

論文 弾性波のパルス入力により得られる差分波形に着目した PC グラウト充填評価に関する基礎的検討

山下 健太郎*1・手塚 正道*2 鎌田 敏郎*3

要旨 : PC 桁の下フランジ部のような断面形状のコンクリート部材に弾性波を入力した場合、弾性波は複数の経路で多重反射するため、周波数解析結果を手掛かりとしたグラウト充填評価が難しい場合がある。こうした背景のもと、著者らは、弾性波の入力点の対向面に点対称に配置したセンサでの受信波形の差分波形の振幅や位相の変化に着目して内部空隙の位置を検知する手法を検討してきた。本稿では、鋼球打撃によるパルス状の入力信号を用いた場合に上記の手法を適用することによって PC グラウト充填評価を行う方法について、数値計算による解析的検討及び、コンクリート供試体を用いた実験的検討を行った結果を報告する。

キーワード : 内部空隙探査, 衝撃弾性波法, 差分波形, PC グラウト充填評価

1. はじめに

Impact Echo Method¹⁾をはじめとする衝撃弾性波法²⁾では、主として板状の構造物を対象とし、弾性波が「板」の厚さ方向に多重反射することによって生じる卓越周波数を求め、その値の変化に着目することによって PC 部材のグラウト未充填部等の内部空隙の有無が判断できる。しかしながら、道路橋 PC 桁の下フランジ部のように断面形状が板状でない部位や、部材端部では、弾性波の伝搬経路が複雑になるため、受信波形の周波数分布上で部材厚に相当する縦波共振のピークを確認するのが難しい場合がある。これに対して、超音波法では、衝撃弾性波法と比べて波長の短い弾性波が使用できるため、内部空隙で反射して測定面に到達する反射波（エコー）を入力信号と分離して計測出来ることから、板状でない任意の断面形状での内部空隙探査に適用可能である。しかしながら、周波数が高いために、弾性波がコンクリート中の材料の境界で散乱・減衰しやすく、深い位置にある空隙探査への適用には課題が残されている。さらに、昨今では電磁的方法によって構造物中の鋼製シースや鋼棒を直接加振して、コンクリート表面で応答を測定する方法も開発が進んでいるが、シース径やかぶり等の条件によらず高精度に評価できる段階には未だ至っていない³⁾。

上記の背景のもと、筆者らは、衝撃弾性波法で使用する低い周波数帯域において、任意の断面形状の構造部材の内部空隙の探査を可能とすることを目的として、入力点に対して対称、等距離に配置した2つのセンサで受信した波形の差分波形に着目することにより、打撃によって生じた表面波と内部空隙からの反射波を分離する手法の研究を行ってきた⁴⁾。本研究では、PC 部材におけるグラウト充填状況の評価手法を対象とし、鋼球打撃による

疑似的なパルス信号を入力波として使用し、グラウト未充填箇所（内部空隙）からの反射波を評価するための基本原理や、実構造物への適用性について検討を行った。

2. 疑似的なパルス信号入力における測定波形の差分に着目した内部空隙の検知

衝撃弾性波法の測定は、鋼球等によってコンクリート表面を軽打することで弾性波を入力し、構造物からの応答を構造物表面の振動として入力点の近傍に設置したセンサ（加速度センサや AE センサ等）で測定するのが一般的である。しかし、コンクリート表面を直接鋼球で打撃して入力される疑似的なパルス信号の周波数は、測定面のコンクリートの性状によって一定とならないことがあり、内部空隙の有無あるいはその位置に関する詳細な解析を行う上での問題となる。この解決策として、著者らは一定時間特定の周波数が継続する疑似的なトーンバースト信号を入力に用いて内部空隙を検知する方法を検討してきたが、本研究では、より簡便な測定法として、疑似的なパルス信号を安定して入力し、測定波形に含まれる内部空隙からの反射波を検出する方法について検討を行った。

ここで、内部空隙からの反射波を検出する際には、反射波に比べて振幅の大きい表面波の影響を除去、あるいは抑制する工夫が不可欠であるが、著者らは入力点から対称となる2点で測定した波形の差分を計算することによって表面波の影響をキャンセルする手法を用いている。

また、2つの測定点に空隙からの反射波が異なる時刻に到達する位置関係では、差分波形の振幅や位相に変化が生じるため、掃引測定を行うことによって、内部空隙の検知が可能となる。

