

РАЗДЕЛ VII. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 691.32:620.179.16:006.057

МЕТОДИКА КОМБИНИРОВАНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ

СНЕЖКОВ Д. Ю.

Белорусский национальный технический университет

Известны различные подходы к решению задачи комбинирования неразрушающих методов определения прочности бетона в построечных условиях. В работах [8, 9] используется феноменологический подход: объединение производится путем построения двухпараметровых градуировочных зависимостей на основе экспериментальных данных лабораторных испытаний. В работах [5, 7] рассматривается возможность расчета весовых коэффициентов на основе анализа физических процессов лежащих в основе объединяемых методов.

При осуществлении сплошного технологического контроля прочности бетона большого количества однотипных железобетонных конструкций, например, монолитных колонн несущего каркаса здания, выборка данных проявляет статистическую устойчивость. Это дает шансы обнаружить взаимную корреляцию оценок прочности бетона совместным использованием комплементарных методов испытаний. В этом случае определенные преимущества можно ожидать от предлагаемой методики базирующейся на статистических критериях.

С таких же позиций можно рассматривать контроль протяженных изделий, например, плит перекрытий с целью выявления неоднородности по прочностным показателям по данным испытаний большого числа участков контроля.

Попытки использование статистических критериев для объединения нескольких неразрушающих методов в комплекс описаны в

[6]. Прочность комбинированного метода рассчитывается как средневзвешенная оценка объединяемых методов по формуле

$$f_c^* = \frac{\sum_i k_i \cdot f_{c,i}}{\sum_i k_i}, \quad (1)$$

Весовой коэффициент k_i для оценки прочности бетона i -м методом определялся как величина обратная дисперсии выборки, то есть

$$k_i = \frac{1}{s_i^2}, \quad (2)$$

Такая методика не учитывает возможную корреляцию ошибок оценок прочности объединяемых методов. Выполненные исследования [4, 5] показывают, что для ряда неразрушающих методов испытания бетона, в частности, методов индентирования и акустических методов наблюдается устойчивая отрицательная взаимная корреляция отклонений косвенных параметров от среднестатистических значений для узкого диапазона вариации прочности при одинаковых условиях испытаний.

Ниже рассмотрен алгоритм использующий в качестве критерия достижение минимального значения стандартного отклонения s оценки прочности комбинированным методом. В основу предлагаемого алгоритма определения весовых коэффициентов положена гипотеза снижения суммарного разброса результатов оценки прочности бетона комбинированным методом при определенном значении весового коэффициента k .

Оценку прочности бетона i -м методом можно выразить следующим образом

$$f_{c,i} = f_c + \Delta f_i, \quad (3)$$

где f_c – «истинная» прочность, которая может быть экспериментально определена стандартным методом по ГОСТ 10180, и к которой статистически сходятся оценки прочности i -го метода при градуировочных испытаниях;

Δf_c – случайная составляющая, обусловленная вариацией технологических факторов: состава, условий уплотнения, хранения и выдерживания бетонной смеси и др.

Дисперсия оценок прочности каждого из объединяемых методов содержит две составляющие: D_f – дисперсию «истинной прочности» f_c и $D_{\Delta f}$ – дисперсию отклонений оценок прочности каждым из методов от «истинной» прочности f_c .

$$D_{f,i} = D_f + D_{\Delta f,i}. \quad (4)$$

Составляющая D_f обусловлена вариацией прочности бетона в пределах контролируемых элементов и конструкций вследствие некоторых неизбежных различий в технологии проведения бетонных работ – неидентичностью условий укладки и уплотнения бетонной смеси в формы опалубки, различием температурного и влажностного режимов, и др. Составляющая $D_{\Delta f}$ – показатель вариации данных косвенного метода испытаний, зависящий от вариации соотношений физико-механических параметров бетона, например, из-за изменения соотношения его прочности, модуля упругости и динамической вязкости.

Анализ методики ориентирован на типичную пару объединяемых методов – ультразвукового импульсного по методике [1, 3] и метода упругого отскока по СТБ 2264 [2]. Для указанного случая

$$f_c^* = \frac{A \cdot f_{c,I} + B \cdot f_{c,U}}{A + B}. \quad (5)$$

Выражение (1, 5) можно привести к виду

$$f_c^* = \frac{f_{c,I} + k \cdot f_{c,U}}{1 + k} = \frac{f_{c,I}}{1 + k} + \frac{k \cdot f_{c,U}}{1 + k}, \quad (6)$$

где $k = B/A$.

Соответственно, выражение для составляющей дисперсии $D_{\Delta f}$ с учетом взаимной корреляции $D_{\Delta f}$ каждого из методов будет иметь вид

$$D_{\Delta f} = \frac{(S_I)^2}{(1 + k)^2} + \left(\frac{k}{1 + k} \right)^2 \cdot (S_U)^2 + 2 \cdot r \cdot S_I \cdot S_U \cdot \left[\frac{k}{(1 + k)^2} \right], \quad (7)$$

где S_I , S_U – стандартные отклонения соответствующей составляющей Δf_I и Δf_U ; $S_I^2 = D_{\Delta f,I}$; $S_U^2 = D_{\Delta f,U}$;

r – коэффициент линейной корреляции Δf_I и Δf_U .

