

(105) 衝撃弾性波法を用いた弾性波伝播時間に基づくPCグラウト充填評価

岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 ○中澤 里
 岐阜大学工学部 土木工学科 鎌田 敏郎
 (株)安部工業所 東京技術部 正会員 北園 英明
 (株)安部工業所 技術部 正会員 横山 博司

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物において、グラウトは、PC鋼材の防食を目的として充填されており、構造物の耐久性にも非常に重要な役割を担っている。もし、シーす内にグラウト未充填箇所が存在すれば、鋼材の腐食原因となり、PC構造物の破断事故をも引き起こしかねない。近年、PCグラウト充填評価手法として非破壊検査手法の1つである衝撃弾性波法の研究が盛んに行われている^{1)~3)}。しかし、そのほとんど¹⁾²⁾は、弾性波の入力をPC鋼棒の端面打撃により行い、もう一方の端面において受信を行うことによって評価するというものである。そのため、この手法を既設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、適用範囲が限定されるという問題点がある。

そこで本研究では、実構造物に近い断面形状を持つスラブ供試体を用いて、既設構造物での計測に有効となる弾性波入力位置について検討した上で、グラウト充填程度と弾性波伝播時間の関係を明らかにすることを目的とした。さらに、本手法の適用性を確認するため、供試体と同様、厚さが一定の版構造で、かぶりコンクリート厚も比較的小さい実際のPCタンク(写真-1にその例を示す)を用いて、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、①PC構造物における各構成材料の超音波伝播速度の計測、②スラブ供試体および③実構造物のそれぞれについて弾性波伝播時間の計測を行い、各種の考察を加えた。

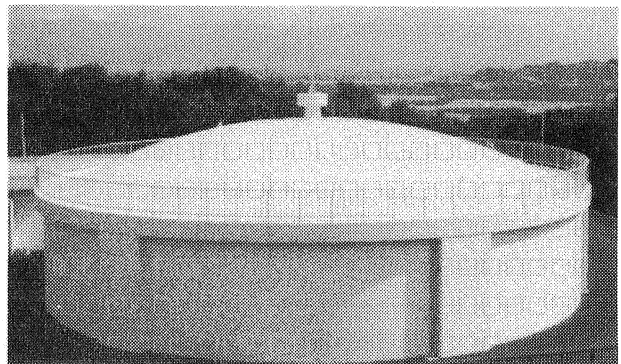


写真-1 PCタンクの例

2.1 各構成材料における超音波の伝播速度計測

PC構造物を構成する各材料、すなわち、PC鋼材、シーす、定着プレート、コンクリートおよびグラウトの超音波伝播速度を計測した。さらに、コンジットシーすφ35にグラウトを充填した複合部材およびコンジットシーすφ35+PC鋼棒φ23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伝播速度計測を行った。なお、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

2.2 スラブ供試体における弾性波伝播時間計測

(1) スラブ供試体

本研究では、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体を作製した。そして、グラウト充填率の違いが弾性波応答特性に及ぼす影響を調べるため、グラウト充填率を0%、25%、50%、75%および100%と変化させた。また、比較のため、コンクリートだけの供試体 (C) も作製した。コンクリートおよびグラウトの配合は2.1で用いたものと同様とした。シースにはコンジットシースφ35を、PC 鋼棒にはB種1号φ23を使用した。また、PC 鋼棒1本につき200kNの緊張力を導入した。シリーズ名は、表-2に示す記号名の頭に図-2に示す弾性波入力位置 (記号: B1~B4) を付けたものとする。

