

伊藤建設(株) 正会員 岩野 聡史
 (株) 大本組 正会員 関根 浩次
 東海大学 正会員 極壇 邦夫

1. はじめに

コンクリート構造物の表面を鋼球で打撃し、発生する弾性波を打撃面で計測して解析する衝撃弾性波法により、厚さ測定する研究である。今回は現地で厚さ約 4000mm の橋脚フーチングを測定した。弾性波は線形的な減衰振動なので、この厚さを往復した弾性波は振幅が微弱となり、厚さ測定に必要な多重反射する弾性波（反射波）が観測できないことが予測される。そこで、打撃点と受信点の距離が変化しても反射波の伝搬経路長は余り変化しないことに着目し、反射波の往復時間を求めた。また、弾性波のコンクリート表面を伝搬する成分（表面 P 波）から弾性波速度を求め、コンクリートの厚さを測定した結果について報告する。

2. 測定方法

2. 1 コンクリートに発生する振動について

鋼球打撃によりコンクリート構造物に発生する振動の模式図を図 1 に示す。表面を 2 次元的に伝搬する表面波と、内部を球面状に伝搬する弾性波が主に発生し、表面ではこの両振動が複合された振動が測定される。弾性波にはコンクリート表面・底面で多重反射する振動（反射波）と表面を伝搬する成分（表面 P 波）があり、反射波の往復時間 T_p と表面 P 波の速度 V_p が測定できれば、コンクリートの厚さ D は $D = (T_p \times V_p) / 2 \cdots$ （式 1）により計算できる。

2. 2 測定状況

反射波の往復時間の測定では、表面に 2 点のセンサーを（ch1, ch2, PCB 社製）を 300mm 間隔で設置し、ch1 より 200mm 離れた点を直径 63mm の鋼球で打撃した。発生した振動をセンサーで検知し、A/D 変換（12bit）で記録した。サンプリングクロック（ dt ）は 10μ 秒である。表面 P 波の測定では、コンクリート内部にある鉄筋の影響を考慮して¹⁾、2 点のセンサーを 200mm で設置し、ch1 より 100mm 離れた点を直径 10mm の鋼球で打撃して測定した。 dt は 0.4μ 秒である。なお、この測定では、表面 P 波の振幅が微弱であるため、測定波形を増幅する必要がある（図 2）。

2. 3 供試体

供試体は施工後 28 日経過した鉄筋コンクリート構造物である高速道路の橋脚フーチングで、橋脚部（3700×3700×10000mm）とフーチング部（10000×10000×4000mm）を測定した。測定面からの厚さはフーチングで 4000mm、橋脚で 3700mm である。

3. 反射波の往復時間の測定結果

図 3 に各測定点での測定波形を示す。測定波形は初期部分に 1 周期分の振動が観測され、その後は若干の振動が観測されるが、減衰によりほとんど観測されない。この初期振動は、反射波および表面 P 波より振幅が大

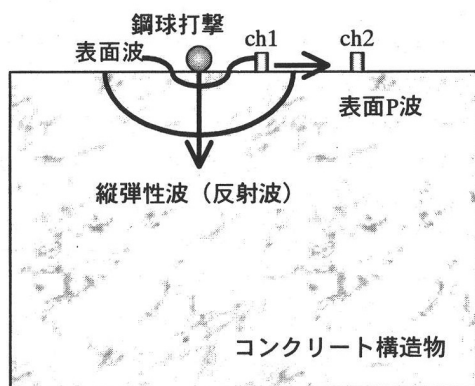


図1 測定状況及び発生する振動

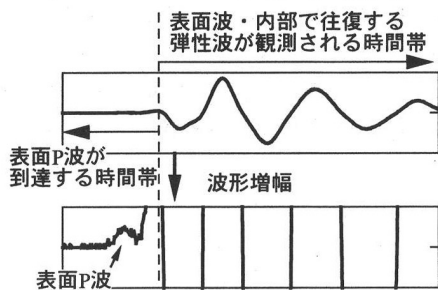


図2 測定波形の増幅による表面P波の観測

きい表面波である。反射波の往復時間を測定する方法として、測定波形の自己相関関数を求めてFFT解析する方法があるが²⁾、この測定波形では、初期振動（表面波）が主に解析され、反射波の往復時間を抽出することは困難となる。

反射波は往復して表面に到達すると、表面では再度振動が観測されることになるが²⁾、測定波形では特にch2で2.5ms付近に振動が観測される。しかし、測定面が板の様に有限である場合は、横方向の端面で反射した振動が観測されることも考えられるので、この振動が厚さ方向に往復した反射波を示しているとは断言できない。

