

Исследование неоднородности прочности бетона монолитных конструкций

К.т.н., профессор А.Х. Байбурин;
к.т.н., доцент С.Н. Погорелов,
ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)*

Ключевые слова: бетон; неоднородность бетона; монолитные конструкции; прочность бетона; технологические факторы

Неоднородность бетона является следствием неравномерного распределения его компонентов, физической и химической неоднородности продуктов гидратации цемента, результатом влияния изменчивости свойств компонентов, технологических параметров изготовления, доставки, укладки бетонной смеси и выдерживания бетона. При определении характеристик бетона на неоднородность влияют также ошибки методов испытаний, погрешности средств измерений, точность тарировки, причем это относится и к определению свойств компонентов бетона. В справочнике [1] неоднородность структуры бетона объясняется, главным образом, отличием свойств его составляющих.

Подробный обзор проблемы неоднородности бетона содержится в [2]. Исследователями получены следующие результаты.

1. Систематическая неоднородность прочности по высоте формуемых изделий в направлении бетонирования достигает 10-35% с понижением в верхних слоях, где концентрация крупного заполнителя меньше [3]. В нормах по проектированию железобетонных конструкций это учитывается коэффициентом условий работы 0,80-0,85 для различных бетонов при высоте слоя бетонирования свыше 1,5 м.

2. Исследовано влияние «гидравлического давления» на изменение модуля упругости бетона по высоте формуемых элементов с увеличением модуля в нижних слоях, доказано, что плотность бетона изменяется незначительно [4].

3. Наблюдается анизотропия свойств бетона, зависящая от направления укладки бетонной смеси: прочность на растяжение в направлении укладки меньше, чем в перпендикулярном направлении [5]. Нормативная вариация прочности бетона на растяжение назначена 0,165 против 0,135 для прочности при сжатии.

4. Чем меньше поперечное сечение элементов, тем больше влияние дефектов структуры (раковин, неплотных участков и пр.), что в нормах учитывается коэффициентом условий работы 0,85 для бетонных столбов или железобетонных колонн сечением менее 30 см [6].

5. Установлено уменьшение влажности поверхностных зон бетона и повышение пористости на глубину до 50 мм, что влияет на прочность по сечению элементов. Причем толщина слоя не зависит от размеров элементов [7, 8].

6. Исследовано влияние неоднородности деформаций усадки по объему бетонных элементов на напряженно-деформированное состояние конструкций различной массивности [9, 10].

Таким образом, неоднородность прочности в вертикальном направлении связана, главным образом, с изменением концентрации крупного заполнителя при виброуплотнении (для массивных и немассивных конструкций). Изменение прочности в горизонтальном направлении – результат распределения влажностных полей, развития деформаций усадки и неблагоприятного изменения поровых характеристик структуры бетона (для массивных конструкций).

Определению количественных взаимосвязей вариации прочности и основных технологических факторов при изготовлении бетонной смеси (водоцементного отношения, активности цемента, густоты цементного теста, режимных параметров твердения, качества заполнителей) были посвящены диссертационные исследования, например [11]. Вместе с тем, большой практический интерес представляет исследование влияния технологии изготовления монолитных конструкций на неоднородность прочности бетона.

На рис. 1 приведены результаты исследования температурных и прочностных полей в бетоне монолитных стен и перекрытий 16-этажного сборно-монолитного дома, возводимого в объемно-переставной опалубке. Тепловая обработка осуществлялась методом камерного воздухообогрева с применением электрических калориферов 15,0–22,5 кВт. Температура измерялась при помощи хромель-копелевых термопар в 72 точках стен и перекрытия, составляющих монолитную ячейку. Прочность бетона определялась методом упругого отскока и ультразвуковым прибором УК-14П (проектный класс бетона В15).

