

論文 コンクリートの欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎的研究

中山 慎也^{*1}・玉井 宏樹^{*2}・坂田 力^{*3}

要旨：予防保全型維持管理の概念に基づき、本研究では、非破壊検査法の一つである打音法に着目し、打音のみでコンクリート構造物の欠陥状態を判別可能なシステムを構築することを最終目標とし、その基礎的段階として、欠陥の有無や欠陥状態を判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎的検討を実施した。具体的には、人工欠陥を模擬した供試体を用いた打撃試験を実施した。その結果、得られた打撃音を分析し、欠陥状態ごとに整理することで、提案した特徴量パラメータの感度を確認し、特徴量関数に取り込むべき特徴量パラメータに関する有用なデータを得ることができた。

キーワード：打音法、維持管理、非破壊検査、特徴量

1. はじめに

近年、予防保全型維持管理の概念に基づき、老朽化した既設構造物に対して、適切に維持・補修管理を実施し、ライフサイクルコストの低減を図ることが重要視されている。コンクリート構造物においても、トンネル覆工の剥離や橋脚や床版の表面剥離に代表されるように、経年劣化の要因により使用性や安全性が低下しているケースが多々見受けられ、定期的に検査を行い耐久性の評価を行う必要性が高まっている。そのような背景の下、様々な非破壊検査法が提案されてきたが、超音波探傷法、レーザー法や熱赤外線影像法などの従来の非破壊検査法の多くは、計測機器が高額であるだけでなく、計測環境に対する適用条件が厳しく、実験室等の理想的な条件下でなければ効力を発揮しにくいなどの問題を有している。そのため、橋梁等の実構造物の点検業務では、目視や打音による検査が主体となっている。しかし、目視や打音による検査にも、検査結果に理論的裏づけがなされておらず、検査者の熟練度により検査結果が異なるなどの欠点を有している。本研究では、打音を用いた欠陥状態判別システムの構築を最終的な目標とし、簡易な非破壊検査法の一つである打音法に着目した。

打音法に関する既往の研究を概観してみると、伊東ら¹⁾、²⁾はコンクリート表面を打撃することで得られる打撃音と表面振動との相関性を明らかにし、ひび割れなどによる構造物の剛性低下は打撃音の低周波成分の増加と強い相関があることを確認している。浅野ら³⁾は供試体実験を実施し、打撃音の振幅特性や減衰特性が健全部と欠陥部で異なることを示している。また、中山・園田ら⁴⁾はハンマから得られる単発打音ではなく、連続打音を発

生可能な回転式打音検査器を用いた新たな方法を開発し、その有用性に関して研究を実施している。この他にも打音法に関する既往の研究は多く存在するが、打音のみを用いた欠陥判別システムの構築に至った研究はほとんど存在しない。その理由は、内部欠陥の有無に関係なく、コンクリート母材を打撃した際に得られる打撃音の理論的解明がなされていないことや、コンクリートの多種多様な欠陥状態を判別可能な特徴量を提案できていないことなどが挙げられる。

上述の背景を踏まえて、本研究では、打音のみでコンクリート構造物の欠陥状態を判別可能なシステムを構築することを最終目標とし、その基礎的段階として、欠陥の有無や欠陥状態を判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎的検討を実施した。具体的には、まず、母材であるコンクリートの打音特性の把握を目的に、コンクリート版供試体を用いた打撃試験を実施し、コンクリート強度や打撃位置による打音特性の違いに関する考察を行った。次に、その結果を踏まえて、人工欠陥を模擬した供試体を用いた実験を実施し、得られた打撃音を分析し、欠陥状態ごとに整理することで、提案した特徴量パラメータの感度を確認し、特徴量関数に取り込む特徴量パラメータを決定した。

