Дифференциальные конструктивные характеристики бетонов, полученных центрифугированием и виброцентрифугированием

Маилян Левон Рафаэлович
д.т.н., профессор кафедры «Автомобильные дороги», Донской государственный технический университет, lrm@aaanet.ru

Стельмах Сергей Анатольевич
к.т.н., доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии», Донской государственный технический университет, sergej.stelmax@mail.ru

Щербань Евгений Михайлович
к.т.н., доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии», Донской государственный технический университет, au-geen@mail.ru

Жеребцов Юрий Владимирович
магистрант, кафедра «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии», Донской государственный технический университет, yuri.zherebtsov@gmail.com

Основной задачей исследования являлась оценка влияния технологии изготовления (центрифугирование, виброцентрифугирование) на различные (отличающиеся по сечению) свойства бетона, к которым относится: плотность; прочность при осевом сжатии образцов-кубов; прочность при осевом сжатии образцов-призм; предельные деформации при осевом сжатии и растяжении; прочность при осевом растяжении и предел прочности на растяжение при изгибе; предел прочности при осевом растяжении; модуль упругости; диаграмма «напряжения – деформации» при сжатии; диаграмма «напряжения – деформации» при растяжении. В качестве исследуемых технологий изготовления были использованы центрифугирование и виброцентрифугирование. Проведенные эксперименты позволили авторам доказать существование трехслойности модели вариатропной структуры центрифугированного и виброцентрифугированного бетона. Результатами распределения свойств слоев вариатропного бетона были диагностика и сопоставление того, что бетон внешних слоев имеет наибольшую численную характеристику прочности и модуля упругости и наименьшую характеристику показателя деформативности; бетон внутренних слоев имеет наименьшую численную характеристику прочности и модуля упругости, но при этом обладает наибольшей деформативностью; в бетоне средних слоев было установлено, что характеристики имеют усредненный вид.
Ключевые слова: виброцентрифугирование, железобетонные изделия, вариатропия, деформация, модуль упругости

В источниках [1-8] достаточно детально рассмотрены физические основы вариатропной структуры центрифугированных бетонов. Вариотропия центрифугированных и виброцентрифугтрованных бетонов складывается из неоднородности структуры, которая получается в процессе формовки из-за отделения некоторого количества воды от цементного теста за счет центробежной силы при увеличении скорости вращения формы.

Таким образом, частицы большого размера сближаются между собой, тем самым обеспечивается наивысшая степень уплотнения бетона.

Одним из первых ученых, исследовавших процесс и закономерности дрейфа заполнителей в процессе центробежного уплотнения бетонной смеси, был Ю.Я. Штайерман. В своих исследованиях [5] он выдвигал предположения о том, что все частицы заполнителя имеют уже определённую массу. Эти предположения помогли ему определить количественный характер рассредоточения заполнителей и цементной смеси по сечению изделия, так как в ходе рассредоточения большое влияние оказывает эффект гидродинамического воздействия теста на зерна заполнителя.

Еще одним ученым, который изучал данный вопрос, является И.Н. Ахвердов. Спустя время в результате его исследований [1] было выведено отношение величины прессующего давления к геометрическим параметрам изделия и показателя скорости вращения формы. Этап отделения жидкой фазы от уплотняемой смеси является достаточно специфическим. Предпосылкой к этому выступает прессующее давление, вернее его неравномерное изменение по стенке изделия. Одной из главных выявленных закономерностей с учетом воздействия прессующего давления является рассредоточение зерен от минимальных значений до максимальных в направлении от внутренней поверхности к наружной.

Исследуя центрифугированный бетон по прочности было выявлено, что физико-механические свойства наружного и внутреннего слоев бетонных образцов различаются. Авторами был проведен анализ достигнутых в процессе исследования результатов. Таким образом, удалось не только доказать отличия в физико-механических свойствах определенных слоев центрифугированных образцов, но и установить, чем отличаются физико-механические свойства центрифугированных образцов от физико-механических свойств вибрированных бетонных образцов.

При эксплуатации центрифугированных элементов из-за воздействия на тело бетона неравномерных температурных и влажностных полей, в изделиях происходит проявление постоянно меняющихся напряжений и деформаций [4].

