

衝撃弾性波によるひび割れ深さ測定の基礎的実験

Fundamental experiment of concrete crack depth measurement by impact elastic wave

日東建設 (株)	正会員	金田重夫 (Shigeo KANEDA)
日東建設 (株)	正会員	久保 元 (Hajime KUBO)
東海大学土木工学科	正会員	極檀邦夫 (Kunio GOKUDAN)
アプライドリサーチ (株)	正会員	境 友昭 (Tomoaki SAKAI)
道立北方建築総合研究所		植松武是 (Takeyoshi UEMATSU)

1. まえがき

コンクリート構造物のひび割れは、設計加重を超える過大荷重によって生じたものか、あるいは種々の理由によって弱体化した構造部分であるかという指標の一つと考えられる。いずれにせよ、ひび割れが生じている部分は、構造的に問題がある可能性が大きいので、表面に現れたひび割れ幅はクラックゲージを使って、長さは目視で観察しひび割れ分布図を作成し検討する。しかし、ひび割れで重要なのは、ひび割れ幅よりもコンクリート内部でのひび割れ深さと方向である。

衝撃弾性波による測定は、表面処理不要、測定法簡便、測定敏速などの利点があるため、超音波の代わりにインパクト打撃による衝撃弾性波を利用して、ひび割れ深さの測定、インパクトの質量の影響、ひび割れに水が充満してときの測定、受信側に2個の加速度計を固定してインパクトだけを移動するひび割れ深さの測定、について実験したので報告する。

2. ひび割れ測定方法について

自然なひび割れの形態は、開始点と終了点が不明瞭であること、深さ方向のひび割れの幅は可変的で、その構成は不規則であるのが特徴である。ひび割れの空隙を満たしている空気は、弾性波を遮断するスクリーンとなる。弾性波がコンクリートから空気へ透過する程度は、音響インピーダンスに依存する。音響インピーダンスは、物質の弾性波速度と密度の積であるから、概略値は、コンクリートは 10^8 、空気は 10^3 である。反射率は、両者の差を分子、両者の和を分母とする比だから空気に接しているコンクリートの弾性波は、ほぼ 100% 反射する。

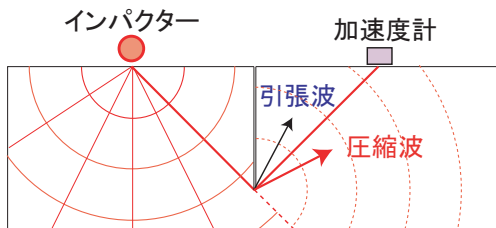


図 1: 弾性波の回折

コンクリート表面を打撃すると、表面波 (レイリー波) と縦弾性波 (P 波)、横弾性波 (S 波) が内部に半球状に伝搬する。伝搬する速度は、コンクリートのヤング率を密度で除した値の平方根となる。コンクリート内部では、弾性波によるひずみが拘束されるためにポアソン比の影響が加わり数パーセント速くなる。

弾性波がひび割れの下端に達すると、ホイヘンスフレネルの原理によって回折する。ひび割れの先端の点

から新たに2次波が球面波として伝搬する。打点、ひび割れ下端、加速度計を結ぶ弾性波の伝搬経路を直線で示した。

加速度計でとらえる最初の縦弾性波は、ひび割れ下端の角度が直角より小さいときは、下向きの波形 (引張り波) である。ひび割れ下端の角度が直角と等しいか大きくなると、上向きの波形 (圧縮波) となることが超音波法で紹介されている。¹⁾

ひび割れの深さの定義することは、加速度計に到達する p 波の経路の幾何学的な関係に基づいて決定できる。インパクトの代わりに、加速度計を取り付けたハンマー (インパルスハンマー) を使用すると縦弾性波の伝搬速度を測定できるので、ひび割れ深さの確認ができる。ひび割れが斜めの場合については、今回は実験しなかった。

3. 供試体と測定方法

供試体と測定装置の概要を図-2に示す。供試体の大きさは $1500 \times 1500 \times 400 \text{mm}$ 、普通ポルトランドセメント、スランプ 8cm、最大骨材寸法 25mm、設計強度 30MPa である。図の供試体は、ひび割れ深さ 200mm であるが、供試体の大きさは変えないで、ひび割れ深さだけを 100mm、50mm に設定した供試体も別途製作した。



図 2: 供試体

測定は、ひび割れを中心として、ひび割れに直行する線を引き、等距離の位置に、たとえば 10mm 間隔に印を付けて、片方は打点でもう一方は弾性波の測定点である。打点をインパクトで叩き、もう一方の測定点に加速度計を手で押しつけて固定した。インパクトの代わりに用いたインパルスハンマーは PCBC03 である。2 個固定して用いた加速度計は (PCB352C66) である。インパルスハンマーの打撃波形および加速度計による弾性波はサンプリングクロック 1 マイクロ秒、データ数 8000 個で記録した。

4. 測定結果および考察

4.1 打点と測点が等距離の測定

図-3は、ひび割れ深さ 100mm の場合、ひび割れ中心から打点と測点を等距離 10mm ずつ増加させたときの結果である。ひび割れから 80mm と 90mm の位置では、弾性波の初期波形は下向きの引張波である。100mm, 110mm, 120mm での初期波形は上向き圧縮波が到達している。加速度計がひび割れから 100mm のとき上向き圧縮波形となっているので、ひび割れ深さ 100mm と一致して、ひび割れ先端の角度は直角となる。超音波法で直角になると報告されていると同様の結果となった。ひび割れ先端の回折角度が直角とすると、ひび割れ深さは加速度計に上向き圧縮波が観測される点の水平距離と等しくなる。図-3 の上向き波形は、第 1 周期波形の振幅の数%の大きさである。

