

論文 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査

岩野 聡史^{*1}・極壇 邦夫^{*2}・境 友昭^{*3}

要旨： コンクリート表面を鋼球で打撃すると内部を球面状に伝搬する縦弾性波が発生する。コンクリートが健全であれば、縦弾性波が打撃面と底面とを多重反射することによって生成される振動数が測定されるが、内部に欠陥が存在すると、見かけの弾性率の低下による弾性波速度の低下、弾性波が欠陥部を迂回して伝搬経路が長くなる、欠陥部で多重反射する縦弾性波の発生、曲げ振動の発生、これらの現象により健全部の測定結果とは異なる。本論文では、まず供試体を用いた実験によりこれらの現象を確認し、ついで、実構造物で壁・柱を対象とした試験で、深さ 145mm および表層部に存在する欠陥を探査した結果について報告する。

キーワード： 衝撃弾性波法、欠陥探査、縦弾性波、多重反射、曲げ振動

1. はじめに

本研究は、コンクリート表面を鋼球で打撃し、衝撃により発生する振動を測定する、衝撃弾性波法によるコンクリートの非破壊検査を対象とする。加速度あるいは速度を測定量とする衝撃弾性波法では、人力振動の振動数帯域幅が狭いという問題点があるが、筆者らはこの影響を除去し、縦弾性波が打撃面と底面とを多重反射することによって生成される振動数を抽出する測定解析方法を用いて、コンクリートの厚さ測定を行ってきた¹⁾。今回はコンクリート内部に存在する欠陥探査を目的として、供試体側面に模擬的な欠陥を作成し、振動数が欠陥によって変化する現象を実験的に確認した。さらに、この結果を利用して、実構造物での壁・柱により、欠陥探査を行ったので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験に用いた供試体および測定方法

実験に用いた供試体の状況を図-1 に示す。供試体寸法は 900mm×300mm×厚さ 199.5mm である。表面から約 150mm 付近の供試体側面をφ10mm のミストドリルにより穿孔し、模擬的な欠陥を、寸法を徐々に広げ作成した。

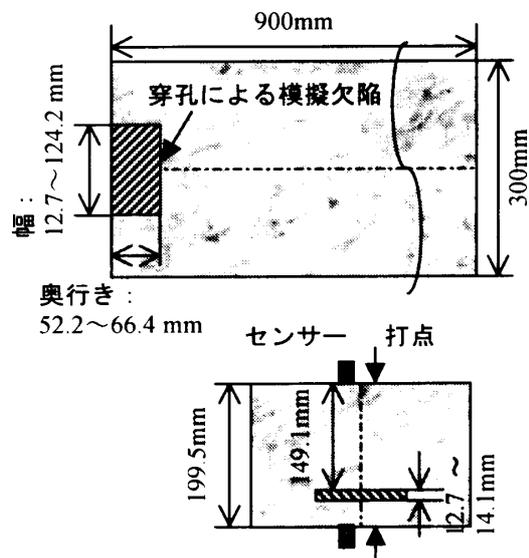


図-1 供試体状況 平面図(上図)と正面図(下図)

測定は穿孔前の健全な段階と、欠陥幅 12.7mm から 124.2mm までの 9 段階の計 10 段階で、欠陥部表面までの厚さが約 150mm となる供試体表面からと、欠陥部表面までの厚さが約 40mm となる供試体底面の 2 面から行った。

各測定段階での欠陥状況を表-1 に、健全な段階および欠陥幅 12.7mm と欠陥幅 124.2mm での状況を写真-1 に示す。

測定は、供試体側面から奥行き約 30mm の測定面に加速度計 (PCB 社製: 測定振動数 25kHz) を手で押し付け、測定点から約 20mm の位置を

*1 伊藤建設(株)技術研究所技術開発グループ 主任研究員 (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

