

(5) 非破壊試験によるコンクリート構造物の部材厚さの測定および変状の検出

岩野 聡史 リック(株) 歌川 紀之 伴 享 北川 真也 佐藤工業(株)
飯田 洋志 日本無線(株) 松本 功 (株)計測技術サービス 森濱 和正 (独)土木研究所

Part 5 Measurement of Thickness and Detection of Defect in Concrete Structures Using Non-destructive Testing

Satoshi IWANO RIK Co., Ltd., Noriyuki UTAGAWA, Susumu BAN
Shinya KITAGAWA Sato Kogyo Co., Ltd., Hiroshi IIDA Japan Radio., Ltd.
Isao MATSUMOTO KGS Inc. and Kazumasa MORIHAMA Public Works Research Institute

キーワード 非破壊試験, 部材厚さ, ジャンカ, 空洞, ひび割れ, 衝撃弾性波法, 打音法, レーダ法, 超音波法

1. まえがき

本編では、コンクリート部材の厚さ測定、変状の検出について取り扱う。

コンクリート構造物の出来形寸法のうち、スラブ、壁、トンネル覆工コンクリートなどの厚さは、部材の端部では直接測定できるものの、それ以外の部分の測定は削孔するか、測定位置を決めておき施工段階ごとに高さを測定し、その差から厚さを求める方法を採用する機会が多い。前者は損傷を伴うこと、後者は測定位置が決まっており、検査などに有効な方法とはいえず、検査位置はランダムに選定するという原則を逸脱することになる。検査位置を事前に決めておけば、その位置では設計値を満足するように施工し、それ以外の位置では設計値を満足していなくても合格と判定されるように施工することも可能になる¹⁾。そのため、構造物に損傷を与えることなく、検査位置をランダムに選定して測定するには非破壊試験が必要である。

コンクリートの変状には、施工不良と、供用中の劣化、損傷がある。施工不良は、打設時に締固め不足などによって生じるジャンカ、コールドジョイント、内部・背面空洞などと、硬化後しばらくして発生するひび割れなどがある。劣化、損傷は、ひび割れ、はくりなどがある。耐久性確保のためには、これらの変状を早期に検出し、対策を講じることが必要である。ここでは、これらの測定・検出の検討結果を紹介する。

2. 部材厚さ

2.1 打音法

ここで扱っている打音法は聴力によるものではなく、音を収録し、波形解析することによって厚さ、変状などを推定する方法である。

コンクリートをハンマで打撃すると曲げ振動が発生する。部材厚さが薄い場合は大きく振動するため、発生する打撃音は大きくなり、厚くなれば逆に小さくなる。この特性を用いて厚さを推定する方法を提案している²⁾。200g程度のハンマにより曲げ振動を発生させられる限界は25～30cmであり、これが適用限界となる。

打音法では、ハンマ先端に加速度センサーを有したインパル

スハンマで打撃し、打撃位置近傍に設置したマイクロフォンによって打撃音を収録し、式(1)を用いて厚さ h が推定される。

$$h = (B/\lambda)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$A = P_{\max}/F_{\max}$$

ここで、 A はマイクロフォンにより収録された最大打撃音 P_{\max} とインパルスハンマにより収録された最大打撃力 F_{\max} の比であり(図1)、 B は実験定数である。

後述の施工不良(3.1)、はくり(5.1)で実例を示す。

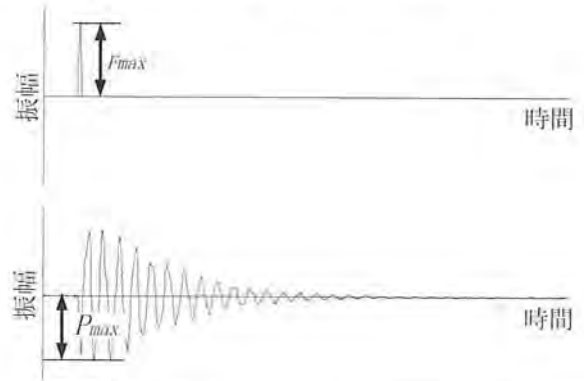


図1 最大打撃力 F_{\max} と最大打撃音 P_{\max}

2.2 レーダ法

2.2.1 レーダによる厚さ推定原理

レーダによる部材厚さの測定は、鉄筋のかぶり厚さを測定する場合と同様に、比誘電率の異なる物質に接した位置で電磁波が反射する性質を利用している。レーダ装置を走査する面の背面が空気や地盤に接している場合、コンクリートと空気、地盤は比誘電率が異なっているため電磁波が反射する。反射波の伝搬時間の測定と、コンクリート中の比誘電率を推定することにより、かぶり厚さと同様に部材厚さを推定することができる。