Трещинообразованию в изделии способствуют развивающиеся в процессе циклического увлажнения и высушивания существенные деформации усадки. Степень

морозостойкости центрифугированного бетона обуславливается влиянием особенностей, которые связаны с его структурной неоднородностью или вариатропией.

На данный момент времени исследования железобетонных изделий кольцевого сечения с вариатропной структурой несут обширный и углубленный характер. По причине более сложной картины их напряженно-деформированного состояния, расчеты степени силовых воздействий нельзя свести к традиционному виду. В работах [9-12] собраны и представлены теоретические основы существующих методов расчета центрифугированных железобетонных изделий кольцевого сечения.

В качестве аналога расчета центрифугированных образцов с кольцевым сечением выступают работы, проведенные Аксомитасом Г.А. для центрифугированных колонн небольшой длины с кольцевым сечением и продольной арматурой в процессе кратковременного сжатия [6].

В расчетах необходимо учитывать то, что при центрифугировании и виброцентрифугировании изделий, воздействия центробежных и центростремительных сил влияют на все слои поперечного сечения, но в тоже время сильно отличаются друг от друга, что провоцирует большую разницу как в структуре, так и в характеристиках бетона этих слоев [13].

Необходимо проанализировать вариатропию структуры образцов из бетона кольцевого сечения и различающиеся по сечению конструктивные характеристики центрифугированного и виброцентрифугированного бетона.

Для производства авторами использовалось оборудование и были применены методики, которые описаны в [14-16]. В опытах применялись такие технологии изготовления как центрифугирование – в шифрах образцов – Ц, и виброцентрифугирование – ВЦ.

Перед авторами стояла задача оценить, как влияют технологии изготовления образцов на такие характеристики бетона как плотность; предел прочности при осевом сжатии образцов-кубов и образцов-призм; предельные деформации при осевом сжатии; предел прочности при осевом растяжении и растяжении при изгибе; предельные деформации при осевом растяжении; модуль упругости; диаграмма «напряжения σ_b – деформации ε_b» при сжатии; диаграмма «напряжения σ_{bt} – деформации ε_{bt}» при растяжении.

Методика испытаний отличалась тем, что каждый из изготовленных опытных образцов был подвержен нескольким видам испытаний. Один опытный образец был испытан в возрасте 7 суток и по одному образцу в возрасте 28 и 180 суток. Схемы разметки и выпиливания участков из образцов кольцевого сечения представлены на рисунках 1 и 2.

Все опытные образцы принимали участие в испытаниях в возрасте 7, 28 и 180 суток согласно ГОСТ 10180. Для того, чтобы анализ результатов опытных образцов производился корректно, авторы применили масштабный коэффициент.

Скорость деформирования в процессе проведения испытаний оставалась неизменной с целью получения прочностных и деформативных характеристик бетона, а также его полных диаграмм деформирования «σ – ε» со спускающимися ветвями. Чтобы достичь необходимого результата для экспериментов применялось не только тензометрическое, но и осциллографическое оборудование.

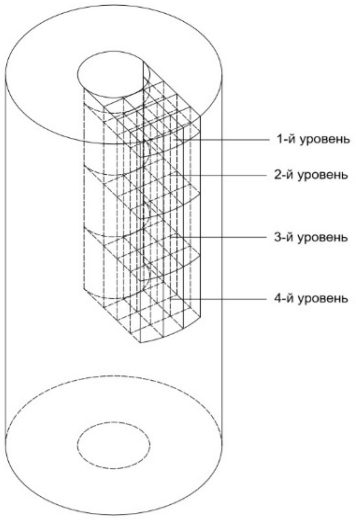


Рисунок 1 – Схематичное изображение выпиливаемых секторов из образцов кольцевого сечения для испытаний на дифференциальные характеристики
Источник: составлено авторами

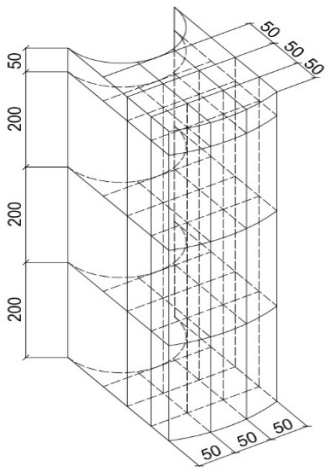


Рисунок 2 – Образцы малого размера, изготовленные из опытных базовых образцов реального размера с кольцевым сечением для изучения дифференциальных характеристик
Источник: составлено авторами

При таких условиях испытаний нагрузка вначале увеличивалась до максимальных значений, а затем начинала постепенно уменьшаться с учетом того, что деформации продолжали возрастать.

