

**ОПИСАНИЕ
ИЗОБРЕТЕНИЯ
К ПАТЕНТУ**
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **20585**

(13) **С1**

(46) **2016.12.30**

(51) МПК

G 01N 33/38 (2006.01)

(54)

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА
В КОНСТРУКЦИИ**

(21) Номер заявки: а 20130687

(22) 2013.05.29

(43) 2014.12.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Снежков Дмитрий Юрьевич; Леонович Сергей Николаевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) СНЕЖКОВ Д. Ю. и др. Строительная наука и техника. - 2009. - № 4. - С. 76-84. ВУ 7929 С1, 2006.

RU 2262687 С1, 2005.

SU 1146593 А, 1985.

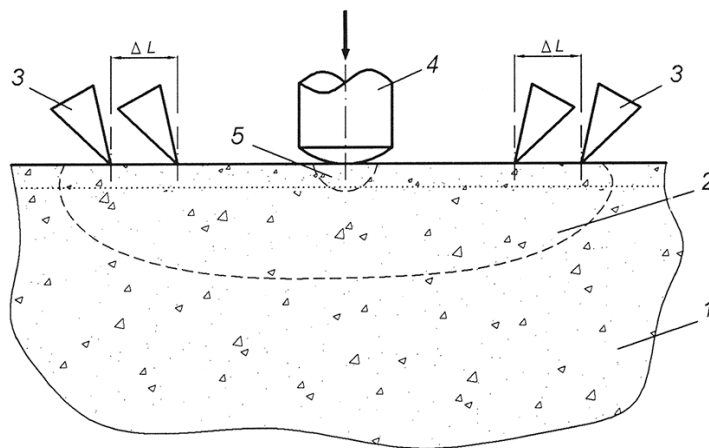
SU 1739291 А1, 1992.

DE 19856259 А1, 2000.

(57)

Способ определения прочности бетона в конструкции, в котором по поверхности бетона исследуемой конструкции наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией W и диаметром D контактного наконечника, строят временную диаграмму текущего значения скорости индентора V в процессе его взаимодействия с бетоном, определяют по ней максимальную предупредательную скорость индентора V_0 и скорость его отскока V_1 , строят диаграмму зависимости текущего значения действующей на индентор контактной силы P от глубины α его вдавливания в бетон с определением по ней максимального значения указанной контактной силы P_{\max} и остаточной глубины вдавливания α_r , рассчитывают твердость H поверхностного слоя бетона и выраженный в ГПа модуль его упругости E в соответствии с выражениями

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r};$$



Фиг. 1

ВУ 20585 С1 2016.12.30

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left(\frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где $k \approx 1,6$,

а также индекс отскока индентора I , далее последовательно пропускают через область индентирования ультразвуковые колебания, на каждом шаге увеличивая расстояние между их источником и приемником, установленным по другую сторону указанной области, на заданную величину ΔL и измеряя время их распространения ΔT , принимают в качестве скорости V_{yz} распространения ультразвука в бетоне, выраженной в $m \cdot s^{-1}$, максимальное из всех вычисленных отношений $\Delta L / \Delta T$, рассчитывают выраженный в ГПа показатель упругости E_V внутренней области конструкции в соответствии с выражением

$$E_V = 1,82 \cdot 10^3 V_{yz}^2,$$

далее по заранее построенным градуировочным зависимостям $f_{c,I} = \varphi(I)$ и $f_{c,V} = \psi(V_{yz})$ прочности бетона от указанных индекса и скорости находят соответствующие оценочные величины его прочности $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$, выраженные в МПа, а затем определяют выраженную в МПа искомую прочность f_c бетона на контролируемом участке конструкции путем совместного решения уравнений

$$f_c = \frac{1}{1 + \theta} \left(\theta \cdot e^{0,091(E_V - E)} f_{c,I} + f_{c,V} \right);$$

$$\theta = 0,0026f_c^2 - 0,115f_c + 2,79.$$

Изобретение относится к области строительства и может быть использовано на строительных объектах, заводах по изготовлению железобетонных изделий, а также при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений для неразрушающего определения прочности тяжелого бетона в бетонных и железобетонных конструкциях и изделиях.

