

弾性波によるPCグラウト充填評価手法の実構造物への適用

鎌田 敏郎¹・浅野 雅則²・川嶋 雅道³・内田 慎哉³・六郷 恵哲⁴

¹正会員 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail:kamada@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 (株)リハビリ・リサーチ・ラボラトリー (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

本論文は、弾性波によるPCグラウトの充填評価手法として、I: 部材軸方向に弾性波を伝播させる場合、II: 部材断面方向に弾性波を伝播させる場合の2ケースについて、既設の実構造物への適用性を検討したものである。Iでは桁の横締め鋼棒を対象とし、伝播速度を用いて評価を試みた。一方、IIでは桁の主ケーブルを対象とし、周波数スペクトルに着目した評価を行った。いずれも評価結果の妥当性を検証するため、削孔結果と比較した。その結果I、IIの両ケースにおいて、実構造物に対して相応の適用性を有することが認められ、本手法が、今後、現場での有効な評価手段となり得る可能性が確認された。

Key Words : PC structure, nondestructive tests, elastic-wave methods, wave velocity, fast Fourier transform, multitaper method

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物では、PC鋼材を腐食から保護するためにシース内にグラウトが充填される。PC鋼材の腐食は鋼材の破断につながり、構造物の耐荷性能および耐久性能を著しく低下させる要因となりうる。イギリスにおいて、1980年代にPC鋼材の腐食に起因するPC橋梁の崩壊が報告¹⁾されており、わが国においても類似現象の発生が懸念される。このため、PCグラウトの充填確認は極めて重要な意味を持つものと考えられる。

PCグラウトの充填不良の検出方法に関しては、種々の非破壊試験方法の適用が可能と考えられている²⁾。PCグラウトの充填評価手法として、これまでにX線法³⁾、超音波法⁴⁾および衝撃弾性波法⁵⁾などの研究が行われてきた。特に近年では、比較的試験条件に制約の少ない衝撃弾性波法が広く検討されている。この手法は、PC鋼材軸方向に弾性波を伝播させる手法(図-1参照)と、部材の断面方向に弾性波を伝播させる手法(図-2参照)とに大別される²⁾。

前者は、部材長全体にわたっての平均的なグラウト充填状況を把握するための概略検査法として位置づけられており、弾性波パラメータとして、周波数分布⁶⁾や波形

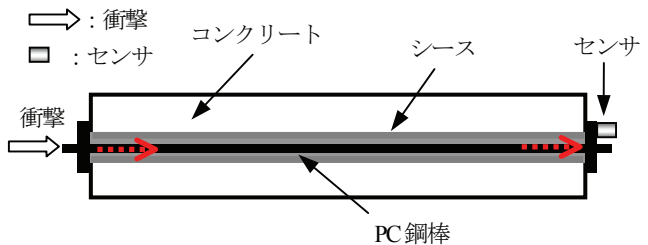


図-1 部材軸方向への弾性波伝播

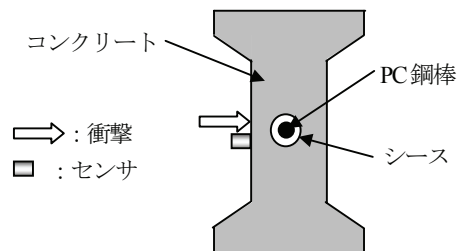


図-2 部材断面方向への弾性波伝播 (インパクトエコー法)

エネルギー⁷⁾などを用いてグラウト充填程度の評価を行うものである。これに関連して、著者らは、特に弾性波伝播速度を用いた検討⁸⁾を行っており、その有効性を供試体実験にて実証している。さらに3次元FEM解析により、部材内の波動伝播からみた弾性波速度の変化の機構

についても検討しており⁹⁾、理論的な面からも弾性波速度の有効性を明らかにしている。

一方、後者は、部材における未充填位置を特定するための詳細検査法としての適用の可能性を有するものである。この手法は、シーす直上のコンクリート表面から弾性波を部材内部に入力し、空隙表面で反射される波動成分による縦波共振現象を計測するものである。これにより、得られた周波数分布におけるピークの有無と周波数の値によって空隙の存在および位置が推定できる。この手法では、周波数分布において共振周波数を特定する必要があり、空隙からの反射に起因する成分を如何に抽出するかが問題となる。これに関連して、インパクトエコー法¹⁰⁾では、受振波形における表面波成分をカットし、縦波共振現象に起因する成分を抽出する方法が提案されている。他方、MEM (Maximum Entropy Method) を用いて縦波共振現象に起因するピーク周波数を特定する手法も検討されており、供試体実験での有効性が示されている¹¹⁾。

しかしながら既往の知見は、供試体レベルでの確認は行われているものの、手法の有効性を実構造物において検証した例はほとんどない。

そこで本論文では、まず、弾性波を軸方向に伝播させる手法(図-1 参照)について、供試体実験を行い、評価指標の有効性を再確認した。続いて、供用中の橋梁 PC 桁の横締め鋼棒を対象として、弾性波伝播速度を用いたグラウト充填評価を試みた。実構造物での検討手順としては、対象とした鋼棒ごとに弾性波伝播速度を求め、値の分布状況などを詳細に調べた。その後、削孔を行い、目視調査の結果と弾性波伝播速度との対応関係を明らかにした。さらに、目視調査により未充填が認められたシーすについては、グラウトの再充填を行い、再充填の前後での弾性波速度の変化を評価した(2章)。

一方、弾性波を部材断面方向に伝播させる手法(図-2 参照)でも、まず、供試体実験で評価原理の確認を行った。また、ここでは実構造物への適用にあたっての手法の改善を試みた。具体的には、周波数分布の算出にあたり、受振波形の表面波成分をカットするとともに、周波数分析手法として Multitaper Method (以降 MTM とする)¹²⁾ を用いた評価を行った。MTM と高速フーリエ変換 (以降 FFT と呼ぶ) との間で有効性の比較を行うとともに、シーす深さに相当するスペクトルピークの出現状況を確認した。続いて既設の橋梁 PC 桁の主ケーブルを対象として、供試体実験での検討結果を踏まえて、グラウト充填評価を行った。ここでも削孔後に目視検査を行い、未充填箇所の有無と評価結果との関係を明らかにした(3章)。

さらに、本研究で用いた2つの手法について、実構造

物への適用に際しての両者の位置づけと具体的手順に関する提言を行った(4章)。

最後に、5章で結論を示した。

2. 部材軸方向でのグラウト充填評価

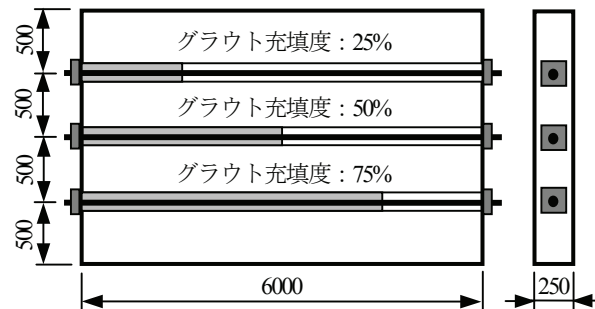
(1) 供試体実験による評価指標の確認

ここでは、実構造物で計測された弾性波伝播速度と比較するため、著者らが行った供試体実験での研究成果⁹⁾を簡単に述べる。

供試体は、2000mm×250mm×6000mmのPCスラブである。写真-1および図-3にスラブ供試体の概要を示す。供試体のコンクリートの水セメント比は37%である。シーすはφ35mmのコンジットシーす、PC鋼材にはPC鋼棒B種1号φ23mmを使用した。また、グラウト充填度の違いが弾性波伝播速度に与える影響について検討するため、グラウトの充填度を25、50、75% (図-3 参照)と、0%および100%と変化させた。グラウト充填度が0および100%の場合のスラブ供試体寸法および構成材料は、その他のグラウト充填度の供試体(写真-1および図-3 参照)と同じである。なお、本研究では、グラウト充填度を、シーす内部全空隙容積に対するグラウト容積の占める割合として定義した。



写真-1 スラブ供試体の一例



[単位: mm]

図-3 スラブ供試体

弾性波の入力位置および受振位置を図-4に示す。弾性波の入力位置は、図に示すとおり、PC鋼棒端部の中央部分とした。また、弾性波の入力には、常に一定の打撃力を与えることができる打撃装置(写真-2)を用いた。弾性波の入力方向の違いが評価パラメータに与える影響を把握するため、グラウト充填側および未充填側からそれぞれ10回ずつPC鋼棒を打撃した。打撃状況を写真-3に示す。この装置の打撃部分は、鋼製の球形状となっている。そのため、パルス状の弾性波を入力することが可能である。

一方、弾性波の受振位置は、PC鋼棒両端部の定着プレート上(写真-3参照)とした。また、弾性波の受振には、150kHz共振型AEセンサ(写真-3参照)を使用した。伝播時間の計測には、AE計測システムを用いた。AEセンサ間距離を伝播時間で除すことにより弾性波伝播速度を算出した。弾性波伝播速度を評価指標として、部材軸方向でのグラウト充填評価を行った。

10回の打撃によって計測された弾性波伝播速度を、グラウト充填度が0、50および100%に分類して表-1にそれぞれ示す。この表に示す変動幅とは、各充填度のケースごとに算出された伝播速度の平均値に対する速度の最大値から最小値を引いた値の比率として求めたものである。これによると、いずれの充填度の場合も、計測ごとの伝播速度の変動幅は小さい。このため、これ以降の弾性波伝播速度は、10回計測した伝播速度の平均値を採用することとした。

図-5に弾性波伝播速度とグラウト充填度との関係を示す。これによると、グラウト充填度が大きくなるに従って、弾性波伝播速度が小さくなる傾向が明瞭に確認できる。特にグラウト充填度が0%の場合に着目すると、伝播速度は5000m/sより大きい値を示していることがわかる。これは、入力された弾性波がPC鋼棒のみを伝播するため、鋼棒単体での伝播速度に近い値を示したものと考えられる。これに対して、鋼棒の周囲にグラウトが充填された場合、鋼棒とグラウトが一体となった複合部材中を弾性波が伝播する。そのため、入力された弾性波はPC鋼棒周辺のグラウトによる拘束の影響を受けるため、鋼棒単体の場合とは弾性波の伝播挙動が明らかに異なる。これにより、グラウト充填度が大きくなるに従い、弾性

