

論文 走査 SIBIE 法によるひび割れ深さ評価の実用化

渡海 雅信*1・大久保 太郎*2・中居 陽子*3・大津 政康*4

要旨: コンクリートの表面ひび割れの深さは構造物の健全性を評価する上で大きな役割を持っている。現在、ひび割れ深さ評価には超音波法が多用されているが、ひび割れ界面接触やひび割れ近傍に鉄筋が存在する場合などへの適用性の問題が知られている。筆者らは、インパクトエコー法を利用し弾性波の反射の影響を画像化し内部欠陥の位置を評価する SIBIE 法を開発中である。そこで、走査 SIBIE 法をひび割れ深さ評価に適用し超音波法との比較を試みた。その結果、走査 SIBIE 法はひび割れ界面接触および鉄筋の影響を受けずひび割れ深さを評価できることが明らかとなった。

キーワード: ひび割れ深さ, 弾性波法, インパクトエコー法, SIBIE

1. はじめに

コンクリート表面に存在するひび割れは深さによって耐久性への取り組みは異なる。したがって、正確に同定するための手法を開発することは緊急の課題といえる。

この理由は、表面ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に問題を生じさせる種類のものである。場合には、ひび割れは早急な補修が必要であるからである。補修を施工する前提として対象となるひび割れの深さを同定しなければならない。

ところで、ひび割れ深さの同定は古くから研究されている分野であり、超音波法¹⁾が多用されている。しかし、ひび割れ深さ同定のための超音波法にはいくつかの制約があり信頼性に乏しいとされ、点検に利用されながら、実務では他の手法による検証や確認のためのコアリングなどが実務では実施されている。これを改善するために、本研究ではインパクトエコー法を用いた2次元画像を作成するSIBIE法(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact Echo)を改良した走査SIBIE法を開発を目的とし、実用化への研究を行った。

2. ひびわれ深さ測定法の原理

2.1 超音波法(T_c - T_o 法)¹⁾

図-1 に示すように、縦発振子および受振子をひび割れ開口部と中心にして等間隔 $L/2$ で設置したときのひび割れ先端部を回折してきた超音波の伝播時間 T_c と、ひび割れない部分での発振子から受振子までの距離 L での伝播時間 T_o より式(1)でひび割れ深さを求める方法である。

$$d = \frac{L}{2\sqrt{(T_c/T_o)^2 - 1}} \quad (1)$$

そして、超音波法は鉄筋近傍で使用する場合、鉄筋での弾性波の反射の影響を大きく受けるため注意が必要である。そして、式(2)の値 ds と推定値 d が $ds > d$ の関係であれば鉄筋の影響はないと評価できるとされている²⁾。

$$ds = \sqrt{Ls^2 + Lc^2} \quad (2)$$

ここで Lc : 鉄筋のかぶり, Ls : 探触子と鉄筋の水平距離

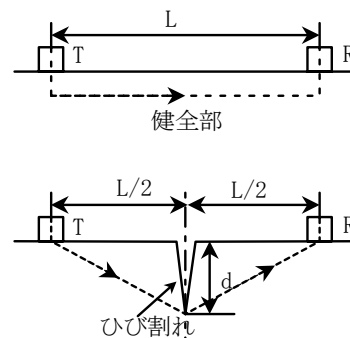


図-1 T_c - T_o 法

2.2 弾性波法

(1) インパクトエコー法(Impact-Echo)³⁾

インパクトエコー法は、弾性的な衝撃力により入力された弾性波を利用する非破壊検査手法の一つである⁵⁾。このインパクトエコー法の概念を表面ひび割れに適用すれば、部材底部からの反射及びひび割れ底からの回折による共振周波数により得られる周波数スペクトルは、P波の伝播速度を C_p とすると、板厚による周波数 f_T 、ひび割れによる周波数 f_{crack} が出現する。それらは、式(3)、

*1 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 助教 工博 (正会員)

*2 熊本大学 大学院自然科学研究科 博士前期課程 (非会員)

*3 西日本高速道路株式会社 工修 (非会員)

*4 熊本大学 大学院自然科学研究科 教授 工博 (正会員)

