

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329>

УДК 666.9.017:666.97.033.17

Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона

Канд. техн. наук, доц. И. И. Полевода¹⁾, канд. техн. наук С. М. Жамойдик¹⁾,
Д. С. Нехань¹⁾, Д. С. Батан²⁾

¹⁾Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье приведены результаты комплекса лабораторных и теоретических исследований физико-механических свойств центрифугированного бетона на образцах секторального сечения, выпиленных послойно из готового изделия. В качестве готового изделия использована стойка из бетона класса по прочности на сжатие В40, изготовленная методом центрифугирования на машине РТЦ-5. Проведена оценка неоднородности по толщине сечения путем визуального определения изменения состава по сечению, определения прочности, плотности полученных бетонных образцов, содержания воды по сечению бетонной смеси. По результатам визуального изучения состава бетонной конструкции выявлено, что 1/8 часть конструкции (от внутренней поверхности) не имеет крупного заполнителя. В дальнейшем по мере движения к периферии наблюдается увеличение крупного заполнителя и уменьшение размера и числа ячеек между зернами щебня. Анализ опытных данных показал, что свойства центрифугированного бетона в послойно распиленных образцах существенно изменяются: плотность бетона в образцах внутреннего слоя меньше на 8 %, чем в образцах наружного слоя, а прочность бетона на сжатие – на 34 %, водосодержание бетонной смеси образцов внутреннего слоя оказалось больше на 43 %, чем в образцах наружного слоя. Построены аппроксимирующие кривые, показывающие закономерности изменения плотности, прочности бетона, водосодержания бетонной смеси по толщине. Получены линейные и экспоненциальные уравнения, описывающие изменение физико-механических свойств центрифугированного бетона по сечению в зависимости от свойств конструкции в целом, которые с учетом вычисленных поправочных коэффициентов k_1 и k_2 могут быть использованы с приемлемым уровнем достоверности в практических расчетах центрифугированных бетонных конструкций. Выявлена связь изменяющейся по сечению прочности центрифугированного бетона с действием центробежной силы инерции. Выведено уравнение, связывающее прочность центрифугированного бетона с его плотностью. Анализ результатов исследований позволяет утверждать, что в центрифугированных бетонных конструкциях основным источником восприятия нагрузок являются наружные слои.

Ключевые слова: прочность, плотность, истинная плотность, водосодержание, неоднородность, относительная толщина, образцы секторального сечения, метод центрифугирования, прогрессивные технологии, раствор, цементный камень, центробежная сила, кольцевое сечение, метод наименьших квадратов, бетонная смесь

Для цитирования: Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И. И. Полевода [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 319–329. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329>

Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete

I. I. Palevoda¹⁾, S. M. Zhamoidzik¹⁾, D. S. Nekhan¹⁾, D. S. Batan²⁾

¹⁾University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Svetlogorsk Reinforced Concrete Products and Structures Plant” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents a complex of laboratory and theoretical studies of physical and mechanical properties in centrifuged concrete while using samples of sectoral cross-section which are cut in layers from a finished product. A post made

Адрес для переписки

Нехань Денис Сергеевич
Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 33 674-45-78
denis_nechany@mail.ru

Address for correspondence

Nekhan Dzianis S.
University of Civil Protection of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus
25 Mashinostroiteley str.,
220118, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 33 674-45-78
denis_nechany@mail.ru

of concrete having B40 grade for compression strength and manufactured while using centrifugation with the help of ПТЦ-5 machine. Assessment of heterogeneity across section thickness has been carried out by visual determination of composition changes in cross section, determination of strength, density of the obtained concrete samples, and water content over cross section of concrete mix. According to the results of a visual study on composition of a concrete structure it has been revealed that 1/8 part of the structure (from an inner surface) does not have a large aggregate. Later, as it moves to periphery, there is an increase in coarse aggregate and a decrease in size and number of cells between grains of gravel. An analysis of experimental data has shown that properties of the centrifuged concrete in samples being sawn in layers change significantly: density of concrete in samples of an inner layer is lower by 8 % than in samples of an outer layer, and compressive strength of concrete – by 34 %, water content of concrete mixture of samples of the inner layer has turned out to be by 43 % higher than in samples of the outer layer. Approximating curves showing regularities of changes in density, concrete strength, water content of concrete mixture over thickness have been constructed in the paper. Linear and exponential equations have been obtained that describe changes in physical and mechanical properties of centrifuged concrete over section depending on structure properties as a whole, which, taking into account the obtained correction factors k_1 and k_2 , can be used with an acceptable level of confidence in practical calculations of centrifuged concrete structures. Relationship between strength of centrifuged concrete varying over cross section and action of a centrifugal force of inertia has been revealed in the paper. An equation has been obtained that relates the strength of centrifuged concrete to its density. Analysis of the research results makes it possible to assert that the main source of loading perception in centrifuged concrete structures is outer layers.

Keywords: strength, density, true density, water content, heterogeneity, relative thickness, samples of sectoral section, centrifugation method, progressive technologies, mortar, cement stone, centrifugal force, annular cross section, least squares method, concrete mixture

For citation: Palevoda I. I., Zhamoidzik S. M., Nekhan D. S., Batan D. S. (2019) Study of Physical and Mechanical Properties of Centrifuged Concrete. *Science and Technique*. 18 (4), 319-329. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-319-329> (in Russian)

Введение

Бетон вносит существенный, если не решающий, вклад в создание материальной основы среды обитания современной цивилизации. Преимущества бетона перед другими материалами способствовали быстрому и широкому его применению в мировой строительной практике еще до того, как надлежащим образом были изучены его важнейшие технологические особенности и технические качества [1].