*1 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士後期課程 (正会員)

*2 オリエンタル白石 (株) 技術本部 (正会員)

*3 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 (正会員)

3. 解析的検討

3.1 反射波と表面波の到達時刻についての検討

反射波と表面波が測定点に到達する時刻は、内部空隙の深さと、測定点と入力点の幾何学的関係によって決定されるものである。

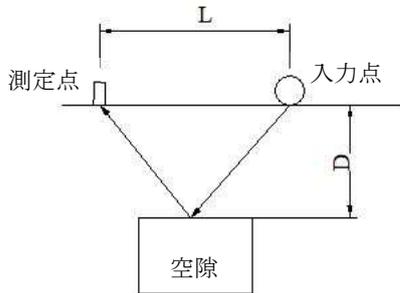


図-1 内部空隙と測定点の幾何関係

図-1において、表面波速度を C_R 、縦波速度を C_P とし、表面波と内部空隙からの反射波が同時に到達する幾何学的関係は、

$$\frac{L}{C_R} = \frac{L\sqrt{1 + \left(\frac{2D}{L}\right)^2}}{C_P} \quad (1)$$

よって、

$$D = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{C_P}{C_R}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

となり、表面波速度と縦波速度の関係が、

$$C_P = 1.76C_R \quad (3)$$

であれば、入力点と測定点間の距離（以降、測定距離）のおおよそ70%の深さに内部空隙がある場合、表面波と反射波が同時に測定点に到達することが示される。内部空隙がこれよりも深い場合には、表面波が先に測定点に到来し、その後で反射波が到来することになる。すなわち、測定波形は表面波と内部空隙からの反射波が重畳したものとなっている可能性が高く、表面波と反射波を分離することが不可欠である。さらに、2段目に配置されたシースを測定の対象とする場合などを想定すると、表面波と反射波の分離が内部空隙探索の前提条件となると言って過言ではない。

3.2 入力（打撃力）波形と反射波の重畳時刻についての検討

鋼球の打撃によってパルス状の信号を入力する場合、打撃力の継続時間以降はコンクリート表面での弾性挙動に起因する振動が支配的となり、この時間帯に内部空隙からの反射波が到来したとしても、入力信号とそれを分離解析することは困難である。このため、制御した入力信号の継続時間中に内部空隙からの反射波が到来するよ

うな条件で測定を行う必要がある。

鋼球打撃によって入力された信号の周波数 f と応答波形（振動速度波形）がピークに至る時間 T の関係は、入力信号を力波形で測定する場合、

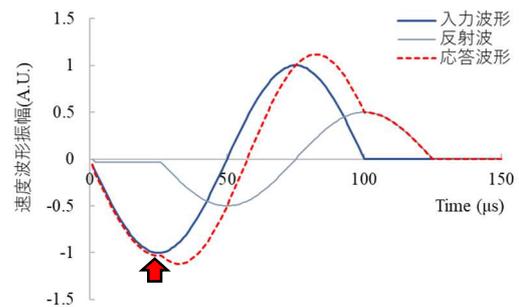
$$T = \frac{1}{4f} \quad (4)$$

である。入力として10kHzの信号を用いる場合、この時間は25 μ 秒である。この間、縦波はコンクリート中をおおよそ100mm進行することになり、内部空隙での反射波を考慮すると、深さは50mmに相当する。同時到達点となる空隙深さを表-1の中列に示す。

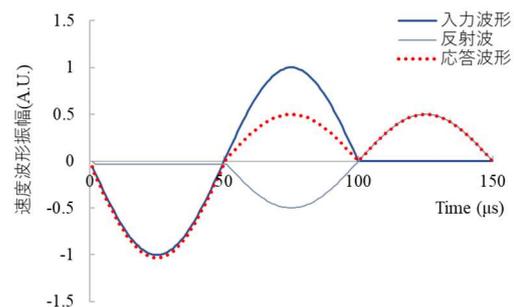
図-2には、速度成分で測定した場合の10kHzの入力波形に1/4周期、1/2周期遅れで空隙からの反射波が重畳した場合の応答波形の比較を示す。1/4周期の遅れでは、反射波が入力波形の下に凸なピーク（図中矢印）から重なり、応答波形に不連続点が現れる。一方、1/2周期遅れでは、少なくとも100 μ sまでの区間で波形のひずみは生じず、波形の変化から反射波の到来を推定することは難しいといえる。