式(4)のように表される。図-2にその概要を示す。

$$f_t = C_p / 2T \quad (3)$$

$$f_{crack} = C_p / 2d \quad (4)$$

$$f_{steel} = C_p / 4d \quad (5)$$

ここで、T：供試体の板厚、d：ひび割れ深さまでの距離

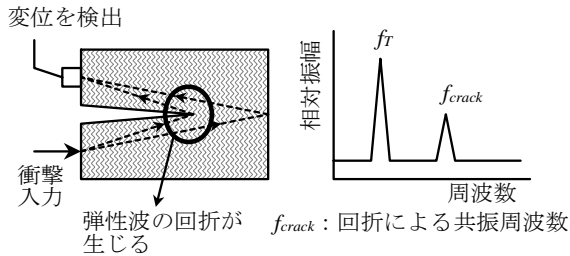


図-2 インパクトエコー法

(2) SIBIE法⁴⁾

インパクトエコー法の測定では、ピーク周波数のみによる欠陥位置の判断は困難な場合も多く、定量的な測定ができるとは言いがたい。

一方で、周波数スペクトルには欠陥位置での反射の情報が含まれているのは確かである。そこで、インパクトエコー法で得られた周波数スペクトルを用い供試体断面での弾性波の反射位置を画像化する処理法であるSIBIE法を開発中である。SIBIE法の手順を説明する。

1. 計測を行ったコンクリート断面を正方形要素に分割しモデル化する。例を図-3に示す。
2. 分割された各要素の中心からの弾性波の反射による共振周波数を式(7)、(8)より求める。その際、弾性波は入力点から要素中心、出力点といった伝播経路を通り、その最短伝播経路Rが式(6)で求まる。なお、式(7)、(8)は式(3)、(4)に式(6)を代入することで求まる。

$$R = 2d = r_1 + r_2 \quad (6)$$

$$f_R = C_p / R \quad (7)$$

$$f'_R = C_p / (R/2) \quad (8)$$

3. 各要素で2種類の共振周波数が求まっており、一要素での各共振周波数に対応する相対振幅値を足し合せた値を要素の値とする。各要素でこの計算を行い図化したものが計測対象断面の2次元画像となる。

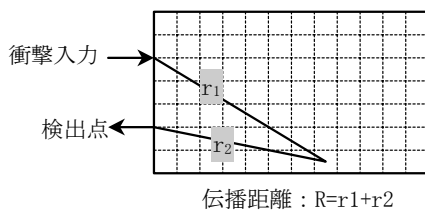


図-3 弾性波の最短伝播経路の計算例

(3) 走査SIBIE法

インパクトエコー法での周波数スペクトルの情報量を増やすため、図-4のように計測対象の断面を数枚に分割し各々の分割面でインパクトエコー法をおこなう。断面を分割することで、分割面の直下の振動が検出でき、不要な箇所の弾性波の反射を除外できる。また、健全部→ひび割れ部→健全部の流れで計測をおこなうので、健全部とひび割れ部での計測データあるいは周波数スペクトルの違いを顕著に観測することもできる。そして、各分割面で得られた周波数スペクトルにSIBIE法を適用し2次元画像を並べれば検査断面の2次元画像が完成する。走査SIBIE法の手順を説明する。

