЧНОМ МЕСТНОМ СЖАТИИ

CONTACT DEFORMATIONS OF REINFORCED LIGHTWEIGHT CONCRETE ELEMENTS IN LOCAL COMPRESSION STATE

Аннотация

Приведены основные результаты экспериментальных исследований контактных деформаций при местном сжатии элементов из легкого бетона, армированных поперечными сетками. Выполнен анализ полученных результатов экспериментальных исследований.

Abstract

Basic results of the experimental investigation of contact deformation of partially loaded lightweight concrete elements, reinforced with lateral grids, are presented. Analysis of the obtained experimental results is made.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1960-х годов прошлого века в странах бывшего СССР, ближнего зарубежья проводились испытания на одно- и многоосное сжатие элементов с круглым, многоугольным, прямоугольным сечением из тяжелого бетона и с применением косвенного армирования в виде сварных сеток, колец, спиралей. Кроме того, ставились также и эксперименты для исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов с применением косвенного армирования при местном сжатии.

Результаты этих исследований показали повышение сопротивления сжатию бетона образца или конструкции, изготовленных с применением косвенного армирования. При этом повышение

сопротивления бетона сжатию происходит в пределах ядра, заключенного внутри сварной сетки (спирали). Сетки, кольца, спирали, подобно обойме, сдерживают поперечные деформации бетона, возникающие при продольном осевом сжатии, и тем самым обуславливают повышенное сопротивление бетона продольному сжатию, в том числе и после появления в нем продольных трещин.

Развитие существующих деформационных методов расчета бетонных и железобетонных конструкций при многоосном напряженно-деформированном состоянии, в том числе при местном сжатии, является чрезвычайно важным направлением развития теории бетона и железобетона.

Однако анализ результатов исследований бетона при местном сжатии показал, что в большинстве исследований изучалась только прочность бетона [11]. Внимание деформациям бетона при местном сжатии было уделено лишь в отдельных исследованиях. При этом эти исследования можно условно разделить на две группы.

В исследованиях, относящихся к первой группе, изучались относительные деформации бетона в области действия сжимающих напряжений в местах расположения несовершенных шарниров [1, 6]. Анализ продольных и поперечных деформаций бетона показал, что бетон в шарнире работает в условиях всестороннего сжатия. На основании исследований разработаны зависимости для расчета прочности и деформаций бетона в области шарнира.

В исследованиях [2, 3, 7–10], относящихся ко второй группе, изучались так называемые контактные деформации, под которыми принято понимать перемещения жесткого штампа относительно некоторой условной плоскости, расположенной на удалении от плоскости контакта, равном глубине активной зоны деформаций.

Из исследований контактных деформаций при концентричном кратковременном местном сжатии различных железобетонных элементов и конструкций следует, что общая контактная деформация состоит из двух составляющих: контактной деформации погружения и контактной деформации искривления поверхности образца. Доля указанных составляющих зависит от способа опирания штампа, размеров штампа и его расположения на поверхности образца.

Необходимо отметить, что приведенный краткий обзор исследований контактных деформаций при местном сжатии относится к элементам из тяжелого бетона плотностью от 2400 кг/м^3 и выше. Исследований контактных деформаций для элементов из легкого бетона плотностью от 1200 до 1900 кг/м^3 , в том числе и с применением косвенного армирования, до настоящего времени не проводилось.

С учетом вышесказанного на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» БНТУ была поставлена задача по исследованию контактных деформаций элементов из легкого бетона при концентричном местном сжатии с последующей разработкой расчетной модели для прогнозирования величин этих деформаций.

Основные результаты выполненных в рамках решения поставленной задачи для неармированных элементов из легкого бетона приведены в работе [5]. Данная статья является логическим продолжением исследований [5] и посвящена изложению основных результатов исследований контактных деформаций армированных поперечными сварными сетками элементов из легкого бетона с плотностью от 1000 до 2000 кг/м³ в условиях концентричного местного сжатия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на призмах из керамзитобетона одного типоразмера 300 × 300 × 600 мм, трех различных средних плотностей 1189–1230, 1607–1668 и 1737–1776 кг/м³, армированные поперечными сетками С-1 или С-2 (объемный процент армирования $\rho_{ху}$ соответственно равен 1,88 и 3,35 %) параллельно с исследованиями прочности при местном концентричном сжатии, основные результаты которых представлены в статье [4]. Сведения об опытных армированных образцах-призмах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные сведения об армированных опытных образцах при исследовании контактных деформаций при местном сжатии

