

# 論文 衝撃弾性波法を用いた鋼-コンクリート合成構造の鋼板下面の空隙の検出

西岡 啓介<sup>\*1</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>・伊達 重之<sup>\*3</sup>・橋本 親典<sup>\*4</sup>

**要旨:** 鋼-コンクリート合成構造において、鋼板とコンクリート界面における空隙が問題となっている。そこで、本研究ではモデル供試体を用いて衝撃弾性波法により鋼板とコンクリート界面の空隙の検出実験を行った。本実験では、既知の空隙部と健全部において計測波形の特徴について比較検討した後、その結果を基にして各供試体に設置した空隙の検出実験を行った。その結果、入力と出力の振幅値の比などの波形パラメータを用いることで、空隙の検出が可能であることが明らかとなった。

**キーワード:** 鋼-コンクリート合成構造, 衝撃弾性波法, たわみ共振

## 1. はじめに

近年建造物の耐震化をはじめ軽量化や薄肉化などが進められており、橋梁において鋼-コンクリート合成構造が多く使用されている。しかし、施工時におけるコンクリートの未充填により鋼板とコンクリート界面において空隙が生じるケースがある。供用後にその空隙が原因となり鋼板のたわみや振動が発生して、舗装面に悪影響を与える等の問題が指摘されている。

そこで目視では確認の出来ない空隙を検出するために、弾性波を利用した非破壊検査手法の一つである衝撃弾性波法<sup>1)</sup>を用いて鋼板とコンクリートの界面における空隙の検出実験を行った。衝撃弾性波法は、試験対象物表面にハンマなどの衝撃を与えて発生した弾性波を表面に設置したセンサで受信し得られた弾性波情報より内部欠陥やコンクリートの性状を評価する手法である。衝撃弾性波法は利用する弾性波の種類や伝播特性、測定形態に様々なバリエーションがあり、幅広い試験対象物の種類や試験目的に適用可能である。

本実験では、空隙を有する鋼-コンクリート供試体を作製し、既知の空隙部と健全部において波形分析を行い両者の違いを定量的に示した後、その結果を用いて各供試体に設置した空隙箇所の検出実験を行った。

## 2. 内部欠陥と振動の関係について

建造物の欠陥の種類には、ひび割れや剥離、浮き、空隙など様々である。それらの欠陥において、コンクリート表面をハンマなどによって衝撃を与えると、縦波共振<sup>2)</sup>とたわみ共振<sup>2)</sup>の二つの共振現象が発生するといわれている。剥離や空隙のような欠陥がコンクリート内部に存在すると表面と欠陥部位で構成される板状構造が形

成される。すると、その部位ではたわみ剛性が低下し、たわみ振動が発生しやすくなるため、外部から衝撃を与えると欠陥部位の構造に応じて共振が発生するというわけである。これら二つの共振現象は欠陥サイズや欠陥深さの相関によって変化することが知られている。<sup>3)</sup> 図-1にその模式図を示す。

一般的にたわみ共振は対象物の厚みが薄く、欠陥が浅く広くなるほど波の振動のエネルギーは大きくなる。つまり欠陥のある場所においては波の減衰が遅く振幅が継続的な動きを示すが、健全な場所においては波の減衰が早いということである。周波数スペクトルのピーク周波数については一般的に低くなるといわれており、その提案されている基本周波数の式を以下に示す<sup>2)</sup>。

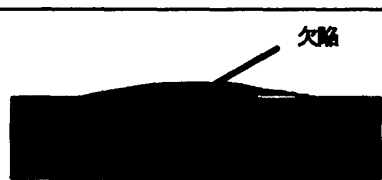

振動現象	原理
たわみ共振	浅い位置に広がる板状欠陥がゆげ方向に振動する
	
縦波共振	深い位置に広がる板状欠陥などに対して入力した縦波が伸縮共振する
	

図-1 たわみ共振と縦波共振<sup>2)</sup>

\*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース (正会員)

\*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 博士(工学) (正会員)

\*3 石川島建機工業 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 工博 (正会員)

$$f_{\min} = \frac{h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} R_{\min}^2 \quad (1)$$

