

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МНОГОВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ

Снежков Д.Ю., канд. техн. наук, доцент, Энезия П., аспирант (БНТУ)

Аннотация. Мультиволновой контроль позволяет улучшить метрологические показатели и повысить информативность ультразвукового метода прохождения при определении физико-механических свойств бетона. В статье рассматривается возможность совместного использования продольных поверхностных волн и волн Релея для определения динамического коэффициента Пуассона бетона конструкций в натуральных условиях, приведены практические результаты.

Использование акустических волн различных типов и совместная интерпретация их параметров прохождения позволяет получать информацию об упругих параметрах бетона. Для однородной изотропной среды известны [1] соотношения

$$E_d = \rho \frac{V_T^2 (3V_L^2 - 4V_T^2)}{V_L^2 - V_T^2}, \quad (1)$$

$$\nu_d = \rho \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}, \quad (2)$$

где E_d – динамический модуль Юнга;

ν_d – динамический коэффициент Пуассона;

V_T – скорость распространения поперечной упругой волны;

V_L – скорость распространения продольной упругой волны.

В настоящее время в литературных источниках нет информации о практических способах определения динамического коэффициента Пуассона бетона в конструкциях неразрушающими методами. В то же время этот параметр весьма чувствителен к изменению свойств контролируемого материала, в частности – его пористости и трещиноватости. Кроме того, коэффициент Пуассона должен приниматься во внимание при определении динамического модуля Юнга бетона в натуральных условиях по скорости распространения импульса продольной волны.

Формула (2) указывает на принципиальную возможность оперативного неразрушающего определения динамического коэффициента Пуассона на основе данных о скорости распространения продольной и поперечной объемных волн. Находящиеся в обращении типовые приборы ультразвукового контроля не позволяют выполнить оценку скорости распространения поперечной волны. Одна из основных причин затруднений

обусловлена тем, что используемые одинарные электроакустические преобразователи не позволяют отдельно излучать и принимать только какой-либо один тип волны, что, в свою очередь, связано со значительной реверберацией ультразвуковых колебаний в самом преобразователе – излучающем и приемном. При этом за время реверберации может происходить многократная смена поляризации вектора колебаний протектора излучателя, а в приемном преобразователе – взаимная трансформация и смешивание всех принятых колебаний. Характер реверберации во многом случаен, – реверберационные процессы экземпляров преобразователей даже одного типа могут значительно отличаться. Учет этих факторов в измерительном процессе требует высокой квалификации оператора. В то же время энергетические показатели импульса волны Релея), особенно на больших базах прозвучивания, позволяют осуществить его селективный прием с использованием типовых приборных средств испытаний [2, 3].

Основа методики состоит в селекции составляющих волнового процесса по амплитудному признаку. Если рассматривать только геометрический эффект рассеивания энергии волны, не принимая во внимание тепловые потери мощности и потери на рассеяние на неоднородностях и дефектах, то соотношение мощностей сигналов акустического импульса продольной подповерхностной волны описывается выражением

$$\frac{Q_{L,s2}}{Q_{L,s1}} = \left(\frac{s1}{s2} \right)^2, \quad (3)$$

где $s1$ и $s2$ – базы прозвучивания.

Для импульса волны Релея соотношение мощностей принимает вид

$$\frac{Q_{R,s2}}{Q_{R,s1}} = \frac{s1}{s2}. \quad (4)$$

Соответственно для амплитуд сигналов принятых импульсов справедливы выражения

$$A_{L,s2} = A_{L,s1} \frac{s1}{s2}, \quad (5)$$

$$A_{R,s2} = A_{R,s1} \sqrt{\frac{s1}{s2}}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что по мере увеличения базы измерения s , соотношение амплитуд импульсов волны Релея и продольной подповерхностной волны будет возрастать прямо пропорционально корню квадратному из относительной базы прозвучивания. Это означает, что определение скорости импульса волны Релея эффективно на больших базах прозвучивания, так как в этом случае сигнал волны Релея ее легко отличить от сигналов других типов волн (рис. 1).

