

コンクリート表層部の健全性診断

北川 真也

コンクリート構造物の点検や調査では、目視点検や点検ハンマーによる叩き点検に加え、測定機器等を用いた非破壊試験による点検が適用されることが多くなっている。非破壊試験とは、弾性波や電磁波を用い、叩き点検のように点検者の聴覚で判断する主観的な評価方法と異なり、点検者の経験や主観にとらわれず定量的かつ客観的な評価が可能な方法である。

ここでは、非破壊試験のうち、弾性波法に分類される打音法を用いたコンクリート表層部の健全性の評価について、その方法から理論、適用事例について述べることにする。

キーワード：コンクリート、診断、非破壊試験、弾性波法、叩き点検、打音法

1. コンクリート構造物を対象とした調査の現状

コンクリート構造物、たとえば道路トンネルや鉄道トンネルの維持管理では、覆工コンクリートのはく離・はく落による第三者災害を未然に防ぐため、定期的な点検や調査が実施されている。はく離やはく落の原因は、締め固め不足による充填不良、不十分な養生に着目した初期欠陥や、塩害による鉄筋腐食によるひび割れ、凍害によるコンクリートのポップアウトなど様々な劣化が挙げられる。これらの欠陥を簡易に探し出す手法は、目視点検や叩き点検がある。目視点検は、コンクリート表面に発生したひび割れや劣化現象をコンクリート面へマーキングし、展開図等を作成し欠陥位置を記録する方法である。また、叩き点検では、コンクリート表面を点検ハンマー等で打撃し、その際に発生する音を聴いて清音であれば健全、異音であれば不健全であると判断し、展開図等に記録する。しかし、目視点検や叩き点検では、ひび割れ幅はクラックスケールで測定できるが、ひび割れ深さは測定することができない。コンクリート表面から10 cm程度の深さに存在する欠陥は、聴き分けることは可能であるが、それより深い欠陥については検知が困難となる。したがって、ひび割れ深さの測定や15～20 cm程度の深さに存在する欠陥、さらには深い位置に存在する欠陥や背面空洞は、目視点検や叩き点検に加えて、測定機器を用いた非破壊試験または微破壊試験による調査が実施されている。

2. コンクリート構造物における非破壊試験

コンクリート構造物における非破壊試験は、試験機器を使用し、コンクリート構造物を破壊することなく、コンクリートの強度推定や、はく離や内部空洞、部材寸法等を調査する手法である。このような調査では、弾性波法や電磁波法と言われている手法が用いられる。弾性波法と電磁波法における試験方法と欠陥に適用する試験方法の一覧を表1に示す。

表1 弾性波法および電磁波法における試験方法および適用例一覧

		ひび割れ	内部欠陥	部材寸法
弾性波法	超音波法	○	○	
	衝撃弾性波法	○	○	○
	打音法		○	○
	A E法	○		
電磁波法	赤外線法		○	○
	レーダー法		○	○
	電磁誘導法			○
	X線法		○	○

内部欠陥：はく離、内部空洞、ジャンカ等

部材寸法：部材厚さ、鉄筋位置

ここでは、コンクリート表層部における健全性診断に用いられる非破壊検査手法について述べる。

コンクリート表層部における健全性診断では、先に述べたように叩き点検が用いられてきた。しかし、叩き点検では、点検者の聴覚に依存しており、経験と主観に左右されやすく、定量的な評価が難しい。そこで、

赤外線法や打音法など非破壊検査手法が利用されつつある。赤外線法は、赤外線カメラを用い、離れた場所から広範囲を同時に測定できることから、測定効率が良い。ただし、自然光による赤外線エネルギーを利用して測定を行う方法（パッシブ法）は、直射日光が当たる箇所では測定できる深さは5 cm程度となっている。また、トンネルや日陰になっているような箇所では、コンクリートと外気温の温度差がないことから、測定を行うことは難しい。このような箇所を調査する場合、ヒーターなどを利用し、人工的に熱源を発生させる方法（アクティブ法）を利用することとなる。この手法では、測定できる深さが20～30 cmまで可能となることが報告されている¹⁾が、コンクリートを暖めるのに時間が掛かること、測定範囲が狭くなることというデメリットがある。そこで、トンネル内でも赤外線法より時間が掛からずある程度の深さに存在する欠陥等を検知できる手法として、簡易的にかつ定量的にデータを管理できる「打音法」について、以下に述べる。

