

論文 SIBIE による PC グラウト未充填部のモデル試験による検討

山田 雅彦*1・大久保 太郎*2・大津 政康*3・内田 昌勝*4

要旨: インパクトエコー法とはコンクリート構造物の内部欠陥を検出する非破壊検査手法の 1 つである。衝撃力を入力し、検出波動の周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の深さを決定する。しかし、周波数スペクトル上には多くのピークが存在しており、欠陥の同定が困難である場合も多い。そこで調査断面において弾性波の反射の影響を画像化し欠陥部を評価する SIBIE 法を研究中である。本論では非破壊検査手法としての SIBIE の確立および信頼性向上のため、異なる条件下でグラウト充填したシース管と未充填シース管との検出性能の比較を行い、検討した結果を報告する。

キーワード: 弾性波, 周波数スペクトル, インパクトエコー法, SIBIE

1. はじめに

コンクリート構造物の 1 つとしてプレストレストコンクリート(PC)があるが、グラウトの充填不良は PC 鋼材の損傷を始めとして、構造物の性能低下の大きな一因となる。充填度を確認する方法として、様々な非破壊検査手法が提案されているが、確固たる成果を得ていない。

そこで現在、コンクリート構造物における非破壊検査手法の 1 つであるインパクトエコー法¹⁾により得られる周波数スペクトルを用い、調査断面において弾性波の反射の影響を画像化し、欠陥部を評価する SIBIE(Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)²⁾を開発している。

本研究では PC グラウト未充填部検出の評価技術としての SIBIE の確立および信頼性の向上を目的とし、グラウト未充填部、充填部を有するそれぞれの供試体について実験を行い、検出性能の検証を行った。

2. グラウト未充填部検出の原理

2.1 インパクトエコー法

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変位型センサで検出記録しFFT処理により周波数スペクトルを求める。こうして得られた周波数スペクトル上には図-1 に示すように供試体底部の反射による共振周波数 f_T 、内部欠陥反射による共振周波数 f_{void} でスペクトルピークが出現する。供試体中を伝わる P 波の伝播速度を C_p 、供試体の板厚を T 、内部欠陥までの距離を d とすると、出現するピーク周波数は図-1 に示す値を用いることにより、式(1)、式(2)のように表される。

$$f_T = C_p / 2T \tag{1}$$

$$f_{void} = C_p / 2d \tag{2}$$

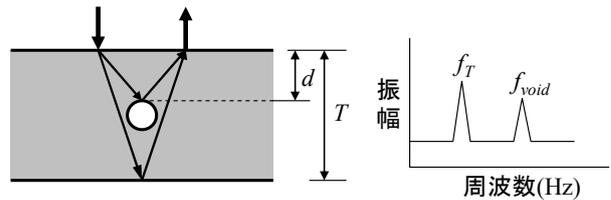


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

次に、波動現象と欠陥位置までの深さについて考察する。波動現象は時間と空間の両者に依存する場であることより、入力周波数に対する攪乱が確実に生じる条件の重要性が指摘されている。これについては寸法と波長のパラメータとして、

$$\alpha = fL / v = L / \lambda \tag{3}$$

が導かれている³⁾。式(3)において f : 周波数, L : 部材代表長さ, v : 弾性波の波速, λ : 波長である。波動の攪乱は、このパラメータを用いれば、 $\alpha \geq 1$ のときに空隙の反射や影響による攪乱が顕著に現れるとされる。したがって、 v を C_p 、 L を板厚 T および埋設深さ d に置き換えると、 $\alpha=1$ の場合に

$$f'_T = C_p / T \tag{4}$$

$$f'_{void} = C_p / d \tag{5}$$

となる。つまり、板厚による反射の影響のスペクトルピークが発生する周波数として式(4)、グラウト未充填部反射の影響のスペクトルピークが発生する周波数として式(5)が導かれる。ここで、式(1)と式(4)および式(2)と式(5)の差異は、スペクトルピークに弾性波の反射による影響が1/2波長で現れるか1波長で現れるかに過ぎず式(4)、式(5)は高周波数帯のピーク周波数の存在を示唆している。

