

論文 弾性波の伝播特性に基づいた PC グラウト充填評価手法に関する基礎的研究

北園 英明^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・横山 博司^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 既設 PC 構造物を対象としたグラウト充填度確認のための非破壊評価手法の検討を行った。実構造物に近い断面形状を持つ供試体において弾性波の伝播経路や周波数特性を明らかにし、グラウト充填状況との関係を把握した。実際の PC 構造物における計測を想定した供試体において、弾性波の入力位置を PC 鋼棒端面近傍、受信位置をコンクリート表面とした場合に PC グラウト充填度の違いにより弾性波の伝播時間が変化することが明らかとなった。さらに、版構造の実構造物においても計測を実施し、本手法の有効性について確認した。

キーワード: PC 構造物, グラウト充填評価, 非破壊試験, 弾性波, 伝播速度, 周波数特性

1. はじめに

ポストテンション方式 PC 構造物における PC グラウトは、PC 鋼材の防食を一つの目的としており、PC 構造物の耐久性に重要な役割を担っている。そこで、PC グラウト充填度を評価するための非破壊検査手法として弾性波を用いた研究が行われている^{1)~3)}。ほとんどの既往の研究^{1), 2)}では、弾性波の入力は PC 鋼棒の端面を打撃することにより行い、受信は、もう一方の端面にて行うことにより評価するというものである。したがって、実際の構造物に適用するためには、鋼棒の両端面の露出が必要条件となり、適用箇所が限定されるという問題点がある。

そこで、本研究では、既設構造物での計測を考慮し、適切な弾性波の入力位置や受信位置について検討した上で、弾性波伝搬時間あるいは周波数分布を用いてグラウト充填の程度を評価するための手法を検討した。

さらに、本手法の適用性を確認するため、供試体と同様な版構造であり厚さが一定でかぶりコンクリート厚も比較的大きくない実際の PC タンク壁面の鉛直方向 PC 鋼棒に対して、グラ

ウト充填前後および保護コンクリート打設後に弾性波の伝播速度計測を実施した。

2. 実験概要

本研究では、① PC 構造物における各構成材料、② スラブ供試体、③ 実構造物のそれぞれについて弾性波計測を行い、各種の検討を加えた。

2.1 各構成材料における実験の概要

PC 構造物を構成する各材料、すなわち、PC 鋼棒、コンジットシース、定着プレート、コンクリートおよびグラウト、さらに、コンジットシース $\phi 35$ にグラウトを充填した複合部材およびコンジットシース $\phi 35 + PC$ 鋼棒 $\phi 23$ にグラウトを充填した複合部材のそれぞれについて、超音波の伝播速度計測を行った。計測にはデジタル超音波測定装置を用いた。コンクリートの配合を表-1 に示す。また、グラウトの配合は $W/C = 45\%$ とした。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	標準配合 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (%)
37	39	146	406	707	1117	2.64

*1 (株)安部工業所 技術本部技術部 課長 (正会員)

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 (株)安部工業所 技術本部技術部 部長 工修 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

2.2 スラブ供試体における実験の概要

(1) スラブ供試体の概要

本実験では、図-1 に示すシース配置供試体 (SG) およびシース+PC鋼棒配置供試体 (SPG) の2種類各々2体を用いて、グラウト充填度が0%, 25%, 50%, 75%および100%と異なる供試体を製作した。また、コンクリートだけの供試体 (C) を比較のために製作した。シースはコンジットシースφ35, PC鋼棒はB種1号φ23を用いており、緊張力としてPC鋼棒1本につき200kN導入した。供試体名称は、表-2 に示す記号名の頭に図-2 に示す打撃位置(記号B1~B3)を付けたものとする。

