

論文 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定

岩野 聡史^{*1}・極檀 邦夫^{*2}・境 友昭^{*3}・森濱 和正^{*4}

要旨：コンクリート表面を鋼球で打撃し、発生する波動を解析して厚さを測定する研究である。波動には表面を伝搬する表面波と内部を球面状に伝搬する弾性波があり、厚さ方向に多重反射する弾性波の振動数と速度から厚さは算出される。しかし、表面波の振幅は大きく、鋼球直径によっては単純な解析で多重反射波の振動数を正確に決定できない。また、弾性波速度を表面弾性波から求めると鉄筋の影響を受ける場合がある。そこで、諸条件を変えて試験を行い、多重反射波の振動数と速度の正確な測定解析方法を考案した。厚さ 100～600mm のコンクリートで測定した結果、精度良く厚さを測定できた。
 キーワード：衝撃弾性波法、厚さ測定、コンクリート、弾性波速度、非破壊診断

1. はじめに

コンクリート表面を鋼球で打撃し、発生する振動を打撃面で計測し、この周波数を解析するいわゆる、衝撃弾性波法により、コンクリート構造物の厚さを非破壊的に測定する研究を行ってきた^{1)~3)}。衝撃弾性波法は、コンクリート表面を鋼球で打撃する振動入力方法であり、コンクリート表面の劣化の影響をうけにくく、簡易にかつ再現性のある振動波形を入力できる。また、発生する波動は波長が長いことから、コンクリート内部の鉄筋や粗骨材の影響をうけにくいという特徴がある。

コンクリート構造物の表面と底面の間を多重反射する弾性波（反射波と言う）の振動数 f_0 と速度 V_p が求まると、コンクリートの厚さ D は、

$$D = V_p / (2 \cdot f_0) \quad (1)$$

として求められる。しかし、測定した振動波形を単純に周波数分析しただけでは、振幅の大きい表面波成分の影響を受けて、 f_0 を正確に求めることが困難である。また、弾性波速度の決定ではコンクリート表面を伝搬する弾性

波の速度（表面弾性波速度と言う）から求める方法があるが、この方法は測定点に最も早く到達した波動の伝搬時間を測定するもので、測定点の配置次第では、鉄筋を伝搬した波動が観測され、コンクリート内部を伝搬する弾性速度を正確に測定できない場合がある。そこで、より正確にコンクリート構造物の厚さを測定するため、打撃に使用する鋼球の直径、表面弾性波速度の測定条件を変えて試験し、これらの問題点を解決する測定方法について報告する。

2. 理論的背景および供試体

2.1 鋼球打撃で発生する弾性波について
 鋼球打撃により鉄筋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。主にコン

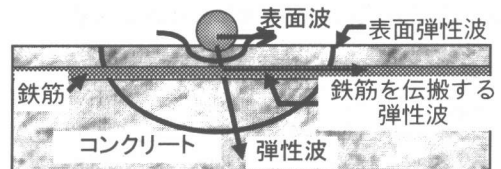


図-1 コンクリートに発生する振動

*1 伊藤建設(株)技術研究所 (正会員)

*2 東海大学助教授 工学部土木工学科

*3 アプライドリサーチ(株)代表取締役 工博

*4 国土交通省土木研究所コンクリート研究室主任研究員 (正会員)

クリート表面を平面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発生し、表面では両者の振動が複合された振動が測定される。

表面波は打撃鋼球がコンクリート表面に与える変形によって生成される振動であり、その周期は鋼球とコンクリート表面との接触時間により決定される。鋼球質量が大きくなると鋼球接触時間および発生する振動の周期が長くなり、振動数は低くなる。つまり、表面波の振動数は打撃する鋼球質量により変化する性質がある。

