

報告 非破壊試験によるコンクリート品質、部材厚さ、かぶり厚さの検査方法に関する研究

森濱 和正^{*1}・富士 岳^{*2}・小林 幸一^{*3}・西山 直洋^{*4}

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の検査は、配筋状態、コンクリートの品質、形状・寸法が重要である。現状では、これらの項目の検査は間接的であり、構造物自体が直接検査されてはいない。そのため、超音波法、電磁波レーダ法、衝撃弾性波法を用いた非破壊試験により直接検査する方法を提案した。特に、コンクリートの品質評価の指標として、また、鉄筋のかぶり厚さ、部材厚さを精度良く求めるためにはコンクリートの正確な速度が必要であり、その測定方法を重点にとりまとめた。

キーワード: コンクリート構造物、竣工検査、超音波法、レーダ法、衝撃弾性波法、速度分布

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物を直接検査・点検することができれば、構造物の信頼性、健全性を正確に把握することができる。そのためには非破壊試験による検査方法の確立が不可欠である。さらには、最近、鉄筋コンクリート構造物の設計は、性能規定化へ移行されつつあり、それにともない竣工検査時には構造物が所要の性能を満足しているのかどうかを直接確認する技術も一層重要なことから、非破壊試験による検査方法の確立が求められている。

鉄筋コンクリート構造物の検査は、配筋状態、コンクリートの品質、形状・寸法が重要である。配筋状態の内、かぶり厚さは鉄筋の腐食を防ぐ観点から特に重要である。コンクリートの品質は、強度をはじめ、中性化や鉄筋を腐食させる物質が浸透し難いことなどが求められていることから、表層コンクリートの品質評価も重要である。形状・寸法では、特に壁、版部材の厚さが直接測定しにくく、しかも所要の耐荷力を有しているのかどうかの重要な検査項目である。これらの部材の厚さは、破壊試験を伴わなければ

ば直接測定できないため、非破壊により精度の高い測定方法が求められている。

これらについて、電磁波レーダ法（以下、単にレーダ法と呼ぶ）、超音波法、鋼球を用いた衝撃弾性波法（以下、単に弾性波法と呼ぶ）を組み合わせた検査方法について提案する。これらの方法で厚さを求めるには反射時間と伝搬速度が必要である。コンクリートの品質を評価する指標も伝搬速度であることから、構造物内部の速度分布の求め方を重点に検討した結果を報告する。

2. 検査方法の現状の問題点

コンクリート構造物の主な検査の時期と項目は、①鉄筋の組立後に配筋状態、②コンクリートの強度は荷卸し時に供試体を作製し、所定期間で強度試験、③竣工時に形状・寸法の計測、が実施されており、①②は施工時のプロセス検査となっている。

検査の現状と、その問題点を整理したのが表-1である。主な問題点は、①の配筋状態の検査は、コンクリートの打設前に実施されるため、

*1 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）

*2 (社) 非破壊検査振興協会認証事業センター 審査部長

*3 (社) セメント協会・研究所ジオセメント研究グループ 研究員 工修

*4 西松建設（株）技術研究所建築技術研究課 課長（正会員）

打設時の鉄筋の移動が測定されないことになる。土木学会「コンクリート標準示方書[施工編]」(以下、RC示方書という)および日本建築学会「建築工事標準仕様書5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5といふ)では、表面状態を目視で検査して「かぶり不足の兆候が認められ」たとき非破壊試験を取り入れることになっているが、どのように測定すればいいのか明確な規定はない。

②のコンクリート品質(圧縮強度)は、RC示方書、JASS5とも基本的にはJIS A 5308で実施することになっており、供試体は現場で試料を採取して作製したものであり構造物自体のコンクリートが評価されているわけではない。JASS5では養生温度を工事現場と合わせるようにしているが、そのほかの施工実態、環境条件などが反映されているわけではない。RC示方書では「必要のある場合には、非破壊試験による」としているものの、どのようなときに実施するのかは不明確であり、その方法についても解説では「構造物中のコンクリートの品質の試験技術は確立されていない」とことわりつつ、「JSCE-G504によるテストハンマー強度の試験等の非破壊試験」によって行なうが「±50%以上も異なることがあることを考慮して適用する」と記述されているように、極めて信頼性の低いものである。