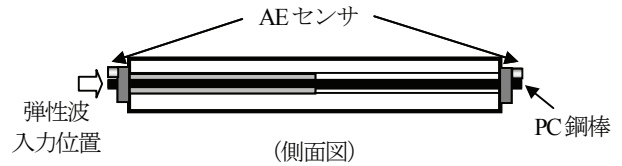


図-4 弾性波入力位置および受振位置



写真-2 打撃装置

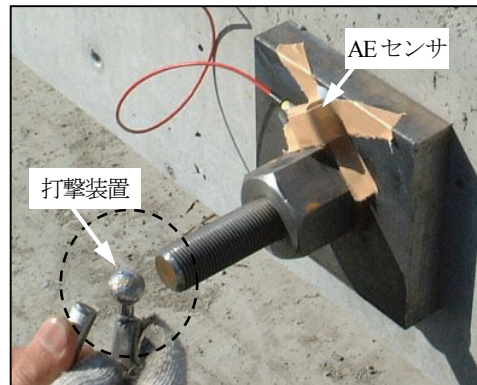


写真-3 打撃およびAEセンサ貼付け状況

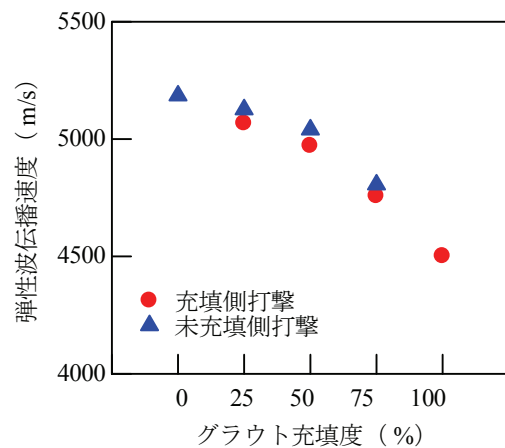


図-5 グラウト充填度と弾性波伝播速度の関係

表-1 打撃回数ごとの弾性波伝播速度の変動

グラウト充填度	打撃回数 (回)										平均値	変動幅 (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0%	5176 m/s	5180 m/s	5180 m/s	5187 m/s	5189 m/s	5189 m/s	5185 m/s	5191 m/s	5190 m/s	5185 m/s	5185 m/s	0.3
50%	4958 m/s	4981 m/s	4966 m/s	4974 m/s	4933 m/s	4980 m/s	4975 m/s	4982 m/s	4978 m/s	4978 m/s	4971 m/s	1.0
100%	4459 m/s	4462 m/s	4516 m/s	4517 m/s	4516 m/s	4514 m/s	4508 m/s	4508 m/s	4502 m/s	4506 m/s	4501 m/s	1.3

波伝播速度が小さくなるものと考察できる。しかも、伝播速度は、弾性波がグラウトとPC鋼棒の複合部材中をより長く伝播するほど、その影響が顕著に現れることが確認できた。

図-5において、弾性波の入力方向に着目した場合、入力方向の違いによる速度差は小さい。これより、実構造物での計測においても、実用上は入力方向の影響を考慮する必要はほとんどないものと考えられる。

以上のことから、弾性波伝播速度は、部材軸方向におけるグラウト充填評価において、感度の良好な評価指標であることが明らかとなった。



(a) A橋



(b) B橋

写真4 橋梁 PC 桁

(2) 実構造物での適用実験

a) 対象とした実構造物の概要

供用中の橋梁PC桁の横締め鋼棒を対象として、弾性波伝播速度の実構造物でのグラウト充填評価への適用性について実験を行った。PC桁の横締め鋼棒は、単体のPC桁を架設後、現地でひとつの橋梁構造物として一体化するためのものである。したがって、直接活荷重の影響を受けるものではないが、その機能が鋼棒の腐食により減じることは避ける必要がある。

実験を行った部材は、写真-4に示す2種類の橋梁（A橋およびB橋）におけるPC桁である。

図-6に各橋梁の橋軸方向断面図を示す。いずれの橋梁も、それぞれ上り線および下り線を有している。各橋梁における横締め鋼棒の配置図を、計測箇所および鋼棒名

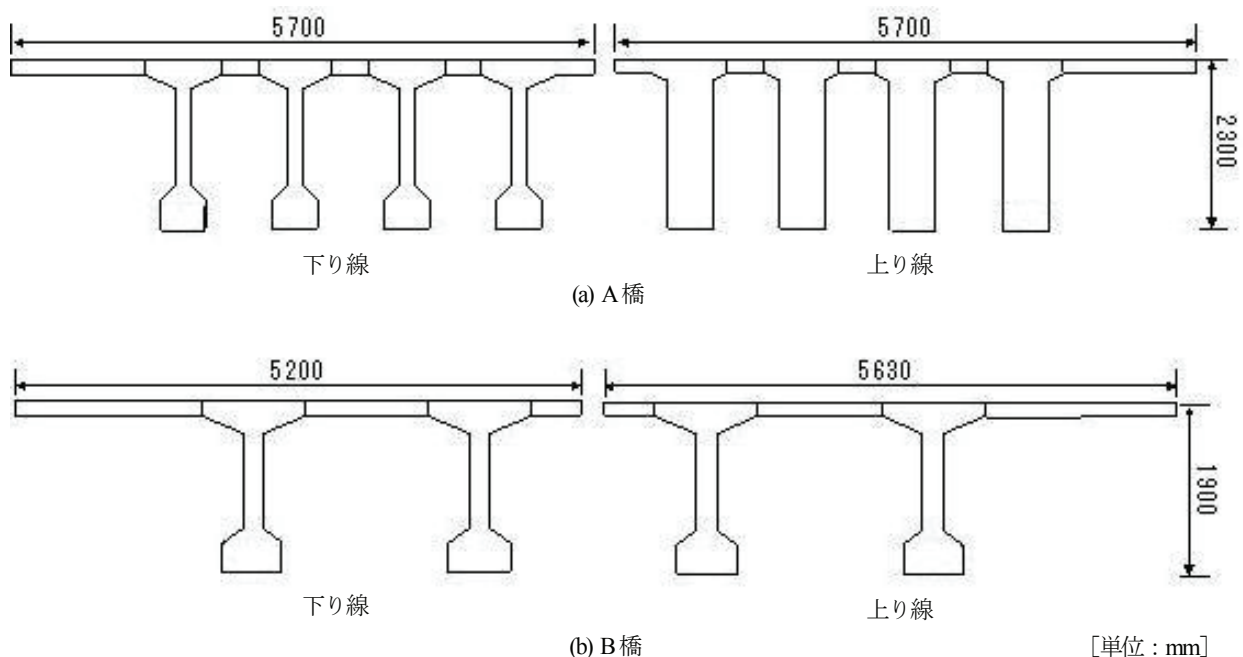


図-6 橋軸方向断面図

と併せて図-7に示す。図中には、橋梁名をAおよびB、上り線と下り線をそれぞれUおよびDとして、計測した横締め鋼棒の記号を表示（例えば、A橋上りの計測箇所1はAU1）した。なお、伝播速度の計測を行った横締め鋼棒は、A橋上り線9本、下り線24本、B橋上下線とも各12本の合計57本である。

b) 現場での弾性波計測方法

A橋およびB橋における弾性波の入力位置および受振位置を、センサ間距離と併せて図-8に示す。A橋上り線（図-8 (a) 参照）の場合では、現場にて足場を設置することが難しい状況だったため、その他のケースと異なるセンサ配置および打撃位置とした。弾性波の入力には、供試体実験で使用した打撃装置（写真-2 参照）を用いた。弾性波の入力にあたっては、事前に保護コンクリートをはつり、鋼棒端部を露出させた。打撃は、鋼棒端部の中央部分で行った。写真-5に弾性波の入力状況を示す。打撃回数は、供試体実験と同様に10回とした。弾性波の受振には、写真-6に示すように、150kHz共振型AEセン

サを使用した。AEセンサはコンクリート表面に接触媒質を介してガムテープにより貼付けた。なお、センサを貼付けるコンクリート表面部は、紙やすりで研磨し、平滑にした。現場での伝播時間計測は、供試体での計測と同様、AE計測システムを使用し、センサ間距離を伝播



