

論文 グラウト内 PC 鋼棒を伝わる衝撃弾性波速度に与える拘束条件の影響

矢野雅彦^{*1}・高海克彦^{*2}・浜田純夫^{*3}

要旨：本研究は，PC グラウトの欠陥部探査への衝撃弾性波の伝播速度の適用に当たって影響すると考えられるパラメータのうち，鋼棒導入応力，コンクリート拘束，およびグラウト充填長さならびに硬化状況を対象に検討した。その結果，PC 鋼棒を伝わる衝撃弾性波の伝播速度は，PC 鋼棒への導入応力の増加，ならびにグラウト充填長さによって直線的に低下すること，およびグラウトの硬化による拘束によって充填から 7 日目までは曲線的に低下し，それ以降は横ばいとなり収束することがわかった。これらの結果を用いてグラウト充填長さを把握する評価式の提案を行った。

キーワード：ポステン PC 構造，グラウト，衝撃弾性波，音弾性

1. はじめに

ポステンション方式の PC 構造物において，シース管内部にグラウト未充填箇所が存在することは，構造上重大な欠陥箇所となり，その耐力および耐久性に大きな影響を与えることが懸念されている。実際に PC 構造物を対象として調査が行われ，シース管内のグラウトの充填が不十分である構造物が確認され報告されている。そのためグラウト未充填箇所に対策を行うことが急務となっている。しかし，シース管内部を目視観察することは不可能であり，非破壊調査法に頼らざるを得ないのが現状である。現在行われている非破壊試験法として，X 線透過法，熱赤外線法などが有力であるが，コスト・労力などを考慮すると最良の方法とは言い難い。そこで，非破壊試験法の一つであり，簡便かつ安価に測定が行える衝撃弾性波法が注目され実験および解析的な研究も行われている。

既往の研究では^{1),2)}，衝撃弾性波の伝播特性のうち伝播速度以外に，検出弾性波の減衰特性，周波数特性，スペクトル解析などにより検討が重ねられているが，その特性とグラウト充填度の定量的な関係は十分に得られていないと思われる。本研究では，伝播速度特性とグラウト充填度の関係を，鋼材導入応力・シース埋設コンクリート部材の大きさ，グラウト充填度・グラウトの硬化状態をパラメーターとし

て検討した。これらの影響要因を個々に検討するために，それらの影響を個別に検討する試験を行った。その結果から，充填長さ状況を求める算定式を提案し，既往の実験との比較により提案式の適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 緊張力に関する実験

鋼材の衝撃弾性波伝播速度計測実験には図-1 に示す装置を用いた。伝播速度に対する鋼材形状の影響を調べるため，供試体はプレート供試体 3 体およびパイプ供試体 5 体を用いた。それぞれの寸法については表-1 に記載する。

各供試体のヤング係数は P40A を除く全てが 200kN/mm²で，P40A のみ 202kN/mm²である。

計測は供試体に T 社の 708 型圧電型加速度計を 20cm 間隔で設置し，S 社の SW3613C 型ソレノイド

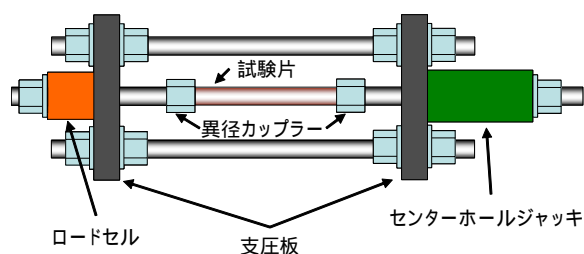


図-1 応力導入装置

*1 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)

*2 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 工博 (正会員)

*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D (正会員)

ハンマーで打撃を行い、衝撃弾性波速度の位相差を検出した。また、計測時の導入応力は 100N/mm^2 刻みで 500N/mm^2 まで増加させて行った。計測の様子、圧電型加速度計の設置状況を図-2 に示す。