2. コンクリートの打音特性における基礎的考察

2.1 打撃位置の変化における打音特性

(1) 実験概要

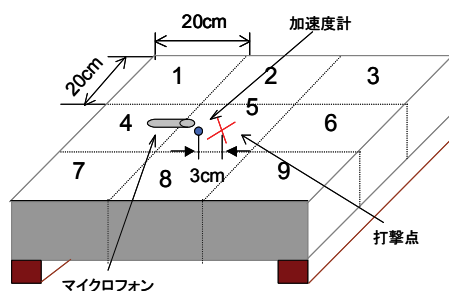
本実験は表-1の配合における60×60×10cmのモルタル版供試体を対象とし、供試体表面を9等分した領域を打撃面と設定し、図-1に示すように番号を振る。打撃

*1 福岡大学 社会デザイン工学科構造力学研究室 研究生 (正会員)
 *2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 助教 (正会員)
 *3 福岡大学 社会デザイン工学科構造力学研究室 准教授 (非会員)

ハンマはテストハンマとし、打撃点は打撃面中央とする。受信センサとしてマイクロフォン(周波数範囲：20Hz～20kHz)と加速度計(周波数範囲：2Hz～10kHz)、データアナライザとして小野測器のFFTアナライザCF7200を用いて収録をした。計測におけるサンプリング周波数は10kHz、データ数は2500とし、10回打撃したデータの平均を実験結果として採用する。打撃点から水平方向に3cmの位置に加速度計、加速度計の上にマイクロフォンを配置して計測を行った。

表－1 供試体配合表

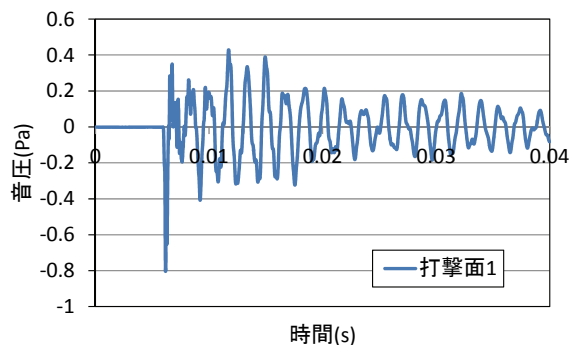
水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
50	165	330	743



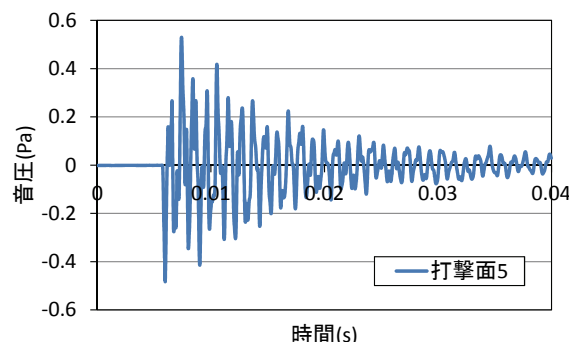
図－1 実験概要図

(2) 実験結果

図－2に打撃面1、図－3に打撃面5の音圧－時間関係を示す。音圧値の最大値から、最大値の1/4の値まで減衰する時間を減衰時間と定義したとき、打撃面1は0.008(s)、打撃面5は0.0015(s)となり、打撃位置の変化によって減衰特性が異なる結果となった。

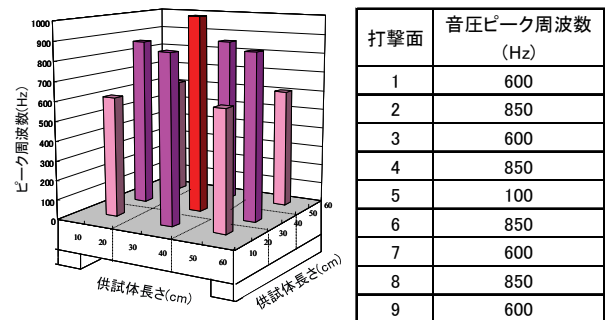


図－2 打撃面1における音圧－時間関係



図－3 打撃面5における音圧－時間関係

また、図－4に各打撃面におけるピーク周波数を示す。図から、ピーク周波数は自由表面の面積に依存していると考えられ、打撃位置の違いは打音特性に与える影響の要因の一つとして考えられるという結果となった。



