

論文 衝撃弾性波法による大型供試体のグラウト充填度の測定

極 檀 邦夫^{*1}・菅野 匡^{*2}・境 友昭^{*3}

要旨：著者らは衝撃弾性波法の波形分析に最大エントロピー法を適用し、既にコンクリートの厚さ測定で良好な結果を得ている。本稿では、この衝撃弾性波法の PC 桁のグラウト充填度評価への適用可能性を実験と解析で考察した。実寸試験桁に埋設されたグラウト充填度の異なるシースを、衝撃弾性波法により測定した。さらに、有限要素解析によって測定原理を検証し、考察を加えた。エコーの MEM スペクトログラムは、充填されているか否かを識別可能にした。

キーワード：PC 桁，グラウト，衝撃弾性波法，欠陥探査，縦弾性波，曲げ振動

1. はじめに

社会資本の老朽化が問題となり、社会資本の維持に要する費用の社会負担の方法が議論されている。コンクリート構造物の維持を考えると、構造上の問題でありかつ、それが将来構造物の機能を滅失させる潜在的問題に、PC 桁の場合などでは PC グラウトの非充填問題がある。グラウトが充填されていないシース内にある鋼材は、腐食し、やがて荷重に抗しきれなくなり破断する。これが、構造物の変形を、最終的には落橋をもたらす。

通常は、落橋に至る前に、目視点検によって変形が発見され、補修されることになるが、この費用は少なくない。鋼材が腐食する前に、非充填シースを発見すれば、グラウトを注入することは比較的容易であるから、この問題は、早期発見が大きな費用対効果をもたらす典型といえる。

筆者らは、昨年衝撃弾性波法による PC 桁シースのグラウト充填度の推定方法について、その理論及び実橋梁での測定結果を報告した¹⁾。しかしながら、その測定では、グラウトが実際

に充填されているものか否か、検証が許されなかった。このため今回は、グラウト充填度評価方法の開発を目的として製作された、充填度が既知のシースを持つ実寸試験桁を用いて同様の試験を行い、衝撃弾性波法の適用性について検討した。さらに、グラウトが完全に充填されているときとそうでないときをモデル化した 2 次元弾性波動解析を有限要素法を用いて解析し、衝撃弾性波法の適用性に関して考察した。

2. 衝撃弾性波の理論

2.1 板厚の測定方法

衝撃弾性波法は、測定面に入力された弾性波が構造物の厚さ方向に多重反射することを前提としている。図-1 に測定方法を示す。衝撃波動は、鋼球などでコンクリート表面を打撃して入力する。コンクリート構造物の振動応答は、Sansalone²⁾らの開発したインパクトエコー装置では、コンクリート表面変位を、筆者らの方法では、加速度を測定している。波動が多重反射すると、往復時間を周期とする固有振動数が見られるようになる。すなわち、音響学にいうフ

*1 東海大学工学部土木工学科助教授 工修 (正会員)

*2 日本道路公団東京管理局小田原管理事務所維持助役 工修 (正会員)

*3 アプライドリサーチ㈱代表取締役 工博

ラッターエコー現象である。測定されたコンクリート表面の振動の周期を T , コンクリート中の縦波速度を V_p とするとコンクリート板の厚さ D は次の式で与えられ, 周期を測定すれば, 厚さを推定できる。

$$D = \frac{1}{2} V_p T \quad (1)$$

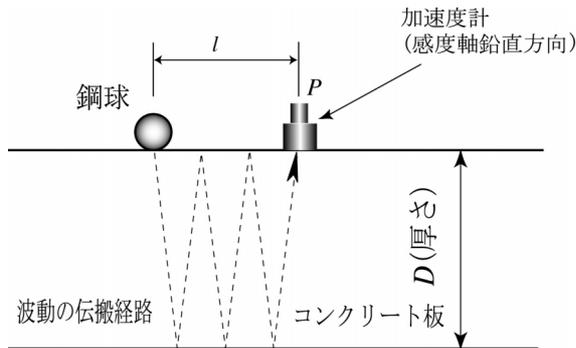


図-1 衝撃弾性波法

2.2 内部欠陥の測定方法

シースの非充填のような内部欠陥がある場合には, 図-2 に示すような反射波が発生する。図-2 は, 測定波において支配的な反射経路を示すものであって, 経路を網羅しているわけではない。(a) は, 欠陥を迂回して底面との間で多重反射となる場合であり, 厚さが測定される。(b) は, 欠陥部と測定面との間での多重反射であり, 欠陥の深さが測定される。