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*4 (株)太平洋コンサルタント コンクリートコンサルタント事業部 工博 (正会員)

2.2 SIBIE の原理⁴⁾

周波数スペクトルのピーク周波数は、理論的には入力された弾性波が不連続面で反射することにより生じる。そこで、供試体断面での弾性波の反射位置を画像化するSIBIEという画像処理法を考案した。手順としては図-2に示すように解析対象の断面を正方形要素に分割しモデル化する。次に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求める。その際弾性波は入力点から要素中心そして出力点といった伝播経路を通る。その最短伝播経路を R とすると式(3)のように表される。

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

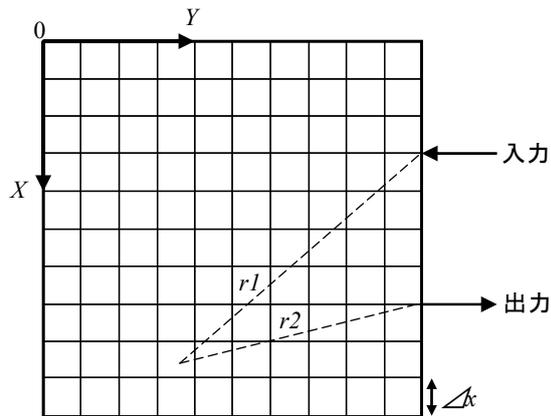


図-2 SIBIE 解析イメージングモデル

解析対象中を伝わる弾性波の波速を C_p とすると、分割された要素の中心で反射することにより生じる共振周波数は、式(7)のように考えられる。

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

さらに要素からの反射が強調された共振周波数として、

$$f_{r2} = C_p / r_2 \quad (8)$$

が考えられる。実測した周波数スペクトルにおいて、式(7)、式(8)で求められる理論的な反射による共振周波数の相対振幅値を合計することにより要素からの反射の影響を数値化する。この計算を各要素で行い、数値の大小により5段階に評価し、図化したものが計測対象断面の2次元画像となる。

上記の作業を行う際、足し合わせる周波数に上限・下限を設定すると図化された画像にノイズを除去することができる。上限は内部欠陥反射による共振周波数である $f'_{void} = C_p / d$ 、下限は板厚 T の反射による共振周波数である $f'_T = C_p / T$ とした。

次にモデル化する際の分割する正方形要素の大きさの影響について考える。 C_p と波形計測時のサンプリングタイム Δt の関係より、衝撃入力点からセル中心を通過し検出点という経路を与える正方形要素を最小単位としたとき、その1辺の長さ Δx は次式で与えられる。

$$\Delta x = C_p \Delta t / 2 \quad (9)$$

3. 実験概要

3.1 供試体

使用する供試体はCASE-1からCASE-3までの3体で、シース内にはそれぞれせん断鋼棒が配置されている。パラメータは鉄筋の有無、主ケーブルの影響の有無である。供試体概要を図-3~5、供試体の条件を表-1に示す。概要図において白色のシースは未充填シースを、灰色のシースは充填されたシースを表している。

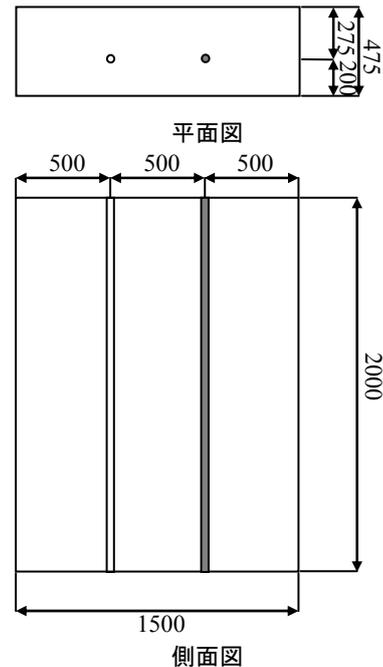


図-3 供試体概要図 CASE-1 (mm)