表-2 記号一覧

記号名	グラウト充填率 (%)	構成部材	打撃位置
SG0	0	コンクリート シースφ35 グラウト	B1 B2
SG25	25		
SG50	50		
SG75	75		
SG100	100		
SPG0	0	コンクリート シースφ35 PC鋼棒φ23 グラウト	B1 B2 B3
SPG25	25		
SPG50	50		
SPG75	75		
SPG100	100		
C	—	コンクリート	B1 B2

(2) 弾性波の入力方法および計測の概要

弾性波の入力位置を図-2 に、受信位置を図-3 に示す。弾性波の入力は、オートポンチを改造したバネポイントをを用いた打撃により行った。受信はAEセンサによって行い、弾性波の伝播時間の計測および波形の記録・解析には6chデジタルAE計測システムを用いた。計測システムは、6chであるため、1ch分のAEセンサはバネポイントの位置の近傍に、残りの5ch分をその他の受信位置に貼付した。伝播時間は、任意の受信位置における弾性波到達時間と、入力位置での到達時間との差によって求め

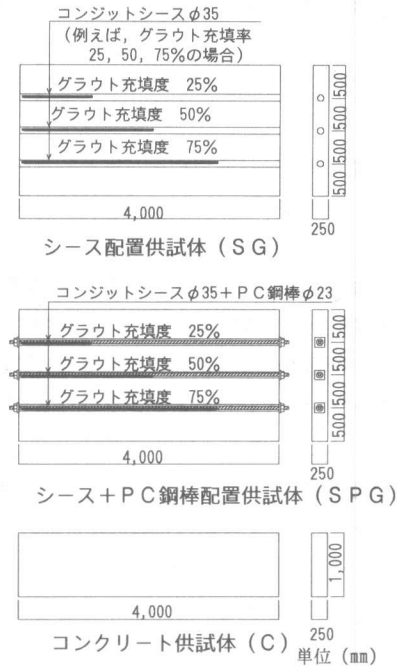


図-1 スラブ供試体

るため、1回の打撃によって5ポイントでの伝播時間を得ることができる。なお、AEセンサは、弾性波の伝播時間を計測する場合には150kHz共振型センサ、周波数分布を計測する場合に広帯域変位型センサを用いた。

2.3 実構造物における実験の概要

施工中のPCタンクの壁面部分を対象として、PCグラウト注入前、注入後およびPC鋼材部の保護コンクリート打設後の3段階において弾性波伝播速度の計測を行った。なお、実構造物に配置してあるPC鋼棒は、B種1号φ17であり、配置間隔は532mmである。スラブ供試体実験と同様に受信に用いたAEセンサは、150kHz共振型センサであり、弾性波の入力についてはバネポイントを使用した。実験を行ったPCタンク壁面部分の断面図(図-4参照)に弾性波の入力位置および受信位置を示す。なお、バネポイントによる打撃は、PC鋼棒端部において行ったものと、保護コンクリート打設後、コンクリート表面にて行ったものがある。