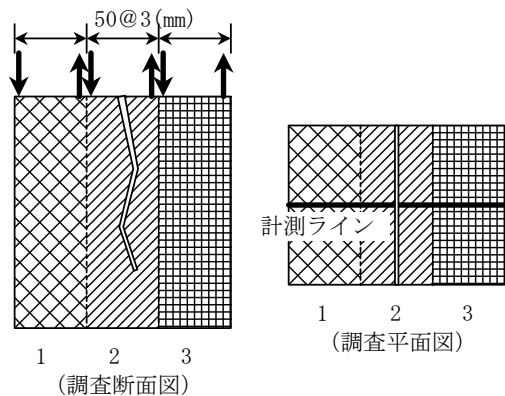


図-4 走査SIBIE法の概要図

1. 計測対象の断面を任意の幅に分割する。分割幅は3~5cmを目安にしている。また、ひび割れはジグザグ状に成長している場合が多いので、図-4の断面2のようにひび割れのジグザグ幅が分割面に収まるようにしている。
2. 各分割面でインパクトエコー法をおこない、周波数スペクトルを導き出す。図-4の矢印で下向きは衝撃入力、上向きは検出のことである。ひび割れを含んだ分割面の計測データは健全部のものと比較して、振幅が非常に小さくなっているので、そのままの状態ではFFTしてしまうと、周波数スペクトルの相対振幅値に大きな差が出てしまい、2次元画像上で正確な比較をすることができない。そこで、正確な比較をするために、各分割面での計測データの最大振幅値が1となるように変換し周波数スペクトルを求めることとした。
3. 各分割面に対する周波数スペクトルを用いてSIBIE法の解析をおこない2次元画像を作成する。そして、3分割であれば3枚の2次元画像を並べ1枚の計測断面の2次元画像を作成する。

3. 試験概要

3.1 試験項目

鉄筋コンクリート梁の曲げ試験で曲げひび割れを発生させた供試体を用いて超音波法によるひび割れ深さ評価を行った。そして、走査的にインパクトエコーを実施し走査 SIBIE 法を適用した。

3.2 試験供試体

実験供試体として 2000mm×150mm×250mm の鉄筋コンクリートを製作し、載荷試験によりひび割れを発生させた。載荷試験は、支点間距離 1800mm、載荷点間距離 1000mm で実施した。供試体の配合および 28 日養生後の力学特性を表-1, 2 に示す。なお、スランプ値は 6cm、空気量は 6.0%とした。

そして、梁供試体への載荷試験の結果、梁の数箇所にひび割れが発生した。そのひび割れの中から表-3 に示す、3 パターンのひび割れを選び超音波試験およびインパクトエコーを行った。なお、深さ d は目視による表面観測の概要値である。



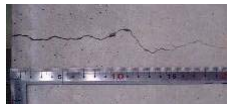
表-1 コンクリート配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
20	55	42	175	318	717	1178

表-2 コンクリートの力学特性

圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	ポアソン比
29.7	28.2	0.20

表-3 ひび割れの特徴

	形状	形状 (特徴)	深さ d (mm)
パターン1		真直ぐに伸びている	180
パターン2		ジグザグ	200
パターン3		真直ぐ伸び、途中より波状	200

3.3 試験法概要

(1) 超音波法

超音波探触子として共振周波数が 60kHz 共振型 AE センサを使用した。実験ではファンクションジェネレータより 10V-60kHz のパルス波を供試体に入力した。そして、

コンクリート表面の変位を検出し、その波形より初動波の伝播時間を求めた。探触子間隔 L は 150mm, 170mm, 190mm で行った。なお、計測位置から側面方向に 38mm、深さ 47.5mm の箇所に 2 本の軸方向鉄筋がある。式(2)より、 $d_s=60.5\text{mm}$ となり $d_s < d$ となり、これらの鉄筋はひび割れ深さ計測に影響のある位置に存在している。

(2) インパクトエコー法および走査 SIBIE 法

衝撃力入力には高周波数の弾性波を発生できるアルミ飛翔体を使用し(図-5)、空気圧約 0.05MPa で発射させ弾性波を入力した。アルミ飛翔体は 50kHz 程度まで含む弾性波を発生させることが可能であることが確認されている。

供試体表面にひび割れがある場合はひび割れを中心とし、左右等間隔の位置で弾性波を発生させた。表面変位は加速度計(小野測器社製 NP-3211、共振周波数: 約 50kHz)により受振し、受振波形を FFT することで周波数スペクトルを求めた。波形のデジタルデータの個数は 2048 個とし、サンプリングタイムは 4μsec を採用した。走査型インパクトエコーの計測間隔は 50mm で行った。計測箇所の概要は図-6 に示し、断面分割については図-4 を参考にす。鉄筋の影響を検討するために、計測ラインは 3 箇所を設けた。なお、パターン 2 のみ計測ライン b および c で試験を行った。