シースカぶり薄いときには, 欠陥とコンクリート表面との間で, コンクリート板の曲げ振動と同様の振動が発生する。

今, 浅い位置の欠陥を図-3 のようにモデル化すると基本振動数は, 矩形板の振動理論³⁾により次式となる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2}{B^2} \sqrt{\frac{Q}{\rho}} \quad (2)$$

ここで, B は空洞の短辺長, Q は板の曲げ剛性, ρ は, 単位面積あたり質量である。 λ は特性方程式の解であり, 縦横比 1, 周辺固定の支持条件では, 基本振動数に対して 3.646 である。

空洞の短辺をシース直径とし, 空洞の長辺を非充填領域の空隙の長さとするれば, 式(2)で得られる振動数が, 曲げ振動数を与える。

シースカぶりが 80mm, シースの直径が 65mm であれば, 非充填領域の長さが直径の 1.5 倍程度するとき, 非充填シースからのエコー周期と曲げ基本振動数が 22kHz で一致する。非充填領域の長さがこの近辺であれば, エコーを見て周期を読まなければ, 曲げ振動と弾性波の反射かを区別できない。スペクトルだけから判断すると, コンクリート内部にある何か別のものからのエコーと誤認する可能性がある。また, 非充填長さが大きいときでも, シースかぶりの高次の曲げ振動が発現するから, 空洞からの反射波周期と近接する可能性は, 無くならない。このときも, エコーを見て周期から, いかなる振動かを見極めてから, スペクトルをみなければならぬ。

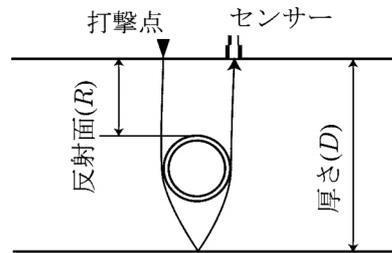


図-2(a) 反射経路 a

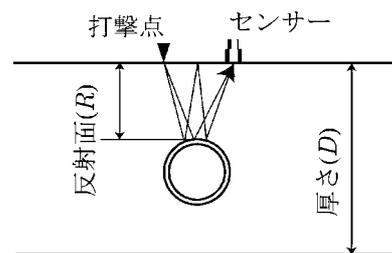


図-2(b) 反射経路 b

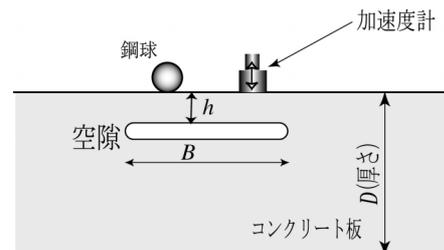


図-3 測定点直下の空洞

3. 実寸試験桁と測定方法

測定に使用した試験桁のシー配置を記入した側面図および衝撃弾性波法の測定位置 (Line-1 から Line-6) を図-4, また全景写真を写真-1 に示す。試験桁は, 長さ 35m, 桁幅 0.35m, 高さは, 1.8m である。直径 65mm のシーを 5 本配置し, 部分的に充填することで, 充填部および非充填部を用意した。

