

УДК 537.7

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Черняев А. А. аспирант

Национальный авиационный университет,

e-mail: aac@nau.edu.ua

Проблема устойчивости зданий становится все более значимой при их эксплуатации. В статье предлагается обзор способа контроля состояния бетона и железобетона, который основан на виброакустическом методе и способен дать оценку состояния бетона. Метод относится к группе методов не разрушающего контроля и может применяться в процессе эксплуатации здания.

The Problem to stability of the buildings becomes all more significant under their usages. In article is offered review of the way of the checking the condition of the concrete and reinforced concrete, which is founded on vibratory acoustic method and capable to give the estimation of the condition of the concrete. The Method pertains to group of the methods not destroying checking and can be used in process of the usages of the building.

Введение.

Увеличивается как количество многоэтажных зданий, так и сокращается площадь качественной поверхности земной коры, не подверженной деформации, на которых строятся дома. Эти факторы приводят к нарушению устойчивого состояния зданий и их разрушению.

Актуальность.

Во многих городах Украины и других странах существуют сооружения, которые находятся в опасной зоне из-за подземных шахтных выработок, плавучих грунтов, размывания фундамента техногенными и почвенными водами, колебаний земной поверхности. Необходим контроль устойчивости подобных строений. Другой причиной потери жесткости может служить транспорт, который приводит к негативным последствиям (появление трещин) и некачественные строительные материалы. Уже отмечено несколько случаев как у нас в стране, так и за рубежом проседания фундаментов высотных зданий, смещение центра тяжести относительно геометрической оси.

Для того чтобы на ранних стадиях зафиксировать это, предпринять меры и уменьшить вероятность разрушения зданий необходимо создать прибор, фиксирующий малейшие изменения в конструкции здания. Этот прибор должен отвечать высоким требованиям надежности, точности и простоте.

Для системы контроля состояния здания необходим метод контроля состояния бетона. Для этого необходимо выбрать и обосновать метод, который способен дать оценку состояния бетона.

О теории ультразвука.

Ультразвуковой метод нашел широкое применение в строительной отрасли при контроле качества строительных конструкций, при их изготовлении на предприятиях строительной индустрии.

Ультразвуковыми колебаниями называются такие механические колебания, частота которых лежит за верхним порогом слышимости человеческого уха. За нижний предел ультразвука условно принята частота колебаний 15 кГц, а за верхний - 10 МГц.

Распространение ультразвуковых колебаний в различных веществах зависит от их состава, структуры и свойств на кристаллическом и молекулярном уровне.

Для случая плоской волны распространение ультразвуковых колебаний описывается формулой

$$a = A \sin w(t-x/c), \quad (1)$$

где a - смещение частиц среды относительно точки покоя; A - амплитуда смещения; x - координата рассматриваемой точки; $w = 2\pi f$ - угловая частота колебаний, рад/с; f - частота колебаний, Гц; c - скорость распространения ультразвуковых колебаний, м/с.

Различают продольные и поперечные колебания ультразвуковой волны. В газах и жидкостях могут распространяться лишь продольные ультразвуковые волны, а в твердых телах - как продольные, так и поперечные волны. В твердых телах могут возникать также изгибные и поверхностные волны.

Скорости распространения поперечных c_t и продольных c_v волн различны, но между собой взаимосвязаны. Их отношение зависит от коэффициента Пуассона ν :

$$\frac{c_t}{c_v} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}}. \quad (2)$$

Основными параметрами, характеризующими ультразвуковые колебания, являются амплитуда, давление, интенсивность.. Амплитуда давления P и амплитуда смещения A функционально взаимосвязаны:

$$P = \rho c \omega A, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала среды; c – скорость распространения волны; ω – частота колебаний.