2.2 コンクリート部の断面寸法および経時変化の伝播速度への影響に関する実験

シース管を埋設したコンクリートの断面寸法が PC 鋼棒の伝播速度に及ぼす影響を確認するため、コ

表-1 供試体記号および寸法

プレート供試体		パイプ供試体	
供試体 記号	幅×高さ (mm)	供試体 記号	直径×厚さ (mm)
PL3	3×38	P29	29×3.6
PL5	5×38	P32	32×5.0
PL8	8×38	P40A	40×5.0
		P40B	40×5.7
		P43	43×7.6

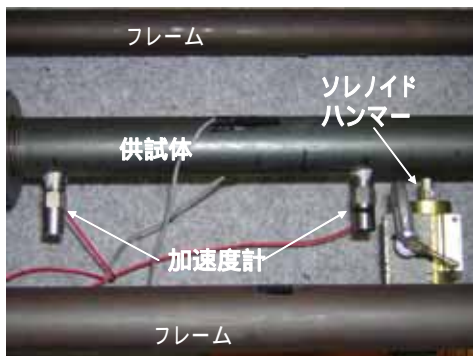


図-2 計測の様子

ンクリートはり部材の断面寸法を変化させた供試体を作製し、グラウトの充填を行い、衝撃弾性波の計測を行った。はり部材断面寸法・供試体記号については表-2に記載する。コンクリート部の長さは60cmで、シースはφ43、PC鋼棒はφ17で長さは定着部を入れ80cmである。導入応力は鋼棒応力で 0N/mm^2 と 500N/mm^2 とした。グラウト充填状況は、未充填の場合と完全充填の場合である。

コンクリートの配合およびグラウトの配合は表-3、表-4 に示す通りである。グラウト材は、プレミックスタイプの無機系注入材を使用した。

計測方法は、打撃点側には PC 鋼棒端部にナットを取り付け、ナットに圧電型加速度計を設置し、反

表-2 供試体記号および寸法

断面(cm)	0N/mm^2		500N/mm^2	
	充填	未充填	充填	未充填
20×20	G-20	N-20	GP-20	NP-20
15×15	G-15	N-15	GP-15	NP-15
10×10	G-10	N-10	GP-10	NP-10
シース	G-S	N-S		

表-3 コンクリートの配合

単位量(kg/m ³)					
W/C	W	C	S	G	AE
45%	372	167	773	1034	7.44

表-4 グラウトの配合

単位量(kg/m ³)		
W/C	W	C
35	524	1496



図-3 打撃点側での計測

対側端部には直接圧電型加速度計を設置しソレノイドハンマーを用いて打撃を行い計測した。打撃点側の計測の様子を図-3 に示す。計測は、グラウト充填直後、6 時間後、1 日後、3 日後、7 日後、14 日後、21 日後、28 日後に行った。

2.3 グラウトの充填長さと伝播速度に関する実験

グラウト充填長さの伝播速度に及ぼす影響を把握するため、グラウトの充填長さを変化させた供試体を作製した。既往の研究では、コンクリートに埋設したシース内部に異なる長さの充填を行っているため、その充填状況を確認できない場合が多いため、本研究では、充填状況を目視できるようにアクリル管を使用した。グラウト充填部と未充填部の境界となる遮断壁は、厚さ 3.0mm のゴム板を設置し、ゴム

板とアクリル管との隙間にはシリコンを充填した。供試体寸法を図-4に示す。グラウトの充填長さは図-5に示すようにそれぞれ端部から12.5、25.0、37.5 mm および完全充填の場合の5ケースを設定した。また導入応力は鋼棒応力で 0N/mm^2 と 60N/mm^2 の2通りとし、 60N/mm^2 の鋼棒応力を導入した供試体をAP供試体、応力を導入しなかった供試体をAN供試体とした。計測方法は2.2と同様に行った。

3. 結果および考察

3.1 鋼材導入応力による伝播速度への影響

図-6に導入応力と伝播速度の関係を示す。これより、供試体の断面積が小さくなるに従い、無応力時の伝播速度が遅くなることが両供試体とも確認された。PL8とPL5の初期伝播速度の差とPL5とPL3の初期伝播速度の差からプレート供試体に関しては幅が1mm薄くなるに従い、約 240m/s 低下する傾向があった。パイプ供試体でも断面積の増加に従い無応力時伝播速度は増加することは確認できた。このことから、断面積および断面形状の差異によって無応力時伝播速度が変化することがわかった。また、導入応力の増加に伴い伝播速度が直線的に低下することがいずれの供試体でも確認できた。これは、いわ