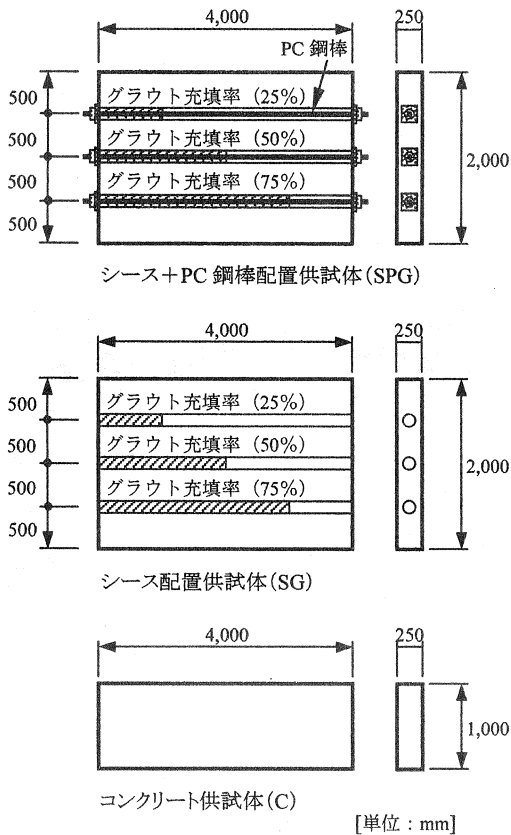


図-1 スラブ供試体

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 B4
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 B4
SPG25	25		
SPG50	50		
SPG75	75		
SPG100	100		
C	—	コンクリート	B1 B2 B4

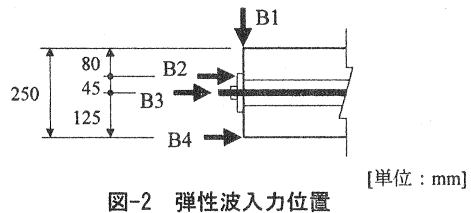


図-2 弾性波入力位置

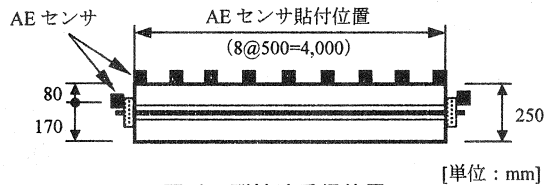


図-3 弾性波受信位置

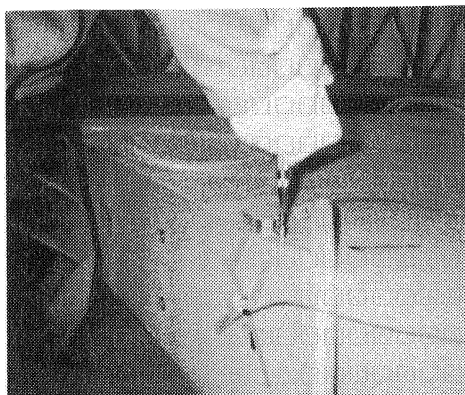


写真-2 パネポイントをを用いた弾性波の入力

(2) 弾性波の入力および計測

弾性波の入力位置を図-2に、弾性波の受信位置を図-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によって行い（写真-2参照）、受信はAEセンサによって行った。弾性波の伝播時間の計測には6ch デジタル AE 計測システムを用い、1ch 分の AE センサを打撃位置の近傍に、残りの 5ch 分の AE センサをその他の受信位置に貼付した（写真-3参照）。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るため、1回の打撃によって5ポイントでの伝播時間を計測することができる。なお、AEセンサには150kHz共振型センサを用いた。

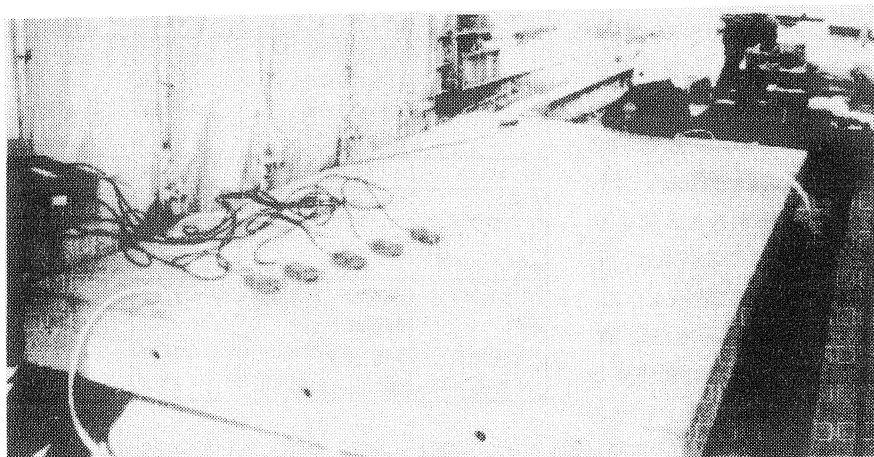
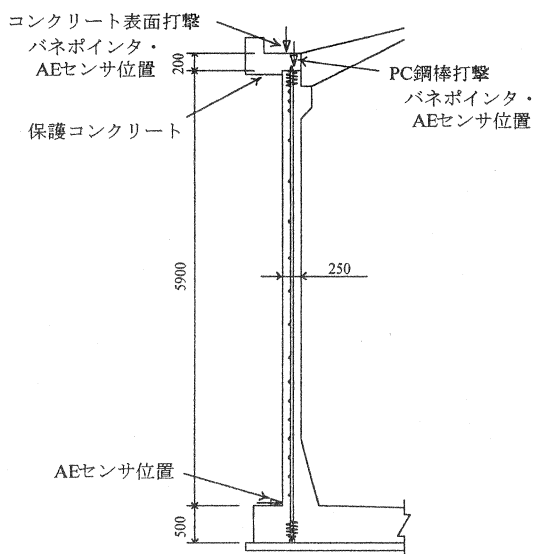


