

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И КОНТАКТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ПРИ МЕСТНОМ СЖАТИИ

Рак Н.А., Смех В.И.

### Введение.

Приведенный в работе [1] анализ экспериментальных исследований элементов при местном сжатии показал, что большинство исследований выполнялось на образцах, изготовленных из бетона с крупным заполнителем из плотных природных пород. В гораздо меньшей степени исследованы элементы, изготовленные с легким крупным заполнителем. Обнаружены только единичные исследования [2-4] на местное сжатие элементов из мелкозернистого бетона (бетона только на мелком заполнителе) как одной из серий исследований элементов из бетона с заполнителем из плотных природных пород.

Исследования [2] выполнялись на образцах в виде цилиндров диаметром 153 мм высотой, изменяющейся от 51 до 153 мм, испытанных с одной из сторон через стальные штампы образца. Отношение площади образца к площади штампа изменялось от 9 до 16.

Исследования [3] выполнялись на цилиндрах диаметром 101,5 мм и высотой 203 мм из мелкозернистого бетона с цилиндрической прочностью на сжатие 11,86 МПа. Отношение площади образца к площади штампа варьировалось в пределах от 1,8 до 16.

Исследования [4] выполнялись на цилиндрах диаметром 150 мм и высотой 300 мм из мелкозернистого бетона с цилиндрической прочностью на сжатие 17,0 МПа. Отношение площади образца к площади штампа варьировалось в пределах от 4 до 225.

В перечисленных выше экспериментальных исследованиях элементов из мелкозернистого бетона изучался характер разрушения образцов и их несущая способность, а контактные деформации таких элементов не исследовались.

В Республике Беларусь в последние 20 лет проведены экспериментально-теоретические исследования несущей способности и контактных деформаций при местном сжатии элементов, изготовленных из бетонов различной структуры [5-8]. Разработаны методики расчета несущей способности при местном сжатии элементов из бетона нормальной плотности [9], из керамзитобетона [10] и сталефибробетона [11].

Разработаны методики расчета контактных деформаций при местном сжатии элементов из высокопрочного бетона нормальной плотности и керамзитобетона [12-14].

Экспериментальные исследования при местном сжатии элементов из мелкозернистого бетона выполнялись в рамках выполнения задания 01 «Разработка методов расчета прочности и деформативности контактных зон сборных железобетонных элементов с учетом их влияния на пространственную работу каркасных зданий государственной программы фундаментальных исследований «Строительство и архитектура» (2002-2005 гг.).

Настоящая статья посвящена анализу основных результатов этих экспериментальных исследований и проверке возможности использования разработанных ранее методик к расчету элементов из мелкозернистого бетона.

### Методика поведения испытаний.

Экспериментальные исследования несущей способности при местном сжатии элементов из мелкозернистого бетона с проектной прочностью 30 МПа проведены на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции».

В качестве опытных образцов были приняты бетонные призмы размерами 150×150×600 мм, при изготовлении которых использовался портландцемент ПЦ 500-Д20 ОАО «Красносельскцемент» с активностью  $R_d = 52,3$  МПа. В качестве заполнителя использовался кварцевый песок ДСЗ «Волма», соответствующий группе песков I класса средней крупности по

ГОСТ 8736-93. Для повышения удобоукладываемости бетонной смеси вводился суперпластификатор С-3 Мозырского завода СЖБ №12.

Для контроля физико-механических характеристик бетона были изготовлены контрольные образцы – неармированные бетонные кубы размером 150×150×150 мм. Прочность бетона на кубов на день испытаний опытных образцов составила 33,8-35,9 МПа.

Испытания призм производились в испытательном цехе Отраслевой НИЛ строительных конструкций БНТУ на прессах ПР-500 и 2ПГ-500 мощностью 5000 кН. Нагрузка на образцы прикладывалась через стальные штампы, имеющие размеры в плане 30×30, 60×60 и 90×90 мм. Отношение площади призмы к площади приложения нагрузки изменялось в диапазоне от 2,778 до 25.