強度に問題があると考えられる場合、コアを採取しその強度試験を行なうことになるが、多くの労力を使い、構造物をきずつけるという問題がある。

さらには、コンクリートの表層と内部では含水率の状態により養生条件が異なることなどから品質も異なっており、特に鉄筋を保護している表層コンクリートの品質を適切に評価するこ

表-1 検査方法の現状と問題点

検査項目	検査方法	検査時期	問題点
配筋状態	目視、計測	組立後	コンクリート打設時の移動が測定されない
	非破壊試験 (かぶり厚さ)	竣工時(表面状態から、かぶり厚さ不足の兆候時)	非破壊試験による測定方法は確立されていない
コンクリート品質 (圧縮強度)	圧縮強度	荷卸し時に試料採取、供試体作製所定材齢で強度試験	・構造物自体のコンクリートが評価されていない ・表層コンクリートが評価できない
	非破壊試験	竣工時	・測定方法確立されてない ・テストハンマーなど信頼性低い
	コア試験		構造物をきずつける
形状・寸法	計測	竣工時	壁、版の厚さが直接測定できない
	非破壊試験		速度の測定方法が不明

とが重要と考えられるが、そのような方法はない。

③の形状・寸法の内、壁、版部材のように直接厚さを測定できない場合、レベルなどによって間接的に測定するか、コア採取による破壊試験により直接測定されているが、ランダムに測定位置を決められない、構造物をきずつけるなど問題が多い。また、非破壊試験によって厚さを求める場合、一般には反射時間と伝搬速度を測定し、式(1)で計算して求める。しかし、伝搬速度を求める方法は確立されていない。これでは非破壊試験による厚さ測定は不可能である。

$$h = v \cdot t/2 \quad (1)$$

ここに、 h : 厚さ、 v : 伝搬速度、 t : 反射時間である。

3. 新しい検査方法の提案

以上のような問題点があることから、非破壊試験によって構造物自体を直接検査する方法を表-2のように提案する。以下、その概要を説明し、具体的な方法については検討結果とともに4章で述べる。

最初に、レーダ法により配筋状態の測定や内部の空洞の有無などの概観を探査し、その後、詳細検査を行なうに当たって、伝搬速度や厚さを測定する位置を決めるために鉄筋の影響や空

洞などを避けるための参考とする。

次に構造物自体のコンクリート内部の速度(分布)を求める。精度良くかぶり厚さや部材厚さ、コンクリート品質を推定する場合、内部の正確な速度分布が必要となることから、超音波法、レーダ法、弾性波法ともコンクリート内部の速度分布を求める方法を開発した。

かぶり厚さおよび部材厚さは、反射時間と速度分布を測定することにより推定することができる。

構造物自体のコンクリートの強度は、超音波法または弾性波法により、速度分布と、品質管理用供試体の速度と圧縮強度の関係から推定することができる。超音波法は速度分布から表層コンクリートの品質を評価することもできる。弾性波法では、鋼球接触時間によって表面の品質を評価することができる。

4. 検討結果

3章で提案した検査の具体的な方法と、裏付けとなる主な検討結果を紹介する。

4.1 速度(分布)測定

(1) 超音波法

筆者らは、超音波のセンサ間距離を変化させながら伝搬時間を測定すると、センサ間距離を伝搬時間で割った“見かけの速度”は、距離が近いときは遅く、遠くなるにしたがい速くなることから、超音波の最速経路を予測することによりコンクリート内部の速度分布を求める方法を提案した¹⁾。その概要は次のとおりである。①コンクリート表面のセンサ距離を数点変化させ伝搬時間を測定する。②コンクリート内部の速度分布を仮定し、変分法により最速経路を求め、伝搬時間を計算する。③伝搬時間の計算値が測定値の最尤値となるように繰り返し計算を行い、速度分布を求める。それに加え、④見かけの速度がほぼ一定になるセンサ距離のときの伝搬経路の最も深い位置より内側では、速度を

表-2 非破壊試験による構造物自体の検査方法(提案)

検査項目	非破壊試験方法	検査時期
概観検査	配筋状態 内部状態	竣工時
	速度(分布)	
	鉄筋のかぶり厚さ	
	コンクリート强度	
	表層(表面)品質	
	部材の厚さ	

一定とする²⁾。

この方法によって求めた速度分布(解析値)と、コアを抜いた後の孔の間の速度を測定した結果(実測値)を図-1に示す²⁾。表面から100mmより内側が一定になっているのは、上記④によつたものである。両者の形状はほぼ一致しており、