図－4 各打撃面におけるピーク周波数

2.2 母材の強度の変化における打音特性

(1) 実験概要

本実験は、表－2の配合における60×60×10cmの無筋コンクリート版供試体3体を対象とする。テストピースによる圧縮強度試験によって得られた圧縮強度および静弾性係数は表－3に示すようになる。尚、圧縮強度の大小関係より、3つの供試体を低強度、中強度、高強度と呼称をした。打撃ハンマはテストハンマとし、打撃点は打撃面中央とする。受信センサとしてマイクロフォン(周波数範囲：20Hz～20kHz)と加速度計(周波数範囲：2Hz～10kHz)、データアナライザとして小野測器のFFTアナライザCF7200を用いて収録をした。計測におけるサンプリング周波数は10kHz、データ数は2500とし、10回打撃したデータの平均を実験結果として採用する。打撃点から水平方向に3cmの位置に加速度計、加速度計の上にマイクロフォンを配置して計測をおこなった。

表－2 供試体配合表

	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤(g/m ³)
低強度	75	165	220	781	1120	66.9
中強度	50	165	330	743	1065	83.9
高強度	25	165	660	628	901	99.3

表－3 材料試験結果

	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)
低強度	18.9	26.4
中強度	41.7	35.4
高強度	64.9	37.3

(2) 実験結果

電圧の減衰時間(定義は、実験2.1の場合と同様)においては、低強度では0.0141(s)、中強度では0.0235(s)、高強度では0.0057(s)となり、強度との関係性は見られないと考えられる。電圧のピーク周波数においては、低強度の場合、1050Hz、中強度の場合、1150Hz、高強度の場合、1200Hzとなった。このことから強度が高くなるほどピーク周波数が高くなるという結果を示した。

2.1, 2.2 の結果から考察すると、打撃位置や配合の変化は打音特性の変化の要因の1つになりうる結果となった。このことから、コンクリートの欠陥状態の変化による打音特徴量の抽出を行うためには、同じ条件下で、なおかつ健全な供試体との相対差を考慮しなくてはならないことが確認できた。以上の結果を踏まえて、欠陥状態の変化による打音試験を実施した。

3. 人工欠陥を埋設した供試体を用いた打撃試験

3.1 供試体概要

本実験で用いた供試体の概念図を図-5に示す。実験対象は、10×10×40cmのモルタル角柱供試体とし、供試体中央には人工欠陥として発泡スチロール(10×5cm)を埋設している。発泡スチロールの厚さを欠陥厚さD、供試体表面から発泡スチロール上面までの深さを欠陥深さHと称し、DとHを変化させた供試体を11体、発泡スチロールを埋設していない供試体を1体の計12体を製作した。実験で使用した供試体および強度試験用テストピースの材料の配合を表-5に示す。テストピースの圧縮強度試験より得られた圧縮強度、圧縮強度試験によって得られた応力-ひずみ曲線の傾きより得られた静弾性係数、健全を模した供試体を用いた振動特性試験から得られた動弾性係数を表-6に示す。なお、これらの値は養生期間28日の値を示している。

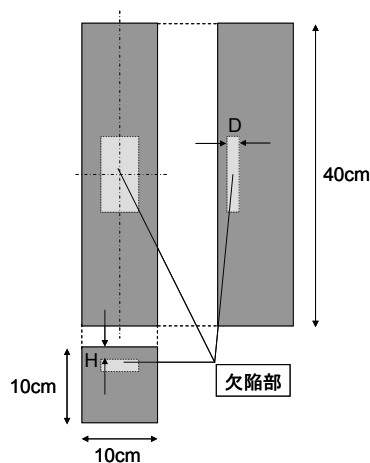


図-5 供試体概念図

表-4 製作供試体一覧

		D(cm)				
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5
H(cm)	なし	○				
	0.5			○		○
	1.0			○		○
	1.5		○	○	○	○
	2.0		○		○	○