そして、インパクトエコーで得られた周波数スペクトルに SIBIE 解析を適用し SIBIE 画像(2次元画像)を作成した。

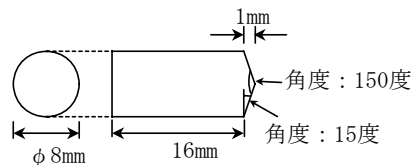


図-5 アルミ飛翔体

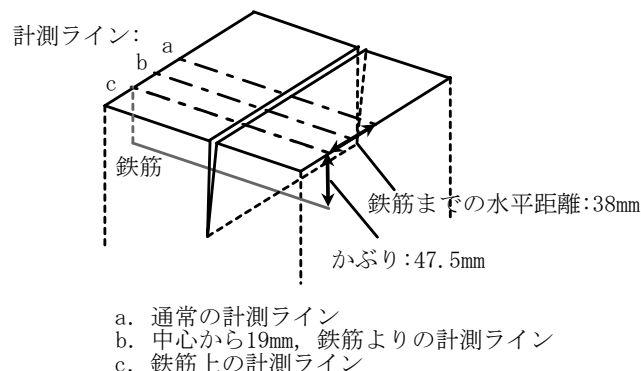


図-6 計測箇所の概要

4. 結果および考察

4.1 超音波法での結果

超音波試験で得られた各ひび割れの結果を表-4(a)

～(c)に示し、波形はパターン1のみを図-7に示す。

パターン1～3のひび割れ深さの平均値はそれぞれ $d = 117.4\text{mm}$, 77.5mm , 92.1mm となった。目視のひび割れ深さ(表-3)は $180\text{mm} \sim 200\text{mm}$ であるので、全てのパターンにおいて浅く評価していることがわかる。パターン1では 34.8% 、パターン2では 61.3% 、パターン3では 54.0% 浅く評価している。これらの結果を検討すると、鉄筋の影響によりひび割れ深さがかなり浅く算定されたと考えられる。

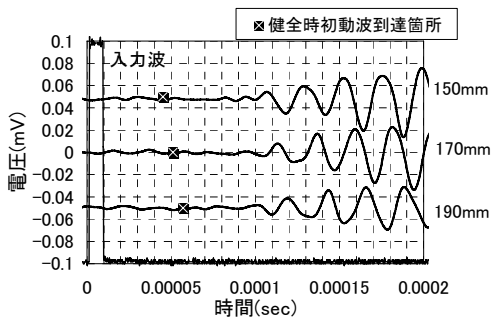


図-7 超音波法で得られた波形(パターン1)

表-4 梁供試体での超音波法で得られたデータ

(a) パターン1のひび割れ

探触子間 距離 L	健全全部での 伝播時間 T_0	ひび割れ部での 伝播時間 T_c	ひび割 れ深さ d
150mm	$45 \mu \text{ sec}$	$92.5 \mu \text{ sec}$	122.1mm
170mm	$51 \mu \text{ sec}$	$103 \mu \text{ sec}$	119.3mm
190mm	$57 \mu \text{ sec}$	$108.9 \mu \text{ sec}$	110.7mm
(表-3 : $d=180\text{mm}$)			平均 117.4mm

(b) パターン2のひび割れ

探触子間 距離 L	健全全部での 伝播時間 T_0	ひび割れ部での 伝播時間 T_c	ひび割 れ深さ d
150mm	$45 \mu \text{ sec}$	$65.5 \mu \text{ sec}$	82.5mm
170mm	$51 \mu \text{ sec}$	$70.0 \mu \text{ sec}$	73.3mm
190mm	$57 \mu \text{ sec}$	$80.0 \mu \text{ sec}$	76.8mm
(表-3 : $d=200\text{mm}$)			平均 77.5mm

(c) パターン3のひび割れ

探触子間 距離 L	健全全部での 伝播時間 T_0	ひび割れ部での 伝播時間 T_c	ひび割 れ深さ d
150mm	$45 \mu \text{ sec}$	$72.4 \mu \text{ sec}$	98.2mm
170mm	$51 \mu \text{ sec}$	$79 \mu \text{ sec}$	92.1mm
190mm	$57 \mu \text{ sec}$	$84.8 \mu \text{ sec}$	85.9mm
(表-3 : $d=200\text{mm}$)			平均 92.1mm