写真-5 弾性波の入力状況

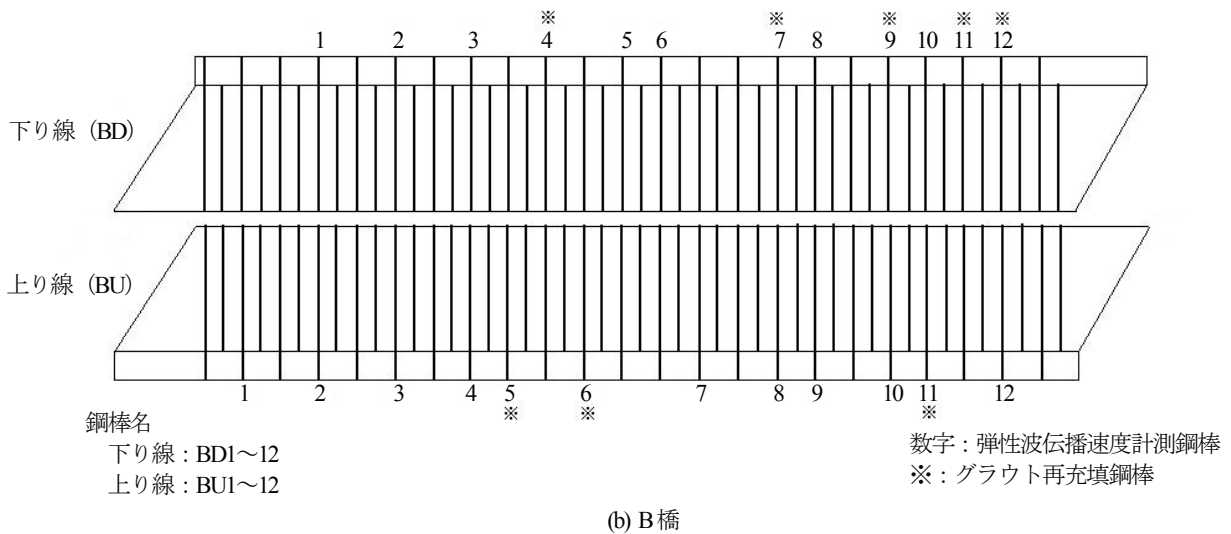
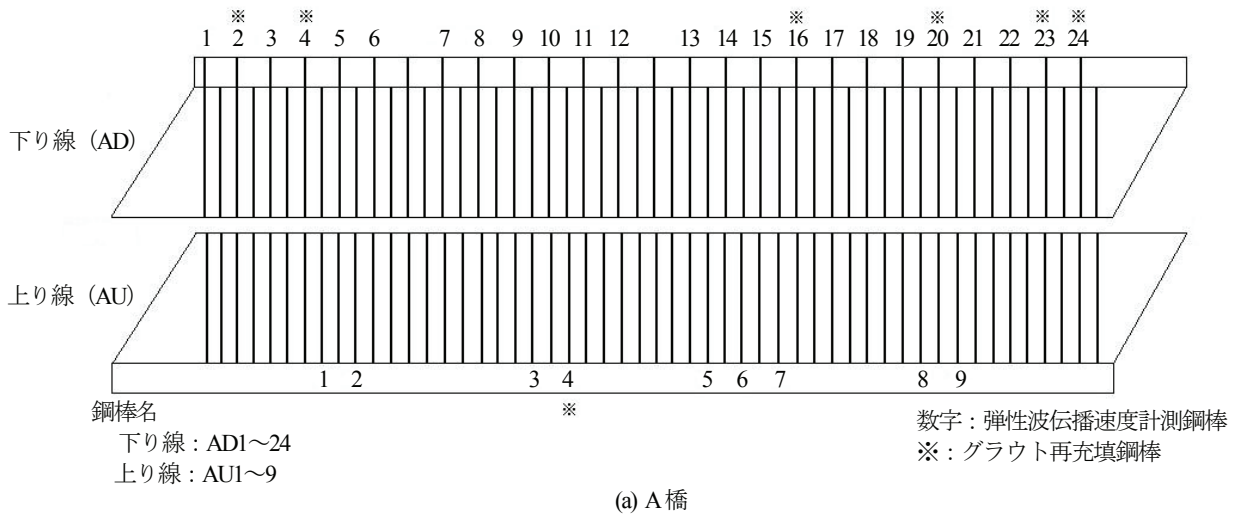


図-7 横締め鋼棒配置図

時間で除すことにより伝播速度を算出した。

一方、得られた弾性波伝播速度と実際のグラウト充填状況との対応関係について検討するため、鋼棒ごとにコンクリート部分を数カ所削孔し、目視によってシース内部のグラウト充填状況を確認した。また、削孔の結果、空隙が認められたシースについては、グラウトの再充填を行った。さらに、その後、再び弾性波の伝播速度計測を行い、グラウト再充填前後での伝播速度の変化についても併せて検討した。

c) 計測結果と考察

・弾性波伝播速度

図-9～10に、A橋およびB橋で得られた弾性波伝播速度を、横締め鋼棒番号と併せて示す。図-9 (a)は、A橋上り線で計測した9本の伝播速度である。これによると、大半のケースにおいて、伝播速度は4400m/s前後の値を示している。これに対して、AU4およびAU9では、他の鋼棒と比較して、伝播速度が相対的に大きくなっている。特にAU9は、伝播速度が5031m/sと突出した値となった。これは、前節での供試体実験で述べたとおり、入力された弾性波がPC鋼棒を伝播するとき、グラウトによる一体化の影響などを受けないことに起因するものと考えられる。よって、これら2つの鋼棒については、AUシリーズのその他の鋼棒よりも、グラウト未充填箇所を含む可能性が高いと考えられる。

A橋下り線で計測した24本の鋼棒の伝播速度を図-9 (b)に示す。A橋下り線では、上り線に比べて、全体的にやや小さめの値を示している。また、伝播速度が最大のもので5200m/s (AD24)、最小のものでは3953m/s (AD23)と、同一の桁における速度の分布幅は大きい。少なくともこれらの結果より、上り線に比べれば下り線の方が、対象とした鋼棒のグラウト充填状態のバリエーションは大きい可能性が考えられる。また、弾性波伝播速度が5000m/sを越えるAD20あるいはAD24については、上り線

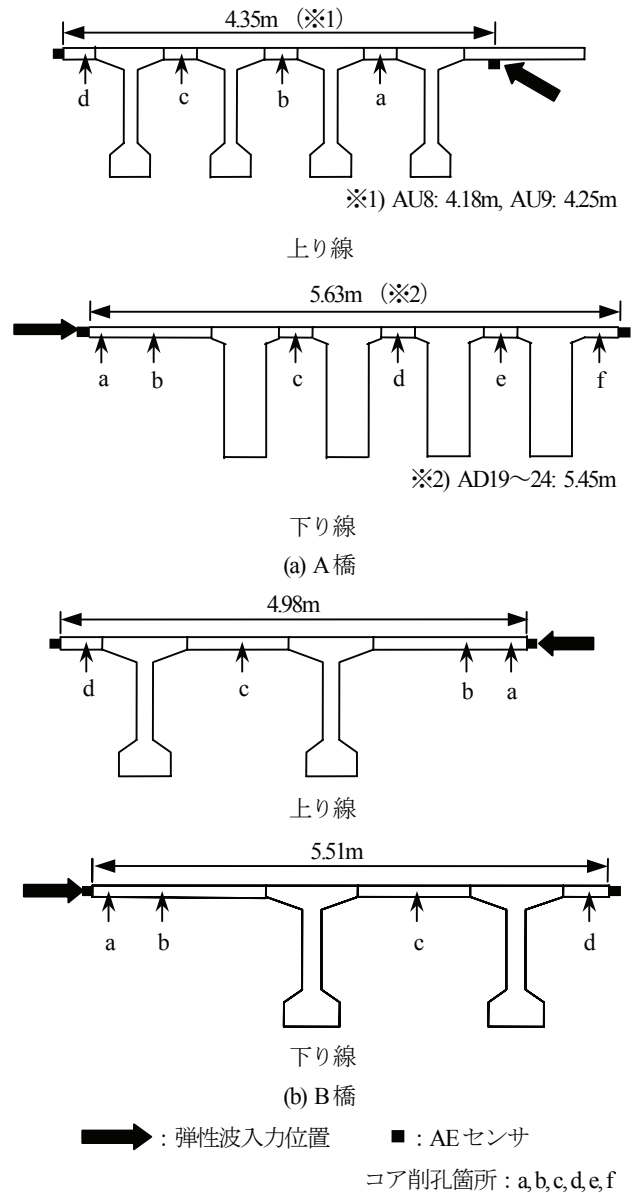
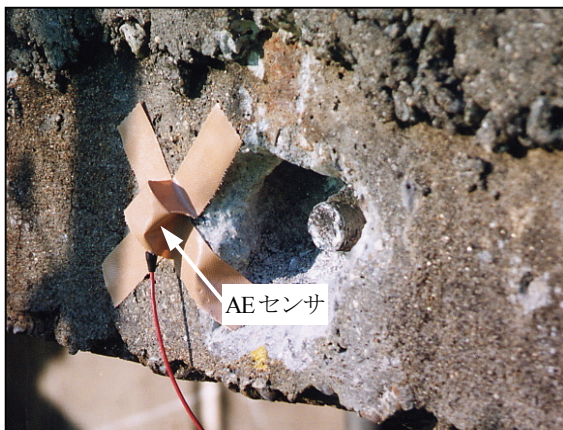


図-8 弾性波入力位置と受振位置および削孔箇所



(a) 弾性波入力位置近傍の AE センサ



(b) 入力位置と反対側の AE センサ

写真-6 AE センサ貼付け状況

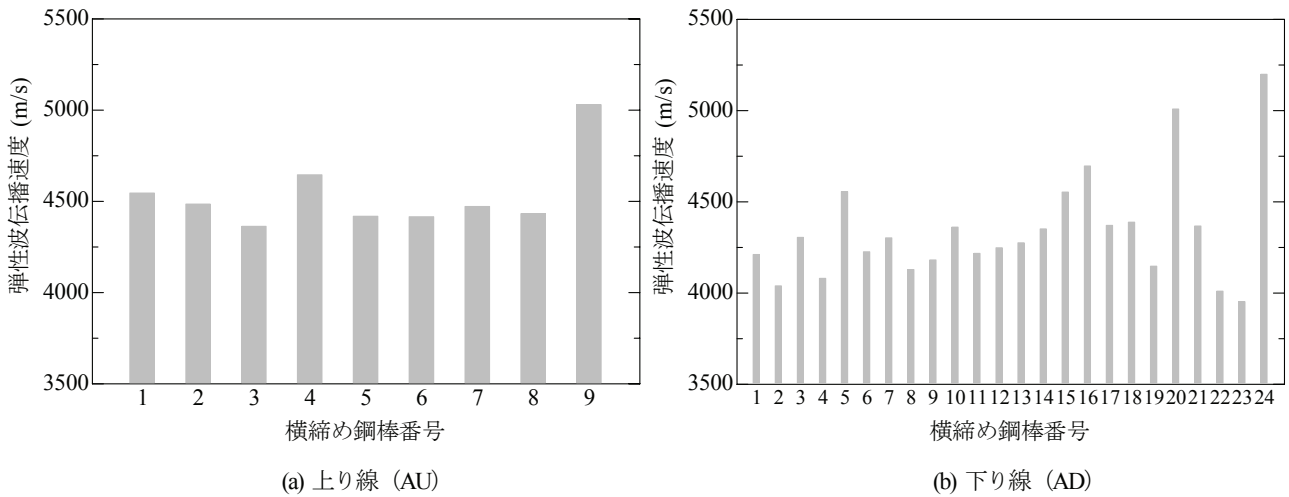


図-9 弾性波伝播速度 (A橋)

