

(V-35) 弾性衝撃波法によるコンクリートの亀裂深さの測定

東海大学 正会員 極壇 邦夫
伊藤建設(株) 正会員 岩野 聡史
アプライドリサーチ(株) 正会員 〇境 友昭

1. まえがき

コンクリート構造物の健全性を評価する上で、亀裂は重要な要素である。特に、表面に現れた亀裂が鉄筋の深さに及ぶ場合、鉄筋の腐食を誘発し、構造物の劣化が急速に進行する可能性が指摘されている。これまで、コンクリートの亀裂深さは、超音波技術によって測定されることが一般的であったが、むしろ回折損失の少ない弾性波領域を用いる方が適用性が高いと考えられる。本報告は、衝撃弾性波法による亀裂深さの測定理論、実験、および実際に適用した結果について述べるものである。

2. 測定の理論

図-1に示すように、コンクリートに深さ d の理想的な亀裂がある場合を想定する。打撃点は、亀裂から $L_1 + L_2$ の距離にあり、また亀裂を挟んだ2点(P_1 , P_2)で波動を測定する。 P_1 で測定される波動は、コン

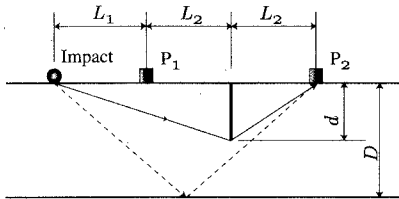


図-1 測定のモデル

クリートの表面を伝搬する弾性波であり、その弾性波速度を V_P とおくと、

$$t_1 = \frac{L_1}{V_P} \quad (1)$$

に到達した波動である。一方、 P_2 点では、表面の伝搬経路に不連続面があり、波動は亀裂を迂回して伝搬する。この時、波動が亀裂の先端を回折して P_2 点に到達すると考えると、伝搬時間は、

$$t_2 = \frac{\sqrt{(L_1 + L_2)^2 + d^2} + \sqrt{L_2^2 + d^2}}{V_P} \quad (2)$$

となる。この測定システムでは、測定点 P_1 , P_2 に到達する波動の時間差(T)が測定される。すなわち、

$$T = \frac{\sqrt{(L_1 + L_2)^2 + d^2} + \sqrt{L_2^2 + d^2} - L_1}{V_P} \quad (3)$$

である。ここで、 $L_1 = L_2 \equiv L$ の条件のもとで、式(3)を整理すると、

$$\frac{V_P T}{L} = \sqrt{4 + \left(\frac{d}{L}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{L}\right)^2} - 1 \quad (4)$$

となる。ここで、 $V_P T/L$ は、伝搬遅延時間を測定距離で規準化したものである。更に、 $d \ll L$ の条件の下で式(4)を近似展開し、

$$V_P T = 2L + \frac{3d^2}{4L} \quad (5)$$

これを d について解くと、

$$d = 2L \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{V_P T}{L} - 2 \right)} \quad (6)$$

が得られる。式(6)から亀裂が存在する場合、 $V_P T > 2L$ の条件が成立しなければならないことが分かる。厳密解と近似式の関係を図-2に示す。ひび割れの深

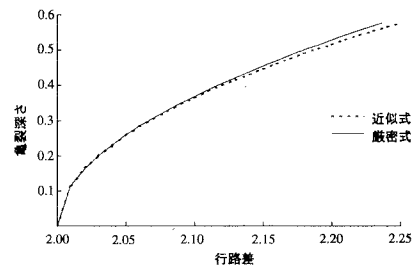


図-2 近似計算の厳密解の比較

さ d は、測定距離 L で規準化した値であり、測定距離の60%までのひび割れ深さの範囲での近似誤差は、1%以下であることが分かる。

測定限界の考察：底面反射の影響

行路差の測定は、測定点 P_1 , P_2 での弾性波の到達時間差によって求められる。超音波法では、発信子と受信子を結ぶ最短距離は、亀裂の先端を迂回する経路であるが、弾性波法では、打撃点からコンクリート板の底面を反射して測定点に向かう経路があり、手法の適用限界について考慮しなければならない。図-1に示す測定システムにおいて、コンクリート板の底面から反射した波動は、近似展開すると、

$$V_P T = 2L + \frac{2D^2}{3L} \quad (7)$$

として与えられる。式 (5) と式 (7) の比較から、亀裂の先端を回折する行路差が底面で反射する行路差よりも小さい、すなわち、回折した波動が底面で反射した波動よりも先に到達する条件は、

