УДК 534–8:620.111.3

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОД НАГРУЗКОЙ

И. И. Вайнштох, А. Я. Гойхман, В. С. Ямщиков

Возможности ультразвукового импульсного метода контроля прочности бетона в железобетонных изделиях далеко не полностью раскрыты и ограничены контролем качества бетона сравнительно невысокой прочности, известного состава (по предварительно построенным тарировочным зависимостям), без учета реальных особенностей его работы в конструкциях и сооружениях (напряженное состояние, армирование и т. д.) [1, 2].

Предлагается новый метод контроля качества бетона и железобетонных конструкций под нагрузкой, обеспечивающий контроль прочности бетона, трещиностойкости и сопротивления железобетонных конструкций разрушению при неизвестных составах бетона, в том числе и высокопрочного.

При нагружении неоднородного материала в нем даже при нагрузках, малых по сравнению с разрушающей, происходит образование и развитие микродефектов. Величина «наведенной» пористости определяется для каждого вида напряженного состояния только величиной приложенной нагрузки, т. е. силы, действующей на конструкцию. Количественно это можно описать функцией $h(P)$, такой, что изменение пористости материала $d\rho$ равно $h(P)\,dP$ при изменении нагрузки от P до $P+dP$. Тогда «наведенная» пористость $\Delta\rho$, возникающая в материале под действием нагрузки P, определяется выражением

$$\Delta\rho = \int_0^P h(x)\,dx. \tag{1}$$

Легко показать, что при хрупком разрушении материала под нагрузкой R (R – значение P, соответствующее моменту разрушения)

$$\lim_{P\to R} h(P) = \infty. \tag{2}$$

Это позволяет по известной функции $h(P)$ определять прочность материала. Для нахождения $h(P)$ следует воспользоваться зависимостью между скоростью распространения ультразвука и пористостью. С учетом малости изменения последней эта зависимость может быть представлена в виде

$$c = c_0(1-\alpha\Delta\rho), \tag{3}$$

где c и c_0 – скорости распространения ультразвука соответственно в пористом и исходном материалах, α – коэффициент, зависящий от свойств материала.

В работе [2] была получена зависимость скорости c распространения продольных упругих волн в бетоне от его пористости ρ на основании рассмотрения бетона как трехкомпонентной системы, включающей равномерно распределенные по объему поры, скелет материала и среду, эквивалентную скелету с включенными в него порами. Линеаризуя полученную в [2] зависимость c от $\Delta\rho$, имеем для α выражение:

$$\alpha = \frac{3}{4}\,\frac{1-\mu}{1-2\mu} + \frac{1}{2}\,(1-\mu)^2\left(\frac{10}{7-5\mu} - \frac{1}{1-2\mu}\right), \tag{4}$$

где μ – коэффициент Пуассона скелета.

Из формул (1) и (3) следует, что

$$\int_0^P h(x)\,dx = \frac{c_0-c}{\alpha c_0}. \tag{5}$$

Уравнение (5) дает возможность по изменению скорости ультразвука под нагрузкой определить $h(P)$, а следовательно, и значение разрушающей нагрузки P. Для практического применения целесообразно конкретизировать вид $h(P)$, привлекая сведения о механизме разрушения.

Введем функцию распределения локальной прочности материала $f(\sigma)$, такую, что $f(\sigma)\,d\sigma = d\rho$ – дополнительная пористость материала, возникающая при изменении среднего напряжения σ в скелете конструкции в каком-либо ее сечении. Среднее напряжение определим как

$$\sigma = F/(S-S_{\text{разр}}),$$

где F – сила, действующая в некотором сечении конструкции, S и $S_{разр}$ – соответственно площадь всего сечения и площадь возникших в нем пор. Теперь

$$\Delta\rho = \int_0^{\sigma} f(x)\,dx \tag{6}$$

и

$$P = k\sigma \int_0^{\infty} f(x)\,dx, \tag{7}$$

где k – коэффициент, зависящий от типа конструкции и схемы ее испытания, природа которого объясняется ниже.