Известен ультразвуковой способ контроля прочности бетона в конструкциях и сооружениях в процессе эксплуатации [1], включающий измерение времени и скорости распространения ультразвука не менее чем в десяти участках контролируемой зоны конструкции, вычисление средней и максимальной скоростей ультразвука в контролируемой зоне, выбуривание в конструкции и испытание кернов с последующим определением значений прочностей в участках, имеющих соответственно среднее и максимальное значение скорости ультразвука, а также расчетное определение прочности бетона на сжатие в участках контролируемой зоны конструкции, при этом определяют влажность бетона в намеченных участках конструкции и устанавливают среднюю и максимальную влажности бетона в контролируемой зоне, а прочность бетона по классу прочности на сжатие до B25 рассчитывают из выражения

$$R = \bar{R}_\phi \cdot \left[\frac{C_j (1 - 0,00069 W_j^{3,1})}{\bar{C} (1 - 0,00069 \bar{W}^{3,1})} \right]^4,$$

где R - прочность бетона в j -м участке контролируемой зоны, МПа;

\bar{R}_ϕ - средняя прочность бетона в контролируемой зоне конструкции, МПа;

C_j - скорость распространения ультразвука в j -м участке контролируемой зоны, м/с;

\bar{C} - средняя скорость распространения ультразвука в бетоне контролируемой зоны, м/с;

W_j - влажность бетона в j -м участке контролируемой зоны, мас.%;

\bar{W} - средняя влажность бетона в контролируемой зоне, мас.%;

ВУ 20585 С1 2016.12.30

и для бетонов по классу прочности на сжатие выше В 25 устанавливают по формуле

$$R = R_{ф.макс} \cdot \frac{C_j(1 - 0,00069W_j^{3,1})}{8,87C_{макс}(1 - 0,00069W_{макс}^{3,1}) - 7,87C_j(1 - 0,00069W_j^{3,1})},$$

где $R_{ф.макс}$ - максимальная прочность бетона в контролируемой зоне, МПа;

C_j - скорость распространения ультразвука в j -м участке контролируемой зоны, м/с;

$C_{макс}$ - максимальная скорость распространения ультразвука в контролируемой зоне, м/с;

$W_{макс}$ - максимальная влажность бетона в контролируемой зоне, мас. %.

Недостатками известного способа являются: значительные время- и трудозатраты при выбуривании и испытании кернов; нанесение значительных повреждений испытываемой конструкции выбуриванием кернов, что не позволяет применять этот способ многократно для элементов конструкций малой площадью сечения. Кроме того, указанному известному способу присущ общий недостаток ультразвукового метода определения прочности бетона по градуировочным зависимостям: зависимость косвенного показателя - скорости распространения ультразвука - от модуля упругости, который однозначно не определяется прочностью бетона. В то же время модуль упругости и прочность бетона в разной степени зависят от вариации технологических и эксплуатационных факторов бетона: состава бетонной смеси, условий укладки и уплотнения в форму опалубки, термического и влажностного режимов выдерживания при твердении и др., что при определении прочности по скорости распространения ультразвука будет приводить к дополнительным погрешностям. В указанном способе учитывается лишь влияние вариации влажности бетона.

Известен способ определения прочности бетона методом неразрушающего контроля [2] с предварительным установлением градуировочной зависимости прочности бетона от соотношения диаметров отпечатков на бетоне и эталонном стальном стержне $R = f(H)$, включающий последовательную установку отпечатков на бетоне и на эталонном стержне между линейками углового масштаба со шкалой до совпадения их крайних точек с делениями шкалы в точке их касания с последующим определением прочности, при этом градуировочную зависимость $R = f(H)$ с началом и концом отсчета наносят на мерительную часть углового масштаба, отпечаток на бетоне помещают у конца отсчета шкалы, совпадения делений конца отсчета шкалы с крайними точками отпечатка на бетоне достигают изменением углового положения линеек относительно друг друга, полученное угловое положение линеек углового масштаба фиксируют, затем отпечаток на эталонном стержне устанавливают до совпадения крайних точек отпечатка на стержне с делениями шкалы, а о величине прочности судят по расположению диаметра отпечатка на стержне относительно делений шкалы углового масштаба.

Недостатком данного способа является высокая погрешность определения прочности бетона контролируемой зоны вследствие различий упруго-прочностных свойств тонкого приповерхностного слоя бетона и остального бетонного массива, а также подверженность оценки прочности влиянию вариации упругих свойств бетона, которые в данном способе не принимаются во внимание.