表-5 供試体配合表

水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
50	160	320	720

表-6 材料試験結果

	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)
低強度	18.9	26.4
中強度	41.7	35.4
高強度	64.9	37.3

3.2 実験及び計測方法

実験のイメージを写真-1に示す。打撃ハンマはインパルスハンマ(小野測器 GK-3100)とし、打撃点は供試体中央部とする。供試体の支持条件として、供試体両端から5cmの部分にL型断面の金属棒で支持を行い、受信センサとしてマイクロフォン(周波数範囲: 20Hz~20kHz)と加速度計(周波数範囲: 2Hz~10kHz)、データアナライザとして小野測器のFFTアナライザCF7200を用いて収録をした。計測におけるサンプリング周波数は20kHz、データ数は2500とし、5回打撃したデータの平均を実験結果として採用する。打撃点から水平方向に4cmの位置に加速度計、3cmの場所にマイクロフォンを配置し計測を行った。また、本研究では、打撃力によるばらつきを是正するために、インパルスハンマによって得られた入力荷重の最大値を打撃力とし、電圧と加速度のデータを打撃力で除算することによって、単位荷重あたりの値に

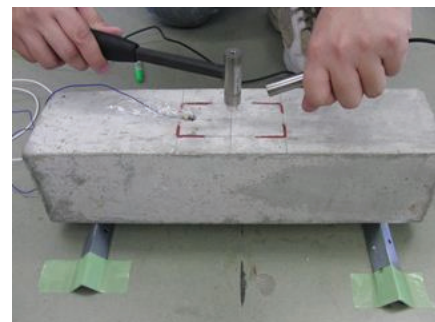


写真-1 実験風景

正規化を行ったデータを実験結果として扱っている。

3.3 着目する特徴量パラメータ

本研究では、打撃試験によって得られた打音と供試体表面加速度の波形を用いて、着目する特徴量パラメータとして下記(1)~(4)を提案した。

(1) ピーク値パラメータ

電圧及び加速度の最大値を w としたとき、ピーク値パラメータ P_w を式(1)の様に定義する。

$$P_w = w_{\text{欠陥}} - w_{\text{健全}} \quad (1)$$

(2) 減衰パラメータ

電圧及び加速度の最大値から10周期後の対数減衰率を σ として、減衰パラメータ P_σ を式(2)の様に定義する。

$$P_\sigma = \sigma_{\text{欠陥}} - \sigma_{\text{健全}} \quad (2)$$

(3) 周波数パラメータ

卓越周波数を f として、周波数パラメータ P_f を式(3)の様に定義する。

表-7 ピーク値パラメータ

電圧		D(cm)				
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5
H(cm)	なし	22.42				
	0.5			698		346
				676		323
	1.0			33.67		47.96
				11.25		25.54
	1.5		31.56	38.52	34.91	41.35
			9.14	16.10	12.49	18.93
	2.0		34.31		33.61	36.79
			11.89		11.20	14.37

加速度		D(cm)				
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5
H(cm)	なし	0.25				
	0.5			29.32		22.94
				29.07		22.69
	1.0			1.72		2.85
				1.47		2.60
	1.5		1.57	1.84	1.46	1.67
			1.32	1.59	1.21	1.43
	2.0		0.67		0.43	0.59
			0.42		0.18	0.34

w
Pw

表-8 減衰パラメータ

電圧		D(cm)					加速度		D(cm)						
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5			なし	1.0	1.5	2.0	2.5		
H(cm)	なし	13.29					H(cm)	なし	7.95						
	0.5			10.61		19.15		0.5			15.55		15.34		
				-2.67		5.89					7.60		7.39		
	1.0			12.56		16.3		1.0			11.80		28.33		
				-0.72		3.01					3.85		20.37		
	1.5		12.79	14.27	11.72	17.35		1.5		16.89	15.99	19.99	17.78		
			-0.49	0.99	-1.56	4.06				8.94	8.04	12.03	9.83		
	2.0		9.96		15.36	22.36		2.0		14.57		9.83	15.33		σ
			-3.33		2.07	-1.93				6.62		1.88	7.38		P σ

