論文　PCグラウト充てん度評価のインパクトエコー法に関する波動論的考察

渡辺健[*1]・大津政康[*2]・友田祐一[*3]

要旨：インパクトエコー法は超音波法における定量的な測定として，欠陥調査の有効性が注目を浴びている。しかし，PC グラウト充てん度評価法への適用性についてはまだ確認されておらず，基礎的な検討が必要と考える。そこで，鋼球落下試験と境界要素法(BEM)により波動理論に基づいた考察を行った。その結果，鋼球落下試験によって，シースの空洞によって生じる周波数スペクトルのピークの出現が確認できた。これを解析によっても考察し，グラウト充てん評価での問題点について検討した。

キーワード：インパクトエコー法，PC グラウト，鋼球落下試験，境界要素法，波動理論

1.　はじめに

インパクトエコー法は超音波法における定量的な測定として，欠陥調査の有効性が注目を浴びている[1)]。しかし，PC グラウト充てん度評価法への適用性についてはまだ確立されているとは言えず[2)]，基礎的な検討が必要と考えられる。本研究では，グラウト充てん部および未充てん部のモデル供試体を用いて，超音波法で検出された弾性波を周波数スペクトル分析し，その成分に関する境界要素法(BEM)を用いた解析とあわせて，インパクトエコー法で得られるスペクトルピークを理論的に考察した。これらの結果により，グラウト充てん度評価の可能性と問題点を検討した。

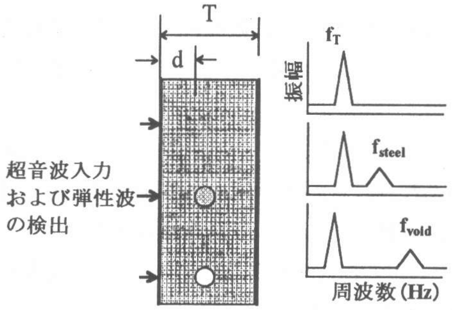
2.　インパクトエコー法

インパクトエコー法[1)]の概念によれば，PC グラウト充てん部で得られる超音波スペクトルについては，以下のような式(1)，式(2)，式(3)で表されるスペクトルピークが出現するとされている。その概要は**図－1**に示されているが，P 波の伝播速度を Cp とすると、板厚によるピーク周波数 f_T，シース管での反射共振周波数 f_{steel}，空隙での反射によるピーク周波数 f_{void} があると考えられている。ただし式(1)，式(3)に見られる係数の意味は現状では明確とは言えない。

$$f_T=0.96Cp/2T \tag{1}$$

$$f_{steal}=Cp/4d \tag{2}$$

$$f_{void}=0.96Cp/2d \tag{3}$$



Cp：P 波の伝播速度
f_T：板厚によるピーク周波数
f_{steel}：シース管によるピーク周波数
f_{void}：未充てんによる空隙のピーク周波数

図－1　超音波スペクトルにおけるグラウト未充てん部検出の原理

本研究では，これについての基礎的な研究として実験と解析の両面から f_T と f_{void} の出現ついて検討を行うことにした。

＊1 熊本大学大学院　自然科学研究科後期課程環境科学専攻（正会員）
＊2 熊本大学教授　工学部環境システム工学科　工博（正会員）
＊3 熊本大学技術官　工学部環境システム工学科

表－1　コンクリートの配合表

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤 (cc)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)
			水 W	ｾﾒﾝﾄ C	細骨材 S	粗骨材 G			
20	50	48	172	344	830	1021	104	3.0	6

インパクトエコー法においては，入力する外力の周波数成分が大きな影響を与える。そこで衝撃の時間関数とその周波数成分の関係をまず考察した。衝撃力の入力関数は正弦波の1/2波長で近似できることが知られている[3)]。したがって，式(4)で与えられる入力関数としての接触時間Tcが衝撃力の周波数成分を決定することになる。

$$Tc=[5.97\{\rho(\delta p+\delta s)\}^{0.4}R]/H^{0.1} \qquad (4)$$

ただし

$$\delta p=[1-\nu p^2]/[\pi Ep]$$

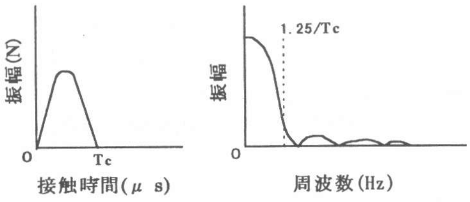
$$\delta s=[1-\nu s^2]/[\pi Es]$$

ρは鋼球の密度(kg/m^3)，Rは鋼球の半径(m)，Hは落下高さ(m)，νp，Epは落下面材料のポアソン比と弾性係数(Pa)で，νs，Esは鋼球のポアソン比と弾性係数(Pa)である。