За последние 20 лет железобетон и бетон уверенно расширяют области своего применения в строительстве, вытесняя другие строительные материалы [2]. Немаловажная роль здесь отводится науке, которая должна уделять особое внимание совершенствованию производства железобетона (бетона), в частности созданию прогрессивных технологий, которые давали бы экономический эффект. К одной из таких технологий относится метод центрифугирования, позволяющий уменьшить расход бетона до 50 % без снижения прочности центрифугированного бетона по отношению к способу изготовления путем вибрирования [3, 4]. Замена традиционных металлических изделий железобетонными позволяет экономить материальные средства. Так, при производстве железобетонных напорных труб расход чугуна и стали уменьшается на 90 %, снижается стоимость прокладки трубопроводов, сводятся к

минимуму эксплуатационные затраты и повышается долговечность конструкций [5].

Из центрифугированного бетона изготавлиются [1–8]:

- напорные и безнапорные трубы;
- опоры линий электропередачи, связи и освещения;
- колонны, свайные основания, стойки кольцевого сечения;
- железобетонные конструкции туннельных сооружений метрополитена;
- изделия и конструкции квадратного сечения (балки, ригели, декоративные формы).

Центрифугированный метод изготовления бетона подразумевает вращение формы, в которую забрасывается бетонная смесь. Распределение и уплотнение бетонной смеси в процессе центрифугирования происходят под действием центробежной силы, возникающей при вращении формы. При этом под действием центробежного прессирующего давления происходит отжатие свободной воды с взвешенными в ней высокодисперсными фракциями из структурных ячеек цементного теста [1], что ведет к повышению плотности и прочности бетона.

Величина центробежных сил пропорциональна массе частиц бетонной смеси. Следовательно, частицы заполнителя, как наиболее тяжелый компонент смеси, стремятся расположиться ближе к стенкам формы, а свободная

вода, как более легкий компонент, отжимается внутрь. В зависимости от величины центробежных сил, продолжительности уплотнения и водоудерживающей способности смеси в процессе изготовления может отжиматься до 20–30 % воды, содержащейся в бетоне, что непременно вызывает повышение класса бетона [1, 5, 6].

Исследования центрифугированного бетона показывают, что его свойства по сечению изменяются [1, 5, 9] в широких пределах. Это объясняется структурной неоднородностью цементного камня и распределением зерен заполнителя по толщине сечения. Так, в [9] по высоте наблюдается изменение средней плотности бетона (до 4 %), общая пористость в шламовом слое увеличивается почти на 18 %, а прочность бетона уменьшается на 18–25 %. Следует отметить, что данные исследования проводились в лабораторных условиях путем послынного распиливания цилиндров диаметром 6,5 см и высотой 8,0 см. Поэтому распространение результатов исследований на реальные конструкции не в полной мере приемлемо ввиду отсутствия непосредственно самого технологического процесса. Ко всему прочему, режим для изготовления образцов принят аналогичный изготовлению опор ЛЭП, однако области применения центрифугированного бетона гораздо шире.

Выводы [9] свидетельствуют о том, что отношение прочности центрифугированного бетона на внутренней поверхности к средней по толщине изменяется в пределах 0,87–0,94. В. Л. Щуцким, Д. А. Дедуком, М. Ю. Гриценко [9] получены различные регрессивные уравнения, описывающие закономерность изменения прочности по толщине, определены эмпирические коэффициенты, позволяющие рассчитать прочностные характеристики такого бетона, из которых следует, что прочность в наружном слое бетона на 20,4 МПа больше, чем во внутреннем, независимо от закладываемого класса прочности, что для практических расчетов не может быть применено. Параболическое уравнение, полученное по результатам исследования, можно распространить сугубо на заложенные в эксперименте параметры.

Следует отметить, что изменяющиеся по высоте характеристики связаны, прежде всего,

с несовершенством технологии производства (неравномерность загрузки формы в процессе изготовления, нарушение технологического процесса и др.), поэтому исследования в этом направлении не проводились.

Анализируя опубликованные в нашей стране и за рубежом исследования неоднородности физико-механических свойств центрифугированного бетона, можно сделать вывод, что их база невелика. Данный факт не может не наталкивать на необходимость проведения подобного рода исследований.

Основная часть

Изготовление конструкции, получение из нее образцов, проведение испытаний осуществлялось в ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» (далее – завод).

Экспериментальная смесь подбиралась в соответствии с «рецептами» лаборатории завода для получения бетона класса В40, которая наиболее широко применяется при изготовлении центрифугированных железобетонных изделий. В экспериментах использовали портландцемент ПЦ500 цементного завода Семех (г. Брест). Ввиду того что широкое применение в Республике Беларусь приобрели песчаник и гранит, в качестве крупного заполнителя брали гранитный щебень РУПП «Гранит». Наибольшая крупность щебня не превышала 20 мм. В качестве мелкого заполнителя использован кварцевый песок с Речного порта г. Бобруйска. Исходная бетонная смесь для изготовления стойки без учета отжатия шлама в процессе изготовления имела следующий состав: портландцемент ПЦ500 – 515 кг/м³; кварцевый песок – 517 кг/м³; гранитный щебень – 1270 кг/м³; вода затворения без примесей – 190 л/м³; суперпластификатор «Полипласт СП-1» – 2,58 кг/м³.

