

論文 グラウト性状の差異による PC 鋼棒の振動特性について

高海 克彦*1・森本 春樹*2・濱田 純夫*3

要旨：本研究では、定着システムがネジ方式によるポストテンション方式の PC はり構造物において、衝撃弾性波法を利用してグラウト充填性状の空間的および経時的差異による PC 鋼棒の打撃振動特性について一連の検討を行った。その結果、弾性波伝播速度はグラウトが硬化後と同様フレッシュ状態においても、緊張力、鋼棒径およびシース径により変動し、グラウト硬化後は急激に伝播速度が低下することを示した。また、周波数特性において、鋼棒とコンクリートそれぞれの卓越振動数から、グラウト充填性状の差異が示されることを明らかにした。

キーワード：非破壊試験，衝撃弾性波，伝播速度，周波数特性，経時変化

1. はじめに

近年、長期間供用してきた PC 構造物において、PC 鋼材の腐食による破断事故のような構造物を維持していく上での不具合の発生および施工不良などの破断原因が、国内外で多く報告されている。ポストテンション方式の PC 構造物を施工する上で PC グラウトの役割とは、PC 鋼材とコンクリート部の付着を確保し鋼材の腐食を妨げる目的があり、設計・施工の現場では地味な作業であるが構造物を長期間維持する上で極めて重要な作業となる¹⁾。しかしながら、新設および既設構造物での充填状況確認検査において、検知部分がコンクリート中に埋め込まれているため、目視観察での発見は不可能である。このため、外観変状を生じた不安箇所での削孔作業や実際に画像として、観察し確認できる X 線透過法等が最も有力で精度も高いといわれている。しかし、装置の複雑さや人的な影響もあることから、簡易な測定装置で作業が容易かつ迅速に行え安全で、かつコストの面に関しては総建設費の削減に伴うライフサイクルコストの低減も含め、安価な打音振動法を利用し、

可能な限り活用することが望ましいと考えられている²⁾。

すでに衝撃弾性波法による PC グラウトの充填評価について、個々にフレッシュグラウトおよび硬化グラウトについての研究報告がいくつかある^{3)~6)}。

本研究は、PC はり供試体に対し、その構造諸元およびグラウト注入後の経過時間をパラメーターとし、衝撃弾性波法を利用して、波動伝播速度および周波数特性からグラウト充填性状を把握しようとしたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

本研究では、シース内に空隙を有する PC 鋼棒の振動特性を定量的に把握するため、**図-1**に示すように、断面寸法を 200×180mm とする長さが 3m と 1.5m の PC 梁供試体を製作した。PC 鋼棒は B 種 1 号を用い、それぞれ長さは 3.3m および 1.7m で、鋼棒両端には、15cm および 10cm の定着長を設けた。用いたコンクリートは設計基準強度 34.3N/mm²、スランプを 12cm

*1 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 工博 (正会員)

*2 ハルテック(株) 工修 (正会員)

*3 山口大学教授 工学部社会建設 Ph.D (正会員)

に設定し、その配合表を表-1に示す。グラウトはその粘性がPC鋼棒の振動特性に及ぼす影響を調べるために、高粘性および低粘性になるように混和剤量を決め、その配合表を表-2に示す。この際に使用したグラウト粘性の評価法として、コンクリート標準示方書〔規準編〕(JSCE-F531)に準じてJ14漏斗を用い流下時間を測定することで確認した。その結果、高粘性グラウト(H)では、8.0秒、低粘性グラウトでは3.9秒となった。

計測した供試体の一覧を表-3に示す。パラメーターは、先に述べた供試体長さ、グラウト粘性、鋼棒径とシース径およびグラウト充填率である。グラウト充填率では、100%充填した供試体、ならびに端部から充填率が25%、50%、75%、供試体中央部のみ25%空隙を設けた供試体(flaw と表記)を用意した。

未充填部は次のように製作した。前もって未充填区間のみのシース両端を薄い発泡スチロールで蓋をし、鋼棒を通した後、充填区間のシースを継ぎ足し、シースに空洞区間を設けた。また各継ぎ目では、グラウトの遺漏が生じないようにコーティングを施した。

供試体両端の定着プレートには、鋼棒径が15mmおよび29mmに対し、それぞれ90x90mm、150x150mmの鋼板を用いた。

表-3中の供試体名で、3m供試体はA、1.5m供試体はBとし、表中下部の9体は、空隙率を供試体名とした。一方、充填率100%の供試体では、供試体名として、長さ記号の後に鋼棒径、