3. 打音法を用いたコンクリート表層部における健全性診断

(1) 打音法の概要

打音法は、打撃力を算出できる機能を有するハンマーを使用し、打撃により発生した音をマイクロフォンにより収録したものを、デジタルデータとして分析することにより、欠陥の有無やコンクリートの健全性を判断する技術である²⁾。したがって、叩き点検のように、点検者による経験や主観が入ること無く、客観的かつ定量的に結果を算出することが出来る。また、取得した結果をデジタルデータとして処理を行うことから、数値として記録することができる。さらに、マイクロフォンにフードを取り付けており、供用中の車両騒音の影響を受けない仕様となっている。打音法で使用する機器の全体写真を写真-1に、測定原理を以下に示す。

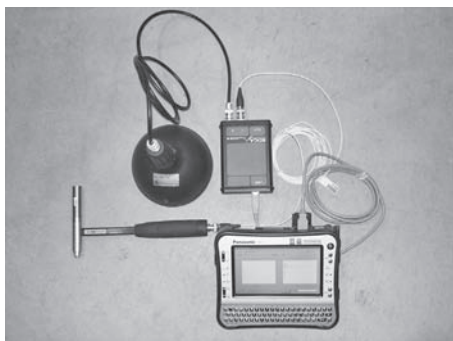


写真-1 打音法で使用する機器全体写真

① 打撃による表面振動を音波で捉える

打撃により発生する表面振動と表面から離れた位置で観察される音波は、ほぼ同じ周波数分布を持っている。したがって、音波を観測することが表面振動を観測することになる。音波で観測することのメリットは、センサーを表面に密着させる必要がないため、測定効率が上がることである。

② 曲げ振動の大きさと厚さを判断する

ハンマーの打撃により観測される波動には、打撃面とその対面を行き来する縦波やコンクリート表面を伝搬する表面波、打撃面とその対面を同位相で伝搬する曲げ波などがある。その中で、厚さが薄い場合に卓越する波は、曲げ波であり、この波に着目する。曲げ波によって発生する曲げ振動の概念図を図-1に示す。また、板の厚さと観測された音波の関係を図-2に示す。図-2に示すように、薄い板の場合には大きな音が発生し、厚い板の場合には小さな音が発生する。