この場合には，sin関数のスペクトル分析により，**図－2**のように接触時間Tcから入力周波数の上限として

$$f_{max}=1.25/Tc \qquad (5)$$

が導かれる。これより，インパクトあるい鋼球落下により**図－1**の各ピーク周波数を検討するには，f_{max}がそれらより高く設定されている必要のあることが分かる。

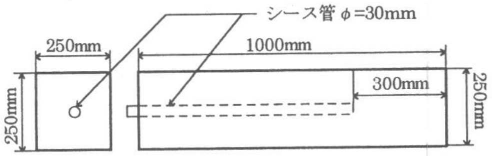


図－2　鋼球落下による入力波形とスペクトル成分

3.　実験概要

3.1　使用供試体

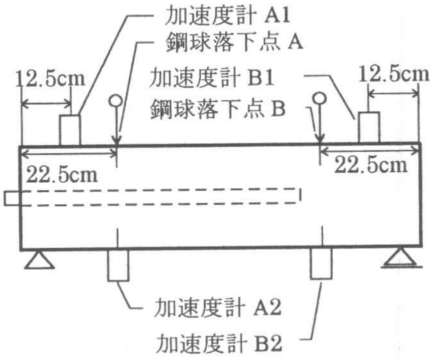
PCグラウトの充てん度を検討するために**図－3**のような250×250×1000mmの供試体を作成した。充てんされている部分をシースがない部分で仮定し，充てんされていない部分にはφ=30mmのシースを供試体断面中央に設置している。コンクリートの配合を**表－1**，28日間水中養生後の力学的特性を**表－2**に示す。



図－3　供試体図

表－2　コンクリートの力学的特性値

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
2.76	33.07	27.37	0.20



図－4　鋼球落下試験

3.2　鋼球落下試験

本研究では高周波数の外力を入力するために，鋼球落下試験を行った。その概要を**図－4**に示す。供試体を両端支持状態で保持し，供試体上面の中心線上に高さ10cmから直径1.1cm，2cm，3cm，4cmの鋼球をそれぞれ自由落下させた。鋼球の密

度は7781kg/m³，ポアソン比は0.3であるので接触時間および入力周波数の上限は式(4)，式(5)より**表－3**のようになる。シース埋設箇所の上部の鋼球落下点 A に対して，同一面の加速度計 A1 と反対面の加速度計 A2によって弾性波を検出した。また同様にシースがない箇所の上部の鋼球落下点 B に対して，加速度計 B1，加速度計 B2 で計測を行った。なお，偶然に A1，B1 では供試体端部からの距離とシースの埋設深さが等しくなったため，両者の反射波が含まれると考えられる。これらの代表例を，実験①～⑧と**表－4** のように分類しておく。加速度計より検出した弾性波の波形をパーソナルコンピュータに記録し，FFT 処理することにより周波数スペクトルを得た。

表－3　鋼球の直径と上限周波数

鋼球の直径 (cm)	接触時間 (μ sec)	上限周波数 (Hz)
1.1	65	19260
2.0	118	10593
3.0	177	7062
4.0	236	5297

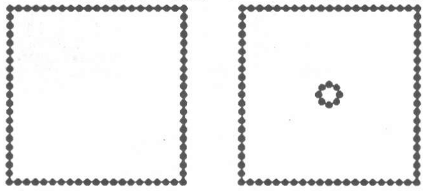
表－4　実験の種類と名称

鋼球直径 (cm)	鋼球落下点	加速度計の位置	実験名称
1.1	A	A1	実験①
		A2	実験②
	B	B1	実験③
		B2	実験④
4.0	A	A1	実験⑤
		A2	実験⑥
	B	B1	実験⑦
		B2	実験⑧