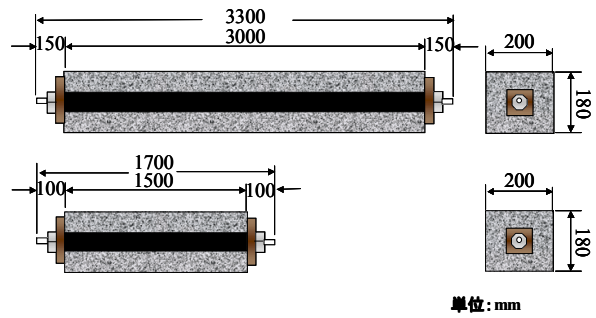


図-1 PC梁供試体概要

表-1 コンクリート配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
46.89	42.3	167	357	681	1020	1.426

混和剤:マイティ-150(使用量=C×0.004)

表-2 PCグラウト配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
	水	セメント	混和剤(%)
45	586	1303	1.0(高粘性)=13.03
			0.5(低粘性)=6.51

シース径およびグラウト粘性を付けた。例えば、供試体名A1530Hは、長さ3m、鋼棒径15mm、シース径30mm、グラウト粘性がHの供試体であることを示す。

2.2 実験方法

表-3の各供試体に対して、グラウト注入後、鋼棒に緊張力を導入し、PC鋼棒の衝撃弾性波を計測した。その計測結果から弾性波の伝播速度およびスペクトル解析を行った。伝播速度の算出法は、打撃部近傍から反対側PC鋼棒端面に設置した加速度計間距離だけ離れた点で伝播波の立ち上がり時刻の位相差(初期位相差)よ

表-3 供試体概要

供試体名	コンクリート長(m)	全長(m)	充填率(%)	鋼棒径(mm)	シース径(mm)	粘性
A1530H	3	3.3	100	15	30	H
A1560H				15	60	
A2960H				29	60	
A1530L				15	30	L
A2960L				29	60	
A25%				25	15	
A50%	50					
A75%	75					
Aflaw	flaw					
B25%	1.5	1.7	15	30	H	
B50%						25
B75%						50
B100%						75
B100%						100
Bflaw						flaw

り伝播速度を求めた³⁾。

本実験における計測システムを図-2に示す。計測に際しては、一般に構造材料の伝播速度は非常に速いことから、サンプリング間隔 Δt を小さくしなければならないことと、ピックアップの応答周波数範囲も広いことが測定の条件³⁾となる。今回の実験では、衝撃弾性波入力点近傍および反対側のPC鋼棒端部の2箇所に小型圧電型加速度計(0.2~22,000Hz, 708LF型, T社製)を設置して弾性波を検出した。

これらの加速度計から検出された弾性波は、アンプで増幅した後、高速データ収集システムに転送され、その後に計算機に送られ各種の波形処理を行った。

サンプリング間隔および個数に関しては、伝播速度、検出弾性波を検討する場合には、 $\Delta t = 0.2 \mu s$ および 25,000 個とした。周波数応答特性、検出弾性波の分析に関しては $\Delta t = 10 \mu s$ および 5,000 個と数値設定を変更した。

打撃位置および方法は、図-3に示すように伝播速度を求める場合は、ナット部をハンマーで打つ方法を取り、振動波形を計測する場合は直径50mm(直径4.5cm, 質量:447g)の鋼球を打撃角度 5° の振り子長さ20cmを用いて、振り子式打撃を鋼棒端部へ与えた。

計測はグラウト注入直後にPC鋼棒への導入緊張力を上げる過程で4回と、注入6時間後、3日目、7日目および28日目に行った。段階的に上げる緊張力は、PC鋼棒径が $\phi 15\text{mm}$ の供試体は0, 300, 445, 800 N/mm^2 , $\phi 29\text{mm}$ 供試体では0, 150, 300 および 445 N/mm^2 とした。