写真-3 AE センサの貼付状況

2.3 実構造物における弾性波伝播速度計測

施工中の PC タンクの壁面部分を対象として、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、構造物に配置してある PC 鋼棒は、B 種 1 号 $\phi 17$ であり、配置間隔は 532mm である。スラブ供試体実験と同様、受信用の AE センサには 150kHz 共振型センサを用い、弾性波の入力に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、さらに、弾性波の入力位置および受信位置を図-4に示す。なお、バネポイントによる打撃は、PC 鋼棒端面にて行い、さらに保護コンクリート打設後、コンクリート表面においても行った。



[単位：mm]

図-4 PC 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

表-3に各構成材料の超音波伝播速度の計測結果

を示す。これによると、PC 鋼棒、シー
スおよび定着プレート等の鋼製の材料
に対して、コンクリートでは 800m/s
程度、グラウトでは 1500m/s 程度、超
音波伝播速度が小さくなっている。また、PC 鋼棒径の増加にしたがって、伝
播速度が少しずつ大きくなる傾向を示
した。

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、PC
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。この結果は、尼
崎らの研究⁷⁾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 PC
鋼棒を伝播する弾性波速度が低下する
傾向と一致する。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。また、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 [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。つまり、複合部材において、グ
ラウトの充填に伴い超音波伝播速度が低下する傾向が見られた。これらから、グラウトの充填による超音波
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。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しているものと考えられる。

3.2 スラブ供試体における検討

(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-伝播時間の関係を弾性波入力位置 B1,
B2, B3 および B4 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 センサ位置までの距離を
みかけの距離と定義する。また、この図における近似直線の傾きは、弾性波のみかけの伝播速度を示す。

これによると、B2SPG および B3SPG では、グラウト充填度が高くなるに従って、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
程度、B3SPG で 3400~5000m/s 程度と、弾性波の入力位置の違いにより異なっている。B2 入力に比べ B3
入力の場合に伝播速度が大きいのは、表-3 の結果と関連しており、入力位置により弾性波が異なる経路を伝
播したためと考えられる。以上の結果より、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であることが確認できた。

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)
PC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	$\phi 100 \times 200$	44.4	20.0	4505
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($\phi 23$)	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

これに対して、弾性波入力位置が B1 および B4 の場合には、グラウト充填程度に応じた伝播時間の変化はほとんど見られなかった。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（縦波伝播速度）の半分ほどとなっている。このことから、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。このため、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。