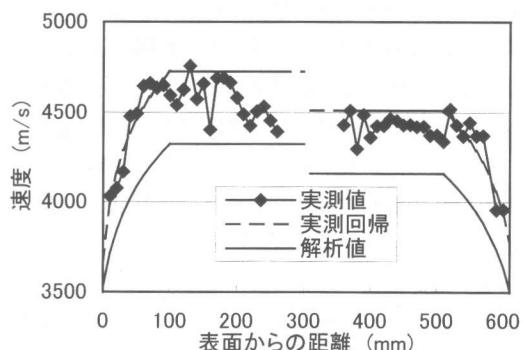


図-1 超音波法による速度分布の解析値と実測値の比較

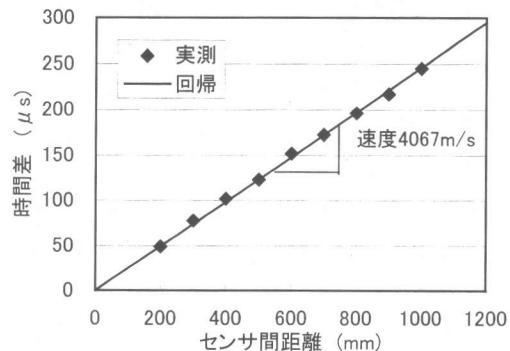


図-2 弾性波法による速度測定(センサ間距離と到達時間差の関係)

この方法によって内部の速度分布を推定することができる。

(2) 弾性波法

弾性波法による速度測定方法は、①センサ間隔を変化させる方法と、②センサ間隔を一定にしておき打撃位置を変化させる方法、の2方法がある。弾性波法は低周波を使った方法であることから、いずれの方法も距離と伝搬時間の関係を求めるに、図-2のようにはほぼ線形関係となり、その傾きから部材厚さの平均的な速度が求められる。

(3) レーダ法

レーダ法による速度分布の測定方法は、①ワイドアングル法、②双曲線法、③深度法の3方法が考えられる。以下にそれらの概要を示す。

1) ワイドアングル法

ワイドアングル法は、発信、受信アンテナを離しながら反射時間を測定することによって速度を求める特殊な方法である³⁾。横軸に送受信アンテナ間の距離、縦軸を反射時間とする走時図が得られ、その傾きから速度が求められる。この方法は、鉄筋が入っている場合は速度が速く測定される傾向があり、無筋コンクリート構造物に適した方法である。

2) 双曲線法

双曲線法は、鉄筋が入っているがそのかぶり厚さがわからないときに適用できる方法である。鉄筋からの反射图形は見かけ上双曲線になることから、その曲率から鉄筋までの距離（かぶり厚さ）を求めることが可能、その距離と反射時間から速度を求める方法である。曲率を正確に求めるに十分な分解能を有する装置を使用する必要がある。

3) 深度法

深度法は、鉄筋のかぶり厚さが既知の部分を作っておき、かぶり厚さと反射時間から速度を求める方法であり、かぶり厚さの設計値ではなく実測値を与えるならばこの方法が最も精度良く速度を求めることができる。

以上の3方法は、一般には速度を一定と考え

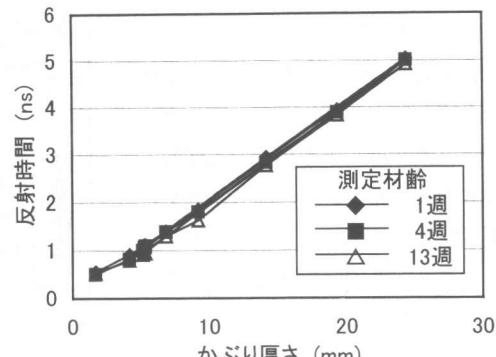


図-3 電磁波法による速度分布の測定
(かぶり厚さと反射時間の関係)

る場合が多いが、コンクリートの内部は含水率が異なることなどから速度もそれに伴い非線形分布になっており⁴⁾、図-3のように表面付近は距離に対して反射時間が遅くなっているが、内部はほぼ一定になっている⁵⁾。特にかぶり厚さを求める場合、乾燥の影響を受けやすい表層は含水率の変化が大きくなり、測定精度に及ぼす影響は大きい。