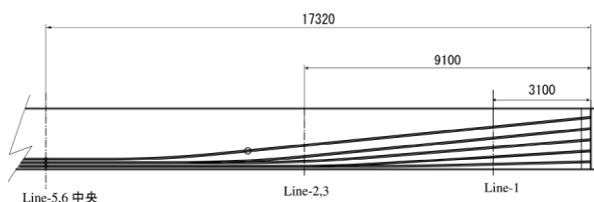


図-5 実寸試験桁鋼材配置



写真-1 実寸試験桁

測定は, 各測定線 (Line) の桁下端から 0.1m 位置を起点として, 0.02m 間隔で下から上方向, 測定線に沿って行った。衝撃弾性波法測定装置などの仕様の概要を表-1 に示す。測定周波数範囲は, 加速度計を測定面に押しつける方法を用いていることから 25kHz 以下に制限される。

測定波形の解析では, 最大エントロピー法 (MEM) によって自己相関関数を求め, そのフーリエ積分によって周波数成分を求める方法によって行った。また, 分析された周波数は, 式(1) の関係を用いて, 測定面からの距離に換算して表示した。ここでは, 弾性波速度を 3,800m/s と

している。

表-1 測定システムの仕様

対象	項目	仕様
インパクト	鋼球 15mm	14g
センサー	加速度計	10mV/m/s ²
測定	サンプリング時間	10 μs
	測定時間長	8ms
	測定周波数	25kHz
	A/D 変換精度	12Bit
解析	MEM 法, MEM スペクトログラム	

4. 測定結果

4.1 Line-1 の結果

Line-1 での測定結果を図-6 に示す。Line-1 の桁断面では, シーは桁幅方向中央に配置されている。

図は, 横軸を周波数(ただし, 距離に変換), 縦軸を測定位置(桁下端を起点)とし, スペクトルの強さをグレースケールで示している。色が濃いほどスペクトルが強くなる。解析は, MEM でスペクトログラムを解析し, その平均値を求めるといった方法 (Time Weighted MEM) によって行っている。この解析方法では, 継続時間の長いスペクトルが強調されることが特徴であり, コンクリートスラブの厚さを測定する方法として用いている。

図-6 から明らかなように, 測定面から 0.34m 前後にスペクトルが集中しているが, この橋梁桁の厚さが 0.35m であることから, この近傍スペクトルは, 桁の厚さに起因する多重反射の周波数成分と判断してよいであろう。これに対し, 桁下面から 0.25m, 0.4m, 0.6m, 1.1m 付近には, 桁の厚さの 1/2 の深さあるいはその近傍にやや強いスペクトルが見られる。これが, 非充填シーである。また, このように厚さ以外の深さでのスペクトルが見られる位置では, 測定された厚さが厚くなる傾向を示している。これは, 内部に欠陥がある場合, かぶりの曲げ振動によって見かけの弾性波速度が低下しているためと推測される。