4.　BEM 解析

2 次元動的 BEM 解析として，任意の周波数 f での定常場の積分方程式を解くことにより境界上の変位を決定した。解析に用いたモデルを**図－5** に示す。ここで，BEM 解析においては均質体としての力学的特性が必要である。そこで密度を実測値より求め，ポアソン比を**表－2** より 0.20 とした。弾性係数は，弾性波の波速を計測し求めた結果，弾性波の波速が4386m/s，弾性係数が43.1GPa となった。表－2 との差異は鋼球落下試験時の材齢の影響(約 100 日)が原因と考えられる。

解析においては周波数 f を連続的に変化させて解析することにより，供試体における解析上の周波数スペクトルを求めた。しかし BEM 解析のみでは，入力する衝撃の周波数スペクトルに対する影響は評価されていない。そこで，入力する衝撃を**表－3** の接触時間を有する sin 関数によって近似し，それを FFT 処理したものと，2 次元の BEM 解析結果との合成積を求める処理を行った。これにより，鋼球落下試験において得られた周波数スペクトルを解析によって再現することを行った。



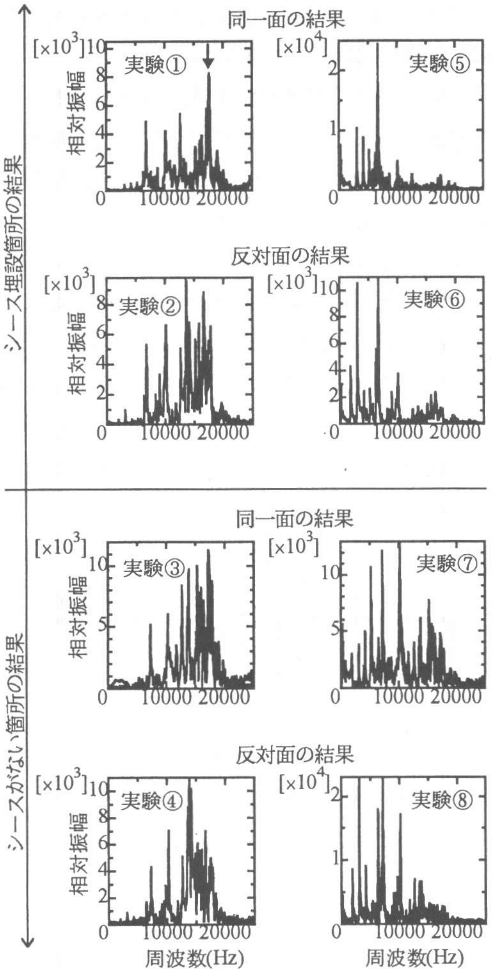
図－5　BEM 解析モデル

5.　結果と考察

鋼球落下試験によって得られた周波数スペクトル図を**図－6** に示す。ここでは，**表－4** に示した条件による結果のみを示す。

実験①～④と⑤～⑧を比較することにより，鋼球の大きさを変化させると，鋼球の接触時間すなわち上限周波数が変化し，周波数スペクトルの結果に大きく影響することが分かる。鋼球の影響としては，鋼球の直径が小さくなるほど，つまり接触時間から求めた上限周波数が高くなるほど高い周波数のスペクトル成分がより顕著に検出されている。これは低い周波数帯の入力においては，その周波数以上にある周波数スペクトルの影響が過小評価される可能性を示唆して

いる。このことから，f_{void}，f_T などのスペクトルピークを確実に得るためには，入力の周波数帯をそれらより高くする必要があることが分かる。

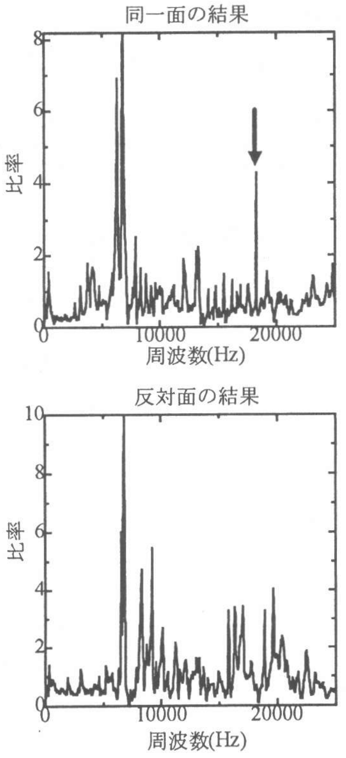


図−6　実験による周波数スペクトル

本実験における供試体において，シースの空洞の影響を示すスペクトルピーク f_{void} は，鋼球落下点と同一面で弾性波を検出する場合を考えると，式(3)より f_{void}=17500(Hz)程度である。よって f_{void} の影響を検出するためには，**表−3** の結果より，直径 1.1cm の鋼球を落下させる必要があることが明らかになった。