一方、コンクリート内部を球面状に伝搬する弾性波は、鉄筋で反射・伝搬する成分も存在するが、鋼球打撃で入力した波長は鉄筋径と比較すると非常に長いので、ほとんどの成分がコンクリート底面に到達し、弾性波はコンクリート表面と底面の間で多重反射する。これから、最も早く到達する波動を観測する弾性波速度測定では、鉄筋を伝搬する弾性波が観測され、鉄筋の影響を受ける場合があるが、多重反射に起因する振動数は、鉄筋に影響されずコンクリートの厚さによって変化する。

2. 2 供試体

実験に用いた供試体の設計寸法を表-1に示す。供試体 A はかぶり深さ 50mm に ϕ 51mm の異形棒鋼を含む。供試体 B は変断面の部材を想定し、くさび状に厚さが変化している。この形状で厚さを正確に測定できるかを確認するため、コア採取により実寸を計測する 5 点 (設計寸法 280, 252, 225, 198, 170mm の位置) を測定した。供試体 C は表面は一面であるが、裏面は厚さが変化し、4 面に分かれている。

表-1 実験に用いた供試体の設計寸法

名称	縦 (mm)	横 (mm)	厚さ (mm)
A	1200	2500	300
B	1300	2200	150 ~ 300
C	600	800	100
	600	1400	200
	750	800	400
	750	1400	600

3. 多重反射波の解析方法

3. 1 実験内容

供試体 A, B, C について、表面に圧電型加速度センサーを瞬間接着剤で 1 点貼付け、その近傍を直径 8mm~40mm の鋼球で落下および振り子運動により打撃する。発生した振動をセンサーで検知し、デジタルオシロスコープを用いてサンプリング速度 2 μ 秒で取り込んだ。測定波形をフーリエ解析 (FFT 解析) して厚さ測定に必要な反射波の振動数を推定する。

3. 2 反射波の振動数の測定結果

(1) 表面波の影響について

図-2 に供試体 A (厚さ 300mm) を直径 8,15,30mm の鋼球で打撃した時の測定波形と、振動数解析として測定波形を FFT 解析した結果を示す。測定波形は表面波と弾性波が複合された振動となるが、図-2 から打撃する鋼球質量によりスペクトル分布が大きく変化していることが分かる。すなわち、鋼球質量によって振動数が変化する表面波および弾性波の振幅が、往復時間を周期とする多重反射成分の振幅より大きいと考えられる。これから、測定波形を FFT 解析し、最大となる振動数から多重反射の振動数を推定するような単純な解析方法では、多重反射の振動数が決定できないことが示される。

(2) 多重反射波の性質

弾性波は表面波と同じ振動数成分を持つ波動がコンクリート内部に伝搬したものである。弾性波はその伝搬過程で減衰するものの、波形の類似性は保持される。これから、弾性波がコンクリート底面で反射し、表面に到達すると、表

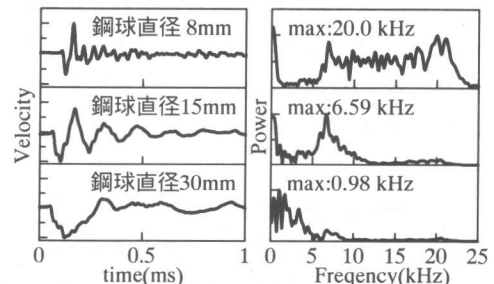


図-2 各鋼球直径での測定波形 (左図) とパワースペクトル (右図)

面では振動入力時の表面波と同じ波形を持つ振動が再度観測されることになる。また、打撃する鋼球の直径により表面波の振動数は変化するが、弾性波の到達時間周期は変化しない。各打撃鋼球直径での反射波到達時の測定波形の模式図を図-3に示す。

弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数がほぼ一致する場合（図-3-1）、

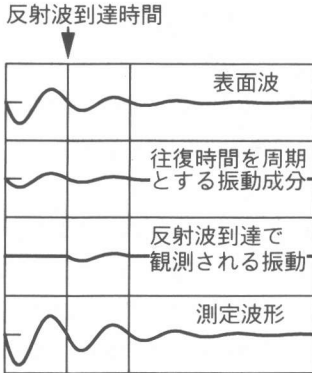
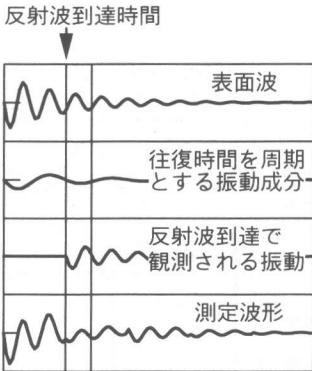
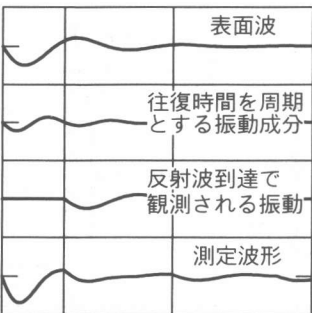


図-3-1 反射波到達時の測定波形模式図
(表面波と反射波の振動数が一致)



表面波の振動数が高い場合



表面波の振動数が低い場合

図-3-2 反射波到達時の測定波形模式図
(表面波と反射波の振動数が不一致)

表面波の振幅がほぼ0になった時に反射波が表面に到達し、表面波と類似した波形を持つ振動が再度観測されることになる。

一方、両者の振動数が一致しない場合（図-3-2）、反射波到達時の表面波の振幅は0ではない。表面波は、反射波到達で観測される振動と位相が一致せず、更に、往復時間に起因する振動と入力の振動数は一致しない。したがって、反射波到達時に測定した振動波形は、入力振動の波形とは異なったものとなる。

(3) 自己相関関数を用いた解析方法

振動波形を $y(t)$ とし、 $y(t)$ とある時間 τ 後の振動波形 $y(t+\tau)$ との相関係数 $R(\tau)$ を

$$R(\tau) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_1+T} [y(t) - \bar{y}(t)] [y(t+\tau) - \bar{y}(t+\tau)]}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_1+T} [y(t) - \bar{y}(t)]^2 \sum_{t=t_1}^{t_1+T} [y(t+\tau) - \bar{y}(t+\tau)]^2}} \quad (2)$$

とする。 t_1 は振動の測定開始時間、 T は $y(t)$ の初期振動（表面波成分）の周期より長い時間

弾性波が1往復する時間を τ_1 とすると、弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数が一致している場合では、 $y(t)$ と $y(t+\tau_1)$ は前述の通り類似し、 $R(\tau_1)$ は極大となる。さらに、弾性波はコンクリート内部で2, 3回と一定時間間隔で往復し多重反射するので、この時間間隔 τ_2, τ_3, \dots 毎に $R(\tau)$ は極大値をとる。従って、 $R(\tau)$ （自己相関関数）を求めると、弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数が一致している場合の自己相関関数は、一定時間間隔で極大値をとる正弦波に近い形状となり、その周期は反射波の往復時間を示す。

一方、両者の振動数が一致しない場合では、前述の通り、振動波形 $y(t)$ と $y(t+\tau_1)$ は類似しない。また、 τ が表面波の周期の倍数となる時間においても極大となり得るので、自己相関関数は正弦波状とはならない。

以上より、測定波形の自己相関関数に着目し、自己相関関数が正弦波に類似する打撃条件、すなわち鋼球質量を選定し、この時の自己相関関数をFFT解析すれば多重反射の振動数を抽出

できることが示される。

図-4に図-2(供試体 A:厚さ 300mm)の各打撃鋼球直径での測定波形について、自己相関関数を求めた結果を示す。

直径 8mm では、相関係数は最大で 0.3 程度と大きくなり、測定波形には初期部分と類似する時間範囲が少ないことを示している。直径 30mm では下向きに変位する自己相関関数波形の途中に極大となる時間差が見られ、鋼球とコンクリートが接触している間に反射波が到達したものと考えられる。直径 15mm では一定間隔で相関係数が大きくなっている。