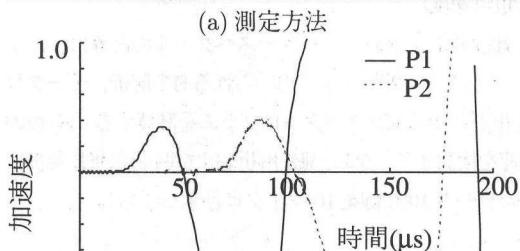
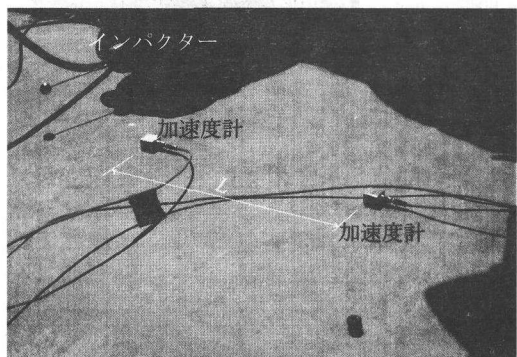
$$d < 0.943D \quad (8)$$

となる。式 (8) から判断して、亀裂がほぼ板厚に及んでいない限り、原理的には亀裂深さが弾性波の回折現象によって測定可能であることが示される。

3. 測定結果

3.1 弾性波速度

式 (1),(3) に示すように、亀裂深さの測定に先立ち、測定対象コンクリートの弾性波速度を求める必要がある。弾性波速度の測定方法には、透過法と表面法がある。前者には、コンクリート板の厚さが既知の場合に、多重反射の周期から算出する方法と、対向面にセンサーを設置して、波動の伝搬遅延時間を測定する方法がある。後者は、図-3 に示すように、コンクリートの表面の2カ所にセンサーを取り付け、この間の波動の伝搬遅延時間を測定する方法である。表面法では、鉄筋や表面劣化などの影響を受けやすく、コンクリート板の平均的な弾性波速度を把握する方法としては、透過法の方が優れる。伝搬遅延時間は、図-3(b) のように、 $1\mu\text{s}$ で波形データをサンプリングし、波形の立ち上がりでの時間差によった。今回の試



(a) 測定方法

(b) 測定波形 (距離 0.2m)

図-3 弾性波速度の測定

験では、透過法および表面法によって弾性波速度の測定を行った。弾性波速度は、透過法で $4,650\text{m/s}$ 、表

面法で $4,300\text{m/s}$ から $4,550\text{m/s}$ であった。亀裂深さの解析では、透過法による弾性波速度を使用した。

3.2 亀裂深さ

表-1 に亀裂模型 (幅 3mm 、深さ 150mm) の亀裂模型による試験結果を示す。この試験は、弾性波法による亀裂の測定方法の検証を目的として行ったものである。測定は、弾性波速度の場合と同様に $1\mu\text{s}$ でサンプリングし、伝搬遅延時間を求めた。試験の結果、

表-1 模型亀裂 ($d = 150\text{mm}$) での試験結果

測定距離		遅延時間	亀裂深さ (mm)	
L_1	L_2	(μs)	式 (3)	式 (6)
0.1	0.1	71	150	130
0.15	0.1	74	156	
0.2	0.1	105	153	

5%以内の精度で亀裂深さが得られており、衝撃弾性波法によってコンクリートの亀裂深さの測定が可能であることがわかった。

表-2 は、実際に亀裂が生じているコンクリートブロック (厚さ 250mm) での試験結果を示すものである。測定距離は、 0.1m 、 0.15m および 0.2m としている。表に示すとおり、測定距離が長くなる程、亀裂の

表-2 実コンクリートでの試験結果

測定距離		遅延時間	亀裂深さ (mm)	
L_1	L_2	(μs)	式 (3)	式 (6)
0.1	0.1	44	30	24
0.15	0.15	70	74	70
0.2	0.2	92	88	86

深さが深く測定される結果となっている。特に、測定距離が 0.1m の場合には測定された深さが 0.15m の場合の $1/2$ 以下となっている。

4. まとめ

これまで、亀裂深さの測定では、超音波が利用されていた。測定原理は、超音波の場合も衝撃弾性波の場合も「波動の回折行路差を求める」という点では同様である。模型的に作成した亀裂は、カッターで切断したものであり、亀裂の途中には接触部がない。このため、測定距離が 0.1m の場合でも 0.2m の場合でもほぼ同様の測定結果となっている。しかし、実際の亀裂では亀裂の両面が部分的に接触している場合が考えられる。測定距離が 0.1m で亀裂が深い場合、亀裂先端での回折角度が大きく、したがって回折減衰が大きくなる。この時、亀裂の部分的な接触面を透過する波動の強さが、回折波よりも強いと、結果的に透過波の伝搬遅延時間が測定されることになる。表-2 に示す結果は、このような原因によるものと考えられる。また、このよう測定距離を変えた試験によって、亀裂が完全に分離したものであるが、部分的に接触しているものであるか、の判定が可能となる。

また、本論では亀裂深さ算出のため近似式を提案した。やや小さめの値を示すが、実用範囲と考える。