При испытании с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм измерялись перемещения штампа относительно нагружаемой поверхности призмы, 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 половине высоты призмы (300 мм). Общий вид опытного образца приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 — Общий вид испытательной установки на основе пресса 2ПГ-500

Нагружение опытных образцов производилось поэтапно ступенями, с приращением нагрузки на величину, составляющую 5 % от ожидаемой разрушающей нагрузки. На первых этапах нагружения производилась тщательная центровка образцов по показаниям всех приборов. Центровка производилась путем перемещения призмы по нижней плите пресса и пе-

ремещения штампа по верхнему торцу призмы относительно геометрического центра торца. Центровка считалась достигнутой, когда при нагружении штамп совершал примерно поступательное (без поворота) вертикальное перемещение относительно верхнего торца призмы при одновременном малом отклонении в показаниях индикаторов, измеряющих продольные деформации бетона на ее различных гранях. Окончательное положение штампа на верхнем торце призмы фиксировалось после разрушения образца.

#### **Схема разрушения и несущая способность образцов.**

Разрушение большинства образцов происходило с образованием в области под штампом, так называемого клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, и сопровождалось раскалыванием образца по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из его боковых граней (рисунки 2 и 3)

Образовавшаяся пирамида затем извлекалась из разрушенного бетона и ее параметры (высота и наклон граней) измерялись. Бетон по расколовшимся плоскостям осматривался, изучалась его структура, фиксировалось наличие и расположение раковин и т. д.

Схемы разрушения образцов незначительно изменялись в зависимости от соотношения размеров штампа и загружаемого торца образца. Только в образцах, испытанных со штампом размерами 30×30 мм, наблюдались случаи разрушения с раскалыванием призм по различному числу плоскостей.

Основные результаты испытаний представлены в таблице 1. Анализ этих результатов, свидетельствует достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов.



Рисунок 2 — Вид разрушения опытного образца П1-90-1

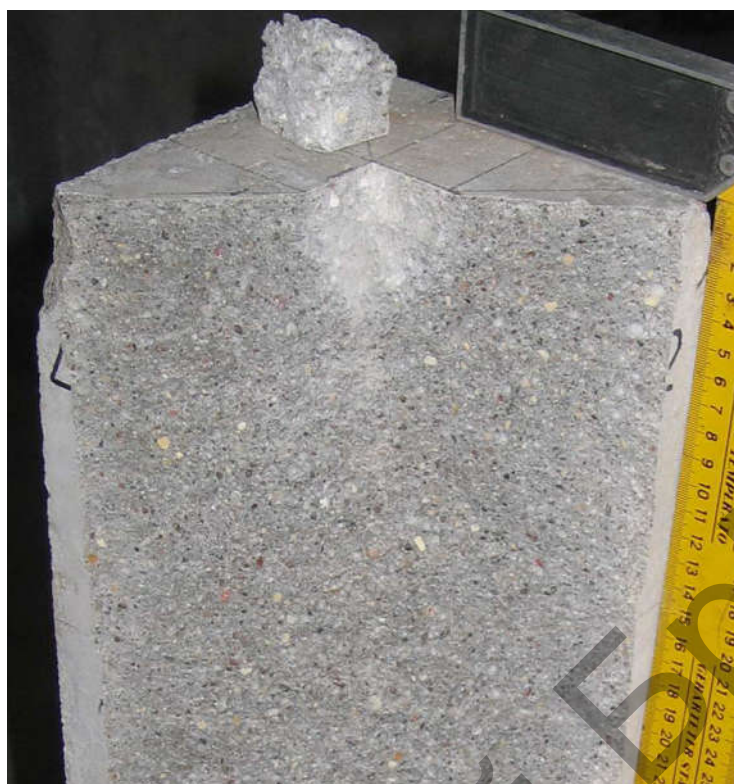


Рисунок 3 — Вид разрушения опытного образца ПЗ0-1

Таблица 1 — Основные результаты испытаний

Шифр образца	Кубиковая прочность бетона $f_{c,cube}$ , МПа	Размер штампа $D_{loc}$ , мм	Нагрузка при разрушении $N_{obs}$ , кН	Средняя нагрузка при разрушении $N_{obs,med}$ , кН	Коэффициент повышения прочности бетона $\omega_{u,obs}$
ПЗ0-1	35.9	30	220	219,7	8,50
ПЗ0-2			231		
ПЗ0-3			208		
П60-1	33.8	60	277	335,5	3,45
П60-3			394		
П90-1	34.2	90	428	428,3	1,93
П90-2			514		
П90-3			343		
ЖЗ0-1	31,6	30	172	172	7,47
Ж60-1		60	289	289	3,18
Ж90-1		90	323	323	1,58

Примечания.