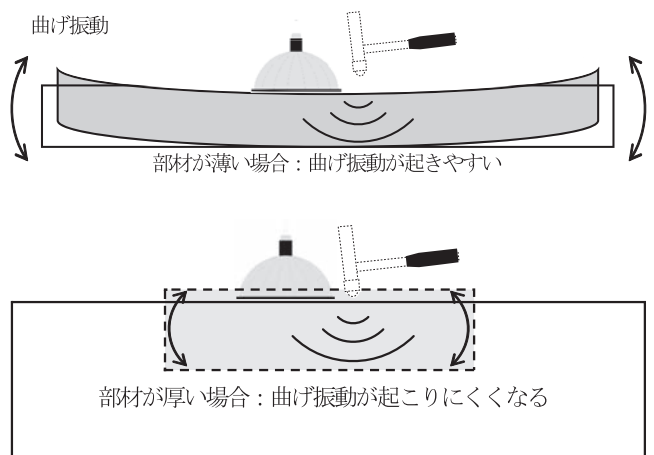


図-1 曲げ振動概念図

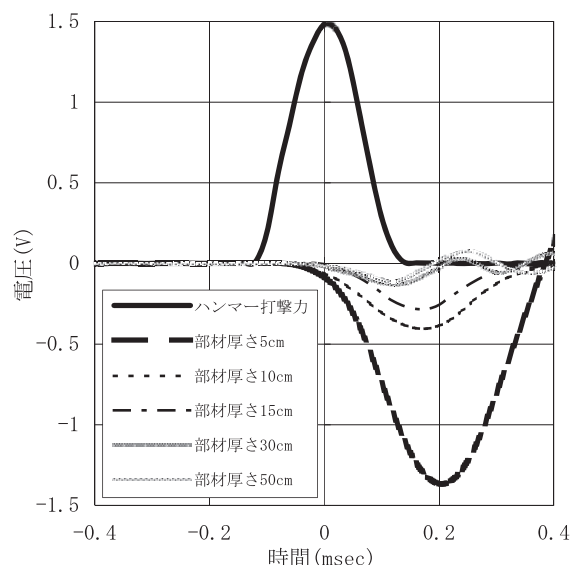


図-2 板厚が異なる場合に得られる打音法結果

この曲げ波は、半無限の板の衝撃インピーダンス式から理論的に計算が可能である。理論式を以下に示す。

$$h = \left(\frac{B}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$B = \frac{p_a C_a^k}{2.31 p_c^{0.5} E_c^{0.5}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

- h : 部材厚さ
- A : 振幅値比 (P_{max}/F_{max} , 図-3 参照)
(最大打撃力 P_{max} と最大打撃音 F_{max} の比)
- P_a : 空気の比重
- P_c : コンクリートの比重
- C_a : 空気中の音速
- E_c : コンクリートのヤング係数
- k : 音源が限定されるための補正係数
(フード付きマイクロフォンによる測定)

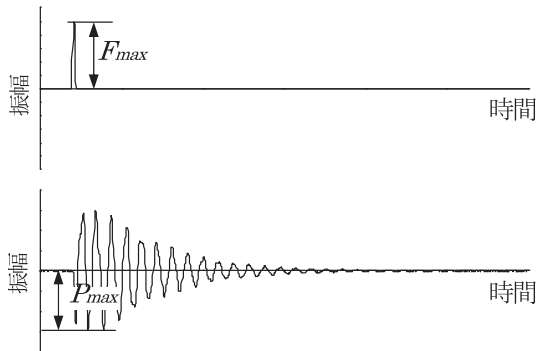


図-3 振幅値比の算定 (概念図)

ここで、係数 B は、空気やコンクリートの物性とフード付きマイクロフォンごとに固有な補正係数 k から決定すべきものであるが、簡易的に異なる部材厚さのコンクリート試験体などの測定結果から振幅値比 A と厚さ h の関係式を作り、直接 B を決定できる。なお、若材齢でヤング係数が異なる場合は式(2)で補正する。

③厚さから欠陥の有無を判定する³⁾

コンクリート内にはく離面や空洞が存在する場合、表面からはく離面や空洞上面までの板が曲げ振動を発生することになる。したがって、健全であれば、その構造物と同等な厚さ、例えば覆工コンクリート厚さが得られ、欠陥がある場合は、その深さまでの板の厚さが得られることになる。ただし、本手法では半無限の板を仮定しているため、欠陥の平面規模が小さい場合は、境界の拘束などの影響を受け、実厚さを得ることは難しい。ただし、欠陥の有無や概略の欠陥までの厚さを得るためには本手法で十分である。

本打音法とは異なる評価方法として、音波の減衰に着目する方法、周波数分布に着目する方法、ウェーブレッ

ト波形から推定する方法などが提案されているが、基本的には厚さにより異なる曲げ振動の大きさに着目している点は共通しているものと考えられる。厚さが小さく曲げ振動が大きい場合は、低周波側のエネルギーが大きくなり、減衰も遅くなることから推定される。ただし、これらの方法では、健全部との比較が必要となり、得られる結果も、欠陥の有無であり、物理的な欠陥のイメージである厚さ分布などは得ることが出来ない。