ここで、境界面までの距離を  $h$ 、欠陥サイズを  $a$ 、コンクリートの弾性係数を  $E$ 、密度を  $\rho$ 、ポアソン比を  $\sigma$ 、 $R_{\min}$  を振動モードの固有値とする。しかし、基本周波数については確立されておらず、議論が続いている<sup>3)</sup>。一方、縦波共振は欠陥構造と垂直に縦波が伸縮共振する現象であり、対象物がある程度の厚みがあり、欠陥が深い場所において卓越するといわれている。縦波共振の基本周波数は、板厚を  $d$ 、縦波の弾性波伝播速度を  $v$  とすると、以下の式で表される。

$$f = \frac{v}{2d} \quad (2)$$

なお、たわみ共振は縦波共振と比べて大きなエネルギーを保有しているために、たわみ共振による内部欠陥検出では S/N 比が大きい測定が可能である。

本研究においては、部材厚の小さい構造物について表層部の欠陥の検出実験を行っているために、現象としては、たわみ共振が卓越するのではないかと考えられる。しかし、予備試験を実施した際の周波数分析では、スペクトルのピーク周波数のみで空隙を判断することが容易ではなかった。そこでここでは波形の特徴に着目し、検討を行った。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用供試体について

実験に使用した供試体の概要を表-1 に、その一例を図-2 に示す。供試体寸法は  $400 \times 800 \times 80\text{mm}$  を 4 体と

$500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 80\text{mm}$  を 2 体の計 6 体を使用した。それぞれ鋼板の厚さや欠陥の位置が異なっている。欠陥の大きさは一辺が、 $50\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ 、 $150\text{mm}$  の 3 種類の正方形とし、欠陥深さは全て  $10\text{mm}$  となっている。空隙箇所には施工時に、コンクリートと音響インピーダンスの異なるアクリル板のボックスを鋼板に設置してその上からコンクリートを打設した。

#### 3.2 実験方法について

空隙部と健全部、その境界付近において、センサとハンマの位置を移動させながら計測を行った。表-2 および図-3 にその計測の概要を示す。なおこの実験に用いた供試体は、A、B、F の 3 供試体とした。その後、その計測結果から得られたデータを基に各供試体について空隙の検出実験を行った。その際、 $400\text{mm} \times 800\text{mm}$  の供試体を  $80\text{mm}$  四方の正方形に、 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$  の供試体を  $70\text{mm}$  四方の正方形に区切り各マス中央に加速度

表-1 供試体概要

寸法(mm)	供試体名	鋼板厚(mm)	空隙の大きさ
400×800×80	A	5.5	100×100
			50×50
			150×150
500×500×80	B	7.4	150×150
	C	7.1	100×100
400×800×80	D	6.0	100×100
			50×50
	E	5.6	50×50
			100×100
	F	5.9	50×50
			100×100
			150×150