$$P_f = f_{\text{欠陥}} - f_{\text{健全}} \quad (3)$$

なお、この際の卓越周波数とは次のように定義した。
電圧及び加速度の周波数特性は、低周波数域(8kHz まで)の範囲が非常に酷似している事が確認できているため、欠陥状態の変化による打音特徴量は高周波数域に集中していると考えられる。本研究では、図-6 に示すように 8kHz から 20kHz における周波数特性に着目し、この範囲におけるピーク周波数を卓越周波数と定義した。

(4) スペクトル値パラメータ

卓越周波数のスペクトル値を s として、卓越周波数パラメータ s を式(4)の様に定義する。

$$P_s = s_{\text{欠陥}} - s_{\text{健全}} \quad (4)$$

3.4 実験結果および考察

(1) 供試体のたわみ振動に関して

パラメータ感度の考察の前に、たわみ振動における供試体全体の振動に関する考察を行う。共振周波数においては、発振器を用いて健全な供試体の第一次共振周波数を計測したところ 2123Hz という結果が得られた。本研究で得られた打音の周波数特性(図-6)を概観すると、いずれも 2000Hz 付近でスペクトル値の増加が確認される。ここから、本研究で用いた寸法の供試体においては、欠陥の存在深さや厚さが、供試体の共鳴振動数に与える影響は極めて小さいと考えられる。

(2) ピーク値パラメータに関して

ピーク値パラメータの結果を表-7に示す。破線上部の値は最大値 w 、下の値は P_w を示している。図中の値が

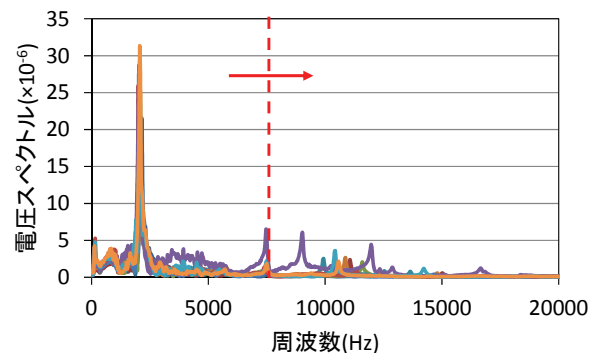


図-6 卓越周波数の定義

表-9 周波数パラメータ

電圧		D(cm)					加速度		D(cm)					
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5			なし	1.0	1.5	2.0	2.5	
H(cm)	なし	8875					H(cm)	なし	10437					
	0.5			8281		8094		0.5			8000		10031	
				-594		-781					-2437		-406	
	1.0			9937		9031		1.0			9906		9000	
				1062		156					-531		-1437	
	1.5		11062	10875	10438	10438		1.5		11062	10843	10406	10406	
2.0			2187	2000	1563	1563	2.0			626	406	-31	-31	
			11594		11344	10563				11594		11313	10562	f
			2719		2469	1688				1157		876	125	Pf

表-10 スペクトル値パラメータ

電圧		D(cm)					加速度		D(cm)					
		なし	1.0	1.5	2.0	2.5			なし	1.0	1.5	2.0	2.5	
H(cm)	なし	0.21					H(cm)	なし	0.001					
	0.5			5.56		14.20		0.5			5.44		9.96	
				5.35		13.99					5.43		9.95	
	1.0			2.34		5.89		1.0			6.61		6.9	
				2.13		5.68					6.6		6.89	
	1.5		2.26	2.55	1.98	3.49		1.5		4.85	5.56	4.67	5.35	
2.0			2.05	2.34	1.77	3.28	2.0			4.84	5.55	4.66	5.34	s
			2.09		1.00	2.06				2.92		1.78	1.47	
			1.88		0.79	1.85				2.91		1.77	1.46	Ps