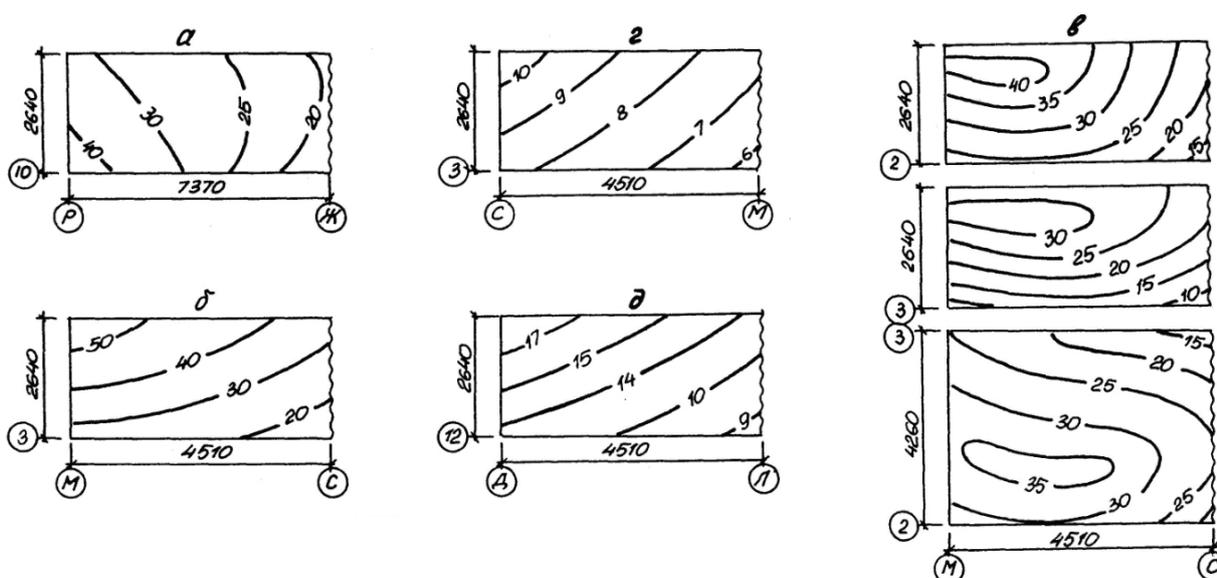


Рисунок 1. Температурные и прочностные поля в бетоне конструкций:
а – распределение температуры воздуха внутри тоннеля опалубки при включенном вентиляторе калорифера, °С; **б** – то же при отключенном вентиляторе, °С;
в – температурные поля в бетоне двух стен и перекрытия, °С; **г** – прочностные поля в бетоне стены в возрасте 3 суток, МПа; **д** – то же в возрасте 6 суток, МПа.
 Температура наружного воздуха от -8°C до 0°C

Распределение температуры воздуха внутри тоннеля опалубки в значительной степени зависит от работы вентилятора калорифера. При работе последнего обеспечивается достаточно равномерное по высоте распределение температур (рис. 1, а). При отключении вентилятора движение воздуха вызывается естественными конвективными потоками от нагретых поверхностей и инфильтрацией через навесные шторы (рис. 1, б). Это обуславливает большую неравномерность температуры в тоннеле (от 7 до 50°C , градиенты по длине и высоте 0,14–0,16 $^{\circ}\text{C}/\text{см}$). Так как в период изотермического выдерживания калорифер включался лишь на непродолжительное время для компенсации теплотерь, распределение температуры в плоскости конструкции (рис. 1, в) определяется температурным полем нагретого воздуха (рис. 1, б). Соответственно температурным полям распределялись и прочностные поля в плоскости стен (рис. 2, г, д). Прочность бетона на сжатие отличалась по высоте стен на 40–47%. В первые часы после распалубки в некоторых монолитных стенах образовались сквозные вертикальные трещины шириной раскрытия 0,2–1,0 мм. Образование трещин объяснялось неблагоприятным сочетанием конструктивно-технологических факторов: большими градиентами температур по плоскости стен, условиями заземления стен, технологическим циклом бетонирования этажей (отношением модуля упругости бетона в смежных этажах). При этом разность температуры наружных слоев бетона и воздуха в момент распалубки была равна 5–15 $^{\circ}\text{C}$ и не превышала допустимого нормативного значения.

Таким образом, камерный обогрев характеризуется большой неравномерностью распределения температуры в бетоне, что приводит к увеличению продолжительности выдерживания бетона до достижения им требуемой прочности, повышенному расходу электроэнергии, а также к значительным температурным градиентам и, в некоторых случаях, к трещинам в конструкциях.