Наиболее близким аналогом к заявляемому объекту является способ определения твердости и модуля упругости бетона [3], заключающийся в том, что наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией W по бетонной конструкции, записывают диаграмму изменения текущих значений скорости индентора V от времени t в процессе удара, получают по данным диаграммы $V = f(t)$ диаграмму зависимости значений контактной силы P от глубины вдавливания индентора α , определяют по диаграмме $V = f(t)$ максимальную предупредительную скорость индентора V_0 и скорость отскока индентора V_1 , а по диаграмме $P = f(\alpha)$ - максимальную контактную силу $P_{макс}$ и остаточную глубину вдавливания α_r , определяют твердость бетона H и модуль упругости бетона E в соответствии с выражениями

BY 20585 C1 2016.12.30

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r};$$

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left(\frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где D - диаметр контактного наконечника индентора;

k - коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала индентора, $k \approx 1,6$.

Недостатками прототипа являются следующие факторы.

1. Высокая погрешность определения твердости и модуля упругости бетона в контролируемой зоне конструкции вследствие различий упруго-прочностных свойств тонкого 5-15 мм приповерхностного слоя бетона и внутренних областей бетонного массива. Указанное различие свойств бетона обусловлено главным образом различием условий уплотнения внешних и внутренних слоев бетонной смеси при ее укладке в форму опалубки, а также различием и нестабильностью условий тепло- и влагообмена внутренних и внешних областей твердеющего бетона конструкции при его выдерживании из-за колебаний температуры, влажности и интенсивности движения окружающего воздуха. Оценки физико-механических свойств бетона поверхностного слоя конструкции будут искажены, соответственно, и итоговые оценки твердости и модуля упругости массива бетона контролируемой зоны конструкции приобретут дополнительную погрешность.

2. Низкая информативность определения прочностных свойств бетона. Твердость бетона H и модуль упругости E косвенно являются характеристиками прочностных свойств бетона, но твердость бетона H не является характеристикой эквивалентной прочности бетона, и для оценки несущей способности бетонной конструкции или элемента конструкции она не используется. В прототипе определение твердости бетона H является промежуточной операцией, позволяющей увеличить точность определения модуля упругости бетона E .

Задача, решаемая заявляемым способом, заключается в повышении точности и достоверности определения прочности бетона железобетонных и бетонных конструкций.

Поставленная задача решается тем, что в способе определения прочности бетона в конструкции, в котором по поверхности бетона исследуемой конструкции наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией W и диаметром D контактного наконечника, строят временную диаграмму текущего значения скорости индентора V в процессе его взаимодействия с бетоном, определяют по ней максимальную предупредительную скорость индентора V_0 и скорость его отскока V_1 , строят диаграмму зависимости текущего значения действующей на индентор контактной силы P от глубины α его вдавливания в бетон с определением по ней максимального значения указанной контактной силы P_{\max} и остаточной глубины вдавливания α_r , рассчитывают твердость H поверхностного слоя бетона и выраженный в ГПа модуль его упругости E в соответствии с выражениями

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r};$$

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left(\frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где $k \approx 1,6$,

а также индекс отскока индентора I , далее последовательно пропускают через область индентирования ультразвуковые колебания, на каждом шаге увеличивая расстояние между их источником и приемником, установленным по другую сторону указанной области, на заданную величину ΔL и измеряя время их распространения ΔT , принимают в качестве

BY 20585 C1 2016.12.30

скорости V_{yz} распространения ультразвука в бетоне, выраженной в $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, максимальное из всех вычисленных отношений $\Delta L/\Delta T$, рассчитывают выраженный в ГПа показатель упругости E_V внутренней области конструкции в соответствии с выражением

$$E_V = 1,82 \cdot 10^3 V_{yz}^2,$$

далее по заранее построенным градуировочным зависимостям $f_{c,I} = \varphi(I)$ и $f_{c,V} = \psi(V_{yz})$ прочности бетона от указанных индекса и скорости находят соответствующие оценочные величины его прочности $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$, выраженные в МПа, а затем определяют выраженную в МПа искомую прочность f_c бетона на контролируемом участке конструкции путем совместного решения уравнений

$$f_c = \frac{1}{1+\theta} \left(\theta \cdot e^{0,091(E_V-E)} f_{c,I} + f_{c,V} \right);$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79.$$

Сущность изобретения поясняется фигурами.

На фиг. 1 приведена схема выполнения измерений: 1 - контролируемое изделие; 2 - область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 - излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 - индентор; 5- область индентирования бетона.