1. Шифр образца ПЗ0-1 следует читать следующим образом: П — показатель удобоукладываемости бетонной смеси (Ж — жесткая, П — подвижная); П — подвижная смесь; 30 — размер стороны штампа в мм; 1 — образец-близнец № 1

Как видно из таблицы 1 при увеличении размеров штампа наблюдается устойчивое снижение величины коэффициента  $\omega_u$ , что связано с уменьшением размеров незагруженной зоны сечения, играющей роль «обоймы». Так при увеличении размера штампа в 3 раза коэффициент  $\omega_u$  снижается в 4,7 раза для жесткой бетонной смеси и 4.4 раза для подвижной смеси.

### Характер развития контактных деформаций.

Полученные экспериментальные данные о деформациях штампов на опытных образцах-призмах из мелкозернистого бетона показали, что осадка штампа происходила практически на всех стадиях нагружения поступательно. Только при приближении к моменту разрушения наблюдался небольшой перекосяк штампа, как правило, в направлении, перпендикулярном плоскости раскола.

По мере увеличения нагрузки осадки поверхности образцов в месте их измерения (в углах загружаемой торцевой плоскости) возрастали практически линейно. Абсолютная величина этих осадок оказалась сравнительно небольшой и не превышала 8...13 % от полной осадки. Это свидетельствует о том, что основной вклад в полную осадку штампа вносят деформации погружения и искривления поверхности в зоне около штампа.

По контуру штампа визуально наблюдалось вдавливание штампа в бетон практически с начала нагружения.

По результатам испытаний получена близкая к линейной зависимость полных контактных деформаций бетонного элемента от напряжений под штампом (рисунок 4).

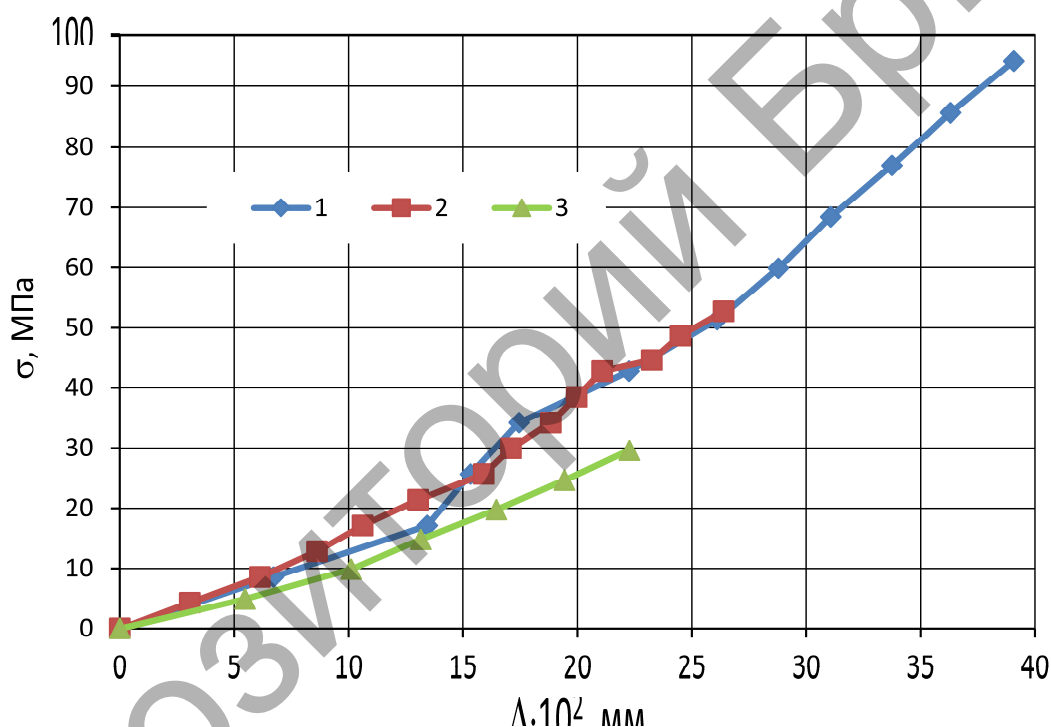


Рисунок 4 – Зависимость значений полной контактной деформации штампа  $\Delta$  от уровня напряжений  $\sigma$  под ним (1 – при штампе 30x30 мм, 2 – при штампе 60x60 мм, 3 – при штампе 90x90 мм)

