

10cm 離れた点と、センサー面から直角に 5cm, 10cm に位置する横側を打撃する 3 通りで行った。これは地盤調査で行われている板叩き法を参考にして、表面波の伝搬する方向に一致するような弾性波入力の方法を検討したためである。

弾性波速度の低下について

縦弾性波 (P 波) の速度は、縦弾性係数 E , 密度 ρ , ポアソン比 ν とすると,

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad Z = \sqrt{E\rho} = \rho C \quad (1)$$

弾性波が伝わる能力を示すパラメータは、インピーダンス Z と呼ばれる。波の力学的な性質は、物質の慣性を与える定数の密度と変形にもなって生じる力を与える弾性係数で表される。コンクリートを波を伝える媒質とすると、波の速さ V とインピーダンス Z という 2 つのパラメータの関数となる。したがって、コンクリート構造物にひび割れ空洞が存在すると弾性係数と密度が変化するので、通常、弾性波速度は数パーセントは低下すると推測される。

3. 実験結果および考察

3-1. 表面 P 波速度とレイリー波の波形

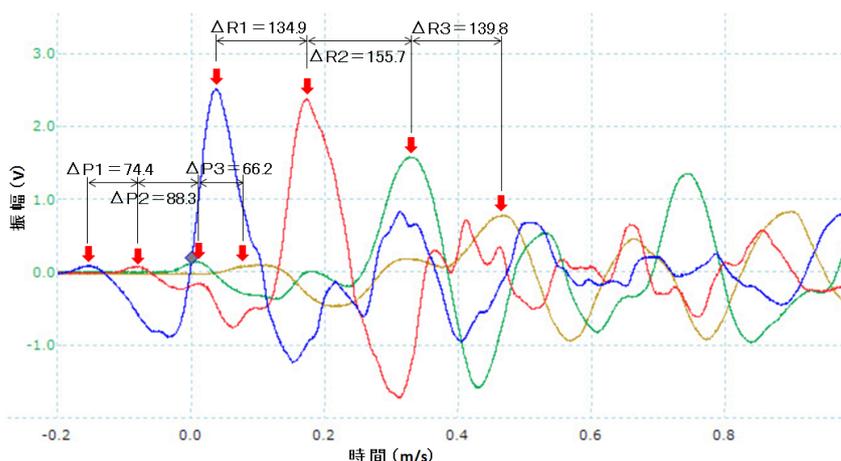


図 3: 表面 P 波速度とレイリー波速度 ハンマー右打

図-3 に 4 点センサーで測定した弾性波波形を示す。衆知のように、ハンマーで打撃すると伸縮波である P 波, 水平と垂直にずれるセン断波 S 波, 表面を伝搬するレイリー波が発生する。均質等方の弾性体の内部を伝搬する P 波は、前述の式-1 で表されるが、表面を伝搬する表面 P 波速度のポアソン比は内部を伝搬する場合よりも小さくなると推測される。ポアソン比を 0.2 と仮定すると、P 波速度 100%, S 波速度 62%, R 波速度 57% である。

図-3 を見ると、表面 P 波速度は明確であるが、R 波は S 波と複合し R 波だけを分離することは難しい。また、表面 P 波速度の波形を注意して観察すると波形の立ち上がり点が伝搬距離が長くなるにつれて打点側にずれる傾向が分かった。たとえば、センサー 4 の波形では立ち上がり点が明確にずれている。これはすべての測定波形で同様であった。そこで、今回は各波形のピークを読み取り、伝搬時間を求めることにした。

表面 P 波速度の波形から速度を求めるとひび割れ前の時間差 $74.4\mu s = 4032m/s$, ひび割れ中央の時間差 $88.3\mu s = 3398m/s$, ひび割れ後の時間差 $66.2\mu s = 4531m/s$, となり、ひび割れ前と比べてひび割れ中央では約 16% 遅くなっている。ところが、ひび割れ後の速度が