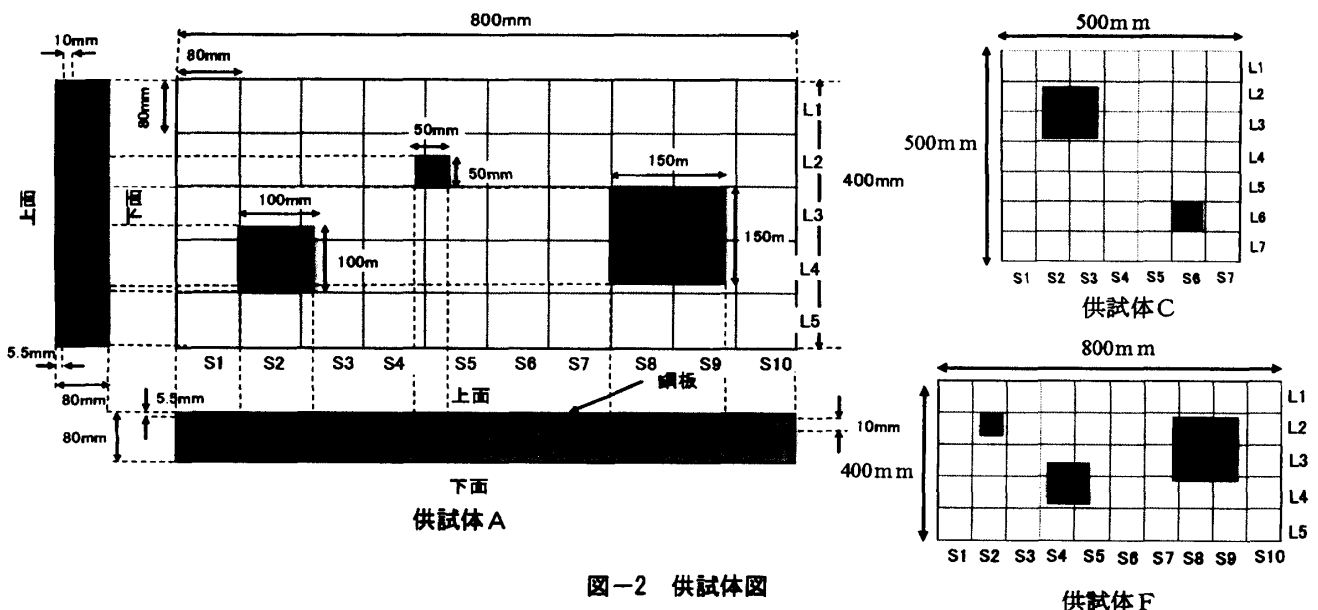


図-2 供試体図

表-2 空隙と健全部の境界実験

計測位置	欠陥に対するセンサとハンマの位置	
	センサ	ハンマ
a	欠陥の中心	欠陥の中心
b	aと空隙端部の中心	aと空隙端部の中心
c	空隙端部	空隙端部
d	健全端部	健全端部
e	空隙端部	健全端部
f	健全端部	空隙端部

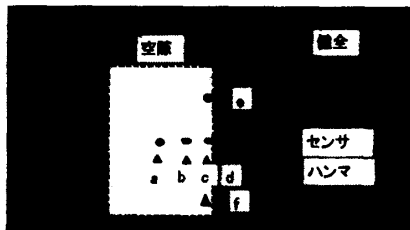


図-3 空隙部と健全部の境界付近の計測位置

センサを設置し、その横約2cmの位置をハンマで叩きながら各マスに対して波形の計測を行った。

なお、今回は入力について計測を行い、その衝撃力の入力により供試体表面のセンサにより検出された波形を正規化するために、0.15Hz~100kHzを周波数領域とする加速度計を内蔵したハンマを用いた。また、加速度センサの共振周波数75kHzのものを使用し、計測条件は $\Delta t=9.766 \times 10^{-6}(s)$ とした。

4. 実験結果と考察

4.1 境界条件の違いによる計測結果

一例として供試体Aの空隙 100mm×100mm の計測位置の違いによる波形を図-4 に示す。グラフから空隙の中心部においては振幅が大きく、収束する時間も長くなっているが、センサを空隙の端部に移動していくにつれて振幅が小さく、収束も早くなっている。また、a の波形では周期が長く、dやeでは周期が短いことより、欠陥の中心部から端部、健全部へ移動していくにつれ周期が短くなることが確認された。なお、これらの効果は他の供試体についても同様に確認された。そこで、波の特性を数値的に示すために、「入力と出力の最大振幅値の比(出力/入力)」と「エネルギー(波形の面積)」、「継続時間(振幅値がしきい値をこえなくなるまでの時間)」の3つのパラメータを用いて解析を行った。尚、エネルギーと継続時間については波形の最大振幅値を1とした相対振幅より算出した値を示す。一例としてFの供試体の100mm空隙における計測位置別の、最大振幅値比、エネルギー、継続時間の関係を図-5 に示す。継続時間のしきい値は最大振幅値の30%とした。図-5においてaからdへ計測位置を移動させていくと最大振幅値比は