4.2 インパクトエコー法および走査 SIBIE 法

(1) 鉄筋の影響の少ない箇所での試験結果

鉄筋の影響が最も少ないと考えられる箇所(計測ライン a)での結果を図-8に示す。図-8には梁供試体の検査断面の走査 SIBIE 法による SIBIE 画像および用いた周波数スペクトルを示す。図-8(a)～(c)はそれぞれパターン1～3の SIBIE 画像であり、周波数スペクトルは各分割面で得られたスペクトルを重ねて表示している。スペクトルの断面 b はひび割れを含んだ分割面でのスペクトルであり、その他のラインは健全全部でのスペクトルである。SIBIE 画像は黒色になるほど、弾性波の反射が強いことを表わしており、白色→薄灰色→濃灰色→黒色と変化する。SIBIE 画像中の黒ラインは実際のひび割れを表わす。以後、同様である。

まず、各パターンの周波数スペクトルをみると、ひび割れを含んだ分割面でのスペクトルは健全全部のものに比べ、スペクトルピークの現れ方が顕著に異なっておりひび割れの有無で周波数スペクトルの形が大きく変わることが理解できる。また、多くのスペクトルピークが現れており、ひび割れ部を含む分割面では振幅の大きな振動が多数発生していることが分かる。

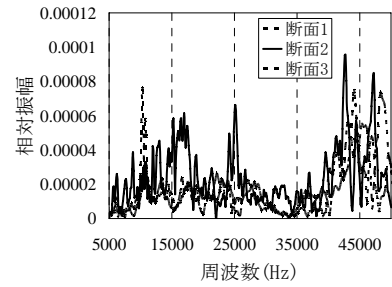
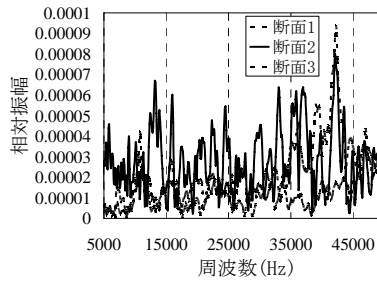
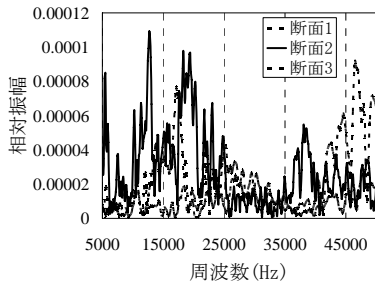
次に、各パターンの SIBIE 画像をみると、ひび割れが存在する箇所では弾性波の反射が顕著に現れていることが分かる。ひび割れ深さは、黒色の領域を基に判断するとパターン1が 170mm 、パターン2が 200mm 、パターン3が 200mm と推定された。

パターン1では 10mm の誤差が生じている。もともと、濃いグレー色の領域がひび割れ先端部付近に拡がっておりひび割れ深さは $180\text{mm} \sim 200\text{mm}$ との判断も可能であるので正確に評価できている。そして、パターン2およびパターン3では正確にひび割れ深さを推定できている。そして、パターン3では曲りの大きい箇所での強い反射源が存在しているが、ひび割れ先端部の反射より強い場合は、画像状でこの反射を打ち消してしまう可能性がある。パターン2では、深さ 100mm 付近に反射の強い領域が存在する。パターン2の周波数スペクトルは他のスペクトルと異なり、 $25\text{kHz} \sim 35\text{kHz}$ のピークの相対振幅値の凸凹が少ない形状となっており、これが基で現れたものである。界面の接触など何らかの作用での結果だと考えられる。

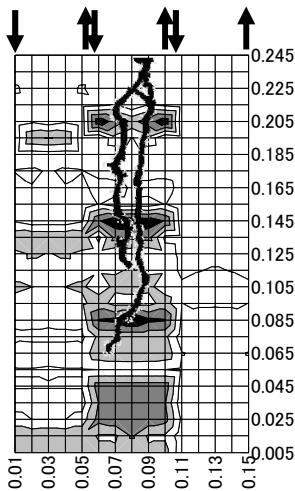
(2) 鉄筋の影響を考慮した箇所での試験結果

供試体には図-7に示すように軸方向鉄筋が配筋されている。そこで、計測ラインを b および c とし試験をおこない走査 SIBIE 法にどのような影響があるか検討をした。計測ライン b は計測ライン a から鉄筋側に 19mm ずらした位置であり、計測ライン c は鉄筋上である。これらの位置設定は、超音波法の場合ならば影響を必ず受け

