

Статистический подход к определению количества измерений при проведении инструментального обследования строительных конструкций

В.С. Абрашитов¹, Д.Е. Капустин², А.Е. Капустин¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
Пенза

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

Аннотация: Определение действительной категории технического состояния строительных конструкций является основной целью проведения обследования. При этом достоверность результатов обследования зависит от объема инструментального измерения контролируемых параметров, который должен быть минимальным, но достаточным для получения данных с заданным уровнем обеспеченности. В данной статье показан статистически обоснованный подход к определению объема инструментального обследования железобетонных конструкций, обеспечивающий получение достоверных результатов при минимальном количестве измерений. Представлена апробация описанного подхода при обследовании сборных железобетонных элементов.

Ключевые слова: обследование строительных конструкций, инструментальный контроль, статистическое обоснование, сборный железобетон.

Обследование строительных конструкций, зданий и сооружений является сложным процессом, достоверность результатов которого зависит от множества факторов [1, 2]. Согласно требованиям ГОСТ 31937-2011 (Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния) информации, полученной в результате обследования, должно быть достаточно для принятия обоснованного решения о возможности безаварийной эксплуатации конструкций в течении заданного времени. При этом вопрос обоснования раскрыт не в полном объеме.

При обследовании железобетонных конструкций [3, 4] для определения прочностных характеристик бетона определить минимально необходимое количество измерений, обеспечивающих получение достоверных результатов, возможно с использованием ГОСТ 18105-2018 (Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам), разработанным с учетом общепринятой методики определения резервов прочности материала [5, 6].

На другие параметры материалов (глубина карбонизации, водонепроницаемость, морозостойкость и др.) данные требования не распространяются [3]. При работе на зарубежных объектах, где стандарты РФ могут оказаться неприемлемыми, также следует выбирать и обосновывать объемы выборки для измерений на основе общепринятых статистических характеристик. Разработка подхода, включающего методику определения количества измерений при обследовании с учетом статистических данных, является в настоящее время актуальной задачей. При этом предложенный подход должен учитывать рекомендации российских [7, 8] и зарубежных исследований [9, 10].

Для решения подобных задач, где проведение сплошного инструментального контроля элементов невозможно, была предложена статистически обоснованная методика выбора количества измерений. Данный подход разработан и реализован для конкретного объекта, где требовалось выполнить техническое обследование сборных железобетонных элементов, находившихся в условиях сухого и жаркого климата в течении 30 лет, на предмет возможности их использования в конструкциях берегового укрепления. Основными критериями для возможности использования конструктивных элементов является отсутствие критических дефектов (установленных проектной и нормативной документацией), прочность, водонепроницаемость и глубина карбонизации бетона. Сборные элементы представлены четырьмя типоразмерами общим количеством 2200 шт.

Визуальное обследование было проведено для 100% элементов с целью отбраковки дефектных блоков. Инструментальные исследования, в том числе по причине сжатых сроков, проводили выборочно. Минимальное количество блоков при проведении выборочного инструментального обследования на основе статистического подхода было рассчитано с использованием подхода, описанного в ГОСТ Р 50779.21-2004 (Статистические методы. Правила

определения и методы расчета статистических характеристик по выбранным данным).

Основными характеристиками, определяемыми при инструментальном обследовании, является прочность бетона и связанная с ней водонепроницаемость. В нормах проектирования строительных конструкций и ГОСТ 27751-2014 (Надежность строительных конструкций и оснований) принято, что эти характеристики распределяются по нормальному закону. При инструментальном обследовании испытания проводятся для выборки, и по их результатам находят выборочное среднее значение определяемой характеристики \bar{x} . Оценка отклонения \bar{x} от среднего значения генеральной совокупности μ рассчитывается на основании доверительного интервала. В данном случае был использован подход, при котором оценивается нижняя граница доверительного интервала, формулы для расчета которой приведены в ГОСТ Р 50779.21-2004. Для расчета нижней границы доверительного интервала при неизвестной дисперсии можно использовать формулу (1):

$$\mu \geq \bar{x} - l_1 \cdot S \quad (1)$$

где μ – среднее значение характеристики генеральной совокупности; \bar{x} – среднее значение характеристики для выборки; S – среднее квадратическое отклонение в выборке; l_1 – статистический параметр, вычисляемый по формуле (2):

$$l_1 = t_{1-\alpha}(v) / \sqrt{n} \quad (2)$$

где: $t_{1-\alpha}(v)$ – квантиль распределения Стьюдента уровня $(1 - \alpha)$ со степенями свободы $v=n - 1$; $1 - \alpha$ - доверительная вероятность, принимаемая

для строительных конструкций по ГОСТ 27751-2014 равной 0.95 (95 %); n – количество измерений (испытаний) в выборке.

Обозначим буквой d ошибку определения среднего значения $d = \mu - \bar{x}$.