レーダによる厚さ測定は、次のような制約条件がある。無筋コンクリートの場合、測定できる厚さは周波数によって決まる。

鉄筋コンクリートは、部材厚さに対して鉄筋間隔が狭い場合、背面よりも鉄筋からの強い反射波が受信されるため測定できない。背面に接触している物質によっても制約を受ける。例えば、捨てコンと接しているような場合、躯体コンクリートの比誘電率との違いがほとんどないため、捨てコンとの界面からの反射波を受信できないことになり、躯体のみの厚さ測定はできない。

2.2.2 レーダによる測定例

厚さの測定例を図2に示す。背面が空気に接している場合、反射波は図(Bモード)のように帯状の反射が連続して表示される。この位置に縦カーソルを合わせると、その位置の直接反射波形(Aモード)は、この装置の場合、左にピークを有する波形が得られる。かぶり厚さと同様に、コンクリート中を伝搬する電磁波速度(または比誘電率)を推定して補正することにより厚さが推定できる。

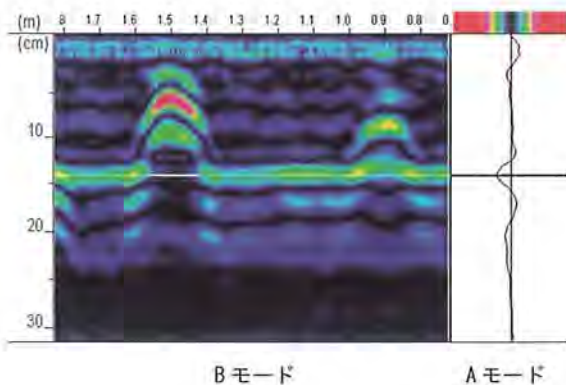


図2 部材厚さ検出結果例

2.3 超音波(土研法)

超音波による厚さ推定も、反射波の往復時間と、コンクリートを伝搬する速度を使用することはレーダ、後述の衝撃弾性波と同じであるが、土研法は強度推定と同じくコンクリート内部の音速分布(3)編の4.参照。詳しくは文献3)参照)を用いる。そのため、測定する部材や厚さに応じて推定式は次のようになる(図3および4)。

2.3.1 スラブの厚さの求め方

(1) 求める厚さが音速変化域の場合

図3(a)のように音速が変化している範囲の厚さ h を求める場合、式(2)による。

$$h = \left(\frac{2m-1}{2m} K \cdot t + h_0 \frac{2m-1}{2m} \right)^{\frac{2m}{2m-1}} - h_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 K 、 h_0 、 m は音速分布の係数。

(2) 求める厚さが内部一定音速域に達している場合

図3(b)のように求める厚さが内部一定音速域の場合、音速変化域と一定域に分けて求める。

音速変化域 h_1 は、音速分布を求めるときに計算過程の中で求められる。 h_1 を伝搬する時間 t_1 は、式(2)の h に h_1 を代入することにより式(3)によって求められる。

$$t_1 = \frac{1}{K} \frac{2m}{2m-1} \left[(h_0 + h_1)^{\frac{2m-1}{2m}} - h_0^{\frac{2m-1}{2m}} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

