

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 534.833.(26)

Ю. А. Гаспарян

Техническая диагностика бетонных покрытий автодорог
с использованием акустического метода

(Представлено академиком НАН Армении Б. К. Карапетяном 24/IX 1996)

В бетонных покрытиях автодорог относительно большие деформации проявляются перед моментом разрушения, поэтому возникает необходимость найти методы, позволяющие производить диагностирование, т.е. проверку технического состояния не только при наличии разрушений, но и в начальной стадии возникновения и развития микротрещин. Существующий механическо-склерометрический разрушающий метод проверки технического состояния бетонных покрытий, регламентированный ГОСТ 22690-88 и основанный на пластической деформации при статическом вдавливании в образцы, имеет ряд недостатков.

В конструкциях бетонных покрытий автодорог механические разрушающие методы позволяют приближенно определять прочностные характеристики. Поэтому возникает необходимость объективного определения прочности бетонного покрытия, что может быть сделано, например, по скорости распространения акустических поверхностных волн, в частности, продольных, поперечных сдвиговых и изгибных. Продольное волновое распространение в покрытии можно рассматривать в виде уравнения второго порядка ⁽¹⁾

$$\frac{\partial^2 l(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 l(x, y, t)}{\partial y^2} - \frac{M}{ES} \cdot \frac{\partial^2 l(x, y, t)}{\partial t^2} = 0; \frac{ES}{M} = c_E^2; \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi_0 e^{j(\omega t - kx)}; P = P_0 e^{j(\omega t - kx)}; \Phi = P(j\omega\rho)^{-1}.$$

Для описания затухающих волн в покрытии можно использовать уравнение (1) в виде

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} - \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} = 0; E = E_x + jE_y; \frac{E}{\rho} = \left(\frac{\omega}{k} \right)^2 = \frac{\omega^2}{(k - j\alpha)^2}. \quad (2)$$

В случае рассмотрения модуля упругости как сопротивления, характеризующегося активными (диссипативными) и реактивными компонентами импедан-

са, представляющими собой комплексную величину, уравнение скорости распространения волн приобретает следующий вид:

$$c_E^2 = \frac{E}{\rho} = \frac{E_x}{\rho} + j \frac{E_y}{\rho} = \frac{\omega^2}{\left(\frac{\omega}{c} - \alpha j\right)^2}; \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha}{k} = -\frac{\alpha c}{\omega};$$

$$k_E = k - j\alpha = k \left[1 + \left(\frac{\alpha}{k} \right)^2 \right] e^{-j\psi} = \omega \left[1 + \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right] e^{-j\psi} / c. \quad (3)$$

Уравнения (2), (3) можно решить относительно волнового числа и коэффициента затухания $k, \alpha(f)$ в зависимости от действительных и мнимых величин модулей упругости бетонного покрытия

$$k = \frac{\omega}{c} = \left[\frac{\omega^2 \rho (\varphi - 1)}{2\varphi^2 E_x} \right]^{0,5}; \quad \alpha(f) = \left[\frac{\omega^2 \rho (\varphi + 1)}{2\varphi^2 E_x} \right]^{0,5}; \quad \varphi = \frac{E_y}{E_x};$$

$$E_x = \frac{\omega^2 \rho (k^2 - \alpha^2)}{(k^2 + \alpha^2)^2}; \quad E_y = \frac{2\omega^2 \rho \alpha k}{(k^2 + \alpha^2)^2}. \quad (4)$$

Заменяя k на ω / c , получим, что, измеряя скорость распространения упругой волны и коэффициент затухания $\alpha(f)$, можно вычислить динамический комплексный модуль упругости покрытия

$$E_x = \rho c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right]^{-2}; \quad E = 2\rho c^2 \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right) \left[1 + \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right]^{-2}.$$

При малом затухании $(\alpha c / \omega)^2 \ll 1$ имеем

$$E_x = \rho c^2; \quad E_y = 2\rho c^2 \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right); \quad E_{x,y} = \rho c^2 \left[1 + 2j \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right) \right]. \quad (5)$$

При инженерных методах расчета акустических параметров бетонного покрытия автодорог возникает необходимость решения обратной задачи, т.е. определения физико-технических параметров скорости продольных волн и коэффициента затухания в зависимости от прочности, динамического модуля упругости, объемной плотности и т.д.; в этом случае можно воспользоваться предыдущими величинами уравнений (4), (5), тогда

$$c_x = \left(\frac{E_x}{\rho} \right)^{0,5}; \quad c_y = \left(\frac{0,5\omega E_y}{\rho \alpha} \right)^{1/3}; \quad \alpha(f) = \frac{0,5\omega E_y}{\rho c_y^3}. \quad (6)$$

На практике при определении диссипативных потерь скорости затухания в бетонных покрытиях автодорог приходится пользоваться шириной резонансной кривой частотной характеристики скорости затухания, т.е. добротностью

колебательной системы, что представляет собой отношение $Q = E_x / E_y = 0,5\omega(c\alpha)^{-1}$.