3. 実験結果および考察

3.1 伝播特性

図-4(a), (b)は、供試体A1530HとA2960Hにおいて、グラウトが未充填の時と100%充填直後の時、導入緊張力毎の伝播速度を示したものである。

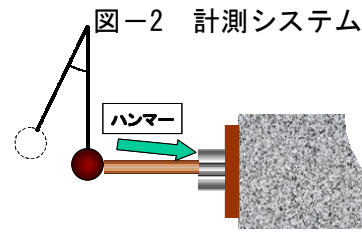
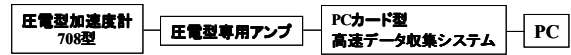
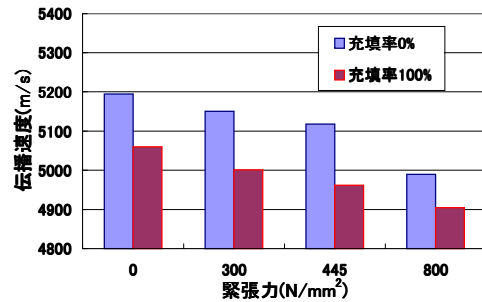
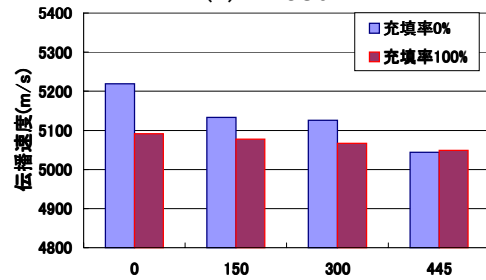


図-3 打撃位置



(a) A1530H



(b) A2960H

図-4 未充填と完全充填の伝播速度の差異

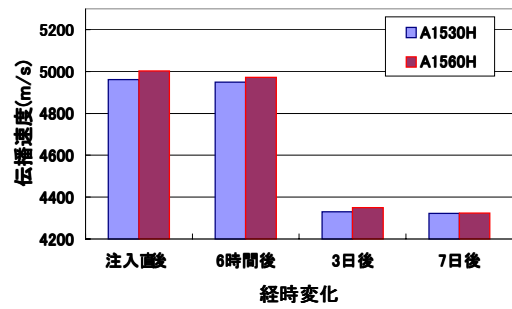
これらの図から、他の研究者の実験報告と同様⁴⁾、グラウトの充填および鋼棒に導入する緊張力が大きくなることにより伝播速度が低下している。供試体A1530Hは供試体A2960Hに比べ、グラウト充填による伝播速度低下の割合が大きい。これは、供試体A1530HとA2960HはいずれもPC鋼棒とシース径の比は同じであるが、鋼棒径がA1530Hのほうが小さく、充填グラウト量による拘束度の影響が大きいと思われる。また、緊張力がなく未充填状態ではPC鋼棒の径が大きいと伝播速度も大きいとの報告があるが、本実験でもその傾向は確認された。しかし、緊張力が大きくなると僅かながら鋼棒径の小さいA1530Hの伝播速度が大きくなった。これは、鋼棒径の大きいほうが、緊張

力による横拘束の影響が強いためと考えられる。

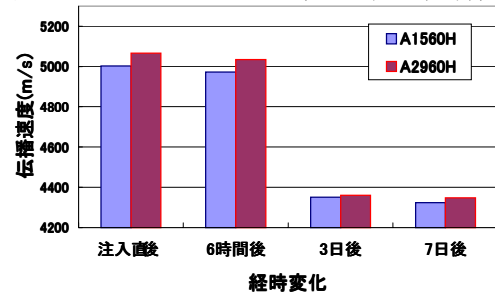
図-5(a), (b)は、供試体 A1530H と A1560H および供試体 A1560H と A2960H の伝播速度をグラウト注入直後から経時的に計測したものである。このときの導入緊張力は 445N/mm^2 である。グラウトは注入後ほぼ 12 時間で硬化するので、伝播速度は 3 日以降では、注入後 6 時間までの伝播速度に比べ著しく低下している。グラウト硬化後では、伝播速度の経時変化はほとんど見られない。フレッシュ状態においては、鋼棒径が同じ場合は、シース径が大きいほうが、またシース径が同じ場合は、鋼棒径が大きいほうが伝播速度は速い。同一鋼棒径に対してシース径が大きいと、グラウト量が多くなり鋼棒に対する拘束度が低下する、また、鋼棒径が大きいとグラウトによる拘束度が低下するためと思われる。