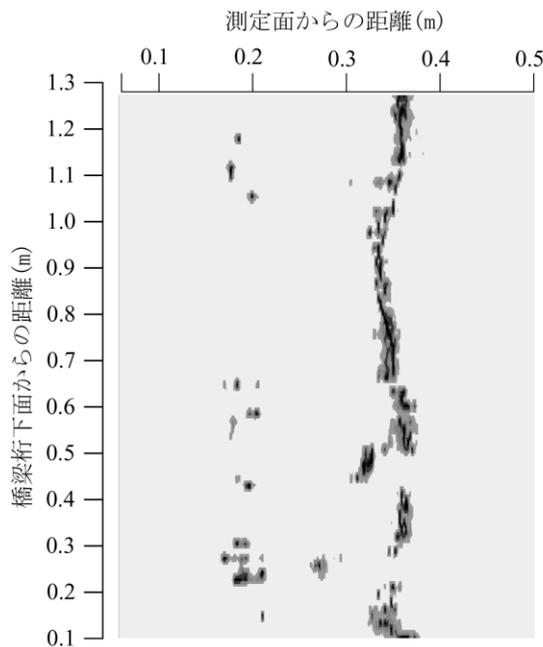


図-6 Line-1の測定結果

置するが、図-7,8に顕著な違いは見られない。

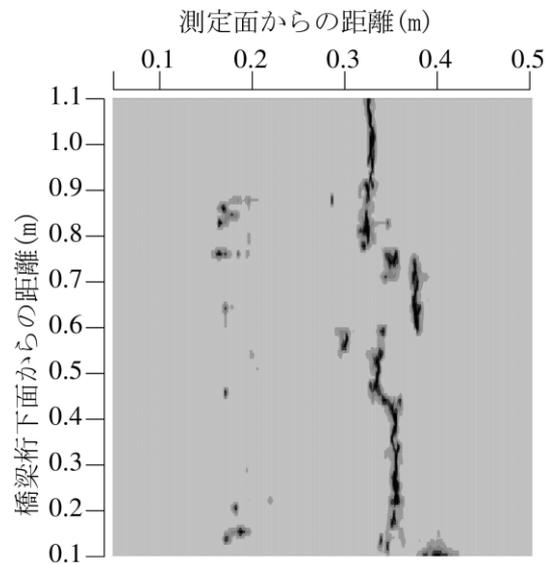


図-7 Line-2の測定結果

表-2 Line-1の測定結果の比較

シース 番号	設計位置	測定位置	充填度	
			設計	測定
1	1.352	1.20	×	
2	1.001	1.05		
3	0.706	0.65	×	×
4	0.410	0.42		
5	0.169	0.22	×	×

:充填, ×:非充填, :不明

表-2に測定結果を示す。番号はシースを示し、位置は、桁下面からの距離である。設計充填度は、試験桁製作時の充填の実際を示し、測定充填度は、図-6の測定結果から評価したものである。また、測定結果でとしたものは、充填度評価において完全充填でも非充填でもないとして評価されたものである。

4.2 Line-2,3の測定結果

Line-2,3の測定結果を図-7および8に示す。Line-2と3は、同一測定断面で桁の左右側から測定したものであり、スペクトルパターンに類似性が見られる。表-3に示すように、この断面では、シース4,5番は同一断面を通り、Line-2側に4番(充填)、Line-3側に5番(非充填)が位

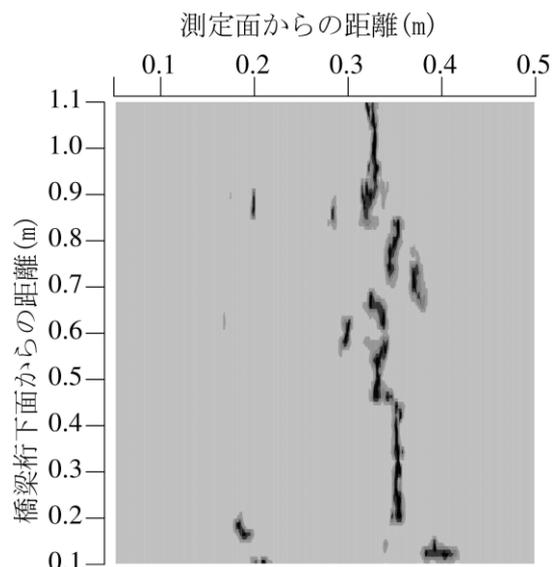


図-8 Line-3の測定結果

表-3 Line-2,3の測定結果の比較

番号	設計位置	測定位置	充填度	
			設計	測定
1	0.775	0.850	×	
2	0.423	0.650		
3	0.267	-	×	
4,5	0.101	0.150	,×	×

:充填, ×:非充填, :不明

表-3に測定結果を示す。同一断面を通るシースの一つに非充填部があったとしても、その位

置を決定できないことが示される。

4.3 Line-6(桁中心)の測定結果

Line-6の測定結果を図-9に示す。桁中央では、シース1は、断面幅方向の中心に配置され、シース2から5は、かぶり78.5mmに配置されている。図では、MEMによるスペクトル解析の結果も併記している。