Центрифугирование осуществлялось на центрифуге РТЦ-5 в следующем режиме:

- 1) загрузка бетонной смеси при вращении формы со скоростью 45 об/мин – в течение 1,5 мин;
- 2) распределение бетонной смеси при скорости вращения формы 105 об/мин – 4 мин;
- 3) уплотнение бетонной смеси на скорости 545 об/мин – 16 мин.

При снятии стойки после центрифугирования шлам сливался в емкость, затем замерялись его объем и масса. По результатам измерений вычислялось количество воды и цемента в шламе. Затем по положениям [10] рассчитывали конечный состав бетона: портландцемент ПЦ500 – 528 кг/м³; кварцевый песок – 534 кг/м³; гранитный щебень – 1311 кг/м³; вода – 165 л/м³; СП-1 – 2,6 кг/м³. Наружный диаметр полученной стойки (рис. 1) составил 950 мм, толщина – 160 мм. Истинная плотность – 2640 кг/м³ (согласно расчетам).



Рис. 1. Центрифугированная бетонная стойка
Fig. 1. Centrifugal concrete column

При изучении физико-механических свойств по толщине сечения выпиливание осуществлялось послойно [11–13] из элементов кольцевого сечения следующим образом. После распалубки стойка разрезалась пополам. Затем получали полукольца высотой 150 и 100 мм. Из этих фигур выпиливанием были получены полукольца, затем – 1/4 части кольца размерами, приведенными в табл. 1. Все эти части разрезались на образцы секторального сечения шириной по средней линии 100 мм (рис. 2). Данные образцы наиболее адекватно отражают свойства неоднородности центрифугированного бетона [11].

Распиловка стойки и выпиливание образцов из полученных колец осуществлялись алмазными дисковыми пилами (бензорез Stihl TS 420 с алмазным кругом по бетону Wurth, дисковая пила Bosch GWS 22-230 Н с отрезным кругом Yourtools из синтетических алмазов) в соответствии с [14]. Дальнейшую обработку образцов производили при помощи лепестковых кругов. Отклонения от плоскостности опорных поверхностей образцов, прилегающих к плитам пресса при испытаниях на сжатие, не превышали 1 мм. Отклонения от перпендикулярности

смежных граней образцов, предназначенных для испытания на сжатие, не превышали 2 мм. Отклонения средних линейных размеров образцов – не более 4 мм.

Таблица 1
Характеристики полученных 1/4 частей колец
Characteristics of obtained 1/4 ring parts

Расположение	Диаметр, мм			Относительная толщина
	внутренний	наружный	средний	
Внутреннее	630	830	730	0,3125
Среднее	690	890	790	0,5000
Наружное	750	950	850	0,6875
Образец в целом	640	940	790	0,5000

Примечание. Под относительной толщиной понимается отношение расстояния от внутренней поверхности исходного изделия до рассматриваемой точки к толщине конструкции. Относительная толщина образцов определялась как половина отношения разницы между средним диаметром рассматриваемого элемента и внутренним диаметром конструкции в целом к ее толщине.



Рис. 2. Образцы секторального сечения шириной по средней линии и высотой 100 мм (внутреннего, среднего и наружного слоев – сверху вниз)

Fig. 2. Samples of sectoral cross section with width along middle line and height of 100 mm (inner, middle and outer layers – from top to bottom)

На образцы наносилась маркировка с указанием их номера, его принадлежности (внутренний, средний, наружный слои), температуры нагрева, после чего они помещались в камеру нормального твердения до набора 28-дневной прочности.

Затем осуществлялись взвешивание образцов при помощи весов PS 3500/C/2 и PS 10100.R2, определение площади путем обведения образцов карандашом на миллиметровой бумаге с двух сторон, определение высоты путем шестикратного замера высот каждого образца (по три раза с каждой боковой стороны).

Плотность образца ρ , кг/м³, находили по формуле

$$\rho = 10^6 \frac{m}{Sh},$$

где m – масса образца, г; S – среднее значение площади поперечного сечения образца, мм²; h – среднее значение высоты образца, мм.

Затем пять образцов каждого слоя и пять базовых образцов (размерами 150×150×150 мм) подвергались испытанию на прочность на сжатие. В качестве испытательного оборудования использовали пресс Pilot 4 марки 50-C5642. В процессе испытания на прочность на сжатие регистрировалось минимальное усилие, разрушающее образец при его статической нагрузке (рис. 3). Скорость нарастания нагрузки на образец составляла (0,6 ± 0,2) МПа/с.



Рис. 3. Испытание образцов на прочность

Fig. 3. Testing of sample strength

После испытания образец подвергался визуальному осмотру на предмет определения характера и выявления удовлетворительности разрушения в соответствии с приложением Е [13]. Следует отметить, что все образцы

показали удовлетворительный характер разрушения.

Прочность образца P , МПа, находили по формуле

$$P = 10^3 \alpha_m \frac{F}{S},$$

где α_m – масштабный коэффициент; F – разрушающая нагрузка, кН; S – среднее значение площади поперечного сечения образца, мм².