反射波の片側の伝搬時間 $t/2$ と音速変化域の伝搬時間 t_1 の差

t_{in} が内部音速域の往復伝搬時間になる。

$$t_{in} = t/2 - t_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

t_{in} と内部一定音速 V_{in} から式(5)によって内部一定音速域の厚さ h_{in} を求める。

$$h_{in} = V_{in} \cdot t_{in} \quad \dots\dots\dots (5)$$

厚さ h は式(6)によって求められる。

$$h = h_1 + h_{in} \quad \dots\dots\dots (6)$$

2.3.2 壁部材の厚さの求め方

壁部材の場合、音速分布が図4のように左右対称と仮定すると、厚さは次のように求めることができる。

(1) 求める厚さが音速変化域の場合

壁の1/2の厚さ $h/2$ は、式(2)の t に $t/2$ を代入し、それを2倍することによって壁の厚さ h を求める。

(2) 求める厚さが内部一定音速域に達している場合

音速変化域 h_1 の伝搬時間は式(3)によって求められる。

壁の中心までの内部一定音速域の伝搬時間 $t_{in}/2$ は、式(4)の t に $t/2$ を代入することによって求められる。

中心までの内部一定音速域 $h_{in}/2$ は、式(5)の t_{in} に $t_{in}/2$ を代入することによって求められる。

壁の厚さ h は、式(7)によって求められる。

$$h = 2 \times (h_1 + h_{in}/2) \quad \dots\dots\dots (7)$$

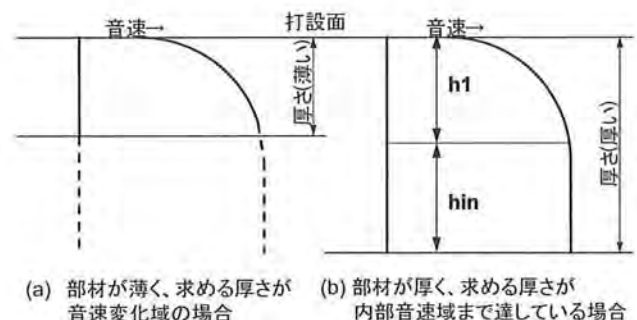


図3 スラブ部材内の音速分布

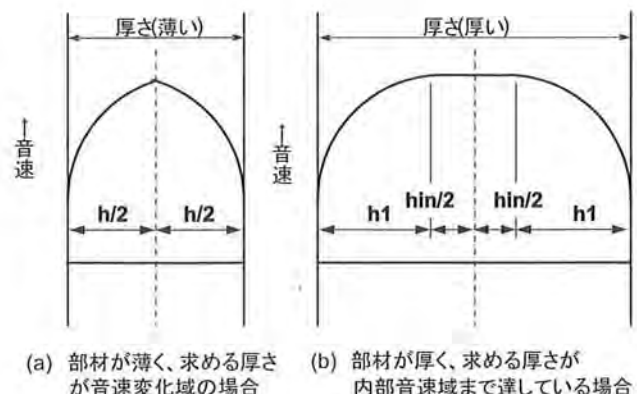


図4 壁部材内部の音速分布

2.4 衝撃弾性波 (ITECS 法)

衝撃弾性波法 (ITECS 法) では、コンクリート表面を鋼球等のインパクターで打撃し、コンクリート表面と背面の間で多重反射する縦弾性波の周波数 f_0 (単位時間あたりの往復回数) を求め、縦弾性波速度 V_p から、縦弾性波の反射深さ D を式 (8) により求め、部材厚さを推定する。

$$D = V_p / (2 \cdot f_0) \quad \dots\dots\dots (8)$$

周波数解析方法について、特に測定対象部材が厚さ 600mm 程度以上の場合では、境界面で多重反射する縦弾性波が著しく減衰するため、得られる周波数スペクトルは、多重反射による周波数よりも衝撃力の接触時間を逆数とする周波数が卓越し、測定対象である多重反射による周波数を正確に測定できない場合がある。そのため、この影響を除去できる周波数解析方法として、本法では、最大エントロピー法または相互相関法⁴⁾により相関関数を求め、相関関数に対して FFT 解析を行う方法を採用している。

この例として、図 5 に示す設計厚さ 1600mm の橋脚で測定された時間波形 (速度波形) に対する各周波数解析方法での周波数スペクトルを図 6 に示す。図 6 より、FFT 解析では、振幅が最大となる周波数は 1200Hz 付近にあり、厚さ 1600mm からの多重反射による周波数と一致するが、衝撃力の接触時間の逆数に相当する 3000Hz 付近の振幅も大きくなり、1200Hz 付近の周波数を多重反射による周波数と判別することが困難である。これに対して、最大エントロピー法、相互相関法では、厚

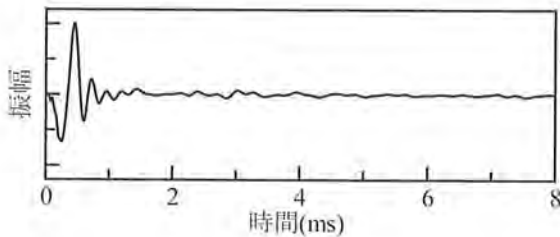


図 5 時間波形 (速度波形)