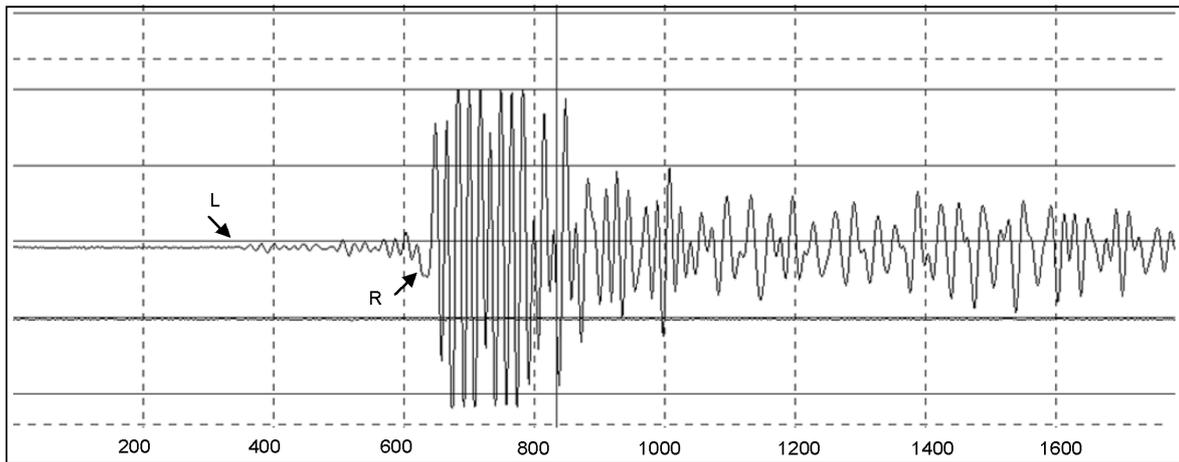


Рисунок 1– Временная диаграмма акустического сигнала на базе прозвучивания 175 см с использованием вязкого акустического контакта ЭАП: L – первое вступление подповерхностной продольной волны; R - первое вступление импульса волны Релея; горизонтальная координата соответствует оси времени, отметки – в микросекундах, вертикальная координата соответствует уровню сигнала предусилителя прибора «Пульсар-1.2», масштаб – 0,5 В/деление

Определение динамического коэффициента Пуассона

Взаимосвязь между динамическим коэффициентом Пуассона и скоростью распространения различных типов волн описывается дисперсионным уравнением [1], которое можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left(3 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2} \right) = 0, \quad (7)$$

где $\zeta = V_R/V_T$.

Принимая во внимание известные соотношения

$$V_L = \sqrt{\frac{E_\delta \cdot (1 - \nu_\delta)}{\rho \cdot (1 + \nu_\delta) \cdot (1 - 2\nu_\delta)}}; \quad (8)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E_\delta}{2\rho \cdot (1 + \nu_\delta)}}, \quad (9)$$

можем записать

$$\frac{V_L}{V_T} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu_\delta}{2 \cdot (1 - \nu_\delta)}}; \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (7) можно записать в виде

$$\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2 \left(3 - 2 \left[\frac{(1-2v_\delta)}{2 \cdot (1-v_\delta)} \right] \right) - 16 \left(1 - \left[\frac{(1-2v_\delta)}{2 \cdot (1-v_\delta)} \right] \right) = 0. \quad (11)$$

Для параметра ζ уравнение (11) имеет 6 корней. Для v_δ в диапазоне $0 \dots 0,2637$ все корни действительные и попарно сопряженные по знаку. В диапазоне $0,2637 \dots 1$ остается одна пара действительных корней и две пары комплексных корней.

Анализ решений уравнения (11) целесообразно выполнить, принимая в качестве неизвестной величины параметр v_δ , рассматривая его выражение в диапазоне действительных положительных значений параметра ζ . В этом случае получим единственное значение v для всего диапазона значений ζ

$$v_\delta = \frac{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 16\zeta^2 - 8}{\zeta^6 - 8\zeta^4 + 8\zeta^2}. \quad (12)$$

Рассмотрим уравнение (11), выполнив подстановку

$$\zeta = \eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1-v_\delta)}{1-2v_\delta}}, \quad (13)$$

где $\eta = V_R/V_L$.

Полученное уравнение

$$\left[\eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1-v_\delta)}{1-2v_\delta}} \right]^6 - 8 \cdot \left[\eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1-v_\delta)}{1-2v_\delta}} \right]^4 + 8 \cdot \left[3 - 2 \cdot \left[\frac{(1-2v_\delta)}{2 \cdot (1-v_\delta)} \right] \right] \times \left[\eta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (1-v_\delta)}{1-2v_\delta}} \right]^2 - 16 \cdot \left[1 - \frac{(1-2v_\delta)}{2 \cdot (1-v_\delta)} \right] = 0 \quad (14)$$

имеет 4 корня для v_δ , из которых только один является действительным.