図-6 は、供試体 A1530H および A1530L 両供試体において、使用 PC グラウトの粘性の違いが伝播速度に与える影響を、経時的に測定したものである。実験結果から、グラウト注入直後は、粘性の小さい方に比べ大きい方が拘束度が大きいために、伝播速度は遅いことがわかる。しかしグラウト硬化後は、伝播速度は逆に粘性の低い供試体がわずかながら速い。ちなみにグラウト硬化後のグラウト強度は、材令 7 日で高粘性グラウトが 27.1N/mm^2 と低粘性グラウトが 29.3N/mm^2 である。

図-7(a) は、グラウト未充填部を設けた供試体の未充填側端部を打撃した場合の伝播速度であり、図 7-(b) は同じ供試体の充填側端部を打撃した場合の伝播速度である。全体的に充填率が大きくなるに従って、伝播速度は直線的に低下しているのがわかる。グラウトがフレッシュ状態の場合は、打撃位置が充填側および未充填側であることの差異はほとんど見られない。しかし、グラウト硬化後、充填率が 75% の供試体では、充填側から打撃したほうが伝播速度は低下しており、硬化後の未充填部の評価には打撃端の位置がかかわってくると思われる。



(a) A1530H と A1560H (グラウト割合)



(b) A1560H と A2960H (鋼棒の割合)

図-5 グラウト径と鋼棒径の断面積変化

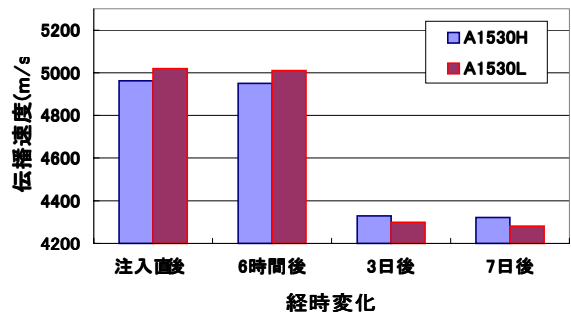
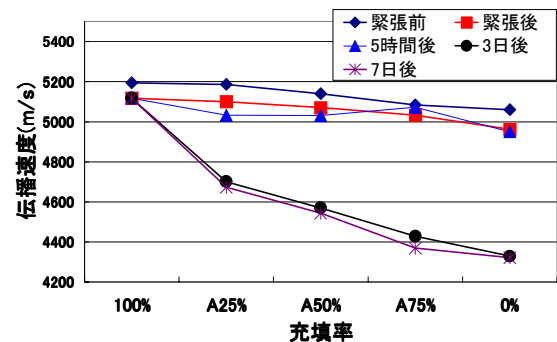
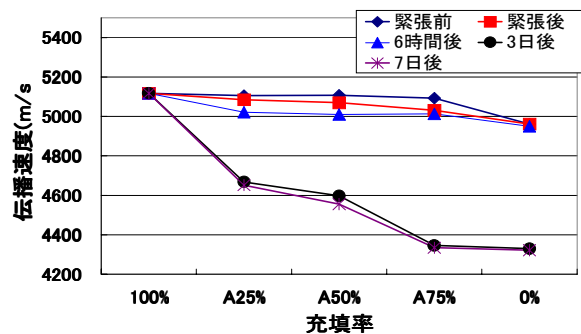


図-6 グラウト粘性の違い



(a) A 供試体未充填側



(b) A 供試体充填側

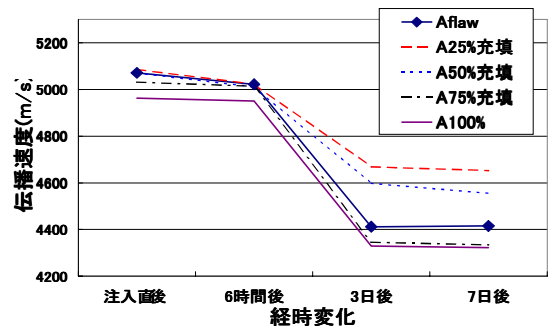
図-7 欠陥供試体の径時変化と伝播速度の関係

図-8(a), (b)は、3mと1.5mの各供試体中央部に25%の空隙を有する供試体の伝播速度を他のグラウト充填率を設定した供試体のそれと比較したものである。なお、打撃位置はグラウト充填側端である。グラウトがフレッシュ状態のとき、長さ1.5mの供試体Bflawの場合、他の供試体に比べ若干伝播速度の差異が見られるが総じて充填率および空隙の位置による伝播速度の差異は顕著でなく、伝播速度のみで空隙状態を把握するのは困難であると思われる。それに対しグラウト硬化後の長さ3mの供試体では、供試体中央に空隙を設けたAflaw供試体が他の充填率および充填位置を設定した供試体と伝播速度が異なり、空隙性状の評価に利用できるとと思われる。