直径 8,15,30mm での自己相関関数を比較すれば、15mm が最も正弦波に類似し、弾性波の往復時間に起因する振動数と表面波の振動数がほぼ一致していると判断できる。そこで、鋼球直径 15mm での自己相関関数を FFT 解析すると多重反射の振動数 f_0 は 6.84kHz と決定される。

4. 弾性波速度の測定実験

一般的に縦弾性波の伝搬速度は表面波の約 2 倍である。このため、コンクリート内部に存在する鉄筋の影響を受けないとすれば、コンクリート表面に設置したセンサーが最初に検知する振動はコンクリート表面を伝搬した弾性波成分

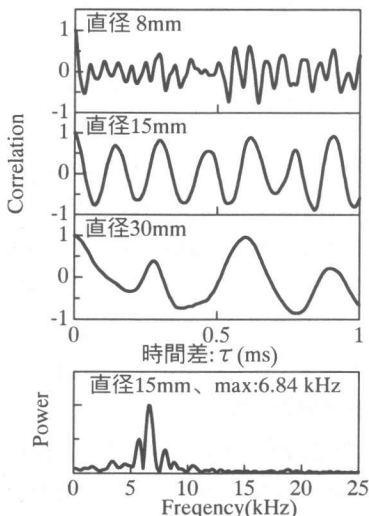


図-4 各打撃鋼球直径の自己相関関数(上図)とパワースペクトル(下図)

(表面弾性波)である。そこで、2 点のセンサーをコンクリート表面に設置して表面弾性波の到達時間差を求めれば、センサー間距離から表面弾性波速度が決定される。なお、表面弾性波の振幅は表面波より微弱であるため、この測定では測定波形を増幅する(図-5)。しかし、鉄筋コンクリートは鉄とコンクリートとの複合構造と考えられ、鉄筋と測定点の位置関係によっては、センサーに最初に到達する波動は表面弾性波ではなく、鉄筋を伝搬した弾性波となる可能性がある。この場合、コンクリートの弾性波速度は正確に決定できないことになる。

4. 1 内部鉄筋の影響調査実験

(1) 実験方法

供試体 A を用いて内部鉄筋が弾性波速度に与える影響について試験を行った。この実験での測定点を図-6に示す。測定点①~③では 2 点のセンサー(ch1,ch2)を 200mm 間隔で設置し、打撃点を ch1 から 100~500mm の範囲で移動させた。測定点①は鉄筋の無い位置、②はφ

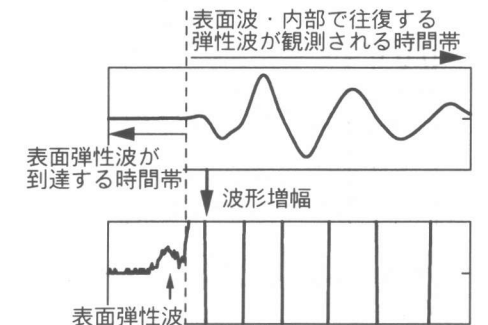


図-5 測定波形の増幅による表面弾性波の観測

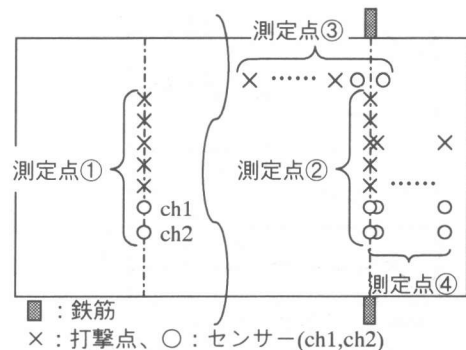


図-6 内部鉄筋の影響調査実験状況

51mmの鉄筋上で、かぶり50mmとなる表面および、かぶり199mmとなる裏面、③は鉄筋に対して直交方向の位置とし、鉄筋の中心位置から左右100mmにch1,ch2を設置している。

また、測定点④ではセンサー間隔を200mm、打撃点をch1より300mmと固定して測定点を鉄筋上から25~250mmまで平行移動した。全測定とも打撃体は直径10mmの鋼球で、加速度波形のサンプリング速度は0.4μ秒である。