Как показано в [12, 13], регулируя температурное поле при термообработке бетона различными методами, можно существенно изменять напряженно-деформированное состояние и повысить трещиностойкость конструкций, особенно тонких стен. Обеспечение равномерности обогрева путем непрерывной работы тепловентиляторов приводит к созданию избыточного давления внутри тепляка, увеличению теплопотерь. Для повышения эффективности прогрева и обеспечения качества монолитных конструкций рекомендуется применение воздухопроводов или приопалубочных штор с подачей теплого воздуха непосредственно к обогреваемой поверхности [14].

Для монолитного перекрытия распределение прочности на сжатие бетона зрелого возраста было получено методом ударного импульса прибором ИПС-МГ4 при контроле отдельных участков методом отрыва со скалыванием. Несмотря на большой разброс значений прочности от 27,6 до 54,2 МПа на отдельных участках (рис. 2), коэффициент вариации составил 16% и не превысил допустимого значения по ГОСТ Р 53231 [15]. Фактический класс бетона с учетом неоднородности составил В27 против В22,5 по проекту.

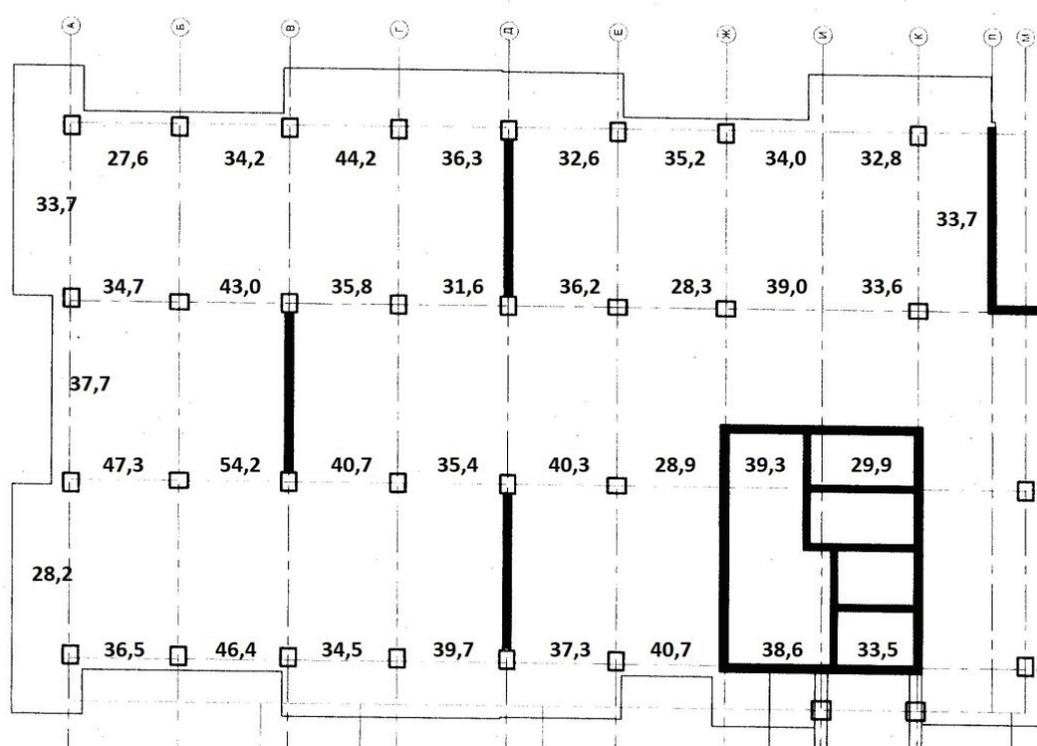


Рисунок 2. Распределение прочности по поверхности перекрытия, МПа

При испытаниях прочности бетона перекрытий непосредственно после распалубки получен разброс прочности от 15,7 до 29 МПа, среднее значение 22,8 МПа, вариация 18%. При этом коэффициент вариации выше, чем в зрелом возрасте и превышает нормативное значение.

Использование греющих проводов при устройстве монолитных перекрытий обеспечивает относительно равномерное температурное поле по сечению и в плоскости конструкции при условии достаточного равномерного утепления открытой поверхности. При этом неоднородность прочности бетона обуславливается, прежде всего, технологической изменчивостью процессов изготовления и укладки, а также повышенными теплопотерями бетона в местах сопряжений со сборными колоннами (необходимо дополнительное утепление указанных мест).