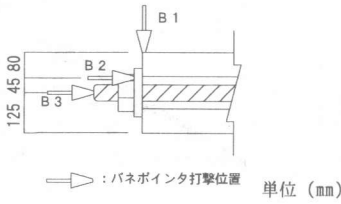


図-2 弾性波の入力位置

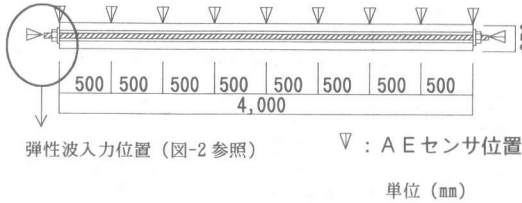


図-3 弾性波の受信位置

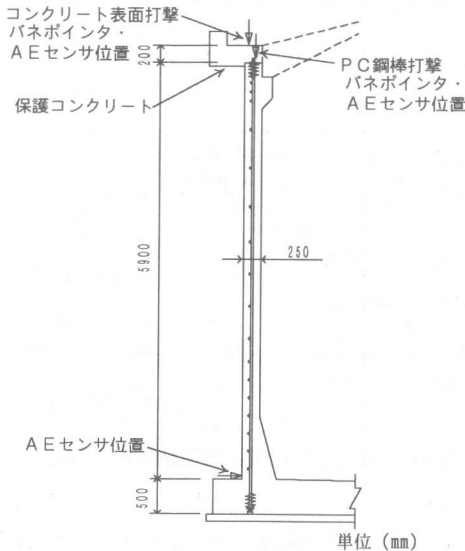


図-4 P C タンク壁面部分断面図

3. 実験結果および考察

3.1 各構成材料の伝播速度

超音波伝播速度の計測結果を表-3 に示す。鋼製の材料に対して、コンクリートやグラウトでは伝播速度が 1000m/s 程度小さくなっている。また、P C 鋼棒径が $\phi 17$ から $\phi 32$ と大きくなるにしたがって、伝播速度が大きくなる傾向を示した。

コンジットシース $\phi 35 + P C$ 鋼棒 $\phi 23$ にグ

ラウトを充填した複合部材の伝播速度は、[端面-端面]計測において 5386m/s であるのに対して、P C 鋼棒 $\phi 23$ 単体のものは 5420m/s であり、グラウトを充填することにより 93m/s 小さくなった。コンジットシース $\phi 35$ にグラウトを充填した複合部材においては、[端面-端面]計測において 4082m/s であるのに対して、コンジットシース $\phi 35$ 単体のものが 5339m/s であり、グラウトを充填することにより、1257m/s 小さくなった。これらから、グラウトの充填による超音波の伝播速度への影響はシースに大きく表れることが確認できた。尼崎らの研究¹⁾で示されているように、グラウト長さ比の増加にともない P C 鋼棒を伝播する弾性波速度が低下する傾向と一致する。すなわち、シースにグラウトが充填されると、弾性波はシース内のみを選択的に伝播するのではなく伝播速度の大きいシースと速度の小さいグラウトが複合された材料の内部を伝播するため、結果的にシース単体の場合よりも伝播速度が小さくなるものと考えられる。

また、コンジットシース $\phi 35 + P C$ 鋼棒 $\phi 23$ にグラウトを充填した複合部材の[側面-側面]計測の伝播速度は、コンジットシース単体のものより、1000m/s 程度小さくなった。

表-3 超音波伝播速度計測結果

部材名	部材寸法	伝播時間 (μ s)	伝播距離 (cm)	伝播速度 (m/s)
P C 鋼棒	$\phi 17$	186.7	100.0	5356
	$\phi 23$	184.5	100.0	5420
	$\phi 26$	182.5	100.0	5479
	$\phi 32$	181.3	100.0	5516
コンジットシース	$\phi 28.6$	188.7	100.0	5299
	$\phi 35.0$	187.3	100.0	5339
	$\phi 42.7$	187.6	100.0	5330
定着プレート	100 × 100 × 19	21.5	10.0	4651
	120 × 120 × 25	24.0	12.0	5000
	135 × 135 × 28	26.9	13.5	5019
	165 × 165 × 32	31.5	16.5	5238
コンクリート	$\phi 100 \times 200$	46.0	20.0	4339
グラウト	$\phi 50 \times 100$	26.3	10.0	3802
コンジットシース $\phi 35 +$ グラウト	端面-端面	245.0	100.0	4082
コンジットシース $\phi 35 +$ グラウト	鋼棒端面-鋼棒端面	222.8	120.0	5386
	鋼棒端面-側面	213.3	108.0	5063
	側面-側面	218.8	96.0	4388
	側面(上)-側面(下)	222.0	96.0	4324

