

УЛТРАЗВУКОВ БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ КОНСТРУКЦИИ-ВЪЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Иван Иванчев¹

РЕЗЮМЕ: С ултразвуковия безразрушителен метод (УБМ) може да се контролира качеството на изпълнение, да се направи оценката на състоянието, безопасността и надеждността на стоманобетонни конструкции както в процеса на изграждането им, така и по време на експлоатацията им. В тази статия е направен преглед на УБМ за определяне на качеството на бетона (вероятна якост на натиск, вероятен модул на еластичност, еднородност), дефектите и повредите (пукнатини, каверни и др.). Този метод е директен, бърз, надежден, безопасен, евтин, с голяма чувствителност и възможност за автоматизиране на процеса. Поради нехомогенността на бетона и наличието на армировка приложението на този метод е свързан с много ограничения. Тази статия е преглед на възможностите и ограниченията при използването на ултразвуков метод за безразрушително изследване на стоманобетонни конструкции.

Ключови думи: *стоманобетон, безразрушителен, ултразвуков метод, вероятна якост, модул на еластичност, еднородност, качество, дълбочини на пукнатини*

¹ гл.ас. д-р, Университет по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ), Строителен факултет, кат.Масивни конструкции, e-mail: ivanchev_fce@uacg.bg, гр. София 1164, бул. "Христо Смирненски" №1

1. Въведение

Според изследване на The Committee on Industry, Research and Energy (ITRE) of the European Parliament [4,5] повече от 40% от сградите в ЕС са построени преди 1960 г., а 90% преди 1990 г. За да се гарантира тяхната безопасност, сигурност и надеждност е необходимо периодично да се извършва оценка и диагностика на състоянието им по време на тяхната експлоатация. Повечето от наличния сграден фонд е изграден от стоманобетон. Има два вида методи за определяне на параметрите и характеристиките на сградите: разрушителни и безразрушителни. Традиционните методи за оценка на строителни конструкции са разрушителни, по-скъпо струващи и по-трудоемки [5,6]. С безразрушителните методи многократно може да се контролира качеството на изпълнение по време на различни етапи от изграждането и експлоатацията на сградите и съоръженията и да се получи информация за параметрите или състоянието им без те да се повредят. Тогава незаменим се явява ултразвуковия безразрушителен метод (УБМ), който е директен, надежден, бърз, безопасен, евтин, с голяма чувствителност, с възможност за автоматизиране на процеса на измерване [2,6,7,12,13,14]. С него могат да се определят качеството на бетона (вероятна якост на натиск, вероятен модул на еластичност, еднородност), дефектите и повредите (пукнатини, каверни и др.), получени в резултат на земетресения, умора, пожар или други [7,13]. С този метод стоманобетонът може да бъде изследван многократно за продължителен период от време [13].

Приложението на този метод при стоманобетонни конструкции, се използва повече от 70 години [12,13] и въпреки това за разлика от приложението му при металите е свързан с много ограничения. Това се дължи на факта, че бетонът е силно нехомогенен композитен материал с различен състав, различни физико-механични и деформационни свойства, изготвен от различни по вид компоненти (различен клас на цимента, различни по произход, размер и форма местни добавъчни материали), различна технологията на приготвяне и положане на бетонната смес, различна възраст на бетона, различни форми и размери на образците и др. [14].

2. Ултразвуков безразрушителен метод (УБМ)

УБМ използва разпространението на ултразвукови вълни, въведени в бетона, където те се разпространяват, разсейват и се отразяват от границата между две среди [11,13]. Измерва се пряко времето или скоростта на разпространение на ултразвуковия сигнал (УЗС). Скоростта на механичните вълни е много голяма и зависи от еластичните свойства и плътността на средата, в която се разпространяват.

Механичните вълни, които се разпространяват са три вида [1,2,7,12,13]:

- Надлъжни (компресионни или Р-вълни). Те се разпространяват по начин аналогичен на разпространението на звуковите вълни във въздуха. В твърди тела те се разпространяват с най-висока скорост;
- Напречни (срязващи или S-вълни). В бетона тяхната скорост е по-ниска и е 60% от скоростта на надлъжните вълни;
- Повърхностни вълни (вълни на Рейли). Те са с най-ниска скорост в бетона, която е 50% от скоростта на надлъжните вълни.

