

超音波を用いたひび割れ深さの測定方法

1. 超音波

超音波 (Ultra Sonic) は、20kHz 以上の周波数の音波のことである。ここで、波長、音速、周波数の間には、一般に次の関係がある。

$$\text{波長} = \text{音速} / \text{周波数}$$

音波には、次の特徴がある。

- (1) 音波は気体中を伝わるが、超音波のうち周波数の高いもの (約 10kHz 以上) は気体中を伝わらない。
- (2) 音波は、水中を伝わる。
- (3) 超音波は、境界面で反射する。
- (4) 超音波は、X 線や γ 線のような放射線障害を生じない。

コンクリート中の音速は、約 4000m/s である。ちなみに、空気中の音速は約 340m/s、水中の音速は約 1500m/s である。(空気 < 水 < コンクリート)

2. ひび割れ深さの測定方法

超音波を用いたひび割れ深さの測定方法には、Tc To 法 (L L 方式)、T 法、デルタ方式、近距離迂回波方式、BS 方式、回折波方式 (ランプ法)、S S 方式、R S 方式、レスリー法 (Leslie 法)、低周波横波超音波法がある。また、超音波の測定機器には、数多くの種類がある。ここでは、ひび割れ深さの測定にマルイ製の UST (Ultra Sonic Tester: 周波数 50kHz の P 波用振動子、二探触子法) を使用することを踏まえ、適用可能な Tc To 法 (L L 方式)、T 法、デルタ方式、近距離迂回波方式、BS 方式の概要について説明をする。

(1) Tc To 法 (L L 方式)

Tc To 法では、まず試験体の健全部表面で一振動子縦波探触子 2 個を間隔 2a で配置し、基準となる伝播時間を求める。次に、探触子 2 個をひび割れが中央になるように間隔 2a で配置し、伝播時間を求め、次式からひび割れ深さを求める。

$$d = a\sqrt{(t_c/t_o)^2 - 1} \quad (1)$$

ここで、d: ひび割れの深さ (mm)、2a: 送受両探触子間の距離 (mm)、tc: ひび割れを挟んで測定した伝播時間 (μs)、to: 健全部表面での伝播時間 (μs)

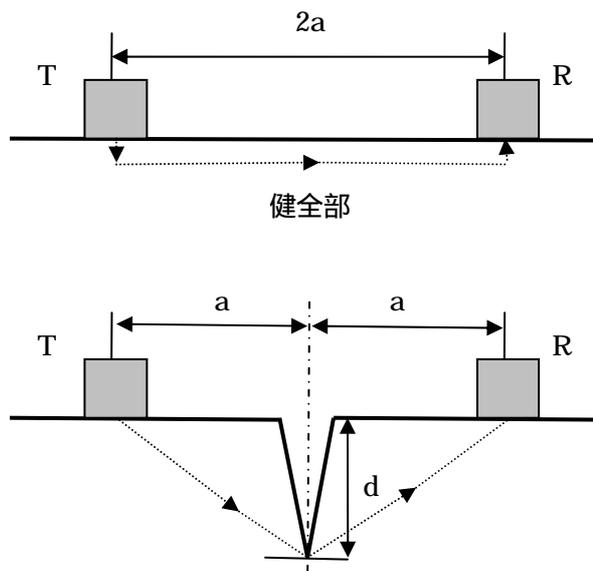


Fig. 1 Tc To 法 (L L 方式)

(2) T 法

T 法は、送信探触子を固定し、受信探触子を一定間隔で移動したときの走時曲線（伝播距離と伝播時間の関係）から、ひび割れ位置での不連続時間 T を求め、次式からひび割れ深さを計算する方法である。

$$d = T \cdot \cot \alpha \cdot \frac{T \cdot \cot \alpha + 2L_1}{2(T \cdot \cot \alpha + L_1)} \quad (2)$$