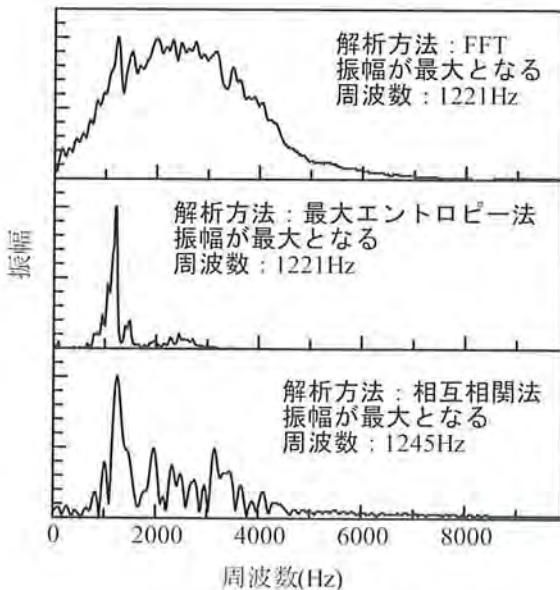


図 6 各周波数解析方法での解析結果

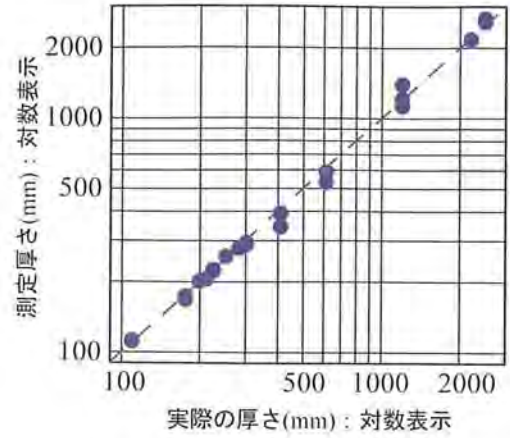


図 7 ITECS 法による厚さ測定精度

さ 1600mm からの多重反射による周波数が明瞭に測定されることがわかる。

測定精度として、実構造物および供試体で本法により測定した部材厚さと、標準コア等による部材厚さ計測結果との比較を図 7 に示す。設計厚さ 100mm ~ 2500mm のコンクリートでの本試験による測定精度は ±5% である。

3. 施工不良 (ジャンカ、コールドジョイント、内部空洞)

3.1 打音法

打音法の厚さ測定を利用したトンネル覆工コンクリートの背面空洞、コールドジョイントの測定例を紹介する。

覆工天端アーチ部分 (延長方向 7m、円周方向 3m) を 50cm 間隔で厚さを測定すると、厚さ 30cm 以下の部分が図 8 の網掛け部分のように検出された。部材厚さが薄いと推定された天端中心および打継目近傍において削孔調査を行った結果、背面は空洞となっており、コンクリート厚さは打音法の結果と一致していることが確認された。

図 9 は堤防護岸のコールドジョイントの測定事例である。コールドジョイントより上側である測定点 1 ~ 3 では、部材厚が厚く測定されており、測定点 4 ~ 7 では薄く測定されている。また、コールドジョイントから下側の測定点 8 ~ 10 では部材厚が厚く測定されており、測定点 4 ~ 7 付近で明らかに付着切れしていることが推定される。確認のためコールドジョイント付近でコアを採取したところ、付着切れは表面から水平方向に 175mm 程度まであり、測定結果とほぼ一致した。

3.2 レーダ法

レーダによる内部空洞などの検出は、基本的に部材厚さの推定方法と同じであり、2.2 を参照されたい。

ここでは、コンクリート表面から 6cm の深さに幅約 19cm、

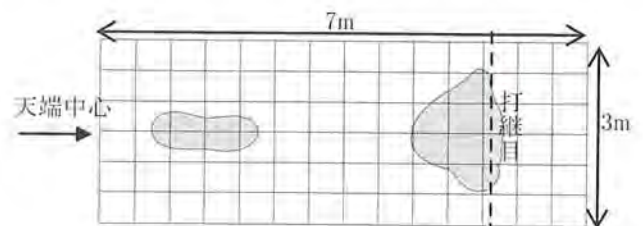


図 8 背面空洞の探査例 (厚さ 30cm 以下の部分)