В процессе исследования анализировались следующие характеристики:

- технология изготовления – центрифугирование, виброцентрифугирование;
- вид напряженно-деформированного состояния – осевое сжатие, осевое растяжение;
- вид образцов – кубы 5х5х5 см и 15х15х15 см, призмы 5х5х20 см и 15х15х60 см;
- режим испытаний – с постоянной скоростью нагружения, с постоянной скоростью деформирования;
- возраст бетона – 7, 28 и 180 суток.

Центрифугированные и виброцентрифугированные образцы по сечению складывались из совокупности формальных слоев одного элемента, но их свойства и характеристики были различны из-за технологии изготовления, иными словами являлись вариатропными.

В центрифугированном бетонном элементе средний слой представляет собой промежуточную между внешним и внутренним слоями прочность, но тем не менее ее численное значение меньше среднего арифметического между значениями прочности внешнего и внутреннего слоев, и, таким образом, связи с усреднением показателей не было обнаружено. В виброцентрифугированном бетоне средний слой определяется так же, как промежуточный между внешним и внутренним слоями по прочностным характеристикам, а его прочность выше среднего арифметического между значениями прочности внешнего и внутреннего слоев, что приводит к смене положения выпуклости линии прочности в зависимости от слоя.

У бетона внешнего слоя должен быть наибольший показатель модуля упругости, у бетона внутреннего слоя – наименьший модуль упругости, среднего же слоя – модуль упругости будет варьироваться между ними и занимать промежуточное положение по величине, несколько численно ниже – при центрифугировании и несколько численно выше – при виброцентрифугировании.

Таким образом, подтверждаются и различия диаграмм «σ – ε» по слоям бетона.

Экспериментально все эти изменения подтверждены результатами механических испытаний, приведенными ниже.

Прочности на сжатие и растяжение слоев бетона, в составе вариатропного сечения – внутреннего, среднего, внешнего (по 5 см каждый) – сравнивались между собой.

Анализ экспериментальных прочностей и их отклонений представлен в виде рисунка 3 (при сжатии) и рисунка 4 (при растяжении).

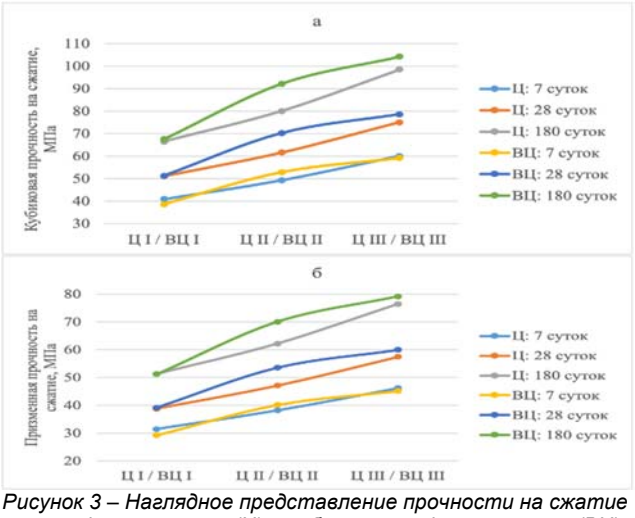


Рисунок 3 – Наглядное представление прочности на сжатие центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов: а) кубиковая б) призменная
Источник: составлено авторами

Если рассматривать вид распределения прочностей слоев бетона на сжатие при виброцентрифугировании, то видно, что он в достаточной степени схож с видом при центрифугировании.