За еластична, хомогенна твърда среда скоростта на компресионна вълна $V_{УРМ}$ е [2,7,12,13,14,15]:

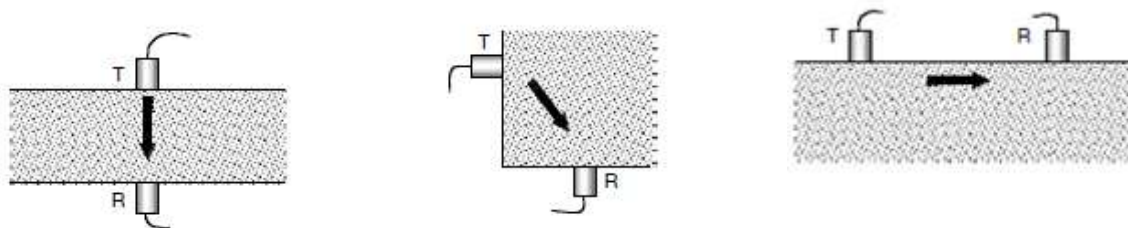
$$V_{УРМ} = \frac{l}{t} \text{ [km/s]}, \quad (1)$$

където: l е разстоянието, изминато от УЗС, а t е времето за разпространение на сигнала. Скоростта на УЗС за обикновен бетон обикновено е от 3700 до 4200 m/s.

Уредите за измерване се състоят от генератор на ултразвукови трептения, излъчвател, приемник, усилвател и отчитащо устройство [2,7,8,11,12,13,14]. Генераторът генерира високочестотни сигнали с честота 25-100 kHz. Колкото са по-големи образците, толкова честотата трябва да е по-малка [12,13]. Излъчвателят е пиезокристал, който преобразува тези

сигнали в ултразвукови механични импулси, които се разпространяват в бетона, претърпявайки множество отражения на границите на различните компоненти на стоманобетона в рамките на стоманобетонния елемент. Приемният пиезоелектрически преобразувател регистрира началото на надлъжните ултразвуковите вълни и ги превръща в електрически сигнали. Преобразувателите трябва да имат много добър контакт с повърхността на изследвания образец. За тази цел повърхностите им се покриват със тънък слой от специална паста [6,7,12,13]. Тези сигнали се усилват от усилвател и се преобразуват в подходящ аналогов или цифров сигнал за визуализиране на резултатите. Има три начина на разположение на двата пиезопреобразуватели - фиг.1 [1,2,7,9,12,13,14]:

- директно (право, срещуположно прозвучаване) - то е най-подходящо, тъй като имаме най-пълно приемане на механичните импулси. Контактният електрод на излъчвателя се намира от едната страна на стоманобетонния елемент, а приемника от срещуположната;
- полудиректно (прозвучаване под ъгъл) - то е много подходящо, когато надлъжната армировка и стремената в елементите са разположени на малки разстояния. При него трябва да се внимава за разстоянието между преобразувателите. То не трябва да е много голямо, за да може да се регистрират пристигащите вълни;
- едностранно (повърхностно) прозвучаване - при него излъчвателят и приемника се намират от едната страна на елемента и резултатите са най-предразположени към грешки.



Фиг.1 Разположение на преобразувателите върху стоманобетонния елемент [13]

Върху скоростта на ултразвуковия сигнал влияят следните фактори [7,12,13]:

- Произтичащи от свойствата на бетона [12]:
 - ✓ Вид и едрина на добавъчните материали [7,12,13] - много автори са установили, че скоростта на ултразвуковия импулс зависи от вида, количеството, размера и зърнометричния състав на добавъчните материали в бетона (речен чакъл, пясък, трошен варовик или камък). Ако имаме само циментов разтвор скоростта е най-ниска. При добавен натрошен варовик скоростта е най-голяма, при натрошен гранит е по-малка и най-малка е при чакъл. Колкото е по-високо съдържанието на добавъчните материали, толкова по-висока е скоростта;
 - ✓ Клас на цимент [7,12] - той не оказва значително влияние на скоростта на ултразвуковия импулс, но скоростта на хидратацията на различните цименти е различна и това може да повлияе на скоростта на УЗС;
 - ✓ Водоциментово отношение [7,12,13] - с увеличаването му скоростта намалява при положение, че нищо друго не се променя;
 - ✓ Други добавки [7,12] - добавянето на калциев хлорид ще увеличи скоростта;
 - ✓ Възраст на бетона [7,12,13] - в първите дни след полагането на бетонната смес скоростта нараства бързо и след това се променя много слабо.
- Други фактори:
 - ✓ Контактът между преобразувателите и повърхността на изпитвания елемент [12,13]. Недобрият контакт води до грешки при измерването на скоростта;
 - ✓ Температура [7,12,13] - температури от 5 до 30⁰С не оказват влияние върху скоростта на сигнала, а ако са извън тези граници резултатите трябва да се коригират;