На фиг. 2 приведена диаграмма зависимости силы индентирования P от внедрения индентора α .

На фиг. 3 приведена диаграмма зависимости скорости индентора V от времени t .

Способ осуществляют следующим образом. Измерение скорости распространения ультразвукового импульса V_{yz} на участке контроля осуществляют таким образом, чтобы область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику включала в себя область индентирования. Процедура ультразвуковых измерений состоит в профилировании участка контроля - последовательной перестановке излучателя и/или приемника ультразвука по линии профилирования на поверхности участка контроля с шагом $\Delta L = 2\lambda \dots 3\lambda$, где λ - длина волны основной моды ультразвуковых колебаний, и регистрации приращения времени распространения ультразвука ΔT на каждом шаге профилирования. В качестве значения скорости распространения ультразвука на участке контроля принимают наибольшее из массива значений $\Delta L/\Delta T$, полученных по результатам профилирования участка контроля. Индекс отскока I определяют по формуле

$$I = (V_1/V_0)^2,$$

где V_0 - скорость подлета индентора к бетонной поверхности в момент ее касания (фиг. 3);

V_1 - скорость отскока индентора от бетонной поверхности в момент выхода из контакта.

Рассмотрим пример реализации предлагаемого способа определения прочности бетона в конструкциях. На поверхности контролируемой конструкции - монолитной плиты перекрытия толщиной 250 мм из бетона проектного класса по прочности С25/30 - производим разметку точки индентирования и позиций установки ультразвуковых преобразователей участка контроля: точки установки преобразователей размечаем на прямой линии симметрично относительно точки индентирования, с шагом 50 мм. В точку индентирования производим удар индентором массой $m = 0,164$ кг с кинетической энергией $W = 1,61$ Дж. Регистрируем скорость движения индентора V . Зависимость скорости движения индентора V от времени t представлена на фиг. 2. Предударная скорость $V_0 = 4,43$ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, скорость отскока $V_1 = 1,86$ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. Процессором производится обработка диаграммы $V = f(t)$, в результате получаем диаграмму зависимости контактной силы от глубины вдавливания индентора $P = F(\alpha)$, представленную на фиг. 3, из которой определяем значения максимальной силы $P_{\max} = 9,02$ кН и остаточной глубины вдавливания индентора $\alpha_r = 357$ мкм. Вычисляем значения твердости

BY 20585 C1 2016.12.30

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r} = \frac{9020}{3,1416 \cdot 0,029 \cdot 357 \cdot 10^{-6}} = 277,3 \text{ МПа}$$

и модуля упругости

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left(\frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}} = 1,6 \cdot 277,3^{\frac{5}{4}} \left(\frac{4,43}{1,86} \right)^2 \left(\frac{0,029^3}{1,61} \right)^{\frac{1}{4}} = 20,3 \text{ ГПа.}$$

Рассчитываем индекс отскока

$$I = (V_1 / V_0)^2 = \left(\frac{1,86}{4,43} \right)^2 = 0,176.$$

Определяем значения времени распространения ультразвука, одновременно меняя позиции установки излучающего и приемного преобразователей с шагом 5 см таким образом, что приращение базы измерения $\Delta L = 0,1$ м. В таблице приведены значения времени распространения ультразвука T и расчетные значения скорости $V_{уз}$.

База L , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Время T , мкс	25,9	51,6	77,2	103,4	130,3
ΔL , м	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
ΔT , мкс	25,9	25,7	25,6	26,2	26,9
$V_{уз}$, м·с ⁻¹	3861	3891	3906	3816	3717

В качестве значения скорости распространения ультразвука принимаем $V_{уз} = 3906$ м·с⁻¹. Рассчитываем показатель упругости E_v

$$E_v = 1,82 \cdot 10^3 \cdot V_{уз}^2 = 1,82 \cdot 10^3 \cdot 3906^2 = 27,77 \text{ ГПа.}$$

По градуировочным зависимостям определяем оценки прочности бетона $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$

$$f_{c,I} = \varphi(I) = 6,97e^{5,58 \cdot I} = 6,97 \cdot e^{5,58 \cdot 0,177} = 19,5 \text{ МПа;}$$

$$f_{c,V} = \psi(V_{уз}) = 10^{-9} V_{уз}^{2,902} = 10^{-9} \cdot 3906^{2,902} = 26,5 \text{ МПа.}$$

Определяем прочность бетона f_c из системы уравнений

$$\begin{cases} f_c = \frac{1}{1+\theta} (\theta \cdot e^{0,091(E_v-E)} f_{c,I} + f_{c,V}) = \frac{1}{1+\theta} [\theta \cdot e^{0,091(27,77-20,3)} \cdot 19,5 + 26,5] \\ \theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79 \end{cases}$$

Решаем систему уравнений относительно переменных f_c и θ , получаем $f_c = 34,4$ МПа; $\theta = 1,905$.