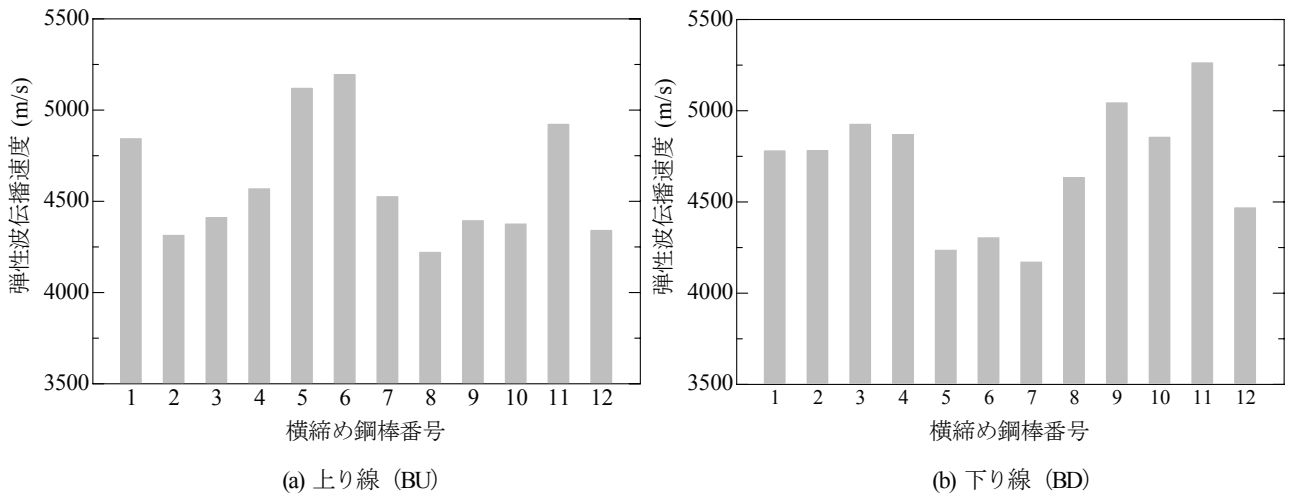


図-10 弾性波伝播速度 (B橋)

での考察結果と同様、ADシリーズのその他の鋼棒よりもグラウト未充填箇所を含む可能性は高いと考える。

B橋上り線および下り線の計測結果を図-10に示す。こちら、B橋での伝播速度は、A橋の場合と同様に、約4000m/s程度～約5000m/s程度の範囲に分布している。また、下り線では、上り線よりも速度の大きなものの割合が高いことなどが見取れる。鋼棒ごとにみれば、BU5やBU6、あるいはBD9やBD11のように、伝播速度が5000m/sを越えるものでは、他のものと比較してグラウト未充填箇所を含む可能性が高いと推察される。

上記より、実構造物で計測される伝播速度は、鋼棒ごとに様々な値を示すものの、いずれの桁においても約4000m/s程度～約5000m/s程度の範囲内に分布することが明らかとなった。また、この値の範囲は、供試体実験での結果や既往の研究成果^{8) 15)}とも良い整合を示していることがわかった。

・削孔結果

弾性波伝播速度と実際のグラウト充填状況との関係を把握するため、以下の3つのグループから、それぞれ6～9本の鋼棒を抽出(表-2 参照)し、コア削孔による目視確認を行った。

- (i) 伝播速度が4800m/s以上のグループ
- (ii) 伝播速度が4300m/s未満のグループ
- (iii) 伝播速度が4300m/s以上で4800m/s未満のグループ

コア削孔の実施箇所を、各桁での橋軸方向における断面図としてに図-8示す。また、削孔により確認したグラウトの充填状況を、弾性波伝播速度と併せて表-2に示す。

これによると、(i)のグループでは、AD24のaを除く全ての削孔箇所においてグラウト未充填が確認された。シー内部のグラウト未充填状況の一例を写真-7に示す。AD24のaでは、グラウトの充填が確認できたものの、同鋼棒のc、dおよびeの削孔箇所ではグラウト未充填が認め

られており、鋼棒全長にわたってグラウト未充填箇所の占める割合は大きいと推定できる。いずれにしても、伝播速度が大きな鋼棒は、削孔による目視確認の結果、ほとんどの場合でグラウト未充填箇所を含むことが明らかとなった。

(ii)のグループでは、AD22 d, AD23 a, cおよびBU8 cの箇所において、グラウトの充填が確認できた。伝播速度が小さいことは、グラウト充填が良好であることと対応することを示唆する事実ととらえることができる。一方、AD4, AD23およびBD7では、グラウト未充填箇所が認められたが、さらにシーす内部に配置された鋼棒に片寄りがあり、シーすと鋼棒とが接触していることも明らかとなった。これらのケースでは、シーすと鋼棒との接触の影響により、入力した弾性波がシーすを介してコンクリート部分に伝播する形態もあり得る。この場合は、グラ

ウト充填が良好な場合と同様に、伝播速度が見かけ上小さくなる可能性も考えられる。

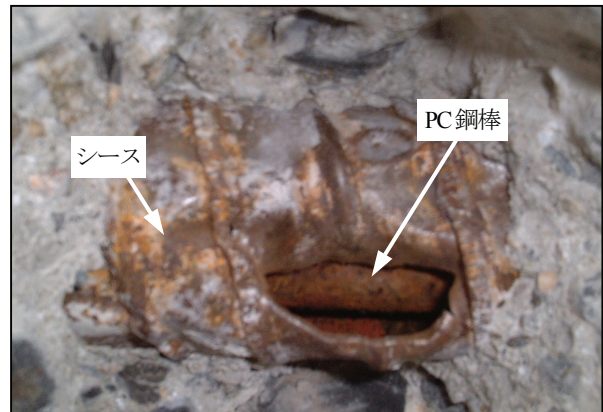


写真-7 グラウト未充填状況

表-2 削孔結果と伝播速度

(i) 伝播速度が4800m/s以上のグループ

鋼棒番号	伝播速度 (m/s)	グラウトの有無		備考
		有	無	
AU9	5031	—	c	—
AD20	5009	—	d	—
AD24	5200	a	c, d, e	—
BU5	5119	—	b, c	シーす腐食
BU6	5195	—	c	—
BU11	4922	—	b, c	—
BD4	4869	—	b, c	—
BD9	5043	—	c	—
BD11	5262	—	c	—

(ii) 伝播速度が4300m/s未満のグループ

鋼棒番号	伝播速度 (m/s)	グラウトの有無		備考
		有	無	
AD2	4040	—	d	—
AD4	4081	—	d	片寄り
AD22	4010	d	—	—
AD23	3953	a, c	d, e	片寄り (e)
BU8	4220	c	—	—
BD7	4170	—	c	片寄り

(iii) 伝播速度が4300m/s以上で4800m/s未満のグループ

鋼棒番号	伝播速度 (m/s)	グラウトの有無		備考
		有	無	
AU3	4363	b, c	—	—
AU4	4646	—	c	—
AD5	4556	c, e	—	—
AD14	4351	d	—	—
AD15	4554	c, d	—	—
AD16	4696	—	c, e	片寄り
BU3	4410	c	—	—
BD12	4467	—	c	—

片寄り：シーすに一部接触していた。

シーす腐食：シーすの腐食が一部確認できた。

(iii)のグループにおいては、グラウト充填および未充填の両方が混在していた。

・グラウト再充填後の伝播速度

削孔結果を基に、目視によりグラウト未充填が確認された箇所を対象に、グラウトの再充填を実施した。グラウトの再充填を行った鋼棒を、図-7中に※印で示す。グラウト再充填後、再度同じ方法で、弾性波伝播速度の計測を行った。

図-11~13にグラウト再充填後の伝播速度を、再充填前のものと併せて示す。ここでは、前節で分類したグループ(i)~(iii)ごとに、再充填前後での伝播速度の変化をそれぞれ整理した。

これによれば、グループ(i) (図-11 参照) , およびグループ(iii) (図-13 参照) では、いずれの鋼棒においても、グラウト再充填後の伝播速度は再充填前よりも小さくなっている。しかも、グラウト再充填前後での速度の差は、グループ(i)のもので、より顕著である。これは、グループ(iii)よりもグループ(i)では、グラウト未充填箇所の割合が大きく、結果的にグラウト再充填によって、新たにグラウトで覆われた鋼棒部分の割合が大きくなり、再充填前後での速度差が大きくなったものと推察される。また、グループ(ii)では、伝播速度は再充填前後でわずかに逆転したものがみられたが、値の変動は小さい。グループ(ii)の鋼棒は、未充填箇所は認められたものの、もともとその割合が小さく、再充填したグラウトの量も少なかった。そのため、再充填前後でのグラウト充填度の変化は小さく、伝播速度の変動は小さくなったものと考えられる。値の逆転現象については、速度計測上の誤差などによるものと考えられるが、詳細な理由は不明である。

これより、グラウト再充填の前後での弾性波伝播速度を比較することにより、グラウト再充填の良否を確認できる可能性が示された。

3. 部材断面方向でのグラウト充填評価

(1) 供試体実験による評価指標の確認と手法の改善

インパクトエコー法によるグラウト充填評価の原理を図-14に示す。この手法は、グラウト未充填による空隙を、打撃により得られた受振波の周波数分布から評価するものである。その評価にあたっては、周波数分布における縦波共振によるピークを活用する。なお、図中における板厚や空隙による縦波共振によるピーク周波数は、以下の式により算出される。

$$f_{\text{板厚}} = 0.96V / 2T \tag{1}$$

$$f_{\text{空隙}} = 0.96V / 2d \tag{2}$$

ここで、 $f_{\text{板厚}}$: 板厚によるピーク周波数、 $f_{\text{空隙}}$: 空隙

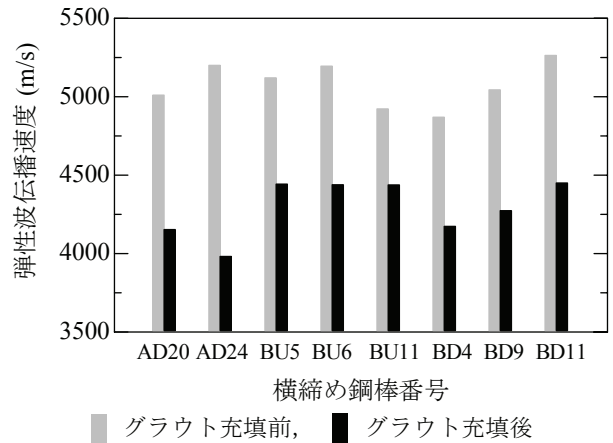


図-11 弾性波伝播速度の変化：グループ(i)