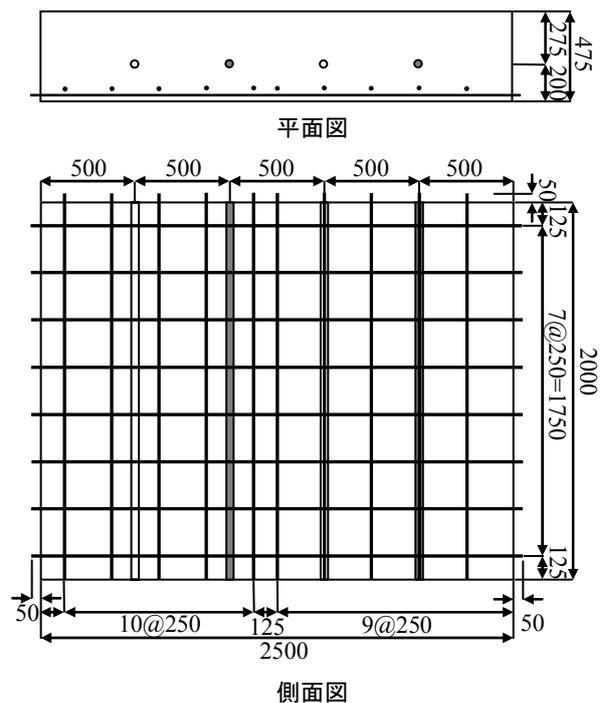


図-4 供試体概要図 CASE-2 (mm)

3.2 弾性波速度試験

インパクトエコー法を用いる際、弾性波(P波)は重要なパラメータである。そこで実験供試体においてパンジットを用い透過法⁵⁾により弾性波速度の測定を行った。供試体の一端から探触子により発振し、供試体の他端で探触子により受信するまでの伝達時間を測定し、供試体の板厚と到達時間から弾性波の速度を求めた。実験概要を図-6に示す。測定は10回行い、得られた波速の平均値を弾性波の波速とした。測定したところ CASE-1 では3950m/s, CASE-2 では4010m/s, CASE-3 では3960m/sという結果が得られた。

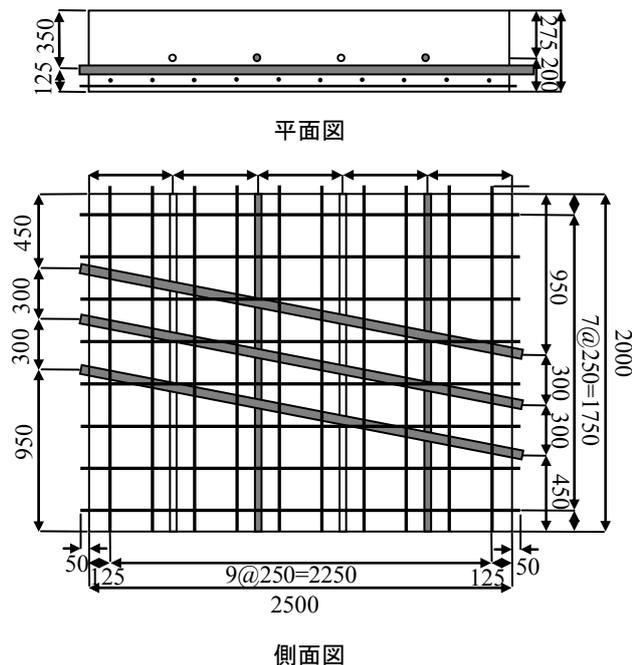


図-5 供試体概要図 CASE-3 (mm)

3.3 インパクト入力試験

インパクト入力試験は、高周波数の外力を入力するため、図-7に示すような直径8mm、長さ17mmのアルミ飛翔体を供試体表面における埋設されたシース管位置の中心から空気圧約0.05MPaにより衝撃を入力し、その左右の二箇所に使用帯域が50kHzまでの加速度計を衝撃入力点から50mmの位置に設置して検出点間隔100mmの2ヶ所を検出点とした1点入力2点検出で行った。衝撃入力点の位置を図-8中の×印に、加速度計による検出点の位置を図-8中の○印に示す。波形の計測は、加速度計に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、それを高速フーリエ変換(FFT)処理することにより周波数スペクトルを求めた。波形を記録する際のサンプリングタイムを4μsecとし、サンプリング数を2048とした。