Согласно величинам (3), (6), с учетом коэффициента сжатия в поперечном и продольном направлениях, скорость распространения продольной волны в покрытии несколько меньше, чем в неограниченной среде, и равна

$$c_E^2 = \frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}; \quad c_E^2 = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \approx \frac{E}{\rho}. \quad (7)$$

Для установления зависимостей между физико-техническими акустическими величинами скорости распространения поверхностных волн и геометрическими параметрами можно воспользоваться задачей о деформационных процессах для случая покрытия на упругом основании, нагруженного сосредоточенной силой от колес автомобиля. При воздействии силовой нагрузки от колес автомобиля происходит растяжение и сжатие по толщине покрытия, вследствие чего возникают изгибные поверхностные волны, характеризующиеся уравнением движения

$$\frac{\partial^4 l(x, y, t)}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 l(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 l(x, y, t)}{\partial y^4} = \frac{P(q) - k_n l(x, y, t)}{D}. \quad (8)$$

Функции воздействия внешних сил и граничные условия решения для свободно опертых краев покрытия могут иметь следующий вид:

$$l(x, y) = \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{mn} \sin(k_m x) \sin(k_n y);$$

$$q = \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn} \sin(k_m x) \sin(k_n y); \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial^2 l(x, y, t)}{\partial x^2} \right|_{x=0,a} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 l(x, y, t)}{\partial y^2} \right|_{y=0,b} = 0.$$

Здесь P – внешняя сосредоточенная сила или давление от колес автомобиля (кгс/см²), ρ, l – плотность и длина исследуемого покрытия; $q = \omega^2 M_s / D$ – равномерно распределенная нагрузка по поверхности автодорожного покрытия $D = EI$; D – цилиндрическая изгибная жесткость покрытия (кг·см), E – модуль упругости; I – инерционный момент; k_n – жесткость поперечных связей, отнесенная к единице упругого прогиба:

$$k_n = \frac{F(P)}{l(x, y, t)} \left[\frac{\text{кг с / с м}^2}{\text{с м}} \right]; \quad D = EI = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}. \quad (10)$$

Для прямоугольного сечения покрытия $I = bh^3 / 12$ $c_{E,G,U}$ – скорости распространения продольных E , поперечных G , изгибных и акустических волн; k, k_m, k_n – волновые параметры продольных m и поперечных n мод колеба-

ний; μ, η — коэффициенты поперечного и продольного сжатия и внутреннего трения.

Если рассматривать упругий прогиб $l(x, y, t)$ и распределение заданной нагрузки $q(x, y, t)$ по всей поверхности покрытия в виде синусоидальных величин, тогда реакция основания автодорожного покрытия будет характеризоваться коэффициентом постели и прогибом

$$F = k_n l(x, y, t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \sum A_{mn} k_n \sin \frac{\pi m x}{a} \sin \frac{\pi n y}{b}; \quad (11)$$

$$F_{\max} = k_n l_{\max} = \frac{P}{8} \left(\frac{k_n}{D} \right)^{0,5}; \quad l_{\max} = \frac{P}{8} (KD)^{-0,5}; \quad (12)$$

$$\frac{k_n}{D} = \frac{6E_{\text{осн}}(1-\mu_n^2)}{E_n(1-\mu_{\text{осн}}^2)}; \quad k_n = \frac{E_{\text{осн}}}{2(1-\mu_{\text{осн}}^2)}.$$

Механические свойства диссипативных потерь характеризуются силами упругости — $F_{\text{упр}} = kA$, трения $F_{\text{тр}} = \mu V$ и добротностью резонансной системы, т.е. отношением $Q = kA / v\eta$. Учитывая, что скорость равна $v = \omega A$ и

коэффициент жесткости $k = \omega^2 M$, получим $Q = \frac{\omega M}{\eta} = \left(\frac{Mk}{\eta} \right)^{0,5}$. Время за-

тухания в этом случае равно $t = Q / \omega = M / \eta$.