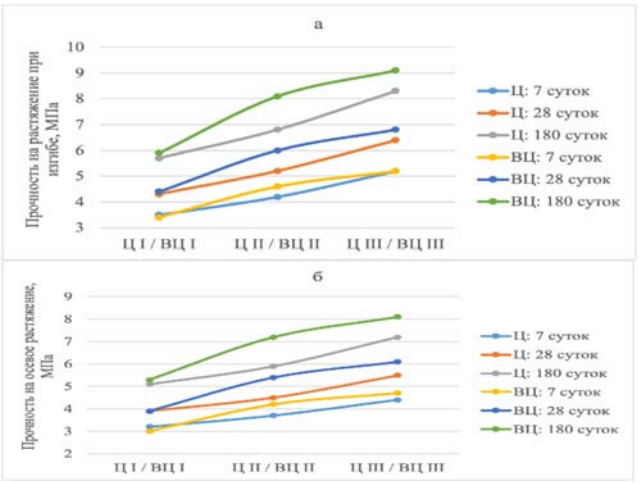


Рисунок 4 – Наглядное представление прочности на растяжение центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов: а) при изгибе; б) осевое
Источник: составлено авторами

Виброцентрифугированные бетоны при распределении прочностей на растяжение обоих видов показали себя следующим образом: внешний слой также имел показатели прочности выше, в сравнении с внешним слоем центрифугированного бетона, средний слой сохранил стремление небольшого повышения значений характеристик, а внутренний слой практически не изменился и сохранил низкое значение по сравнению с другими слоями сечения.

По результатам исследований бесспорно прослеживается необходимость учета, при проведении расчетов конструкции, явления вариатропии сечений и изменяющиеся в результате ее прочностных характеристик бетона.

В процессе оценки воздействия вариатропности сечений на деформации определенных слоев бетона в процессе сжатия и растяжения, необходимо учитывать, что самые маленькие предельные деформации и в процессе сжатия, и в процессе растяжения будет иметь наружный слой, внутренний же слой, напротив, имеет максимальную деформативность, средний слой при этом имеет промежуточные значения деформаций между внутренним и внешним слоями (рисунки 5 и 6).

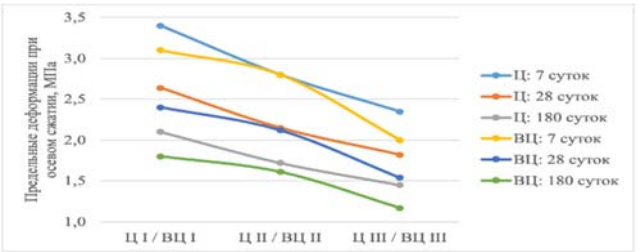


Рисунок 5 – Распределение предельных деформаций при сжатии по слоям сечения центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов
Источник: составлено авторами

Самое высокое значение модуля упругости было выявлено у наружного слоя, у внутреннего слоя, напротив, данный показатель был наименьшим, а вот что касается модуля упругости среднего слоя – он имеет промежуточ-

ное значение: при центрифугировании – в меньшей степени, при виброцентрифугировании – в большей (рисунок 7).

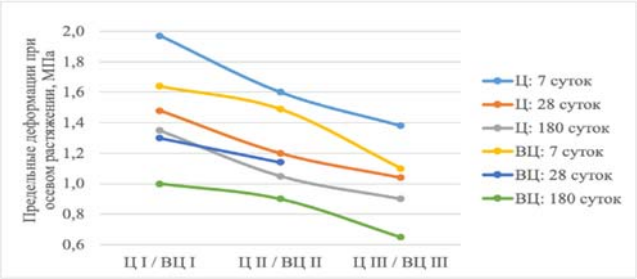


Рисунок 6 – Распределение предельных деформаций при растяжении по слоям сечения центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов
Источник: составлено авторами

Данный анализ имеет отношение как к модулю упругости при сжатии, так и к модулю упругости при растяжении, при этом между собой они практически не имели отличий.