鋼球落下点と同一面の加速度計で計測した結果において，（**図−6**，実験①中の矢印参照）シースが埋設してある箇所で，理論上検出されるであろう f_{void}=17500Hz 周辺のところに，突出したスペクトルピークが見られる。しかし，同様の条件でシースがない箇所においても 17500Hz 周辺にスペクトルピークが見られ（**図−6**，実験③），これらの周波数スペクトルのピークからだけでは，空隙の存在を判断することは困難であることがわかる。これも端部からの反射の影響があると考えられる。

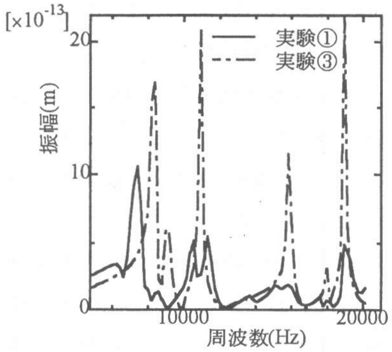
そこで，空隙によるスペクトル f_{void} の影響だけを取り出すために，シースを埋設した箇所での周波数スペクトルを，シースがない箇所での周波数スペクトルで除した。理論的には，シースが存在していること以外の条件をすべて同じにしておけば，シースの影響のみが現れるはずである。得られた結果を**図−7** に示す。

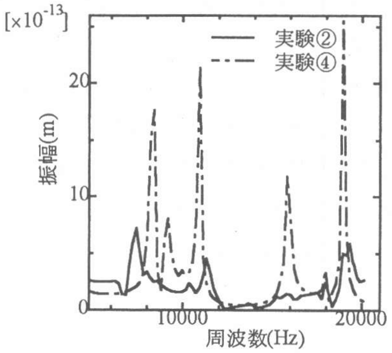


図−7　f_{void} による影響

鋼球落下点と同一面で計測した場合，スペクトルでは，約 7000Hz，18000Hz 周辺にスペクトルのピークが見られる。このうち 18000Hz（**図**

−7，矢印参照）は f_{void} の 17500Hz とほぼ一致しており，シースの影響により得られたといえる。しかし，鋼球落下点と反対面で計測した場合では，約 7000Hz 程度のピーク以外では突出したスペクトルピークが得られなかった。これらの結果の違いは，空隙を含むシース表面での弾性波の反射が影響していると考えられる。弾性波の反射は，鋼球を落下させた側のシース表面で発生すると考えらる。その反射波が 鋼球落下点と同一面，つまり供試体上部の加速度計で検出されたと考えられる。一方，反対面では，その反射波の影響は顕著には見られないと考えられる。



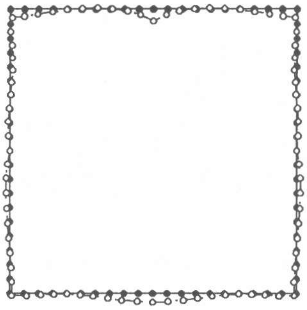


図−8　解析による周波数スペクトル

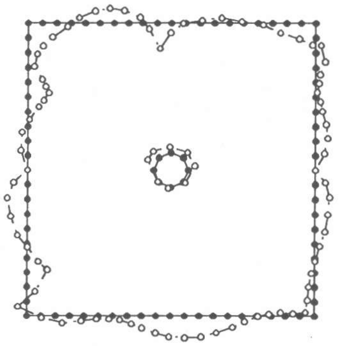
次に，解析的に実験を再現した。周波数スペクトルを解析で求めるため，周波数刻みを 195.3Hzとして解析を行った。この周波数刻みは，実験によって得られた周波数スペクトルの周波数刻みに比べ4倍となっている。また，解析を行った周波数は，4882.5Hzから20115.9Hzである。そして，入力する衝撃をsin関数によって近似し，それをFFT処理したものを，２次元のBEM解析結果と合成積をとる処理を行うことにより，衝撃力の影響も考慮した。入力する衝撃は，実験①〜④の鋼球の直径が 1.1cm の場合である。これは，実験と同様に，衝撃の持つ周波数帯が f_{void} の周波数を含む必要があるためである。これらの処理を行った解析的な周波数スペクトルを図−8に示す。