表-1 測定距離と内部空隙検出範囲（入力10kHz）

測定距離(mm)	同時到達点となる空隙深さ (mm)	1/2周期の遅れとなる空隙深さ (mm)
50	41	141
75	61	162
100	82	181



(a) 1/4 周期遅れ



(b) 1/2 周期遅れ

図-2 応答波形

これより、応答波形から内部空隙による反射波の到来を推定するためには、入力信号の 1/2 周期以上の遅れで反射波が重畳することは好ましくないことがわかる。これをまとめると 10kHz のパルス信号を入力として使用し、速度波形を測定量とする場合の内部空隙検出可能深さの範囲は、表-1 の中列と右列の間として表すことができる。

3.3 数値計算による差分振幅と測定距離の関係の検討

2次元弾性固体波動方程式の差分法による数値解法⁵⁾を用いて、数値計算による検討を行った。数値計算の基本条件を表-2 に示す。なお、計算ステップ数は 1000 とし、計算領域端部からの反射波は測定点に到達しない条件とした。計算は図-3 に示すように、深さ 50mm の位置に 40mm×40mm の空隙を設け、空隙の前後 200mm の区間に対し、20mm 間隔で入力点と 2 つの測定点からなる測定ユニットを移動しながら計算を行い、測定距離と空隙深さの関係について検討を行った。入力には 10kHz の半端正弦波を用いた。また、差分波形は測定点 1 の波形を減数として 2 つの計算波形の差を計算して求めた。

表-2 数値計算に使用したパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
縦波速度	4,000m/s	メッシュ間隔	10mm
横波速度	2,320m/s	横メッシュ数	2000
差分時間間隔	0.5 μ s	縦メッシュ数	1000

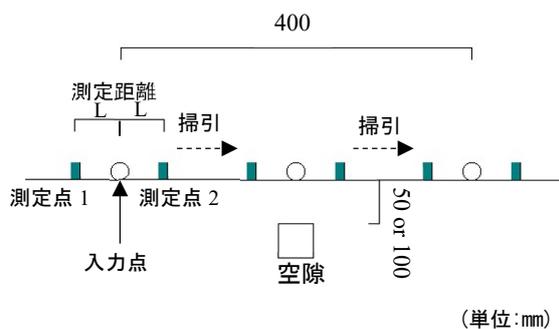


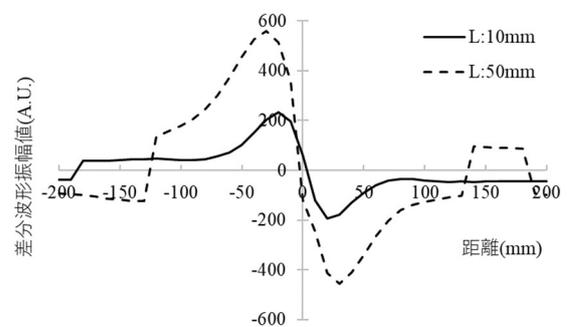
図-3 数値計算条件

波動方程式の数値シミュレーションで得た 2 つの測定点での波形を基に計算した差分波形のピーク振幅の変化を図-4 に示す。図の横軸は、空隙位置を原点とした距離を示しており、縦軸は差分波形の振幅値を表している。

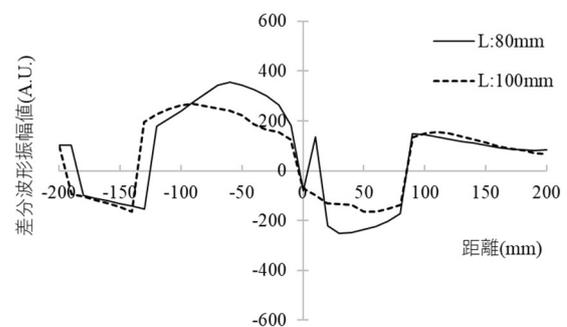
空隙の手前では、空隙からの反射波は測定点 2 (掃引進行方向側) に先に到来する。空隙位置を通過すると、空隙からの反射波は、逆に測定点 1 に先に到来する。このため、空隙を通過する以前と以降で測定点に到来する反射波の順番が変化するので、差分波形のピーク振幅を掃引