Положения [10] допускают использование масштабных коэффициентов, закрепленных в [15]. Для перехода от образцов размерами 100×100×100 мм к базовому 150×150×150 мм $\alpha_m = 0,95$. При этом в [10] введен дополнительный коэффициент (равный 1,35) для перехода от прочности образцов секторального сечения размерами $L \times L \times 4L$ к образцам секторального сечения $L \times L \times L$. С учетом некоторого разброса высот в полученных образцах коэффициент α_m будет принимать значения от 0,93 до 0,96. Однако определение α_m в каждом конкретном испытании не оправдано значительным увеличением объемов расчетов. К тому же бетон дает большой разброс прочности, вследствие чего увеличивается погрешность измерений. Прочностные характеристики бетона, полученные при испытаниях в каждой серии, для использования в расчетах подвергаются статистической обработке. Поэтому в качестве переходного коэффициента для образцов размерами 100×100×100 мм $\alpha_m = 0,95$, для образцов размерами 150×150×150 мм $\alpha_m = 1,00$.

Для определения характера изменения по сечению водосодержания бетонной смеси оставшиеся образцы, масса и геометрические параметры которых были предварительно определены, делились на четыре серии. Каждая серия, включающая в себя по пять образцов из каждого слоя конструкции, подвергалась нагреву в камерной печи ПКС-80/12 со скоростью 2 °С/мин до температур 200, 400, 600, 800 °С соответственно с последующей четырехчасовой выдержкой при заданной температуре и дальнейшим охлаждением в лабораторных условиях. Затем образцы повторно взвешивались. Количество удаленной воды (физически и химически связанной) V , л/м³, определялось по следующей формуле:

$$B = 10^6 \frac{m - m_1}{Sh},$$

где m, m_1 – масса образца до и после нагрева, г; S – средняя площадь поперечного сечения образца (до нагрева), мм²; h – средняя высота образца (до нагрева), мм.

Результаты эксперимента

Статистическая обработка результатов измерений проводилась в соответствии с [16, 17]. Сравнительные данные по оценке структурной неоднородности центрифугированного бетона приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства центрифугированного бетона Physical and mechanical properties of centrifuged concrete

Слой	Средняя плотность, кг/м ³	Фактический предел прочности на сжатие, МПа
Внутренний	2370 ± 100	33,6 ± 5,0
Средний	2520 ± 110	41,3 ± 5,8
Наружный	2560 ± 120	45,1 ± 9,1
Образец в целом	2480 ± 20	41,3 ± 5,4

Примечание. Интервал результатов измерений представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.

Опытные графики изменения средней плотности и предела прочности бетона на сжатие по толщине образца приведены на рис. 4, 5.

Количество удаленной воды из образцов (а равно уменьшение массы, отнесенной к первоначальному объему образцов) с ростом температуры приведено в табл. 3.

Изменение объемного содержания воды в образцах бетона с ростом температуры Changes in volumetric water content for concrete samples with temperature increase

Таблица 3

Слой	Объемное содержание воды, л/м ³ , в образцах при температуре, °С			
	200	400	600	800
Внутренний	156,0 ± 19,7	196,7 ± 38,3	214,1 ± 27,1	216,8 ± 36,6
Средний	101,6 ± 14,1	125,2 ± 20,5	139,4 ± 11,7	145,0 ± 15,9
Наружный	80,9 ± 15,0	100,7 ± 5,4	119,7 ± 11,5	123,3 ± 17,8
Среднее значение	112,8 ± 16,3	140,9 ± 21,4	157,7 ± 16,8	161,7 ± 23,4

Примечание. Интервал результатов измерений представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.

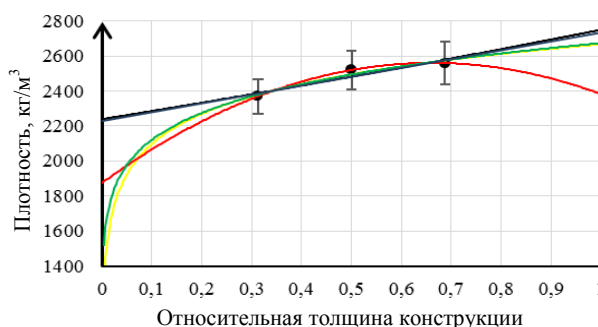


Рис. 4. Изменение плотности бетона по толщине конструкции: черный цвет – экспоненциальная зависимость; синий – линейная (черная и синяя линии практически совпадают); зеленый – степенная; красный – квадратичная; желтый – логарифмическая

Fig. 4. Change in density of concrete through structure thickness: black colour – exponential dependence; blue – linear dependence (black and blue lines almost coincide); green – power dependence; red – quadratic dependence; yellow – logarithmic dependence

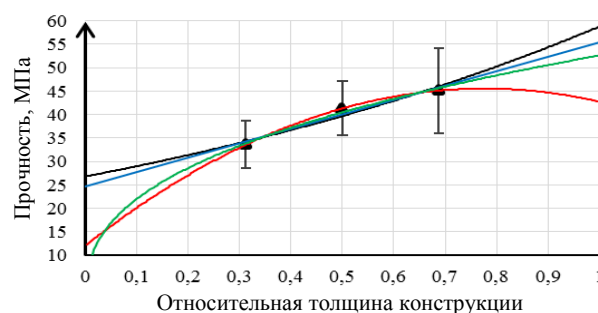


Рис. 5. Изменение прочности бетона по толщине конструкции: черный цвет – экспоненциальная зависимость; синий – линейная; красный – квадратичная

Fig. 5. Change in concrete strength through structure thickness: black colour – exponential dependence; blue – linear dependence; green – power dependence; red – quadratic dependence

Характер потери воды различными слоями центрифугированной конструкции с ростом температуры, практически определяемый изменением удельной массы образцов, показан на рис. 6.