При бетонировании монолитных колонн неоднородность прочности бетона по высоте зависит, прежде всего, от соблюдения технологии послойной укладки. Изучалось распределение прочности на сжатие бетона в проектном возрасте по высоте 54 монолитных колонн (6 точек через полметра: от 25 до 275 см от уровня перекрытия). Прочность определялась методом ударного импульса склерометром ИПС-МГ4. При разбросе значений прочности от 21,6 до 40,6 МПа коэффициент вариации по всем 324 измерениям составил 11,8%. Вариация прочности по каждой колонне составила от 2,6 до 8,4%. Фактический класс бетона с учетом неоднородности составил В21,3...В36,2 против В25 по проекту.

Распределение значений прочности по высоте колонн было сгруппировано по следующим типам: «Н» – наибольшее в низу; «С» – наибольшее в середине; «В» – наибольшее вверху; «Р» – равномерное распределение; «Г» – распределение типа «гребёнка» (рис. 3).

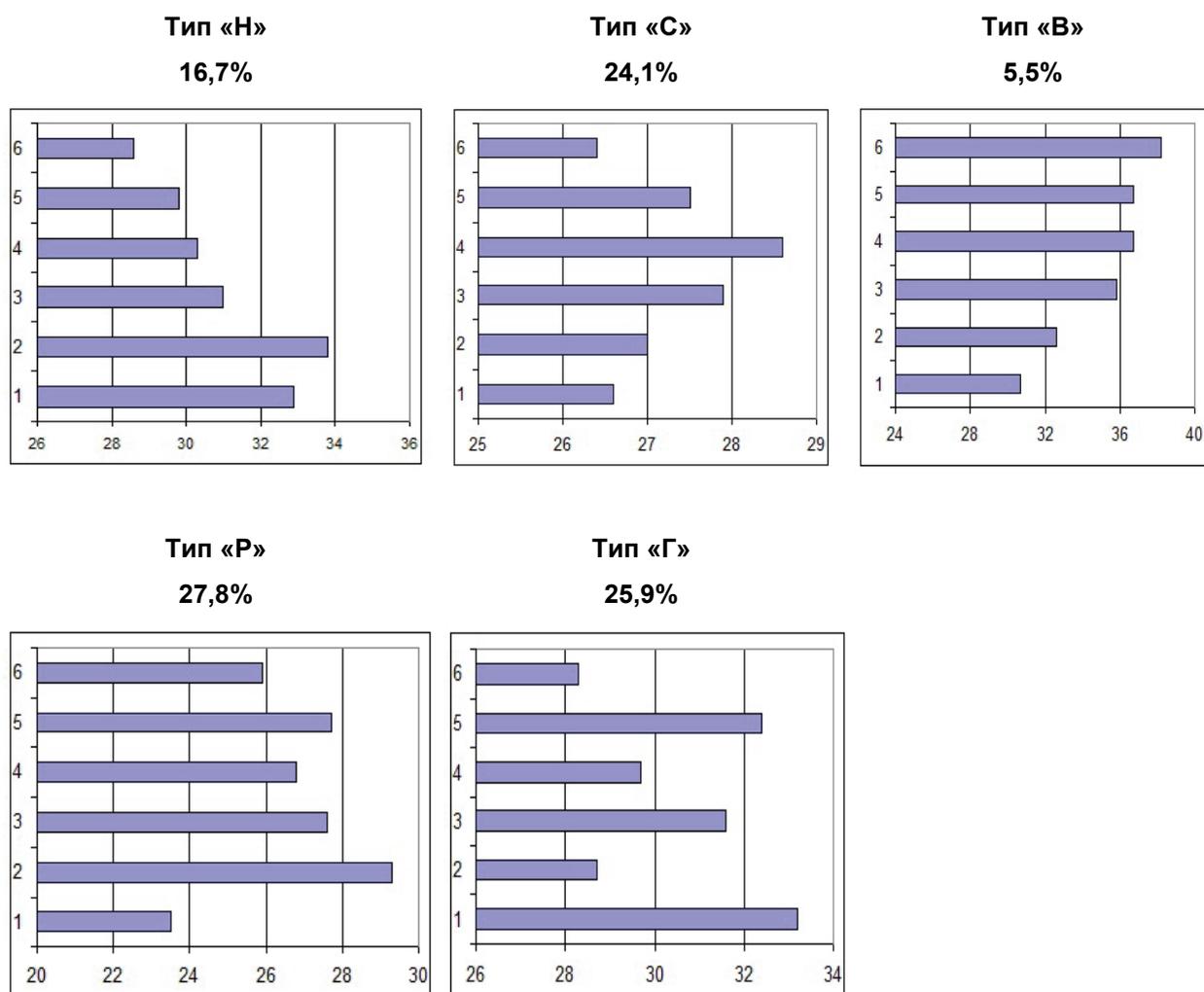


Рисунок 3. Типы распределений прочности бетона по высоте колонн

Таким образом, распределение прочности по высоте колонн в основном равномерное или переменное (типа «гребёнка»), которое с учетом случайных ошибок контроля также можно отнести к равномерным. Такое распределение наблюдалось у 53,7% колонн. На втором месте по частоте оказалось распределение с наибольшими значениями прочности в середине колонны (24,1%), на третьем – распределение с максимумом прочности по низу колонн (16,7 %). Таким образом, соблюдение технологии послойной укладки смеси в опалубку колонн в большинстве случаев обеспечивает равномерное распределение прочности бетона по высоте. Причем более вероятны повышенные значения прочности в середине и по низу колонн. Подобные распределения прочности по высоте стен, формируемых в вертикально подвижных опалубках, были получены в исследованиях Долматова А.А. [16].

Полученные результаты соотносятся с исследованиями разрушения монолитных колонн при землетрясениях [2, 17], которые выявили наибольшие значения прочности бетона в средней и нижней зонах колонн (рис. 4).