距離でプロットすると、概ね点対称のような分布をすることになる。また、どちらかの測定点が空隙の直上近傍となる位置関係で差分波形が極大となることが確認された。2次元波動方程式の数値計算結果によると、測定距離が空隙かぶりの 1.5 倍 (測定距離 70mm) を超えるようになると、点対称型の分布から離れ、また、空隙付近で単調増加、あるいは単調減少関数型から乖離する傾向が確認された。

次に、空隙深さを 100mm として計算した差分波形の一例を図-5 に示す。図より、測定距離に関係なく空隙位置の検出が可能であることが伺えるが、測定距離が小さく、かぶりが大きい場合などは、測定波形の差異が小さくなり、差分振幅も小さくなるなど、空隙深さと測定距離には検出能を支配する関係が存在すると言える。



(a) 測定距離 10mm, 50mm



(b) 測定距離 80mm, 100mm

図-4 空隙深さ 50mm での差分波形振幅

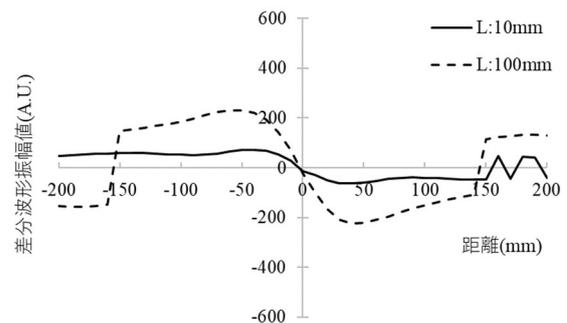


図-5 空隙深さ 100mm での差分波形振幅

4. 実験的検討

4.1 疑似パルス信号の入力方法の検討

鋼球打撃による疑似パルス信号入力を用いて内部空隙からの反射波を検知しようとする場合、打撃力の継続時間で決まる弾性波の周波数範囲（入力周波数）をある程度制御することが不可欠である。一方で、コンクリート表面はモルタル部や粗骨材部など、硬さが一様でなく、打撃箇所によって入力周波数が安定しなくなることが想定される。さらに、測定技術者が加速度計内蔵のインパルスハンマを使用して弾性波の入力を行う場合は、打撃位置がずれることや、測定面に鉛直にハンマが衝突しない等の理由で入力周波数や入力されるエネルギーが不安定になる。このため、本稿では、入力点に接触固定した鋼球（固定鋼球）を別の鋼球で打撃して疑似的なパルス信号を入力する方法について検討を行った。鋼球はφ10mm(4g)、φ20mm(34g)、φ30mm(130g)を用い、それぞれの組合せについて10回ずつ測定を行った。測定は直径200mm、長さ500mmの円柱状のコンクリート供試体の端面で行った。測定面はグラインダーで研磨を行い、セメントペースト部を入力位置とし、入力位置から25mmの位置に加速度センサを接着して応答波形の測定を行った。測定状況を図-6に示す。また、測定波形の一例として、直径10mmの鋼球を固定鋼球として使用した際の測定波形（加速度波形）及び、直径10mmの鋼球で直接打撃して入力した際の測定波形の比較を図-7に示す。直接打撃の波形について、入力波形に相当する第一波目（谷-山-谷）から波形にひずみが生じており、衝突時の細骨材の塑性変形などによって、打撃力がスムーズに作用していない状況が推察される。一方で、固定鋼球を打撃して入力する方法での第一波目は、いずれの条件でも波形形状は平滑であり、安定的に入力できることがうかがえる。次に、入力周波数とそのばらつきについて検討を行った。波形の初動部の抜粋を図-8に示すが、加速度波形表示のため、波形における最初の谷-山-谷の時間が入力信号の周期に相当する。測定の条件によっては、ピークが明瞭でない波形もあったことから、便宜的に図中矢印Aに相当する時間を2倍したものの逆数から入力周波数を求めた。各条件における入力周波数の平均値を図-9に示し、10回の測定において算出した周波数の変動係数を図-10に示す。参照として、それぞれの鋼球で直接打撃した際の結果も併せて示している。図より直接打撃の場合は既往の知見の通り、鋼球の質量が大きくなるにつれて入力される周波数が低くなる傾向を示している。一方で、固定鋼球を打撃して入力する方法については、固定鋼球の径に応じて入力周波数が変化する傾向が確認された。また、固定鋼球を同程度の質量の鋼球で打撃する方法が最も安定した入力を行うことが出来る