Некоторые отличия можно увидеть для образцов с размерами штампа 30 мм, когда на первых этапах наблюдалось более резкое увеличение осадок. Полученный характер развития штампов не свидетельствует об упругой работе бетона, а является следствием сложного взаимодействия ряда трудно поддающихся учету факторов, таких как наличие зазоров между штампом и основанием, шероховатость поверхности бетона и т.д. Очевидно, что эти факторы начинают проявляться в большей мере при небольших уровнях напряжений, а также при меньших размерах штампа. По мере увеличения нагрузки влияние этих факторов уменьшается, но появляются пластические деформации бетона в области под штампом и по его контуру. В целом такое взаимодействие отмеченных факторов приводит к зависимости контактных деформаций от напряжений под штампом, мало отличающейся от линейной.

Основные результаты измерений относительных контактных деформаций  $\delta = \Delta/D_{loc}$  при уровне напряжений под штампом, равным цилиндрической прочности бетона  $f_{cm}$  приведены в таблице 2. Для удобства оценки влияния размеров штампа на величину контактных деформаций в таблице 2 для каждого образца приведены не абсолютные величины контактных деформаций, а относительные величины деформаций (по отношению к поперечному размеру штампа) при напряжениях под штампом, равных цилиндрической прочности бетона на осевое сжатие. Кроме того, в последнем столбце таблицы даны средние относительные величины контактных деформаций для образцов-близнецов каждой группы.

Таблица 2 — Относительные контактные деформации при напряжениях под штампом, равных цилиндрической прочности бетона

Шифр образца	Кубиковая прочность бетона $f_{c,cube}$ , МПа	Размер штампа $D_{loc}$ , мм	Относительный размер штампа $\beta$	Цилиндрическая прочность бетона $f_{cm}$ , МПа	Относительные контактные деформации $\delta \cdot 10^2$	
					по образцам	средние
ПЗ0-1	35.9	30	0,2	28.7	0.207	0.298
ПЗ0-2					0.372	
ПЗ0-3					0.314	
П60-1	33.8	60	0,4	27.0	0.207	0.217
П60-3					0.227	
П90-1	34.2	90	0,6	27.3	0.164	0.177
П90-2					0.153	
П90-3					0.213	
ЖЗ0-1	31.6	30	0,2	25.3	0,178	0,178
Ж60-1		60	0,4		0,256	0,256
Ж90-1		90	0,6		0,290	0,290

#### Методика расчета сопротивления местному сжатию элементов из мелкозернистого бетона.

Прочность бетона при местном сжатии определялась по формуле

$$f_{cm,c}(0) = f_{cm} \cdot \omega_u(0) \quad (1)$$

где  $f_{cm}$  – цилиндрическая прочность бетона, принимаемая равной 80 % от его кубиковой прочности;

$\omega_u(0)$  – коэффициент, учитывающий повышение прочности бетона при местном сжатии по сравнению с осевым сжатием, определяемый по формуле

$$\omega_u(0) = 1 + k_c \cdot k_f \cdot \psi_c(0) \quad (2)$$

В формуле (2)  $k_c$  – коэффициент эффективности бокового обжатия при местном сжатии (принимается равным 12,5 для мелкозернистого бетона);  $k_f$  – коэффициент, учитывающий неравномерность бокового обжатия (при равномерном обжатии принимается равным 1,0),  $\psi_c(0)$  – коэффициент, учитывающий относительный уровень бокового обжатия, создаваемого окружающим бетоном.

Коэффициент  $\psi_c(0)$  определяется по формуле

$$\psi_c(0) = \frac{f_{cm}}{f_{cm}} \cdot \left( \sqrt{\frac{A_c(l)}{A_c(0)}} - 1 \right) \geq 0,07 \cdot \left( \sqrt{\frac{A_c(l)}{A_c(0)}} - 1 \right) \quad (3)$$

В формуле (3)  $f_{cm}$  – среднее значение прочности бетона на осевое сжатие,  $f_{ctm}$  – среднее значение прочности бетона на осевое растяжение;  $A_c(l)$  – площадь нагружаемой плоскости элемента;  $A_c(0)$  – нагруженная площадь бетона (площадь штампа).