- ✓ Наличието на влага и условията на отлежаване на бетона [7,12,13,14]. При бетони с висока якост влагата влияе по-слабо, отколкото при бетони с ниска якост. Скоростта на ултразвуковия сигнал е по-висока за образци изготвени в закрити помещения от тези изготвени на открито;
- ✓ Дължина на пътя на сигнала [7,12,13] - препоръчва се минимални разстояния между сондите 100 mm при максимален размер на добавъчния материал 30 mm и 150 mm при максимален размер на добавъчния материал 45 mm;
- ✓ Натоварване на елемента [12,13] – скоростта на УЗС не се влияе от натоварването, но при квазипостоянна комбинация на натоварване, което е по-голямо от 65% от стойността на натоварването при провлачване на надлъжната армировка е възможно да се появят микропукнатини, които ще доведат до намаляване на скоростта на импулса;
- ✓ Размер и форма на образеца [7,12,13] - скоростта на ултразвуковия сигнал не зависи от размера и формата на образеца, освен при образци с много малки размери. При елементи с по-малки дължини на прозвучаване е подходящо да се използват преобразуватели с по-висока честота, а при по-големи дължини с по-ниски честоти.
- ✓ Наличие на армировка [7,12,13] - това е един от най-важните фактори, които влияят на скоростта. Скоростта на импулса в стоманата е 1,4 до 1,7 пъти по-голяма отколкото в бетона. Следователно скоростта в близост до армировъчна стомана е по-висока от места без армировка. Тогава е необходимо да се използват коригиращи фактори.

3. Приложение на УБМ.

3.1. Определяне на вероятна якост на натиск на бетона [6,7,12,13,14].

Вероятната якост на натиск на бетона $f_{c,UPV}$ може да се определи от скоростта на УЗС по формулата:

$$f_{c,UPV} = cV_{UPM}^{3,75} \quad (2)$$

където: V_{UPM} е в km/s ; $f_{c,UPV}$ е в MPa ; c е коефициент в интервала от 0,158 до 0,231 [6].

Точността на тези изпитвания не е много голяма. Резултатите се влияят от много фактори, като условията на приготвяне, уплътняването и отлежаване на бетона, свойствата на добавъчните материали, клас на цимента, температура и съдържание на влага на прозвучаваните стоманобетонни елементи, водоциментово отношение и други фактори [6,12,13]. Влиянието на тези фактори е проучено от много изследователи и те ясно посочват необходимостта от установяване на корелации между измерванията с ултразвук и стандартни изпитвания чрез разрушаване на кубчета, които са от едни и същи материали и състав като на елементите и са изготвени в един и същи ден.

3.2. Оценка на еднородност и качество на бетона [6,13].

УБМ може да се използва за изследване на хомогенността и за оценка на качеството на бетона. Необходимо е да се направят „n“ на брой измервания на скоростта на преминаване на импулса през бетона. В зависимост от размера и големината на изследвания елемент измервателните точки могат да бъдат разположени равномерно в линия или мрежа, като покриват подходящ обем от бетона. За обработка на резултатите се използват статистически методи. Определя се средноаритметичната стойност на скоростта на импулса V_{bm} [km/s] и средноквадратичното отклонение S_v по формулите:

$$V_{bm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{UPM} \quad (3)$$

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{UPM,i} - V_{bm})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

където: $V_{UPM,i}$ - скоростта на ултразвуковия импулс на i -тото измерване.

Еднородността на бетона се характеризира с коефициент k_{hom} , който се определя с:

$$k_{hom} = \frac{f_{c,UPV} - 3S_v}{f_{c,UPV}}. \quad (5)$$

3.3. Измерване на дълбочини на пукнатини [1,6,7,9,10,12,13,14,15].

Ако по пътя си в стоманобетонен елемент УЗС срещне запълнени с въздух дефекти или пукнатини той няма да премине през тях, а ще ги заобиколи по най-краткия път между излъчвателя и приемника. Така времето за преминаване ще се увеличи в сравнение с това в бетона без дефекти. Т.е. този метод е ефективен при измерване на дълбочини на нормални пукнатини. Ако те са запълнени с вода или други включвания времето за преминаване на УЗС няма да се промени значително и това ограничава използването на УБМ.

При нормални пукнатини дълбочината им „с” се определя от [6,9,10,13,15]:

$$c = b \sqrt{\frac{t_{crack}^2}{t_{no\ crack}^2} - 1} = \frac{v_{no_crack}}{2} \sqrt{t_{crack}^2 - t_{nocrack}^2} \quad (6)$$

където:

b е разстоянието от центъра на преобразувателите до пукнатината;

t_1 е времето за преминаване на ултразвуковия сигнал от излъчвателя до приемника за разстояние $2b$ между преобразувателите;

t_2 е времето за преминаване на ултразвуковия сигнал от излъчвателя до приемника за разстояние $4b$ между преобразувателите.