4.2 かぶり厚さおよび部材厚さの測定

厚さは、求めたい位置までの反射時間をそれぞれの方法による測定値と、4.1節による速度(分布)から求めることができる。速度を一定と仮定した場合は式(1)で求めればよい。速度分布を求めた場合は、式(2)から反射時間が求められ、これを解くことによって厚さ h が求められる¹⁾。

$$\frac{t}{2} = \int_{h_0}^{h_0+h} \frac{dx}{v(x)} \quad (2)$$

ここに、 t ：反射時間、 $v(x)$ ：速度分布、 h_0 ：速度分布の原点からコンクリート表面までの距離、 h ：厚さである。

図-4に超音波法による厚さ約600mmの壁供試体の厚さ測定結果(解析値)の一例を示す⁶⁾。実測値はコアの測定値である。横軸の速度分布の仮定は、図-5のように①表面速度で全断面一定、②提案した速度分布、③壁は対象断面であり速度も対象分布、④⑤表面から100mm、

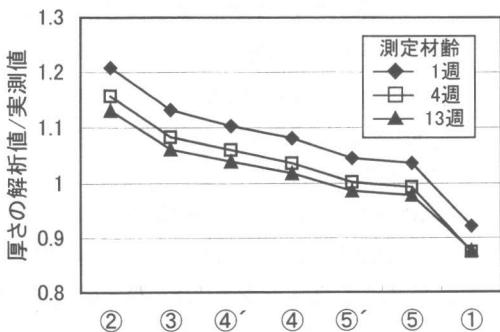


図-4 速度分布の仮定と厚さの関係

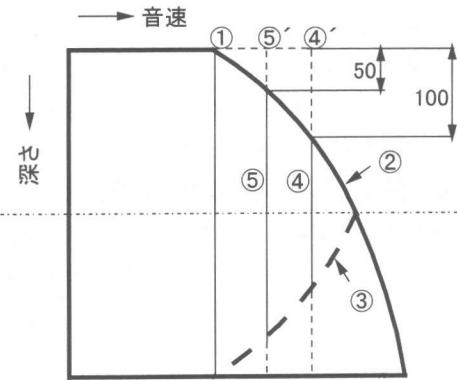


図-5 速度分布の仮定

50mm より内部は一定速度, ④' ⑤' 表面から 100mm, 50mm の速度で全断面一定とした。④ ⑤あるいは④' ⑤' の表面から 100 mmとしたのは、4.1 節 (1) の超音波法による速度分布の求め方の④から、材齢 13 週のときのそれより内部の速度が一定になる距離である。それより若い材齢の傾向も検討するため 50 mmの場合も入れてある。図-4 の結果より、測定材齢が進むに従い速度が一定値になる位置がしだいに内部に移動していることがわかる。これは、表面の品質が内部より低いこと、乾燥が内部に進行しているためであり、提案した方法が有効であることを示している。

超音波法は、かぶり厚さと同時に鉄筋径も測定することができる^{7, 8)}。

4.3 コンクリート品質

超音波法によるコンクリート内部の速度分布の解析結果と、強度から推定した速度の比較を図-6 に示すように、両者はよく一致している⁹⁾。また、有効細孔量と速度分布の関係は図-7 のとおりである¹⁰⁾。図-7 は、表面から 5, 25, 50, 95, 150, 195 mm の位置の有効細孔量と、超音波法によって求めた速度分布から有効細孔量の測定位置と一致する位置の速度をプロットしたものである。供試体 B, C は呼び強度 24、供試体 N2, N7 は呼び強度 18 のコンクリートで作製した供試体であり、N2 と N7 は脱型材齢が 2