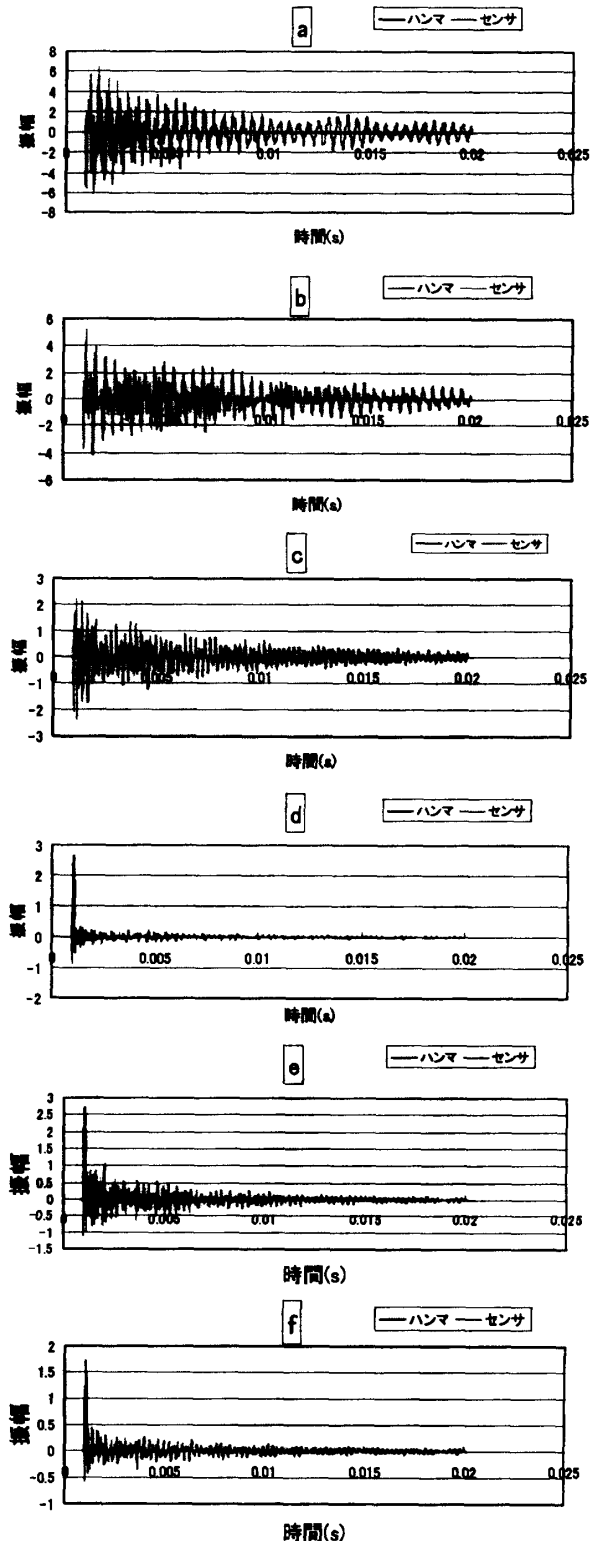


図-4 計測位置の違いによる波形の変化

減少しており、空隙部(a,b)は健全部の値の20倍以上の値を示し、空隙部と健全部の境界付近(c,d,e,f)の値も健全部の2倍以上の値を示しており、空隙部と健全部の違いがはっきりと分かる。他の供試体の空隙についても健全部と空隙部では10倍以上、その境界付近でも1.5倍~3倍の値となっている。一方、エネルギーは空隙部(a,b)が健全部の3.5倍以上、境界付近では1.5倍~2.5倍の値