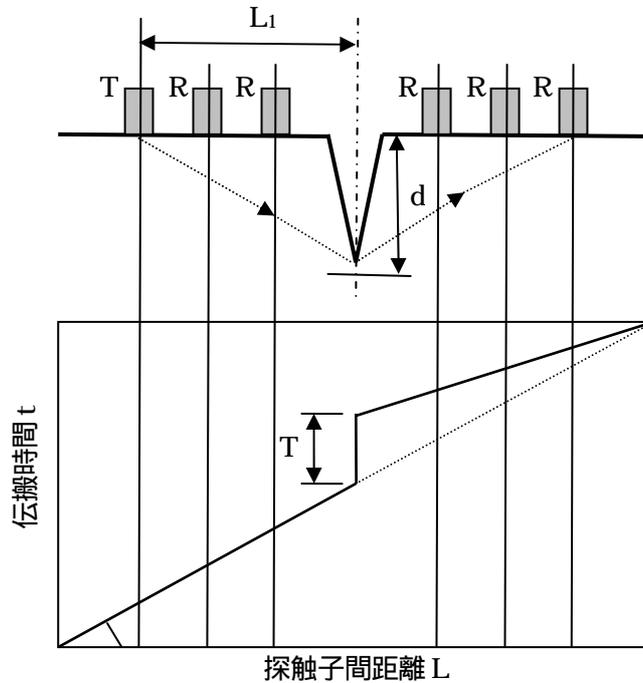


Fig. 2 T 法

(3) デルタ方式

デルタ方式は、L L 方式と原理的には同じであり、送受信探触子をひび割れを挟んで配置して伝播時間を測定し、ひび割れ深さを次式から求める方法である。L L 方式との違いは、送受探触子をひび割れを挟んで等間隔に設置しないことである。

$$d = \sqrt{\left\{ \frac{T^2 - R^2 + (V \cdot t)^2}{2V \cdot t} \right\}^2 - T^2} \quad (3)$$

ここで、T：ひび割れから送信探触子の表面までの距離（mm）、R：ひび割れから受信探触子の表面までの距離（mm）、V：健全部における各探触子間隔の表面走査法による音速（km/s）、t：ひび割れを挟んで測定した伝播時間（μs）である。

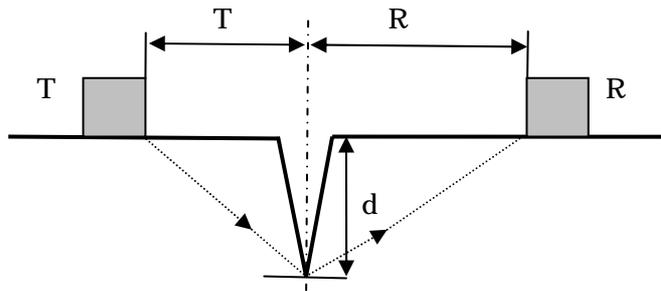


Fig. 3 デルタ方式

(4) 近距離迂回波方式

近距離迂回波方式は、L L 方式と原理的には同じであり、送受信探触子をひび割れを挟んで近接して配置し、ひび割れ先端までの往復伝播時間を測定して、ひび割れ深さを次式から求める方法である。L L 方式との違いは、送受探触子をひび割れを挟んで近接して設置することである。

$$d = V_o \cdot \frac{t}{2} \quad (4)$$

ここで、 d ：ひび割れの深さ (mm)、 V_o ：測定物の音速 (km/s)、 t ：往復伝播時間 (μ s) である。

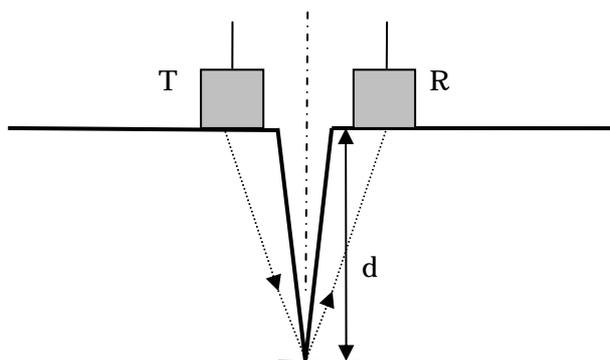


Fig. 4 近距離迂回波方式

(5) BS 方式

BS 方式は、BS4408 で推奨されている方法であり、送受信探触子をひび割れから等間隔に配置し、 $X_1=150$ mm の伝播時間 t_1 と $X_2=300$ mm の伝播時間 t_2 からひび割れ深さを計算する方法である。