4531m/s と異常に速くなっているのは、コンクリートの弾性係数と密度の相違ではなく、入力波長とセンサー間隔など他に原因があると考えるので検討中である。

レイリー波速度の波形から速度を求めるとひび割れ前の時間差 $134.9\mu s = 2224m/s$ 、ひび割れ中央の時間差 $155.7\mu s = 1927m/s$ 、ひび割れ後の時間差 $139.8\mu s = 2146m/s$ 、となり、ひび割れ中央では約 13%遅くなっている。

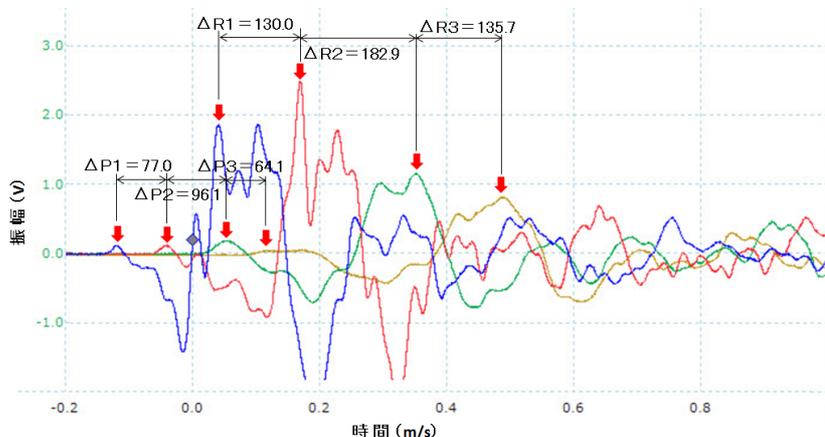


図 4: 表面 P 波速度とレイリー波速度 ハンマー左打

図-4は、図-3の異常に速い速度の原因と打撃位置による影響を確認するために、センサーの位置は変更しないで、ハンマー打撃位置を右から左に変えて測定したものがある。図3と異なり、波形ピークの歪み、複数ピークなどが観測され、測定誤差は大きいだろうと思われる。

表面 P 波速度はひび割れ前 $3896m/s$ 、ひび割れ中央 $3121m/s$ 、ひび割れ後 $4680m/s$ 、となり、ひび割れ中央では約 20%遅くなっている。レイリー波速度はひび割れ前 $2307m/s$ 、ひび割れ中央 $1640m/s$ 、ひび割れ後 $2210m/s$ 、となり、ひび割れ中央では約 29%遅い。しかし、右打で $4531m/s$ と異常に速いものが左打では $3896m/s$ となっているので、供試体が原因ではないと判断できる。

3-2. 健全区間のヒストグラム

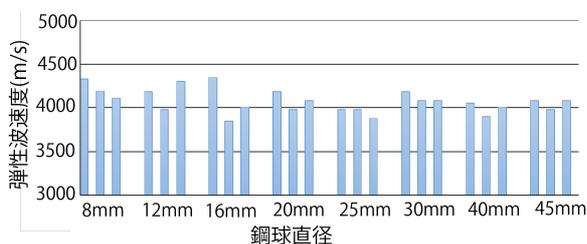


図 5: 表面 P 波速度分布

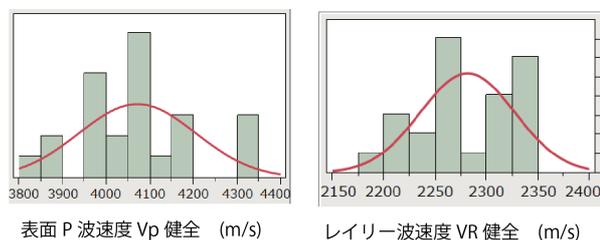


図 6: 速度ヒストグラム

ひび割れの無い区間を、4点センサー、30cm 間隔で、測定した。3区間は、ほぼ同等の速度となったが、コンクリートは複合構造物であるので測定値はバラツキが生じた。鋼球直径ごとの表面 P 波速度の分布を図5に、表面 P 波速度とレイリー波速度のヒストグラムを図6に示す。

表面 P 波速度の中央値: $4081m/s$ 、平均値は $4072m/s$ 、標準偏差: $133.7m/s$ 、レイリー波速度の中央値: $2274m/s$ 、平均値は $2281m/s$ 、標準偏差: $46.1m/s$ である。