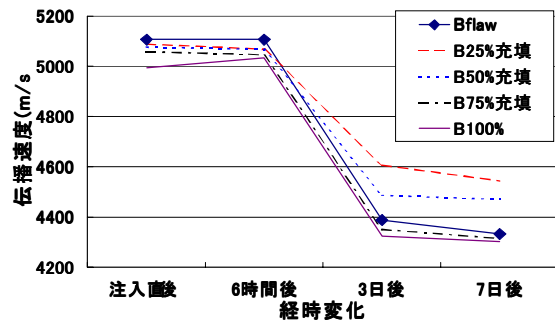
3.2 周波数特性

図-9(a), (b)に供試体A1530Hのグラウト注入直後と、注入後7日の鋼球打撃による周波数分布を示す。グラウト注入直後には低周波数域(4kHz以下)において、703Hzと805Hzの間隔で卓越周波数が存在する。PC鋼棒と硬化コンクリート単体の弾性波伝播速度は一般に5000m/sおよび4400m/sであるといわれているので、供試体長さから逆算すると、703Hzがコンクリートの、805HzがPC鋼棒の卓越周波数であることがわかる。このコンクリートの周波数を拾うのは、鋼球のPC鋼棒への打撃がアンカープレートを介してコンクリートに伝達されるためと思われる。次に、注入後7日になると、コンクリートの卓越周波数は注入直後と同様の性状を示すが、PC鋼棒の周波数には減衰が見られる。これはグラウト硬化によりPC鋼棒の振動が拘束されるためと思われる。また、グラウトが硬化すると高周波数域の振動が増加することが観察される。

図-10(a), (b)に、支間中央にグラウト空隙を設けた供試体Aflawの、グラウト注入直後と7日後の打撃周波数分布を示す。注入直後、この供試体もコンクリートの卓越振動数を示すのは、100%グラウト充填した供試体A1530Hと同様

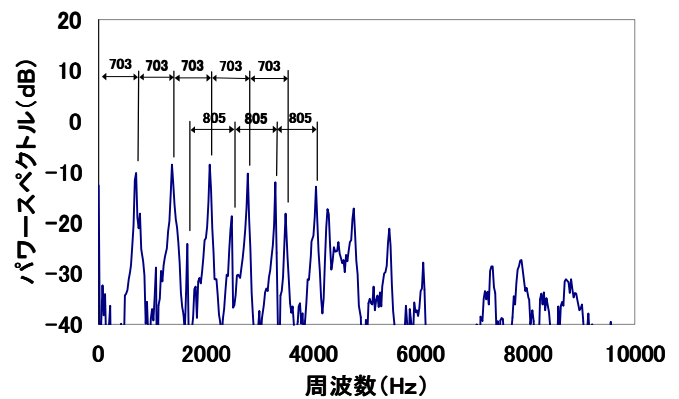


(a) Aflaw

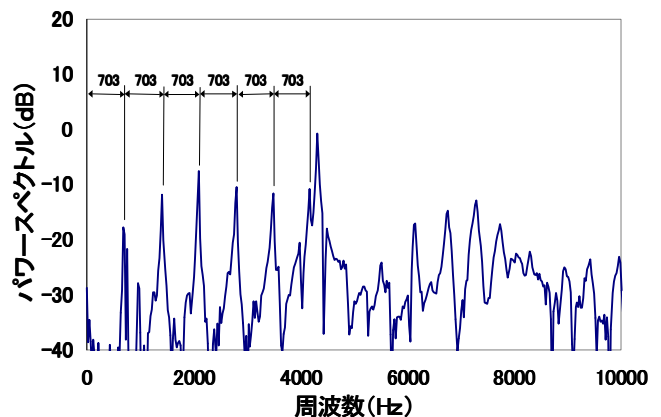


(b) Bflaw

図-8 供試体中央部が未充填



(a) 注入直後



(b) 注入後7日目

図-9 A1530Hの周波数特性

であるが、PC 鋼棒の 1 次の卓越振動数を示さず 2 次の振動モードから発生している。グラウトが硬化すると、低振動数領域では、空隙の影響は、ほとんど確認できない。しかし、この供試体では 8~9 kHz の振動数が多くなることから、グラウト空隙部での反射波を計測していると考えられる。