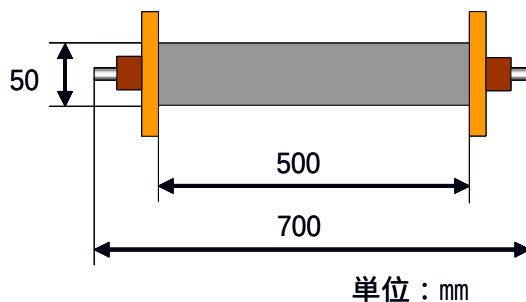
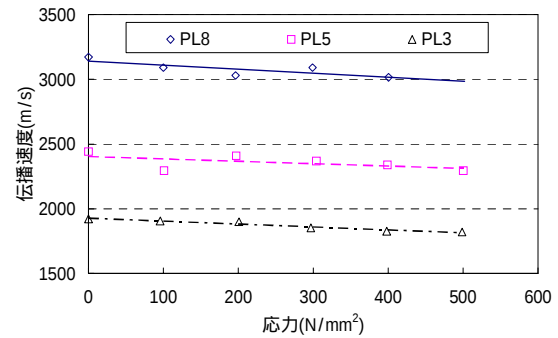


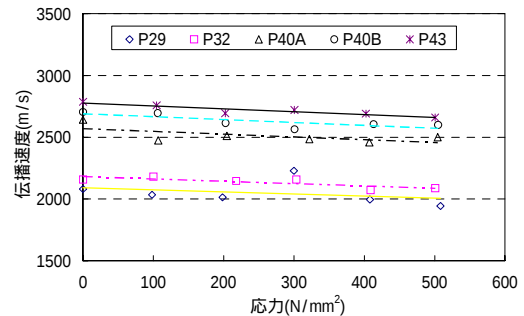
図-4 供試体寸法



図-5 可視化供試体



a) プレート供試体



b) パイプ供試体

図-6 応力と伝播速度の関係

表-3 音弾性定数

供試体 記号	音弾性定数	供試体 記号	音弾性定数
PL8	-1.18×10^{-4}	P29	-8.02×10^{-5}
PL5	-7.67×10^{-5}	P32	-8.68×10^{-5}
PL3	-9.85×10^{-5}	P40A	-8.73×10^{-5}
		P40B	-8.79×10^{-5}
		P43	-8.40×10^{-5}

ゆる音弾性効果に起因するものである。一般的に弾性体を伝播する波の速度は応力などの影響を受けず、常に一定であるとされているが、厳密には応力を与えることで低下することが確認されている^{3), 4)}。

この低下の度合いを示す定数である音弾性定数が式(1)より算出できる³⁾。

$$\frac{V - V_0}{V_0} = C_E \sigma \quad (1)$$

ここに、 V は応力下での伝播速度(m/s)、 V_0 は応力 0N/mm^2 での伝播速度(m/s)、 C_E は音弾性定数、 σ は導入応力(N/mm^2)である。

音弾性理論では厳密には、応力導入方向と平行に進行する縦波、振幅が応力導入方向と垂直な横波、応力導入方向に進行する表面波に対する音弾性定数が3次元的に定義される³⁾。しかし、本研究ではPC鋼材が棒部材であること、簡易な算定が望ましいことから、既往の研究で1次元の場合、縦波と横波の音弾性定数よりわずかに大きい値を取る⁴⁾とされる表面波の音弾性定数を採用することにした。

式(1)より算出された音弾性定数を表-3に示す。プレート供試体の方がパイプ供試体の結果と比較するとばらつきが多くなっている。これはプレート供試体の幅が小さく、パイプ供試体と比べて剛性が低いため打撃を行った際にたわみ振動が生じるため、入力した弾性波が正確に受信できなかったためと考えられる。パイプ供試体の結果より、PC鋼棒の音弾性定数は $8.7 \times 10^{-5} (\text{kN/mm}^2)^{-1}$ であると考えられる。