(2) 内部鉄筋の影響調査実験結果

図-7に測定点①、②表裏、③で測定した伝搬速度と打撃点位置の関係を、図-8に測定点④で測定した伝搬速度と鉄筋までの平面距離の関係を示す(②表打撃点300mmを距離0とする)。図-7より、測定点①では、距離100mmで弾性波速度は、4902m/sとなったが、他では約4000m/sで一定となった。測定点②表は、距離100mm~280mmでは距離と比例して伝搬速度が速くなるが、300mm以降では約5100m/sで一定となった。測定点②裏と③では、誤差はあるが全打撃点において測定点①とほぼ等しい結果となった。

図-8より、測定点④では平面距離0, 25mmでは約5100m/sであるが、距離が40~60mmと離れると4950~4464m/sと徐々に遅くなり、距

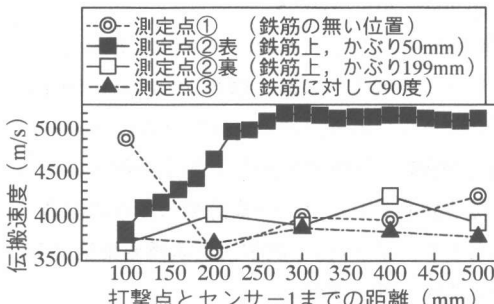


図-7 伝搬速度と打撃点位置の関係

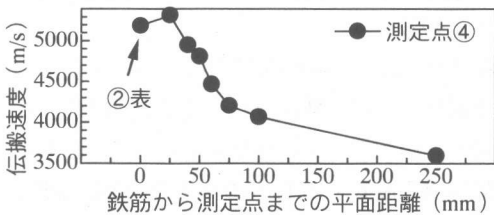


図-8 伝搬速度と鉄筋までの平面距離の関係

離75mm以降では約4000m/sとなった。

弾性波の伝搬速度は、一般的なコンクリートでは約4000m/s、鉄筋では約5000m/sであり、伝搬速度が5000m/s以上となった条件は、1)測定点②表と裏の結果比較より、鉄筋かぶりが浅い場合、2)測定点④の結果より、測定点と鉄筋距離の平面距離が近い場合、3)測定点②の結果より、打撃点が遠方である場合、以上の1)~3)の条件を同時に満たす場合である。

ここで弾性波の伝搬経路を考えると⁴⁾(図-9)、球面状に伝搬する弾性波は表面を伝搬する経路(表面弾性波) W_{PC} とコンクリート内部に伝搬する経路を持ち、後者には内部に鉄筋が存在する場合、鉄筋を經由しセンサーに到達する弾性波 W_{PS} の経路がある。打撃点からセンサーまでの距離を L_{ch} 、 W_{PC} の伝搬速度を V_{PC} 、 W_{PS} の鉄筋内部での伝搬速度を V_{PS} 、打撃点から鉄筋までの最短距離を D とすると、 W_{PC} の最短伝搬時間 T_{PC} は

$$T_{PC} = \frac{L_{ch}}{V_{PC}} \quad (3)$$

W_{PS} では、コンクリートと鉄筋を伝搬するので、

$$T_{PS} = \frac{2D}{V_{PC} \cos \theta} + \frac{L_{ch} - 2D \tan \theta}{V_{PS}} \quad (4)$$