Одним из основных факторов, обуславливающих значительную неоднородность прочности бетона монолитных конструкций по сравнению со сборными, является невозможность оперативной корректировки состава смеси и технологии ее укладки, связанной поздними сроками определения прочности бетона. Причем исследованиями установлено, что вариация прочности с возрастом бетона снижается [18]. Поэтому при прогнозировании проектной прочности по результатам ускоренных испытаний отмеченное снижение вариации способствует повышению конструктивной надежности. Этот факт нашел отражение и в стандарте [15], рекомендуемом для сборных конструкций принимать коэффициент вариации прочности бетона в проектном возрасте, равным 85% коэффициента вариации отпусковой прочности.

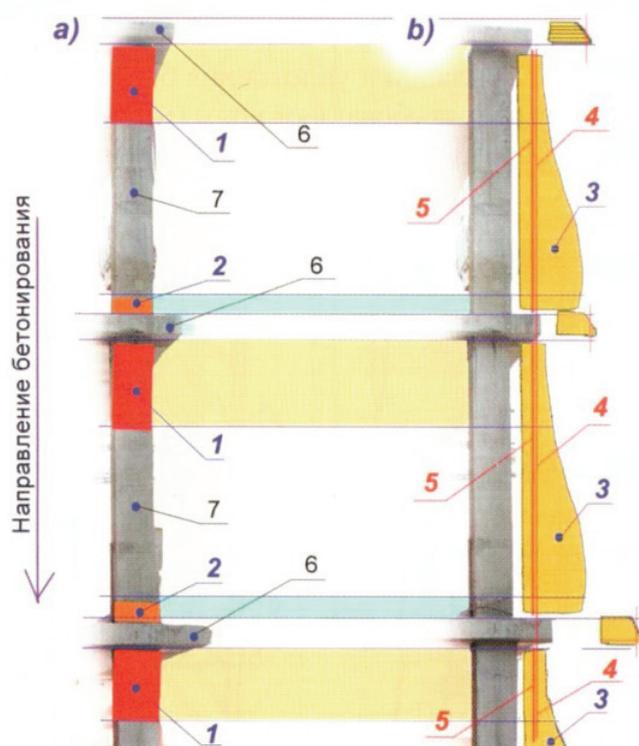


Рисунок 4. Разрушение каркасно-монолитных зданий при землетрясениях:
а – места разрушения каркасно-монолитных зданий; б – распределение прочности бетона по высоте колонн;
1 – разрушение колонн в верхней зоне;
2 – разрушение колонн в нижней зоне;
3 – фактическое распределение прочности (неиспользуемый резерв);
4 – расчетная прочность при сжатии конструкции;
5 – прочность стандартных образцов;
6 – безригельные плиты перекрытия;
7 – монолитная колонна

Требование по выдерживанию бетонных образцов в условиях аналогичных условиям выдерживания монолитных конструкций не означает использования для контроля прочности вариации в сериях указанных образцов, так как количество образцов мало, а использование образцов, изготовленных за несколько рабочих смен или суток, приводит к неоправданному завышению коэффициента вариации. По данным Ю.Г. Хаютина [18] при оценке однородности прочности бетона монолитных конструкций следует ориентироваться на коэффициент вариации прочности бетонных образцов, хранящихся в нормальных условиях на заводе-поставщике.