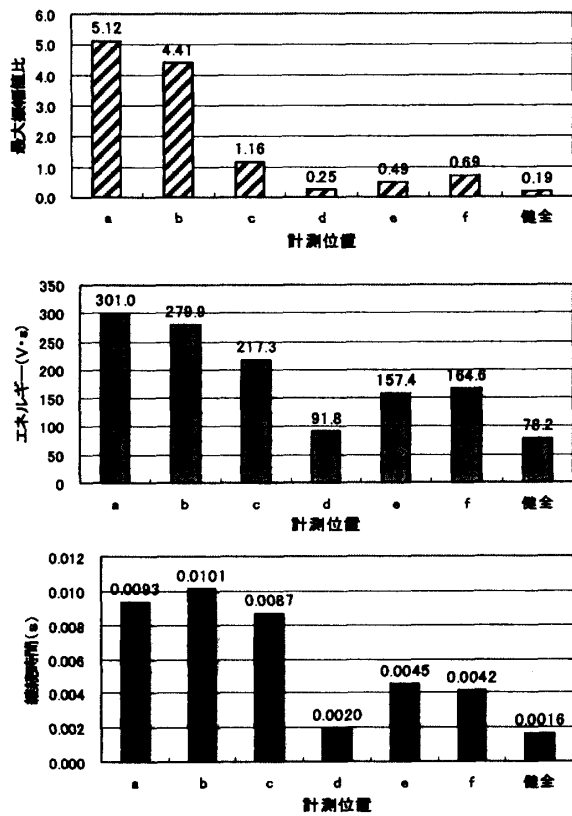


図-5 空隙（供試体 F 100mm×100mm）の最大振幅値比、エネルギー、継続時間の計測位置の違いによる結果

を示しており、空隙部の中心付近の検出は可能であるが、境界付近は困難である可能性がある。また、AやFの50mmの空隙においては、空隙部や境界部分の値が健全部とほぼ同じ値であったり、わずかな違いしかなかったために、検出が難しいと考えられる。継続時間においては、a,b では健全部の5倍以上の値を示し、境界付近では2倍～4倍の値となったが、エネルギー同様、50mmの空隙においては健全部と空隙部の値が近く検出は困難であることが予想される。以上の結果から、空隙部(a,b,c)の検出において各パラメータのしきい値を設定した。各しきい値は、最大振幅値比を0.5、エネルギーを100(V·s)、継続時間を0.002(s)とした。

4.2 各供試体における空隙検出実験

各パラメータを用いて、4.1で設定したしきい値を基に各供試体に設置した空隙の検出実験を行った。図-6に一例として供試体A, C, Fの計測結果を示した。なお、図の平面の縦軸のL1~L7、横軸のS1~S10は図-2中の軸と対応している。また、図中の山の部分は、各パラメータが大きいことを示しており、空隙部である可能性が高いことを示している。図より、最大振幅値比では、各供試体において各供試体の空隙位置とパラメータの大きな箇所が一致しており、空隙部の検出が明確に行えている。空隙部の検出が明確に行えることができるとわかる。Cの供試体以外は空隙の径が大きいと相対的に最