Интенсивностью ультразвука J называют величину звуковой энергии, проходящую в единицу времени, через единичную площадку, расположенную перпендикулярно распространению волны. На практике часто используют аналог интенсивности звука – уровень силы звука, измеряемый в децибелах. Между интенсивностью ультразвуковых колебаний J , амплитудой A и давлением P существует следующая зависимость:

$$J = \frac{1}{2} \rho c (\omega A)^2 = \frac{P^2}{200 \rho c}. \quad (4)$$

Исходя из этой формулы было введено понятие акустическое или волновое сопротивление среды, которое равно произведению плотности среды на скорость распространения волны.

Величины акустического распространения для продольный ρc_l и поперечных ρc_t волн различны, их значения можно найти в справочниках. Затухание ультразвуковой волны в направлении ее распространения на сравнительно небольшом интервале длины x может быть описано следующими экспоненциальными выражениями:

$$A_x = A_0 e^{-2\alpha x}; \quad (5)$$

$$J_x = J_0 e^{-2\alpha x}; \quad (6)$$

где α является коэффициентом затухания амплитуды колебания.

Отражение и преломление ультразвуковых волн. При падении ультразвуковой волны на границу раздела двух сред, обладающих разными акустическими сопротивлениями, часть энергии проходит во вторую среду, а другая часть отражается обратно. При этом процесс отражения и преломления ультразвуковой волны осуществляется по тем же законам, что и свет, и в первую очередь зависит от угла падения волны (угла между направлением распространения волны и нормалью к поверхности раздела сред).

Скорость ультразвука в твердых средах. В твердых телах помимо продольных и поперечных волн могут распространяться волны сжатия (растяжения), крутильные и поверхностные волны. Если контролируемая среда является бесконечно большой, то в ней возникают только два основных типа волн – продольные и поперечные.

В строительной практике среду условно считают «бесконечно протяженной», если она удовлетворяет двум требованиям:

- когда длина ультразвуковой волны на порядок меньше размеров контролируемой среды, в любом направлении;
- когда влияние повторно отраженных волн от границы среды пренебрежимо мало (например, вследствие затухания волны или при специальных режимах импульсного излучения).

Скорость распространения ультразвуковых волн в твердых средах зависит от их упругих постоянных. Большинство строительных материалов являются изотропными (металлы, сплавы, пластмассы). Условно изотропным считается и бетон. Упругие свойства таких материалов характеризуются модулем упругости E (модуль Юнга) и коэффициентом Пуассона ν . Скорость продольных c_l и поперечных c_t волн определяется через упругие постоянные среды с помощью следующих зависимостей:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} ; \quad (7)$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} . \quad (8)$$

Скорость распространения ультразвука в бетоне может изменяться в пределах от 2000 до 5500 м/с. Такой разброс этого параметра обусловлен влиянием различных факторов. Наиболее существенными среди них являются: плотность и возраст бетона, условия твердения, объем и тип заполнителя, показатель водоцементного отношения, влажность бетона, температура наружного воздуха, процент армирования в железобетонных конструкциях, напряженное состояние в контролируемом изделии.

Качество бетона можно оценить по его модулю упругости, который зависит от величины напряжения сжатия (статический модуль упругости) в образце и от скорости его нагружения (динамический модуль упругости). Считается, что между этими модулями нет зависимости, но некоторыми исследователями найдена взаимосвязь, которая используется в строительной практике.

$$E_{стат} = E_{дин} \left(1 - 0.15 \frac{\sigma - 4}{10}\right), \quad (9)$$

где σ – напряжение, измеренное в образце.

Тело, в котором длина волны меньше его самого малого размера, условно считают бесконечно большим. Скорость ультразвука в таком теле может быть найдена по формуле

$$c_l = \sqrt{\frac{E_{дин}(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{10}$$

Для плоских тел (когда один размер пренебрежимо мал по сравнению с другими)

$$c_l = \sqrt{\frac{E_{дин}}{\rho(1-\nu^2)}} \tag{11}$$

Для стержней, когда два размера существенно меньше длины

$$c_l = \sqrt{\frac{E_{дин}}{\rho}} \tag{12}$$

Скорость распространения ультразвука в бетоне может быть найдена с помощью установки, в состав которой входят:

- генератор, вырабатывающий кратковременные импульсы;
- ультразвуковой излучатель;
- ультразвуковой приемник;
- регистратор времени прохождения ультразвука.