らも明らかのように、ピーク値パラメータの値は全て正の値となる。ここから、 $P_{\text{欠陥}} < P_{\text{健全}}$ の関係が成り立ち、欠陥の有無の判定に関しては精度が高いと考えられる。次に、欠陥状態の判定の視点から着目をする。D1.0cmに着目をしてHを増加させるとパラメータの値は増加するが、D2.5においては逆にスペクトルの値が減少していることがわかる。これは、Hに着目をした際にも同様の結果なり、このことから欠陥状態の判定の精度は低いことが確認できた。

(3) 減衰パラメータに関して

減衰パラメータの結果を表-7 に示す。破線上部の値は対数減衰率 σ ，下の値は P_o を示している。電圧の減

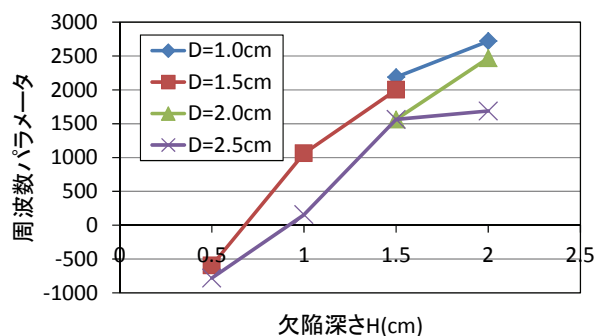


図-7 H の変化における周波数パラメータの推移

衰パラメータには正負が存在するため、欠陥の有無の判定には向かないことがいえる。次に、欠陥状態の判定の視点から考察を行う。このパラメータにおいても、ピーク値パラメータ同様、H や D の変化によって増加するものと減少するものが存在し、欠陥判定をするのは困難である。このことから、減衰パラメータは欠陥の有無の判定、状態の判定の双方において精度が低いことが確認できた。

(4) 周波数パラメータに関して

周波数パラメータの結果を表-8 に示す。破線上部の値は卓越周波数 f ，下の値は P_o を示している。双方の周波数パラメータにも正負が存在するため、欠陥の有無

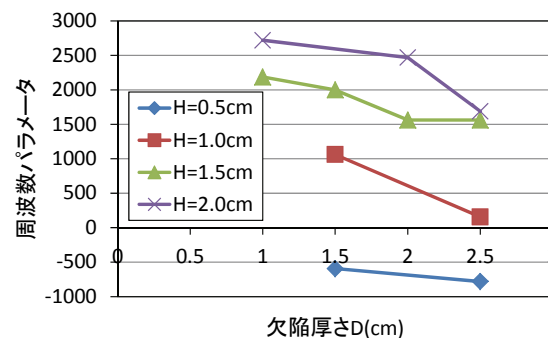


図-8 D の変化における周波数パラメータの推移

の判定には向かないことがいえる。次に、欠陥状態の判定の視点から考察を行う。双方の周波数パラメータにおいても、 D が大きくなるほど増加し、 H が小さくなるほど減少していることがわかる。ここで、電圧の周波数パラメータの値において、 H の変化についてまとめたものを図-7、 D の変化についてまとめたものを図-8に示す。ここから、周波数パラメータは欠陥状態の判定には高い精度があることがいえる。

(5) スペクトル値パラメータに関して

スペクトル値パラメータの結果を表-9に示す。破線上部の値は最大値 S 、下の値は P_s を示している。図中の値からも明らかに、ピーク値パラメータの値は全て正の値となる。ここから、 $P_{\text{欠陥}} < P_{\text{健全}}$ の関係が成り立ち、欠陥の有無の判定に関しては精度が高いと考えられる。次に、欠陥状態の判定の視点から着目をする。双方のパラメータにおいても、 D が大きくなるほどパラメータの値は減少傾向にある。ここで、電圧のスペクトルパラメータの値において、 D の変化についてまとめたものを図-9に示す。このことから、スペクトル値パラメータは欠陥の有無の判定および欠陥深さの判定において、高い精度があることがわかる。