ことがわかった。2つの鋼球の質量の整合が取れていない場合には鋼球同士、あるいは、鋼球と測定面の接触点における振動系で生成する異なる振動が入力周波数に影響を及ぼす可能性が考えられる。図-11には露出した粗骨材を入力点として直接打撃した際に測定した入力周波数を示す。モルタル部を入力点とした場合に比べて10%程度周波数が高くなる傾向があり、実際のコンクリートでパルス状の入力を行う際には測定点毎に入力周波数が一定とならない可能性も明らかになった。

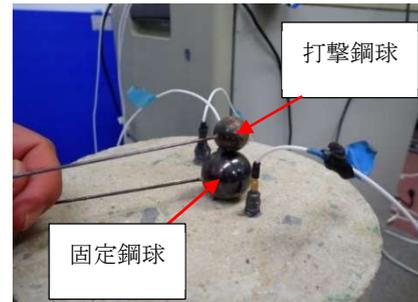


図-6 疑似パルス入力の測定状況

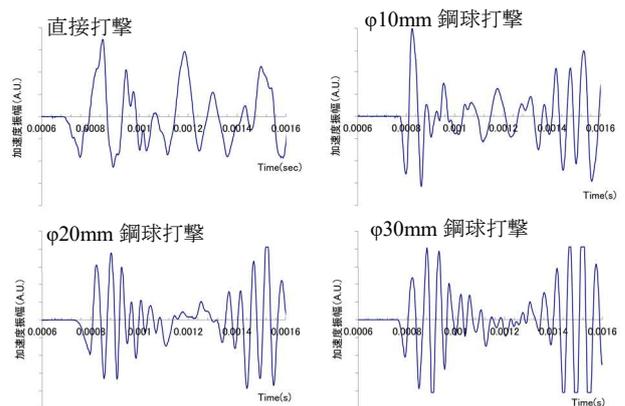


図-7 固定鋼球径10mmにおける測定波形の一例

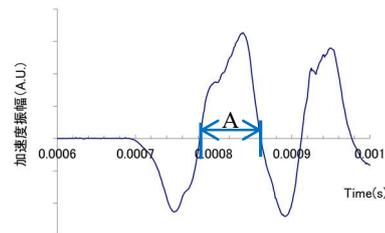


図-8 入力波形の初動部

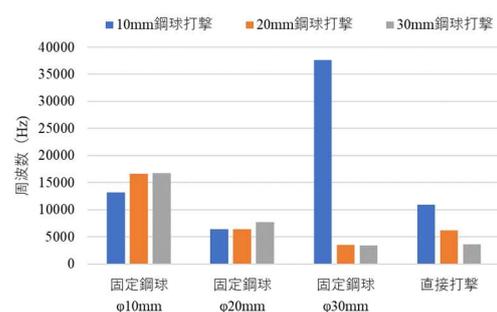


図-9 入力周波数計算結果

4.2 MC ナイロン供試体実験

(1) 疑似パルス入力による PC グラウト未充填箇所検出の適用性の検討

疑似パルス信号入力における測定波形の差分に着目した内部空隙探査手法の適用性を確認するため、均質な弾性体と見なせる MC ナイロン供試体を用いた検討実験を行った。供試体は、図-12 に示すように、長さ 1200mm、幅 600mm、厚さ 50mm の MC ナイロン板に未充填シースを模擬した $\phi 40\text{mm}$ の空隙をかぶり 70mm の位置に設けたものである。測定は空隙の前後 200mm の区間を 25mm 間隔で掃引して行った。測定距離は 50mm とし、弾性波の入力は、 $\phi 15\text{mm}$ の鋼球 (14g) を加速度計内蔵のインパルスハンマ (14g) で打撃して行った。

弾性波の応答は、特性の揃った 2 つの加速度センサを瞬間接着剤で接着し、サンプリング間隔 $1.0\mu\text{s}$ で測定して記録した。また、参照のため、鋼球を敷設せずにインパルスハンマで直接打撃して入力する方法についても試行した。図-13 には測定波形の差分波形の初動振幅値の変化を示す。なお、差分波形の振幅は打撃力の強弱によって変化するため、入力波形の振幅で基準化した。図より、いずれの入力方法についても、空隙位置の前後で差分振幅の符号が正から負へ変化する傾向が見られ、疑似的なパルス入力による方法でもグラウト未充填箇所の検出が可能であることが示された。また、インパルスハンマによる直接入力の方が、点对称型の分布から乖離していることは、ハンマが測定面に鉛直に衝突しなかったことや、打撃位置が微小にずれたなど、測定上の影響によるものと考えられ、実際のコンクリート構造物の測定では、鋼球を敷設して疑似的なパルス信号を入力する方法の方が有効であることが示された。