Испытание бетона в зоне контроля альтернативными методами - отрыва со скалыванием - и испытаниями образцов-кернов дало следующие значения прочности:

$f_c = 31,1$ МПа - для метода отрыва со скалыванием,

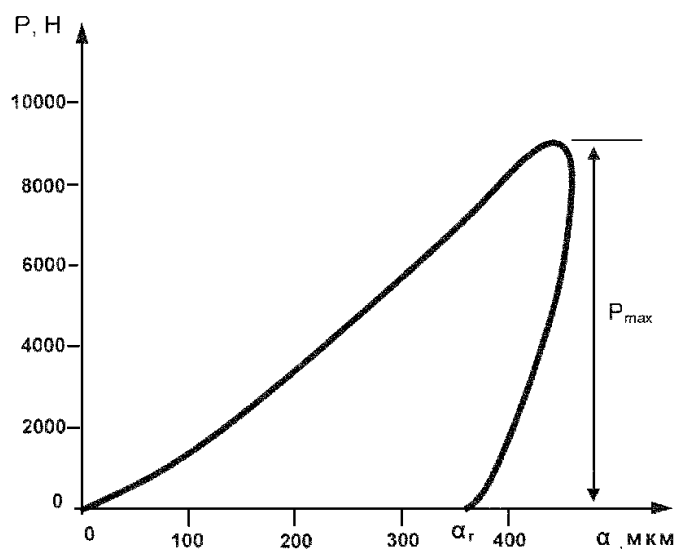
$f_c = 37,3$ МПа - для испытаний образцов-кернов.

По отношению к оценке прочности, полученной испытаниями кернов, погрешность определения прочности предлагаемым методом составила $\Delta f_c = 37,3 - 34,4 = 2,9$ МПа, что значительно меньше, чем для ультразвукового метода - $\Delta f_c = 37,3 - 26,5 = 10,8$ МПа; и $\Delta f_c = 37,3 - 19,5 = 17,8$ МПа для метода упругого отскока.

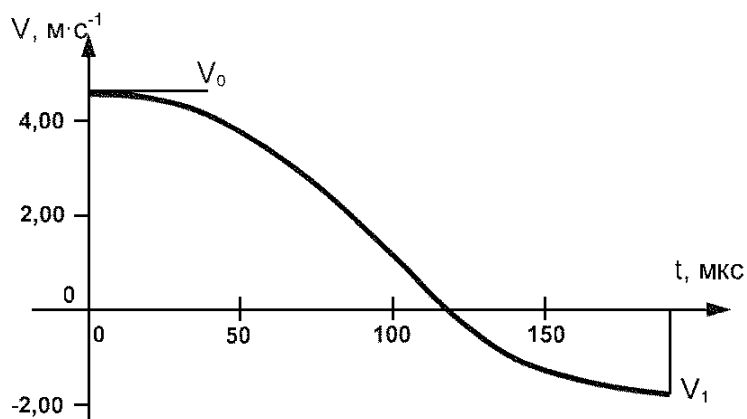
Положительный эффект данного способа достигается за счет того, что оценка прочности бетона осуществляется с учетом различий упруго-прочностных свойств поверхностного слоя бетона и его внутренних областей, и компенсацией влияния вариации модуля упругости бетона на оценку прочности. Учет осуществляется произведением частной оценки прочности методом индентирования $f_{c,I}$ на поправочный коэффициент $k = \theta \cdot e^{0,091(E_v-E)}$ и объединением ее с оценкой прочности ультразвуковым методом $f_{c,V}$ с учетом коэффициента влияния θ .

Источники информации:

1. Патент RU 2262692, МПК G 01 N 29/04, 2005.
2. Патент RU 2145070, МПК G 01N 3/00, 3/02, 3/32, G 01 B 3/02, 2000.
3. Снежков Д.Ю. Строительная наука и техника. - 2009. - № 4. - С. 76-84.



Фиг. 2



Фиг. 3