(2) 打音法の適用範囲

打音法はコンクリート板の曲げ波の大きさを評価する方法であるので、曲げ波が卓越する厚さまでが適用範囲である。図-2 に示すように、厚さが大きくなると、振幅が小さくなり、厚さによる変化が無くなる。これは、観測される波が曲げ波ではなく、縦波または表面波(レイリー波)になるためと考えられる。図-4 に部材厚さが異なる部材を叩いた場合に発生する弾性波の伝播速度の観測結果を曲げ波(周波数 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz)、レイリー波の理論値と比較した。

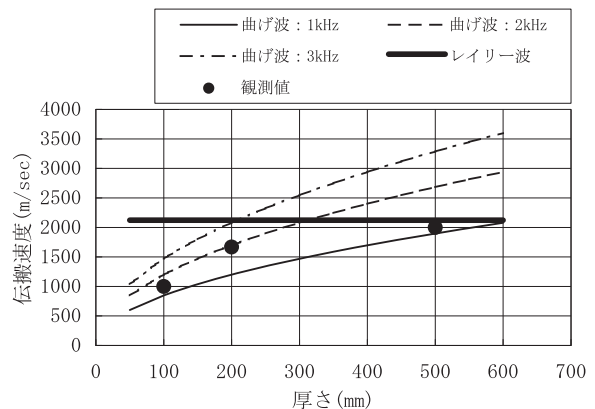


図-4 伝播速度の観測値と理論値との比較

ここで、ハンマー (200 g) による打撃周波数は、2 kHz 程度であるので、曲げ波(周波数 2 kHz)の理論値に対応する。部材厚さが 100 mm, 200 mm では、曲げ波の理論値(周波数 2 kHz)と良く一致しており、部材厚さが 500 mm では、レイリー波の理論値と良く一致していることがわかる。この結果から、曲げ波が卓越する 0~300 mm までが本手法の適用範囲となり、厚さ 200~300 mm よりも薄い部分にある空洞やはく離が検出できる可能性があることがわかる。

4. 打音法による健全性診断

打音法によるトンネル二次覆工コンクリートにおける健全性診断の事例を以下に示す。

(1) 調査概要

本調査は、新設トンネルにおける二次覆工コンクリートの品質管理項目の一つとして行ったものである。調査フローを図-5に示す。

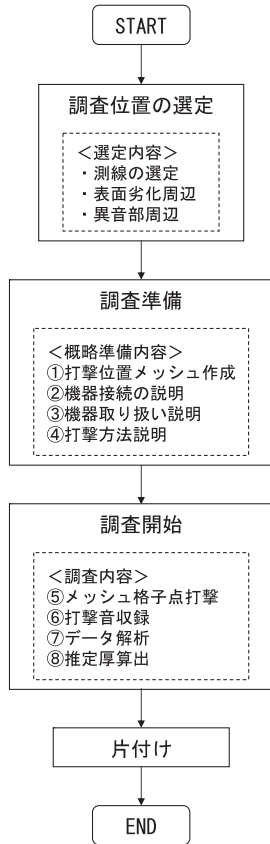


図-5 調査フロー図

調査を行った覆工コンクリートは、短繊維が配合された鉄筋コンクリートである。予め目視点検および点検ハンマーによる叩き点検は行っている。これらの調査では、特に問題となるような欠陥は見あたらなかったが、はく離・はく落が生じやすい箇所について、締め固め不足や充填不良による内部空洞等が存在しないことを詳細に確認するために行ったものである。