3.2 コンクリート部の断面寸法および経時変化の影響

図-7にコンクリート部材の断面寸法の異なる供試体の弾性波伝播速度の経時変化を示す。この結果より、導入応力の有無に関係なくコンクリート部材の断面寸法は、PC鋼棒を伝わる弾性波の伝播速度には影響しないことが確認された。経時変化をみると、両グラフとも充填後7日までは曲線的に大きく低下しているが、7日以降はほぼ横ばいになっており、充填後7日までにグラウトの硬化はほぼ完了しているものと考えられる。

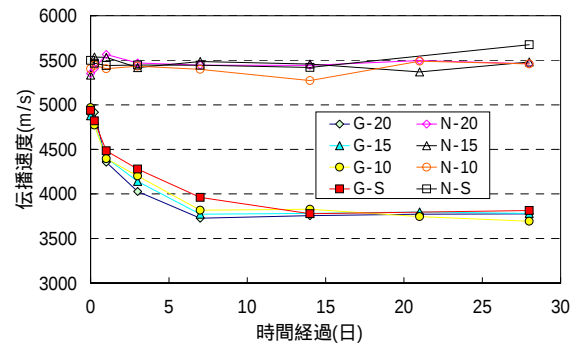
図-8に経過時間と伝播速度の低下量の関係を示す。このグラフはグラウト充填直後の伝播速度と各計測時間での伝播速度との差を縦軸にとることで、充填からの経過時間よっての低下量を示している。このグラフからも、充填から7日以降では大きな伝播速度の低下がなくなり横ばいになっていることがわかる。この変化を近似すると、式(2)のようになった。

$$\frac{1150(1.5^{0.83T} - 1)}{1.5^{0.83T}} = V_T \quad (2)$$

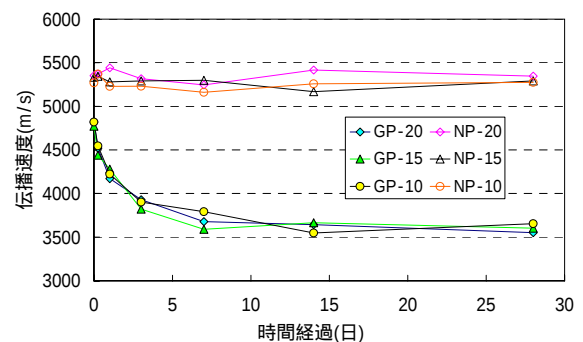
T は経過時間(日)、 V_T は伝播速度の低下量(m/s)を表す。

3.3 グラウト充填長さによる影響

図-9に可視化したアクリル供試体試験で行ったグラウトの充填長ささと弾性波伝播速度の関係を示す。このグラフよりAP供試体もAN供試体も充填長さ



a) 応力 0N/mm²



b) 応力 500N/mm²

図-7 断面寸法と経時変化

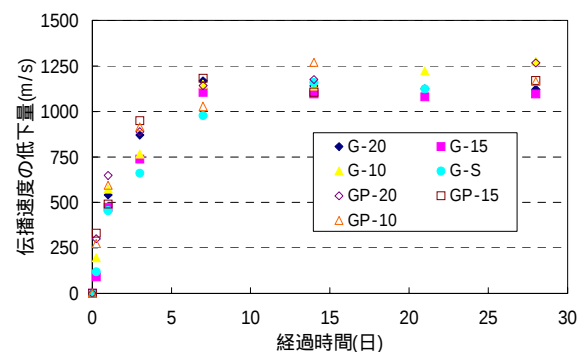
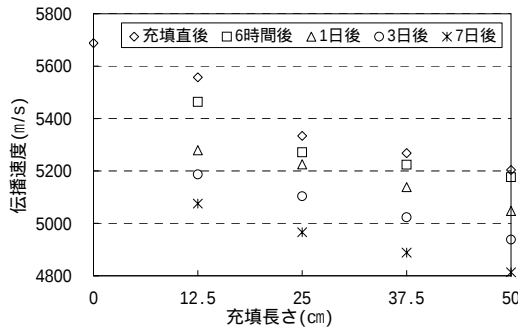