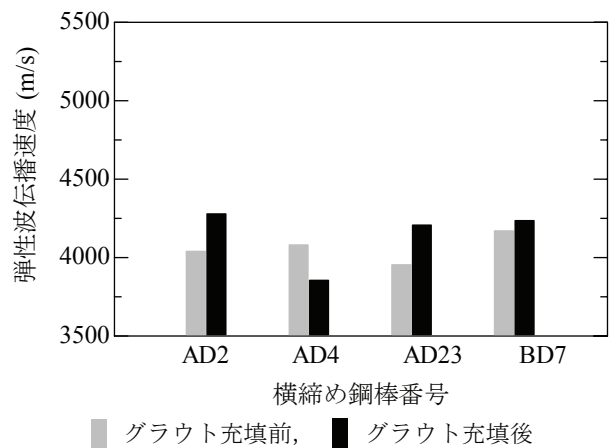


図-12 弾性波伝播速度の変化：グループ(ii)

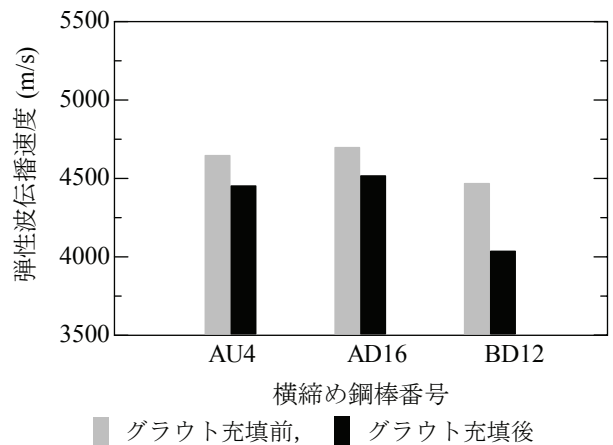


図-13 弾性波伝播速度の変化：グループ(iii)

によるピーク周波数、 V : 縦波の伝播速度、 T : 板厚、 d : シース内部の空隙までの深さである。なお、式(1)および(2)における 0.96 は、形状係数¹⁰⁾である。

上記のインパクトエコー法の評価原理のグラウト充填評価への適用性を確認するため、図-15 に示す供試体を作製した。供試体内部には、φ90mm のスパイラルシー

ス（グラウト未充填）を埋設した。また、コンクリート表面から空隙までの深さを変化させることを目的に、シースメ埋設深さが 60mm から 250mm へ連続的に変化するように、供試体長手方向における中央部分にて、5°の角度で斜めに曲げ上げた。シースまでの深さは、供試体作製後、電磁波レーダ法により確認した。

弾性波の入力および受振位置は、図-15 における◎の位置である。図に示す計測位置において、鋼球打撃による弾性波の入力と変位波形の受振を、シース中央部の直上のコンクリート表面にて行った。用いる鋼球直径の選定にあたっては、著者らが過去に行った研究成果¹³⁾を参考にし、入力された弾性波の上限周波数が空隙からの反射に起因する縦波共振のピーク周波数を十分上回るよう考慮した。

弾性波の受振には、0~1MHz の間でフラットな応答感度¹⁴⁾を有するコンカル型高感度変位センサを用いた。

周波数分布の算出にあたっては、以下の i~iii に示す 3 ケースについて、比較検討を行った。

- i) 受振波形を無処理の状態では FFT により周波数分布を算出（以降、従来法による周波数分布）
- ii) 受振波形において表面波を除去し、その後 FFT により周波数分布を算出（以降、Rcut 周波数分布）
- iii) 受振波形において表面波を除去し、その後 MTM により周波数分布を算出（以降、MTM 周波数分布）

このうち ii および iii における表面波の除去とは、受振波形においてコンクリート表面を伝播した P 波および

表面波の振幅電圧を 0V とみなす波形処理¹⁰⁾をさす。一方、iii の MTM とは、サンプリング時間ごとに sinc 関数で近似した箱型ウィンドウを介して、バンド幅ごとにスペクトルを推定する手法である。そのため、FFT と比較して、スペクトル推定における分散の影響をより減少させることが可能な周波数分析手法¹²⁾である。

なお、コンクリート部分の弾性波伝播速度の計測は、シースおよび鉄筋の直上を避け、図-15 における×印で実施した。伝播速度は、縦波共振周波数と供試体厚さ

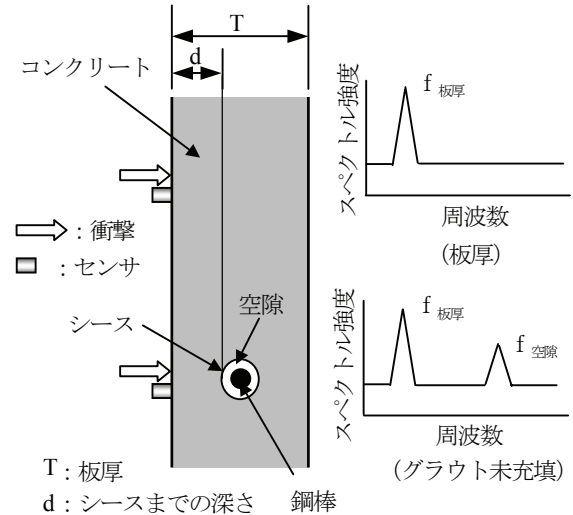
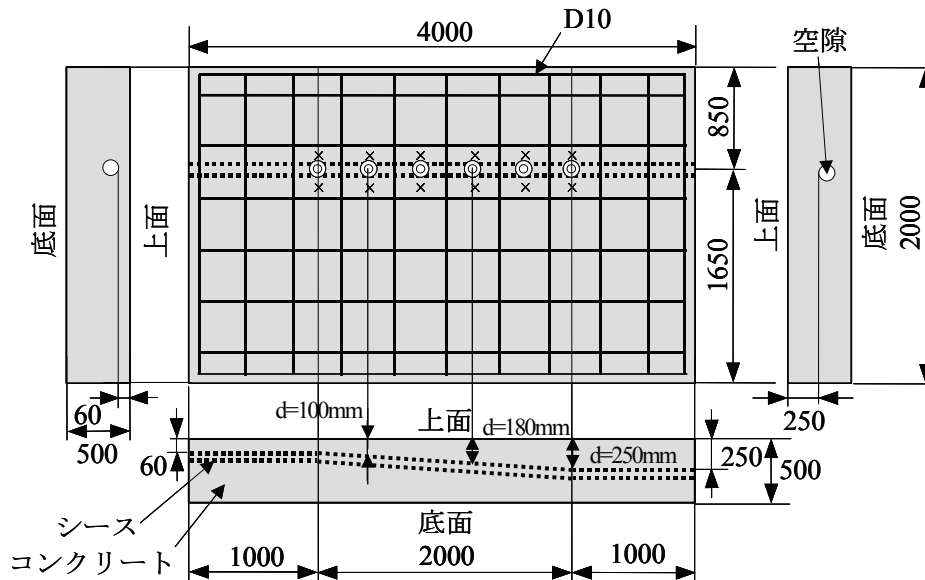


図-14 インパクトエコー法の概念図



◎ : グラウト充填評価実施箇所（弾性波の入力および受振位置） × : グラウト充填評価に用いる弾性波伝播速度の計測位置
d : シース埋設深さ

[単位 : mm]

図-15 供試体概要図

(500mm) から算出した。複数箇所での算出を平均して、伝播速度を 3900m/s とした。

図-16 に、シース埋設深さが 140, 180 および 250mm における、ケース i ~ iii で得られた周波数分布をそれぞれ示す。弾性波の入力に使用した鋼球の直径は、6.0, 8.0 および 12.8mm である。また、図中の矢印は供試体厚さに応じた縦波共振周波数であり、破線はシース埋設深さに相当する縦波共振周波数（以降、 $f_{\text{空隙}}$ とする）を示している。

ケース i では、4kHz 付近に供試体の厚さに応じた縦波共振周波数が確認できる。しかしながら、それと同時に、幅広い周波数領域にわたって、成分の分布がみられる。いずれのシース埋設深さにおいても、単独のピークを特

定することは難しく、 $f_{\text{空隙}}$ を明瞭に把握できるとは言えない。これに対して、ケース ii では、ケース i と比較すると、高周波領域の成分が減少することにより、計算上の $f_{\text{空隙}}$ に近い周波数ピークがより明確に把握できる。これより、受振波より表面波成分を除去することによって、空隙からの反射の特徴が評価しやすくなることが改めて確認された。ケース iii においては、板厚に相当するピーク、空隙からの反射に起因するピークの両者のみが明瞭に得られている。しかも、空隙に起因するピーク周波数の値は、計算上の $f_{\text{空隙}}$ と良く一致している。