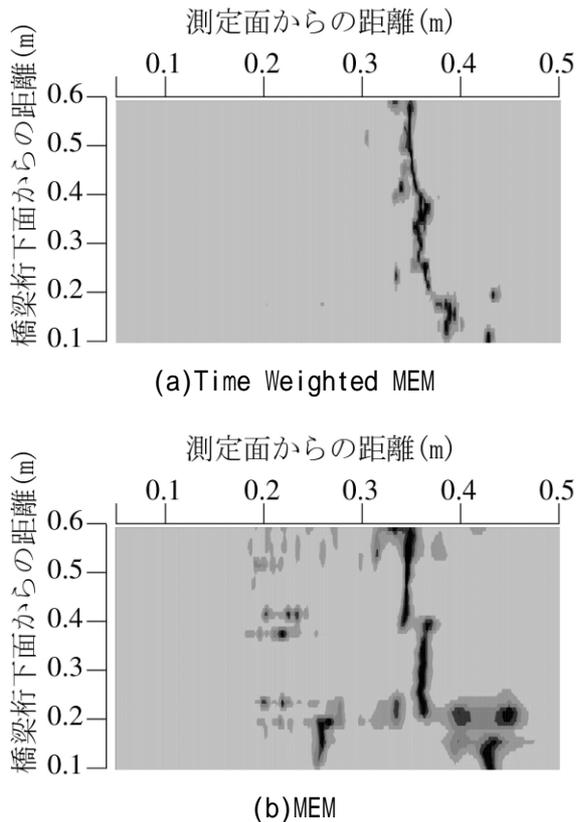


図-9 Line-6の測定結果

表-4 Line-6の測定結果の比較

番号	設計位置	測定位置	充填度	
			設計	測定
1	0.340	0.250		
2,3	0.220	0.240	, x	x
4,5	0.100	0.100	,	x

:充填, x:非充填, :不明

Time Weighted MEMでは、厚さ近傍のスペクトル以外は、ほとんど観測されない。これに対し、MEMでは、0.1から0.2mおよび0.35mの位置に厚さ以外のスペクトルが見られる。また、0.2mより下の位置では、推定厚さが0.4m以上

となり、厚さ方向の多重反射の周波数よりも低い周波数成分が発生しているものと考えられる。実際、Line-6は、Line-1の断面よりもシースかぶりが薄い。このため、かぶりの曲げ振動の加速度は、Line-1よりも大きく、測定され易い。

5. 弾性波動解析

衝撃弾性波法の適用性を検証するために、有限要素過渡応答解析を行った。シース内にグラウト充填されているモデルと充填されておらず空洞となっている2つのモデルを作成し、パルス外力を加えて波動の伝搬を調べた。

図-10は、非充填モデルの有限要素である。充填モデルは空洞の無い矩形断面である。いずれも実験と同じ幅340mmの断面で、対称性を考慮し、上下の半分をモデル化した。モデルの高さは171mmである。メッシュ代表長さは1mmである。試験桁の高さは十分に大きく、モデル端部からの反射波を防ぐためにモデルの上端には、6節点無限要素を配した。モデルの上端は、すべての自由度を固定し、モデル下端は、面外の自由度を拘束した。節点数は、充填モデルで58652、非充填モデルで、95000。要素数は、同様に58140、94180である。

断面は、充填モデル、非充填モデルともに、平面ひずみモデルを用い、コンクリートのYoung係数を $2.8 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、Poisson比を0.17、密度を $2.35 \times 10^{10} \text{kg/m}^3$ とした。力学特性値から導かれるコンクリート内の縦波伝搬速度は、3,600m/sである。

過渡応答解析には、 β を1/4とするNewmarkの β を用いた。コンクリートの弾性波周波数は、100kHz程度までであるから、これをカバーするために、時間間隔を2 μsec とした。シース内欠陥からの反射波の到達時間は、38 μsec であるから、この反射を見るのにも十分短い時間間隔である。また、要素代表長さの1mmは、時間間隔に弾性波が7要素進むのに相当している。衝撃力には、断面内の弾性波伝搬を調べる目的で、

2 μ sec の矩形パルスを時刻 2 μ sec から 4 μ sec まで、
 図-10 の矢印に示すモデル左下の位置に入力した。解析コードは、MSC.Marc を用いている。