Результаты вычислений несущей способности опытных образцов из мелкозернистого бетона по нашим экспериментальным данным и данным исследований [3, 4] свидетельствуют о том, что разработанная методика позволяет с удовлетворительной точностью оценить несущую способность (определенное по 23 образцам среднее отношение расчетных значений к экспериментальным составляет 0,998 при коэффициенте вариации  $C_v = 0.20$ ).

**Оценка применимости разработанной ранее методики расчета контактных деформаций при местном сжатии [13, 14] на основе многопараметрической модели основания к расчету элементов из мелкозернистого бетона.**

Выполнены расчеты контактных деформаций при местном сжатии испытанных элементов из мелкозернистого бетона по методике, разработанной ранее для элементов из высокопрочного бетона нормальной плотности и керамзитобетона [12-14].

Коэффициент постели  $C_1$  многопараметрической модели основания может быть определен по формуле

$$C_1 = \frac{\sigma_c(0)}{\Delta + \frac{(\lambda - 1)\Delta_1}{\ln(\Delta_2/\Delta)}} \quad (4)$$

где  $\sigma_c(0)$  – напряжения в бетоне под площадью приложения нагрузки на верхнем торце элемента;

$\Delta$  – контактная деформация бетона, накопленная в пределах первой и второй зоны, (рисунок 5) определяемая по формуле (5)

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (13).$$

где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – значения контактной деформации бетона, накопленные в пределах первой и второй зон соответственно.

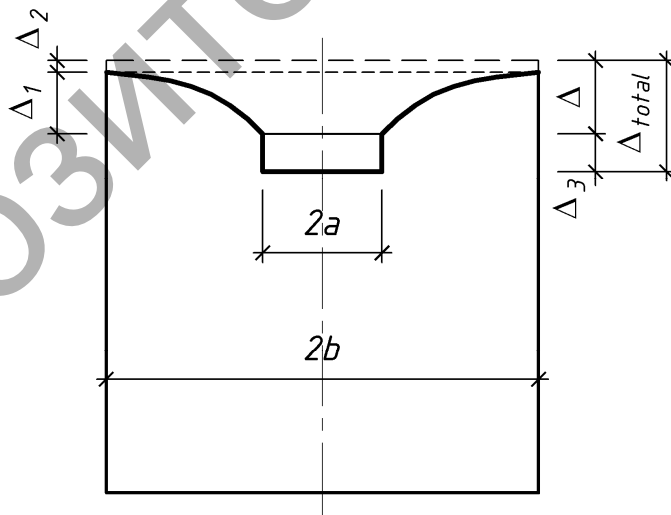


Рисунок 5 – Схема контактных деформаций при местном сжатии бетонного элемента

Значение контактной деформации бетона, накопленной в пределах первой зоны, может быть рассчитано по формуле

$$\Delta_1 = \frac{\sigma_c(0) \cdot 2 \cdot a}{(n+1) \cdot E_c(l) - E_c(0)} \cdot \frac{\lambda - 1}{k_{p\lambda}} \cdot \left[ \frac{n+1-\lambda}{\lambda} + \frac{1-n \cdot p}{k_{p\lambda}} \cdot \ln\left(\frac{p+1}{p \cdot \lambda}\right) \right], \quad (6)$$

где параметры  $p$  и  $k_{p\lambda}$  определяются по формулам

$$p = \frac{E_c(0)}{(n+1) \cdot E_c(0) - E_c(l)} \quad \text{и} \quad k_{p\lambda} = 1 - p \cdot (\lambda - 1);$$

$E_c(0)$  – секущий модуль деформаций бетона для сечения, расположенного на нагруженном торце элемента;

$E_c(l)$  – секущий модуль деформаций бетона для сечения, расположенного в месте перехода от первой зоны ко второй;

$$\lambda = b/a ;$$

$n$  – параметр, отражающий характер изменения секущего модуля деформаций бетона по высоте первой зоны, принимаемый наименьшим из значений  $n = 1,5 \cdot \lambda$  или  $n = 8$ .