Расчет k произведем исходя из равенства нулю производной $D_{\Delta r}$ по k

$$\frac{d}{dk} D_{\Delta} = \left[\frac{2 \cdot (S_U)^2 \cdot k}{(k+1)^2} - \frac{2 \cdot (S_I)^2}{(k+1)^3} - \frac{2 \cdot (S_U)^2 \cdot k^2}{(k+1)^3} + \frac{2 \cdot S_I \cdot S_U \cdot r}{(k+1)^2} - \frac{4 \cdot S_I \cdot S_U \cdot k \cdot r}{(k+1)^3} \right], \quad (8)$$

$$\frac{d}{dk} D_{\Delta} = 0$$

Аналитическое выражение для решения уравнения (8) имеет вид

$$k = \frac{(S_I)^2 - S_I \cdot S_U \cdot r}{(S_U)^2 - S_I \cdot S_U \cdot r} \quad (9)$$

Используя подстановку $S = S_U/S_I$ получим

$$k = \frac{1 - S \cdot r}{S^2 - S \cdot r} \quad (10)$$

Выражение (7) приобретет вид

$$D_{\Delta} = \frac{1}{(1+k)^2} + \left(\frac{k}{1+k} \right)^2 \cdot S^2 + 2 \cdot r \cdot S \cdot \left[\frac{k}{(1+k)^2} \right] \quad (11)$$

Решение (11) соответствует экстремуму дисперсии. Убедиться в том, что оно соответствует минимуму – в районе значений $0 \dots 1$ для k – можно по графикам (см. рисунки 1 и 2).

Для отрицательных значений коэффициента k дисперсия имеет точку разрыва ($k = -1$) и не имеет выраженного минимума. На рис. 2 выделена область значений $k = 0 \dots 3$. Характерным является постепенное сглаживание зависимости для $k > 1$. При $S < 0,8$ экстремум становится невыраженным, значение D асимптотически приближается к постоянному значению, зависящему от коэффициента корреляции. Рассмотренная методика комбинирования указанных методов апробирована на ряде объектов монолитного строительства г. Минска.

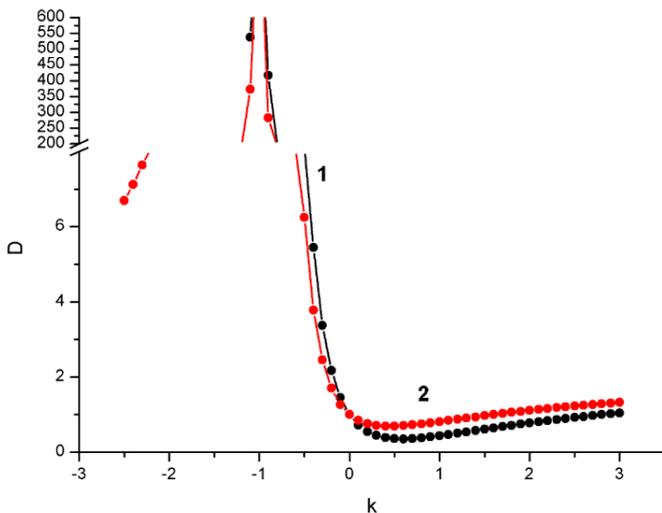


Рисунок 1. Зависимость дисперсии $D_{\Delta\Gamma}$ от коэффициента k :
 1 – для $S = 1,5, r = -0,5$; 2 – без учета корреляции

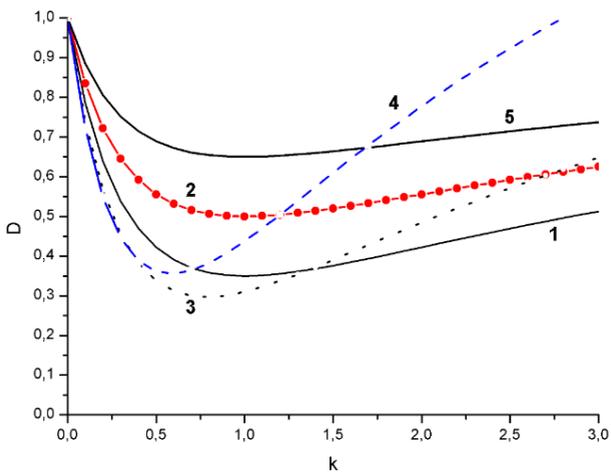


Рисунок 2. Зависимость дисперсии $D_{\Delta\Gamma}$ от коэффициента k :
 1 – $S = 1,0, r = -0,3$; 2 – $S = 1,0, r = 0$; 3 – $S = 1,2, r = -0,5$;
 4 – $S = 1,5, r = -0,5$; 5 – $S = 1,0, r = +0,3$

На основе репрезентативных выборок данных неразрушающих испытаний прочности монолитного бетона в построечных условиях произведен расчет весовых коэффициентов объединения метода упругого отскока и ультразвукового импульсного метода для бетона проектных классов по прочности С25/30 и С30/37. На рис. 3 показаны зависимость показателя рассеяния значений прочности от весового коэффициента k .