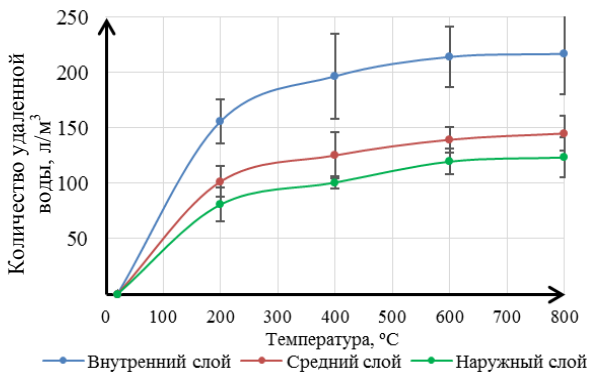


Рис. 6. Характер удаления воды из структуры образцов бетона разного слоя с ростом температуры

Fig. 6. Pattern of water removal from concrete sample structure of different layers with temperature increase

Резкое изменение массы образцов при температурах до (200–300) °C объясняется происходящими физическими процессами, а именно – удалением воды из грубых пор и адсорбированной гелем двух- и трехкальциевого силиката. Поскольку число пор и содержание цемента увеличиваются по мере движения от периферии к центру, как следствие, повышается количество выпаренной воды во внутренних слоях. Некоторая стабилизация количества удаленной воды при температуре до 400 °C связана с тем, что физическая вода уже удалена из пор и происходит лишь процесс удаления воды, находящейся в гелевом пространстве цементного камня. Известно, что основная масса связанной воды теряется при температурах выше 350 °C [18]. Начиная с 400 °C происходит разложение гидроксида кальция [19, 20], сопровождаемое выделением окиси кальция и воды, которая при длительной выдержке при соответствующих температурах также удаляется из структуры бетона. Именно поэтому на участке температур (400–600) °C наблюдается некий скачок кривых, которые до 800 °C плавно переходят в прямые. При плавном нагреве до 800 °C и последующей выдержке в течение 4 ч можно сказать, что структура бетона практически полностью освобождена от химически связанной, адсорбционной и физической воды в порах. Среднее значение изменения объемной массы образцов после нагрева до 800 °C при-

близительно равно содержанию химически и физически связанной воды в структуре бетона (фактическому содержанию воды в бетонной смеси).

Обработка экспериментальных данных касемо удаленной воды при предельной в эксперименте температуре позволила выявить характер распределения воды по сечению центрифугированной бетонной смеси (фактический остаточный расход воды в смеси) (рис. 7).

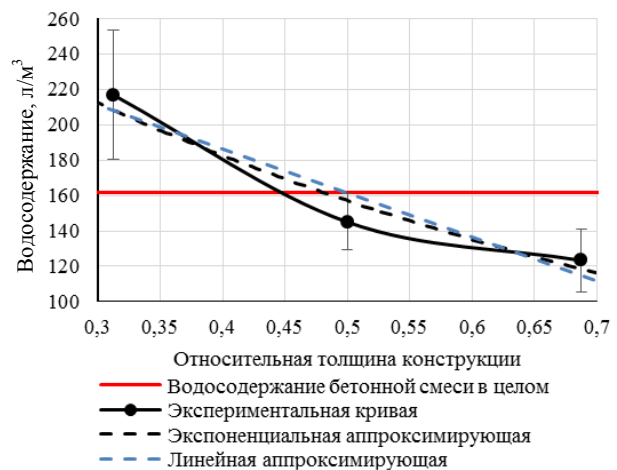


Рис. 7. Водосодержание бетонной смеси по толщине конструкции

Fig. 7. Water content of concrete mixture through structure thickness

Анализ опытных данных показывает, что свойства центрифугированного бетона в полойно распиленных образцах существенно изменяются: плотность бетона в образцах наружного слоя оказалась на 8 % больше, чем в образцах внутреннего слоя, прочность бетона больше на 34 %, содержание воды в бетонной смеси во внутренних слоях на 43 % больше, чем в наружных.

В [5] И. Н. Ахвердовым исследовано, что при надлежаще подобранном составе бетона на внутренней поверхности стенки элемента образуется корка шлама, затем идет слой цементного камня, далее – мелкозернистый бетон и потом – бетон обычной структуры. Из рис. 1 видно, что на внутреннем слое конструкции имеется четкое разграничение слоя, состоящего из цемента, песка и воды, не имеющего в своем составе крупного заполнителя, который составляет 1/8 толщины конструкции. От данной границы до периферии наблюдается наличие крупного заполнителя. При этом по мере дви-

жения к периферии по сечению наблюдается сокращение количества ячеек между щебнем и уменьшение их размеров. Следовательно, более высокая прочность наружных слоев центрифугированной конструкции обуславливается повышением относительного содержания гранитного щебня, прочность которого гораздо больше, чем у раствора (бетон без щебня) и цементного камня. Увидеть невооруженным глазом разграничение на внутренней поверхности цементного камня и шлама не удалось.

Общая картина распределения свойств бетона и бетонной смеси по толщине сходна с результатами, полученными И. Н. Ахвердовым [5], В. Л. Щуцким, Д. А. Дедуком и М. Ю. Гриценко [9]. Вместе с тем различие в изменении плотности послойно выпиленных образцов составило около двух раз, различие в изменении прочности – около 40 %, водосодержания бетонной смеси – 3,5 раза.