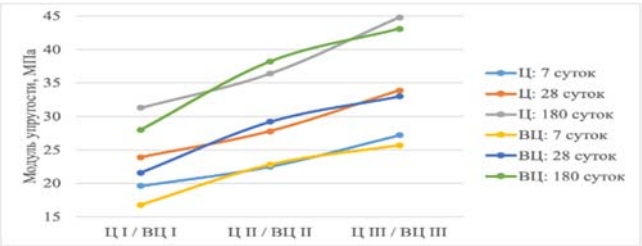


Рисунок 7 – Распределение модуля упругости по слоям сечения центрифугированных (Ц) и виброцентрифугированных (ВЦ) бетонов
Источник: составлено авторами

Все вышесказанное оказывает влияние и на различия диаграмм «σ – ε» определенных слоев бетона. Все три диаграммы – для внутреннего, среднего и внешнего слоев, построенные в ходе эксперимента, отличались друг от друга из-за различий прочностных и деформативных характеристик, которые описаны выше.

Самой низкой и наиболее ровной была диаграмма «σ – ε» внутреннего слоя центрифугированного бетона, которая имела самые минимальные значения прочности, но в то же время она обладала самыми высокими предельными деформациями и наименьшим модулем упругости, который характеризовался восхождением диаграммы.

Резкое смещение максимума вверх и влево и восхождение в верхней части диаграммы и резкий спад в ее нисходящей части характерны для диаграммы «σ – ε» наружного слоя, который обладает, напротив, наибольшей прочностью, но в то же время наименьшими предельными деформациями и большим модулем упругости.

Диаграмма деформирования среднего слоя располагается между диаграммами внутреннего и наружного слоев, но стоит обратить внимание, что смещение замечено ближе к диаграмме внутреннего слоя.

Что касается виброцентрифугированных бетонов, диаграммы деформирования и их отличия в данном случае выглядят примерно так же, как и для центрифугированных бетонов. Но в этом случае стоит обратить внимание на разницу в диаграммах внутреннего и внешнего слоев, которая стала существенно больше, а диаграмма среднего слоя сместилась ближе к диаграмме внешнего слоя.

На рисунке 8 продемонстрированы экспериментальные диаграммы «σ-ε».

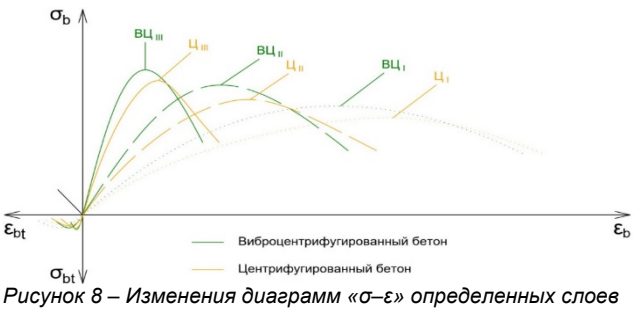


Рисунок 8 – Изменения диаграмм «σ–ε» определенных слоев вариатропных сечений центрифугированного и виброцентрифугированного бетонов
Источник: составлено авторами

По итогам анализа в целом можно отметить, что вариатропия как центрифугированного, так и виброцентрифугированного бетона от возраста совершенно не зависит и дает о себе знать сразу. Иными словами, ситуация с изменением прочностных и деформативных характеристик в зависимости от слоя вариатропных сечений в разных возрастах не меняется.

Но что касается количественной ситуации, то она, очевидно, видоизменяется, но некритично. Данные изменения связаны с возрастом и набором прочности бетона.

В возрасте 7 суток прочности на сжатие и растяжение составили 73 % и 81 % соответственно от значений этих же прочностей в возрасте 28 суток. Соответствующие им предельные деформации, напротив, были выше и равны 21 % и 29 %. Модули упругости – 13 % и 17 %.

В возрасте же 180 суток прочности при сжатии и растяжении увеличиваются до 11 % и 13 %, а соответствующие им максимальные деформации снижаются до 9 % и 12 %. Модуль упругости, как и прочности, повышается (до 15 %).

Исходя из этого, некоторым образом изменяются и диаграммы деформирования «напряжения-деформации» в возрасте 7 и 180 суток в сравнении с диаграммами при 28 сутках (рисунок 9).