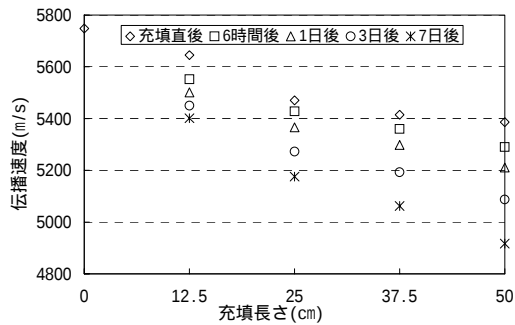
図-8 経過時間と伝播速度の低下量

の増加に伴い伝播速度は直線的に低下していることがわかる。またこの傾向は、充填直後から7日目までどの状態においても同様に確認できる。伝播速度の低下は、拘束度、エネルギー減衰によるものと考えられるが、本実験の下では1mにつき750m/s低下に相当するものと推定された。

AP供試体の充填直後は他の結果よりも傾きが大きく低下しているが、これはグラウトの充填時にPC鋼棒にグラウト材が付着してしまい、加速度計の設置がうまく行えなかったためである。



a) AP 供試体



b) AN 供試体

図-9 充填長さと伝播速度の関係

4. グラウト充填状況の評価式の提案

4.1 グラウト充填状況の評価式の構成

以上の結果より、グラウトの充填を評価するための式の提案を行う。PC 鋼棒を伝わる弾性波の伝播速度の変化の要因であると考えられる 3 つの要素を考えると式(3)のような式が考えられる。

$$V = V_0 + V_\sigma + V_X + V_T \quad (3)$$

ここに、 V : グラウト充填後の伝播速度(m/s), V_0 : PC 鋼棒の初期伝播速度(m/s), V_σ : 応力 σ (N/mm²) での伝播速度低下量(m/s), V_X : グラウト充填長さ X (m)での伝播速度低下量(m/s), V_T : 充填から T (日) 経過の硬化による伝播速度低下量(m/s)である。

これらの低下量を本研究で求められた結果を当てはめると、導入応力による低下量は、音弾性定数 $-8.7 \times 10^{-5} \text{ (kN/mm}^2\text{)}^{-1}$ であることから、式(4)となる。

$$V_\sigma = -8.7 \times 10^{-5} \times \sigma \times V_0 \quad (4)$$

次にグラウト充填長さによる低下量は、1m につき 750m/s 低下することから式(5)のようになる。

$$V_X = -750 \times X \quad (5)$$

最後に経過時間による低下量であるが、これは、3.2 で述べたように式(2)のようになる。

以上の式より、伝播速度の低下式は、式(6)で表される。

$$V = V_0 - 8.7 \times 10^{-5} \sigma V_0 - 750 X - \frac{1050(1.5^{0.83T} - 1)}{1.5^{0.83T}} \quad (6)$$

グラウト充填評価において、未知数となる値はグラウト充填長さ X であるため、 X を求める式に置き換えると次式となる。

$$X = \frac{V_0 - V - 8.7 \times 10^{-5} \sigma V_0 - \frac{1050(1.5^{0.83T} - 1)}{1.5^{0.83T}}}{750} \quad (7)$$

4.2 提案式の適応性についての検討

この提案式の適用性について検討を行うため、過去の研究結果と比較を行った。比較に用いた供試体⁵⁾は、コンクリート部材の断面寸法が 250mm × 250mm で長さが 1500mm の PC 梁供試体 2 体である。PC 鋼棒は $\phi 15$ 長さ 1700mm で、シース管は $\phi 23$ を使用している。また導入応力は鋼棒応力で 300N/mm² である。配筋は PC 鋼棒軸方向に D10 を 4 本配置し、15cm 間隔に $\phi 10$ のスターラップを配置した。この 2 つの供試体はグラウトは完全充填と端から半分充填したものである。グラウト充填状況と供試体記号の対応を表-4 に記載する。

グラウト充填部と未充填部の境界面は、発泡スチロールを用い、PC 鋼棒およびシース管との隙間は、シリコンで埋めている。

弾性波の計測方法は、既に述べた方法と同様に圧電型加速度計とソレノイドハンマーと用いて行った。この 2 体の梁供試体の伝播速度を表-5 に示す。また、PC 鋼棒のみの無応力時の実測伝播速度は約 5600m/s であった。これは、一次元の波動方程式や文献¹⁾などの実測値と比較すると若干大きい、数回の計測により求めた値である。