インパクトエコー法では入力する衝撃の持つ上限周波数が、内部欠陥によって生じると考えられる共振周波数を含むことが重要である。各供試体の板厚部、シース管により出現するピーク周波数は、式(1)、式(2)に板厚 T およびシース管までの距離 d を代入することによって20kHz以内に板厚や未充填シース部による共振周波数が出現すると考えられるが、解析する範囲中の弾性波の影響を正確に知るためには、入力周波数はできる限り高周波帯域まであり、かつ、平坦な周波数特性を有するほど良い入力装置であるといえる。今回使用したアルミ飛翔体の衝突試験の上限周波数は、供試体に埋設してあるシース管により発生するピーク周波数を十分に含んでいることが確認されている⁶⁾。

表-1 供試体条件

		CASE-1	CASE-2	CASE-3	
供試体概要	高さ (mm)	2000	2000	2000	
	幅 (mm)	1500	2500	2500	
	厚さ (mm)	475	475	475	
	コンクリート強度 (N/mm ²)	40	40	40	
	せん断鋼棒	せん断鋼棒径 (mm)	32	32	32
		シース径 (mm)	38	38	38
		せん断鋼棒ピッチ (mm)	500	500	500
		グラウト充填条件	充填1本, 未充填1本	充填2本, 未充填2本	充填2本, 未充填2本
	主ケーブル	主ケーブル	-	-	Φ15.2 PC鋼より線×7本
		シース径 (mm)	-	-	55
主ケーブルピッチ (mm)		-	-	300	
	配置本数	-	-	3本	
	鉄筋	-	SD295 D16,19	SD295 D16,20	
調査条件	せん断鋼棒までのかぶり (mm)	181	181	181	
	鉄筋ピッチ (mm)	-	250	250	
	鉄筋の影響	-	中間2本, 直下2本	中間4本	
	主ケーブルの影響	-	-	有り	

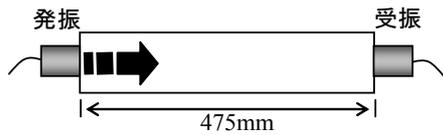


図-6 透過法による弾性波速度試験概要図

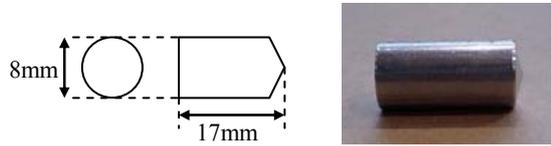


図-7 アルミ飛翔体

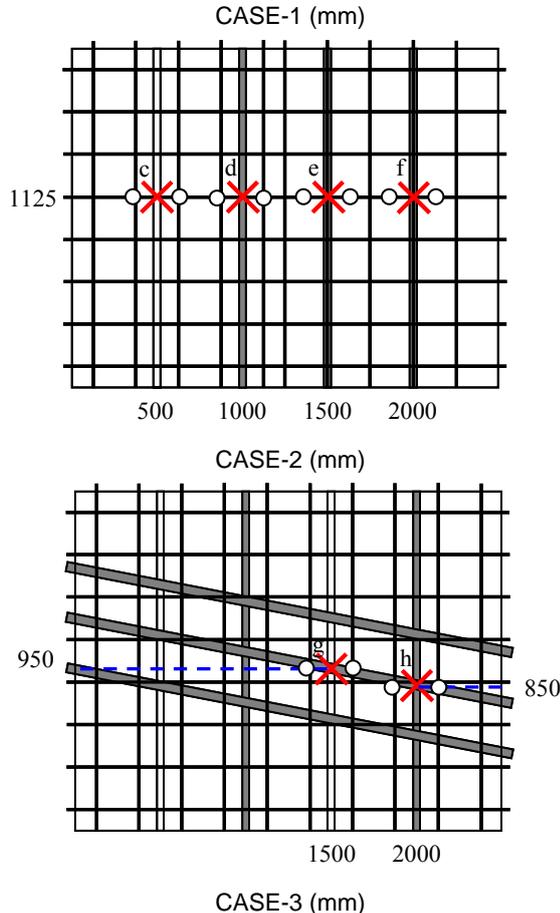
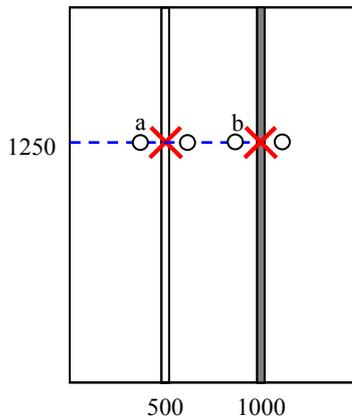