При использовании неразрушающих методов контроля прочности необходимо учитывать значительные погрешности применяемых молотков (Кашкарова, КМ, Шмидта) – до 20-25%, электронных склерометров (ИПС-МГ4, ОНИКС-2.5) – до 10–12%, отличие поверхностной прочности бетона от прочности внутренних слоев, а также влияние отрицательных температур на результаты контроля. Кроме того, изменение влажности бетона конструкции в результате осадков может привести к ошибкам определения прочности до 25–30% [18].

Использование формулы (4) стандарта [15] при расчете среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации для неразрушающих методов с применением ошибочной или неточной градуировочной зависимости повышает неоднородность прочности, по нашим оценкам, на 20–40% по сравнению с расчетом без ошибок градуировки. Многочисленные исследования показали, что на градуировку приборов неразрушающего контроля большое влияние оказывает вид применяемых цементов и заполнителей. Поэтому для большинства строек, получающих бетон от разных заводов либо от одного завода, работающего с непостоянными поставщиками, использование предварительно устанавливаемых градуировок становится невозможным. Следовательно, применение неразрушающих методов для систематического приёмочного контроля прочности монолитного бетона нецелесообразно, как с точки зрения их точности, так и из-за возможных ошибок градуировки. С другой стороны, их использование оправдывается большими объемами и трудоемкостью контроля. Указанное противоречие разрешается следующим образом: при обнаружении неразрушающим контролем проблемных конструкций переходят к более точным методам отрыва и скалывания или испытаниям образцов, извлеченных из конструкций.

Требования норм [15] по числу участков испытаний (не менее трех на захватку плоских конструкций: стен, перекрытий, плит) представляется недостаточно обоснованным в связи с риском пропуска слабых участков конструкции, например, в зонах примыкания колонн. С другой стороны, чем меньше число испытаний, тем больше вариация прочности, так как стандартное отклонение обратно пропорционально корню квадратному числа испытаний (при фиксированном разбросе прочности). Но чем меньше количество испытаний, тем больше риск не обнаружить реальный разброс прочности. Исход выбора между числом испытаний и трудоемкостью контроля в значительной степени зависит от расчетных допущений по перераспределению усилий в неразрезных монолитных конструкциях, влиянии слабых зон элемента на его несущую способность и пр.

В качестве заключения следует отметить следующее.

Повышение однородности монолитного бетона – сложная комплексная задача, обусловленная нестабильностью свойств цемента и заполнителей, несовершенством бетоносмесительного оборудования, особенностями формирования структуры бетона (усадка, влажность, пористость), влиянием технологии укладки и выдерживания, ошибками методов и средств контроля прочности. Решение этой задачи невозможно без участия государства (с учетом опыта развитых стран), совершенствования законодательной и нормативной базы.

В условиях поставок бетонной смеси, изготовленной на разных технологических комплексах (или на одном, но нестабильном по однородности продукции), требование построения градуировочной зависимости для косвенных неразрушающих методов становится непреодолимым препятствием для использования стандартного правила контроля по схеме «В» [15]. Вместе с тем, игнорирование добавочной ошибки градуировочной зависимости может приводить к значительному занижению коэффициента вариации и неправильной оценке требуемой прочности.

Для повышения достоверности контроля следует применять комплексные методы прямых и косвенных неразрушающих испытаний [19], проводить анализ неоднородности прочности контрольных образцов, изготовленных на строительной площадке и на заводе. При контроле прочности по схеме «Г» без определения характеристик однородности бетона в партии целесообразно, тем не менее, оценивать вариацию прочности в пределах каждой ответственной конструкции. При этом необходимо соблюдать требования норм по числу участков испытаний монолитных конструкций различных видов и уточнять их в ППР с учетом реальной работы конструкции, потенциально опасных зон, как по условиям нагруженности, так и по вероятности технологических дефектов.