Марка образца	Процент армирования μ , %	Размеры образцов, мм	ρ , кг/м ³	Размер грани штампа, мм	Кол-лич., шт.
1. ПЗ00Ар1-18	1,88	300 × 300 × 600	1740	30, 60, 90, 120	12
2. ПЗ00Ар2-18	3,35		1607–1668	30, 60, 90, 120	12
3. ПЗ00Ар2-13	3,35		1189–1230	30, 60, 90, 120	12

Образцы изготавливались в деревянной опалубке в заводских условиях на ОАО «Минскжелезобетон» из бетонной смеси, состав которой был предварительно подобран отделом технологии бетона и растворов РУП «Институт БелНИИС». В качестве легкого заполнителя использовался керамзитовый гравий фракции 4/10 производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок. Изготовление образцов производилось посерийно из замесов легкого бетона одинакового состава. Для контроля физико-механических характеристик бетона были изготовлены контрольные образцы кубы (по три на каждый замес) размером 100 x 100 x 100 мм.

Испытания опытных образцов производились в лаборатории кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» БНТУ на прессе мощностью 5000 кН при рабочем диапазоне до 2000 кН. Нагрузка на образцы прикладывалась через штампы, размеры которых приведены в таблице 1.

При испытании с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм измерялись перемещения штампа относительно нагружаемой поверхности, а также условной равномерно деформируемой плоскости образца, расположенной от нагружаемого торца на расстоянии, равном поперечному размеру призмы. С помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм измерялись продольные деформации бетона в средней по высоте зоне призмы при базе измерения, равной 100 мм для образцов-призм с размером поперечного сечения 150 мм и равной 150 мм – для образцов-призм с размером поперечного сечения 200 и 300 мм. Общий вид испытательного стенда приведен на рис. 1, схема расстановки приборов аналогична схеме, приведенной в работе [5].

В начале испытания образец центрировался на плите прессы, а затем для достижения концентричности приложения усилия центрировался стальной штамп на образце при помощи измерительных приборов.

Нагружение образца до уровня нагрузки, ориентировочно равной 70 % от предполагаемой разрушающей, производилось ступенями, равными 5...10 % ожидаемой разрушающей нагрузки, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с.

На каждой ступени производилась выдержка нагрузки от 4 до 5 мин и записывались отсчеты по приборам в конце выдержки ступени нагрузки в журнал испытаний.



Рисунок 1. Общий вид испытаний

После достижения нагрузкой 70 % от предполагаемой разрушающей или при появлении трещин контрольно-измерительные приборы снимались во избежание их повреждений в случае внезапного разрушения образца. После снятия приборов дальнейшее нагружение производилось непрерывно с постоянной скоростью в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-90, вплоть до разрушения образца, фиксировалось разрушающее усилие F_u с занесением в журнал испытаний.

Разрушение всех армированных образцов происходило с образованием в области под штампом так называемого клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, но не сопровождалось

раскалыванием образцов по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из их боковых граней, как это было характерно для всех без исключения образцов-призм без использования косвенного армирования.

Разрушение сопровождалось отслаиванием наружного слоя бетона, расположенного вне ядра, заключенного внутри области, образованной сетками косвенного армирования. Также активно образовывались трещины на верхней поверхности образца, на которую осуществлялось непосредственное воздействие через металлический штамп. Причиной этого являлось чаще всего выпучивание арматурных стержней верхней сетки, на которые воздействовал штамп, используемый в эксперименте. Необходимо отметить, что отслаивание бетона по боковым граням происходило преимущественно в верхней половине образца, то есть на длине около 300 мм. Характер образования трещин и разрушения образцов представлены на рис. 2 и 3.

Как такового раскалывания образцов не происходило, поэтому в качестве разрушающего усилия F_u фиксировалась нагрузка с таким значением, при котором при дальнейших попытках увеличить нагрузку на образец наблюдалось резкое развитие деформаций под штампом, сопровождаемое уменьшением действующих на испытываемый образец нагрузок.