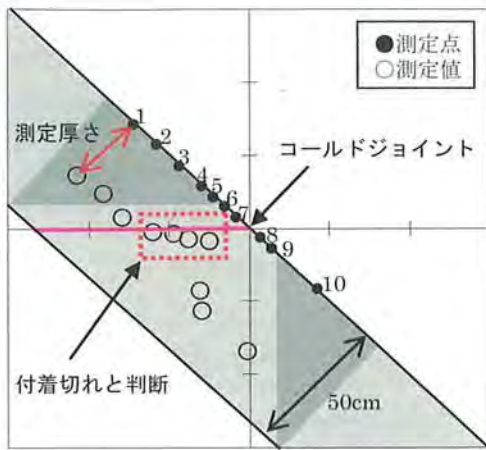


図9 堤防護岸のコールドジョイント

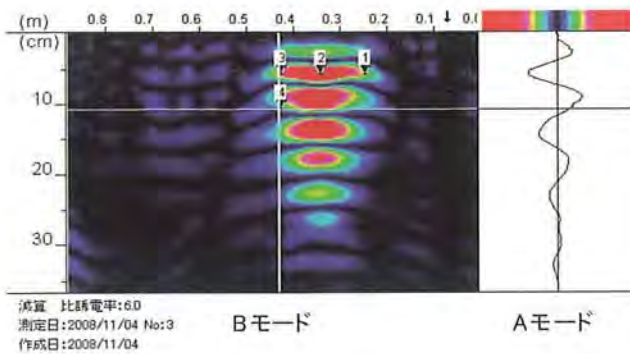


図10 空洞探査

厚さ約18cmの空洞を作り、その検出を行った(図10)。空洞の幅は、断面画像(Bモード)のマーカ1と3のように、変曲点と思われる位置から推定する。距離の差から18cmと読みとることができ、実際の幅19cmに近い。空洞の深さは、コンクリート表面から5.7cm(比誘電率6.0)と解読できる。

空洞の厚さ(奥行)は、空洞上面と下面からの反射信号を分離して解読できる場合に推定可能である。図10の例では、深さ約10.7cmに不連続点(Aモードの横線位置にわずかな乱れがある)に注目すると、比誘電率6.0に設定しているので、空洞(空気の比誘電率1)の厚さは次のように求められる。

$$(10.7 - 5.7) \times \sqrt{6} \approx 12 \text{ cm}$$

実際の厚さ18cmの2/3程度であり、概略の厚さは把握できる。ほぼ正確に測定できる限界は周波数に依存する。使用した装置が2つの反射波形を明確に分離できるのは厚さ30cm以上の場合である。

レーダによる空洞の検出は、上記のとおりある程度の厚さ以上必要となるため、ひび割れ、コールドジョイントのように極めて薄い層の検出は困難である。ただし、水(比誘電率81)が浸透している場合、その部分の比誘電率の変化が大きいことから検出が可能になる。このような例が図11である(図9と同じ)。コールドジョイントに水が浸透していた場合のものであり、ほぼ矢印の角度でコールドジョイントがあることが確認できた例である。

3.3 衝撃弾性波(iTECS法)

衝撃弾性波法(iTECS法)では、図12に示す伝搬時間差法、多重反射法により変状範囲を推定する。コンクリート中を伝搬する縦弾性波は、内部にコールドジョイント、ジャンカ等の変状が存在すると①コンクリートの弾性係数の低下により伝搬速