Для сильно неоднородных сред функция $f(\sigma)$ может быть аппроксимирована функцией нормального распределения, т. е.

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} A \exp\left[-\frac{(\sigma-\sigma_0)^2}{2B^2}\right], \tag{8}$$

где A – нормировочный множитель.

Среднее и дисперсия нормального распределения, т. е. параметры материала σ_0 и B, определяются из (7) и аналогично (5):

$$\int_0^{\sigma} f(\sigma)\,d\sigma = \frac{c_0-c}{\alpha c_0}. \tag{9}$$

С достаточной для практики точностью можно положить

$$R = k(0{,}75\,\sigma_0 - 0{,}50\,B). \tag{10}$$

Измеряя при двух значениях нагрузки P_1 и P_2 (составляющих 20–60% от разрушающей) изменение скорости ультразвука, находим

$$\sigma_0 = \frac{P_1\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_2}{c_0}\right)t_2 - P_2\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_1}{c_0}\right)t_1}{k(t_2-t_1)\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_1}{c_0}\right)\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_2}{c_0}\right)}, \tag{11}$$

$$B = \frac{P_2\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_1}{c_0}\right) - P_1\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_2}{c_0}\right)}{k(t_2-t_1)\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_1}{c_0}\right)\left(1-\frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_2}{c_0}\right)}, \tag{12}$$

где $\Delta c_1 = c_0 - c_1$ и $\Delta c_2 = c_0 - c_2$ – изменения скорости распространения ультразвука при нагрузке P_1 и P_2 соответственно;

$$\operatorname{erf}(t_{1,2}) = \frac{1}{\alpha}\frac{\Delta c_{1,2}}{c_0} - 0{,}5.$$

Подставляя выражения (11) и (12) в (10), получим удобное выражение для определения разрушающей нагрузки R:

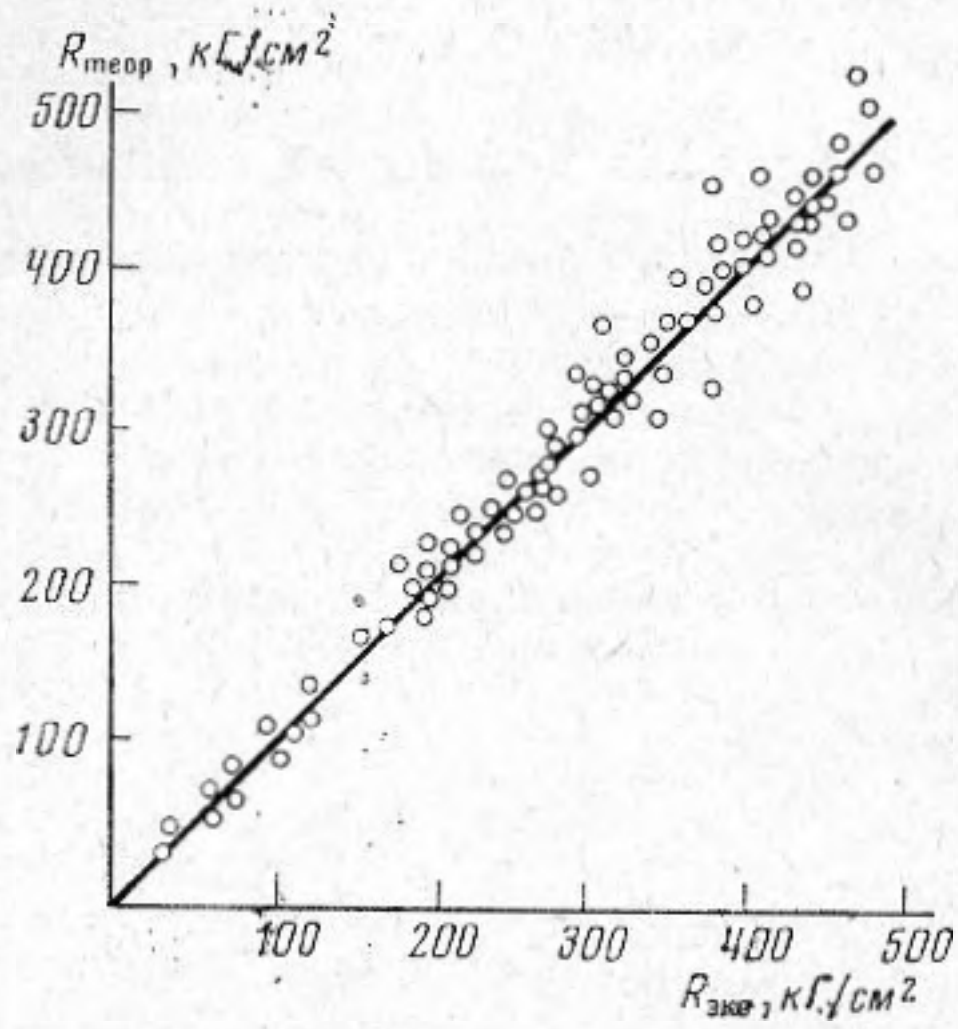
$$R = a_2 P_2 - a_1 P_1, \tag{13}$$

где коэффициенты a_1 и a_2 зависят практически только от относительных изменений скорости ультразвука, так как в большинстве случаев $\alpha = 0{,}5$. Эти коэффициенты для некоторых значений $\Delta c_1/c_0$ и $\Delta c_2/c_0$ приведены в таблице.

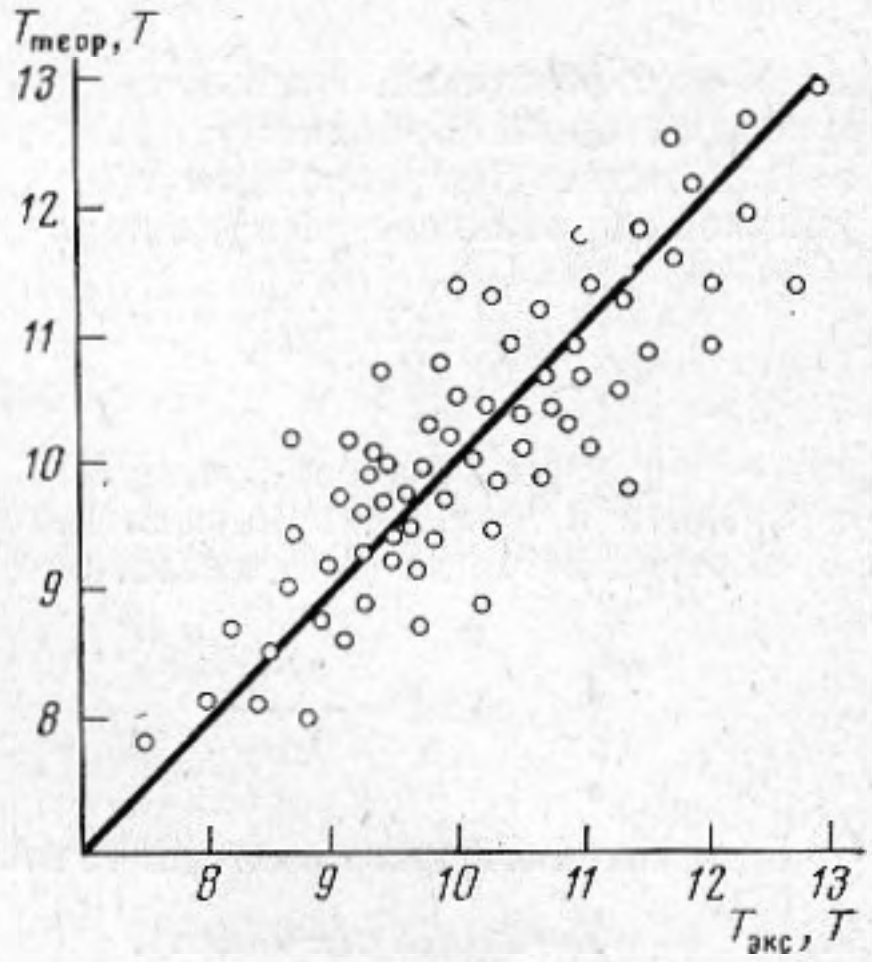
$\frac{\Delta c_1}{c_0}$, %	$\frac{\Delta c_2}{c_0}$, %	a_2	a_1	$\frac{\Delta c_1}{c_0}$, %	$\frac{\Delta c_2}{c_0}$, %	a_2	a_1	$\frac{\Delta c_1}{c_0}$, %	$\frac{\Delta c_2}{c_0}$, %	a_2	a_1
0,25	0,5	5,79	5,00	0,50	1,50	2.88	2,07	0,75	2,50	2,26	1,42
0,25	0,75	3,58	2,79	0,50	2,00	2,25	1,43	1,00	2,00	3,58	2,74
0,25	1,00	2,80	2,00	0,75	1,50	4,02	3,20	1,00	2,50	2,68	1,83
0,50	1,00	4,67	3,86	0,75	2,00	2,80	1,97	1,00	3,00	2,22	1,36