ここで、反射波の往復経路 L_p は、 $L_p = \sqrt{4D^2 + L_{ch}^2}$ (D :コンクリート厚さ、 L_{ch} :打撃点とセンサー間の距離) となり、往復時間は $T_p = \sqrt{4D^2 + L_{ch}^2} / V_p$ (V_p :弾性波速度) となる。従って、2点センサー間での反射波到達時間差 ΔT_p は近似計算をすると、

$\Delta T_p = (L_{ch2}^2 - L_{ch1}^2) / (4DV_p)$ となる。 $L_{ch1}^2 - L_{ch2}^2 \ll 4DV_p$ である今回の測定状況では、 ΔT_p は小さくなり、反射波は2点のセンサーにほぼ同時に到達し、振動が観測されることになる。一方、横方向の振動では、到達時間差 $\Delta T_s = (L_{ch2} - L_{ch1}) / V_s$ (V_s :横方向の振動の伝搬速度) となり、時間差が生じる。従って、ch1の測定波形 $W1(t)$ とch2の $W2(t)$ を加算すれば、反射波の到達で発生した振動に限り加算されることになる。

また、ある時間 τ からの n 個分のch1の測定波形 $\{W1(t) \mid t = \tau, \tau + dt, \tau + 2dt, \dots, \tau + (n-1)dt\}$ とch2の測定波形 $\{W2(t) \mid t = \tau, \tau + dt, \tau + 2dt, \dots, \tau + (n-1)dt\}$ の相関係数（時間 τ での時間窓相関係数と言う）を求めると、反射波の往復時間では両センサーに同じ振動が観測されるので、この時間での時間窓相関係数は高くなる。

そこで、図4に $W1(t)$ と $W2(t)$ での加算波形と各時間での時間窓相関係数を求めた結果を示す。時間2.5msでは、加算波形で振動が観測され、時間窓相関係数が高いことから厚さ方向に往復した反射波が到達した時間帯と考えられる。ch1に表面波が到達して測定波形が極小となった時間と、加算波形が時間2.5ms付近で極小となった時間差から表面波と反射波の到達時間差は2.12msとなる。この時間差と $W1(t)$ と $W2(t)$ から計算した表面波速度から、振動発振時から反射波到達までの時間を求めると2.07msとなる。同様に橋脚では1.77msとなった。

4. 表面P波速度測定結果及びコンクリートの厚さ測定結果

フーチングにおける反射波速度の測定例を図5に示す。2点センサー間での表面P波到達時間差 ΔT を測定し、センサー間距離から速度を測定した結果3922m/s、同様に橋脚では4027m/sとなった。

以上の通り、測定した反射波往復時間と速度から厚さ D を計算した結果を表1に示す。実寸と良く一致した結果となった。

5. まとめ

現地で厚さ約4000mmの橋脚フーチングを測定した結果、測定波形は減衰し、これまでの解析方法での測定は困難であったが、反射波の伝搬経路長が変化しないことに着目した解析方法により、反射波の往復時間を決定できた。また、表面P波速度から厚さを計算した結果は実寸と良く一致し、約4000mmのコンクリート構造物であっても衝撃弾性波法により厚さが測定できることが示せた。

参考文献 1) 岩野他：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その1 3表面波に及ぼす鉄筋の影響、（社）日本非破壊検査協会平成12年度秋季大会講演概要集 pp.269 - 270 2) 岩野、極壇他：衝撃振動法による現地鉄筋コンクリート構造物の厚さの計測、土木学会第54回年次学術講演概要集第V部、pp.284 - 285

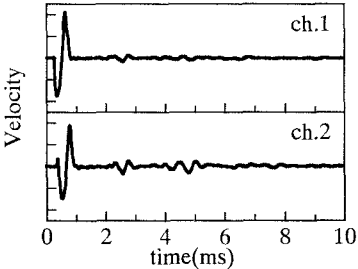


図3 各測定点での測定波形（フーチング）

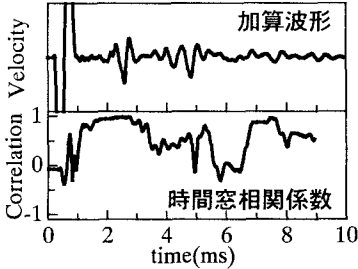


図4 フーチングでの解析結果

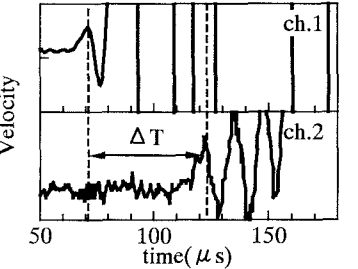


図5 表面P波速度の測定（フーチング）

表1 厚さ測定結果				
供試体	T_p (ms)	V_p (ms)	D (mm)	実寸 (mm)
フーチング	2.07	3922	4059	4000
橋脚	1.77	4027	3564	3700