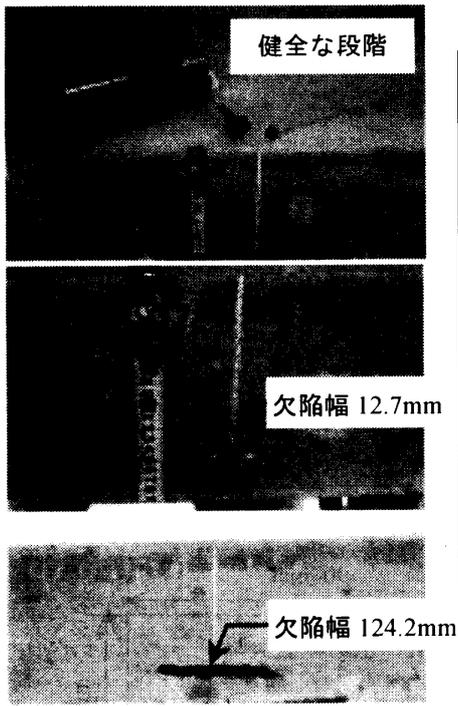


写真-1 各段階での供試体状況

鋼球で打撃し、サンプリングクロック 10μ秒、データ数 1024 個で測定波形を記録する。なお、記録した測定波形をに対し、2.2 に示す振動数解析を行うが、加速度計が受信できる範囲の強さで打撃すれば、振動数解析結果は打撃強さに影響されない。また、打撃する鋼球直径によって入力振動の振動数成分は変化するが、この実験では、厚さ約 200mm での縦弾性波の多重反射による振動数を測定できる、直径 10mm(4g)と 15mm(14g)の鋼球を用いた。

2.2 解析方法

測定した時間軸上の速度波形に対し、MEM (最大エントロピー法) 解析により振動数スペクトルを求め、測定したコンクリートの応答振動のスペクトル解析を行う。AR 係数の項数は 40 である。MEM 解析は、自己回帰モデルによって自己相関関数を推定するという手法を用いており、縦弾性波の多重反射に起因する周期性を抽出することができる。また、少ないデータ数であってもスペクトルの分解能が高いことから、少ない回数での多重反射しか観測できない厚さ 1m 以上のような厚い構造物や、多重反射の成分が弱い微細な欠陥においても、それらの

表-1 供試体内欠陥状況

測定段階	欠陥部寸法(mm)			表面から欠陥部表面 (mm)	欠陥部底面から底面 (mm)	表面から底面 (健全部厚さ) (mm)
	幅	奥行き	厚さ			
A	無欠陥					
B	12.7	52.2	12.7	149.1	37.7	199.5
C	19.5	52.2	14.1	149.1	36.3	
D	32.2	62.4	14.1	149.1	36.3	
E	45.2	66.2	14.1	149.1	36.3	
F	60.5	66.2	14.1	149.1	36.3	
G	75.0	66.4	14.1	149.1	36.3	
H	91.1	66.4	14.1	149.1	36.3	
I	106.3	66.4	14.1	149.1	36.3	
J	124.2	66.4	14.1	149.1	36.3	

位置で反射する縦弾性波の振動数成分を抽出できるといった長所がある^{2), 3)}。

以上のように求めた振動数スペクトルに対し、振動数が縦弾性波の多重反射によるものであれば、測定厚さ D は

$$D = V_p / (2f) \tag{1}$$

(V_p : 縦弾性波速度, f : 振動数)

により求められる。また、縦弾性波速度 V_p はコンクリートの圧縮強度 f_c と相関係数 0.95 で

$$f_c = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.2} \tag{2}$$

の関係にあることがこれまでの実験で確認されており⁴⁾、式(1)での V_p を 3800m/s と仮定すると、式(2)より、圧縮強度 20~33 N/mm² のコンクリートにおいて、誤差±5%で厚さ D を測定できることとなる。

3. 実験結果

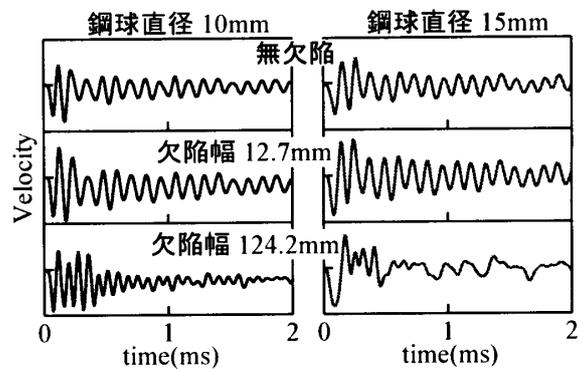


図-2 各鋼球直径、測定段階での測定波形例 表面側 (欠陥までの厚さ約150mm)