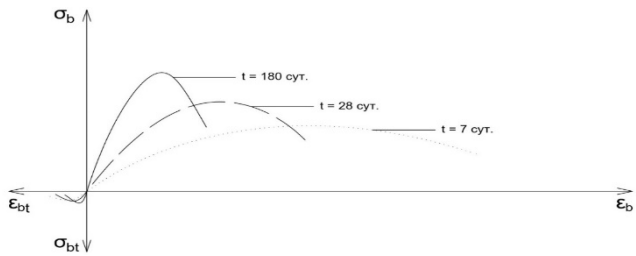


Рисунок 9 – Трансформации диаграмм напряжений и деформаций при сжатии и растяжении бетона, твердеющего 7, 28 и 180 суток
Источник: составлено авторами

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что вариатропные и дифференциальные характеристики бетона как центрифугированных, так и виброцентрифуги-

рованных конструкций необходимо учитывать в расчетах, а доказывает данный факт анализ, который был проведен в данной статье.

Литература

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Баташев В.М. Исследование прочности и деформации железобетонных элементов кольцевого сечения при изгибе, сжатии и растяжении // Труды института Энергосетьпроект. – 1975. – № 6. – С. 70–86.
3. Дмитриев С.А., Баташев В.М. Деформации (прогибы) железобетонных элементов кольцевого сечения и раскрытие трещин в них. / В сб.: Особенности деформаций бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций. – М.: Стройиздат, 1969. – С. 157–189.
4. Подольский В.И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика. – М.: Интекст, 2007. – 152 с.
5. Штайерман Ю.Я. Центрифугированный бетон. – Тифлис: Техника да Шрома, 1933. – 107 с.
6. Аксомитас Г.А. Прочность коротких центрифугированных колонн кольцевого сечения с продольной арматурой класса Ат-V при кратковременном сжатии: диссертации на соискание звания кандидата технических наук. – Вильнюс: ВИСИ. – 1984. – 261 с.
7. Радайкин О.В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – №10. – С. 29–39.
8. Рязанов М.А. Расчет изгибаемых элементов с учетом физической нелинейности деформирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – №12. – С. 58–64.
9. Чубаров В.Е., Умаров А.Г., Маилян В.Д. К расчету железобетонных колонн со смешанным армированием // Инженерный вестник Дона. – 2017. – №1. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3988 (дата обращения: 01.12.2020).
10. Bourchy Agathe, Davin Laury Barnes, Laetitia Bessette, Chalencon Florian, Joron Aurélien, Torrenti Jean Michel Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures // Cement and Concrete Composites. Volume 103, Pp. 233–241, 2019.
11. Alani Aktham Hatem, Bunnori Norazura Muhamad, Noaman Ahmed Tareq, Majid Taksiah A Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC) // Construction and Building Materials. Volume 209. Pp. 395–405. 2019.
12. Butler L., West J.S., Tighe S.L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement // Cement and Concrete Research. Volume 41. № 10. Pp. 1037–1049, 2011.
13. Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Шербань Е.М., Насевич А.С., Яновская А.В. Патент на полезную модель № 197610, опубл. 18.05.2020 бюлл. 14.
14. Холодняк М.Г., Стельмах С.А., Шербань Е.М., Третьяков Д.А., Дао В.Н., Заикин В.И. Предложения по расчетному определению прочностных характеристик вибрированных, центрифугированных и виброцентрифугированных бетонов // Вестник Евразийской науки. – 2018. – № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://esj.today/PDF/66SAVN618.pdf (дата обращения: 01.12.2020).
15. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Determination and use of hidden strength reserves of centrifuged reinforced constructions by means of calculation and experimental methods // Russian Journal of Building Construction and Architecture. № 1(45). Pp. 6–14. 2020. DOI: 10.25987/VSTU.2020.45.1.001.
16. Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Investigation of the Influence of the Initial Composition of Heavy Concrete Designed for the Manufacture of Ring-Section Products on its Properties. // Materials Science Forum. Volume 931. Pp. 508–514. 2018.

Differential design characteristics of concretes obtained by centrifugation and vibrocentrifugation

Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Zherebtsov Yu.V.