Экспериментальная проверка рассмотренного метода проводилась на бетонных образцах различной прочности и составов. Результаты, приведенные на фиг. 1, показывают, что метод может быть использован для контроля прочности бетона неизвестного состава, в том числе и бетона высокой прочности.

Предложенный метод позволяет определять прочностные характеристики конструкций с учетом особенностей работы материала (вид напряженного состояния, армирования и пр.). Эта возможность обусловлена тем, что изменение скорости ультразвука в рассматриваемом сечении связывается с интегральной нагрузкой, действующей на конструкцию, с помощью формального параметра k (см. уравнение



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Сравнение данных о разрушающих напряжениях для бетонных призм, полученных экспериментально на прессе ($R_{экс}$) и рассчитанных по формуле (13) ($R_{теор}$)

Фиг. 2. Сравнение экспериментальных ($T_{экс}$) и теоретических ($T_{теор}$) значений трещиностойкости железобетонных шпал

(7)), который характеризует соотношение между внешней нагрузкой и силой, действующей в рассматриваемом сечении, зависящее именно от условий работы материала в конструкции. Определяя максимальную силу, которая может быть воспринята сечением без разрушения, с помощью того же самого коэффициента k получим максимальное значение внешней нагрузки T. При этом сама величина k сокращается (см. уравнения (10) – (12)).

Для экспериментальной проверки этого положения были проведены исследования железобетонных шпал на трещиностойкость, т. е. определялось значение нагрузки T, при которой в конструкции возникли макротрещины. Известно, что трещиностойкость шпал в большой степени зависит от параметров армирования (расположение арматуры, натяжение и т. д.). Результаты, полученные описанным методом и приведенные на фиг. 2, показывают, что и в этом случае погрешность определения трещиностойкости не превышает 10–15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. *И. С. Вайншток, И. Э. Школьник, Ю. Н. Мизрохи, Л. В. Березницкий, Д. М. Цинцкиладзе.* Новое в методике определения прочности бетона ультразвуковым импульсным методом. Бетон и железобетон, 1972, 7, 15—17.
2. *И. С. Вайншток, И. Э. Школьник, Ю. Н. Мизрохи.* К методике определения прочности бетона ультразвуковым импульсным методом. Сб. тр. ВНИИжелезобетон, 1972, вып. 19, 134—138.

ВНИИжелезобетон, Москва

Поступила
23 декабря 1974 г.
После повторной доработки
31 октября 1975 г.