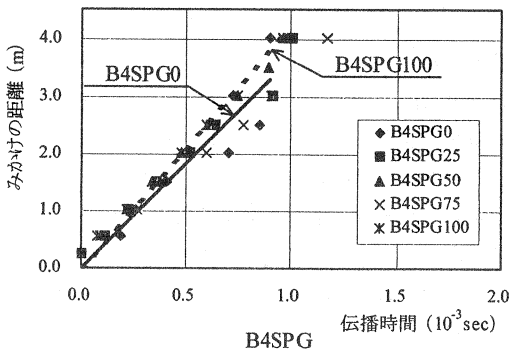
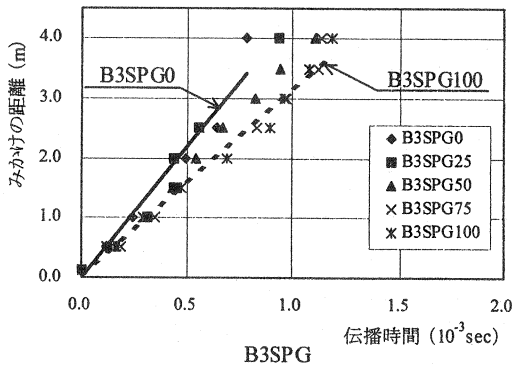
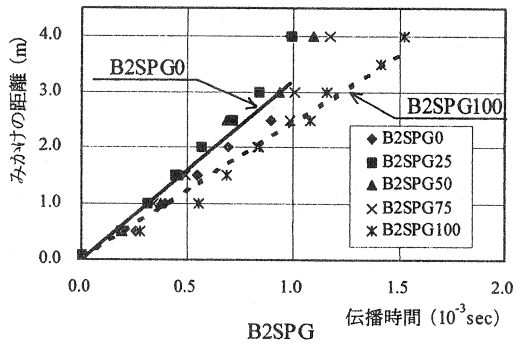
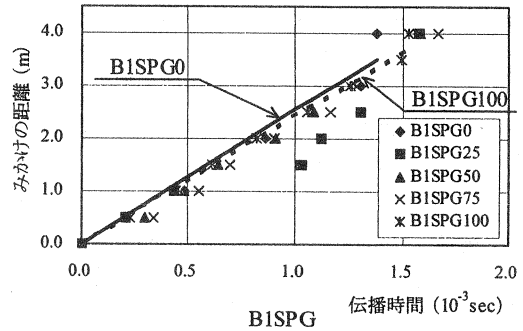
B4SPG では、グラウト充填度が高くなるに従って、伝播時間が長くなるという B2 および B3 と同様の傾向は多少見られたものの、必ずしもグラウト充填率に従った違いが見られはしなかった。また、打撃点からの距離が遠くなくても、その影響の度合いは小さい。これは、B4 入力の場合、弾性波がシースおよびグラウト部分を伝播する割合に比べて、コンクリート中を透過する割合の方が大きく、受信された弾性波には、シース内のグラウト充填の違いによる影響が十分に含まれなかったためと考えられる。以上のことから、入力位置を B1 および B4 とすると、グラウト充填度の評価は難しいことが解る。

(2) 弾性波伝播経路に関する考察

図-6 に B2SG0, B2SPG0 および B2C におけるみかけの距離と伝播時間との関係を示す。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、シース内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リートの伝播速度より大きいためである。

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度との関係を図-7 に示す。実構造物においても、グラウト充填の有無により、弾性波の伝播速度に違いがみられた。また、その違いは、スラブ供試体を用いた



実験結果と同様の傾向を示しており、本手法の実構造物への適用性が確認できた。さらに、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の結果を得ることができ、既設 PC 構造物への適用の可能性を示すことができた。

4. 結論

本研究では、実構造物に近い断面形状を持つスラブ供試体および施工中の PC タンクを用いて、評価パラメータを弾性波伝播時間とした場合のグラウト充填評価の可能性を検討した。本研究で明らかとなった点を要約すると、以下のとおりである。

- ① 本研究で対象とした版状の PC 部材においては、弾性波の入力は、弾性波がシース部分を伝播するよう PC 鋼棒端面の近傍において打撃するのが有効である。
- ② さらに、その弾性波をコンクリート表面で受信し、弾性波伝播時間を比較することによりグラウトの充填評価を行うことが可能である。
- ③ 実際の PC タンク壁面においても計測を行い、本手法の適用性を確認した。

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。しかしながら、現段階では、グラウト充填率については相対的な評価にとどまっており、弾性波の伝播経路に関する理論的な検討が十分とはいえない。したがって今後、本手法の実用化にあたっては、実際の構造物へのセンサの貼付方法やデータの効率的な処理方法について検討するとともに、伝播経路に関する解析的な検討も行っていく必要があると考える。また著者らは、弾性波の周波数特性に着目した評価法についても検討を行っており⁴⁾、これと弾性波伝播時間による評価とを併せた効率的なグラウト評価システムを構築していく予定である。

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
- 4) 北園英明, 鎌田敏郎, 横山博司, 六郷恵哲: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.367-372, 2000

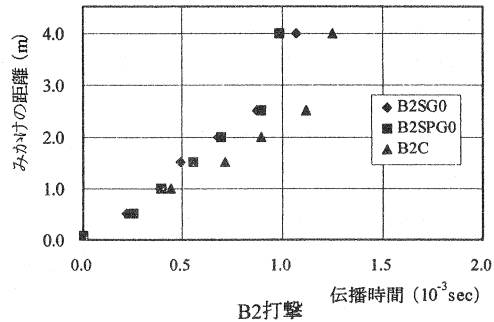


図-6 みかけの距離と伝播時間との関係