Количество измерений n можно определить, решая уравнения (1) и (2) относительно n :

$$n = (t_{1-\alpha} \cdot V/d)^2 \quad (3)$$

где: $t_{1-\alpha} = 1.96$ для обеспеченности 0.95 (95 %); V – коэффициент вариации измеряемой характеристики, %; d – предельно допустимая ошибка в оценке измеряемой характеристики, %

На основании опыта аналогичных работ, проведенных при детальном обследовании конструкций, эксплуатируемых в схожих климатических условиях, значения показателей, входящих в формулу (3), первоначально можно принять по таблице 1.

Таблица № 1

Значения статистических показателей

| Измеряемая характеристика | V , % | d , % |
|-----------------------------|---------|---------|
| Прочность бетона | 15 | 15 |
| Водонепроницаемость бетона | 20 | 20 |
| Глубина карбонизации бетона | 20 | 20 |

После проведения нескольких измерений можно уточнить значение коэффициента вариации V и затем по формуле (3) пересчитать необходимое количество железобетонных элементов для каждого типоразмера.

При расчете объема выборки для определения прочности бетона на сжатие неразрушающими методами следует учитывать требование

ГОСТ 18105-2018 (Бетоны. Правила контроля и оценки прочности), согласно которому объем испытаний принимается не менее 10 % от общего числа изделий в партии (для сборного железобетона). Если их количество в партии меньше или равно 12, то измерения проводятся для всех изделий. Для сборных железобетонных блоков в качестве партии принимается группа элементов одного типоразмера, исходя из предположения, что они должны быть изготовлены по одной технологии, включающей способы укладки и уплотнения бетонной смеси, и из бетона одного состава.

Оценку глубины карбонизации выполняли по методике ГОСТ 31383-2008 (Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии), основанной на том, что защитные свойства бетона по отношению к арматуре связаны с наличием щелочной среды, препятствующей коррозии арматуры. При воздействии углекислого газа окружающей среды степень щелочности в бетоне может снизиться ниже допустимого уровня, характеризуемого величиной рН, равной 9.3. Глубину карбонизации оценивали по цвету наносимого на поверхность бетона индикатора, изменяющего свой цвет в зависимости от рН. Для проведения испытаний в качестве индикатора использовали 1%-ный (по массе) раствор фенолфталеина в этиловом спирте, который меняет свой цвет от малинового (при $\text{pH} > 9.3$) до бесцветного (при $\text{pH} < 9.3$). Измерения для оценки глубины карбонизации проводили на кернах, отбираемых из бетона блоков [2].

Прочность бетона определяли неразрушающим и разрушающим методами. Прочность прямым разрушающим методом определяли по ГОСТ 28570-2019 (Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции) испытанием образцов цилиндров, отобранных из конструкции.

В качестве неразрушающего использовали метод ударного импульса по ГОСТ 22690-2015 (Бетоны. Определение прочности механическими

методами неразрушающего контроля) с использованием прибора ОНИКС-2.5. Данный метод позволяет определять прочность в широком диапазоне значений. Прибор внесен в государственный реестр средств измерения и обеспечивает высокую точность контроля за счет двухпараметрического метода измерения с адаптивной фильтрацией сигналов, статистической обработкой и отбраковкой данных.

Для построения градуировочной зависимости использовали результаты прямых разрушающих испытаний на сжатие образцов, изготовленных из не прокарбонизированной части керна и результаты испытания неразрушающим методом, проведенные на карбонизированном слое бетона. Такой подход возможен, поскольку из опыта проведенных обследований конструкций, эксплуатируемых в схожих климатических условиях установлено, что соотношение прочностей прокарбонизированного и непрокарбонизированного бетона является постоянным.

Керны для построения градуировочной зависимости были отобраны равномерно из железобетонных элементов всех типоразмеров. В соответствии с требованиями ГОСТ 22690-2015, для построения градуировочной зависимости общее количество участков для выбуривания кернов должно быть не менее 12.

На первом этапе было отобрано по 4 керна из каждой партии (группы), и на этих же блоках были проведены испытания неразрушающим методом ударного импульса на участке, расположенном на расстоянии не более 100 мм от места отбора керна. Была рассмотрена гипотеза, что блоки всех типоразмеров изготавливались из одного состава бетона и по одной технологии, поэтому в соответствии с рекомендациями ГОСТ 22690-2015 оценили возможность построения одной градуировочной зависимости для всех блоков. Соответственно на первом этапе по результатам испытаний

образцов из кернов каждой партии была проведена оценка их принадлежности к одной совокупности.

Выбор метода определения марки по водонепроницаемости бетона основывался на том, что поскольку с большой степенью вероятности (с учетом предварительной оценки) поверхностный слой бетона блоков прокарбонизировал на значительную глубину, использование метода оценки водонепроницаемости по его воздухопроницаемости по ГОСТ 12730.5-2018 (Бетоны. Методы определения водонепроницаемости) не даст достоверных результатов об этом показателе для бетона внутренней части блоков. Поэтому была сделана оценка водонепроницаемости по методу мокрого пятна по ГОСТ 12730.5-84. Для испытаний на водонепроницаемость отбирали керны диаметром 150 мм. Длина отбираемого керна принимается такой, чтобы из него можно было изготовить образец высотой 150 мм, отрезав карбонизированную часть.

