

MEASUREMENT OF THE DEPTH OF SURFACE OPENING CRACKS USING IMPACT-ECHO METHOD

L. Pečínka^{*}

Summary: *Currently, the widths of opening surface cracks in reinforced concrete structures are used together with carbonation depth or chloride effects as an evaluation index for decision making for the repair of construction together with assessment of structural safety and ageing. The crack depth as a more important factor for structural lifetime management is rarely incorporated in the codes due to lack of knowledges and experiences. The time-of-flight diffraction technique developed in the early 1980s has been used widely to locate and measure defects in metal using ultrasound. In contradiction concrete is a composite material consisting of a binding material with particles like gravel, sand etc. embedded in construction medium. To overcome these difficulties, stress waves generated by mechanical impact instead of an ultrasonic transmitter are used. In this paper is presented simply method based on the propagation of the dilatation (P) and Rayleigh (R) waves excited by the impact. The theory is applied to the cracks perpendicular and oblique to the surface.*

1. Princip metody impact-echo

Podstatou metody impact-echo je úderem na testovaný objekt vytvoření přechodového napětíového pulsu a následně monitorování posuvů jeho povrchu vyvolaného příchodem vln odražených od vnitřních defektů a vnějších rozhraní. V dalším budeme hovořit o dilatačních (P) a smykových (S) vlnách, které se objektem šíří v kulových vlnoplochách a o povrchové (Rayleighově R) vlně. Jejich rychlosti jsou charakterizovány nerovností $c_P > c_S > c_R$. P a S vlny se po odrazu na rozhraní šíří směrem k povrchu, kde se opět odráží. Vzniká tedy přechodový jev, který se monitoruje snímačem umístěným pokud možno blízko místa úderu. Předmětem zájmu jsou P vlny, které jsou energeticky nejvydatnější. Amplituda této odražené vlny je dána vztahem

$$A_{\text{reflect}} = A_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

kde Z_1 a Z_2 jsou impedance defektu a oblasti, která je před/za ním a A_i je amplituda šířící se vlny. Její fáze závisí na poměru Z_2/Z_1 . V případě, že platí $Z_2/Z_1 \ll 1$ (např. pro rozhraní beton – vzduch $Z_2/Z_1 \approx 10^{-7}$), pak dochází ke změně fáze. Je-li tedy např. betonová deska obklopena ze všech stran vzduchem, pak v důsledku změny fáze na obou rozhraních vzniká

^{*} Ing. Ladislav Pečínka, CSc.: Nuclear Research Institute Rez plc, Husinec-Řež, čp. 130 250 68 Rez; tel.: +420 266 172 610, fax: +420 220 940 519; e-mail: pel@ujv.cz

na „úderovém“ povrchu tahová vlna. Pokud se ale vlna odráží na rozhraní beton/ocel a následně na rozhraní beton/vzduch, pak v prvním případě vznikne vlna tlaková a rozhraní beton/vzduch vznikne vlna tahová. Ve svém důsledku to znamená, že frekvence příchozí P vlny typu tlak/tah je poloviční než v případě odrazů na dvou rozhraních beton/vzduch. Z toho tedy plyne, že měříme-li tloušťku desky či zjišťujeme-li hloubku vnitřní vady, pak použijeme vztah

$$d = \frac{c_P}{2f} \quad (2)$$

zatímco pro zjišťování hloubky armovací tyče platí

$$d = \frac{c_P}{4f} \quad (3)$$

Pro vybuzení napětových vln se používají buď průmyslově vyráběné impaktory nebo pád ocelové kuličky o $\varnothing D$ z výšky h . Obecně platí, že čím menší průměr D , tím je vybuzena vyšší frekvence, ale nízká energie. Proto se používá pro detekci defektu blízko povrchu. Naopak kulička s větším průměrem vybudí nízkofrekvenční vlnu, ale s vyšší energií a proto je vhodná pro předpokládané větší hloubky.

Vliv velikosti průměru D a výšky pádu h na zjištění vad lze odvodit z Hertzovy teorie pružného rázu, Goldsmith 1965. Pro ocel/beton platí pro dobu kontaktu t_c vztah

$$t_c \doteq 0,00429 D/(h)^{0,1} \quad (4)$$

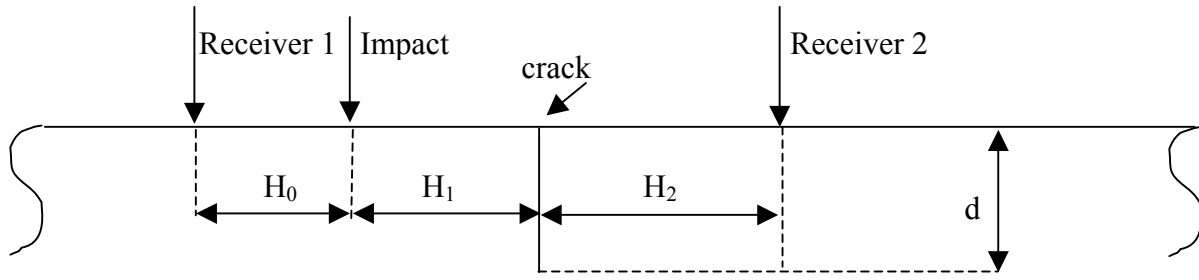
kde t_c je v mikrosekundách, D a h v metrech. V praxi se ale obvykle používá kulička na několika pružinách, jejichž natažením a uvolněním se vybudí úder. V tomto případě lze pro dobu kontaktu t_c použít vztah $t_c = 0,0037 D$, German Instruments 1996. Dle tohoto manuálu nejnížší frekvence takto vybuzené napětové vlny je rovna $1,25/t_c$. Jestliže tedy předpokládáme, že rychlost šíření P vlny je cca $4\,000\text{ m s}^{-1}$, pak nejkratší vlnová délka napětové vlny se odvodí pomocí vztahu