Для бетона установлена корреляционная зависимость между скоростью ультразвука и прочностью материала. С увеличением скорости распространения ультразвука прочность бетона возрастает. Определить прочность бетона можно по татуировочным графикам. Экспериментально установлено, что скорость распространения ультразвука хорошо аппроксимируется функцией

$$R = kc^4 \tag{13}$$

или

$$R = ae^{bc} \tag{14}$$

где R – прочность бетона на сжатие, k, a, b – коэффициенты пропорциональности.

Если нет татуировочных графиков, то для грубой оценки качества конструкции можно использовать данные таблицы 1.

Таблица 1. – Зависимость качества бетона от прочности и скорости ультразвука

Скорость ультразвука км/с	Качество бетона	Прочность бетона, МПа
<3.00	Очень плохое	7
3,0 ... 3,4	Плохое	10
3,4 ... 3,9	Удовлетворительное	18
3,9 ... 4,3	Хорошее	30
>4,3	Очень хорошее	>30

Погрешности измерений. При использовании ультразвукового метода погрешность определения динамических характеристик складывается из нескольких факторов.

Ошибка при измерении длины. Расстояние между передатчиком и приемником. В среднем считается, что при измерении линейных размеров возможна ошибка 0.3мм.

Ошибка при расчете времени распространения ультразвукового импульса. Опыт показывает, что относительная ошибка измерения времени составляет не более 0.1 %.

Ошибка контакта датчика с образцом. Датчик прикрепляется к образцу с помощью гипса, смазки, и т.д. Наличие промежуточной среды отрицательно сказывается на результатах измерений. Суммарная оценка этого фактора, как показывает опыт оценивается величиной $\pm 2\%$.

Влияние плотности бетона. При постоянном составе бетона его прочность зависит от пористости. Чем больше пор в бетоне, тем меньше его плотность, а следовательно, и прочность. Поры препятствуют распространению ультразвука, и поэтому его скорость функционально зависит от прочности бетона. Чем меньше пор, тем больше прочность и тем выше скорость распространения ультразвука. Например, при увеличении пористости бетона на 10% скорость ультразвука уменьшается на 7%; если увеличение пористости бетона достигает 30%, скорость ультразвука уменьшается также на 30%.

Влияние возраста бетона и условий его твердения. Твердение бетона и нарастание его прочности происходит в основном в течение первого месяца. С увеличением прочности бетона увеличивается и скорость ультразвука. Поэтому существенное нарастание скорости ультразвука наблюдается только в первый месяц после замоноличивания конструкции.

Условия твердения бетона также сказываются на скорости распространения ультразвука. Экспериментами установлено, что в пропаренном бетоне скорость ультразвука ниже, чем в бетоне той же прочности при его естественном твердении.

Влияние объема и типа заполнителя. Как известно, в качестве крупного заполнителя в бетоне используется щебень или ранний различного минералогического состава. Бетон является материалом неоднородным, поскольку физико-механические характеристики крупного и мелкого заполнителей отличаются от соответствующих характеристик цементного камня. Это обстоятельство и обуславливает различные скорости распространения ультразвука в бетонах равной прочности, выполненных с использованием заполнителей различного минералогического состава. Ввиду того, что 70% объема бетона составляет крупный заполнитель, при постоянных значениях водоцементного отношения и количества крупного заполнителя скорость ультразвука в бетоне в большей степени зависит от упругих свойств заполнителя.

В мелкозернистом бетоне на скорость ультразвука влияют упругие свойства песка и цемента. Минералогический состав песка практически повсеместно изменяется в незначительных пределах. Поэтому разновидности песков мало сказываются на скорости распространения ультразвука. Однако изменение количества песка существенно влияет на этот показатель. Так, увеличение объема песка на 10% влечет за собой изменение скорости ультразвука на 5... 10%.