Рисунок 2. Характер разрушения образца при передаче нагрузки через штампы сечением 60 x 60 мм



Рисунок 3. Отслаивание бетона на верхней грани образца в результате выпучивания стержней сетки при передаче нагрузки через металлический штамп сечением 60 x 60 мм

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСЛЕДОВАНИЙ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Для удобства оценки влияния варьируемых факторов на величину контактных деформаций для каждого из испытываемых образцов были определены относительные величины контактных деформаций (по отношению к поперечному размеру штампа) по формуле (1):

$$\lambda = \Delta / D_{loc}, \quad (1)$$

где λ – относительные контактные деформации;
 Δ – абсолютные значения контактных деформаций бетона, мм;
 D_{loc} – поперечный размер металлического штампа, мм.

Также были вычислены относительные напряжения в бетоне под штампом по формуле (2):

$$\gamma = \sigma / f_m, \quad (2)$$

где γ – относительные напряжения в бетоне под штампом;
 σ – абсолютные значения напряжений в бетоне под штампом, МПа;
 f_m – средняя прочность по контрольным образцам, МПа.

По полученным значениям относительных контактных деформаций были определены средние относительные величины контактных деформаций для образцов-близнецов λ_m при напряжениях под штампом, равным призменной прочности бетона ($\gamma = 1$), а также при напряжениях под штампом, равным двойной призменной прочности бетона ($\gamma = 2$).

Полученные экспериментальные значения относительных контактных деформаций λ варьируются в относительно больших пределах: от 0 до 21,33 при диапазоне изменения относительных значений напряжений в бетоне γ образцов под штампом от 0 до 8,33.

По данным измерений контактных деформаций были построены графики зависимости относительных контактных деформаций λ от относительных напряжений в бетоне под штампом γ (рис. 4). Для дальнейшего анализа результатов на рис. 4 также приведен график этой зависимости для аналогичных трех образцов-близнецов с размерами $300 \times 300 \times 600$ мм без применения косвенного армирования, испытанных ранее [5].

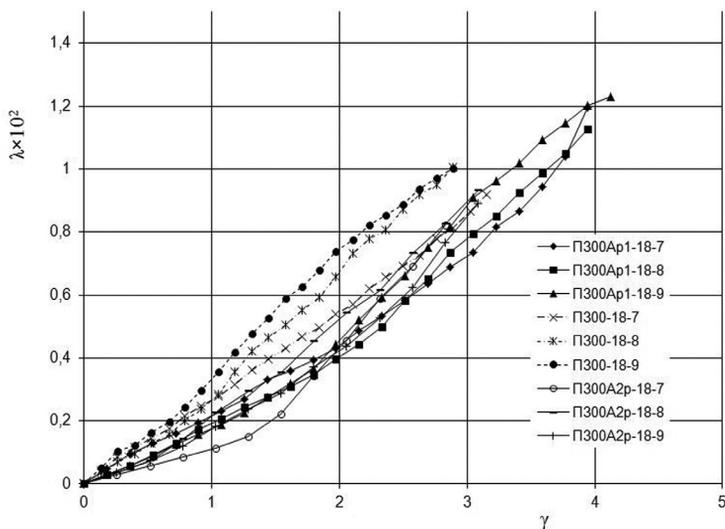


Рисунок 4. Зависимость относительной контактной деформации от относительного уровня напряжений в бетоне под штампом размером 90×90 мм (армированные образцы П300Ар-1-18 и П300Ар2-18, неармированные образцы П300-18)

Из приведенных на рис. 4 графиков следует, что зависимость относительных контактных деформаций λ от относительных напряжений в бетоне под штампом γ близка к линейной как при наличии косвенного армирования, так и при его отсутствии. При этом значения λ для неармированных образцов превышают на 30...60 % значения относительных контактных деформаций для армированных образцов при равных значениях γ .

Для дальнейшего анализа результатов исследований были использованы подсчитанные ранее значения средних относительных контактных деформаций λ_m образцов с применением косвенного армирования и без него при уровнях относительных напряжений в бетоне под штампом, равным $\gamma = 1$ и $\gamma = 2$. При двух данных уровнях относительных напряжений γ было проанализировано влияние на относительные контактные деформации таких физических факторов, как величина относительного размера штампа $\beta = D_{loc}/B$ (где B – размер поперечного сечения образцов, 300 мм), процента косвенного армирования образцов μ , %, а также влияние плотности бетона образцов ρ , кг/м³.

На рис. 5 представлена зависимость значений средних относительных контактных деформаций λ_m образцов с косвенным армированием и неармированных образцов от значений относительно размера штампа β .