3.2 スラブ供試体における検討

3.2.1 伝播時間によるグラウト充填評価

(1) 打撃位置と伝播時間の関係

図-5 にシース+PC鋼棒配置供試体SPGにおけるみかけの距離と伝播時間との関係を弾性波入力位置B1, B2およびB3のそれぞれについて示す。なお、弾性波入力位置から受信用AEセンサ位置までの長さをみかけの距離と定義する。これによれば、B1SPGでは、グラウトの充填程度が異なる場合でも、距離に応じた伝播時間には、あまり変化がみられない。この図における近似直線の傾きは、弾性波の見かけの伝播速度を示す。B1SPGでは、いずれの場合もみかけの伝播速度が、2000m/s程度であり、コンクリートの超音波伝播速度(たて波伝播速度)の半分ほどとなっている。これから、受信された弾性波は、表面波である可能性が高いと考えられる。B1で入力され、コンクリート表面部分を伝播した弾性波には、当然シースやグラウトの影響は含まれにくいと考えられる。これより、入力位置をB1とするとグラウト充填度の評価は難しいことが解る。これに対して、B2SPGおよびB3SPGでは、グラウト充填度が高くなるにしたがって、伝播時間は長くなる傾向を示した。また、打撃点からの距離が遠くなるに従って、グラウト充填状況の違いが明確になっている。これは、PC鋼棒端面あるいは定着プレートで入力された弾性波が、シースおよびグラウト部分を長く伝播することにより、その影響が大きくなるものと考えられる。また、みかけの伝播速度は、B2SPGで2600~4000m/s、B3SPGで3400~5000m/sと、入力位置の違いにより異なっている。B3入力の場合に伝播速度が速いのは、表-3のPC鋼棒の結果と関連しており、入力位置により異なる経路を伝播したのと考えられる。これより、PC鋼棒中心付近を打撃し、シースの影響を含む部分で弾性波を伝播させることにより、グラウトの充填評価が可能となるものと考えられる。

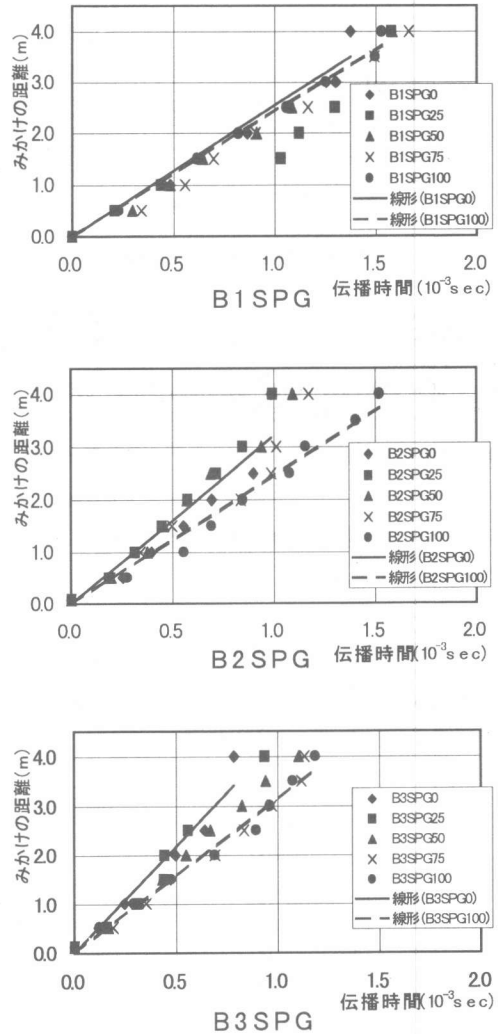


図-5 みかけの距離と伝播時間との関係

(2) 弾性波伝播経路に関する考察

図-6 にB2SG0, B2SPG0およびB2CにおけるB2打撃の場合のみかけの距離と伝播速度との関係を示す。これによれば、シースが埋設されているB2SG0およびB2SPG0では、コンクリートのみの供試体B2Cと比較すると弾性波の伝播時間が短くなっている。これは、B2で入力された弾性波がコンクリート部分のみを伝播したのではなく、シースの影響を含んだ伝播経路を取ったためであると考えられる。しかも、伝播時間が短くなるのは、3.1で示したようにシース単体の伝播速度がコンク