$$\lambda_{\min} = \frac{c_P}{\frac{1,25}{t_c}} \equiv 12 D \quad (5)$$

Pro detekci jakékoliv vady musí být vlnová délka vybuzené napětové vlny přibližně rovna nebo menší než očekávaný rozměr defektu. Vyjdeme-li z rovnice (5), pak to znamená, že $\varnothing$ budící kuličky musí být roven nebo menší než $1/12$ velikosti vady.

2. Detekce trhliny kolmé k povrchu

Testovací schéma je patrné z Obr. 1



Obr. 1: Schéma měření # 1

Úderem se vybudí dilatační vlna, která se rychlostí c_p šíří v kulových vlnoplochách až dosáhne vrcholu trhliny. Zde se odráží a opět v kulových vlnoplochách se šíří ke snímači 2. Současně se ale vybudí povrchová R vlna, která se rychlostí c_R šíří ke snímači 1. Vstupní data pro výpočet jsou tudíž tato, Iching 2004

- čas příchodu t_{IR} R vlny ke snímači 1
- počátek úderu $t_0 = t_{IR} - H_0/c_R$
- čas příchodu odražené P vlny t_2 do snímače 2
- čas nutný pro šíření P vlny z místa úderu do snímače 2 $\Delta t = t_2 - t_0 = t_2 - t_{IR} + H_0/c_R$

Použitím Pythagorovy věty pak dostaneme celkovou vzdálenost ve tvaru

$$c_p \Delta t = \sqrt{H_1^2 + d^2} + \sqrt{H_2^2 + d^2} \quad (6)$$

Odtud jednoduchou úpravou odvodíme

$$d = \sqrt{\left[\frac{(c_p \Delta t)^2 + H_1^2 + H_2^2}{2 \Delta t c_p} \right]^2 - H_1^2} \quad (7)$$

Otázka zní, do jaké míry je přesnost výpočtu ovlivněna volbou vzdálenosti H_1 a H_2 . První přístup vychází z požadavku, že výraz pod odmocninou musí být nezáporný. Odtud plyne podmínka, že

$$\left[(c_p \Delta t)^2 + H_1^2 + H_2^2 \right]^2 > \left[(2 \Delta t c_p) + h \right] \quad (8a)$$

Jednoduchou úpravou dostaneme

$$H_1^2 - H_2^2 > (\Delta t c_p) [2 H_1 - (c_p \Delta t)] \quad (8b)$$

Je to ale podmínka nutná a postačující? Proto pro důkaz zvolíme inverzní problém. Známe-li H_1 , H_2 a d , pak lze vypočítat Δt . Z rovnice (7) dostaneme vztah

$$(\Delta t)^2 - \frac{2 \sqrt{d^2 + H_1^2}}{c_p} \Delta t + \frac{H_1^2 - H_2^2}{c_p^2} = 0$$

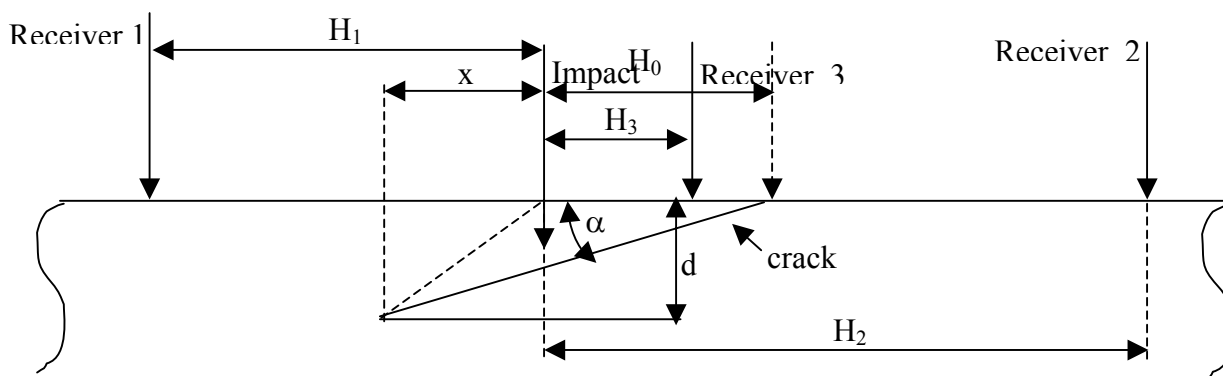
čili

$$\Delta t = \frac{1}{c_p} \left(\sqrt{d^2 + H_1^2} \right) \pm \left(\sqrt{d^2 + H_2^2} \right) \quad (9)$$

Odtud plyne, že nutnou a postačující podmínkou je, aby platilo $H_1 > H_2$, což lze i numericky dokázat.