以上のことから、受振波における表面波の除去と MTM とを併用することが、空隙からの周波数ピークを検出する上で極めて効率的であることがわかった。

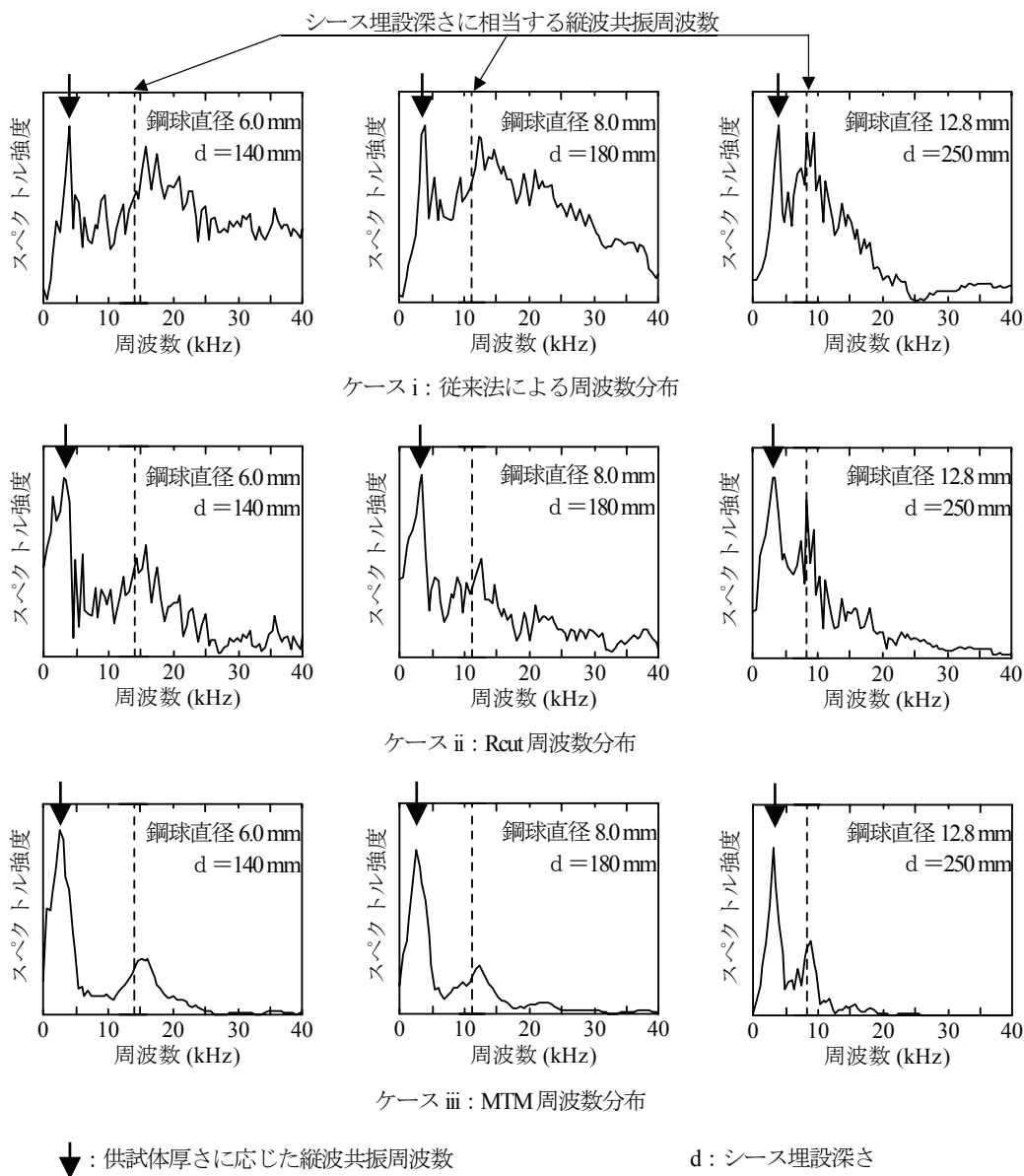


図-16 供試体実験結果

(2) 実構造物での適用実験

a) 対象とした実構造物の概要

実構造物に対するMTMを併用したインパクトエコー法の適用性について確認することを目的に、供用中の橋梁PC桁の主ケーブルを対象に実験を行った。対象としたPC桁は、写真-8に示す4主桁である。図-17に主桁の概要を示す。ウェブの断面寸法は、桁中央部では高さ：1950mm、厚さ：300mmであるが、桁端部では高さ：1480mm、厚さ：600mmと桁の長手方向に変化している。桁の主ケーブルは、PC鋼より線（12φ7mm）であり、シースには、φ45mmのスパイラルシースが使用されている。図に示すように、主ケーブルのうち、桁中央部から端部方向に向かって1段配置されているものを、C1～C9とする。一方、2段配置されているケーブルにおいては、C10-11、C12-13、C14-15と記すこととする。

b) 現場での弾性波計測方法

弾性波の入力では、既往の研究¹³⁾結果を踏まえて、評価対象であるPC桁の寸法（図-17参照）を考慮し、表-3に示す鋼球直径を選定した。弾性波の受振方法や使用した計測機器は、供試体実験と同じである。

弾性波の入力および受振状況を写真-9に示す。弾性波の入力および受振位置は、PC鋼より線の定着部からそれぞれ50cm (A)、150cm (B)および250cm (C)のシース直上とした（図-17の◎）。弾性波の計測は、図-17 (a)に

表-3 シース埋設深さに応じた入力方法（鋼球直径）

シース埋設深さ (mm)	鋼球直径 (mm)
150以下	6.0
160～180	8.0
190	9.6
200～220	11.0
230～250	12.8
260	15.7



写真-8 橋梁PC桁

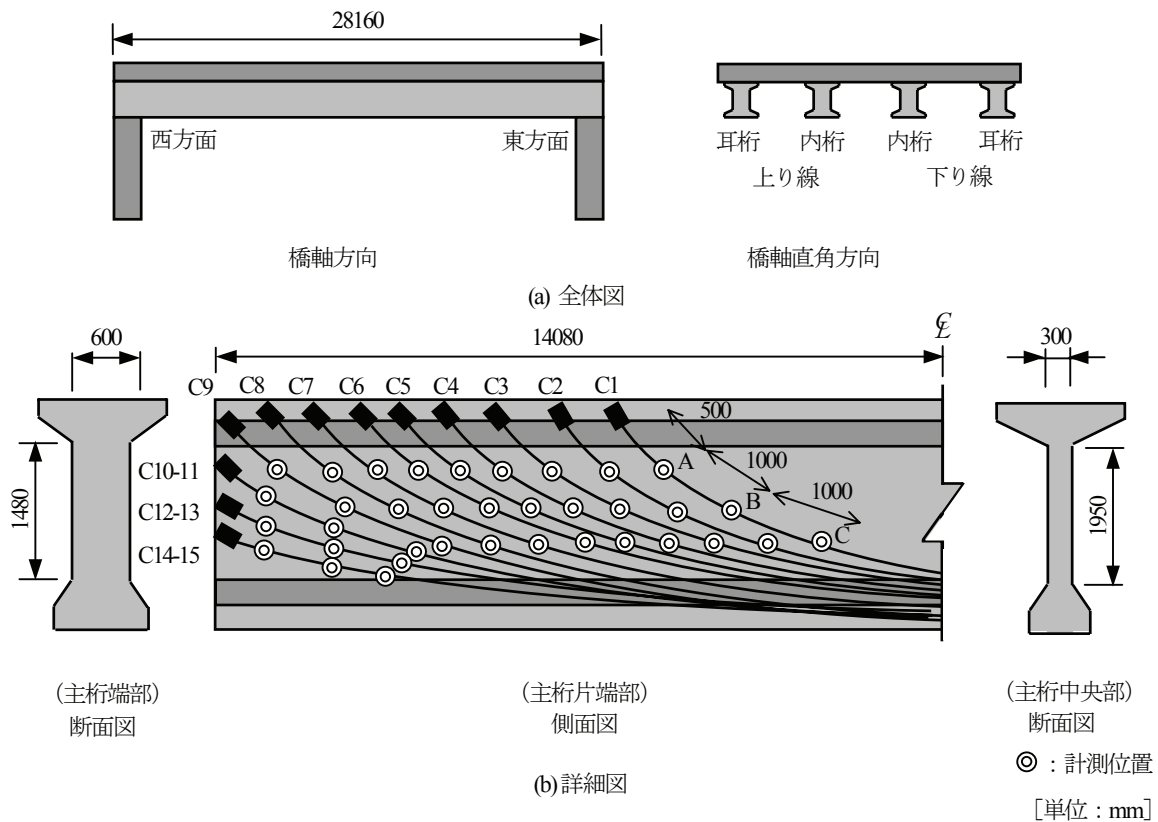


図-17 橋梁PC桁の概要図

おける上り線および下り線での外桁と内桁の両方について、それぞれ西方面と東方面に対して、いずれも図-17 (b)に示す計測位置 (◎) に対して行っており、計測箇所数の合計は 288 箇所となった。コンクリートの弾性波伝播速度は、埋設されたシースの影響を受けない部分において、FFT により算出された周波数分布における板厚 (ウェブ厚さ) に相当する縦波共振周波数から算出した。シースの影響を受けない複数の箇所において伝播速度を算出し、その平均値をとって、弾性波伝播速度を 3900m/s とした。なお、シースの埋設位置および深さは、電磁波レーダ法により把握した。

弾性波計測が終了した後、得られた周波数分布とグラウト充填状況との対応関係について検討するため、計測位置のうち数カ所をφ75mmのコアカッターにより削孔し、シース内部のグラウト充填状況を確認した。

c) 計測結果と考察

・計測された周波数分布の特徴

図-18 に、下り線内桁西方面の C1 B および C7 B で得られた計測結果を示す。ここでは、供試体実験での結果を踏まえて、従来法による周波数分布および MTM 周波数分布を示す。また、周波数分布上での破線は、電磁波レーダでのシース深さ推定結果から算出した $f_{\text{空隙}}$ 位置を示している。この図によれば、従来法による周波数分布および MTM 周波数分布の両方において、ウェブ厚さに応じた縦波共振周波数 (図中の矢印) の近傍にピークが見られる。特に、MTM 周波数分布では、ウェブ厚さによるピークがかなり明瞭に卓越していることがわかる。これに対して従来法による周波数分布では、ウェブ厚さが大きい方がピーク周波数以外の成分割合が大きくなり、ピークの判読が困難になることが確認できる。これは、実構造物での計測でも、供試体実験の場合と同様に、板厚に相当する縦波共振による成分と比較して、表面波による周波数成分が相対的に大きくなったためと考えられる。さらに、波形処理の有無だけでなく、周波数分析手法の違いによる影響も考え得る要因である。これらのことから、実構造物計測において、ウェブ厚さに起因するピーク周波数の把握には、表面波を適宜必要に応じて除去し、周波数分析手法に MTM を活用することが有効であることが明らかとなった。

・グラウト充填評価手法

供試体での実験結果および前節で得られた知見から、本研究で提案する波形処理および MTM を併用したインパクトエコー法の有効性が確認された。そこで、これ以降は、MTM 周波数分布を用いたグラウト充填評価手法の実構造物での適用性を検討することとする。グラウト充填評価手順としては、まず、MTM 周波数分布における $f_{\text{空隙}}$ 位置にピークが見られない場合を、グラウトが