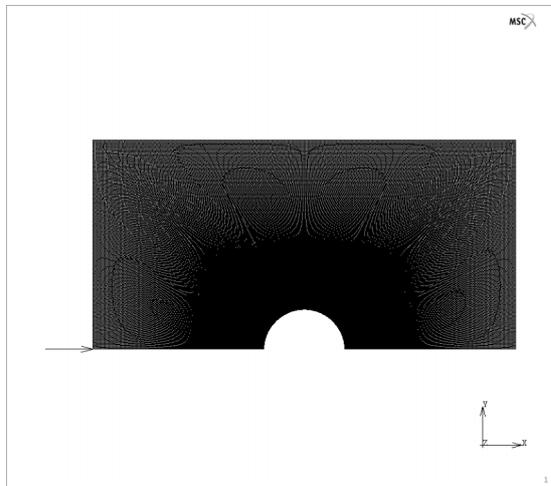


図-10 非充填モデル

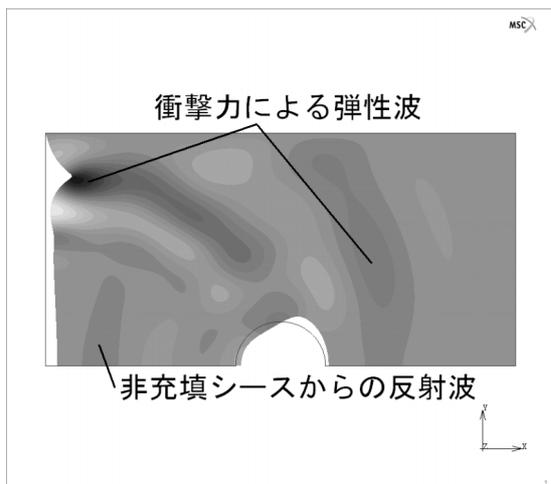


図-11 断面内加速度応答

図-11 に、シースから反射してきた縦波が表面に到達する直前の、断面内の幅方向加速度の分布を示す。衝撃力によって発生した弾性波と反射波の存在を捕らえている。

図-12, 13 は、パルス入力点から 30mm 上方のコンクリート表面における加速度応答の時刻歴を示す。充填モデルが反対面からのエコーのみであるのに対して、非充填モデルは、シースからの、比較的高いエコーを検出している。よって、衝撃弾性波によるシース位置検出の可能

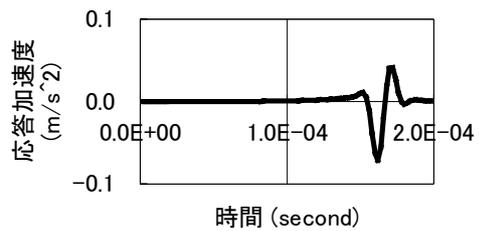


図-12 充填モデル表面加速度時刻歴

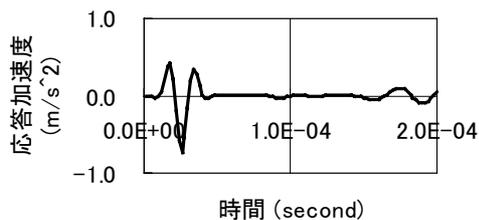


図-13 非充填モデル表面加速度時刻歴

6. まとめ

測定波形を解析する方法として、(a)測定した全波形からスペクトルを求める方法と(b)時間領域の波形ごとに MEM スペクトル解析し、その平均値を出力とする Time Weighted MEM の2つの解析方法を用いた。(a)法はコンクリートの内部欠陥などに敏感に反応し、(b)法は、コンクリートの厚さ、非充填シース深さの情報をよく解析した。

実際的な測定解析では、まず(a)法によって PC 桁内部の情報を含めて探査し、ついで(b)法によって深さの情報が解析できるかどうか吟味することで、充填度評価の精度をあげられる。

参考文献

- 1) 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法による橋梁シースの充填度の測定, コンクリート工学年次論文集, 2002.6
- 2) Sansalone M.J. and Streett W.B.: Impact- Echo, Bullbrier Press, 1997
- 3) Gorman D.J.: Free Vibration Analysis of Rectangular Plates, Elsevier North Holland, 1982