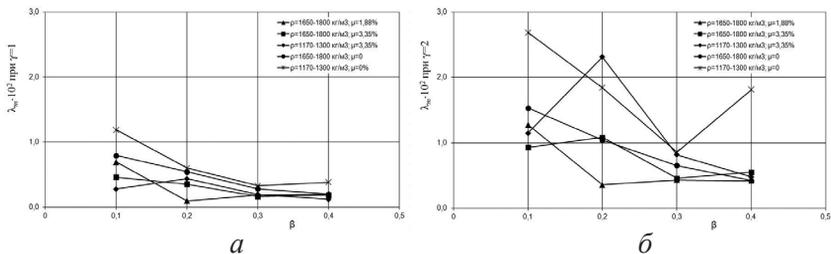


Рисунок 5. Зависимость относительных контактных деформаций λ_m от относительного размера штампа β при: а – $\gamma = 1$, б – $\gamma = 2$

Несмотря на то что ярко выраженной зависимости относительных контактных деформаций λ_m от относительного размера штампа β нет, можно констатировать тенденцию к некоторому уменьшению значений λ_m при росте параметра β .

На рис. 6 представлена зависимость значений средних относительных контактных деформаций λ_m образцов с косвенным

армированием и неармированных образцов от значений процента армирования μ .

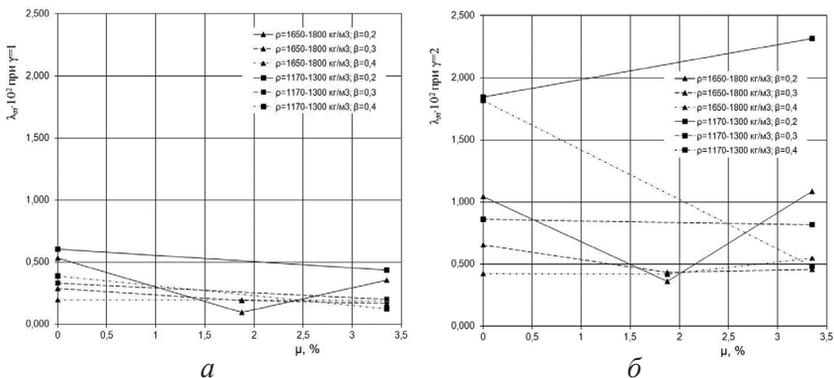


Рисунок 6. Зависимость относительных контактных деформаций λ_m от относительного размера штампа β при: а – $\gamma = 1$, б – $\gamma = 2$

Представленные на рис. 6 данные свидетельствуют об уменьшении значений относительных контактных деформаций λ_m для образцов-призм с косвенным армированием относительно образцов без него. Однако отсутствует какое-либо влияние на значения относительных контактных деформаций λ_m от параметра процента коэффициента армирования μ в диапазоне его изменения от 1,88 до 3,35 %. Одной из возможных причин таких результатов являются погрешности изготовления образцов-призм, а именно нестабильное положение верхней сетки косвенного армирования относительно нагружаемой грани образца.

На рис. 7 представлена зависимость значений средних относительных контактных деформаций λ_m образцов с косвенным армированием и неармированных образцов от величин средней плотности бетона ρ .

Из приведенных на графиках данных следует, что при прочих равных значениях параметров относительного размера штампа β и процента армирования μ величина относительных контактных деформаций λ_m больше для образцов с меньшей плотностью. Причем в большей степени это начинает проявляться при значениях относительных напряжений в бетоне под штампом $\gamma \geq 1$.

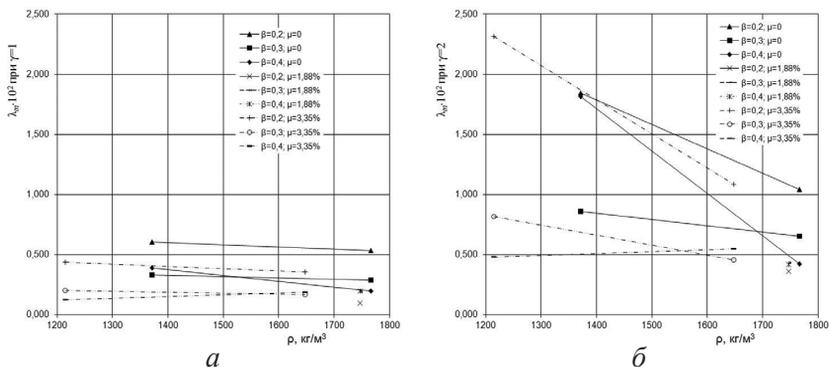


Рисунок 7. Влияние средней плотности бетона ρ на величину средних относительных контактных деформаций λ_m при: а – $\gamma = 1$, б – $\gamma = 2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментальных исследований контактных деформаций образцов из легкого бетона при местном сжатии позволил сделать:

- 1) зависимость относительных контактных деформаций λ от относительных напряжений в бетоне под штампом носит линейный характер во всем диапазоне изменения величин относительных напряжений γ . При этом для легкобетонных элементов с нетипично малой площадкой приложения на них нагрузки (относительный размер штампа $\beta \leq 0,3$) зависимость носит частично линейный характер в пределах определенных значений уровня относительных напряжений в бетоне под штампом γ . Изложенные выше выводы касаются как легкобетонных образцов с применением косвенного армирования, так и без него;
- 2) не установлено какой-либо стабильной зависимости относительных контактных деформаций λ от изменения величины относительного размера штампа β ;
- 3) наличие косвенного армирования оказывает существенное влияние на величины относительных контактных деформаций λ . С появлением косвенного армирования значения λ уменьшаются. При этом не установлено какого-либо значимого изменения в величинах относительных контактных деформаций λ при увеличении процента косвенного армирования более значения 1,88 %;
- 4) средняя плотность легкого бетона оказывает прямое влияние на изменение значений относительных контактных деформаций λ .

Чем выше плотность ρ , тем ниже значения относительных контактных деформаций λ при прочих равных условиях. Влияние средней плотности проявляется в большей степени при увеличении относительных напряжений в бетоне под штампом γ ;

5) результаты экспериментальных исследований контактных деформаций образцов из легкого бетона с плотностью 1200–1800 кг/м³ при местном концентричном сжатии следует использовать при разработке новых или уточнению существующих методов расчета контактных деформаций.

Список использованных источников

1. Griezic, A. Stress-Strain Characteristics of Confined Concrete in Column «Hinges» / A. Griezic, W. Cook, D. Mitchell // *ACI Materials Journal*. – 1987. – V. 37, №1. – P. 278-285.
2. Lieberum, K. Strength of Concrete on an Extremely Small Bearing Area / K. Lieberum, H. Reinhardt // *ACI Structural Journal*. – 1989. – V. 86, № 1. – P. 67–76.
3. Rak, N. Calculation of Reinforced Concrete Member Deformation Under Local Compression / N. Rak // *Modern Building Materials, Structures and Techniques: Proceedings of 4th international conference*. – Vilnius, Technika, 1995. – Vol. II. – P. 46–51.
4. Бондарь, В.В. Методика расчета несущей способности при местном сжатии элементов из легкого бетона, усиленных косвенным армированием / В.В. Бондарь, Н.А. Рак // *Вестник БГТУ. Строительство и архитектура*. – 2013. – № 1(79) – С. 172–176.
5. Бондарь, В.В. Контактные деформации элементов из легкого бетона при концентричном местном сжатии. / В.В. Бондарь // *Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сб. междунар. науч.-техн. ст.* – Минск : БНТУ, 2012. – С. 35–44.
6. Коваль, Ю.В. Контактные деформации бетонов при кратковременном и длительном местном сжатии / Ю.В. Коваль: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Киев, 1980. – 232 л.
7. Курьлло, А.С. Экспериментальное исследование железобетонных арок с несовершенными шарнирами / А.С. Курьлло, В.Г. Кваша // *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. – 1966. – № 7. – С. 29–36.
8. Поздникин, В.М. Экспериментальные исследования деформаций бетона под подошвой жесткого штампа / В.М. Поздникин // *Проблемы архитектурного проектирования промышленных предприятий, зданий и сооружений*. – Свердловск, 1973. – С.82–87.

9. Рак, Н.А. Контактные деформации при местном сжатии элементов из тяжелого высокопрочного бетона / Н.А. Рак, Н. Аль-Арики // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – № 1(19) – С. 151–157.
10. Рак, Н.А. Напряженно-деформированное состояние узлов сопряжения колонн кольцевого сечения со стропильными конструкциями: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Белорус. гос. политехн. акад. – Минск.: БГПА, 1994. – 216 с.
11. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест, 2003. – 252 с.

Статья поступила в редколлегию 29.10.2013