

鋼球打撃の衝撃弾性波によるひび割れ深さ測定の検討

東海大学 学生員 藤原 達郎
 東海大学 正会員 笠井 哲郎
 iTECS 技術協会 正会員 極 檀 邦夫

1. まえがき

コンクリートの健全性の評価項目の一つにひび割れがあり、ひび割れ幅、分布などが検討される。ひび割れは種々の要因により生ずるが、地震や過加重が原因の場合は、ひび割れ深さの測定を要請される場合がある。また、ひび割れが鉄筋に達すると鉄筋の腐食が急速に進行する。これまで、ひび割れ深さの測定は超音波法が多用されてきたが、表面平滑に要する前処理やグリース塗布による汚れなどの問題があった。衝撃弾性波法は、前処理不要、深いひび割れ可能、測定が簡便など有利な点が多い。

ひび割れを設けた大型コンクリート供試体を用いて次の3点の方法によりひび割れ深さを測定し検討した。1. 位相の反転を利用する直角回折法、2. 弾性波の伝搬速度を比較する方法、3. レイリー表面波による方法。

2. 実験内容

インパクト（鋼球）による点発生の衝撃弾性波がひび割れ先端で回折する様子を図-1に示す。コンクリートを等方等質の弾性体と仮定すると、体積変化する縦波（P波）は、体積変化しない形状変化する横波（S波）よりも速い。点衝撃の弾性波はあらゆる方向に球面状に伝搬する。

ひび割れ先端を通過するとき、端の外側に形成される一次波の波面と、先端の後ろに形成される回折波の波面はつながり、その回折波はあたかもひび割れ端の部分から新たに発生したような波面を形成する。

回折角度が 90° より小さい鋭角と大きい鈍角では弾性波の位相が変わることは多くの報告があり、超音波によるコンクリートのひび割れ深さ測定方法：JCMSB5705 直角回折波法、として規格化されている。

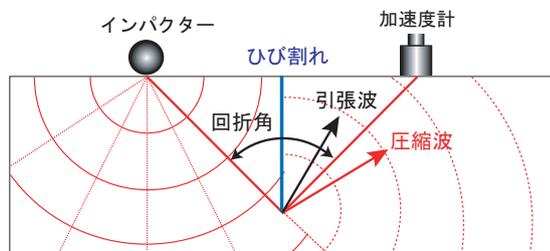


図-1 弾性波の回折

製作したひび割れ供試体は、設計強度 28MPa で、寸法は $900 \times 1780 \times 390\text{mm}$ である。ひび割れは、生

コン打設時に厚さ 5mm の EPS 板を埋設し、半硬化後に抜取った。今回測定したひび割れ深さは 95mm と 165mm である。

直角回折波法による測定は、ひび割れを中心として、インパクトの打点と 1 軸加速度計 (PCB 352C66) を左右対称に配置した。打点と加速度計の間隔は、深さ 95mm のひび割れでは 140mm から 280mm まで、深さ 165mm のひび割れでは 280mm から 360mm まで、20mm ずつ増加させた。

弾性波伝搬速度の測定では、インパクトの代わりにインパルスハンマー (PCB 086C03) を使用した。インパルスハンマーを 1ch に、1 軸加速度計 (PCB 352C66) を 2ch に接続して、両者の波形の始点を観測し時間差を求めた。

表面波の測定は、3 軸加速度計 (PCB U356A11) を使用して、インパクトによる表面波の鉛直加速度を 1ch で、水平加速度を 2ch でとらえた。

測定装置 (iTECS-2) は 2ch 仕様で、サンプリングクロック $1\mu\text{s}$ 、サンプリングデータ数 8000 個である。

3. 実験結果および考察

3.1 直角回折波法によるひび割れ深さ測定

図-2 に直角回折波法による結果を示す。

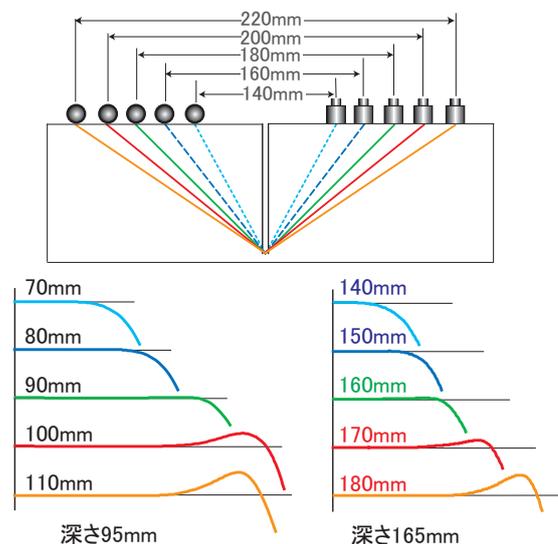


図-2 弾性波の位相反転

95mm ひび割れの場合、ひび割れからの距離が 90mm では、弾性波の初期波形は下向きの引張波であり、100mm では上向きの圧縮波となっている。したがって位相の変わる境界点を 90mm と 100mm の中間 95mm と仮定すると、ひび割れ深さが 95mm であるので、回折角は直角 90° となる。165mm のひび割れの場合も、ひび割れ深さは 160mm と 170mm の中

間に境界点が存在する同様の結果が得られた。

表面処理不要で機械的衝撃を与える衝撃弾性波法でも超音波による直角回折波法と同等の結果が得られることが分かった。

3.2 弾性波速度によるひび割れ深さ測定

弾性波速度は、伝搬距離を伝搬時間で除した。伝搬時間は、インパルスハンマー打撃により発生した弾性波が、ひび割れ先端で回折して反対側表面に設置した加速度計に到達するまでの時間差を波形から求めた。図-3は、縦軸に時間差、横軸に打点と加速度計の距離を取り、前半の下向き波形の測定値(黒丸)、後半の上向き波形の測定値(黒丸)、ひび割れのない部分の測定値(白丸)を示した。