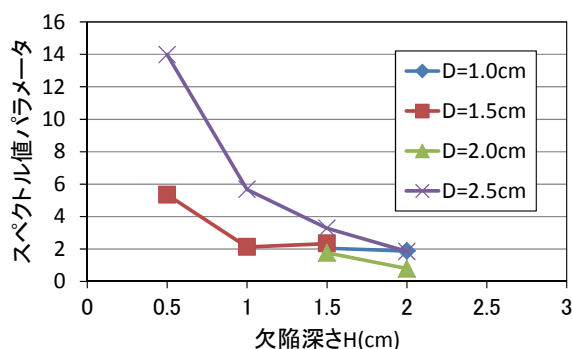


図-9 Dの変化におけるスペクトル値パラメータの推移

(6) ごく浅い位置に存在する欠陥

欠陥深さ $H0.5\text{cm}$ および健全な供試体の電圧の周波数特性を比較したものを図-10に示す。図から、 $H0.5\text{cm}$ の2ケースはピーク周波数が 3000Hz 付近に存在し、共振周波数に大きく影響を与える結果になった。次に、欠陥状態の変化による周波数特性の変化に着目すると、 D が増大するほどピーク周波数が高くなり、スペクトル値が小さくなることが確認できた。しかし、他のケース(図-6)と比較しても明らかな様に、スペクトル値と周波数特性が大きく異なるため、比較は困難であった。以上の結果から、ごく浅い位置に存在する欠陥の打音特性には、別のメカニズムが働いていると考えられる。このことに関しては別途考察が必要であるため、引き続き研究が必要である。

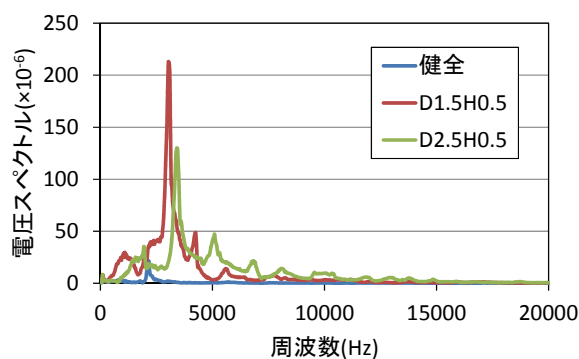


図-10 ごく浅い位置に存在する欠陥について

5. 考察

3.4(2)～(5)より、欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数は P_w 、 P_f 、 P_s のパラメータを用いて提案できると考えられる。しかし、現データでは特徴量関数の立式は困難であったため、さらなる実験や考察の必要がある。

6. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる

- (1) コンクリートの強度や打撃位置の変化は、打音特性の変化の一因となることが確認できた。そのため、コンクリートの欠陥状態を把握するためには、同条する必要がある。
- (2) コンクリートの欠陥状態の変化は、特に高周波数域に影響を与え、今回提案したパラメータを用いることで、欠陥の有無や状態を把握することが可能である。しかし、特徴量関数の立式には至らなかったため、更なる考察の必要性がある。
- (3) 本研究で用いた供試体において、欠陥の厚さや存在深さの変化が供試体の共振振動数に与える影響は小さいことが確認できた。
- (4) ごく浅い位置に欠陥が存在する場合、コンクリート共振振動数や打音特性に大きな変化が見られるため、別途考察が必要である。

参考文献

- 1) 伊東良浩, 魚本健人: コンクリート打撃音の定量的評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集 vol.17, No.1, pp.859-864, 1995
- 2) 伊東良浩, 魚本健人: 鉄筋コンクリートのひび割れが打撃音に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 vol.18, No.2, pp.77-82, 1996
- 3) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打音特性値の定量的関係, コンクリート工学年次論文集 vol.23, No.1, pp.589-594, 2001
- 4) 中山歩, 園田佳巨, 三好茜, 吉田直次: 回転式打音の音圧特性に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集 vol.30, No.3, pp.1729-1734, 2008