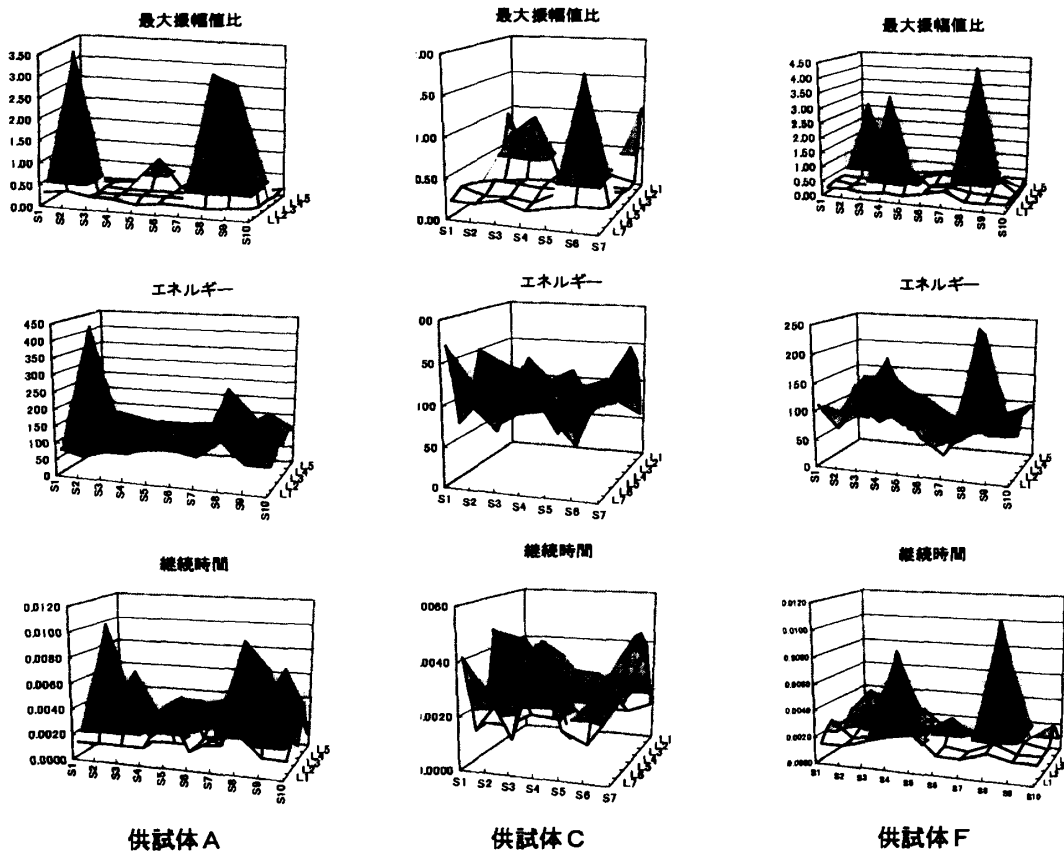


図-6 供試体 A, C, F の各パラメータ別のマッピング

大振幅値比も大きな値となっており空隙が小さいとその値も小さくなっており、0.5のしきい値でうまく空隙の検出が来ている。エネルギーでは、Aの供試体やFの供試体において一辺が100mmと150mmの空隙部では大きな値を示すが、一辺が50mmの空隙においては検出できなかった。また、しきい値100で識別すると空隙以外の部分も多く該当し、検出が困難であった。Cの供試体についても同様に空隙部だけの検出は不可能であり、空隙のない端部において大きな値を示す場所もあった。継続時間で判別した場合はさらに検出が難しく、空隙部以外でも多くの箇所で大振幅値を示し、0.002のしきい値においては空隙の判定は困難である。また、Aの供試体とFの供試体の結果は各パラメータのグラフの概形がよく似ている。両者は寸法が等しく鋼板厚さの違いもわずかで、設置した空隙径も同じであり、このことから実験の再現性についても検討できると考えられる。

本実験から各供試体において共通して、エネルギーや継続時間でのみ空隙部を検出することは難しい場合があり、他のパラメータと併用して用いる必要があることが分かる。この原因として、エネルギーと継続時間はセンサで受信した波形の相対振幅での値を表しているため、健全部と空隙部における波形の違いが分かりにくく

なつたと考えられる。また、これらのパラメータは供試体の端部において大きな値を示す傾向があり、端部の計測結果は他の部分よりも信用度が低い可能性がある。

#### 4.3 パラメータの組み合わせについての検討

図-7、図-8、図-9は供試体A、C、Fにおける3つのパラメータの関係を示した。△は空隙直上、×は空隙と健全部の境界付近、◇は健全部における計測データを示したものである。先ほど示したしきい値で設定したしきい値を下回る領域(健全部)としきい値を上回る領域(空隙部)、その他の領域(グレー領域)で線引きを行い区分けを行った。なお、横軸には最大振幅値およびエネルギーをとり、縦軸にはエネルギーおよび継続時間をそれぞれとった。図-7や図-9では、最大振幅値の比では空隙直上のデータは2.0以上の値を示し明確に検出が可能である。継続時間とエネルギーを軸にとったグラフにおいては、上記で示したように境界付近のデータが計測されなかったり、健全部の値が空隙と判定されたりする場合がありますが、空隙直上のデータは共に大きな値を示しており空隙がうまく検出されており、出力データのみでも空隙の有無は判定可能である。一方、図-8においても最大振幅値の比では空隙の検出