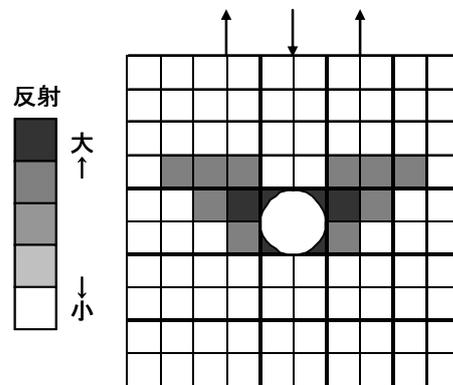
図-8 衝撃入力点および計測点位置

4. 結果および考察

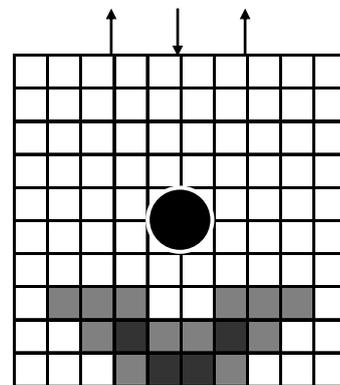
4.1 CASE-1 の SIBIE 結果

コンクリート表面で得られた信号を記録する装置として周波数帯域が 100MHz のデジタル・ストレージ・オシロスコープを使用した。内部欠陥から明瞭な反射源を検出するために、入力点の左右の加速度計で検出された周波数スペクトルから得られた相対振幅値を重ね合わせて SIBIE を行った。その際足し合わせる周波数の上限を 20kHz とし下限を 4kHz に設定した。イメージングモデルは 150mm×500mm で、メッシュ分割幅 Δx は、式(9)より 10mm とした。SIBIE 画像は、各要素の相対振幅値を基に 5 段階に色分けし、色が濃いほど反射の影響が強いことを表している。図の上部中央が衝撃入力点であり、左右それぞれ 50mm 離れた位置が計測点である。図中の白丸はグラウト未充填のシース管を、図中の黒丸は充填されたシース管を示している。また下向きの矢印が衝撃入力点を、上向きの矢印が加速度計による計測点を示している。

SIBIE 結果図の見方の例として図-9 を示す。結果の見方としては、図のように 5 段階中上位 2 段階がシース周りに顕著に表れた場合シースによる反射が検出できたとする。板厚による反射についても同様とする。