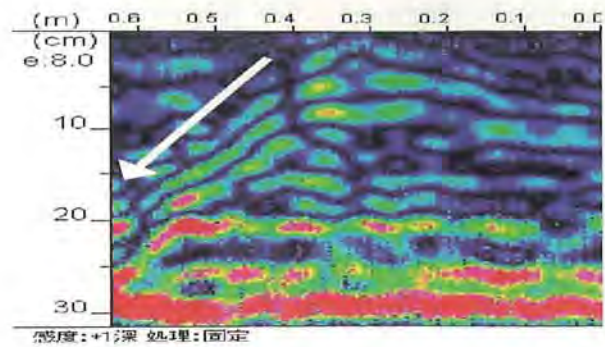


図11 コールドジョイントの検出例

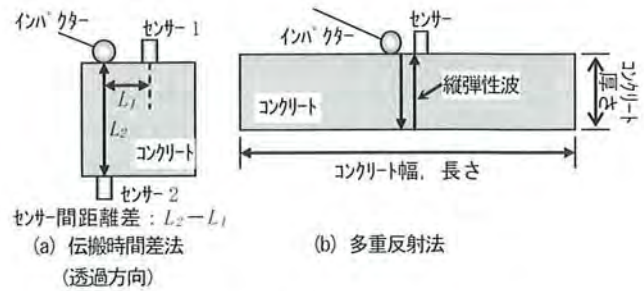


図12 iTECS法での変状範囲測定方法

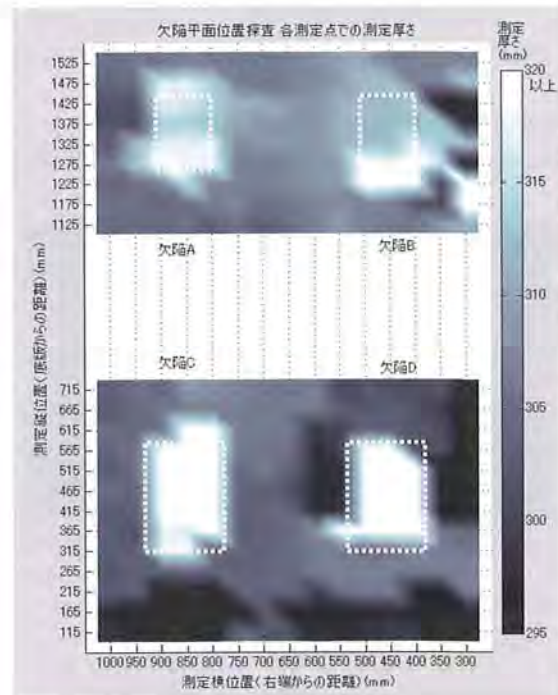


図13 衝撃弾性波法による供試体での測定結果例

度が遅くなる、②欠陥表面で反射する、③曲げ振動が発生する、これらの性質により健全部と比較して測定値に変化が生じることとなる。

ジャンカを模擬したポーラスコンクリートを埋設した供試体を多重反射法によって測定した例を図13に示す。設計厚さ300mmに対して、ポーラスコンクリートの埋設位置付近では測定上の反射深さが320mm以上となった。これはポーラスコンクリートにより、縦弾性波の伝搬速度が低下したもので、この様な異常値を示す範囲から変状範囲を推定する。

4. ひび割れ深さ

4.1 ひび割れ深さの評価

ひび割れ深さの推定には、通常、ひび割れ先端で回折する波を受信することによって行う。しかし、波には第1波の押しと引きがあり、回折する角度によって受信される波が異なる。回折角度が小さいときは引き波、90度以上になると押し波が受信されることから、90度の時の結果をベースに測定（直角回折波法または位相反転法）することを基本としている。

また、ひび割れ先端はどこなのか、あるいはひび割れの途中で接触している、水が入っている、析出物があるなど、完全に離れた状態になっていない場合がある。このような場合、ひび割れ深さを浅く推定することになる。

このようなことから本研究では、人工的に深さ既知の切欠き（スリット）を入れておき（図14）、その測定が可能かを確認しておく。実際のひび割れ深さの測定では、上記のとおりひび割れ内部にはさまざまな接触により浅く推定されるため、「測定結果以上」と評価する。

4.2 超音波（直角回折波法）

直角回折波法によってスリットの深さを測定した結果は図15のとおりである。スリットは、深さ50～300mmを、コンクリート表面に対して90～30度変化させて入れた。