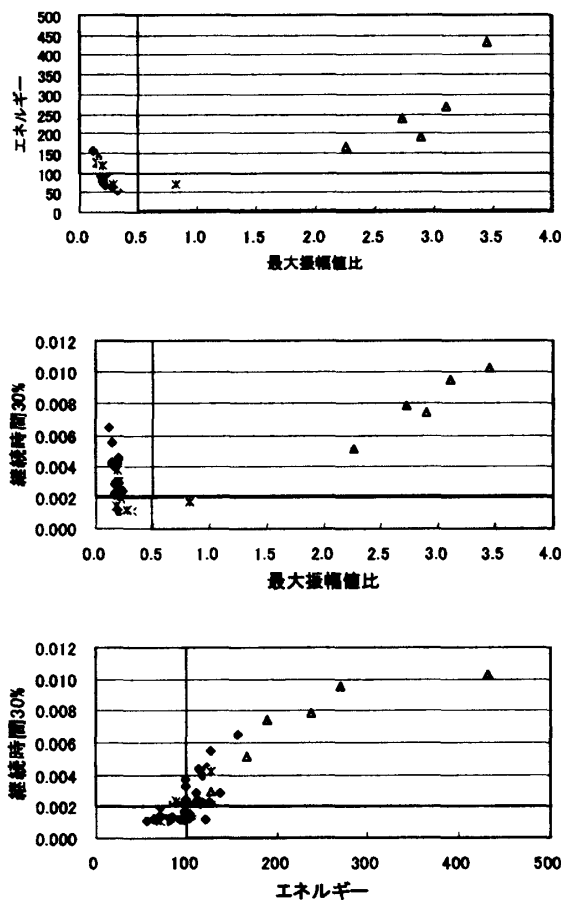


図-7 供試体Aのパラメータ別の計測結果の分布

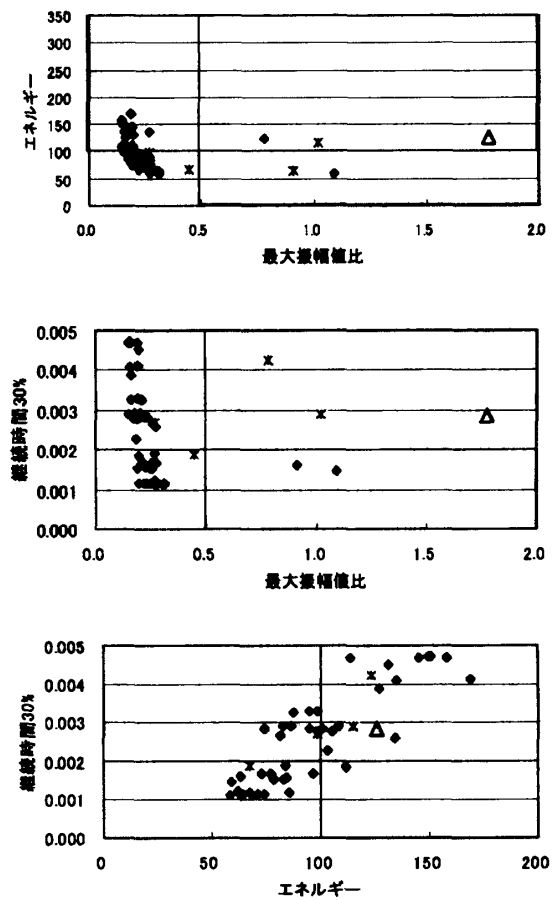


図-8 供試体Cのパラメータ別の計測結果の分布

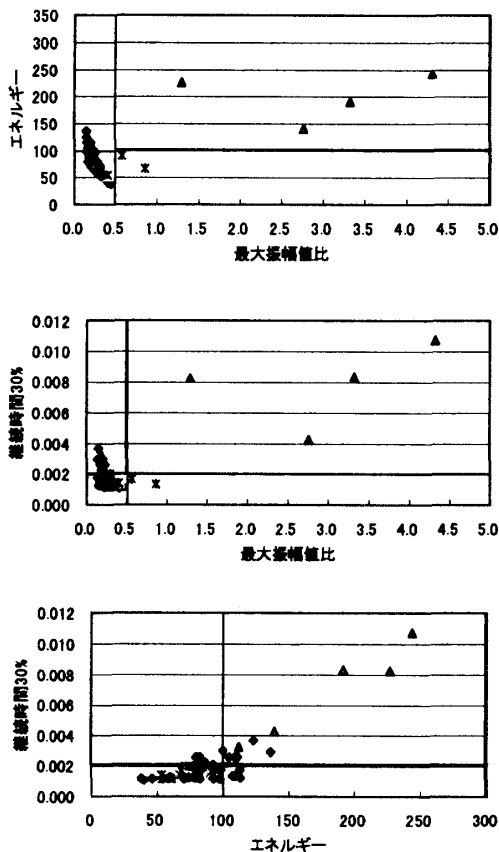


図-9 供試体Fのパラメータ別の計測結果の分布

がうまく行われているが、エネルギーと継続時間を軸としたグラフでは、赤い部分において健全部や境界付近のデータも空隙直上のデータと混在しており、空隙が健全と評価されることはないものの、健全部との混在があり、空隙のみ判断することがこのデータのみでは困難である。原因として鋼板厚さが他の供試体よりも厚いCの供試体は、鋼板のたわみ振動の振動が小さくなり出力センサだけでは空隙の検出が難しくなるからと考えられる。

以上の結果から、入力と出力の最大振幅値の比が空隙検出には有効なパラメータと判断できるが、波の入力と出力の両方を必ず計測しなければならないという制約を受ける。一方、検出波形から取り出した出力から得られるパラメータ（エネルギー、継続時間）を使用する場合は、鋼板厚さが薄い場合有効である。ただし、これらの簡易的なパラメータを用いた実験では、空隙を検出出来ているが、健全部も空隙と判定してしまうケースが多く、現時点では詳細な検査への適用には課題が残る。鋼板が厚くなる場合、本実験条件では6mm以上の場合においては、健全部を空隙と誤診断する可能性がある。ただし、鋼板の厚さと空隙の広がりとの比が影響すると考えられ、鋼板が厚い場合でも、空隙の大きさが大きい場合は検出が可能であると考えられる。

また、空隙位置を明確に知った上でその直上や周辺を

計測する場合と空隙位置を分からずにランダムに計測を行う場合では、衝撃力の入力点および検出点の設置と空隙の位置関係が一定にならずに差が生じるため、一つのパラメータではなく複数のパラメータを用いて検討することで、より確実に空隙の診断が可能となる。また、本実験で示したしきい値は、本供試体および計測条件での値である。