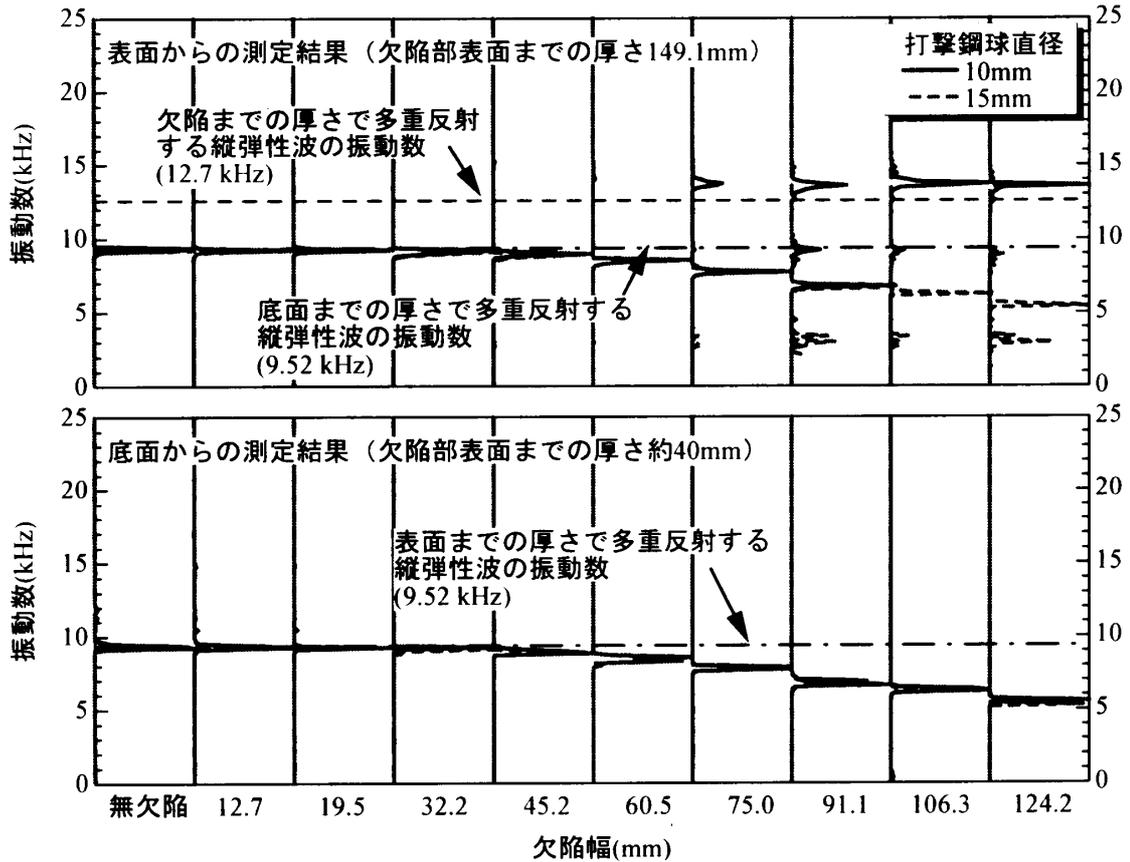


図-3 全解析結果

健全な段階および欠陥幅 12.7mm と欠陥幅 124.2mm での測定波形を図-2 に、各測定段階で得られた解析結果を図-3、表-2 に示す。

測定結果より、欠陥幅 32.2mm までは健全な段階と比較して変化は見られず、強さが最大となる振動数は 9.28kHz 程度で、縦弾性波が速度 3800m/s で、表面から底面までの厚さ (199.5mm) で多重反射したときの振動数 9.52kHz (図-3 一点鎖線) と良く一致している。

欠陥幅が 45.2mm では、強さが最大となる振動数は表面からの測定では 8.98kHz、底面からでは 8.79kHz となり、健全な段階での測定結果および表面から底面までの厚さで多重反射したときの振動数よりも低くなる。その後、表面から測定した鋼球直径 15mm、底面から測定した鋼球直径 10、15mm での測定結果はほぼ一致し、欠陥幅が大きくなるのに対応して、強さが最大となる振動数はより低く変化していった。

一方、表面から鋼球直径 10mm で測定した場

表-2 強さが最大となる弾性波の振動数

欠陥幅 (mm)	表面からの測定(kHz)		底面からの測定(kHz)	
	鋼球10mm	鋼球15mm	鋼球10mm	鋼球15mm
無欠陥	9.38	9.28	9.28	9.28
12.7	9.28	9.28	9.28	9.28
19.5	9.28	9.28	9.28	9.28
32.2	9.28	9.08	9.28	9.08
45.2	8.98	8.98	8.79	8.79
60.5	8.59	8.59	8.59	8.59
75.0	7.71	7.71	7.91	7.71
91.1	6.74	6.74	6.64	6.64
106.3	13.7	6.25	6.25	6.25
124.2	13.6	5.47	5.57	5.57