図15のとおり角度30度、45度のときの深さの測定精度は低下しているが、そのほかは±10%以内で測定できている。

4.3 衝撃弾性波（ITECS法）

ITECS法によるひび割れ深さ測定は、位相反転法と多点測定による伝搬時間差法の両法を併用する方法（併用法）を提案している⁵⁾。

測定例として、ひび割れを想定した深さ300mmのスリットでの測定結果を示す。測定状況を図16に示すとおり、ひび割れ



図14 スリット状況

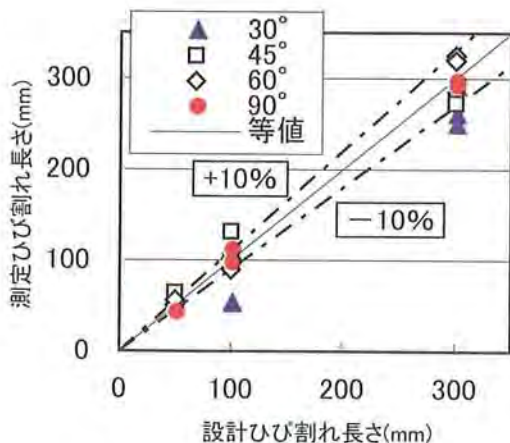


図15 超音波（直角回折波法）によるスリットの深さ測定結果

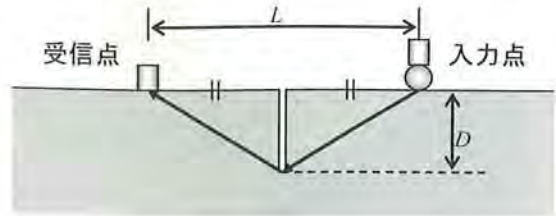


図16 測定状況図

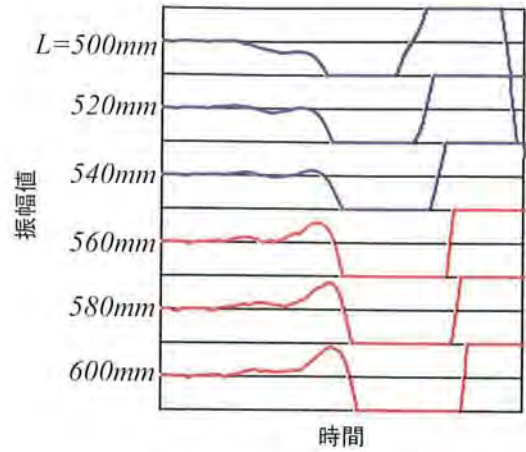


図17 各距離Lでの測定波形

開口部を中点として入力点と受信点を設定し、入力波形とひび割れ先端を回折した縦弾性波を測定した。測定波形を図17に示す。距離 $L \leq 540\text{mm}$ での測定波形の第1波は下に凸形状であり、距離 $L \geq 560\text{mm}$ では上に凸形状となることから、位相反転法ではひび割れ深さは280mmと推定される。しかし、位相反転法では、 $L = 540\text{mm}$ の測定波形のように、第1波の形状が下に凸形状か上に凸形状かの判断結果の客観性が課題となる場合もある。

多点測定による伝搬時間差法の例として、測定波形の第1波が上向きとなる距離Lでの、距離Lの2乗と、ひび割れ先端を回折する縦弾性波の到達時間 T_c の2乗との関係を図18に示す。ここで、両者は式(9)の直線関係となることから、最小二乗法により回帰直線を求めた結果も示す。なお、計算を第1波が上向きとなる距離で行ったのは、第1波が下向きの際の弾性波の伝搬経路が図16に示す経路であるのかが不明であるため対象外としている。

$$L^2 = V_p^2 \times T_c^2 - 4D^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)の V_p は縦弾性波速度、 D はひび割れ深さである。つまり、距離Lの2乗と到達時間 T_c の2乗との関係式の傾きが弾

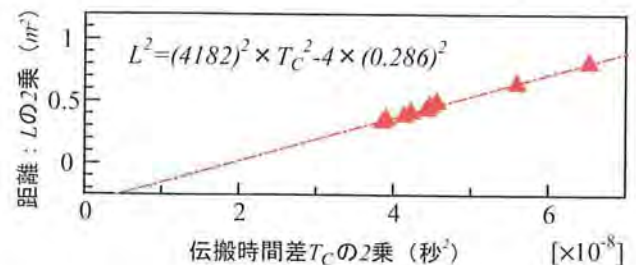


図18 距離と到達時間差の関係

性波速度、切片がひび割れ深さを示し、回帰直線より縦弾性波速度は4182m/s、ひび割れ深さは286mmと推定された。ひび割れ深さの推定結果は位相反転法による280mmと近似した結果となり、実際の深さ300mmとの誤差は5%となった。

併用法では2つの方法によるひび割れ深さの推定結果を比較することにより、推定結果の妥当性が確認できる。

5. はくり

5.1 打音法

打音法によるはくり調査も厚さ測定をベースに行うことができる。

図19は、塩害による鉄筋腐食に伴うかぶりコンクリートのはくり状況を打音法により調査した事例である。厚さ400mmの底板のある断面について0.1m間隔で打音法により厚さを測定した結果であり、鉄筋の位置を同時に示した。白丸印の健全な鉄筋の周辺の厚さは、適用限界である300mm程度となっている。一方、黒丸印の腐食した鉄筋(事後調査により判明)の周辺では厚さが薄く、特に鉄筋直上では、ほぼ鉄筋のかぶり(80mm)と同程度の厚さ60mm程度となっている。この結果から鉄筋の腐食により鉄筋周辺にはくりが生じているものと推定される。