Используя метод наименьших квадратов, были получены различные регрессивные уравнения, описывающие закономерность изменения плотности и прочности бетона по толщине, а также водосодержания бетонной смеси. Наиболее адекватно закономерности изменения физико-механических свойств отражают экспоненциальная и линейная зависимости (рис. 4, 5). Приведя полученные зависимости к показателям конструкции в целом, были получены уравнения, описывающие изменение прочности и плотности центрифугированного бетона, водосодержания бетонной смеси по сечению в зависимости от свойств изделия в целом (табл. 4).

Для определения средней прочности (плотности) части сечения (конкретного образца, выпиленного из конструкции), водосодержания бетонной смеси вполне допустимо использовать следующую формулу:

$$Y' = \int_{\delta_1}^{\delta_2} Y(\delta) d\delta,$$

где Y' – значение характеристики конкретного образца; $Y(\delta)$ – зависимость, приведенная в табл. 4; δ_1, δ_2 – относительные толщины конструкции, соответствующие внутренней и наружной поверхностям выпиленного образца (сечения).

Следует отметить, что полученные по зависимостям из табл. 4 значения плотности и прочности на внутренней и наружной поверхностях могут быть несколько занижены (завышены), что подтверждается превышением полученного значения плотности на периферии над истинной плотностью конструкции. Согласно данным зависимостям, прочность бетона по мере движения от внутренней поверхности к периферии увеличивается примерно в два раза, а плотность – на 20 %. Необходимо учитывать, что такое существенное различие объясняется исследованием стойки достаточно большой толщины. Поскольку центрифугированный метод подразумевает зачастую изготовление тонкостенных конструкций, а уменьшение толщины конструкций влечет повышение однородности по сечению, данные зависимости подлежат некой корректировке.

Для линейных зависимостей, наиболее гибко используемых в расчетах, общую формулу по определению плотности (прочности) для конструкции толщиной 160 мм можно переписать в виде

$$Y(\delta) = Y_0(A + C\delta),$$

где A, C – эмпирический коэффициент; Y_0 – характеристика материала в целом.

Таблица 4

Зависимости изменения физико-механических свойств по сечению
Dependences of changes in physical and mechanical properties over cross section

Характеристика бетона (бетонной смеси)	Зависимость, описывающая закономерность изменения характеристики по сечению	
	линейного вида	экспоненциального вида
Плотность ρ	$\rho(\delta) = \rho_0 \cdot (0,899 + 0,204\delta)$	$\rho(\delta) = \rho_0 e^{0,206\delta - 0,102}$
Прочность P	$P(\delta) = P_0(0,597 + 0,743\delta)$	$P(\delta) = P_0 e^{0,785\delta - 0,432}$
Водосодержание B	$B(\delta) = B_0(1,735 - 1,511\delta)$	$B(\delta) = B_0 e^{-1,504\delta + 0,703}$
Примечание. Характеристики с индексом «0» относятся к конструкции в целом; δ – относительная толщина конструкции (от 0 до 1).		

По мнению авторов статьи, данная функция подлежит корректировке дополнительными коэффициентами k_1 и k_2 , учитывающими повышение однородности структуры с уменьшением толщины бетонного изделия, зависящими от толщины изготовленного элемента:

$$Y(\delta) = Y_0(Ak_1 + C\delta k_2).$$

Если две конструкции разной толщины имеют одинаковые физико-механические характеристики в целом, то можно записать:

$$\int_0^1 Y_0(A + C\delta) d\delta = \int_0^1 Y_0(Ak_1 + C\delta k_2) d\delta;$$

$$Ak_1 + \frac{Ck_2}{2} = A + \frac{C}{2};$$

$$k_2 = 1 + \frac{2A(1 - k_1)}{C}.$$

Предположив, что однородность повышается пропорционально уменьшению толщины, запишем $k_2 = \frac{b}{b_0}$, где b – толщина заданной конструкции, мм; $b_0 = 160$ мм – толщина исследованной конструкции.

С учетом полученных в ходе исследования значений A и C , имеем:

– при расчете плотности $k_1 = \left(9,8 - \frac{b}{b_0}\right)/8,8;$

– при расчете прочности $k_1 = \left(2,6 - \frac{b}{b_0}\right)/1,6;$

– при определении водосодержания бетонной смеси $k_1 = \left(1,3 + \frac{b}{b_0}\right)/2,3.$

Вышеописанные зависимости линейного вида из табл. 4 с учетом коэффициентов k_1 и k_2 более приемлемо использовать для инженерных расчетов.

Интересным представлялось рассмотреть вопрос зависимости прочности центрифугированного бетона от действия центробежной силы инерции. Учитывая, что данная сила, воздействию которой подвергаются частицы бетонной смеси в процессе центрифугирования, пропорциональна массе вращающегося твердого тела M , кг, рас-

стоянию от оси вращения до центра зерна r , м, и угловой скорости вращения ω , рад/с, можно записать следующую зависимость:

$$F_{цб} = M\omega^2 r = \rho V\omega^2 r,$$

где V – объем зерна, м³.

Очевидно, что данная сила будет принимать наибольшее значение вблизи стенок вращающейся формы. Прочность в периферийных слоях оказывается больше, чем во внутренних. Значит, прочность бетона прямо пропорциональна центробежной силе, действующей на смесь в процессе изготовления, т. е. $P \sim F_{цб}$. Приняв равными рассматриваемые элементарные объемы структуры бетона и учитывая, что все точки бетонной смеси при вращении формы имеют одинаковую скорость вращения, можно записать:

$$P \sim K\rho r.$$

Увеличение прочности прямо пропорционально росту произведения плотности и расстояния от оси вращения до рассматриваемой точки (рис. 8). Среднее значение коэффициента пропорциональности K составило 0,041 МН/кг.