Значение контактной деформации бетона, накопленной в пределах второй зоны, может быть рассчитано по формуле

$$\Delta_2 = \frac{\sigma_c(0) \cdot 2 \cdot a}{E_c(l)} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \quad (7)$$

Для учета деформаций погружения на перекрестные ленты в пределах штампа дополнительно установлен еще один слой пружин, жесткость которых принимается равной коэффициенту постели  $C_3$ , определяемому по формуле

$$C_3 = k_3 E_c(0) / \sqrt{A_c(0)}. \quad (8)$$

Здесь коэффициент  $k_3$  учитывает вид бетона и принимается равным согласно [14] для бетона нормальной плотности с крупным заполнителем  $k_3 = 1,25$ , а для керамзитобетона  $k_3 = 0,85$ . Для мелкозернистого на основании результатов настоящих исследований рекомендуется принять значение коэффициента  $k_3 = 1$ .

Тогда дополнительная осадка, возникающая вследствие вдавливания только в пределах штампа, может быть определена по формуле

$$\Delta_3 = \sigma_0 / C_3 .$$

Полная контактная деформация (осадка штампа на основании) тогда определится в виде суммы

$$\Delta_{total} = \Delta + \Delta_3 .$$

С использованием многопараметрической модели основания можно выполнять расчеты контактных деформаций при местном сжатии с учетом нелинейности деформирования бетона при действии не только центрального сжатия, но и при внецентренном сжатии. В последнем случае допускается использовать значения параметров модели основания, определенных исходя из равенства средних осадок при внецентренном и центральном приложении.

Следует отметить, что представленная выше методика расчета контактных деформаций позволяет учитывать важнейшие характеристики структуры бетона (плотность крупного заполнителя) как на стадии трансформации диаграмм деформирования, так и на стадии определения осадок.

По предложенной методике были выполнены расчеты контактных деформаций для испытанных в настоящей работе элементов из мелкозернистого бетона при размерах штампов 60x60 и 90x90 мм, т.е. при значениях коэффициента  $\lambda = 2,5$  и  $\lambda = 1,67$ . Расчеты выполнялись при уровнях напряжений под штампом, составляющих  $\sigma_c(0) = 0,5 f_{cm,c}(0)$ . При вычислении коэффициента постели  $C_3$  по формуле (16) принято значение  $k_3 = 1$ .

Результаты вычисления контактных деформаций по предложенной методике, предусматривающей использование трансформированных диаграмм деформирования и многопараметрической модели основания, представлены на рисунке 6.



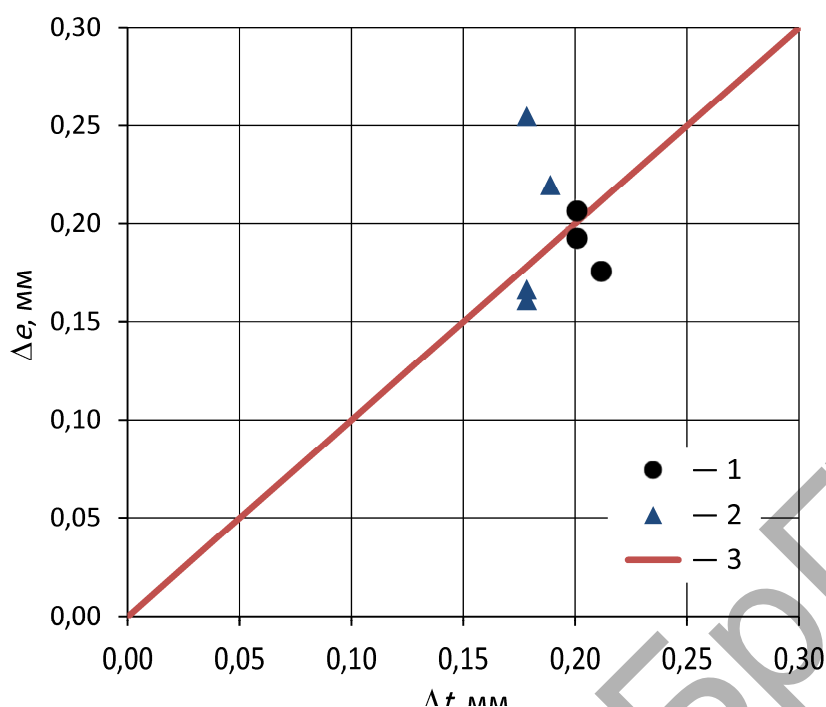


Рисунок 6 – Сопоставление опытных значений контактных деформаций  $\Delta_e$  элементов из мелкозернистого бетона с расчетными значениями  $\Delta_t$  по предложенной методике (1 – при штампе 60x60 мм; 2- при штампе 90x90 мм; 3 – линия  $\Delta_t = \Delta_e$ )

Точность расчета была оценена в соответствии со стандартной процедурой приложения D [15]. Поправка среднего значения составила  $b = 1,001$  при коэффициенте вариации вектора ошибок  $V_\delta = 0,174$ .