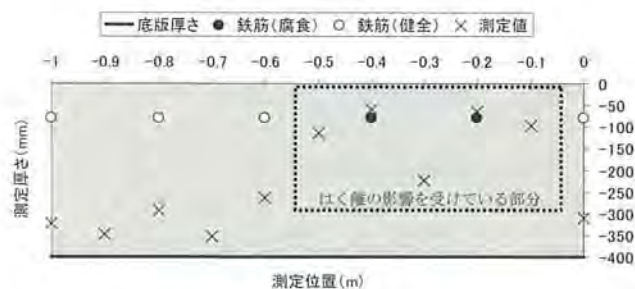


図19 打音法によるはくり検出状況

5.2 衝撃弾性波(iTECS法)

衝撃弾性波法(iTECS法)では、対象とするはくりによって測定方法が異なる。表面側および背面側の鉄筋腐食等による内部のはくりを対象とする場合には、これらのはくり位置では3.3に示した変状と同様に、健全部での測定結果と比較して測定値に変化が生じることから、図12に示す測定方法によりはくり位置を推定する。

はくりは、上記2例のように劣化の代表例として鉄筋腐食に伴うはくりのほか、建築の仕上げ材や、耐震補強など補修・補強部分の付着状態やはくりの確認も重要であり、RC巻立による耐震補強工事でのコンクリート増厚部と既設部ではくりを対象とした測定方法を紹介します。2.4に示した部材厚さの測定方法を利用し、増厚部で多重反射する縦弾性波の反射深さを測定する。模式図を図20に示す。既往の研究より、コンクリート背面に材料が付着している場合には、厚さ方向での多重反射に相当する周波数よりも低い周波数が測定されることが確認されている⁶⁾。これから、増厚部と既設部が付着している場合には、測定上の反射深さは実際の増厚部の厚さよりも厚くなる。これに対し、増厚部と既設部にはくり面が存在する場合には、測定上の反射深さは実際の増厚部の厚さ以下となる。これから、この試験においては測定した縦弾性波の反射深さが増厚部の厚さ以下となる場合に異常値と判断する。

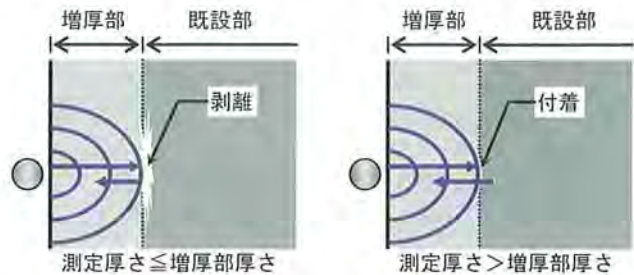


図20 増厚部と既設部との付着状況試験での模式図

6. まとめ

打音法、レーダ法、超音波(土研法、直角回折波法)、衝撃弾性波(iTECS法)による施工不良(ジャンカ、空洞、コールドジョイント)、劣化、損傷に伴うひび割れ深さ、はくりの測定方法を紹介した。

本特集の最後に当たり、9年間の共同研究の成果として非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の主な検査方法、点検方法およびそのための各種試験方法を提案した。鉄筋のかぶり厚さ、コンクリート強度の検査については、国土交通省の橋梁構造物に適用されている。今後さらに多くの構造物に適用されること、さらには是非とも点検に適用されるようになり、適切な維持管理が行われ、コンクリート構造物の長寿命化が図られるための一助になることを願っている。

参考文献

- 1) 例えば、日経BPnet ケンブラッツ、施工不良が相次いだ上信越道・熊取トンネル、「発注者の検査方法も問題」と指摘、2008年9月9日
- 2) 歌川紀之、伴 享、北川真也：打音法における欠陥検知に関する一考察、土木学会第58回年次学術講演会、V-383, pp.765-766, (2003)
- 3) 森濱和正：超音波法(土研法)による構造物コンクリート強度の推定精度、コンクリート工学年次論文集、30(2), pp.727-732, (2008)
- 4) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定、コンクリート工学年次論文報告集、23(1), pp.547-552, (2001)
- 5) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定方法の検討、第62回土木学会年次学術講演会講演概要集、第V部門、pp.3-4, (2007)
- 6) 岩野聡史ほか：縦弾性波の反射面の材質による振動数変化について、コンクリート工学年次論文報告集、26(1), pp.1887-1892, (2004)

岩野 聡史 <本誌143ページ参照>