これより同一面で計測した場合，周波数スペクトルピークの発生している周波数の位置は，実験での結果と類似しているといえる。ただし周波数スペクトルのピークは，シースを埋設した場合に比べ，シースがない場合の方が明瞭に現れている。反対面で計測した場合も同様にシースがない場合において，より明瞭に周波数スペクトルのピークが見られる。

シースがない箇所の断面



シース埋設箇所の断面

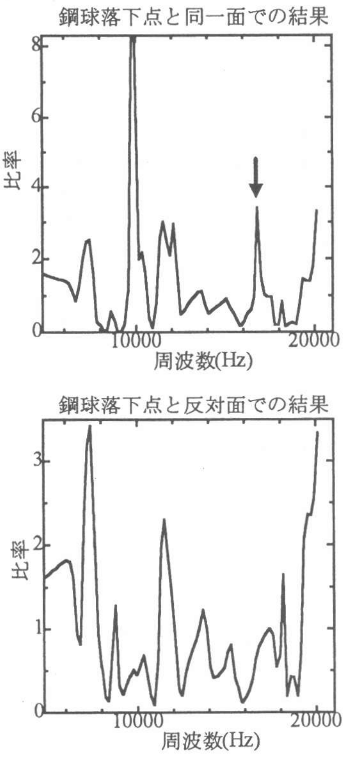


図−9　断面における振動モード

これらの同一面と反対面の計測におけるシースがない箇所で周波数スペクトルのピークが現

れているのは，供試体の形状(250×250×1000mm)の影響であると考えられる。そこで，17500Hz におけるシース有りと無しでの振動モード図を**図－9** に示す。これより，シースが埋設されている場合には，シース管の上部での反射波の発生が明瞭に認められる。その場合でもシース下部の振動は小さく，反対側での計測の困難さを裏付けている。

解析においても，実験結果の考察と同様に，f_{void}の影響を得るために，シースを埋設している箇所での周波数スペクトルを，シースがない箇所での周波数スペクトルで除する処理を行った。その結果を**図－10** に示す。



図－10　解析によるシースの影響

同一面で計測した場合，式(3)より求めた f_{void}=17500Hz 程度の周波数ピーク（**図－10**, 矢印参照）が解析上でも確認することができた。これは実験の結果と一致しており，シースの充てん度を評価する手法として有効と考えられる。しかし，反対面で計測した場合の結果からは，特徴的なピーク周波数を得ることができず，シースの影響を評価することができなかった。これが，シース表面における反射波発生の影響の有無によると考えられる。

6.　結論

PC グラウト充てん度評価の手法として，インパクトエコー法の適用性を鋼球落下試験と BEM 解析によって検討した。その結果をインパクトエコーの理論に基づき考察した結果，以下のような結果が得られた。

(1)鋼球落下試験より，衝撃の接触時間より求められる上限周波数が，周波数スペクトルに大きな影響を与えることが確認できた。

(2)実験による周波数スペクトル分析より，鋼球落下点と同一面の計測で，シースの空隙の影響を確認することができた。しかし，反対面での計測では認められなかった。

(3)BEM解析よりこれらの実験結果を考察すると，鋼球落下点と同一面においては，シースの空隙による影響が確かに認められ，これがシース空隙部での反射波の発生に関連していることが明らかになった。

2 次元解析であるためピーク周波数の位置まで特定するには，問題があると考えられ，インパクトエコー法の諸係数までは検討できなかった。今後は 3 次元解析へと研究を進め，諸係数の妥当性についても考察する予定である。

参考文献

1)Sansalone, M.J. and Streett, W.B. : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y. , 1997

2)中野将士・藤原規雄・尼崎省二：弾性波法による PC グラウト状況の非破壊検査，第 51 回セメント技術大会講演要旨, pp.92-93, 1997.5

3)白鳥雅也・桧貝　勇・岡村雄樹：軽い衝撃を受けるコンクリート部材の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp.679-684, 1992.6