写真-9 弾性波の入力および受振状況

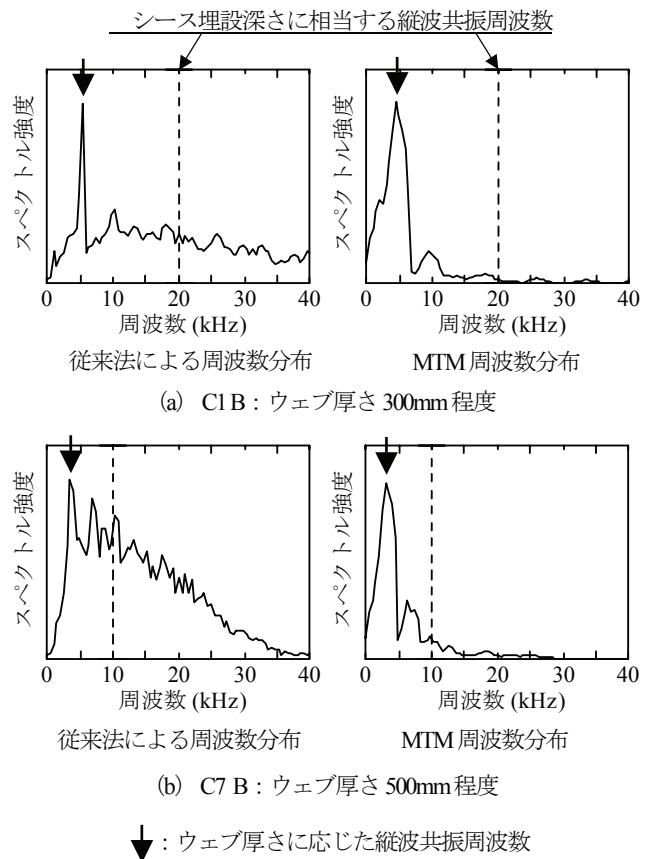


図-18 下り線内桁西方面における周波数分布

充填されていると判断する。これに対して、 $f_{\text{空隙}}$ 位置にピークが発現している場合は、このピークの発生要因がグラウト充填不足による空隙に起因するものと考え、グラウトの充填不足の可能性があると判断した。

・削孔結果

本手法で提案する MTM を併用したインパクトエコー法によるグラウト充填評価における判断結果の妥当性を

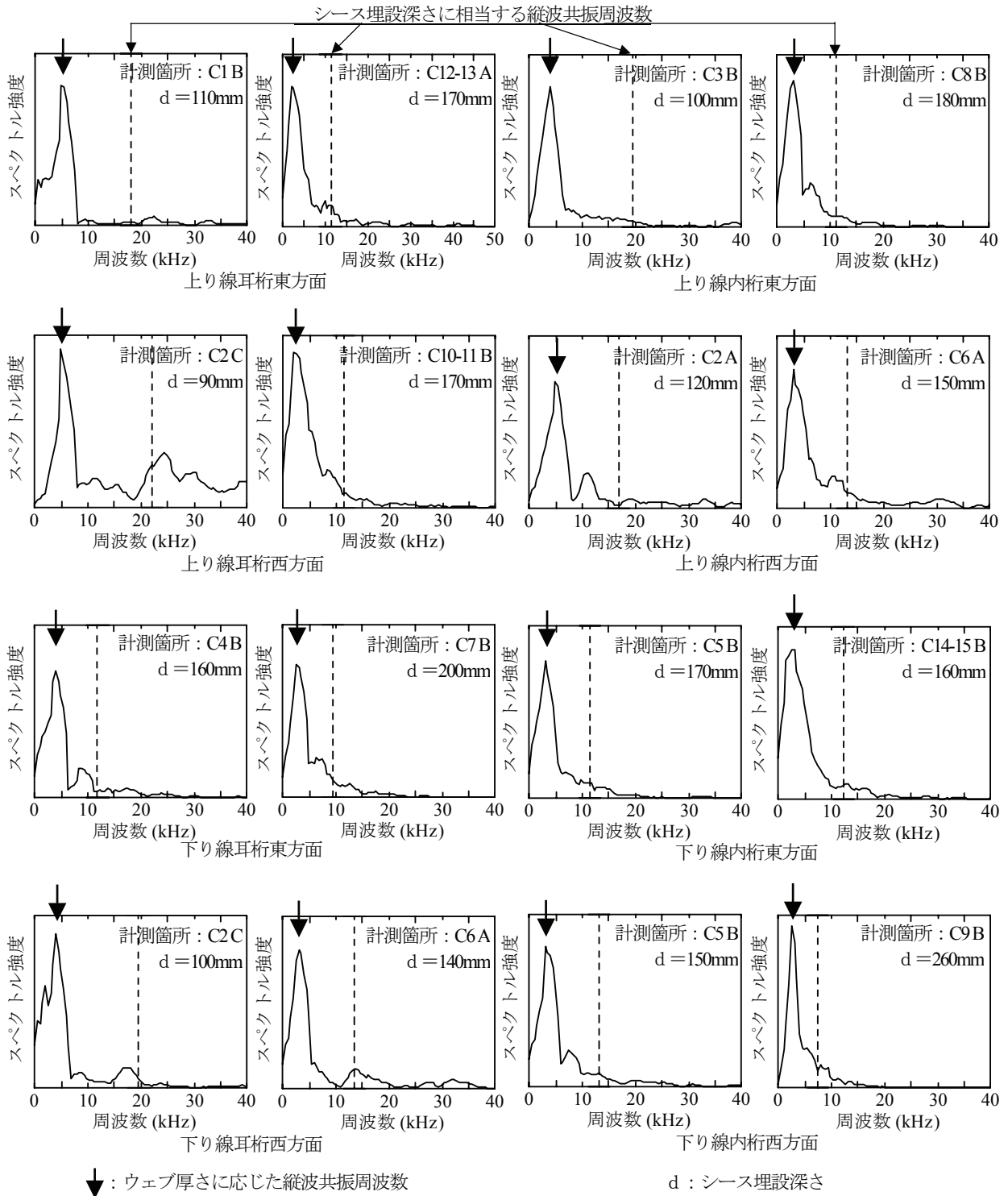


図-19 削孔箇所における周波数分布

確認するため、主桁 1 本につき 4 箇所、合計 16 箇所の削孔を行った。図-19 に削孔箇所における周波数分布を、橋梁およびケーブル名と併せて示した。図-18 と同じく、周波数分布上での矢印はウェブ厚さに応じた縦波共振周波数の位置、破線は電磁波レーダでのシース深さ推定結果から算出した $f_{\text{空隙}}$ 位置を指している。また、表-4 には、本手法によるグラウト充填状況の判定結果と削孔結果を示す。本手法によりグラウト充填程度が良好である

と判断した箇所（表中の○）においては、グラウトが十分充填されていることを削孔により確認することができた。グラウトの充填状況を写真-10 に示す。

一方、本手法でグラウトの充填不足と判断した箇所において、削孔によりグラウト充填不足による空隙（写真-11 参照）が確認された（表中の上り線耳桁東方面 C12-13 A）。これに対して、グラウト充填不足の可能性ありと判断した箇所（表中の△）においても、グラウト

表4 削孔箇所における判断結果および削孔結果

計測箇所			判断結果	削孔結果	
上り線	耳桁	東方面	C1 B	○	グラウト有り
			C12-13 A	△	グラウト充填不足による空隙有り
	西方面	C2 C	△	グラウト有り	
		C10-11 B	○	グラウト有り	
	内桁	東方面	C3 B	○	グラウト有り
			C8 B	○	グラウト有り
西方面	C2 A	○	グラウト有り		
	C6 A	△	グラウト有り		
下り線	耳桁	東方面	C4 B	○	グラウト有り
			C7 B	○	グラウト有り
		西方面	C2 C	△	グラウト有り
			C6 A	△	グラウト有り
	内桁	東方面	C5 B	○	グラウト有り
			C14-15 B	○	グラウト有り
		西方面	C5 B	○	グラウト有り
			C9 B	○	グラウト有り

○：「グラウト充填程度が良好」

△：「グラウト充填不足の可能性あり」



写真10 グラウト充填状況 (下り線耳桁西方面 C2C)

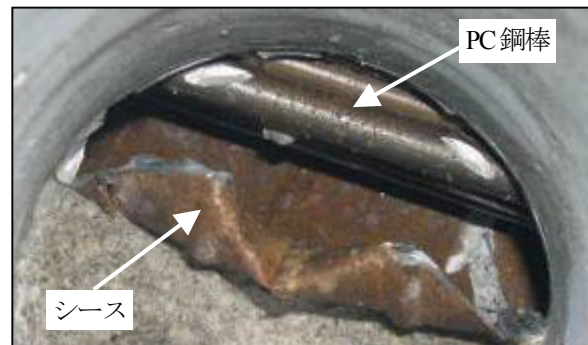


写真11 グラウト充填不足による空隙 (上り線耳桁東方面 C12-13A)

充填が確認された箇所もあった。しかもこれらは、いずれの場合も C6 A あるいは C2 C であり、計測位置からハンチ部までの距離はおよそ 150mm 程度であった。このことから、本研究の範囲内では、計測位置からハンチ部や桁端部の境界面までの距離が小さい場合、反射の影響によるピーク周波数を、シース内部の空隙からの反射に起因したピークと誤認したと考察できる。

これらより、本手法で提案する波形処理および MTM を活用したインパクトエコー法は、実構造物での評価において相応の適用性を有することが明らかとなった。なお、本論文の範囲においては、削孔結果によれば、2章で示した横締め鋼棒の場合と比較して、主ケーブルでは相対的にグラウト充填状況が良好であった。

4. グラウト充填評価手順の提言

前章までの検討結果より、本研究では、I: 部材軸方向に弾性波を伝播させる場合 (概略検査法) と II: 部材断面方向に弾性波を伝播させる場合 (詳細検査法) を併用した PC グラウト充填評価手法を提言する。そのフローチャートを図-20に示す。ここではまず、概略検査法として、I: 部材軸方向の弾性波を伝播させ、その伝播速度の評価を行う。次に、概略検査結果より、グラウト充填不足の可能性があると判断されたものについては、詳細検査法である II: 部材軸方向に弾性波を伝播させる手法を適用してグラウト充填状況の評価を行う。詳細検査にあたっては、受振波形の表面波成分をカットするとともに、