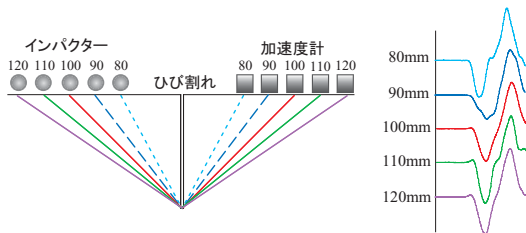


図 3: 打点測点等距離の測定

図-4は、波形を拡大表示しているため判断が容易になるが、微少な上向き圧縮波形により、ひび割れ深さが決定するので、たとえば、第一周期の振幅の数%以上のとき圧縮波と認めるなどの判定基準が必要と思われる。ひび割れ先端角度が直角のときに現れる微少な上向き圧縮波の解明は、コンクリートは不均質、異方性、音響学的に不連続性などもあり容易ではない。

打点をインパルスハンマーで打撃し、測点に加速度計を設置しひび割れの先端を通る経路の弾性波速度を測定し、下向き引張波と上向き圧縮波を比較した。鋼球打撃により入力した弾性波が加速度計に到達する経路長 P は、打点と加速度計の距離を L 、ひび割れ深さを D とすると、 $P = \sqrt{L^2 + 4D^2}$ となり、 V_P を弾性波速度、 T_P を伝搬時間とすると、 $T_P = \frac{P}{V_P}$ となる。弾性波速度からひび割れ深さを算出すると、 $D=118\text{mm}$ と誤差が大きい結果が得られた。

4.2 インパクター質量の影響

インパクターの質量に比例して、インパクターの接触時間が増加する。接触時間の前半がコンクリートを押ししている入力波長となる。弾性波の波長が長いと、透過力は大きくなるが、小さい欠陥は探査できない。1メートルを超える厚さの現地の橋脚や橋台のひび割れを測定するには、重量インパクターが必要である。

そこで、質量 4 グラムから 64 グラムまで変えて測定した結果を図-4 に示す。図によると、軽重に関係なく 100mm のとき、上向き圧縮波が観測されているので、インパクター質量の影響は考慮しないで良いと思われる。

ひび割れに水が入っている場合

ひび割れに水が充満している場合と空気がある場合を実験した。ひび割れに水が満たされていると、その水面の上端を弾性波が伝搬した。従って現地構造物の測定では、水をエアガンなどで吹き飛ばす工夫が必要であろう。

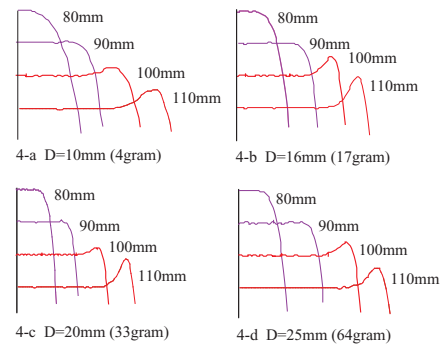


図 4: インパクター質量の影響

4.3 加速度計 2 個での測定

図-5は加速度計 2 個を一定間隔 (例えば 20cm) に固定して、インパクターだけを移動しながら打撃したときの結果を示したものである。

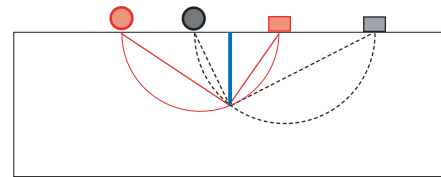


図 5: 加速度計 2 個の測定

加速度計は固定しているので、ひび割れから加速度計 A,B までの距離 (L_A, L_B) は一定である。インパクターとひび割れの距離は、一定間隔 (10mm) ずつ増加させて、A,B 向上向き圧縮波が観測されるまで計測する。上向き圧縮波が観測されたときの、加速度計 A とインパクターの距離を D_A 、加速度計 B とインパクターの距離を D_B とする。 D_A と D_B を直径とする円曲線を描き、その交点とコンクリート表面を結んだ直線がひび割れ深さとひび割れの位置を示す。ひび割れ深さ 100mm の測定では、測定値は 97mm と良好な結果が得られた。

5. まとめ

ひび割れ深さを超音波の代わりに衝撃弾性波を用いて測定できるか実験した。ひび割れ深さ、50mm, 100mm, 200mm に設定した供試体の測定結果をまとめると次のとおりである。

- (1) ひび割れを中心に打点と加速度計を等距離ずつ離してゆき、最初の受信波形に上向き圧縮波が到達した点からひび割れ深さを推定した結果と、模型のひび割れ深さ 50mm, 100mm, 200mm とはほぼ一致した。
- (2) インパクターの質量の影響は、今回の実験では無かったので、現地大型構造物の測定には、重量インパクターを使用できることがわかった。
- (3) 一定間隔の加速度計 2 個を固定し、インパクターだけを移動させて上向き圧縮波を測定し、打点加速度計の距離を直径とする円を 2 つ描き、交点を求め表面と結んだ直線がひび割れ深さとなる。実寸 100mm のひび割れを測定したところ、97mm であった。この方法は打点と加速度計を移動させる方法よりも、簡単で測定時間も短い。

参考文献

1. 日本非破壊検査協会編、コンクリート構造物の非破壊試験法、日本非破壊検査協会 養賢堂、1994.12.