### Заключение

1. Выполненные экспериментальные исследования на местное сжатие элементов из мелкозернистого бетона позволили изучить характер их разрушения, получить значения несущей способности образцов, а также изучить характер развития контактных деформаций по мере увеличения нагрузки.

2. Разрушение большинства образцов происходило с образованием в области под штампом, так называемого клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, и сопровождалось раскалыванием образца по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из его боковых граней. При увеличении размеров штампа наблюдается устойчивое снижение величины коэффициента несущей способности  $\omega_n$ , что связано с уменьшением размеров незагруженной зоны сечения, играющей роль «обоймы».

3. По результатам испытаний получена близкая к линейной зависимость полных контактных деформаций бетонного элемента при приложении местной сжимающей нагрузки штампов от нагрузки.

4. Предложена методика расчета сопротивления местному сжатию элементов из мелкозернистого бетона, которая позволяет с удовлетворительной точностью оценить несущую способность таких элементов.

5. Выполнена оценка применимости разработанной ранее методики расчета контактных деформаций при местном сжатии [13, 14] на основе многопараметрической модели основания к расчету элементов из мелкозернистого бетона. Как показали вычисления влияние структуры мелкозернистого бетона на деформации вдавливания (погружения) штампа может быть учтено путем принятия значения коэффициента  $k_3 = 1$ .

### Список источников

1. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: Монография / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест, БрГТУ, 2003. – 252 с. (Глава 6. Прочностные и деформативные свойства бетона при местном сжатии. С. 179-226).
2. Hyland, M. Bearing Capacity of Concrete Blocks / M. Hyland, W. Chen // ACI Journal. – 1970. – V. 67, № 3. – P. 228–236.
3. Hawkins, N. The Bearing Strength of Concrete Loaded through Rigid Plate / N. Hawkins // Magazine of Concrete Research. – 1968. – V. 20, № 62. – P. 31–40.
4. Семенцов, С.А. Расчет бетонных элементов на местное сжатие / С.А. Семенцов // Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 98–106.
5. Рак, Н.А. Влияние условий приложения нагрузки на прочность тяжелого высокопрочного бетона при местном сжатии / Н.А. Рак, Н. Аль-Арики // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. – № 1(13) – С. 64-68.
6. 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.
7. Бондарь, В.В. Экспериментальные исследования элементов из легкого бетона при местном сжатии / В.В. Бондарь, Н.А. Рак // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовки инженерных кадров Респ. Беларусь: сб. тр. XV Международного науч.-метод. семинара: в 2 т. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – Т.1. – С. 191–196.
8. Бондарь, В.В.. Контактные деформации элементов из легкого бетона, армированных поперечными сетками, при концентричном местном сжатии // В.В. Бондарь, Н.А. Рак // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. трудов / МАиС Респ. Беларусь, РУП «Институт БелНИИС» – Минск: Минсктипроект, 2013. – С. 27-39.
9. Рак, Н.А. Совершенствование методики расчета бетонных элементов при местном сжатии с использованием банка экспериментальных данных / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5(14). – С. 84-90
10. Рак, Н.А. Методика расчета прочности при местном сжатии элементов из легкого бетона / Н.А. Рак, В.В. Бондарь // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2011. – № 16. – С.40-47.
11. Рак, Н.А. Методика расчета сопротивления сталефибробетонных элементов местному сжатию // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2017. – №16. – С. 93-97
12. Рак, Н.А. Методика расчета контактных деформаций бетонных элементов при местном сжатии на основе трансформированных диаграмм деформирования бетона / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3(6). – С.53-57.
13. Рак, Н.А. Методика расчета контактных деформаций бетонных элементов при местном сжатии с использованием многопараметрической модели основания / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6(21). – С. 63-67.
14. Рак, Н.А. К расчету контактных деформаций при местном сжатии элементов из высокопрочного тяжелого бетона и керамзитобетона // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2018. – №8. – С. 93-101.
15. ТКП EN 1990-2011. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2012. – 70 с.