測定箇所は20スパン（1スパン10.5m）ほどあり、

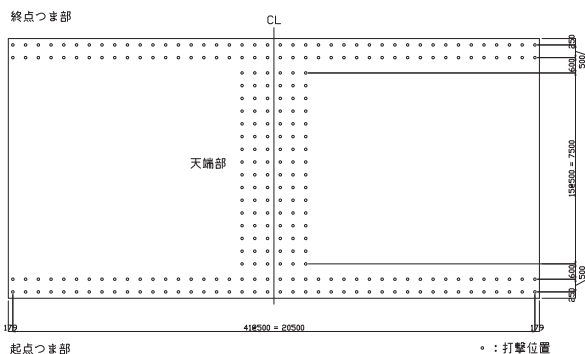


図-6 調査位置展開図

充填不良が起こりやすい覆工つま部および天端部において打撃ピッチを500mm間隔で行った。調査位置展開図を打撃点とともに図-6に示す。

(2) 調査結果

調査状況写真を写真-2, 3に示す。また、調査結果を図-7, 8に示す。



写真-2 調査状況



写真-3 打撃位置状況

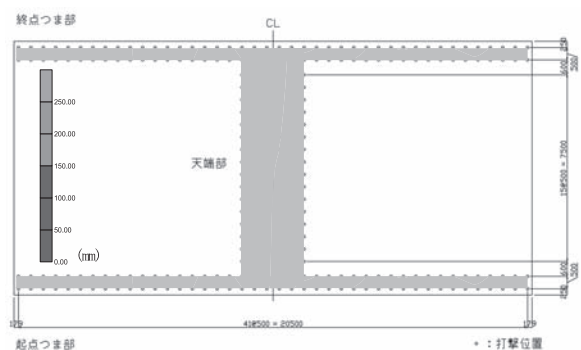
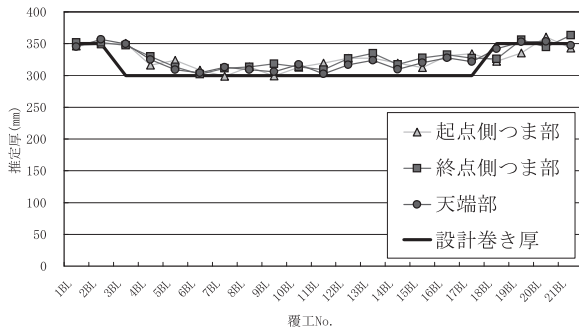


図-7 調査結果（コンター図の場合）



図一八 調査結果（各スパン毎の評価）

図一七は、各打撃位置における結果をカウンター図で示した結果であり、すべての打撃位置において推定厚が250 mm以上であることを示している。また、図一八については、つま部と天端部の打撃位置における結果を平均値化し、スパン毎にグラフ上に示した結果である。この結果から、すべてのスパンのつま部、天端部において、設計巻き厚以上の結果であることが推定され、調査を行った二次覆工コンクリートの表層部には、第三者への被災が懸念される空洞やはく離というものはないことが分かる。また、二次覆工コンクリートは鉄筋と短繊維が配合されたコンクリートであるが、打音法は、これらの影響を受けない手法であることが分かった。

以上のように、打音法を使用したコンクリート表層部の健全性診断は、コンクリートの品質管理を行うことが可能であり、今後、定期的な点検を打音法を用いて行う際に、今回の測定値を初期値として用い、定量的な健全性の評価管理を行うことが可能となる。

5. まとめ

打音法によるコンクリート表層部における健全性診断は、客観的かつ定量的な評価が可能となる。調査結果は、デジタル値としてデータが残り、維持管理を行う上で経年劣化等の把握も可能となる。また、今回の場合、新設時における品質管理として使用し評価を行っているが、定期点検や劣化診断にも使用の検討が進んでいる。

打音法においては、2009年に非破壊検査協会から規格として制定されており、他の非破壊試験についても規格・標準化が行われている。このように、規格・標準化されることによって、非破壊試験による評価の信頼性が高まることから、今後、コンクリート構造物の健全性診断、劣化診断、初期・定期点検において、打音法をはじめその他の非破壊試験が利用されていくことを望む次第である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 魚本, 加藤ら: コンクリート構造物の検査・診断, 理工図書, P155, 2003年8月
- 2) 伴享, 歌川紀之, 篠川俊夫, 中村英孝, 伊東良浩: 打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査手法の開発, 佐藤工業技術研究所報, No.27, PP43-52, 2001
- 3) 伴享, 歌川紀之, 市野大輔, 北川真也, 森濱和正: 打音法のRC構造物への適用について, 佐藤工業技術研究所報, No.30, PP9-17, 2004

【筆者紹介】

北川 真也 (きたがわ しんや)
佐藤工業㈱
土木事業本部 設計部