合では、強さが最大となる振動数は欠陥幅 91.1mm までは他の測定結果とほぼ一致するが、欠陥幅 75.0mm からは、縦弾性波が速度 3800m/s で欠陥までの厚さ (149.1mm) で多重反射したときの振動数 12.7kHz (図-3 破線) とほぼ一致する、13.7kHz 付近の振動数が観測された (図-3 参照)。さらに、欠陥幅が 106.3mm 以上では、この付近の振動数での強さが最大となった。

4. 実験結果考察

4.1 低振動数成分の発生原因について

3. より欠陥幅が 45.2mm より大きくなると、縦弾性波が表面から底面までの厚さ 199.5mm で多重反射したときの振動数より低い振動数が観測された。この原因について検討した。

(1) 欠陥を迂回する縦弾性波の発生

原因の1つとして、欠陥を迂回して表面と底面間を多重反射する縦弾性波が発生したと考えられる。この縦弾性波の模式図を図-4(1)に、各欠陥幅で最短経路で迂回した場合の振動数の計算結果を表-3に示す。表-3より、この弾性波は欠陥幅が長くなると経路が長くなり、振動数は低く変化する。表-2の測定結果と比較すると、欠陥幅 45.2mm、60.5mm では概ね一致し、この縦弾性波が観測されたと考えられる。しかし、欠陥幅 75.0mm 以降では、表-2の測定結果はこの弾性波よりさらに低い振動数となる。

(2) 欠陥部と測定面の間での曲げ振動の発生

測定面から見た表層部付近に欠陥が存在すると、鋼球打撃により欠陥部と測定面の間が撓み、打音法などで利用されている曲げ振動が発生する(図-4(2))。欠陥幅 75.0mm 以降では欠陥を迂回する縦弾性波よりさらに低い振動数が観測されたが、この原因として、欠陥までの厚さが約 40mm である底面からの測定では、曲げ振動による共振が生じたものと考えられる。また、欠陥までの厚さが約 150mm の表面からも同じ振動数が観測されていることから、表面からの鋼球打撃によっても、底面と欠陥間で曲げ振動が発生し、表面側から観測された可能性がある。

(3) 欠陥による弾性率の低下

(1)(2)の他に、欠陥によってコンクリートの弾性率 E が低下し、弾性率 E と式(3)の関係にある縦弾性波速度 V_p が遅くなり、縦弾性波の多重反射による振動数が健全な段階と比較して低くなる場合も考えられる。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

(ρ : 密度, ν : ポアソン比)

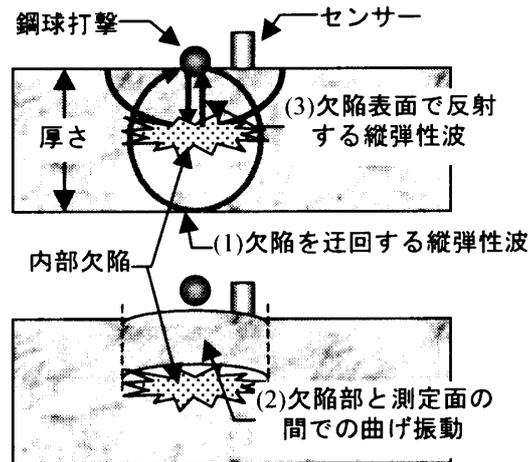


図-4 欠陥部で発生する弾性波模式図

表-3 最短迂回経路での縦弾性波振動数

欠陥幅 (mm)	振動数 (kHz)
12.7	9.49
19.5	9.45
32.2	9.32
45.2	9.15
60.5	8.90
75.0	8.63
91.1	8.32
106.3	8.03
124.2	7.68

4.2 高振動数成分の発生原因について

鋼球直径 10mm での表面からの測定では、欠陥幅 75.0mm 以上で、13.7kHz 付近の振動数が観測された。これから、測定面と欠陥表面で多重反射する縦弾性波が発生し、観測されたと考えられる(図-4(3))。この弾性波が観測できると欠陥までの厚さが探査でき、欠陥探査に有効である。しかし、センサーの測定振動数は 25kHz までのため、縦弾性波速度を 3800m/s とすると、欠陥までの厚さが 76mm 以下では、欠陥までの厚さ約 40mm の裏面からの測定結果の通り、この縦弾性波による振動数は観測できない。また、鋼球直径 15mm では観測されなかったことから、打撃する鋼球直径(入力振動の振動数成分)によっては、4.1に示したような他の弾性波の振動数成分が強く観測され、この縦弾性波は観測されない可能性がある。さらに、欠陥幅 60.5mm までは観測されなかったことから、微細な欠陥では観測されない可能性がある。