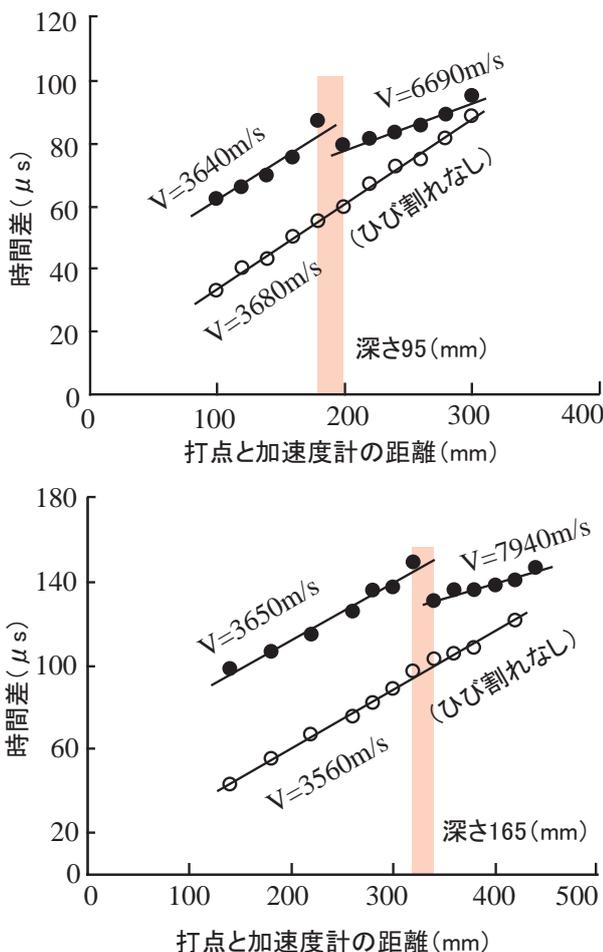


図-3 前半伝搬速度と後半伝搬速度

ひび割れ深さ 95mm を見ると、前半の回帰直線の傾きと後半の回帰直線の傾きが違うため不連続点が存在する。下向き波形の伝搬速度は 3640m/s であるが、上向き波形の伝搬速度は 6690m/s とかなり異なっていて、伝搬速度の異なる不連続点は 190mm 付近である。打点と加速度計の距離の中央にひび割れがあるので、打点とひび割れ先端と加速度計は直角三角形になる。すなわち、前半と後半の弾性波速度の不連続点は、直角回折波法の位相の変わる境界点と一致している。この傾向は、ひび割れ深さ 165mm の場合でも認められた。

ひび割れのない表面弾性波速度 3680m/s と、ひび

割れのある前半下向き波形の速度 3640m/s とは測定誤差を考えると妥当であるが、後半の上向き波形の弾性波速度は 6690m/s と異常に速い。常識的にはこのような高速伝搬速度はあり得ないので、今後の検討課題である。

3.3 レイリー表面波の回転

三軸加速度計の鉛直加速度を縦波、水平加速度を横波とみなして、加速度を数値積分して速度に変換してレイリー表面波を求めた。レイリー波は、伝搬が2次元的で減衰が少ない、伝搬速度が遅い、表皮効果をもっている、などの特徴がある。表皮効果は、表面亀裂や表面劣化の評価に有効に利用することができる。

図-4にひび割れ深さ 95mm と、ひび割れのないところのレイリー波の回転の様子を示した。

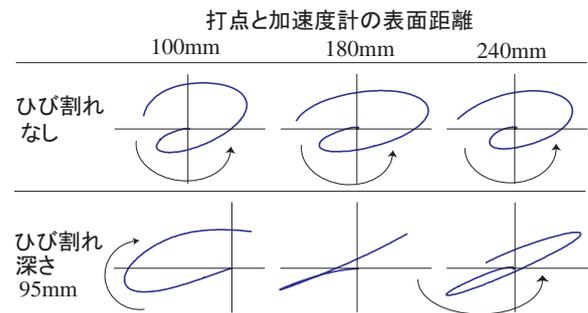


図-4 レイリー表面波の回転

ひび割れのないところでは、打点と加速度計の距離が 100mm, 180mm, 240mm と変化しても、反時計回りに回転するレイリー波が観測された。

ひび割れ深さ 95mm の場合は、100mm(回折角 56°)では時計回りに回転し、180mm(回折角 89°)では回転しない、240mm(回折角 103°)では反時計回りに回転する特異な現象が生じた。

100mm は、1軸加速度計での測定では下向き波形、180mm は境界点近傍、240mm は上向き波形に対応している。下向き波形では時計、上向き波形では反時計に回転する傾向は他の測定位置でも認められた。

5. まとめ

衝撃弾性波によるひび割れ深さの実験結果をまとめると次のとおりである。

1. 超音波の直角回折波法によるひび割れ深さの測定法と、同等の結果が衝撃弾性波でも得られた。下向き波形(引張波)と上向き波形(圧縮波)との境界点から、簡単明瞭にひび割れ深さを測定できる。
2. 下向き波形の弾性波速度と上向き波形の弾性波速度はかなり異なるため、両者の回帰直線は不連続点をもつ。この不連続点は、直角回折波法の位相の変わる境界点と一致することが分かった。
3. ひび割れ深さ 95mm におけるレイリー波の回転は、回折角度が 90° より小さい鋭角では時計回りに回転するが、90° 以上になると反時計回りに変わった。直角回折波法の位相が変化する境界点に対応して回転方向が変わることが分かった。