Влияние количества цемента. Известно, что с ростом количества цемента возрастает механическая прочность бетона. Поэтому при одинаковом содержании в бетоне крупного заполнителя изменение количества цемента на 10... 15% изменяет скорость распространения ультразвука на 1...3%.

Влияние температуры. При повышении температуры скорость ультразвука уменьшается. В среднем при увеличении температуры бетона на 10°C скорость ультразвука уменьшается на 40 м/с (приблизительно на 1%).

Влияние арматуры. При наличии арматуры в бетоне скорость распространения ультразвука увеличивается. В среднем в железобетоне в зависимости от количества и диаметра применяемой арматуры скорость ультразвука увеличивается на 6...8% по сравнению с бетоном.

Влияние напряженного состояния бетона. Скорость распространения ультразвука существенно зависит от напряженного состояния в бетоне. При сжатии бетонного образца постепенно возрастающей нагрузкой и одновременном его

прозвучивании ультразвуком поперек действия силы (или под небольшим углом наклона, порядка 2...4%) на начальном этапе нагружения наблюдается увеличение скорости ультразвука. При дальнейшем возрастании нагрузки скорость ультразвука начинает снижаться. Такое поведение объясняется следующими обстоятельствами. На начальном этапе нагружения, когда напряжения в бетоне невелики, происходит его уплотнение, что и вызывает увеличение скорости ультразвука. При больших напряжениях в бетоне начинают появляться трещины, и этот процесс нарастает с ростом нагрузки. С появлением трещин и с увеличением их количества и протяженности скорость ультразвука снижается.

При растяжении бетонного образца уплотнения бетона не происходит, и поэтому скорость ультразвука при постепенном увеличении нагрузки постоянно уменьшается.

Проводя параллельно механические и ультразвуковые испытания, можно установить величину напряжений, при которых начинается интенсивный процесс трещинообразования в бетоне заданного состава и конструкции определенного вида.

Выводы.

Многочисленные исследования по применению ультразвукового метода в строительной практике позволяют сделать ряд обобщений. Основное достоинство ультразвукового метода заключается в том, что он дает возможность получать и сравнивать упругие характеристики материала не только на лабораторных образцах, но и на готовых элементах строительных конструкций. Он позволяет наиболее просто производить оперативный контроль свойств бетона по сравнению с другими методами.

Прочность бетона на сжатие и скорость ультразвука в нем по-разному зависят от количества и качества цемента, соотношения долей мелкого и крупного заполнителей и их прочности, степени армирования и т.д. Поэтому строить тарировочную кривую «прочность бетона - скорость ультразвука» следует в каждом отдельном случае для заданного состава бетона. И делать это необходимо не по отдельным результатам измерений, а по большому числу испытаний, многократно повторяя их на образцах или в одних и тех же местах строительных конструкций. При этом целесообразно проводить измерения в наиболее ответственных местах конструкции.

Для конструкций, стоящих в сооружении, контроль свойств которых в процессе эксплуатации предполагается осуществлять с помощью ультразвукового метода, необходимо предусматривать заранее контрольные точки для проведения в них длительных повторных измерений.

Результаты лабораторных испытаний образцов не следует безоговорочно переносить на строительные конструкции, поскольку способы уплотнения бетонной смеси и условия твердения для них различны. На практике установлено, что прочность бетона в конструкции на 5... 12% выше, чем в контрольных кубиках.

Литература.

1. В. И. Коробко, А.В. Коробко. Контроль качества строительных конструкций: виброакустические технологии. М.: Издательство АСВ, 2003. -288 с.
2. Артюнян Н.Х., Абрамян В.Л. Кручение упругих тел. – М.: Физматгиз, 1964. -670 с.
3. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек . Справочное пособие. –Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.
4. Долидзе Д.Е. Испытание конструкций и сооружений. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1975. – 252 с.
5. Коробко А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости. – М.: Издательство АСВ, 1999. – 304 с.
6. Поль Э. Не разрушающие методы испытаний бетона. – М.: Стройиздат, 1967. – 178 с.
7. Колесников В. Г. Электроника: энциклопедия, 1991. – 688 с.