(2) 空隙深さと測定距離に関する適用性の検討

測定距離が深さ方向に異なる空隙の検出性能に与える影響を確認するため、実験を行った。供試体は、長さ 2000mm、幅 250mm、厚さ 25mm の MC ナイロン板に未充填シースを模擬した $\phi 40\text{mm}$ の空隙を、かぶり深さ 25mm、50mm、75mm の位置に設けたものを使用した。測定点の一つは、解析によって最も差分値が大きくなることが確認された空隙の直上に設置し、もう一方の測定点を測定距離が 25mm、50mm、75mm、100mm となるように設置した。入力点は 2 つの測定点の間とした。測定点と空隙の配置を図-14 に示す。弾性波の入力は、 $\phi 15\text{mm}$ の鋼球 (14g) を加速度計内蔵のインパルスハンマ (14g) で打撃して行った。図-15 に入力波形で基準化した差分波形のピーク値の変化を示す。図より、かぶり 50mm 程度までの空隙については測定距離の影響に依らずに同程度に検出可能であることが分かった。一方かぶり 75mm では、測定距離が小さいと差分値が小さくな

り、空隙の検出が困難になる可能性が示され、解析的検討と同様の結果が得られた。

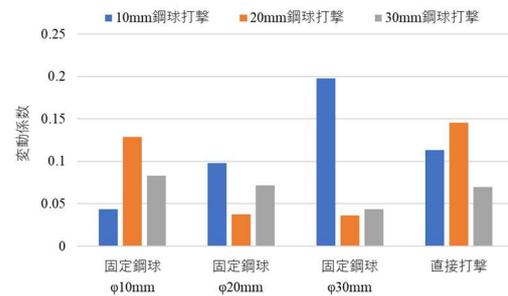


図-10 入力条件ごとの変動係数

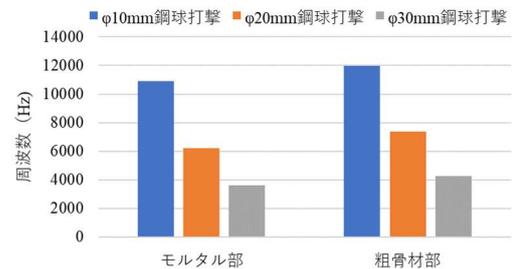


図-11 粗骨材部を入力点とした際の入力周波数

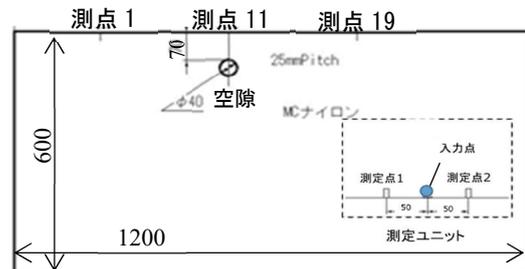


図-12 MC ナイロン供試体概要

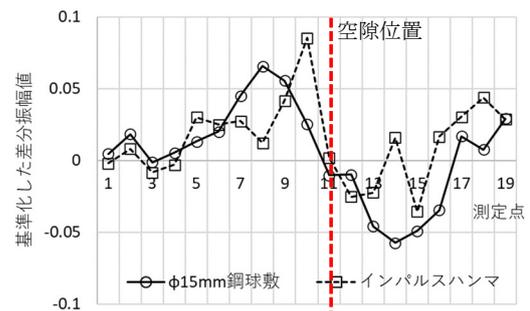


図-13 差分波形の振幅

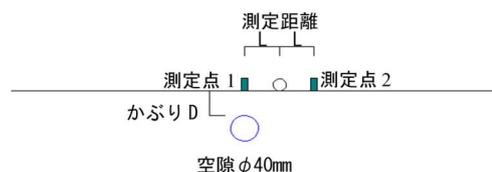


図-14 測定点と空隙の配置

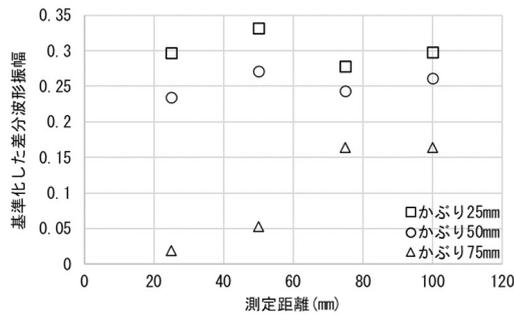


図-15 測定距離と差分波形振幅の関係

4.3 コンクリート供試体実験

疑似パルス信号入力における測定波形の差分に着目したグラウト未充填箇所の検出手法のコンクリート構造物への適用性を確認するため、コンクリート製供試体を用いた実験を行った。供試体の概要を図-16に示すが、厚さ250mmの板状試験体に、φ63mmの鋼製シースがかぶり50mmの位置に埋設されている。測定はシース埋設位置の前方300mmから後方300mmの範囲について行った。信号の入力は、φ15mmの鋼球(14g)を加速度計内蔵のインパルスハンマ(14g)で打撃して行った。なお、測定波形から計算される入力周波数は8.2kHz程度であった。測定距離は50mmとなるように特性の揃った加速度センサを瞬間接着剤を用いてコンクリート表面に設置した。入力点及び2つの測定点からなる測定ユニットは、25mm間隔で移動しながら掃引測定を行った。波形はサンプリング間隔1.0μsで測定して記録した。図-18に入力波形振幅で基準化した差分波形の振幅変化を示す。未充填シースが存在する測点13(図中波線位置)を境に点対称と見なせる変化が生じており、グラウト充填不良箇所を検知出来た。