Технологические регламенты на возведение монолитных конструкций должны обеспечивать минимальное влияние состава и режима технологических операций на характеристики однородности бетона (выбор способов укладки и уплотнения, параметры выдерживания и пр.). При контроле прочности бетона необходимо учитывать влияние технологических факторов на неоднородность бетона в конструкциях (по высоте колонн, по площади стен и перекрытий, по длине балок). Приемку конструкций следует осуществлять с учетом статистической неоднородности не только партий, но и отдельных элементов конструкций. Регламент контроля прочности должен входить в состав проекта производства работ и согласовываться с проектной организацией.

Литература

1. Липовский В. М. Сборный железобетон: Справочник. Л.: Стройиздат, 1990. 144 с.
2. Горохов Е. В., Югов А. М., Веретенников В. И. Учёт явления систематической неоднородности свойств тяжелого бетона по объему элементов при выборе безопасных конструктивных систем зданий // Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: 2011. С. 146-167.
3. Лещинский А. М. Систематическая неоднородность прочности тяжелого бетона в сборных железобетонных изделиях, формуемых на виброплощадках: дис. канд. техн. наук. Киев: 1981. 202 с.
4. Öztürk T., Kloggel O., Grübl P. Propagation of ultrasound in concrete – Spatial distribution and development of the Young's modulus // BB 85-CD Intern. sympos. Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Berlin: 2003. URL: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v065/v065.htm> (дата обращения: 01.05.2012).
5. Soshiroda T. Effects of bleeding and segregation on the internal structure of hardened concrete // RILEM Proceedins 10.. Cambridge: University Press, 1990. Pp. 253-260.
6. Залесов А. С., Кодыш Э. Н., Лемыш Л. Л., Никитин И. К. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: Стройиздат, 1988. 320 с.
7. Yuasa N., Kasai Y., Matsui I. Inhomogeneous Distribution of Compressive Strength from Surface Layer to Interior of Concrete in Structures // Special Publication. 2002. Vol. 192. Pp. 269-282.
8. Arioglu N., Girgin C. Discussion on paper // Magazine of Concrete Research. 1999. Vol. 51. No. 3. Pp. 217-225.
9. Карпепко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
10. Nagamatsu S., Kawakami Y. Shrinkage and stress caused by drying of concrete // Rev. 31st Gen. Meet. Techn. Sess. Tokyo: 1977. Pp. 151-153.
11. Шамбан И. Б. Управление однородностью прочности бетона путем выбора рациональных технологических решений: дис. канд. техн. наук. Ровно: 1983. 197 с.
12. Афанасьев А. А. Интенсификация работ при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона. М.: Стройиздат, 1990. 384 с.
13. Красновский Б. М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М.: Изд-во ГАСИС, 2004. 470 с.
14. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / РААСН, НИИЖБ. М.: 2005. 275 с.
15. ГОСТ Р 53231-2008. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
16. Долматов А. А. Прочность и деформативность железобетонных фрагментов стен зданий и сооружений, возводимых в вертикально подвижных опалубках: дис. канд. техн. наук. Макеевка: 2004. 140 с.
17. Halil Sezen, Jack P. Moehle. Strength and deformation capacity of reinforced concrete columns with limited ductility // 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver. B.C., Canada: 2004. 279 p.
18. Хаятин Ю. Г. Монолитный бетон: Технология производства работ. М.: Стройиздат, 1991. 576 с.
19. Улыбин А. В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 10-15.

**Альберт Халитович Байбурин, г. Челябинск, Россия*

Тел. раб.: +7(351)267-91-83; эл. почта: abayburin@mail.ru

doi: 10.5862/MCE.29.1

Study of concrete strength heterogeneity in monolithic structures

A.K. Baiburin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

S.N. Pogorelov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

+7(351)267-91-83; e-mail:abayburin@mail.ru

Key words

concrete; concrete heterogeneity; monolithic structures; concrete strength; technological factors

Abstract

The problem of the concrete strength heterogeneity in monolithic constructions is considered in this article.

The factors, influencing on the heterogeneity are analyzed. The study results of the strength distribution over the area of the monolithic walls, floors and columns height are given. The features of the standard methods of the strength control are analyzed.