【周波数スペクトル】

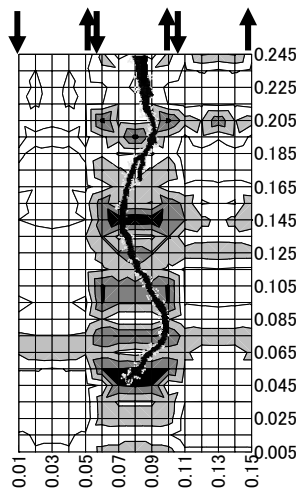


【SIBIE 画像】



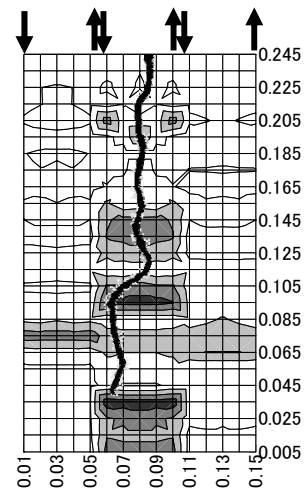
推定ひび割れ深さ：170mm
目視のひび割れ深さ：180mm

(a) パターン 1



推定ひび割れ深さ：200mm
目視のひび割れ深さ：200mm

(b) パターン 2



推定ひび割れ深さ：200mm
目視のひび割れ深さ：200mm

(c) パターン 3

図-8 各パターン の SIBIE 画像

る箇所であることを考慮して決定した。なお、検査対象はパターン2のひび割れを使用した。

計測ライン a より 19mm 鉄筋側と鉄筋上でインパクトエコーの試験結果を図-9 に示す。図-9 には SIBIE 画像および用いた周波数スペクトルを示す。SIBIE 画像中の点線は鉄筋を現わしている。

式(5)より鉄筋による理論的共振周波数は 16kHz～22kHz と算出される。各スペクトルをみると、16kHz～22kHz の区間にはいくつかのスペクトルピークが存在する。しかし、ピークが多く存在しており、どのピークが鉄筋の影響によるピークか断定することはできない。よって、スペクトルピークのみで鉄筋位置を判断するのは困難である。

次に、SIBIE 画像について考察する。鉄筋から 19mm の計測および鉄筋上での計測での推定ひび割れ深さは実際の深さとほぼ一致しており、ひび割れ計測への鉄筋の影響は見受けられない。そして、(b)の鉄筋上の SIBIE 画像では鉄筋位置で反射の強さでは濃灰色の領域が拡

がっていることがわかる。これは鉄筋からの弾性波の反射を現わしており、SIBIE 法で鉄筋位置の確認が可能であることが分かる。

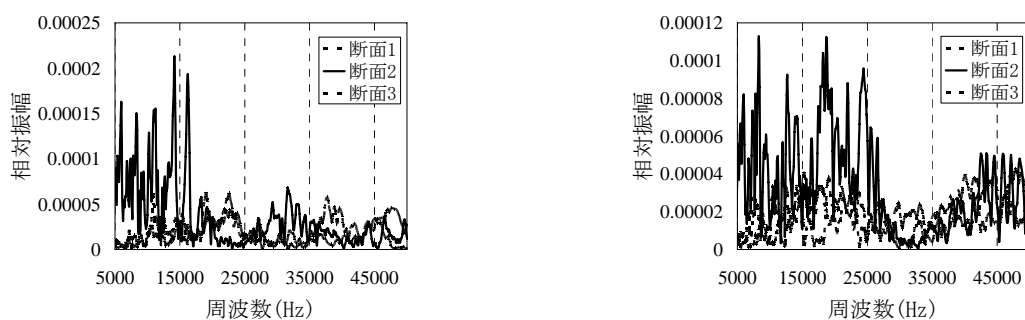
なお、超音波法のようにひび割れ深さ計測に鉄筋の影響が現れない理由として、周波数領域のデータを利用していることが挙げられる。なぜなら、超音波法は弾性波の伝播時間がメインファクターでありコンクリートと異なる鉄筋が大きな障害となるが、周波数領域で判断することは構造物全体の振動を対象とするのであり、鉄筋の影響よりもひび割れ部で起こる共振現象がより顕著に現れるからである。