$$d = 150 \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (5)$$

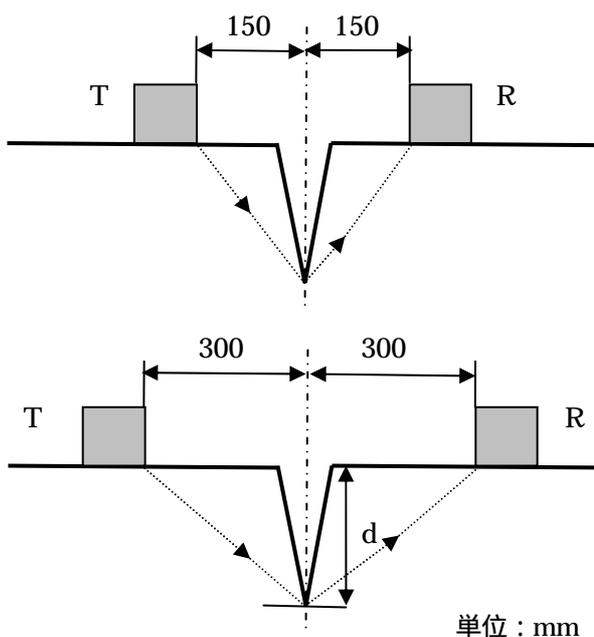
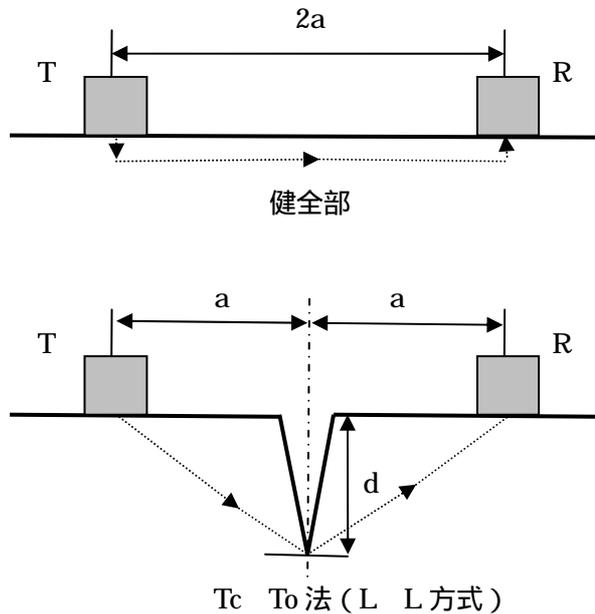


Fig. 5 BS 方式

【付録】

Tc To 法 (L-L 方式), デルタ方式, 近距離迂回波方式における式の導き方および条件を示す。

(1) Tc To 法 (L-L 方式)



健全部における伝播速度を V_0 , ひび割れを挟んだ場合の伝播速度を V_c とする。 V_0 および V_c は, 測定される伝播時間と伝播距離を用いることで次のように得ることができる。

$$V_0 = \frac{2a}{t_0}, \quad V_c = \frac{2\sqrt{a^2 + d^2}}{t_c}$$

ここで, V_0 の伝播距離は, 発振子と受振子の間の距離 $2a$ とし, V_c の伝播距離は, ひび割れから発・受振子までの距離 a とひび割れ深さ d の二等辺三角形とする。また, t_0 は健全部表面での伝播時間, t_c はひび割れを挟んで測定した伝播時間である。

超音波パルスは同じコンクリート内を伝播することから, 伝播速度は同じである。

$$V_0 = V_c$$

したがって, 次のようにして L-L 方式の式を得ることができる。

$$\frac{2a}{t_0} = \frac{2\sqrt{a^2 + d^2}}{t_c}$$

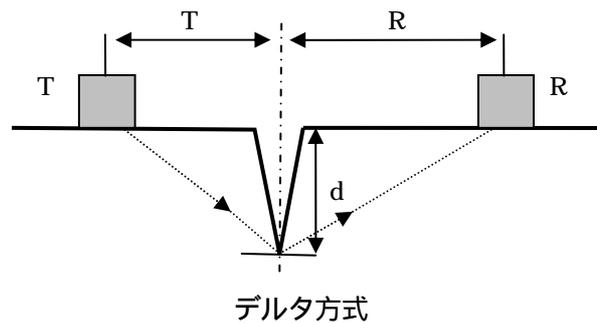
$$a \frac{t_c}{t_0} = \sqrt{a^2 + d^2}$$