シースによる反射



板厚による反射

図-9 図の見方

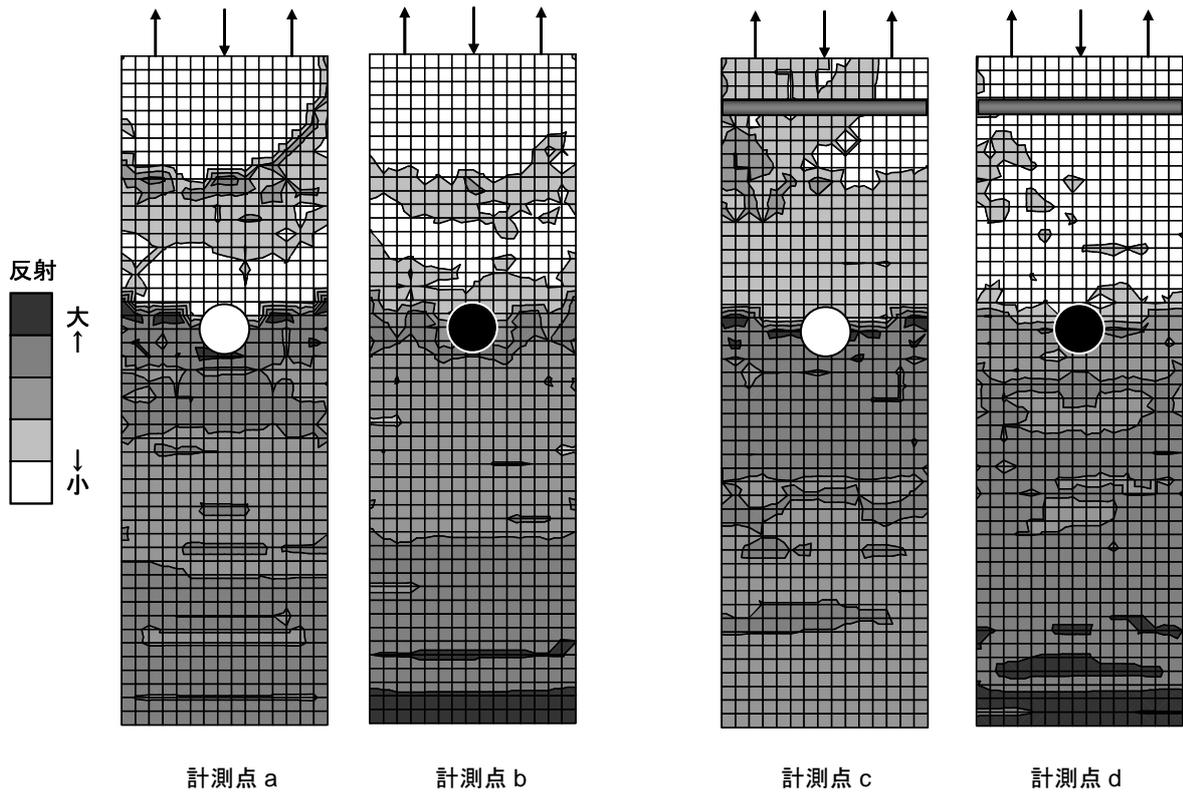


図-10 CASE-1 SIBIE 結果

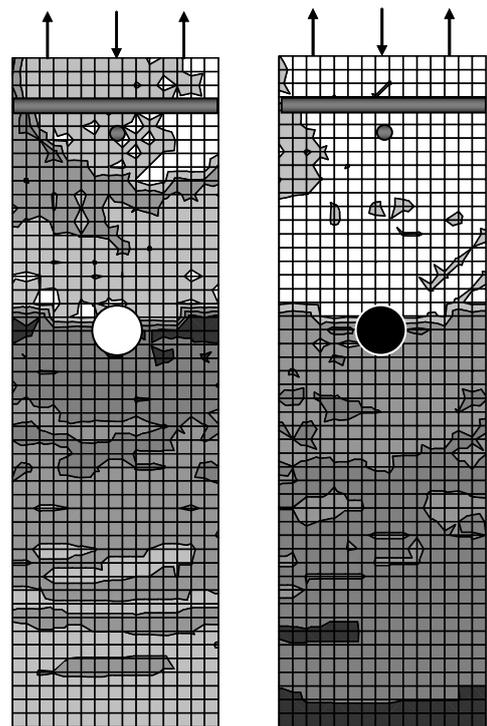
インパクト試験により得られた周波数スペクトルを用いて SIBIE 解析で得られた結果を図-10 に示す。

図-10の結果より CASE-1 においては計測点 a では未充填シースの強い反射が確認できた。また計測点 b の充填シースについてはシース周りに反射は認められず、板厚による反射が確認できた。この結果から SIBIE を用いることでシースが充填であるか未充填であるか評価することができた。