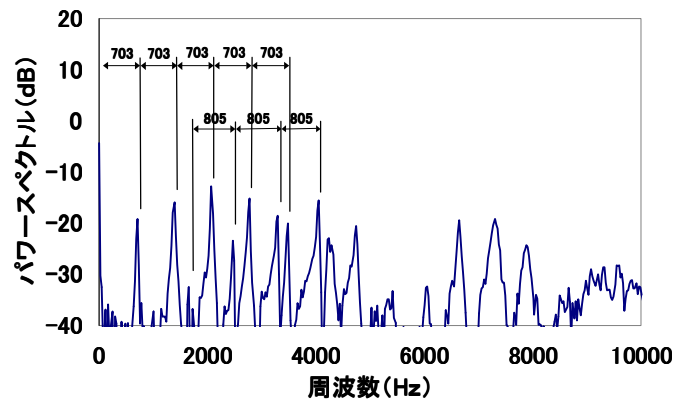
4. 結論

本研究は、PC はり構造物を想定し、衝撃弾性波法を用いて、はりの構造諸元、グラウトの充填状況およびグラウト注入後の経過時間が PC 鋼棒の振動特性に与える影響を検討したものである。得られた結果をまとめると次のようになる。

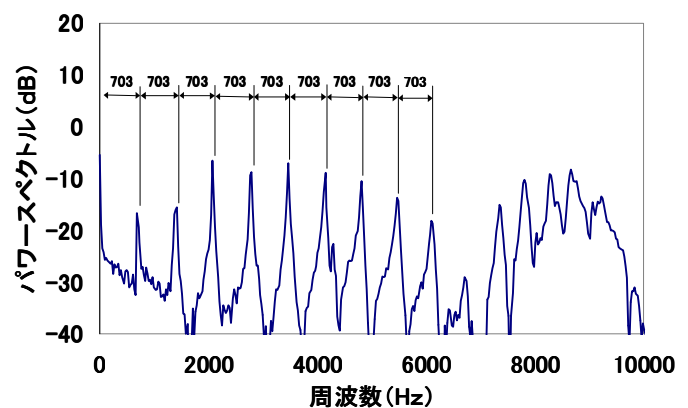
- 1) グラウトがフレッシュ状態の場合、鋼棒径とシース径の比が同じ場合は鋼棒径の小さいほうが、鋼棒径が同じ場合はシース径が小さいほうがグラウトの拘束の影響を受けやすいため、伝播速度は遅くなる。
- 2) フレッシュ状態のグラウト粘性が小さいと鋼棒に対する拘束力が小さいため、伝播速度は大きくなる。
- 3) グラウトがフレッシュ状態のときは、充填率の伝播速度に与える影響は明確でなく、伝播速度のみで充填状況を把握するのは困難と思われるが、硬化後は伝播速度に差異が生じる。
- 4) 中央に空隙のある供試体の打撃周波数では、100% 充填した供試体の打撃周波数にみられる PC 鋼棒の 1 次の卓越振動数は明確でなく、2 次から明らかになる。

参考文献

- 1) 藤井学, 宮川豊章: PC グラウト充填状況の非破壊検査法, 土木学会論文集, No. 402 / V-10, pp. 15-26, 1989. 2
- 2) 望月秀次, 本間淳史, 上東泰: 非破壊検査を用いた PC グラウトの点検と補修, プレストレストコンクリート, Vol. 37, No. 6, pp. 67-74, 1995. 11



(a) 注入直後



(b) 注入後 7 日目

図-10 Aflaw の周波数特性

- 3) 山田和夫・黒野幸弘・中井祐司: PC 鋼棒中を伝播する弾性波の伝播特性に及ぼす緊張力の影響に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No. 48, pp. 534-539, 1995
- 4) 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基礎的研究, コンクリート工学, Vol. 21, No. 2, pp. 1267-1272, 1999. 2
- 5) 富田芳男, 岩波光保, 大即信明: 衝撃弾性波を用いた PC フレッシュグラウトの充填性評価に関する研究土木学会論文集, No. 648 / V-47, pp. 127-135, 2000. 5
- 6) 藤本良雄, 荒巻真二, 鳥野清, 岳尾弘洋: 打撃法による伝播速度, 部材長の算出法とコンクリートの浮き部分の図化法に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 16A, pp. 1195-1201, 2000. 3