Для каждой группы железобетонных элементов на основании полученных результатов испытания, определяли средние значения каждой из контрольных характеристик.

На основании представленного расчетов и обоснований получаем матрицу инструментального контроля исследуемых элементов (таблица 2). Представленные объемы выборок являются статистически обоснованными и обеспечивают получение достоверных данных при минимальных трудозатратах.

Следует отметить, что представленный подход был успешно реализован при работе на зарубежном объекте. Для исключения разногласий перед проведением физических работ была разработана программа обследования, включающая подробное описание методики измерений и формы представления результатов. Программа была утверждена заказчиком, что исключает возможность возникновения конфликтных ситуаций, связанных с

появлением дополнительных вопросов при сдаче технического отчета и использованием предоставленных данных для принятия ответственного решения.

Таблица № 2

Результаты расчета количества измерений по контрольным параметрам

| Типоразмер | Общее количество блоков, шт. | Количество испытаний (не менее) | | | |
|------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|----------------------|
| | | прочность разрушающ им методом* | прочность неразрушающ им методом | водонепроницаемость методом мокрого пятна | глубина карбонизации |
| 1 | 1385 | 4 (12) | 140 | 4 | 4 |
| 2 | 444 | 4 (12) | 44 | 4 | 4 |
| 3 | 235 | 4 (12) | 24 | 4 | 4 |
| 4 | 136 | 4 (12) | 14 | 4 | 4 |

* указано количество испытаний (по 4) при условии построения одной градуировочной зависимости. В скобках (по 12) указано количество испытаний при условии построения индивидуальных градуировочных зависимостей для каждой партии (группы)

В результате проведенной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложенная статистически обоснованная методика определения минимально необходимого и достаточного количества измерений позволяет обоснованно снизить объем работ по инструментальному обследованию строительных конструкций (таблица 2) и может быть рекомендована к использованию.

2. Показано, что разработка на подготовительном этапе программы обследования строительных конструкций, включающем методику и обоснование выбора средств измерения и объемов инструментального контроля, повышает достоверность результатов.

Литература

1. Римшин В.И., Кецко Е.С., Кузина И.С. Методы определения прочности материалов в строительных конструкциях сооружений водоподготовки // Университетская наука. 2020. №1(9). С. 29-32.
 2. Штенгель, В.Г. Общие проблемы технического обследования неметаллических строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2010. №7(17). С. 4-9.
 3. Кириленко А.М. Диагностика железобетонных конструкций и сооружений. М.: Архитектура-С. 2013. 365 с.
 4. Еремин К.И., Павлова Г.А., Матвеюшкин С.А. Неразрушающий контроль при обследовании строительных конструкций объектов культурного наследия // Наука и безопасность. 2011. №2(12). С. 39-73.
 5. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
 6. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. –М.: Изд-во АСВ, 1998. 304 с.
 7. Осипов С.Н. Об оценке надежности результатов испытания физических свойств строительных материалов. Наука и техника. 2014. №5. С. 18-24.
 8. Тур В.В., Дереченник С.С. Критерии оценки соответствия прочности бетона в подходах европейских и американских стандартов. Вестник Брестского государственного технического университета. 2012. №1. С. 177-182.
 9. Rozenvasser G.R., Malikov S.S., Ushakov S. V., Duvansky A.V., Gunko V.I., Wunderlich T.A. Global Monitoring of the Technical Condition for the “Donbass Arena” Stadium // Geodetsky list. Zagreb, Lipang, 2014. pp. 123-142.
 10. Drukisa P., Gailea L., Pakrastinsa L. Inspection of public buildings based on risk assessment // Modern Building Materials. Structures and Techniques. December 2017. pp. 247-255.
-

References

1. Rimshin V.I., Kecko E.S., Kuzina I.S. Universitetskaja nauka. 2020. №1(9). pp. 29-32.
2. Kirilenko A.M. Diagnostika zhelezobetonnyh konstrukcij i sooruzhenij [Diagnostics of reinforced concrete structures and structures]. M.: Arhitektura-S. 2013. P. 365.
3. Shtengel', V.G. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. 2010. №7 (17). pp.4-9.
4. Eremin K.I., Pavlova G.A., Matvejushkin S.A. Nauka i bezopasnost'. 2011. №2(12). pp. 39-73.
5. Rzhanicyn A.R. Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost' [Theory of calculation of building structures for reliability]. M.: Strojizdat, 1978. P. 239.
6. Rajzer V.D. Teorija nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii [The theory of reliability in construction design]. M.: Izd-vo ASV. 1998. P.304.
7. Rozenvasser G.R., Malikov S.S., Ushakov S. V., Duvansky A.V., Gunko V.I., Shhunderlich T.A. Geodetsky list. Zagreb. Lipang. 2014. Pp. 123-142.
8. Drukisa P., Gailea L., Pakrastinsa L. Modern Building Materials. Structures and Technijaues. December 2017. pp. 247-255.
9. Osipov S.N. Nauka i tehnika. 2014. №5. pp.18-24.
10. Tur V.V., Derechennik S.S. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2012. №1. pp. 177-182.