При изгибных процессах скорость распространения волны зависит от жесткости материала D , толщины h , частоты f и равна

$$k_{\text{изг}}^4 = \frac{\omega^2 M}{D}; \quad k_u = \frac{\omega}{c_u}; \quad c_{\text{изг}} = \left(\frac{\omega^2 D}{M_s} \right)^{0,25} = \left(\frac{\omega^2 EI}{M_s(1-\mu^2)} \right)^{0,25}; \quad (13)$$

$$\frac{h}{\lambda_E} = \frac{hf}{c_{\text{изг}}}; \quad c_{\text{изг}} = (1,8c_E hf)^{0,5}; \quad \lambda_{\text{изг}} = 1,8c_E hf^{-1}.$$

Зная скорость распространения упругих волн — $c_{E,G}$, частоту f и амплитуду $A_{n,n-1}$, получим коэффициент затухания звуковой энергии и его логарифмический декремент

$$\alpha_{E,G}(f) = \delta f / c_{E,G}; \quad \delta = \ln(A_n / A_{n-1}). \quad (14)$$

По скорости распространения продольных и изгибных волн в бетонном покрытии можно определить действительную динамическую изгибную жесткость

$$D_u = EJ = \frac{E}{\rho(1-\mu^2)} \cdot \frac{\rho h^3}{12} = J\rho c_E^2; \quad D_u = \left(\frac{E}{2\pi} \right)^2 \frac{h}{\rho} f_{\text{изг}}^{-2};$$

$$D_u = \frac{Mc_{\text{изг}}^4}{\omega^2} = \frac{\omega^2 M}{k^4} = \frac{(\omega E)^2 h}{\omega^4 \rho^2} = \left(\frac{E}{\omega} \right)^2 \frac{h}{\rho}; \quad (15)$$

$$k = \omega \left(\frac{\rho}{E} \right)^{0.5} ; D_u = \frac{P_k D_k h^3}{3 f_p^2} .$$

Таким образом, основными диагностическими акустическими параметрами, характеризующими техническое состояние бетонных покрытий автодорог, являются скорость распространения и затухания упругих поверхностных продольных, поперечных и изгибных волн, резонансная частота, а также диссипативные потери, т.е. добротность колебательной системы скорости затухания звуковой энергии.

Принцип диагностирования акустическим методом основан на определении скорости распространения упругих волн. При наличии дефектного поверхностного слоя и изменения плотности покрытия скорость распространения волны уменьшаются, причем не столько из-за изменения упругих характеристик, сколько вследствие чувствительности скорости антисимметричных волн нулевого порядка к толщине слоя, в котором они распространяются. Упругая волна, встречая расположенный на своем пути дефект, огибает его и, проходя при этом большее расстояние, приходит к приемнику колебаний с отставанием по фазе. По изменению фазы волны в точке приема и резкому уменьшению скорости распространения продольной и изгибной волны можно судить о наличии зоны нарушения (дефектов) в бетонном покрытии.

Ереванский архитектурно-строительный институт

Յու. Ա. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Ավտոճանապարհների բետոնե ծածկերի տեխնիկական ախտորոշումը ակուստիկ եղանակով

Աշխատանքում դիտարկված են ավտոճանապարհների բետոնե ծածկերի տեխնիկական վիճակի ստուգման գոյություն ունեցող մեխանիկական քայքայման եղանակի թերությունները, ինչպես նաև առաջարկված նոր եղանակների առավելությունները: Բերված է ակուստիկ պարամետրերի՝ առաձգական ալիքների տարածման արագությունների վրա ազդող դեֆորմացիոն պրոցեսների հաշվարկի տեսական մեթոդ:

Ստացված է, որ բետոնե ծածկերի խափանումների հայտանիշների ախտորոշման և մնացորդային ռեսուրսի կանխատեսման օբյեկտիվ եղանակներից է ակուստիկ եղանակը, որը հիմնված է երկայնական, լայնական և ծռման առաձգական ալիքների տարածման արագությունների չափման վրա: Ախտանիշը սահմանվում է իրական մեծությունների ամբողջությունների սեղմման և ձգման ժամանակ (տես (5,15)) նկարագրված է ախտորոշման սկզբունքը, որի հիման վրա կարելի է ստեղծել ավտոճանապարհային ծածկերի տեխնիկական վիճակի ակուստիկ եղանակով ստուգման սարք:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Ю.А.Гаспарян, ДНАН Армении, т.98, №2, с.142-148 (1998).