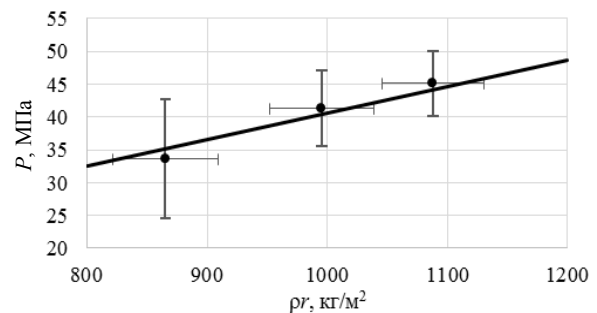


Рис. 8. Зависимость прочности центрифугированного бетона от произведения его плотности на расстояние до рассматриваемой точки

Fig. 8. Dependence of centrifuged concrete strength on product of its density by distance to the point under consideration

В практических расчетах имеется необходимость взаимосвязи прочности бетона с его плотностью напрямую. Обработка экспериментальных данных позволила выявить зависимость между плотностью и прочностью центрифугированного бетона исследуемого состава (рис. 9).

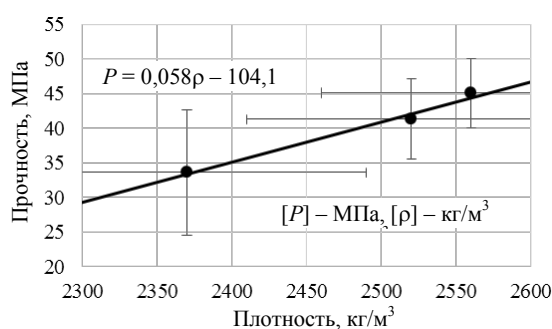


Рис. 9. Зависимость прочности центрифугированного бетона от его плотности

Fig. 9. Dependence of centrifuged concrete strength on its density

Как видим из рис. 9, при изготовлении конструкций методом центрифугирования прочность бетона при прочих равных условиях прямо пропорциональна его плотности.

ВЫВОДЫ

1. Центрифугированный бетон обладает существенной неоднородностью по толщине сечения готового изделия. Внутренние слои конструкции заняты в основном шламом, раствором и цементным камнем. Начиная с относительной толщины 0,125 наблюдается увеличение относительного содержания крупного заполнителя. Наружные слои состоят в основном из крупного заполнителя, ячейки между которым заполнены раствором. Количество и объем ячеек по мере движения к периферии уменьшаются.

2. Физико-механические свойства центрифугированного бетона меняются в широких пределах. Плотность в исследованных образцах внутреннего слоя на 8 % меньше, чем наружного слоя, водосодержание бетонной смеси на 43 % больше. Прочность на сжатие бетонных образцов наружного слоя на 26 % превышала прочность образцов, выпиленных из внутреннего слоя конструкции, что объясняется образующимся в процессе изготовления составом.

3. Получены уравнения, описывающие изменение физико-механических свойств по сечению в зависимости от свойств конструкции в целом и ее параметров, что позволяет рассчитать необходимые при проектировании характеристики такого бетона. Согласно зависимостям, прочность в периферийных слоях

центрифугированной конструкции толщиной 160 мм при однослойном формовании больше в два раза, чем во внутренних слоях, что свидетельствует об увеличении жесткости наружных слоев, и, соответственно, восприятию ими основных нагрузок.

4. Выявлена взаимосвязь прочности центрифугированного бетона с действием центробежной силы инерции. Получена эмпирическая формула для перехода от плотности центрифугированного бетона исследуемого состава к его прочности, и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
- Давидюк, А. Н. Бетон в строительстве – новые вызовы и перспективы / А. Н. Давидюк // Вест. НИЦ «Строительство». 2017. Т. 12, № 1. С. 5–13.
- Пастушков, В. Г. Опыт применения центрифугированных линейных элементов с поперечными сечениями различного профиля при строительстве многоэтажных зданий: строительство / В. Г. Пастушков, Г. П. Пастушков // Архитектура и строительные науки. 2014. Т. 18, 19, № 1, 2.
- Иванов, В. П. Исследование и разработка технологии монтажа каркасов промышленных зданий с применением центрифугированных колонн кольцевого сечения / В. П. Иванов. Минск, 1984. 185 с.
- Ахвердов, И. Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1967. 163 с.
- Дутка, Р. Т. Технология центрифугирования и влияние состава бетона на режим центрифугирования / Р. Т. Дутка // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вып. 52. С. 91–94.
- Informationen Rund um Schleuderbeton [Electronic Resource]. Mode of access: <http://schleuderbeton.de/vorteile.htm>. Date of access: 17.08.2018.
- Zerstörende Großversuche an Hochbewehrten Schleuderbetonstützen / S. L. Burtcher [et al.] // Bauingenieur. April 2003. Band 78. P. 187–193.
- Щуцкий, В. Л. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона [Электронный ресурс] / В. Л. Щуцкий, Д. А. Дедух, М. Ю. Гриценко // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2, ч. 2. Режим доступа: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf.
- Руководство по проектированию, изготовлению и применению железобетонных центрифугированных конструкций кольцевого сечения // Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1979. 144 с.
- Леонович, С. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных стоек: обзорная информация / С. Н. Леонович, Л. Н. Зикеев. М.: Информэнерго, 1991. 64 с.