Don State Technical University

The main objective of the study was to assess the influence of manufacturing technology (centrifugation, vibro-centrifugation) on various (differing in cross-section) properties of concrete, which include: density; axial compression strength of cube specimens; axial compression strength of prism specimens; ultimate deformation during axial compression and tension; axial tensile strength and ultimate tensile strength in bending; axial tensile strength; elastic modulus; stress-strain diagram during compression; stress-strain diagram under tension. The studied manufacturing technologies were used centrifugation and vibrocentrifugation. The conducted experiments allowed the authors to prove the substantiation of the three-layer model of the variatropic structure of centrifuged and vibrocentrifuged concrete. The results of the distribution of the properties of layers of variatropic concrete were diagnostics and comparison of the fact that concrete of the outer layers has the greatest numerical characteristic of strength and elastic modulus and the smallest characteristic of the deformability index; the concrete of the inner layers has the lowest numerical characteristic of strength and elastic modulus, but at the same time it has the highest deformability; in the concrete of the middle layers, it was found that the characteristics have an average form.

Key words: vibrocentrifugation, reinforced concrete products, variatropy, deformation, elastic modulus

References

1. Akhverdov I.N. Fundamentals of Concrete Physics. - M.: Stroyizdat, 1981. - 464 p.
2. Batashev V.M. Investigation of strength and deformation of reinforced concrete elements of annular section under bending, compression and tension // Proceedings of the Energosetproekt Institute. - 1975. - No. 6. - P. 70–86.
3. Dmitriev S.A., Batashev V.M. Deformations (deflections) of reinforced concrete elements of ring section and opening of cracks in them. / In collection: Peculiarities of concrete and reinforced concrete deformations and the use of computers to assess their influence on the behavior of structures. - M.: Stroyizdat, 1969. - Pp. 157–189.
4. Podol'skii V.I. Reinforced concrete overhead supports. Construction, operation, diagnostics. - M.: Intekst, 2007. - 152 p.
5. Shtaierman Yu.Ya. Centrifuged concrete. - Tiflis: Technique and Shroma, 1933. - 107 p.
6. Aksomitas G.A. Strength of short centrifuged columns of annular cross-section with longitudinal reinforcement of class AT-V under short-term compression: dissertation for the title of candidate of technical sciences. - Vilnius: VISI. - 1984. - 261 p.
7. Radaikin O.V. Comparative analysis of various diagrams of concrete deformation according to the criterion of energy consumption for deformation and destruction. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. - 2019. - No. 10. - Pp. 29–39.
8. Ryazanov M.A. Calculation of bending elements taking into account the physical non-linearity of deformation. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. - 2016. - No. 12. - Pp. 58–64.
9. Chubarov V.E., Umarov A.G., Mailyan V.D. To the calculation of reinforced concrete columns with mixed reinforcement // Engineering Bulletin of the Don. - 2017. - No. 1. [Electronic

resource]. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3988 (date access: 01.12.2020).
10. Bourchy Agathe, Davin Laury Barnes, Laetitia Bessette, Chalencon Florian, Joron Aurélien, Torrenti Jean Michel Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures // Cement and Concrete Composites. Volume 103, Pp. 233–241, 2019.
11. Alani Aktham Hatem, Bunnori Norazura Muhamad, Noaman Ahmed Tareq, Majid Taksiah A Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC) // Construction and Building Materials. Volume 209. Pp. 395–405. 2019.
12. Butler L., West J.S., Tighe S.L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement // Cement and Concrete Research. Volume 41. № 10. Pp. 1037–1049, 2011.
13. Stel'makh S.A., Kholodnyak M.G., Sherban' E.M., Nasevich A.S., Yanovskaya A.V. A device for the manufacture of products from vibrocentrifuged concrete // Application for a useful model Russia, IPC B28B 21/30. No. 2020103753/09; declared 01/29/2020.
14. Kholodnyak M.G., Stel'makh S.A., Sherban' E.M., Tret'yakov D.A., Dao V.N., Zaikin V.I. Proposals for the calculated determination of the strength characteristics of vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged concretes // Bulletin of Eurasian Science. 2018. No. 6. [Electronic resource]. URL: https://esj.today/PDF/66SAVN618.pdf (date access: 01.12.2020).
15. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Determination and use of hidden strength reserves of centrifuged reinforced constructions by means of calculation and experimental methods // Russian Journal of Building Construction and Architecture. № 1(45). Pp. 6–14. 2020. DOI: 10.25987/VSTU.2020.45.1.001.
16. Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Investigation of the Influence of the Initial Composition of Heavy Concrete Designed for the Manufacture of Ring-Section Products on its Properties. // Materials Science Forum. Volume 931. Pp. 508–514. 2018.