5. まとめ

- (1)入力周波数と入力点-測定点間距離(測定距離)の組合せによって任意の深さの空隙に照準を合わせた測定を行うことができる可能性が示された。
- (2)疑似的なパルス信号を安定的に入力する場合は、測定点に接触固定した鋼球を同程度の質量の鋼球で打撃する方法が適していることが確認された。
- (3)測定距離と内部空隙の検出性能には有効となる関係が存在し、少なくともかぶりの大きい空隙に対しては測定距離の小さい配置は適さないことが確認された。
- (4)疑似的なパルス信号の入力によっても、測定波形の差分振幅に着目した方法によって、コンクリート中のグラウト未充填シースを検出することが可能であることが確認された。

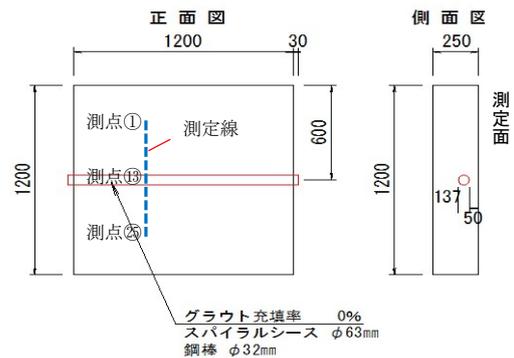


図-16 コンクリート供試体概要



図-17 コンクリート供試体測定状況

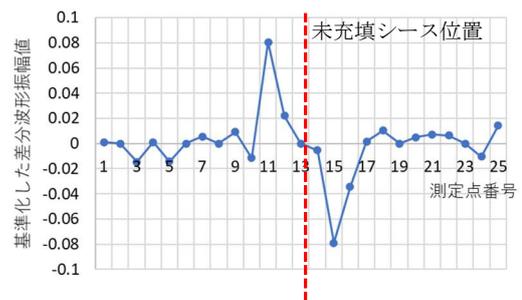


図-18 コンクリート供試体測定結果

参考文献

- 1) Sansalone, M. and Street, W.B. : IMPACT-ECHO, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y. 1997
- 2) 岩野聡史ら：衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査，コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No1, pp.1521-1526, 2002
- 3) 服部晋一ら：機械的/電磁的入力での弾性波とコンクリート中鋼材の電磁的応答を統合した PC グラウト非破壊評価手法のための基礎評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第18巻，pp.243-248, 2018.
- 4) 山下健太郎他：測定点間の差分波形に着目したコンクリート内部空隙探査に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第20巻，pp.361-366, 2020.
- 5) 山下健太郎他：2次元波動方程式の差分解析法及びび割れ深さ測定方法の検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No1, pp.2115-2120, 2016.