4.2 CASE-2 の SIBIE 結果

次に CASE-2 におけるインパクト試験により得られた周波数スペクトルを用いて SIBIE 解析で得られた結果を図-11 に示す。CASE-1 との差異は鉄筋の有無である。図中の白丸はグラウト未充填のシース管を、図中の黒丸は充填されたシース管を示している。灰色の長方形は水平方向に配筋された鉄筋を、灰色の丸は鉛直方向に配筋された鉄筋を示している。計測点 c, d においてはシース上で鉄筋が横断している。計測点 e, f では鉛直方向上にも鉄筋が配筋されており、衝撃入力点上で鉄筋が交差している。

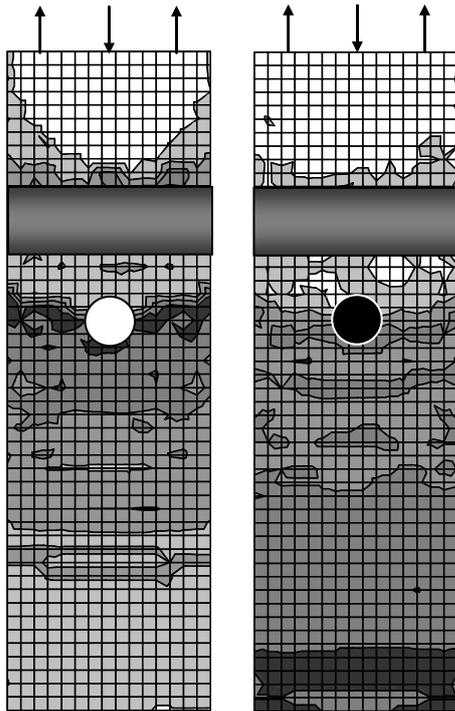
この条件でも鉄筋の配筋状況にかかわらず、計測点 c, e の未充填シースにおいてはシースの反射、計測点 d, f の未充填充填シースにおいては板厚による反射が確認できた。



計測点 e 計測点 f
図-11 CASE-2 SIBIE 結果

4.3 CASE-3 の SIBIE 結果

最後に CASE-3 における結果を図-12 に示す。図中の白丸はグラウト未充填のシース管を、図中の黒丸は充填されたシース管を示している。灰色の長方形は主ケーブ管を示している。CASE-1 との差異は鉄筋および主ケー



計測点 g 計測点 h
図-11 CASE-3 SIBIE 結果

ブルの影響の有無である。CASE-2 の結果と同様に鉄筋、主ケーブル管の埋設状況にかかわらず、計測点 g、h どちらにおいても未充填シースにおいてはシースの反射、充填シースにおいては板厚による反射が確認できた。

5. 結論

本論では、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート構造物のシース管を対象として、非破壊検査手法としての SIBIE による PC グラウト未充填部のモデル試験による検討を行った。以下に結論を示す。

(1)CASE-1 においては PC グラウト未充填の場合、シース周りで強い反射が確認できた。充填された場合ではシース周りの反射は認められず、板厚による反射が確認できた。

(2) CASE-2 の実験結果は CASE-1 とほぼ同様であり、鉄筋がシース上で横断・交差していても SIBIE 結果においては鉄筋の影響は表れず、シースによる反射、板厚による反射を確認できた。

(3) CASE-3 の実験結果においても CASE-1 とほぼ同様であり、SIBIE 結果においては主ケーブルの影響があっても問題なく未充填シースを検出することができた。充填シースについても同様である。

これらの結果より、SIBIE を用いることで鉄筋や主ケーブルが埋設されていたとしても PC グラウト充填状況を評価できるといえる。

謝辞：本研究は、熊本大学，(株)高速道路技術研究所，(株)プレストレストコンクリート建設業協会による共同研究の成果の一部である。実験に多大なご協力を頂いた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Sansalone, M. J. and Streett, W. B.: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 2) 渡辺健，渡海雅信，小坂浩二，大津政康：インパクトエコー法の画像処理に関する研究，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000
- 3) Ohtsu, M.: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials Concrete Structures and Pavement, JCSE, No.544/V-32, pp.277-290, 1992
- 4) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT&E International, Vol.35, pp.189-196, 2000
- 5) 大津政康ほか：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，pp.111-141, 1994
- 6) 三原真一，N. Ata，大津政康：SIBIE による PC グラウト未充填部の評価に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1953-1958, 2004