$$a^2 \left(\frac{t_c}{t_0} \right)^2 = a^2 + d^2$$

$$d^2 = a^2 \left(\frac{t_c}{t_0} \right)^2 - a^2$$

$$d = a \sqrt{\left(\frac{t_c}{t_0} \right)^2 - 1}$$

(2) デルタ方式



デルタ方式の式は、次のとおりである。

$$d = \sqrt{\left\{ \frac{T^2 - R^2 + (V \cdot t)^2}{2V \cdot t} \right\}^2 - T^2}$$

ここで、ひび割れから発振子までの距離 T とひび割れから受振子までの距離 R を同じであるとする、式は次のように変形することができる。

$$d = \sqrt{\left\{ \frac{T^2 - T^2 + (V \cdot t)^2}{2V \cdot t} \right\}^2 - T^2}$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{1}{2} V \cdot t \right)^2 - T^2}$$

V は健全部における伝播速度である。

$$V = \frac{2T}{t_o}$$

この条件を上式に適用すると、次のようになる。

$$d = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2T}{t_o} \cdot t \right)^2 - T^2}$$

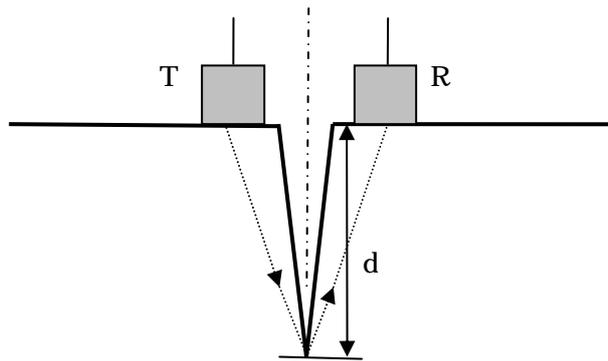
$$d = \sqrt{\left(\frac{T}{t_o} \cdot t \right)^2 - T^2}$$

$$d = \sqrt{T^2 \cdot \left(\frac{t}{t_o} \right)^2 - T^2}$$

$$d = T \sqrt{\left(\frac{t}{t_o} \right)^2 - 1}$$

T と t は、L-L方式において a と t_c であることから、ひび割れから発・受振子までの距離が同じであるならばデルタ方式の式とL-L方式の式は同じになる。

(3) 近距離迂回波方式



近距離迂回波方式

近距離迂回波方式は、原理的に L-L 方式である。したがって、健全部における伝播速度 V_0 およびひび割れを挟んだ場合の伝播速度 V_c は、測定される伝播時間と伝播距離を用いることで次のように得ることができる。

$$V_0 = \frac{2a}{t_0}, \quad V_c = \frac{2\sqrt{a^2 + d^2}}{t_c}$$

また、発振子と受振子は、ひび割れの近距離に設置することから V_c の式に $a=0$ という条件を加えると次のようになる。

$$V_c = \frac{2\sqrt{d^2}}{t_c}$$

$$V_c = \frac{2d}{t_c}$$

$$d = V_c \cdot \frac{t_c}{2}$$

超音波パルスは、同じコンクリート内を伝播することから、 $V_0 = V_c$ という条件を加えると次のようになる。

$$d = V_0 \cdot \frac{t_c}{2}$$

(4) 条件

T_c T_0 法 (L-L 方式)、デルタ方式、近距離迂回波方式の式を導くためには、次の 3 つの条件が必要になる。

健全部における伝播速度 V_0 の伝播距離は、発振子と受振子の間の距離である。

ひび割れを挟んだ場合の伝播速度 V_c の伝播距離は、ひび割れから発・受振子までの距離 a とひび割れ深さ d の二等辺三角形である。

超音波パルスは同じコンクリート内を伝播することから、 $V_0 = V_c$ である。

からは、表面走査法 (表面法) における伝播距離は端子間距離になることを意味しており、超音波パルスはコンクリート内部ではなく、表面近傍を伝わっていることになる。また、からは、部材断面内において伝播速度は一定であることを意味している。