表-5 のように得られた結果および梁供試体の導入応力、経過時間などを本研究で提案した式に代入し、それぞれの供試体のグラウト充填長さを算出した。その結果、提案式より得られた充填長さを表-6 に示す。

本研究で提案した式では、両供試体とも 3 日後の結果は B₇₅ 供試体で 0.73m、B₁₅₀ 供試体では 1.53m と実際の充填長さとはほぼ同程度の値が求められた。し

かし、B₇₅供試体の7日後においては、0.55mと実際のグラウト充填長さである0.75mよりも0.2mも差が生じる結果となった。提案式の計算値と実測値の比を表したグラフが図-10である。図より3日後の実測値を提案式はほぼ予測しているが、経過時間が短いと充填部を過大評価、長いと過小評価している。今後ポステン PC 構造施工時のグラウト欠陥探査という実用性を考慮すると、グラウト注入直後の予測値の精度向上に焦点を絞る必要がある。これには、グラウト硬化拘束による影響度を評価する式(2)を再検討する計画である。

5. 結論

以上のことから、本研究で得られた結論として以下のことが挙げられる。

- 1) PC鋼材に応力を導入した場合、弾性波の伝播速度は音弾性理論に従い直線的に低下する。その際の音弾性定数を本研究では $-8.7 \times 10^{-5}(\text{kN/mm}^2)^{-1}$ と評価した。
- 2) PC 鋼材内部を伝わる弾性波は、シース管外側周辺のコンクリート部材の断面寸法などの影響を受けない。
- 3) グラウト充填後の弾性波の伝播速度は7日目まではグラウトの硬化に従い曲線的に低下し、7日以降は横ばいとなり低下しない。
- 4) PC 鋼棒を伝わる弾性波の伝播速度はグラウトの充填長さによる拘束の影響を受け、グラウト充填長さの増加に従い、直線的に低下し、グラウト充填1mにつき約750m/sほど低下する。
- 5) 伝播速度低下の要因を分析し、それぞれの速度低下を実験から求め、全体としてのPC 鋼棒の伝播速度からグラウト充填長さを予測した。その結果、3日目は実験値と整合するが、他の経過時間において、更なる予測精度の向上が必要である。

参考文献

- 1) 北園秀明・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.367-372，2000.7
- 2) 斉藤宏行・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研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.1，pp.373-378，2000.7

表-4 供試体記号および充填状況

供試体記号	グラウト充填長さ (m)
B ₇₅	0.75
B ₁₅₀	1.50

表-5 弾性波速度計測結果

経過時間	B ₇₅	B ₁₅₀
直後	4835	4230
6時間後	4707	4078
3日後	4235	3636
7日後	4091	3439

(単位：m/s)

表-6 提案式より算出された充填長さ

経過時間	B ₇₅	B ₁₅₀
充填直後	0.83	1.63
6時間後	0.88	1.72
3日後	0.73	1.53
7日後	0.55	1.42

(単位：m)

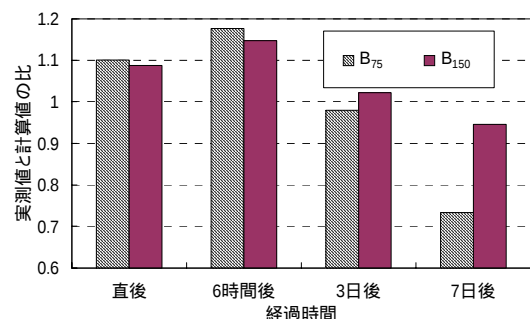


図-10 計算値と実測値の比較

- 3) 福岡秀和編：音弾性の基礎と応用，オーム社，pp.6-9，1993
- 4) 日本非破壊検査協会：音弾性，pp.2-18，87-89，1994
- 5) 高海克彦・森本春樹・浜田純夫：グラウト性状の差異によるPC 鋼棒の振動特性について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.2，pp.667-672，2002.7