The recommendations on the accounting of the established laws during the concrete strength control are given.

References

1. Lipovskiy V. M. *Sbornyy zhelezobeton: Spravochnik* [Precast concrete: Handbook]. Leningrad: Stroyizdat, 1990. 144 p. (rus)
2. Gorokhov Ye. V., Yugov A. M., Veretennikov V. I. *Bezopasnost ekspluatiruyemykh zdaniy i sooruzheniy* [Safety of buildings and structures]. Moscow: 2011. Pp. 146-167. (rus)
3. Leshchinskiy A. M. *Sistematicheskaya neodnorodnost prochnosti tyazhelogo betona v sbornyykh zhelezobetonnykh izdeliyakh, formuyemykh na vibroplushchadkakh* [Systematic heterogeneity of the strength of heavy concrete in precast concrete structures, formed-in-shaking table]. Thesis of Technical Sciences Candidate. Kiev: 1981. 202 p. (rus)
4. Öztürk T., Kloggel O., Grübl P. Propagation of ultrasound in concrete – Spatial distribution and development of the Young's modulus. *BB 85-CD Intern. sympos. Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Berlin: 2003. URL: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v065/v065.htm> (Date of Request: 01.05.2012).
5. Soshiroda T. Effects of bleeding and segregation on the internal structure of hardened concrete. *RILEM Proceedins 10*. Cambridge: University Press, 1990. Pp. 253-260.
6. Zalesov A. S., Kodysh E. N., Lemysh L. L., Nikitin I. K. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy po prochnosti, treshchinostoykosti i deformatsiyam* [Calculation of reinforced concrete for strength, crack resistance and deformation]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 320 p. (rus)
7. Yuasa N., Kasai Y., Matsui I. Inhomogeneous Distribution of Compressive Strength from Surface Layer to Interior of Concrete in Structures. *Special Publication*. 2002. Vol. 192. Pp. 269-282.
8. Arioglu N., Girgin C. Discussion on paper. *Magazine of Concrete Research*. 1999. Vol. 51. No. 3. Pp. 217-225.
9. Karpepko N. I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of the reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)
10. Nagamatsu S., Kawakami Y. Shrinkage and stress caused by drying of concrete. *Rev. 31st Gen. Meet. Techn. Sess.* Tokyo: 1977. Pp.151-153.
11. Shamban I. B. *Upravleniye odnorodnostyu prochnosti betona putem vybora ratsionalnykh tekhnologicheskikh resheniy* [Management of the homogeneity of the concrete strength by the selecting of rational technological decisions]. Thesis of Technical Sciences Candidate. Rovno: 1983. 197 p. (rus)
12. Afanasyev A. A. *Intensifikatsiya rabot pri vozvedenii zdaniy i sooruzheniy iz monolitnogo zhelezobetona* [The intensification of works during the construction of reinforced concrete buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1990. 384 p. (rus)

13. Krasnovskiy B. M. *Inzhenerno-fizicheskiye osnovy metodov zimnego betonirovaniya* [Engineering and physical fundamentals of winter concreting]. Moscow: GASIS, 2004. 470 p. (rus)
14. *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruktsiyakh* [Heating of the concrete in monolithic structures. Guide]. Moscow: NIIZhB, 2005. 275 p. (rus)
15. *GOST R 53231-2008. Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti* [Concrete. Rules for monitoring and evaluation of strength]. (rus)
16. Dolmatov A. A. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh fragmentov sten zdaniy i sooruzheniy, vozvodimyykh v vertikalno podvizhnykh opalubkakh* [The strength and deformability of reinforced concrete fragments of the walls of buildings and structures erected in a vertically movable formwork]. Thesis of Technical Sciences Candidate. Makeyevka: 2004. 144 p. (rus)
17. Halil Sezen, Jack P. Moehle. Strength and deformation capacity of reinforced concrete columns with limited ductility. *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*. B.C., Canada: 2004. Pp. 279.
18. Khayutin Yu. G. *Monolitnyy beton: Tekhnologiya proizvodstva rabot* [Monolithic Concrete. Technology]. Moscow: Stroyizdat, 1991. 576 p. (rus)
19. Ulybin A. V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4(22). Pp. 10-15. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 12-18.