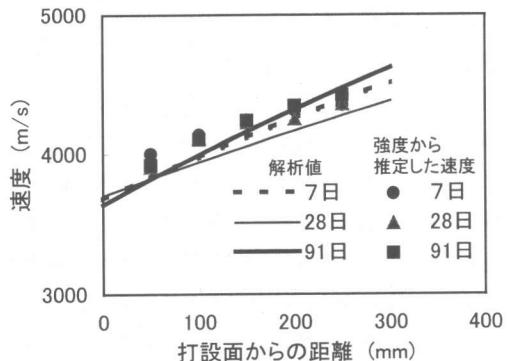


図-6 超音波法による速度分布の解析結果と強度から推定した速度の比較

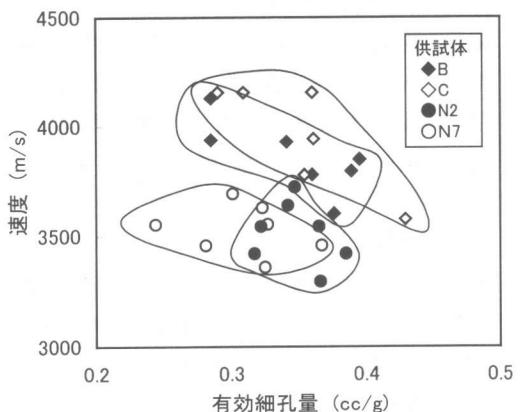


図-7 有効細孔量と速度の関係

日と 7 日の場合である。図-7 は有効細孔量が増加すると速度が低下していること、呼び強度の異なる B, C と N2, N7 とでは速度は異なっているが、水セメント比はほぼ同じであったので有効細孔量の範囲はほぼ同じであること、脱型材齢が異なることにより有効細孔量とともに速度も異なっていること、など速度分布は通常考えられているコンクリートの品質を評価できている。

5.まとめ

鉄筋のかぶり厚さ、部材厚さ、コンクリートの品質を構造物自体から直接検査する方法を提案した。主に速度(分布)が重要であり、その求め方も提案した。

この速度は、維持管理の基準になる値(初期値)となり、その後も継続して測定することにより維持管理にも役立つものと考えられる。

最後に、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試験特別研究委員会との共同研究であり、参加者は、同研究所より筆頭者と河野広隆、同協会からは連名者、超音波法に山口哲夫・(株)東横エンジニアリング、南康雄・日本ケルトクラー(株)、廣瀬正行・(株)エッジアンドビーシステム、柏瀬一彦・東京理学検査(株)、坂本一・検査開発(株)、奥紀仁・(株)八洋コンサルタント、レーダ法に松本功・日本無線(株)、前川聰・応用地質(株)、吉村明彦・コマツエンジニアリング(株)、松本章・(株)ジャスコ、弾性波法に金井昭三郎・岩野聰史・伊藤建設(株)、境友昭・アーライトリサーチ(株)、寺本朝明・後藤俊宏・松下インターテクノ(株)である。

参考文献

- 1)森濱和正、笠井芳夫、山口哲夫：超音波によるコンクリート版内の最速経路の予測と版厚測定に関する研究、非破壊検査、Vol.48、N0.5、pp.294-302、1999.5
- 2)森濱和正、山口哲夫、南康雄、廣瀬正行、柏瀬一彦、坂本一、奥紀仁：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 10 超音波による内部音速の解析結果と実測値の比較、日本非破壊検査協会平成 12 年秋季大会講演概要集、pp.263-264、2000.11

- 3)Annan,A.P. and J.L.Davis : Impulse Radar Sounding In Permafrost, Radio Science, Vol.11, pp.383-394, 1976
- 4)森濱和正、笠井芳夫、湯浅昇：コンクリート内部の含水状態と比誘電率の関係、日本非破壊検査協会平成 11 年春季大会講演概要集、pp.91-94、1999.5
- 5)前川聰、松本功、吉村明彦、森濱和正：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 12 電磁波を使用したコンクリート供試体の速度分布と厚さの測定について、日本非破壊検査協会平成 12 年秋季大会講演概要集、pp.267-268、2000.11
- 6)南康雄、柏瀬一彦、森濱和正：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 9 超音波による音速分布と厚さの測定、日本非破壊検査協会平成 12 年秋季大会講演概要集、pp.261-262、2000.11
- 7)山口達夫、山口哲夫、森濱和正：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 5 超音波法による鉄筋径とかぶりの計測、日本非破壊検査協会平成 12 年春季大会講演概要集、pp.73-74、2000.5
- 8)廣瀬正行、佐藤康之、森濱和正：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 11 かぶり厚の異なる鉄筋の広帯域超音波による径の探知、日本非破壊検査協会平成 12 年秋季大会講演概要集、pp.265-266、2000.11
- 9)森濱和正、山口哲夫：コンクリート版内の音速分布と強度の関係、土木学会第 55 回年次学術講演会第 V 部、pp.900-901、2000.9
- 10)森濱和正、小林幸一、湯浅昇、西山直洋：超音波速度分布の予測によるコンクリートの品質評価に関する研究、日本非破壊検査協会「鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷」シンポジウム、pp.21-26、2001.1