したがって、走査 SIBIE 法を鉄筋コンクリート構造に適用する場合、超音波法のように鉄筋位置を考慮することなく適用することが可能であることが分かった。

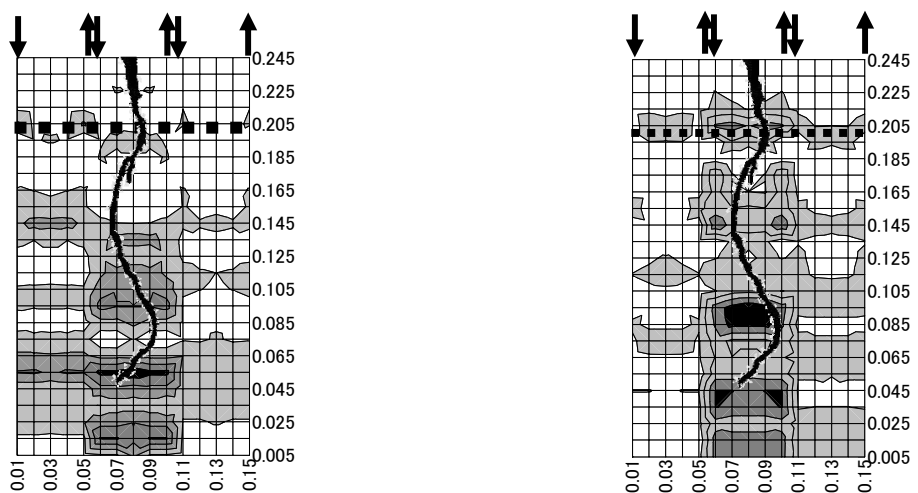
5 まとめ

梁供試体に曲げを及ぼすことにより、曲げひび割れを発生させ、超音波法(T_c-T₀法)および走査SIBIE法により

【周波数スペクトル】



【SIBIE 画像】



推定ひび割れ深さ：200mm

鉄筋のかぶり：47.5mm

目視のひび割れ深さ：200mm

(a) 中心から 19mm 鉄筋側 (計測ライン b)

推定ひび割れ深さ：190mm

鉄筋のかぶり：47.5mm

目視のひび割れ深さ：200mm

(b) 鉄筋上 (計測ライン c)

図-9 SIBIE 画像 (パターン 2)

ひび割れ深さを測定し両手法の結果について考察した。まとめを以下に示す。

(1) 超音波法によるひび割れ深さ計測では全パターンで実際のひび割れ深さより極端に浅く評価された。最大で約 130mm の誤差が生じた。計測対象の全体形状が関係するとも考えられるが、今回のようにひび割れ深さよりも浅い位置に鉄筋が存在する場合、鉄筋からの弾性波の反射を顕著に捉える超音波法ではひび割れ深さの計測には不向きであることが確認できた。

(2) 調査断面を3分割し走査的にインパクトエコーを行い、SIBIE 画像を作成する走査 SIBIE 法を提案しひび割れ深さを測定した。その結果、健全部と欠陥部での周波数スペクトルの差異が顕著に現れることが明らかになった。そして、SIBIE 画像においても欠陥がある分割面では弾性波の反射が顕著に現れた。ひび割れ深さは実際の深さとほぼ一致する結果となり有用性が確認できた。

(3) SIBIE 法では鉄筋の有無に関わらず精度の良い結果を導き出すことができることが明らかとなった。鉄筋が存在する場合、ひび割れ深さ以外に鉄筋位置も確認できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 建産協規格集：コンクリートの非破壊検査方法・超音波によるコンクリートの表面ひび割れ深さ測定方法，社団法人日本建材産業協会，pp.27-46，2003
- 2) 大津政康：弾性波法によるコンクリートのひび割れ深さ評価，検査技術第5巻第3号，2000
- 3) Mary J. Sansalone, and William B. Streett: Impact-echo, Ithaca, N.Y., Bullbrier Press, 1997
- 4) 渡海雅信，大津政康：SIBIE によるひび割れ深さ評価の実用化，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, pp.613-618, 2007