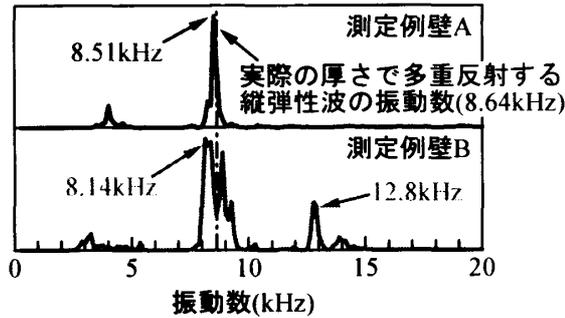
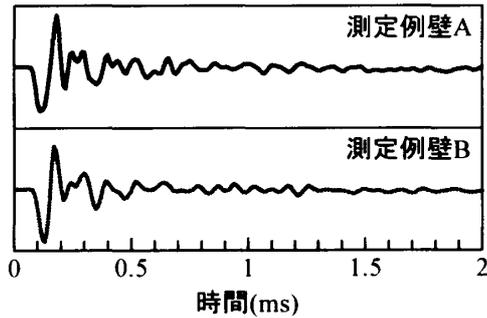


図-5 壁での測定結果例（実際の厚さ220mm）
測定波形（上図）と解析結果（下図）

5. 実構造物での欠陥探査

今回の実験結果から、欠陥探査方法、判定基準を設定し、施工後30年以上経過した建築構造物での壁およびL型柱にて欠陥探査を行った。

5.1 本法による欠陥探査方法、判定基準

(1) 測定物が健全な場合に、実際の厚さでの縦弾性波の多重反射による振動数 f_0 が測定できる直径の鋼球で測定する。

(2) f_0 より高い振動数が観測される測定位置では、観測される振動数に相当する厚さに欠陥が存在していると判断する。

(3) f_0 より低い振動数が観測される測定位置では、打撃する鋼球直径を小さくして（入力振動の振動数成分を高くして）再度測定する。

再測定の結果、 f_0 より高い振動数が観測される場合は、観測される高い振動数に相当する厚さに欠陥が存在していると判断する。

再測定の結果、 f_0 より低い振動数が再度観測される場合では、曲げ振動が発生しており、表面層部に欠陥が存在していると判断する。

5.2 実構造物での欠陥探査結果

図-5 に厚さ220mmの壁、図-6 に厚さ330mmのL型柱（壁、L型柱ともコンクリート

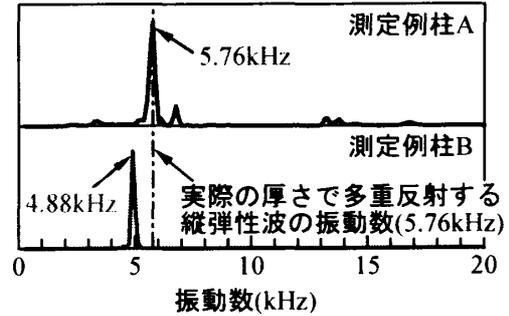
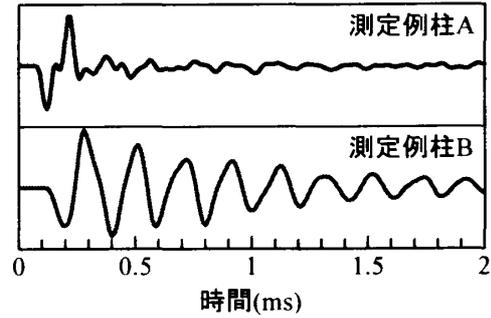


図-6 L型柱での測定結果例（実際の厚さ330mm）
測定波形（上図）と解析結果（下図）

躯体部および両面モルタル部を含めた厚さ)での代表的な測定結果例を示す。測定に用いた鋼球直径は壁で10mm、L型柱では15mmである。また、縦弾性波の速度は3800m/sと仮定した。