3. Trhlina šikmá k povrchu

Na rozdíl od trhliny kolmé k povrchu je nutno měřením stanovit dva parametry, tj. hloubku d a úhel sklonu α . Nutná jsou tudíž dvě měření. Schéma je patrné z Obr. 2.



Obr. 2: Schéma měření # 2

Podstata šíření napěťových vln je shodná s předchozí kapitolou. Vstupní data pro výpočet jsou ale tato

- měření # 1

- čas příchodu R vlny t_{1R} do snímače 1
- počátek úderu $t_0 = t_{1R} - H_1/c_R$
- čas příchodu odražené P vlny t_2 do snímače 2
- čas nutný pro šíření P vlny z místa úderu do snímače 2

$$\Delta t_2 = t_2 - t_0 = t_2 - t_{1R} + H_1 / c_R$$

Použitím Pythagorovy věty pak dostaneme celkovou vzdálenost ve tvaru

$$\Delta t_2 c_P = \sqrt{x^2 + d^2} + \sqrt{(H_2 + x)^2 + d^2} \quad (10)$$

- měření # 2

- čas příchodu R vlny t_{3R} do snímače 3
- počátek úderu $t_0 = t_{3R} - H_3/c_R$
- čas příchodu odražené P vlny t_1 do snímače 1
- čas nutný pro šíření P vlny z místa úderu do snímače 1

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = t_1 - t_{3R} + H_3 / c_R$$

Analogicky k měření # 1 odvodíme výraz

$$\Delta t_1 c_P = \sqrt{x^2 + d^2} + \sqrt{(H_1 + x)^2 + d^2} \quad (11)$$

Pro neurčité $\underline{x}$ a $\underline{d}$ dostaneme pomocí vztahů (10) a (11) systém rovnic

$$4[H_1^2 - (\Delta t_1 c_p)^2]x^2 - 4H_1[1 - (\Delta t_1 c_p)^2]x + [(\Delta t_1 c_p)^2 - H_1^2] = 4d^2(\Delta t_1 c_p)^2 \quad (12)$$

$$4[H_2^2 - (\Delta t_2 c_p)^2]x^2 - 4H_2[1 - (\Delta t_2 c_p)^2]x + [(\Delta t_2 c_p)^2 - H_2^2] = 4d^2(\Delta t_2 c_p)^2 \quad (13)$$

Výsledná rovnice pro x má zjednodušený tvar

$$x_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\frac{p^2}{4} + \frac{1}{4}} \quad (14)$$

kde

$$p = H_1[1 - (\Delta t_1 c_p)^2](\Delta t_2 c_p)^2 + H_2[1 - (\Delta t_2 c_p)^2](\Delta t_1 c_p)^2 \quad (15)$$

Na základě znalosti $\underline{x}$ vypočteme hloubku $\underline{d}$ a délka trhliny L pak je

$$L = \sqrt{(H_0 + x)^2 + d^2} \quad (16)$$

a úhel $\alpha = \arcsin(d/L)$.

Speciální případ by nastal, pokud bychom náhodou udeřili právě nad vrcholem trhliny.

V tom případě platí

- pro snímač 1

$$(\Delta t_1 c_p) = d + \sqrt{d^2 + H_1^2}$$

$$d = \frac{1}{2}(\Delta t_1 c_p) \left[\sqrt{1 - \frac{H_1^2}{(\Delta t_1 c_p)^2}} \right]$$

- pro snímač 2

$$(\Delta t_2 c_p) = d + \sqrt{d^2 + H_2^2}$$

$$d = \frac{1}{2}(\Delta t_2 c_p) \left[\sqrt{1 - \frac{H_2^2}{(\Delta t_2 c_p)^2}} \right]$$

Identické výrazy bychom získali z předchozího řešení položením $x = 0$.

4. Závěr

Cílem předloženého příspěvku bylo vypracovat výpočtové základy měření povrchových trhlin. Z něj vyplynuly následující požadavky na experimenty

- vhodné budící zařízení (impaktor, kuličky)
- znalost rychlosti šíření P a R vln buď výpočtem nebo měřením na objektu
- přesná registrace časů příchodu P vln.

Jako příprava na měření byl v ÚJV Řež a.s. vyvinut a vyroben piezoelektrický budič a měřicí systém TRS pro detekci v časové a frekvenční oblasti. V roce 2007 se uskutečnila první měření.

Literatura

Goldsmith W. (1965 Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids. Edward Arnold Press.

Operation manual for the DOCTer Impact-echo test system using the Echo Blue software. German Instruments A/S.

Yiching Lin et al (2004) A simple device for detecting impact time in impact-echo testing of concrete. NDT & E International 37, pp. 1÷8.