Уравнение (6) е валидно, когато имаме нормални пукнатини. Според [12] за всяка пукнатина трябва да се направи проверка дали е нормална или не. Това става по следния начин: двата преобразувателя се поставят на еднакво разстояние от двете страни на пукнатината и се измерва времето за преминаване на УЗС. След това последователно се правят две измервания - единият преобразувател остава в положение на предишното измерване, а другият се премества далеч от пукнатината. Същото се повторя и за другия преобразувател. Ако времето за преминаване намалява, тогава пукнатината е наклонена в посоката, в която е преместен датчика.

3.4. Определяне на вероятния модул на еластичност на бетона [6,7,9,12,14].

Измерената скорост на разпространение на УЗС в бетонни и стоманобетонни елементи зависи от динамичния модул на линейни деформации $E_{b,dm}$, акустическата плътност на материала ρ_b и коефициентът на Поасон ν и се определя по формулата [2,3,6,12,13,14]:

$$E_{b,dm} = k\rho_b V_{UPM}^2, \quad (7)$$

където: k – коефициент, $k = (1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu)$ при прозвучаване с надлъжни вълни [13];
 $k = 2(1 + \nu)$ при прозвучаване с напречни вълни.

Измерването на вероятния модул на еластичност с УБМ не е много точно по две причини: неточност при приемането на коефициента на Поасон и уравнение (7) е подходящо за хомогенни материали, докато бетона е нехомогенен материал. Много често измереният с този метод модул на еластичност е по-висок от измерения с традиционните методи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Проучванията са направени по проект No.КП-06-ОПР01/3-2018 “Разработване на гъвкава методология за развитие и управление на иновационни проекти в научни организации“ (2018/2021), финансиран от ФНИ, „Конкурс за финансиране на фундаментални научни изследвания по обществени предизвикателства – 2018 г.“, МОН, България.

ПРЕПРАТКИ

- [1] Ahn E.,H. Kim,S.Sim,S. Shin, M. Shin, Principles and Applications of Ultrasonic-Based Nondestructive Methods for Self-Healing in Cementitious Materials, Journal List Materials (Basel), v.10(3); 2017.
- [2] Ahmad N., R. Rahim, H. Rahim, M. Rahiman, A Review of Ultrasonic Application on Non-destructive Testing Method for Concrete Structure, JurnalTeknologi, 2014.
- [3] Bogas J., Gomes M., Gomes A., Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method, Elsevier, Ultrasonics, 2013, vol. 53.
- [4] Boosting Building Renovation: What Potential and Value for Europe? Directorate Ge-neral for Internal Policies Policy Department A: Economic and Scientific Policy, 2016.
- [5] Concu G., N. Trulli, “Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps”, Journal Buildings, 8 (12), 2018.
- [6] Dimov D., Non-destructive testing of Building Structures, Publisher: Direct Services, Sofia, Bulgaria, 2011.
- [7] Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures IAEA, Vienna, Austria, 2002 IAEA–TCS–17 ISSN 1018–5518 © IAEA.
- [8] Hasbullah M., R. Yusof, M. Yusoff, Assessing the Performance of Concrete Structure Based on the Width of the Crack Using UPV, Journal of Engineering Science and Special Issue on ISSC’2016.
- [9] Kalyan T., Chandra Kishen J., Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity, APCNDT 2013, Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, 2013.
- [10] Kumar S., Santhanam M., Detection of Concrete Damage Using Ultrasonic Pulse Velocity Method, Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad, Indian Society for Non-Destructive Testing Hyderabad Chapter, 2006.
- [11] Lorenzi A., Tisbieriek F., Pinto L., Ultrasonic Pulse Velocity Analysis in Concrete Specimens, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007.
- [12] Malhotra V., N. Carino, Handbook on Second Edition Nondestructive Testing of Concrete, CRC PRESS, 2004.
- [13] Naik T., V. Malhotra, J. Popovics, The Ultrasonic Pulse Velocity Method, Handbook on Nondestructive testing of Concrete, 2004.
- [14] Panzera T., A. Christoforo, F. Cota, P. Borges, C. Bowen, Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials, Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials, ISBN: 978-953-307-449-8, InTech, 2011.
- [15] Zatar W., Assessing the service life of corrosion-deteriorated reinforced concrete member highway bridges in west Virginia, Prepared for the WVDOT/DOH RP# 234, 2014.