(1) 壁

図-5より、測定例壁Aは、実際の厚さ220mmでの縦弾性波の多重反射による振動数8.64kHzと良く一致する振動数8.51kHzが卓越して観測される。式(1)による測定厚さは223mmとなり、健全であると判定できる。一方、測定例壁Bでは、強さが最大となる振動数は8.14kHz（測定厚さ234mm）と低くなった。さらに、振動数12.8kHz（測定厚さ148mm）が同時に観測されたことから、この測定点では内部の148mm付近に欠陥が存在していると判定した。

測定例壁Bを測定した位置で厚さ200mm付近までコアを採取した結果を写真-2に示す。深さ145mm付近に欠陥が存在しており、判定結果とほぼ一致しているといえる。測定例壁Bは、欠陥表面で多重反射する縦弾性波と、欠陥による弾性率の低下で速度が低下した縦弾性波、または、欠陥を迂回した縦弾性波が観測された結果と考えられる。

(2)L型柱

図-6より測定例柱Aは、実際の厚さ330mmでの縦弾性波の多重反射による振動数5.76kHzが卓越して観測され、健全であると判定できる。一方、測定例柱Bは振動数4.88kHz（測定厚さ389mm）が卓越して観測された。また、直径10mmの鋼球で再測定したが、同様の結果となった。さらに、図-5, 6の各測定波形を比較すると、測定例柱Bでの減衰の程度は明らかに他の測定波形と異なる。これから、この測定点では縦弾性波ではなく、曲げ振動が発生しており、表層部に欠陥が存在していると判定した。

測定例柱Bを測定した位置でコアを採取した結果を写真-3に示す。その結果、打撃面側のモルタル部において、コンクリート躯体と接している面でクラックが発生し、コンクリート躯体からモルタルが剥離しており、判定結果と一致しているといえる。測定例柱Bは、この剥離部近傍の測定面を鋼球で打撃したことにより、曲げ振動が観測された結果と考えられる。

6. まとめ

衝撃弾性波法によるコンクリート内部の欠陥探査を目的として、供試体側面に模擬的な欠陥を作成し、測定結果がどのように変化するかを実験した。その結果、幅45.2mm以上の欠陥がコンクリート内部に存在すると、(1)欠陥部と打撃面の間での曲げ振動が発生する。(2)底面で反射する縦弾性波の経路が欠陥を迂回して長くなる。(3)コンクリートの弾性率が低下し、縦弾性波の速度が低下する。これらの現象によって健全な場合に観測される縦弾性波の振動数より低い振動数が観測されることが確認できた。また、欠陥幅が大きく、打撃面と欠陥表面までの厚さが一定以上であれば、適当な直径の鋼球で測定することによって欠陥表面で反射する縦弾性波が発生し、観測されることが確認できた。

以上から設定した欠陥判定基準により、施工後30年以上経過した建築構造物で欠陥探査を行った。その結果、厚さ145mm付近に存在す



写真-2 測定例壁Bでのコア採取結果

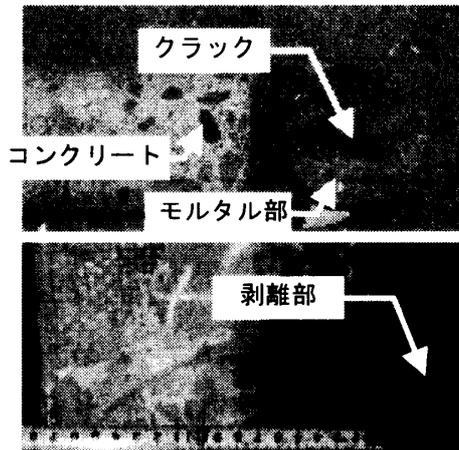


写真-3 測定例柱Bでのコア採取結果

る内部欠陥と、部材表層部の欠陥であるモルタル部の剥離を探查することができた。

今後は、健全部までの厚さ、欠陥位置、欠陥寸法、欠陥の種類が異なる供試体を製作して実験を行い、欠陥判定基準をより正確なものに改善していく予定である。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭, 森濱和正: 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, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001.6
- 2) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1992
- 3) 極檀邦夫, 関根浩次, 岩野聡史: 衝撃弾性波法によるコンクリート板の欠陥探査, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.698-699, 2001.3
- 4) 岩野聡史ほか: 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23 弾性波法によるコンクリート強度の推定, 日本非破壊検査協会平成13年秋季大会講演概要集, pp.111-114, 2001.10