となる(ここで、 $\theta = \sin^{-1}(V_{PC}/V_{PS})$)。

式(3),(4)より $T_{PS} < T_{PC}$ 、すなわち W_{PS} が先にセンサーに到達する条件は、

$$L_{ch} > \frac{2D\sqrt{V_{PS}^2 - V_{PC}^2}}{V_{PS} - V_{PC}} \quad (5)$$

である。測定結果から伝搬速度が5000m/s以上となった条件、1)鉄筋かぶりが浅い場合、2)測

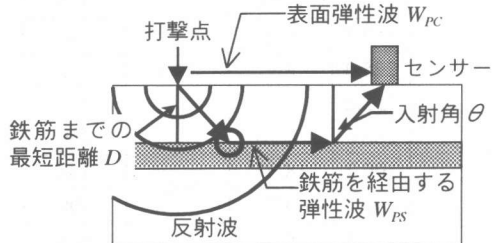


図-9 弾性波の伝搬モデル

定点と鉄筋距離の平面距離が近い場合、では式(5)の D が小さくなるので(右辺)が小さくなり、条件 3)打撃点が遠方である場合では(左辺)が大きくなるので、条件 1)~3)が重なると式(5)を満たす。また、鉄筋に対して直交方向となる測定点③では 4000m/s 以下で一定であったことから、表面弾性波 W_{ps} が観測されたと考えられる。また、測定点②表の距離 100mm ~280mm, ④での平面距離が 40~60mm では速度が測定距離に比例して変化するが、これはセンサー1 より遠方にあるセンサー2 のみが式(5)を満たしたためと考えられる。

4. 2 弾性波速度の測定方法

前節の結果から弾性波速度は、鉄筋上かぶり 50mm となる位置で測定したとしても、式(5)から計算すると、 L_{ch} が 300mm では表面弾性波が先に到達し、鉄筋の影響を受けないことが分かる。そこで、センサー間隔 200mm で、センサー1 から 100mm の位置を打撃して弾性波速度を求めることとした。なお、供試体 C では、打設面側である厚さ 100,200mm と底面側である 400,600mm では打設面からの深さが 600mm と異なり、品質の違いによる速度変化が考えられるので⁹⁾、2箇所測定した。

5. コンクリートの厚さ測定結果

各測定点について、3. 2により反射波の振動数 f_0 、4. 2により反射波速度 V_p を求め、式(1)よりコンクリートの厚さ D を求めた結果

表-2 コンクリートの厚さ測定結果

供試体	実寸 (mm)	f_0 (kHz)	V_p (m/s)	D (mm)
A	302.0	6.84	3943	288
B	175.9	11.96	3971	166
	199.4	10.01		198
	225.0	8.91		223
	252.2	7.81		254
	282.6	7.20		276
C	109.7	18.07	3894	108
	211.7	9.77		199
	409.8	5.13	3940	384
	609.7	3.42		576

とコア採取により測定した実寸との比較を表-2に示す。平均誤差は 3.6%と良く一致した。本論に示した測定解析方法により、表面波や内部鉄筋の影響を受けずに、厚さ測定に必要な f_0 と V_p が求められることが示された。

6. まとめ

自己相関関数を利用した振動数解析方法と弾性波の伝搬経路を考慮した表面弾性波速度の測定により、多重反射の振動数と速度を決定し、厚さを計算する測定解析方法を提案した。厚さ 100mm~600mm の供試体で測定した結果、振幅の大きい表面波や内部鉄筋の影響を受けることなく、実寸に良く一致した結果を得ることができた。なお、本研究は国土交通省土木研究所と(社)日本非破壊検査協会・鉄筋コンクリート構造物の非破壊検査特別研究委員会の共同研究であり、セメント協会、超音波 6 社、電磁波 5 社、弾性波 2 社が実施している研究成果の一部である。

参考文献

- 1)岩野聡史, 極檀邦夫ほか: 多種鋼球打撃によるコンクリート板の共振振動数の確定, 土木学会第 52 回年次学術講演概要集第 V 部, pp.704 - 705, 1997.5
- 2)極檀邦夫ほか: 周波数応答解析によるコンクリートの健全性試験, 構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp.121 - 128, 1998.7
- 3)岩野聡史, 極檀邦夫ほか: 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, 1999.5
- 4)田治米鏡二: 弾性波による地盤調査法, 槇書店, 1977
- 5)森濱和正ほか: 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 2. 超音波による音速分布の測定, 日本非破壊検査協会平成 12 年春季大会講演概要集, pp.67 - 68, 2000.5