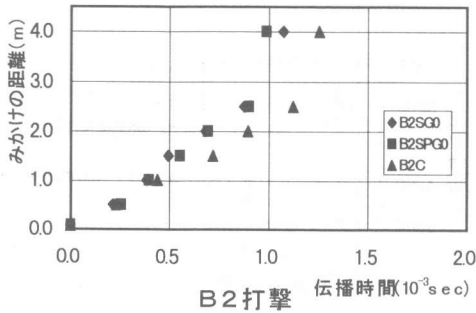


図-6 みかけの距離と伝播速度との関係

リートの伝播速度より早いためである。

3.2.2 周波数分布によるグラウト充填評価

(1) 打撃位置と受信位置が同じ場合

伝播時間による評価法は、特別なデータ処理を必要とせず簡易的な手法であり、概略検査に有効である。現時点では、グラウト未充填領域の位置標定までは難しいが、未充填箇所の特定のための詳細検査には周波数分布を用いる方法が有効である³⁾。本実験では、SPG0 および SPG100 について、周波数分布を検討するための計測を行った。なお、計測間隔は 2 MHz、計測長さは 1000 μ s とした。図-7 にシース直上で計測した周波数分布と代表的な卓越周期をピーク (Peak 1~3) として示した。コンクリートの伝播速度を 4300m/s として計算すると版厚 (250mm) に相当する共振周波数が 8.6kHz であり、これは SPG0 および SPG100 のいずれにおいても明確なピーク (Peak 1) となって現れている。また、SPG100 では、20kHz 付近に第 2 のピーク (Peak 2) がみられるが、これはグラウトの充填されたシースとコンクリート表面との間における共振周波数の計算値 (21.5kHz) に近く、グラウトの充填有りを示すピークと考えられる。一方、SPG0 では、SPG100 に見られた Peak2 の位置でのピークが消失し、代わって Peak 2 のほぼ倍の周波数の成分が卓越 (Peak 3) していることがわかる。グラウトなしのシースとコンクリート表面との間における共振周波数を計算すると、グラウト有りのシースの場合の 2 倍となる³⁾ ことがわ

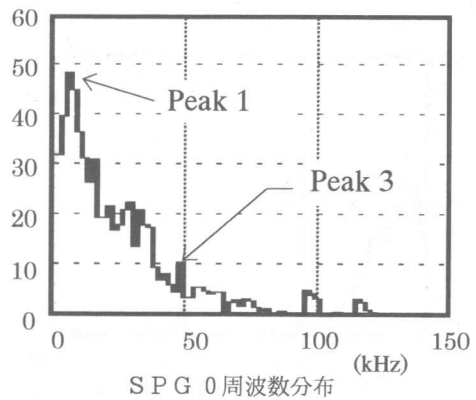
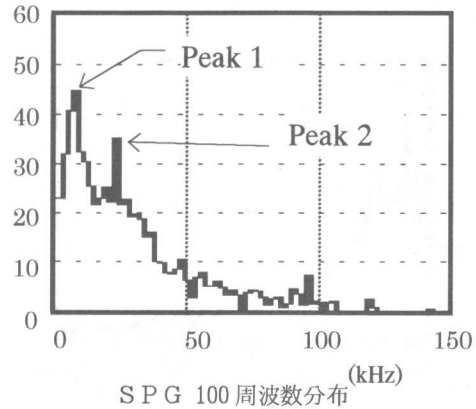