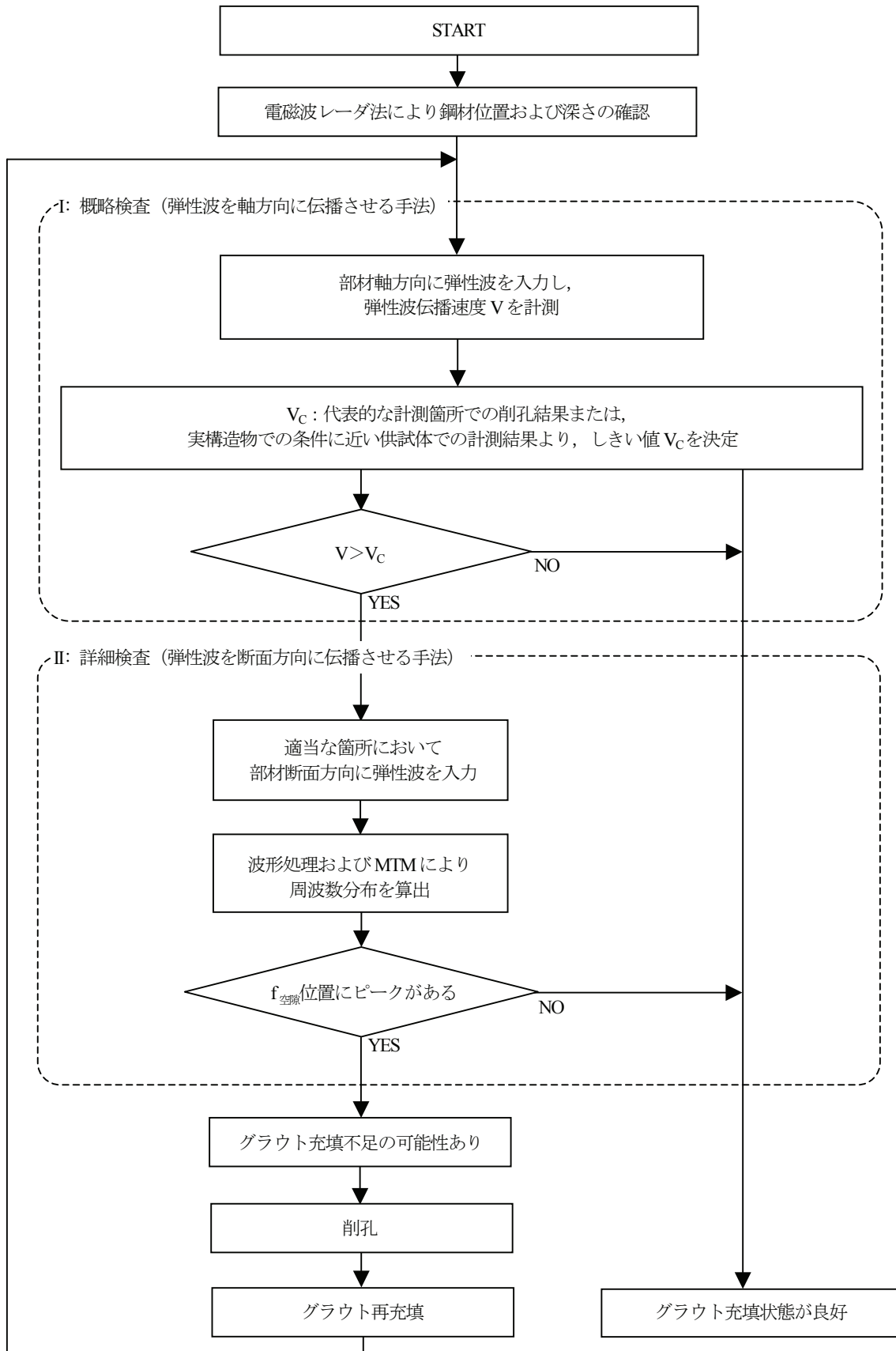


図-20 PC グラウト充填評価手法のフロー

周波数分析手法としてMTMを併用したインパクトエコー法を用いる。本研究で提案したこの手法を活用することにより、グラウト充填の有無を評価し、グラウト充填不足の可能性のある箇所を同定する。ただし、本研究では、3. (2) c) 削孔結果において議論したとおり、桁端部の境界面からの反射波の影響を受ける可能性があるため、この場合を本手法の適用範囲外とする。このようにして把握された充填不足箇所において削孔を行うことにより、構造物に与える損傷程度を最小限に押さえることが可能である。削孔後はグラウトの再充填を行い、グラウトの硬化後、再び概略検査を実施し、必要があれば詳細検査へと移行する。以上のような一連の流れを繰り返すことにより、構造物におけるグラウト充填不足箇所の効率的な検出とグラウト再充填の良否の確認が可能となる。

本論文に示した実験結果は、Iの概略検査法に関するものが横締め鋼棒に対するものであり、一方でIIの詳細検査法については、桁の曲げ上げを伴う主ケーブルを対象としたものとなっている。このうち、前者の横締め鋼棒の場合にIIの詳細検査法は原理的に適用可能である。また、後者の曲げ上げを伴うケーブルに対しては、実物大供試体での著者らの過去の実験¹⁹⁾により、I: 概略検査法の適用可能性が確認されている。したがって、IとIIを組み合わせた評価手順は、実構造物の様々なパターンに対応可能と考えられるが、今後、適用可能な構造物の条件については、さらに検討すべきと考える。これにより、グラウトを用いるポストテンションPC構造物全般において、本手法の活用が維持管理の合理化に役立ち、構造物の安全性確保につながるものと考えている。

5. 結論

本研究では、弾性波によりPCグラウトの充填度を評価する手法として、I: 部材軸方向に弾性波を伝播させる場合、II: 部材断面方向に弾性波を伝播させる場合の2ケースについて、実際の構造物への適用性の評価を行った。以下に、得られた結論を示す。

Iに関して：

- 1) スラブ供試体実験において弾性波伝播速度は、グラウト充填度の増加に伴い徐々に小さくなることが再確認できた。また、弾性波の入力方向の違いによる影響は、ほとんどないことも確認された。
- 2) 橋梁PC桁にIの手法を適用した結果、弾性波伝播速度はスラブ供試体の場合と同様の傾向が得られた。また、伝播速度と削孔による確認結果との比較から、実構造物でのグラウト充填評価において、弾性波伝播速度は評価指標として非常に有効であることが明らかとなった。

- 3) グラウトを再充填したPC鋼棒では、弾性波伝播速度が再充填前の速度より小さくなる傾向を示す場合がほとんどであった。これより、グラウト再充填前後での伝播速度を比較することにより、グラウト再充填の良否を判断できる可能性が示された。

IIに関して：

- 4) 供試体を用いて部材断面方向に弾性波を伝播させた場合は、インパクトエコー法では検出が困難な条件にある空隙に対しても、表面波を除去するとともに、周波数分析にMultitaper Methodを適用することにより、空隙からの周波数ピークを識別させることが容易となる。
- 5) 橋梁PC桁にIIの手法を適用した結果、波形処理およびMTMを併用したインパクトエコー法によりグラウト充填程度が良好と判断した箇所全てにおいて、グラウトが充填されていることを削孔により確認することができた。

今後は、I: 部材軸方向に弾性波を伝播させる場合、II: 部材断面方向に弾性波を伝播させる場合の両者の手法を、同一の実構造物に対して適用し、本手法の適用範囲の明確化および手法の確立を目指す必要があると考えている。特にIでは、弾性波伝播速度の基準値の設定方法について、具体的に示す予定である。一方、IIについては、桁端部からの反射波の影響やその範囲について明確にする必要がある。

参考文献

- 1) Woodward, R. J.: Collapse of a Segmental Post-Tensioned Concrete Bridge, *Transportation Research Record, V. 1211*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 38-59, 1989.
- 2) 例えば、鎌田敏郎：PC構造物のメンテナンスにおける非破壊検査、プレストレストコンクリート、pp.51-58, 2003.
- 3) 例えば、前田春雄、長谷川敦史、五阿彌雅夫：X線法によるコンクリート構造物の非破壊検査、コンクリート構造物の耐久性に関するシンポジウム論文集、pp.109-115, 1988.
- 4) 例えば、坂田康徳、大津政康：超音波スペクトロスコープ法によるポストテンションPC構造物のグラウト充填度評価、コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集、pp.87-92, 1991.
- 5) 例えば、黒野幸弘、山田和夫、中井祐司：衝撃弾性波法を適用したPC床板のグラウト充填性評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.1, pp.1175-1180, 1995.
- 6) 斎藤宏行、尼崎省二：衝撃弾性波法によるPCグラウト充填評価に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp.1267-1272, 1999.
- 7) 魚本健人、首藤芳久：AE計測によるプレストレストコンクリートのシーす内グラウト充填度判定方法、生産研究、Vol.39, No.4, pp.141-144, 1987.
- 8) 鎌田敏郎、浅野雅則、国枝泰祐、国枝稔、六郷恵哲：弾性波特性パラメータを用いたPCグラウト充填評価手法、土木学会論文集、No.746/V-61, pp.25-39, 2003.11.

- 9) 應虹江, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: 弾性波による PC グラウト充填評価法の適用性に関する解析的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1899-1904, 2004.
- 10) Sansalone, M. and Streett, W. B.: *Impact Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997.
- 11) 極壇邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法による PC 橋梁シース管グラウトの充填度合の測定コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1557-1562, 2002.
- 12) Percival, D. B., and Walden, A. T.: *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques*, Cambridge University Press, 1993.
- 13) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 共振現象を利用したコンクリート内部の欠陥評価手法, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 V 部門, pp.161-162, 2004.
- 14) Proctor, T. M., Jr.: Some details on the nbs conical transducer, *Journal of Acoustic Emission*, Vol.1, No.3, pp.173-178, 1982.
- 15) Kamada, T., Wakayama, T., Kitazono, H., Imao, K. and Rokugo, K.: Evaluation of grouting condition in tendon ducts of prestressed concrete members by impact elastic-wave methods, Proceedings of fib 2002, F-9, CD-ROM, 2002.10.

(2005. 11. 14 受付)

APPLICATION OF IMPACT ELASTIC WAVE METHOD FOR EVALUATION OF GROUTED CONDITION OF TENDON DUCTS IN EXISTING PC STRUCTURES

Toshiro KAMADA, Masanori ASANO, Masamichi KAWASHIMA, Shinya UCHIDA and Keitetsu ROKUGO

In this paper, the applicability of Impact Elastic Wave Method for evaluation of grouted condition in tendon ducts was investigated through two methods for each objective structure. One is applied to lateral prestressing steel bars to connect Prestressed Concrete beams, where wave velocity was measured for the evaluation of grouted conditions in tendon ducts. The other is the measurement at cross-section of steel strands in PC beams, where frequency spectrum was applied for the evaluation. In both cases, actual conditions in tendon ducts were confirmed by visual observation after drilling. Results show the applicability of the both methods to evaluate grouted conditions in existing PC structures.