Ниже, в качестве примера, приведены решения уравнения (14) для $\eta = 0,48$, полученные в среде MathCad.

$$v_\delta = \begin{pmatrix} -2.71060683 \ 9478563695 \ 7 \\ 0.31859261 \ 3611644208 \ 78 \\ 0.47448917 \ 8674423402 \ 42 - 0.01632528 \ 2660833714 \ 262i \\ 0.47448917 \ 8674423402 \ 42 + 0.01632528 \ 2660833714 \ 262i \end{pmatrix}$$

Если в качестве переменной рассматривать величину η , то уравнение (14) будет иметь 6 корней. В диапазоне значений v_δ от 0 до 0,5 имеется два действительных, сопряженных по знаку и четыре комплексных корня. В диапазоне значений v_δ от 0,5 до 1,0 имеется два мнимых и четыре комплексных корня для η . Символьные аналитические выражения для корней уравнения (14) слишком громоздки, - выражение только для одного корня занимает страницу. Поэтому для анализа результата удобнее использовать

выражение, приближенно описывающее связь между v_∂ и η . Зависимость v_∂ от η хорошо аппроксимируется выражением вида

$$v_\partial = \frac{a + b \cdot \eta}{1 + c \cdot \eta + d \cdot \eta^2}, \quad (15)$$

где $a = 0,50607613$; $b = -0,817673$; $c = -1,3740213$; $d = 0,05049$.

Выражение (15) может служить основой методики оперативного определения коэффициента Пуассона по данным поверхностного прозвучивание бетона.

Для проверки возможности регистрации импульса поверхностной волны и оценки метрологических показателей методики измерений была выполнена серия ультразвуковых измерений на натурном крупноразмерном образце. В таблице 1 приведены данные измерений скоростей ультразвукового импульса с использованием вязкого акустического контакта ЭАП с бетоном на различных базах: от 25 см до 1,75 м: $V_{d,L}$, $V_{d,R}$ – дифференциальные значения скорости импульсов продольной и поверхностной волн.

Таблица 1 Данные регистрации параметров акустических волн

| База, см | $t_{0,L}$, мкс | $\Delta t_{0,L}$, мкс | $v_{d,L}$, м/с | $\Delta v/v_L$ | $t_{0,R}$, мкс | $\Delta t_{0,R}$, мкс | $v_{d,R}$, м/с | $\Delta v/v_R$ |
|------------|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|
| 25 | 56 | 56 | 4464 | 0,000 | 114,5 | 105 | 2381 | 0,002 |
| 50 | 110 | 54 | 4630 | -0,037 | 220 | 105,5 | 2370 | 0,007 |
| 75 | 169 | 59 | 4237 | 0,051 | 326 | 106 | 2358 | 0,011 |
| 100 | 221 | 52 | 4808 | -0,077 | 431 | 105 | 2381 | 0,002 |
| 125 | 284 | 63 | 3968 | 0,111 | 538 | 107 | 2336 | 0,021 |
| 150 | 338 | 54 | 4630 | -0,037 | 641 | 103 | 2427 | -0,017 |
| 175 | 392 | 54 | 4630 | -0,037 | 743 | 102 | 2451 | -0,027 |
| К.вариации | | 0,072 | 0,069 | | | 0,013 | 0,013 | |
| ср. знач. | | 56,0 | 4464,3 | | | 104,8 | 2385,8 | |
| | | | | r = | 0,705 | | | |

Для полученных значений скоростей распространения ультразвукового импульса (см. таб. 1) $V_L = 4464,3$ м/с, $V_R = 2385,8$ м/с получим: $\eta = V_R/V_L = 0,5345$; $v_\partial = 0,247$. Значение динамического коэффициента Пуассона заметно выше часто принимаемого в расчетах статического значения – 0,18..0,2.

Заключение. 1. Практическое применение поверхностной волны для целей диагностики состояния бетонного массива возможно с использованием типовых ультразвуковых электроакустических преобразователей. 2. В основе методики селекции поверхностных акустических волн на базах прозвучивания бетона более 0,4..0,5 м может быть положено амплитудное

разделение составляющих акустического сигнала, а также использование корреляционной его обработки

Литература. 1. Гринченко, В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т Гринченко, В.В. Мелешко. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 284 с. 2. Качанов, В.К. Проблемы ультразвукового контроля протяженных сложноструктурных изделий с большим затуханием сигналов / В.К. Качанов, И.В. Соколов // Дефектоскопия. – 2007. - № 8. - С. 82-93. 3. Снежков, Д.Ю. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.