図-7 シース直上で計測した周波数分布

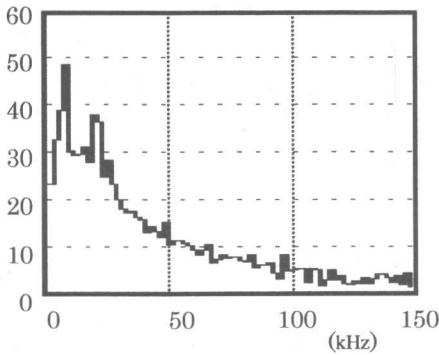
かっており、このピーク (Peak 3) からは、グラウト充填がないことが評価できる。

(2) 打撃位置と受信位置が異なる場合

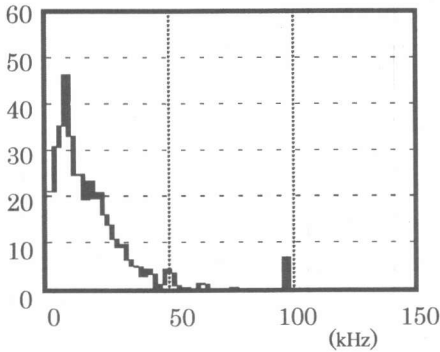
図-8 に PC 鋼棒を直接打撃し (B3 位置)、もう一端で受信した場合の周波数分布を示す。これによれば、グラウト充填度が高くなるにしたがって、グラウトの影響により高周波数成分の減衰が著しくなる傾向を示している。これは、既往の研究結果^{1), 2)} と一致している。この方法は、一定の条件下において相対比較を行う場合は有効と考えられるが、周波数分布状況からグラウト充填程度を把握するためには、グラウト充填度が高周波成分の減衰に与える影響を定量的に検討していく必要がある。

3.3 実構造物における評価結果

実構造物で計測したグラウト充填度と伝播速



B3SPG0 周波数分布



B3SPG100 周波数分布

図-8 PC鋼棒受信周波数分布

度との関係を図-9に示す。実構造物においても、グラウト充填の有無により、弾性波の伝播速度が異なり、スラブ供試体実験の結果と同様な傾向がみられ、本手法の実際の構造物への適用性が確認された。また、PC鋼棒端のかぶり厚さが7cm程度ある保護コンクリート上から弾性波を入力した場合においても、供試体実験の結果と同様な結果を得ることができ、既設PC構造物への適用の可能性が示された。

4. まとめ

- (1) 本研究で対象とした版状のPC構造物においては、弾性波がシース部分を伝播するよう伝播経路を選定することによって、打撃により入力した弾性波をコンクリート表

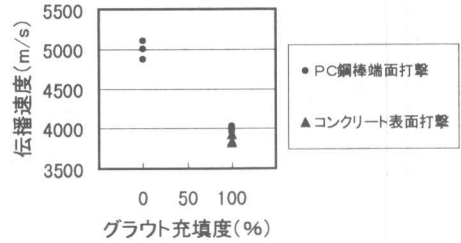


図-9 グラウト充填度と伝播速度との関係

面で受信した場合の伝播時間から、グラウトの充填評価が可能である。

- (2) 確定的な診断を行う場合は、打撃と受信を同じ位置で行うことによって得られた周波数分布を解析することにより、グラウト充填評価が可能である。
- (3) PC鋼棒に直接弾性波の入力を行い、一方のPC鋼棒端面で弾性波を出力する場合には、周波数分布により、グラウト充填評価が可能である。
- (4) 実際のPCタンク壁面において計測を行い、評価法の適用性を確認した。

謝辞 実験および解析に際してご助力を得た岐阜大学大学院生の浅野雅則君ならびに学部生の中澤里君に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤宏行, 尼崎省二: 衝撃弾性波による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
- 2) 黒野幸弘, 山田和夫, 中井祐司: 衝撃弾性波法を適用したPC床版のグラウト充填性評価に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.1175-1180, 1995
- 3) Barbara J. Jaeger, Mary J. Sansalone, and Randall W. Poston: Detecting Voids in Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method, ACI Structural Journal, July-August, pp.462-473, 1996