12. Тарасов, В. В. Исследования центрифугированных железобетонных элементов кольцевого сечения с продольным сосредоточенным армированием бетона / В. В. Тарасов. Киев: Науч.-исслед. ин-т стрит. констр., 1983. 26 с.
13. Технологические правила изготовления центрифугированных стоек опор контактной сети, линий связи и автоблокировки: ВСН 1–90. Взамен ВСН-1–67 и ВСН-7–58. Введ. 07.08.1990. М.: Всесоюз. ордена Окт. революции НИИ трансп. стр-ва, 1990. 55 с.
14. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций: ГОСТ 28570–90. Введ. 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 1990. 11 с.
15. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартиформ, 2013. 36 с.
16. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207–76. Введ. 01.01.1977. М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.
17. Кравченко, Н. С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н. С. Кравченко, О. Г. Ревинская. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. 86 с.
18. Зенков, Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара / Н. И. Зенков. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1974. 174 с.
19. Hermann, K. Brandverhalten von Beton / K. Hermann // Cementbulletin. 1992. No 10. P. 1–8.
20. Милованов, А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А. Ф. Милованов. М.: Стройиздат, 1998. 304 с.
- Поступила 21.01.2019
Подписана в печать 26.03.2019
Опубликована онлайн 31.07.2019
- REFERENCES
1. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroyizdat Publ. 464 (in Russian).
 2. Davidiyuk A. N. (2017) Concrete in Construction – New Challenges and Prospects. *VESTNIK NITs "Stroitel'stvo" = Bulletin of Science and Research Center "Stroytelstvo"*, 12 (1), 5–13 (in Russian).
 3. Pastushkov V. G., Pastushkov G. P. (2014) Experience on Application of Centrifugal Linear Elements with Cross-Sections of Various Profile while Constructing Multi-Storey Buildings: Construction. *Arkhitektura i Stroitelnye Nauki [Architecture and Construction Sciences]*, 18, 19 (1, 2), 36–38 (in Russian).
 4. Ivanov V. P. (1984) *Investigation and Development of Technology for Installation of Industrial Building Framework while Using Centrifugal Columns of Annular Section*. Minsk. 185 (in Russian).
 5. Akhverdov I. N. (1967) *Reinforced Concrete Pressure Centrifugal Pipes*. Moscow, Stroyizdat Publ. 163 (in Russian).
 6. Dutka R. T. (2013). Technology of Centrifugal Process and Influence of Concrete Composition on Centrifugal Process Regime. *Visnik Odes'koï Derzhavnoï Akademii Budivnitstva ta Arkhitekturi = Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (52), 91–94 (in Russian).
 7. Informationen Rund um Schleuderbeton Available at: <http://schleuderbeton.de/vorteile.htm> (Accessed 17 August 2018).
 8. Burtscher S. L., Rinnhofer G., Benko V., Kollegger J. (2003) Destructive Large-Scale Tests on Highly Reinforced Spun Concrete Columns [Zerstörende Großversuche an Hochbewehrten Schleuderbetonstützen]. *Bauingenieur*, 78, 187–193 (in German).
 9. Shchutsky V. L., Dedukh D. A., Gritsenko M. Yu. (2015) Investigations on Physical and Mechanical Properties of Centrifugal Concrete. *Inzhenerny Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, (2), part 2. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf.
 10. Scientific Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete of USSR State Committee for Construction (1979) *Guide on Design, Fabrication and Application of Reinforced Concrete Centrifugal Structures of Annular Section*. Moscow, Stroyizdat Publ. 144 (in Russian).
 11. Leonovich S. N., Zikeev L. N. (1991) *Longevity of Centrifugal Reinforced Concrete Posts: Survey Information*. Moscow, Informenergo Publ. 64 (in Russian).
 12. Tarasov V. V. (1983) *Investigations of Centrifugal Reinforced-Concrete Elements of Annular Section with Longitudinal Concentrated Reinforcement of Concrete*. Kiev, Research Institute of Building Structures. 26 (in Russian).
 13. BCH [Industry-Specific Construction Standards] 1–90. *Technological Rules for Fabrication of Centrifugal Posts for Contact Network, Communication Lines and Automatic Block System*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Transport Construction Awarded with Order of the October Revolution, 1990. 55 (in Russian).
 14. State Standard 28570–90. *Concrete. Methods for Determination of Strength According to Specimens Taken from Structures*. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 11 (in Russian).
 15. State Standard 10180–2012. *Concrete. Methods for Determination of Strength According to Control Specimens*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 36 (in Russian).
 16. State Standard 8.207–76. *State System for Ensuring Uniform Measurement. Direct Measurements with Multiple Observations. Methods for Processing Observation Results. Fundamental Principles*. Moscow, Publishing House of Standards, 1986. 8 (in Russian).
 17. Kravchenko N. S., Revinskaya O. G. (2011) *Methods for Processing Results of Measurements and Assessment of Errors in Training Laboratory Workshop*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnical University 86 (in Russian).
 18. Zenkov N. I. (1974) *Construction Materials and their Behavior During Fire*. Moscow, Publishing House of Higher Engineering Fire-Technical School, Ministry of Internal Affairs of the USSR. 174 (in Russian).
 19. Hermann K. (1992) Brandverhalten von Beton. *Cementbulletin*, (10), 1–8.
 20. Milovanov A. F. (1998) *Resistance of Reinforced Concrete Structures During Fire*. Moscow, Stroyizdat Publ. 304 (in Russian).
- Received: 21.01.2019
Accepted: 26.03.2019
Published online: 31.07.2019