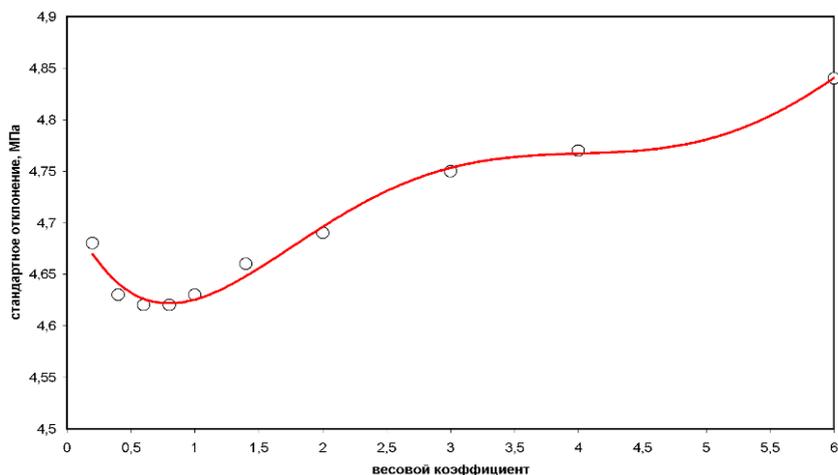


Рисунок 3. Зависимость стандартного отклонения оценок прочности бетона проектного класса по прочности С20/25 от значений весового коэффициента k

В таблице 1 приведены данные показателей вариации оценок прочности комбинированного метода и методов его образующих – метода упругого отскока по СТБ 2264 [2] и ультразвукового импульсного по методике [1, 3].

Испытывались образцы – кубы 100 x 100 x 100 мм из бетонов классов по прочности С20/25 и С30/37. Объем выборки данных испытаний $n = 130$.

Установлена закономерность снижения весового коэффициента K с повышением класса бетона по прочности от значений 0,6...0,8 до значений 0,2...0,4, что коррелируется с оценками весовых коэффициентов приведенных в [4, 5].

Таблица 1

Показатели вариации оценок прочности бетона

K=	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	2	2,5	3	4	5	6	7	8
Sx(all)	6,51	6,49	6,49	6,51	6,53		6,58		6,64		6,72	6,78		6,85		6,89
V	0,156	0,162	0,167	0,172	0,17		0,18		0,19		0,2	0,21		0,21		0,22

K=	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	2	2,5	3	4	5	6	7	8
Sx(25)	4,68	4,63	4,62	4,62	4,63		4,66		4,69		4,75	4,77		4,84		4,87
V	0,124	0,128	0,132	0,135	0,14		0,14		0,15		0,16	0,16		0,17		0,17

K=	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	2	2,5	3	4	5	6	7	8
Sx(37)	4,01	4,25	4,48	4,68	4,85		5,13		5,42		5,74	5,93		6,16		6,29
V	0,084	0,093	0,101	0,108	0,11		0,12		0,14		0,15	0,16		0,17		0,17

Минимальная дисперсия наблюдается для весового коэффициента $K = 0,4 \dots 0,8$, что также согласуется с данными [4, 5]. Наличие выраженного минимума на диаграммах (рис. 1) указывает на коррелированность отклонений оценок прочности Δf_c от «истинного» значения прочности (см. рис. 2, кривые 3 и 4).

Список использованных источников:

1. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-2012. – Введ. (в РБ) 01.01.2016. – М. : 2014. – 16 с.
2. Испытания бетона. Неразрушающий контроль прочности: СТБ 2264-2012 – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 20 с.
3. Методы контроля бетона в конструкциях. Часть 4. Определение скорости распространения ультразвукового импульса: СТБ EN 12504-4-2014 – Введ. 01.01.2015. Госстандарт, Минск, 2014. – 15 с.
4. Снежков, Д. Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович – Минск: БНТУ, 2016. – 330 с.
5. Снежков, Д. Ю. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 25 – 32. ISSN-0869-7019

6. Судаков, В. В. Контроль качества и надежности железобетонных конструкций / В. В. Судаков. – Л. : Стройиздат, 1980. – 166 с.

7. Leonovich, S.N. Complex metod of strength estimation of the monolithic reinforced concrete structures / S.N. Leonovich, D.U. Snezhkov // Concrete structures stimulators of development: proceedings of international FIB conference. – Dubrovnik, – 2007. – P. 947 – 954.

8. Pucinotti, R. Reinforced concrete structure: non-destructive in situ strength assessment of concrete, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 331 – 341.

9. Runkiewicz, L. Application of the Ultrasonic and Sclerometric Methods for the Assessment of the Structures Made of High-Strength Concrete (HSC) / L. Runkiewicz, M. Runkiewicz // [Electronic resource], 2003. – Mode of access: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/>. – Date of access: 24.12.2007.