P 波速度 V_p とレイリー波速度 V_R の関係式は次のとおりである。

$$V_P = \frac{1 + \nu}{0.87 + 1.12\nu} \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)}} \times V_R \quad V_s = \sqrt{\frac{(1 - 2\nu)}{(2(1 - \nu))}} \times V_p \quad (2)$$

式-2に V_P , V_R の平均値を代入すると、ポアソン比は0.19となる。このポアソン比を用いて V_s を求めると、動弾性係数を計算できる。コンクリートの密度を、小口径コアなどで測定するとACIの強度推定式からコンクリートの圧縮強度を推定できる。

3-3. ひび割れによる表面弾性波速度の低下

図-7にひび割れ深さ8cm 打点横5cm, 鋼球直径8種類, レイリー波速度, 表面P波速度の結果を示す。ひび割れ前と後は青色, 中央ひび割れは赤色で表示した。

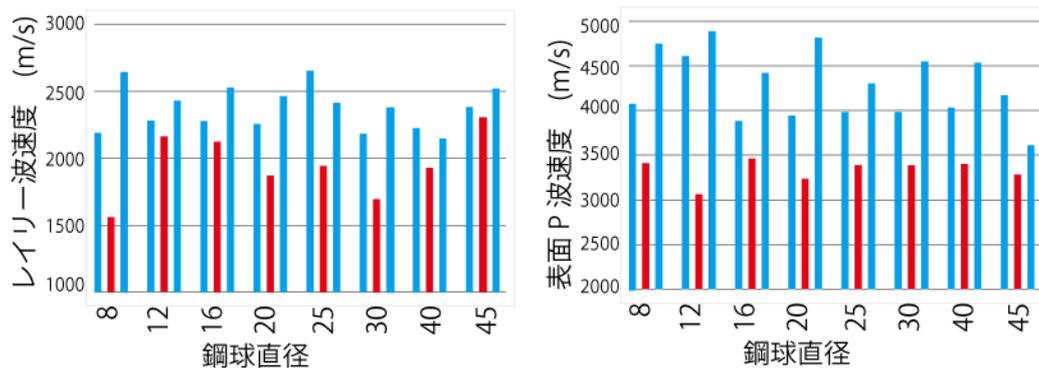


図 7: ひび割れ 8cm の速度比較図

表面P波速度のひび割れによる速度低下は、平均18%で範囲は11%から21%まで(1個だけ34%と大きく外れている)。レイリー波は平均15%で範囲は3%から29%までとなっている。測定波形を見ると、表面P波はひとつだけ単純な山形波形が現れるので読み取りも容易である。これに対してレイリー波は大鋼球ではほぼ1個の波形であるが山形波形は歪むことが多い。小鋼球では山型が分割されて多数のピークが現れて判読が難しい。

ひび割れ深さ5cmの場合も深さ5cmとほぼ同様な結果が得られた。表面P波速度のひび割れによる速度低下は、平均10%で範囲は4%～15%まで。レイリー波は平均7%で範囲は3%～12%である。ひび割れ深さが浅くなると速度低下率が小さくなるのは妥当であろう。

4. まとめ

疑似ひびわれ供試体を用いて、4点センサーで中央にひび割れを挟み、横から打撃して、3区間の表面弾性波速度を比較した結果は次のとおりである。

1. ひび割れの影響で、表面弾性波速度は遅くなるが、表面P波速度の方がレイリー波よりも簡単で明確にであった。
2. ひび割れ深さ8cmでは、表面P波速度は平均18%、レイリー波速度は平均15%の速度低下率であった。ひび割れ深さ5cmでは、表面P波速度は平均10%、レイリー波速度は平均7%の速度低下率であった。
3. 4点センサーは、4個の波形を同時に測定するので現場調査時間が短縮でき、波形を比較検討できる。2点センサーの2個の波形よりも判断が容易となること、局所的な異常、あるいはハンマーの打撃面の破損などが推測しやすい。また、3区間を比較することで、ひび割れなどの欠陥探査が容易にできることが分かった。

謝辞 本実験は東洋計測リサーチの山下健太郎さんに多大なご支援をいただきました。厚く御礼申し上げます。