実現場に置いては、空隙が予め既知の箇所では正規化できれば、その検出精度は向上する。それらが難しい場合でも、相対的に明らかに他の箇所の数倍の大きな値を示す箇所がある場合は空隙の可能性が高く、複数のパラメータで判断することにより、検出を実施できると期待している。

本実験では空隙の最小径を既知の状態では計測を行ったために計測間隔を70mmと80mmに設定した。計測間隔をさらに小さくすると検出精度は向上すると思われるが、実際の現場適用時は空隙箇所も空隙径も未知の状態であり、作業の効率化を考えると一概に計測間隔を小さくすればいいというわけではない。検出すべき欠陥の大きさや対象物の種類や大きさによって適切な判断をすることが、作業の効率や計測精度に繋がってくる。

## 5. まとめ

- 1) 計測場所を変化させた実験において、最大振幅値を用いた計測では空隙径が異なっても明確に空隙の有無を区別することが可能であるが、エネルギーや継続時間を用いた計測では空隙中心付近の検出は可能であるが、空隙径が小さく境界付近での検出は困難である。
- 2) 各供試体の空隙検出実験では、エネルギーや継続時間を用いたパラメータでは空隙径が小さかったり、鋼板厚さが厚いと検出されないことがあり、健全部でも空隙の疑いがあると判定してしまう場合があったが、鋼板厚さが薄いと空隙検出は可能である。実際に空隙の検出を行う場合は一つのパラメータだけでなく複数のパラメータを用いて総合的に判断する必要がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズNo61，p.124，2004.8
- 2) 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズNo61，pp.48-49，2004.8
- 3) 服部 晋：可聴周波数帯域の周波数応答を用いた内部欠陥検出方法，弾性波法の非破壊検査小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズNo73，pp.205-212，2007.2